



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Caline Milú Martins Nunes

**AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE JUNTAS  
SOLDADAS COM O AUMENTO DA  
TEMPERATURA**

**Dissertação de Mestrado em Construção Metálica e Mista, orientada pela  
Professora Doutora Aldina Maria da Cruz Santiago e pelo Professor Doutor  
Hélder David da Silva Craveiro e apresentada ao Departamento de  
Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de  
Coimbra.**

Dezembro de 2021



Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra  
Departamento de Engenharia Civil

Caline Milú Martins Nunes

# **AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE JUNTAS SOLDADAS COM O AUMENTO DA TEMPERATURA**

## **EVALUATION OF THE DEGRADATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF WELDS WITH THE INCREASE OF TEMPERATURE**

Dissertação de Mestrado em Construção Metálica e Mista, orientada pela Professora Doutora Aldina Maria da Cruz Santiago e pelo Professor Doutor Hélder David da Silva  
Craveiro

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Dezembro de 2021



**UNIVERSIDADE D  
COIMBRA**



## DEDICATÓRIA

*Aos pilares da minha vida...*

*Aos meus pais, Carlos Celestino Nunes e Rosalina Gaspar Martins Nunes;*

*Por me terem preparado para os desafios da vida;*

*Por me proporcionarem o acesso à educação;*

*Por todo apoio incondicional;*

*Por estarem sempre presentes fisicamente ou online;*

*Por celebrarem as minhas conquistas e acolherem-me nas derrotas, sempre ao meu lado não importando onde esteja;*

*Por tornarem este sonho possível;*

*Porque tudo que sou é fruto de todo amor, empenho, dedicação e confiança depositada em mim.*

*Luzes da minha vida.*

*Às minhas irmãs, Carla e Carina, porque as adoro!*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar a minha profunda e sincera gratidão ao Ministério dos Recursos Minerais, Petróleo e Gás de Angola pelo apoio financeiro no âmbito da atribuição da bolsa de estudos.

Gratidão ao meu orientador, Professor Hélder David da Silva Craveiro, por toda a dedicação, paciência, ensinamentos, conselhos, apoio e atenção que me dedicou. Mesmo frente a algumas adversidades foi bastante presente.

Agradeço imenso à orientadora Professora Aldina Maria da Cruz Santiago, por todo o apoio, orientação e incentivo ao longo destes meses.

Gostaria também de expressar o meu agradecimento à Universidade de Coimbra, em especial ao Departamento de Engenharia Civil, e a todos os colaboradores que sempre apoiaram esta investigação. Agradecimentos especiais ao Ilídio Santos, Cláudio Martins, Scree Sabari e os colegas do Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil.

Obrigado a todos por me ajudar nesta jornada maravilhosa e desafiadora.

Agradecimento à Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo apoio no âmbito do projeto de investigação PCIF/AGT/0062/2018, INTERFACESEGURA – Segurança e resiliência ao fogo das zonas de interface urbana-florestal, financiado por fundos nacionais através da FCT.



## RESUMO

Foi realizado um programa de pesquisa experimental na Universidade de Coimbra, a fim de avaliar a degradação das propriedades mecânicas de juntas soldadas de topo fabricadas com o aço S355 J2.

O estudo do comportamento do aço é maioritariamente desenvolvido através de ensaios de tração axial, existindo dois tipos de métodos de ensaios a altas temperaturas: ensaios em regime transiente e ensaios em regime estacionário.

Neste trabalho, a avaliação assentou na realização de ensaios mecânicos de caracterização a elevadas temperaturas em regime transiente e caracterização microestrutural.

A caracterização microestrutural e medidas de dureza foram realizadas para explicar o comportamento de tração dos provetes após a exposição a altas temperaturas, recorrendo a técnicas de microscopia ótica para realizar observações metalográficas.

Os resultados foram comparados. Esta comparação foi realizada por meio de análises de resultados de diagramas de tensão e extensão de ensaios realizados em provetes, confrontando os parâmetros de resistência do aço, no que se refere ao comportamento do material em questão. A partir dos resultados deste estudo, foi possível compreender o comportamento dos provetes metálicos, quando expostos a situações de aquecimento.

Com base nas curvas de tensão-extensão em uma temperatura específica, determinou-se os parâmetros mecânicos e fatores de redução e foram comparados com os resultados obtidos com diversos autores e com as normas EN 1993 1-2, Australian Standard AS 4100 (1998) (Código Australiano) e British Standard BS 5950-8 (Código Britânico).

**Palavras-Chave:** aço estrutural, aço S355 J2, juntas soldadas, propriedades mecânicas, fatores de redução, análise microestrutural.

## ABSTRACT

An experimental research program was carried out at the University of Coimbra, in order to evaluate the degradation of the mechanical properties of butt welded joints manufactured with S355 J2 steel.

The study of steel behavior is mainly developed through axial tensile tests, with two types of test methods at high temperatures: transient tests and steady state tests.

In this work, the evaluation was based on the realization of mechanical tests for characterization at high temperatures in transient regime and microstructural characterization.

Microstructural characterization and hardness measurements were performed to explain the tensile behavior of specimens after exposure to high temperatures, using optical microscopy techniques to perform metallographic observations.

The results were compared. This comparison was performed by analyzing the results of stress and extension diagrams of tests performed on specimens, comparing the steel strength parameters, with regard to the behavior of the material in question. From the results of this study, it was possible to understand the behavior of metallic specimens when exposed to heating situations.

Based on the stress-strain curves at a specific temperature, the mechanical parameters and reduction factors were determined and compared with the results obtained with several authors and with the standards EN 1993 1-2, Australian Standard AS 4100 (1998) (Australian Code) and British Standard BS 5950-8 (British Code).

**Keywords:** structural steel, S355 J2 steel, welded joints, mechanical properties, reduction factors, microstructural analysis.



## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	v
RESUMO .....	vi
ABSTRACT .....	vii
ÍNDICE .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
ÍNDICE DE TABELAS .....	xiii
SIMBOLOGIA .....	xiv
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>15</b>
1.1 INTRODUÇÃO .....	15
1.2. OBJETIVOS .....	17
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	17
<b>CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>18</b>
2.1 AÇOS ESTRUTURAIS .....	18
2.1.1 Classificação dos aços carbono .....	19
2.2 PROPRIEDADES DO AÇO .....	20
2.2.1 Propriedades Térmicas .....	20
2.2.2 Propriedades Mecânicas a Temperaturas Elevadas .....	23
2.3 ESTUDOS PRECEDENTES SOBRE A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO .....	29
2.4 SOLDADURAS .....	47
2.4.1 Caracterização Mecânica a Temperaturas Elevadas .....	47
2.4.2 Caracterização Mecânica Após Fogo .....	48
2.5 COMPORTAMENTO MECÂNICO À TEMPERATURA AMBIENTE .....	53
2.5.1 Metal Base S355J2 .....	53
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>55</b>
3.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL .....	55
3.1.1 Protocolo Experimental .....	56
3.1.2 Provetes de ensaio .....	59
3.2 RESULTADOS E COMPARAÇÕES .....	62
3.2.1 Modos de rutura .....	62

3.2.2	Curvas temperatura-extensão .....	63
3.2.3	Curvas tensão-extensão .....	64
3.2.4	Fatores de Redução da Tensão de Cedência ( $K_{y,\theta}$ ).....	65
3.2.5	Comparação dos resultados obtidos com as diversas normas .....	67
3.2.6	Comparação dos resultados obtidos com bibliografia existente.....	69
3.3	ANÁLISE METALOGRAFICA .....	71
3.3.1	Ensaio de Dureza Vickers.....	71
3.3.2	Descrição do ensaio .....	73
3.3.3	Metodologia para Ensaio Microscopia Óptica .....	76
3.3.4	Caraterização Microestrutural .....	78
3.3.5	Resultados de Microdureza Vickers .....	79
	<b>CONCLUSÃO E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>82</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>84</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1- Classificação dos aços carbono de acordo com a EN 1993-1-10 (STANDARDIZATION, 2005).....	19
Figura 2. 2 – Extensão térmica relativa do aço carbono em função da temperatura (Fonte: Eurocódigo3).....	21
Figura 2. 3 – Calor específico em função da temperatura. (Fonte: Eurocódigo3).....	22
Figura 2. 4 – Condutividade térmica em função da temperatura. (Fonte: Eurocódigo3) .....	22
Figura 2. 5 - Factores de redução para a relação tensão-extensão do aço carbono a temperaturas elevadas (EN 1993-1-2, 2010) .....	23
Figura 2. 6 - Relação tensão-extensão para o aço carbono a temperaturas elevadas. (Adaptado de EN 1993-1-2, 2010) .....	26
Figura 2. 7 - Variação das propriedades mecânicas do aço com a temperatura (AS 4100-1998) 27	
Figura 2. 8 – Curva tensão-extensão e temperatura-extensão em regime transiente .....	29
Figura 2. 9 - Comparação dos valores obtidos com os valores propostos pelo EN 1993-1-2, para o aço S355 (Outinen et al., 2000) .....	31
Figura 2. 10 - Comparação dos factores de redução obtidos pelo regime transiente com os valores propostos pelo EN 1993-1-2, para o aço S460 (Outinen et al., 2000) .....	32
Figura 2. 11 - Ensaios de tração do aço estrutural S350GD+Z antes e após ação térmica (Outinen e Mäkeläinen, 2002).....	32
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).....	34
Figura 2. 13 - Relação tensão-extensão do aço (Chen et al., 2006).....	35
Figura 2. 14 - Relação tensão-extensão do aço para diversas temperaturas (Chen et al., 2006) .	35
Figura 2. 15 - Comparação dos factores de redução experimentais com diversos regulamentos, para a tensão de cedência (Chen et al., 2006).....	36
Figura 2. 16 - Comparação dos factores de redução experimentais com diversos regulamentos, para a tensão de cedência (Chen et al., 2006).....	37
Figura 2. 17 - a) Factores de redução da tensão de cedência do aço G550 e G250 em função da temperatura; b) Factores redução do módulo de elasticidade do aço G550 e G250 em função da temperatura (Ranawaka e Mahendran, 2009) .....	39
Figura 2. 18 - Factores de redução para os aços estudados (Kelly and Sha, 1999) .....	40
Figura 2. 19 - Factores de redução para a tensão de cedência, através do regime transiente (Schneider and Lange, 2009) .....	41
Figura 2. 20 - Comparação da relação tensão-extensão obtida pelos testes com a presente no Eurocódigo (Schneider and Lange, 2009) .....	41
Figura 2. 21 - Comparação do módulo de elasticidade (Qiang et al., 2011) .....	42
Figura 2. 22 - Factores de redução para o módulo de elasticidade dos aços S460 e S690 (Qiang et al., 2012b) .....	43
Figura 2. 23 - Factores de redução para a tensão de cedência de acordo com a extensão (Qiang et al., 2012b) .....	45

Figura 2. 24 - Factores de redução para a tensão de cedência de acordo com a extensão (Qiang et al., 2012b) .....	45
Figura 2. 25 - Factores de redução da tensão última para os aços S460 e S690 (Qiang et al., 2012b) .....	46
Figura 2. 26 - Resultados para as soldaduras MAG em ensaio em regime estacionário. a) Curvas tensão-deformação; b) Fatores de redução experimentais versus Eurocódigo 3 (adaptado de (Jacob, 2018))......	47
Figura 2. 27 - Evolução do perfil de dureza superior da soldadura com o aumento da temperatura para a soldadura MAG (adaptado de (Jacob, 2018)). .....	48
Figura 2. 28 - Seções transversais das juntas GMAW (a) e FCAW (b) e distribuições de dureza nas diferentes regiões das soldaduras. (Fonte: D.M. Rodrigues et al. (2021))......	50
Figura 2. 29- Análise micrográfica da região da articulação GMAW sinalizada na Figura 3.24. (Fonte: D.M. Rodrigues et al. (2021)) .....	50
Figura 2. 30- Microestrutura na condição de recepção e após a exposição ao calor do BM (a, d, g, j), FZ da junta FCAW (b, e, h, k) e CGHAZ da junta GMAW (c , f, i, l). (Fonte: D.M. Rodrigues et al. (2021))......	51
Figura 2. 31- Microestrutura do BM, após rápido aquecimento (a) e curta (b) e muito longa exposição (c) a 900 °C. (d) Curvas tensão-deformação para as amostras em a), b) e c). (Fonte: D.M. Rodrigues et al. (2021)).....	52
Figura 2. 32- Curvas tensão-deformação de ambos os materiais base sem tratamento térmico. (Fonte: Fernandes, Pedro “Comportamento Mecânico de Soldaduras em Aço em Tração a Temperaturas Elevadas”, fevereiro 2020)......	53
Figura 2. 33- Curvas tensão-deformação para as soldaduras com MAG em aço S355 J2 e com elétrodo revestido (ER) em aço S460 sem tratamento térmico. (Fonte: Fernandes, Pedro “Comportamento Mecânico de Soldaduras em Aço em Tração a Temperaturas Elevadas”, fevereiro 2020)......	54
Figura 3. 1 - Sistema experimental utilizado (Fonte: Autor) .....	57
Figura 3. 2 – 1) SERVOSIS modelo MUE404/100; 2) Data Logger, modelo TDS-530; 3) EUROTHERM temperature controller; 4) Forno tubular elétrico; 5) Extensómetro de elevadas temperaturas Epsilon HI3548; 6) sistema de refrigeração Epsilon Caron 2050 model; 7) Monitores SERVOSIS (Fonte: Autor) .....	57
Figura 3. 3 – Forno elétrico: a) Fechado; b) Aberto. (Fonte: Autor) .....	58
Figura 3. 4 – a) Geometria e dimensões dos provetes de ensaio, b) Geometria de seção transversal como soldada; c) Geometria de seção transversal constante. (Fonte: D.M. Rodrigues et al.,2021) .....	59
Figura 3. 5 - a) Garras de aço refratário usadas no desenvolvimento dos ensaios de tração; b) Massa refratária; c) Ilustração de alguns provetes utilizados nos ensaios. (Fonte: Autor) .....	60
Figura 3. 6 – Pontos medidos ao longo do comprimento do provete. (Fonte: Autor) .....	60
Figura 3. 7 - Ilustração dos provetes, correspondente a cada temperatura, após término dos ensaios (Modos de rotura dos ensaios em regime transiente - S355). (Fonte: Autor).....	62
Figura 3. 8 - Gráfico Temperatura-Extensão fornecido por cada ensaio em regime transiente – S355 J2. (Fonte: Autor).....	64

Figura 3. 9 - Curvas tensão-extensão obtidas nos ensaios em regime transiente - S355. (Fonte: Autor).....	65
Figura 3. 10 – Determinação da tensão de cedência.....	66
Figura 3. 11 – Fatores de redução $K_{y,\theta}$ obtidos. (Fonte: Autor).....	67
Figura 3. 12 – Comparação dos valores médios dos fatores de redução obtidos com a norma EN 1993-1-2.....	67
Figura 3. 13 – Comparação dos fatores de redução obtidos com a norma BS 5950-8.....	68
Figura 3. 14 – Comparação entre os valores médios dos fatores de redução obtidos com a norma BS 5950-8.....	68
Figura 3. 15 – Comparação entre os valores médios dos fatores de redução obtidos com a norma americana AS 4100.....	69
Figura 3. 16 - Fatores de redução obtidos comparados com a bibliografia existente.....	70
Figura 3. 17 – Impressão do edentador Vickers.....	71
Figura 3. 18 – Amostras cortadas dos provetes de ensaio 1, 7 e 14. (Fonte: Autor).....	73
Figura 3. 19 – a) Amostras no molde; b) Resinas utilizadas (Castable (Cold) Mounting Compound Liquid Hardner + Castable (Cold) Mounting Compound Powder); c) Amostras embutidas na resina. (Fonte: Autor).....	74
Figura 3. 20 - papéis abrasivos Buehler CarbiMet™ de diferentes tamanhos. (Fonte: Autor) ..	75
Figura 3. 21 – Pastas de diamante e lubrificante utilizado para o polimento. (Fonte: Autor) .....	75
Figura 3. 22 – Aspeto final: uma superfície completamente lisa. (Fonte: Autor) .....	75
Figura 3. 23 – Reagente Nital para ataque químico.....	76
Figura 3. 24 – Microscópio óptico LEICA DM4000 M LED. (Fonte: Autor).....	77
Figura 3. 25 - Microestrutura aço S355J2 em corte Longitudinal.....	78
Figura 3. 26 – Gráfico da microdureza do provete 1.....	79
Figura 3. 27 – Gráfico da microdureza do provete 7.....	80
Figura 3. 28 – Gráfico da microdureza do provete 14.....	80
Figura 3. 29 - Microdureza Vickers.....	81

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2. 1 – Resumo das características de cada subclasse de aço. ....	18
Tabela 2. 2 - Factores de redução para a relação tensão-extensão do aço carbono a temperaturas elevadas (EN 1993-1-2, 2010) .....	24
Tabela 2. 3 - Equações propostas para determinar a relação tensão-extensão do aço (EN 1993-1-2, 2010) .....	24
Tabela 2. 4 - Equações propostas para determinar a relação tensão-extensão do aço tendo em conta o endurecimento (EN 1993-1-2, 2010) .....	25
Tabela 2. 5 - Factores de redução da resistência para parafusos e soldaduras (EN 1993-1-2, 2010) .....	25
Tabela 2. 6 - Factores de redução para a resistência de aços S275 e S355 (BS 5950-8, 2003)....	27
Tabela 2. 7 - Características dos aços estudados (Outinen and Mäkeläinen, 2002) .....	33
Tabela 2. 8 - Factores de redução para as propriedades mecânicas do aço estrutural S350GD+Z de 20 °C a 1000 °C (Outinen and Mäkeläinen, 2002) .....	33
Tabela 2. 9 - Propriedades mecânicas do aço estrutural S355J2H de 20 °C a 1000 °C (Outinen and Mäkeläinen, 2002) .....	34
Tabela 2. 10 - Características dos materiais estudados (Chen et al., 2006) .....	35
Tabela 2. 11 - Factores de redução para o módulo de elasticidade e tensão de cedência para o aço XLERPLATE Grade 350 (Chen et al., 2006) .....	35
Tabela 2. 12 - Factores de redução para o módulo de elasticidade e tensão de cedência para o aço BISPLATE 80 (Chen et al., 2006) .....	36
Tabela 2. 13 - Factores de redução para o módulo de elasticidade obtidos pelo regime transiente (Chen et al., 2006) .....	37
Tabela 2. 14 – Resultados obtidos para a tensão última do regime transiente e “teste estacionário” (Chen et al., 2006) .....	37
Tabela 2. 15 - Factores de redução para o módulo de elasticidade para o regime estacionário e regime transiente, respectivamente (Qiang et al., 2011) .....	42
Tabela 2. 16 - Redução do módulo de elasticidade dos aços S460 e S690 (Qiang et al., 2012b) .....	43
Tabela 2. 17 - Tensão de cedência efectiva para os aços S460 e S690 (Qiang et al., 2012b) .....	44
Tabela 2. 18 - Factores de redução para a tensão de cedência efectiva para os aços S460 e S690 (Qiang et al., 2012b) .....	44
Tabela 2. 19 - Redução da tensão última para os aços S460 e S690 (Qiang et al., 2012b) .....	46
Tabela 2. 20 – Propriedades mecânicas do material base à temperatura ambiente .....	53
Tabela 3. 1 – Composição química do aço S355. (Fonte: EN 10025-2) .....	55
Tabela 3. 2 – Características mecânicas a temperatura ambiente. (Fonte: EN 10025-2) .....	55
Tabela 3. 3 - Dimensões dos provetes ensaiados (espessura e largura), medidas com o micrômetro, e valores de tensões .....	61
Tabela 3. 4 – Tempo decorrido para ruptura dos provetes ensaiados .....	63
Tabela 3. 5- Factores de redução S355 - Regime Transiente .....	66
Tabela 3. 6 - Resultados de microdureza .....	79

## SIMBOLOGIA

$\theta$	temperatura
$\theta_a$	temperatura do aço
E	módulo de elasticidade
$E_{,\theta}$	módulo de elasticidade a temperaturas elevadas
$f_y$	tensão de cedência a 20°C
$f_{y,\theta}$	tensão de cedência do aço a temperaturas elevadas
$f_u$	tensão última
$f_{u,\theta}$	tensão de última a temperaturas elevadas
$f_p$	tensão limite convencional de proporcionalidade
$f_{p,\theta}$	tensão limite convencional de proporcionalidade a temperaturas elevadas
$\varepsilon_y$	extensão de cedência a 20°C
$\varepsilon_{y,\theta}$	extensão de cedência efetiva do aço a temperaturas elevadas
$\varepsilon_u$	extensão última
$\varepsilon_{u,\theta}$	extensão de última a temperaturas elevadas
$\varepsilon_p$	extensão limite convencional de proporcionalidade
$\varepsilon_{p,\theta}$	extensão limite convencional de proporcionalidade a temperaturas elevadas
$k_{E,\theta}$	fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico à temperatura do aço $\theta_a$
$k_{y,\theta}$	fator de redução para a tensão de cedência do aço à temperatura $\theta_a$ .
$k_{p,\theta}$	fator de redução para a tensão limite de proporcionalidade do aço à temperatura $\theta_a$ .
$k_{u,\theta}$	fator de redução para a tensão última do aço à temperatura $\theta_a$
$\Delta l/l$	extensão térmica
$\lambda_a$	condutividade térmica
$c_a$	calor específico
T	Temperatura
$\sigma$	Valor da tensão

## CAPÍTULO 1

### 1.1 INTRODUÇÃO

O aço é um material utilizado desde longa data na construção e apresenta várias vantagens em relação a outros materiais. Em relação ao betão armado, que representa grande parte das estruturas existentes, o aço apresenta vantagens tais como melhor relação resistência/peso, melhor resistência ao sismo devido à sua maior ductilidade e menor peso, uma construção mais rápida e mais precisa, ser um material quase cem por cento reciclável, ter fundações mais económicas devido ao seu menor peso e permitir vencer maiores vãos.

Porém, a utilização do aço não traz só vantagens. O aço quando sujeito a temperaturas elevadas apresenta um desempenho pouco satisfatório: apresenta uma elevada condutibilidade térmica e conseqüentemente a temperatura propaga-se muito depressa; possui secções transversais muito esbeltas e as suas propriedades mecânicas degradam-se rapidamente com o aumento da temperatura.

Quando submetidos a elevadas temperaturas, os materiais constituintes dos elementos estruturais vêm as suas propriedades mecânicas reduzidas, facto que poderá conduzir a um colapso prematuro de um dado elemento, ou mesmo de toda a estrutura, podendo desta forma não garantir a total evacuação do edifício. Tal efeito é particularmente gravoso para estruturas de aço, atendendo a grande degradação das propriedades mecânicas deste material quando submetido a altas temperaturas.

As estruturas metálicas são especialmente sensíveis às altas temperaturas em caso de incêndio. Depois de 500°C contorcem-se perdendo a sua capacidade portante, e acabam por colapsar. Por conseguinte, é necessário protegê-los para que não atinjam a sua temperatura crítica.

Os perfis metálicos não se comportam todos de forma igual num incêndio, para quantificar este comportamento melhor ou pior, foi introduzido um termo a que chamamos massividade que representa a relação entre a superfície exposta ao fogo e o volume total do perfil metálico. Para os perfis com secção regular (que são os habituais), esta fórmula pode ser substituída pela relação entre o comprimento do perímetro do perfil dividido pela área da secção transversal deste, expressa em metros. Com este valor, juntamente com a necessidade do tempo de resistência ao fogo que seja exigido de acordo com as normas e a temperatura crítica do aço que seja estimada, podemos logo calcular a espessura do material necessário de protecção contra o fogo escolhido.

A Segurança Contra Incêndio em Edifícios é uma das componentes da segurança do edifício. Diz respeito às medidas de segurança que previnem o início e propagação do fogo, ou que limitam as suas conseqüências. No caso de risco de incêndio, o principal factor a salvaguardar é a vida humana, muitas vezes posta em perigo pelo facto dos edifícios não possuírem as medidas



de segurança contra incêndio adequadas, apesar da obrigatoriedade da sua implementação, desde a fase de projecto.

O interesse em estudar a resistência das estruturas metálicas face à ocorrência de incêndio tem crescido nos últimos tempos. Diversos estudos têm sido feitos a fim de avaliar o comportamento do aço a temperaturas elevadas, e como as suas propriedades mecânicas se degradam com o aumento da temperatura. Estes estudos sustentam a necessidade de definir novos fatores de redução das propriedades mecânicas de determinados aços, especialmente para classes de resistência diferentes.

No entanto, a análise da estabilidade e da resistência das estruturas durante e após a exposição ao fogo é crítica não apenas nos elementos estruturais, mas também nas ligações, isto é, nas soldaduras. A soldadura é um dos processos com maior aplicação na ligação de materiais metálicos.

Apesar disso a informação disponível sobre a resistência mecânica a temperaturas elevadas de ligações soldadas é reduzida, tendo como principal foco as propriedades mecânicas à temperatura ambiente.

Assim, é no contexto desta escassez de informação sobre a caracterização da resistência mecânica de juntas soldadas que se insere a presente dissertação, realizada com o intuito de avaliar a degradação das propriedades mecânicas de juntas soldadas fabricadas em aço S355 J2, em condições de incêndio, utilizando método de ensaio de tração em estado transiente.

## 1.2. OBJETIVOS

Os objetivos desta dissertação são:

- Realizar ensaios de tração em regime transiente de juntas soldadas fabricadas com o aço S355 J2 a elevadas temperaturas;
- Determinar as curvas tensão-deformação e fatores de redução;
- Avaliar a degradação das propriedades mecânicas com o aumento da temperatura;
- Efetuar a caracterização microestrutural recorrendo a técnicas de microscopia ótica;
- Comparar os resultados obtidos experimentalmente com os resultados de outros autores e as normas EN 1993-1-2, Australian Standard AS 4100 (1998) (Código Australiano) e British Standard BS 5950-8 (Código Britânico).

## 1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho divide-se em 4 capítulos, fazendo-se uma pequena exposição nesta secção do conteúdo tratado em cada um.

Capítulo 1 – De carácter introdutório, menciona os motivos que levaram à concretização desta tese de dissertação, elucidando os principais objetivos da mesma e a sua forma de organização.

Capítulo 2 – Estado da arte, apresenta as características dos aços estruturais, bem como a caracterização das suas propriedades térmicas e mecânicas de acordo com as normas e ainda a revisão bibliográfica relativamente ao tema proposto apresentando um resumo dos principais trabalhos desenvolvidos e os procedimentos experimentais que serviram de base a este estudo.

Capítulo 3 – Programa experimental, descreve-se a campanha experimental levado a cabo e apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos.

Capítulo 4 – Conclusão e Desenvolvimentos Futuros, apresentam-se as conclusões deste estudo e propõem-se desenvolvimentos futuros.

## CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE

### 2.1 AÇOS ESTRUTURAIS

Para serem categorizados como aços estruturais, os aços devem obedecer a normas europeias específicas, nomeadamente o Eurocódigo 3 (EC 3). Esta norma institui princípios e regras básicas para o projeto e edificação de estruturas em aço com componentes com espessura superior a 3 mm. De acordo com a norma, os aços podem ser classificados em três subclasses:

- Aços de baixo teor em carbono ou aços macios (MS) → (Mild Steel)
- Aços de alta resistência (HSS) → (High Strength Steel)
- Aços de resistência ultra-elevada (VHSS) → (Very High Strength Steel)

Na Tabela 2.1 comparam-se algumas características dos três tipos de aços descritos.

Tabela 2. 1 – Resumo das características de cada subclasse de aço.

	<b>Aços Macios (MS)</b>	<b>Aços Alta Resistência (HSS)</b>	<b>Aços de Elevada Resistência (VHSS)</b>
<b>Tensão Limite Elasticidade</b>	< 420 MPa	= ou > 420 MPa	> 690 MPa
<b>Teor de Carbono</b>	0,04% a 0,30%	0,31% a 0,60%	0,61% e 1,50%
<b>Teor de Manganês</b>	Não aplicável	0,060% a 1,65%	Não aplicável
<b>Maquinabilidade</b>	Muito Boa	Reduzida	Baixa/Extremamente Difícil
<b>Soldabilidade</b>	Muito Boa	Média (+Cara)	Baixa/Extremamente Difícil
<b>Enformabilidade</b>	Muito Boa	Média (+ Cara)	Baixa/Extremamente Difícil
<b>Relação Resistência/Peso</b>	Média	Boa	Muito Boa
<b>Relação Qualidade/Preço</b>	Média	Boa	Mais Baixa

### 2.1.1 Classificação dos aços carbono

Os aços carbono são classificados em função da sua tensão de cedência, tenacidade e espessura. Assim, essa classificação é realizada atribuindo-lhe uma designação constituída por três grupos alfanuméricos como se apresenta no exemplo abaixo:

#### S355 J0 Z15

O primeiro grupo alfanumérico, S355, indica a tensão de cedência do aço que, neste exemplo vale 355MPa. A designação “S” vem do inglês “Steel”, ou seja, “Aço” em português. O segundo grupo, J0, refere-se à tenacidade do aço, ou seja, a capacidade do aço resistir a fendas quando sujeito à tração. Essa capacidade é testada segundo o método de Charpy descrito na EN10045. O terceiro grupo, Z15, é uma especificação especial que tem em consideração a espessura do grão presente no aço.

A Figura 2.1 apresenta as várias formas de classificação, de acordo com o Eurocódigo 3 parte 1-10.

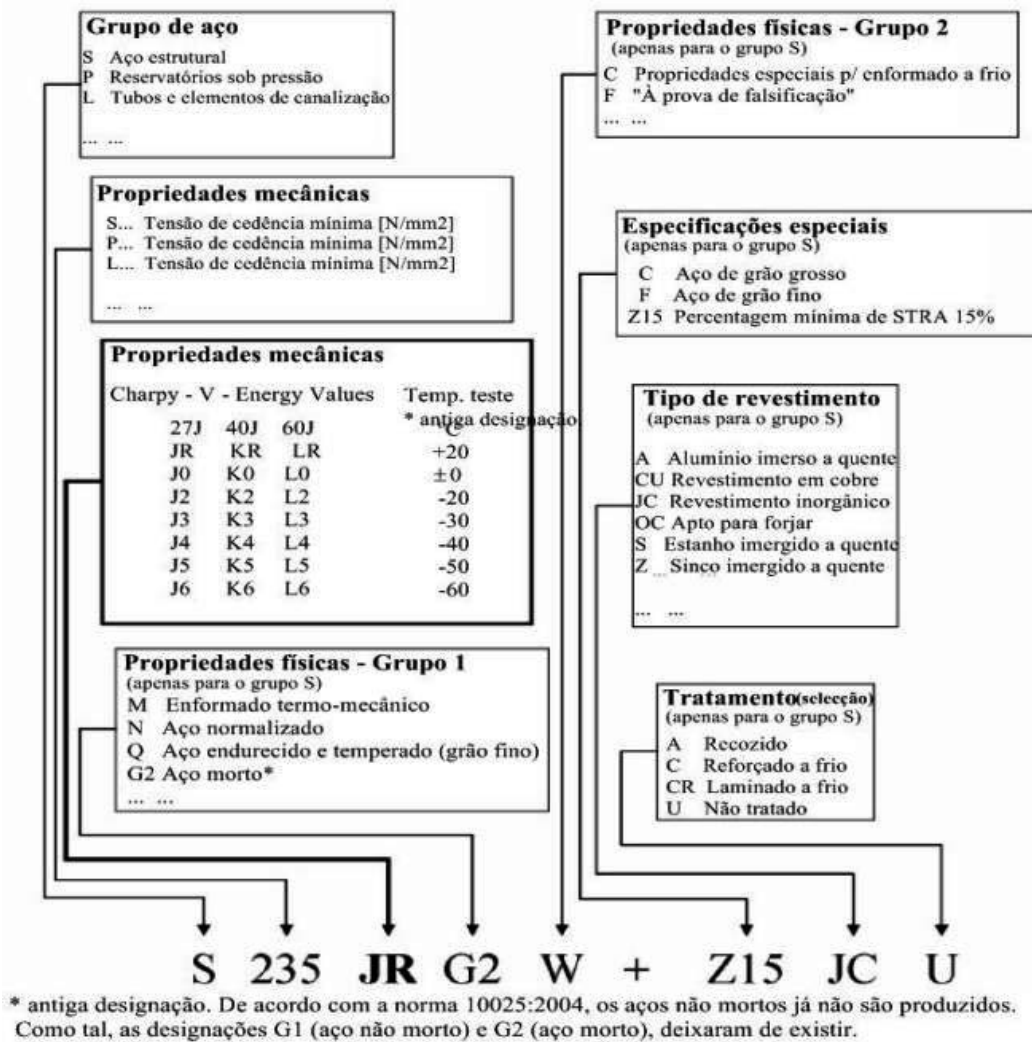


Figura 2. 1- Classificação dos aços carbono de acordo com a EN 1993-1-10 (STANDARDIZATION, 2005)

## 2.2 PROPRIEDADES DO AÇO

### 2.2.1 Propriedades Térmicas

As propriedades térmicas do aço modificam as suas propriedades físicas e as temperaturas elevadas reduzem as tensões de cedência e tensão última, bem como o módulo de elasticidade, ou seja, definem o seu comportamento em função da temperatura que o mesmo é capaz de suportar, sem que este fator, altere a composição do material uma vez que a temperatura elevada é aplicada no material, os resultados apresentam valores mais baixos de resistência e mais altos de ductilidade.

O conhecimento da evolução das propriedades mecânicas do aço a elevadas temperaturas é importante para a obtenção de bons resultados no dimensionamento de elementos deste material. Também as propriedades térmicas influenciam o comportamento do aço quando sujeito a temperaturas elevadas, de tal forma que, um bom dimensionamento de elementos estruturais neste material deve considerar estas propriedades. As propriedades térmicas consideradas no dimensionamento de elementos de aço são: *condutividade térmica; calor específico e expansão térmica*. Estas possibilitam o conhecimento da evolução da temperatura nos elementos de aço quando sujeitos à ação do fogo e conseqüentemente, prever a degradação das propriedades resistentes destes elementos com o aumento de temperatura.

#### a) Extensão Térmica

A NP EN1993-1-2:2010 apresenta a variação das propriedades térmicas para aços carbono a elevadas temperaturas, nomeadamente, a extensão térmica, o calor específico, e a condutividade térmica. No entanto, não existe nesta norma, uma consideração da evolução das propriedades térmicas a elevadas temperaturas para aços enformados a frio ou aços laminados a quente, sendo comuns para ambos. A extensão térmica do aço carbono ( $\Delta l / l$ ) deverá ser considerada a partir das seguintes equações:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta l}{l} &= 1,2 * 10^{-5} \theta_a + 0,4 * 10^{-8} \theta_a^2 - 2,416 * 10^{-4} && 20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 750^\circ\text{C} \\ \frac{\Delta l}{l} &= 1,1 * 10^{-2} && \text{para } 750^\circ\text{C} \leq \theta_a < 860^\circ\text{C} \\ \frac{\Delta l}{l} &= 2 * 10^{-5} \theta_a - 6,2 * 10^3 && 860^\circ\text{C} \leq \theta_a < 1200^\circ\text{C} \end{aligned} \quad \text{Equação (1)}$$

em que:  $l$  comprimento a 20 °C;  
 $\Delta l$  alongamento induzido pela temperatura;  
 $\theta_a$  temperatura do aço [°C]

A Figura 2.2, mostra a evolução da extensão térmica do aço com o aumento de temperatura, sendo possível observar que entre os 750°C e os 850°C a extensão térmica do aço não sofre variação.

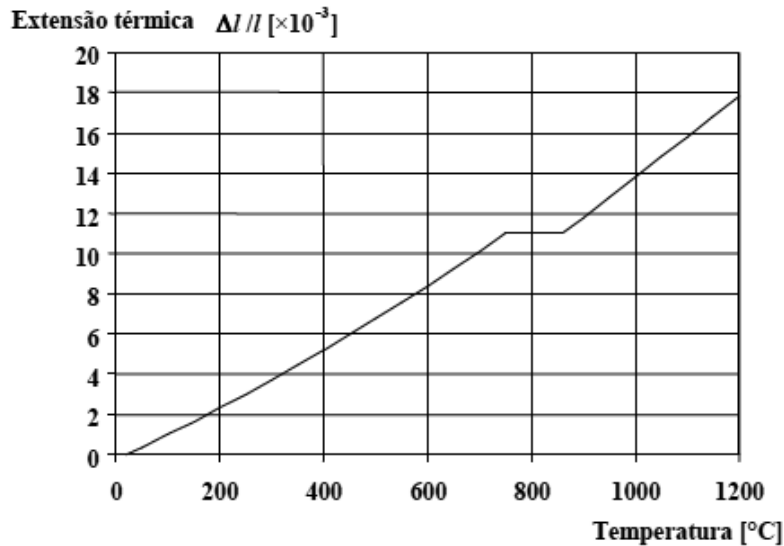


Figura 2. 2 – Extensão térmica relativa do aço carbono em função da temperatura (Fonte: Eurocódigo3)

### b) Calor Específico

O calor específico do aço em J/KgK, deverá ser determinado conforme a Equação (2).

$$\begin{aligned}
 c_a &= 425 + 0.773\theta_a - 1,69 * 10^{-3}\theta_a^2 + 2,22 * 10^{-6}\theta_a^3 & 20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600^\circ\text{C} \\
 c_a &= 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} & 600^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735^\circ\text{C} \\
 c_a &= 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} & 735^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900^\circ\text{C} \\
 c_a &= 650 & 900^\circ\text{C} \leq \theta_a < 1200^\circ\text{C}
 \end{aligned}
 \tag{Equação (2)}$$

Em que:

$\theta_a$  – temperatura do aço (°C).

A Figura 2.3 representa a evolução do calor específico do aço a elevadas temperaturas, onde é possível observar que entre os 750 ° e 800° existe uma descontinuidade da função.

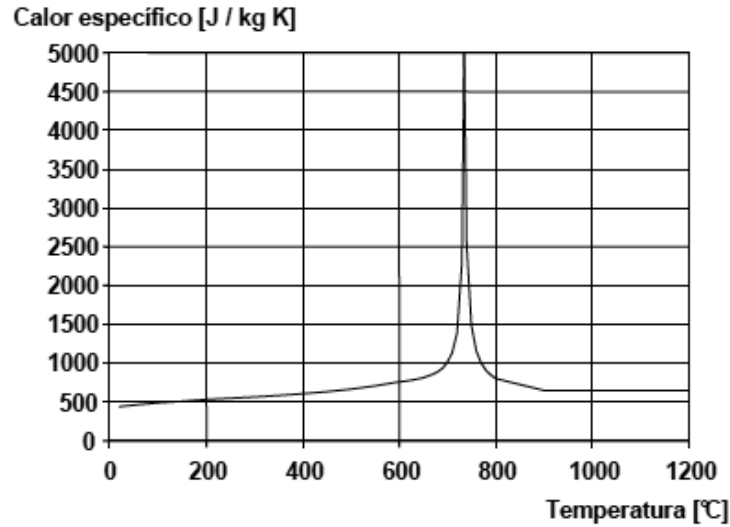


Figura 2. 3 – Calor específico em função da temperatura. (Fonte: Eurocódigo3)

### c) Condutividade térmica

De acordo com o EC3 -1.2, a condutividade térmica, em W/mK, varia com a temperatura segundo a equação lustrada na Figura 2.4.

$$\begin{aligned} \lambda_a &= 54 - 3,33 * 10^{-2} \theta_a & \text{para } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 800^\circ\text{C} \\ \lambda_a &= 27,3 & \text{para } 800^\circ\text{C} \leq \theta_a < 1200^\circ\text{C} \end{aligned} \quad \text{Equação (3)}$$

Em que:

$\theta_a$  – temperatura do aço (°C).

A Figura 2.4 mostra a evolução da condutividade térmica do aço a elevadas temperaturas. Observa-se que a partir dos 800° a condutividade térmica passa a ser constante.

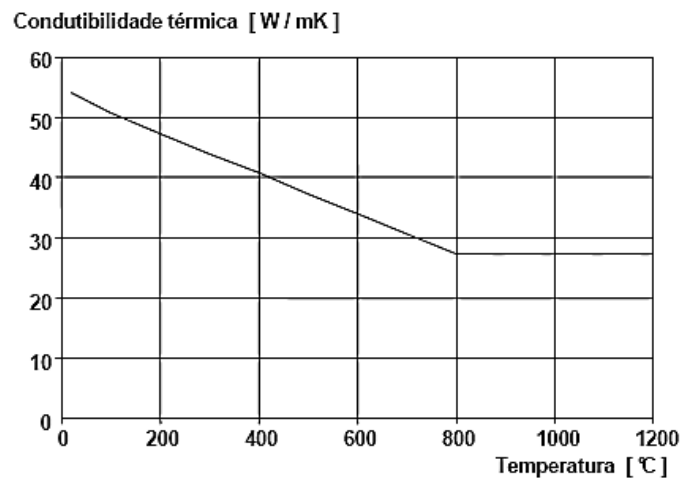


Figura 2. 4 – Condutividade térmica em função da temperatura. (Fonte: Eurocódigo3)

## 2.2.2 Propriedades Mecânicas a Temperaturas Elevadas

Nesta seção são apresentados alguns regulamentos, de forma não exaustiva, tais como o Eurocódigo 3 (EN 1993-1-2, 2010), o código Australiano (AS 4100, 1998) e o código Britânico (BS 5950-8, 2003).

### 2.2.2.1 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 (Tabela 2.2 e Figura 2.5): 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 2.6a e Tabela 2.3) 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 2.6b e Tabela 2.4) presente no Anexo A deste mesmo código.

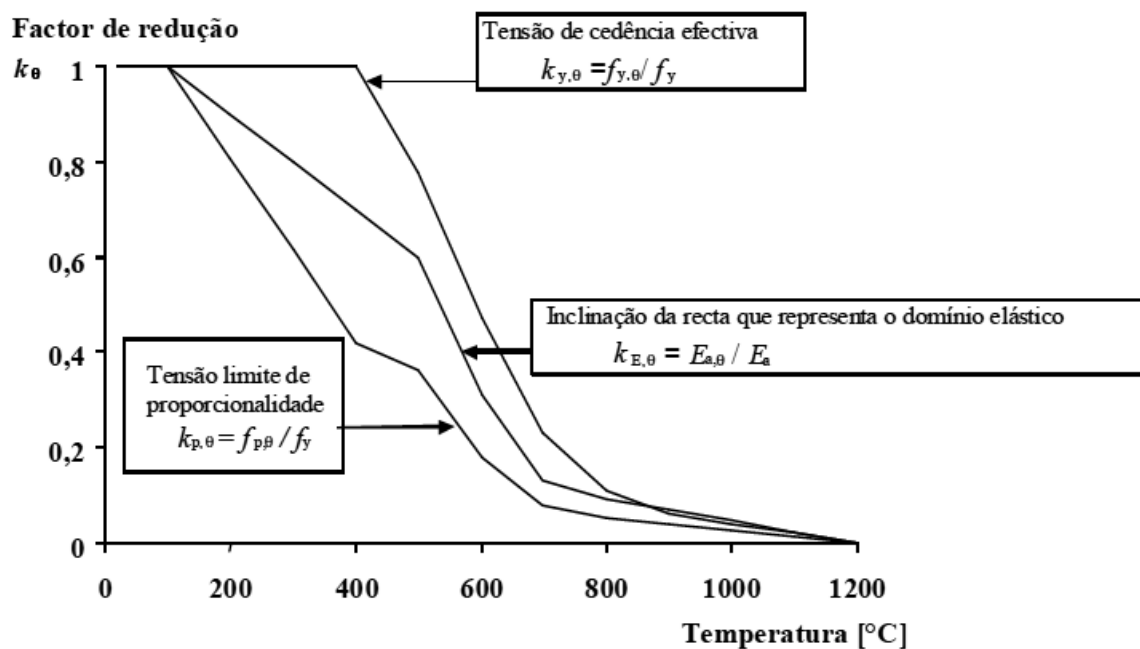


Figura 2. 5 - Factores de redução para a relação tensão-extensão do aço carbono a temperaturas elevadas (EN 1993-1-2, 2010)



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

Temperatura do aço $\theta_a$	Factores de redução à temperatura referidos ao valor de $f_y$ ou E a 20°C		
	Fator de redução (referido a $f_y$ ) para a tensão de cedência efetiva $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Fator de redução (referido a $f_y$ ) para a tensão limite de proporcionalidade $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Fator de redução (referido a $E_a$ ) para inclinação da reta 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 intermediários da temperatura do aço, poderá efetuar-se uma interpolação linear.

Tabela 2. 3 - Equações propostas para determinar a relação tensão-extensão do aço (EN 1993-1-2, 2010)

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

Tabela 2. 4 - Equações propostas para determinar a relação tensão-extensão do aço tendo em conta o endurecimento (EN 1993-1-2, 2010)

- para $0,02 < \varepsilon < 0,04$ :	$\sigma_a = 50(f_{u,\theta} - f_{y,\theta})\varepsilon + 2f_{y,\theta} - f_{u,\theta}$	(A.1a)
- para $0,04 \leq \varepsilon \leq 0,15$ :	$\sigma_a = f_{u,\theta}$	(A.1b)
- para $0,15 < \varepsilon < 0,20$ :	$\sigma_a = f_{u,\theta}[1 - 20(\varepsilon - 0,15)]$	(A.1c)
- para $\varepsilon \geq 0,20$ :		(A.1d)
- para $\theta_a < 300$ °C:	$f_{u,\theta} = 1.25f_{y,\theta}$	(A.2a)
- para $300$ °C $\leq \theta_a \leq 400$ °C:	$f_{u,\theta} = f_{y,\theta}(2 - 0.0025\theta_a)$	(A.2b)
- para $\theta_a \geq 400$ °C:	$f_{u,\theta} = f_{y,\theta}$	(A.2c)

Adicionalmente, o Eurocódigo também trata das propriedades dos parafusos para altas temperaturas. (Anexo D do EN 1993-1-2), ver Tabela 2.5.

Tabela 2. 5 - Factores de redução da resistência para parafusos e soldaduras (EN 1993-1-2, 2010)

Temperatura $\theta_a$	Factor de redução para parafusos $k_{b,\theta}$ (tração e corte)	Fator 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

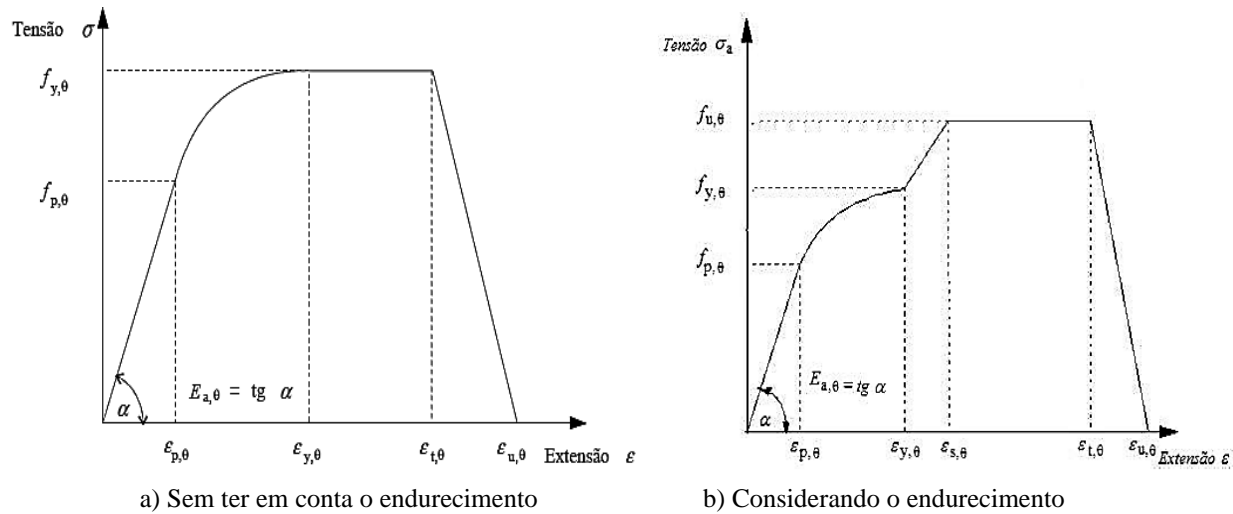


Figura 2. 6 - Relação tensão-extensão para o aço carbono a temperaturas elevadas. (Adaptado de EN 1993-1-2, 2010)

### 2.2.2.2 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 2.7), 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:	Para o módulo de elasticidade:
$\frac{f_{y,\theta}}{f_y} = 1,0$ <p style="text-align: center;">quando</p> $\frac{f_{y,\theta}}{f_y} = \frac{905 - T}{690}$	$\frac{E_{a,\theta}}{E_a} = 1,0 + \left[ \frac{T}{2000 \left[ \ln \frac{T}{1100} \right]} \right]$ <p style="text-align: center;">quando</p> $\frac{E_{a,\theta}}{E_a} = \frac{690 \left( 1 - \frac{T}{1000} \right)}{T - 53,5}$
$0^\circ\text{C} < T \leq 215^\circ\text{C}$ $215^\circ\text{C} < T \leq 905^\circ\text{C}$	$0^\circ\text{C} < T \leq 600^\circ\text{C}$ $600^\circ\text{C} < T \leq 1000^\circ\text{C}$

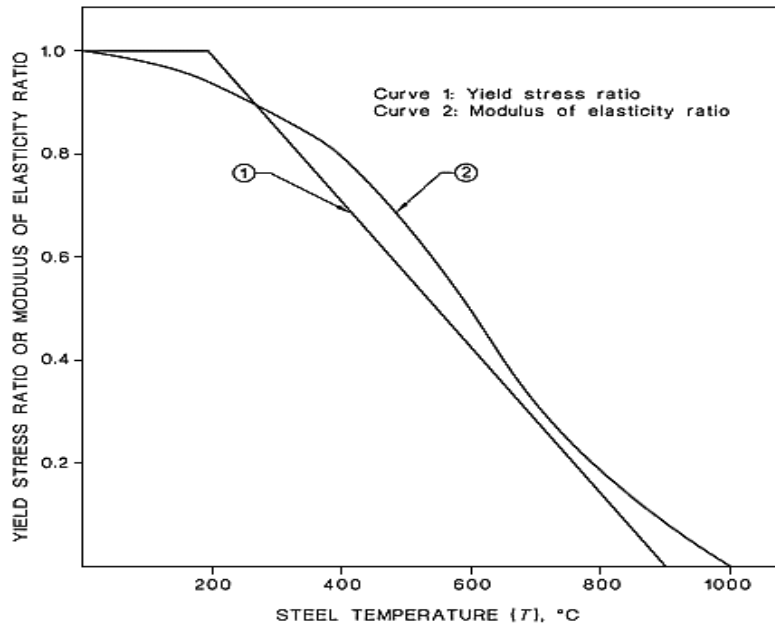


Figura 2. 7 - Variação das propriedades mecânicas do aço com a temperatura (AS 4100-1998)

### 2.2.2.3 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 (Tabela 2.6).

Tabela 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 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

*Pontos a reter:*

- **EN 1993-1-2** introduz o conceito de coeficientes de redução que relaciona o valor das propriedades do aço a altas temperaturas com os valores a 20 °C: tensão de cedência efectiva, tensão limite de proporcionalidade e módulo de elasticidade.
- **Australian Standard AS 4100-1998** apresenta as relações entre a tensão de cedência e o módulo de elasticidade, para diversas temperaturas e propõe fórmulas para as referidas relações, através das quais é possível calcular coeficientes de redução para a tensão de cedência e módulo de elasticidade.
- **British Standard BS 5950-8** apresenta a variação da resistência para diferentes temperaturas em função do valor de extensão.

## 2.3 ESTUDOS PRECEDENTES SOBRE A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO

O estudo do comportamento do aço sobre o efeito das temperaturas elevadas nas suas propriedades é maioritariamente desenvolvido através de ensaios de tração axial, existindo dois tipos de métodos de ensaios a altas temperaturas: ensaios em **regime transiente** e ensaios em **regime estacionário** (Chen e Young, 2007, Kankanamge e Mahendran, 2011).

O sistema em regime estacionário consiste em aquecer primeiramente o provete de ensaio até uma certa temperatura específica e só depois tracioná-lo até à rotura. A amostra é aquecida a uma temperatura pré-determinada antes do teste e mantida constante durante o teste. A temperatura é então mantida à medida que a carga é aplicada à amostra até que a falha seja alcançada. Os testes podem ser executados sob controle de carga ou deslocamento. A relação tensão-deformação do aço a uma temperatura específica pode ser obtida diretamente. Normalmente, em um incêndio num prédio, a temperatura muda constantemente.

Na literatura (Outinen e Makelainen 2004), o sistema em regime estacionário é amplamente utilizado devido à sua simplicidade. Com um procedimento mais simples, os resultados podem ser mais reproduzíveis. Uma desvantagem do método é que ele não representa um evento real de incêndio, no qual a temperatura varia com o tempo.

O sistema em regime transiente baseia-se em colocar o provete em tração com carga constante e aquecido a uma velocidade constante até à rotura. A temperatura e a deformação total são medidas durante o teste; normalmente, os resultados são então convertidos em curvas de tensão-deformação, conforme mostrado na Figura 2.8.

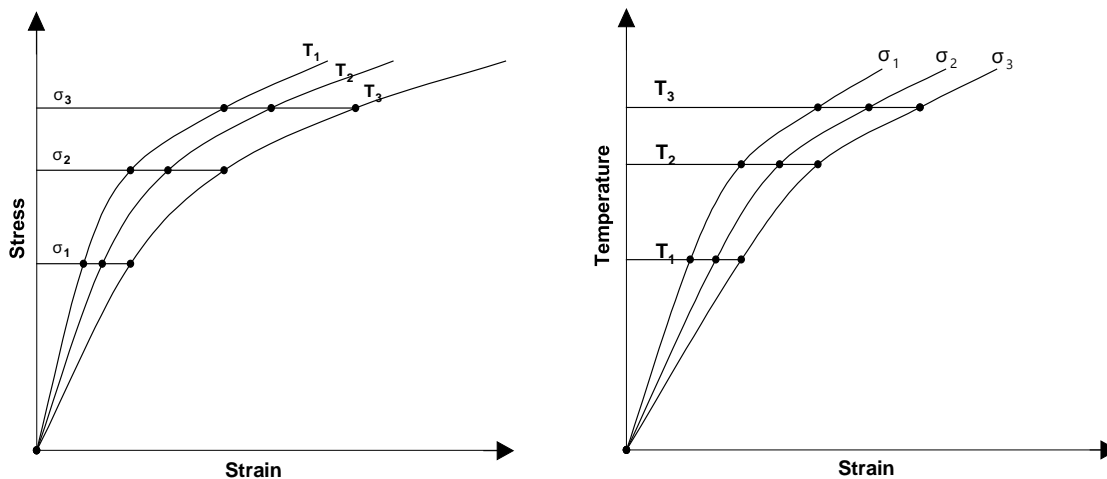


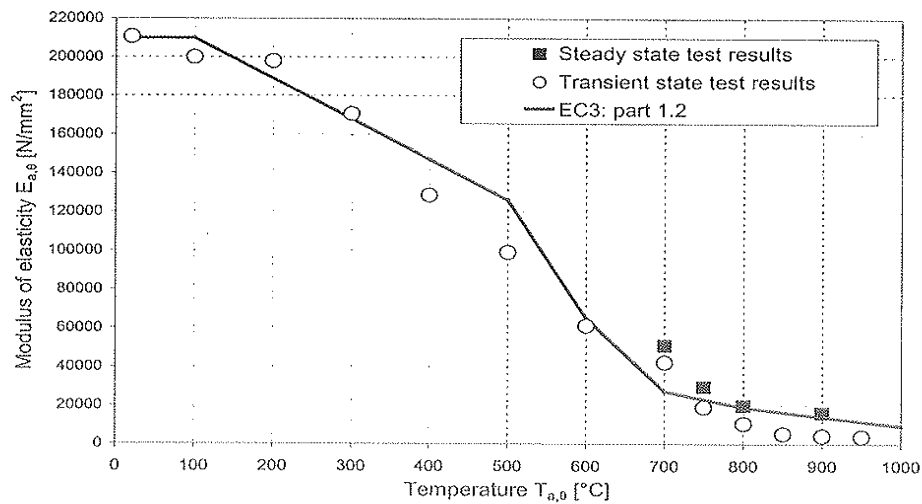
Figura 2. 8 – Curva tensão-extensão e temperatura-extensão em regime transiente

Estes métodos permitem obter várias características do aço, como por exemplo: tensão efetiva,  $f_y$ , a tensão de rotura,  $f_u$ , o módulo de elasticidade longitudinal,  $E$ , a extensão na tensão de rotura,  $\epsilon_u$ , e a extensão após rotura  $\epsilon_f$ . Vários autores (Outinen, 2006, Chen e Young, 2007,

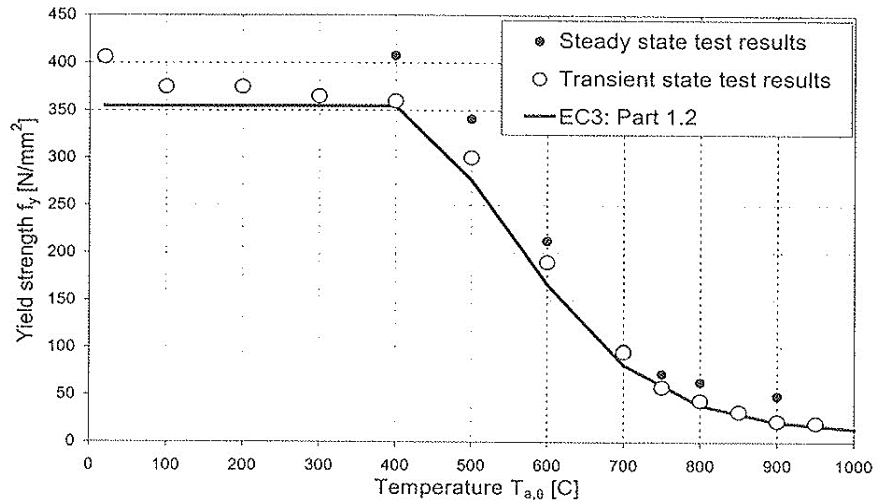
Kankanamge e Mahendran, 2011) têm sustentado que o método de ensaio em regime transiente transmite um comportamento mais realista que o método em regime estacionário, pois numa situação real de incêndio um elemento previamente em esforço sofre um aquecimento gradual ou espontâneo, e assim sendo, o método de ensaio em regime transiente revela-se mais adequado na previsão do comportamento do material ao fogo.

No entanto, a complexidade e o elevado número de ensaios necessário para a determinação das curvas de tensão-extensão levam a que se realizem ensaios em regime estacionário para caracterização do material. Por outro lado, (Kankanamge e Mahendran, 2011) afirmam que os ensaios em regime estacionário são os mais comumente utilizados devido à metodologia associada e à obtenção direta das curvas tensão-extensão.

*Outinen et al. (2000)* estudaram o comportamento dos aços S355 e S460 quando submetidos a altas temperaturas. Para obterem os resultados pretendidos utilizaram o ensaio em regime 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 em regime transiente variou entre 10 °C/min e 30 °C/min e foi notado que os resultados não tinham grande diferença para cada uma das taxas. As Figuras 2.9a e 2.9b comparam os resultados do aço S355 com os valores propostos pelo EN 1993-1-2. Os valores obtidos pelo regime 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.



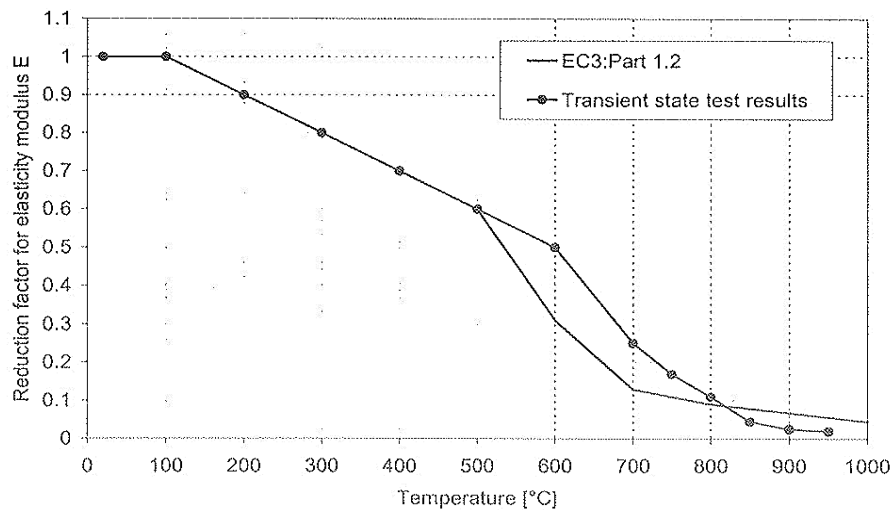
a) Módulo de Elasticidade



b) Tensão de cedência

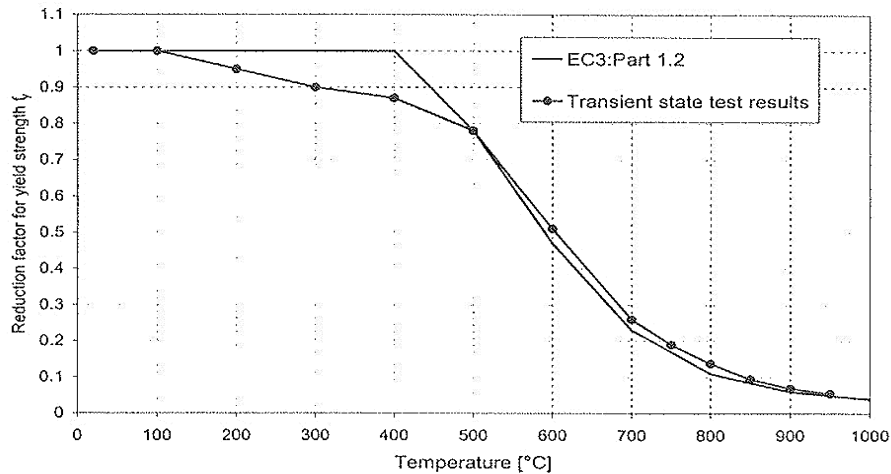
Figura 2. 9 - Comparação dos valores obtidos com os valores propostos pelo EN 1993-1-2, para o aço S355 (Outinen et al., 2000)

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 2.10a). 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 2.10b). Os restantes valores aproximam-se dos propostos pelo EN 1993-1-2.



a) Módulo de Elasticidade





b) Tensão de cedência

Figura 2. 10 - Comparação dos factores de redução obtidos pelo regime transiente com os valores propostos pelo EN 1993-1-2, para o aço S460 (Outinen et al., 2000)

*Outinen e Mäkeläinen (2002) e Outinen (2006)* concluíram que as propriedades mecânicas residuais do aço estrutural S420M e S350GD+Z, respetivamente, são semelhantes às nominais do material, isto é, os perfis de aço enformado a frio depois de serem submetidos a altas temperaturas e à compressão (a um incêndio) apresentam propriedades mecânicas aproximadamente iguais às nominais que tinham antes do incêndio (Figura 2.11). Observaram ainda que a relação tensão-extensão do aço S420M a elevadas temperaturas aplicando o modelo proposto pela NP EN 1993-1-2:2010 (2010) e as curvas tensão-extensão obtidas experimentalmente apresentam resultados diferentes, sendo que esta norma admite valores não conservativos, ou seja, o dimensionamento para o aço S420M não está do lado da segurança.

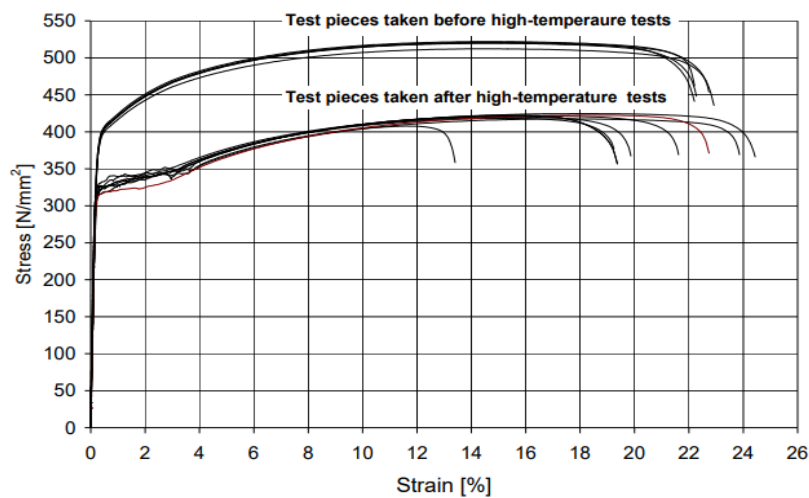


Figura 2. 11 - Ensaios de tração do aço estrutural S350GD+Z antes e após ação térmica (Outinen e Mäkeläinen, 2002)

**Outinen e Mäkeläinen (2002)** realizaram uma série de regime transientes (taxa de aquecimento 20 °C/min), para investigar as propriedades mecânicas de diferentes tipos de aço (S350GD+Z e S355J2H) ver Tabela 2.7. Deve-se referir que o aço S350GD+Z não é um aço corrente utilizado para perfis laminados, mas sim para elementos enformados a frio.

Tabela 2. 7 - Características dos aços estudados (Outinen and Mäkeläinen, 2002)

Steel grade	Nominal $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	Measured $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	Material Standard
S350GD+Z	350	402	SFS-EN 10 147
S355J2H	355	539-566*	SFS EN 10 219-1

Tabela 2. 8 - Factores de redução para as propriedades mecânicas do aço estrutural S350GD+Z de 20 °C a 1000 °C (Outinen and Mäkeläinen, 2002)

Temperatura do aço	Reduction factor for the slope of the linear elastic range	Reduction factor for proportional limit	Reduction factor for satisfying deformation criteria (informative only)	Reduction factor for yield strength	Reduction factor for yield strength
$\theta_a$ [°C]	$k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$	$k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	$k_{x,\theta} = f_{x,\theta} / f_y$	$k_{p0.2,\theta} = f_{p0.2,\theta} / f_y$	$k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$
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

A Tabela 2.8 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 1993-12 (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 a Tabela 2.9 apresenta os valores das propriedades para cada temperatura.

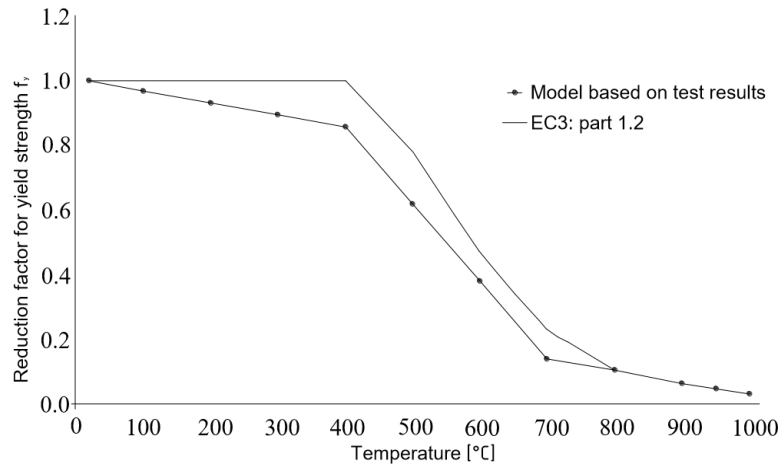


Figura 2. 12 - Comparação entre os factores de redução obtidos nos testes, para a tensão de cedência, com os valores propostos pelo EN 1993-1-2 (Outinen and Mäkeläinen, 2002)

Tabela 2. 9 - Propriedades mecânicas do aço estrutural S355J2H de 20 °C a 1000 °C (Outinen and Mäkeläinen, 2002)

Temperatura [°C]	Modulus pf elasticity E [N/mm <sup>2</sup> ]	Proportional limit f <sub>p</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Yield strength f <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Yield strength R <sub>p0.2</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Yield strength R <sub>t0.5</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]
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 (Tabela 2.10). 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 regime transiente para obter a relação tensão-extensão para as diversas temperaturas (Figura 2.14). Os factores de redução, para as propriedades estudadas, são apresentados na Tabela 2.11 e 2.12.

Tabela 2. 10 - 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)	$\epsilon_f$ (%)
High strength steel	789	790	813	823	847	223	7
Mild steel	401	409	445	465	552	220	30

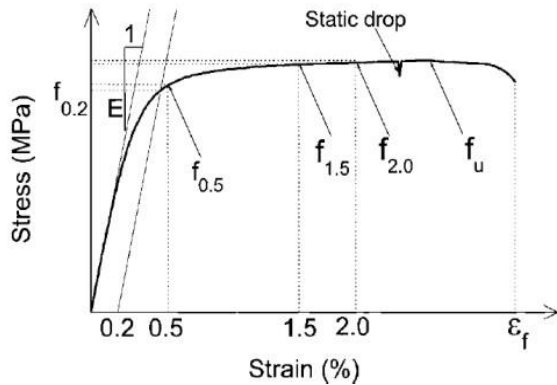


Figura 2. 13 - Relação tensão-extensão do aço  
(Chen et al., 2006)

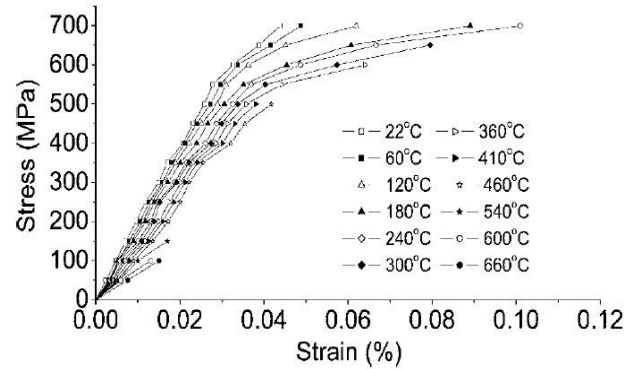


Figura 2. 14 - Relação tensão-extensão do aço para  
diversas temperaturas (Chen et al., 2006)

Tabela 2. 11 - Factores de redução para o módulo de elasticidade e tensão de cedência para o aço  
XLERPLATE Grade 350 (Chen et al., 2006)

Temperatura [°C]	$E_{\theta}/E_{normal}$	$f_{0.2,\theta}/f_{0.2, normal}$	$f_{0.5,\theta}/f_{0.5, normal}$	$f_{1.5,\theta}/f_{1.5, normal}$	$f_{2.0,\theta}/f_{2.0, normal}$
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	0.2
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

Tabela 2. 12 - Factores de redução para o módulo de elasticidade e tensão de cedência para o aço  
BISPLATE 80 (Chen et al., 2006)

Temperatura [°C]	$E_{\theta}/E_{normal}$	$f_{0.2,\theta}/f_{0.2, normal}$	$f_{0.5,\theta}/f_{0.5, normal}$	$F_{1.5,\theta}/F_{1.5, normal}$	$f_{2.0,\theta}/f_{2.0, normal}$
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	10.5	1.05
300	0.95	0.95	0.99	1.11	1.11
410	0.93	0.86	0.89	1.03	1.04
460	0.93 , 0.89*	0.90 , 0.90*	0.94 , 0.94*	1.04 , 1.04*	1.03 , 1.03*
540	0.89	0.81	0.85	0.93	0.93
600	0.90	0.78	0.82	0.87	0.86
660	0.82	0.71	0.74	0.76	0.74
720	0.77	0.56	0.58	0.57	0.55
770	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.

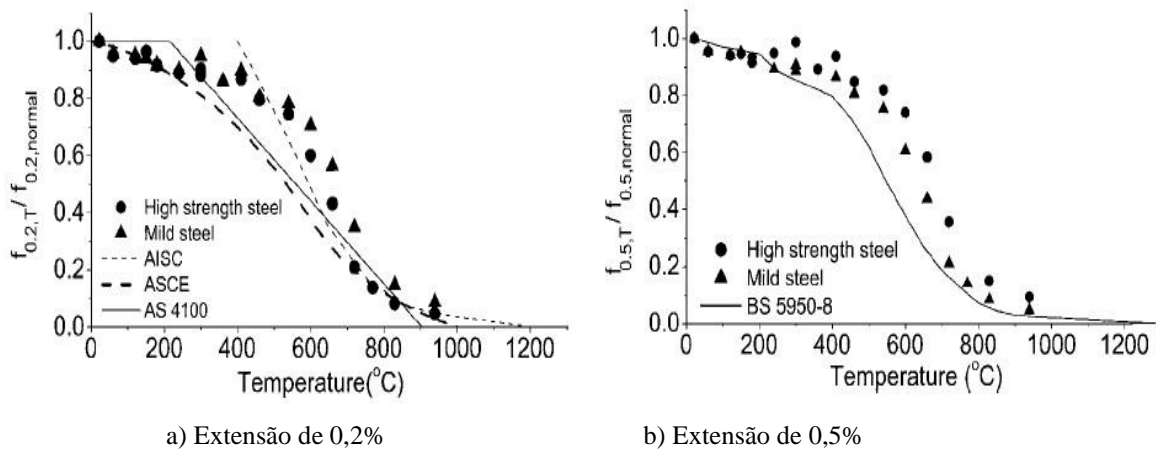


Figura 2. 15 - Comparação dos factores de redução experimentais com diversos regulamentos, para a tensão de cedência (Chen et al., 2006)

A análise dos gráficos para extensões de 0.5%, 1.5% e 2.0% foi muito semelhante (Figura 3.9b, Figura 3.10a e Figura 3.10b). 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 3.9a), até 400 °C. A partir de 800 °C os valores dos factores voltam a ficar semelhantes para os regulamentos e para os ensaios.

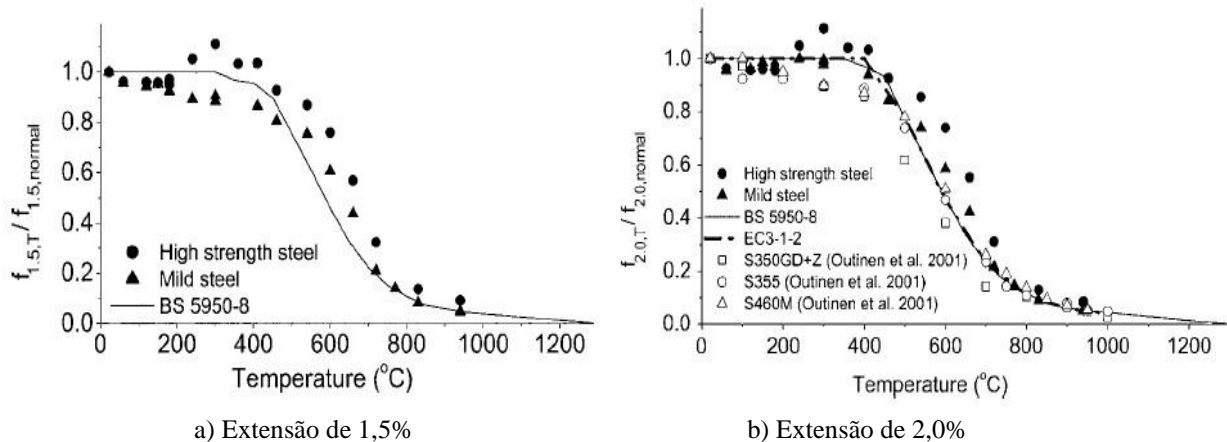


Figura 2. 16 - Comparação dos factores de redução experimentais com diversos regulamentos, para a tensão de cedência (Chen et al., 2006)

Para confirmar os resultados, os autores realizaram testes em regime transiente no aço XLERPLATE Grade 350 para o módulo de elasticidade e tensão última (Tabela 2.13 e 2.14).

Tabela 2. 13 - Factores de redução para o módulo de elasticidade obtidos pelo regime transiente (Chen et al., 2006)

Temperatura [°C]	22	60	120	180	240	300	360	410	460	540	600	660
$E_{\theta}$ [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
$E_{\theta}/E_{normal}$	1.00	0.92	0.89	0.82	0.77	0.74	0.68	0.64	0.61	0.60	0.44	0.32

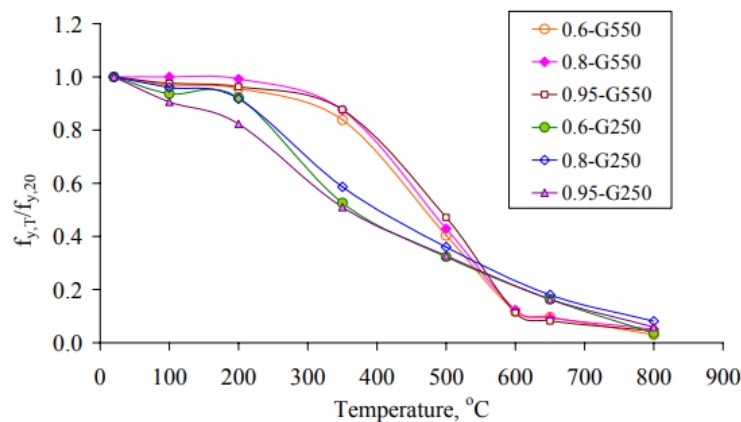
Tabela 2. 14 – Resultados obtidos para a tensão última do regime transiente e “teste estacionário” (Chen et al., 2006)

Temperatura [°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

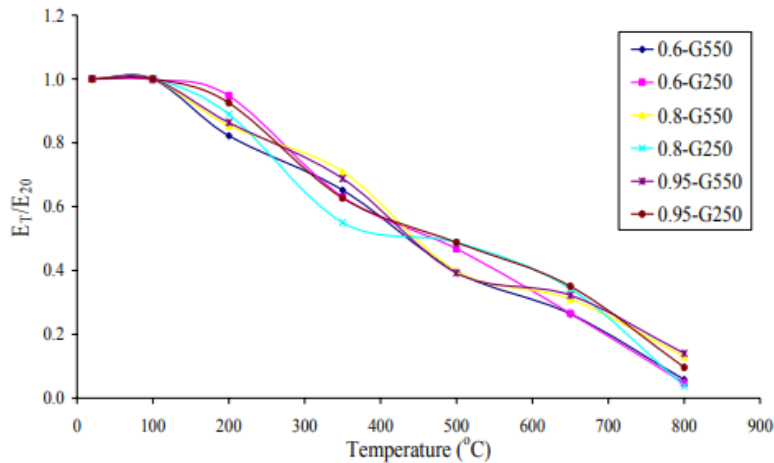
600	150-200	498	407
660	100-150	357	250
720	50-100	178	109
770	50-100	119	57
830	1-50	75	34
940	<1	43	22

Notas: Os valores apresentados para  $f_{i,u,T}$  correspondem ao regime transiente e para  $f_{u,T}$  correspondem ao "teste estacionário". \* correspondem a resultados obtidos para um ensaio adicional.

**Ranawaka e Mahendran (2009) e Kankanamge e Mahendran (2011)**, estudaram a influência da classe estrutural e da espessura das chapas na evolução das propriedades mecânicas do aço enformado a frio a temperaturas elevadas. Os autores realizaram ainda uma comparação dos valores obtidos nos seus ensaios com os valores previstos nas normas de dimensionamento da NP EN 1993-1-2 (2010) e BS 5950-5 (1998) e em investigações experimentais efetuadas até à data, tendo concluído que nem as normas nem as propostas dos investigadores anteriores são capazes de prever com exatidão o comportamento a altas temperaturas dos aços enformados a frio, tendo sido propostas um conjunto de novas equações para a determinação dos fatores de redução da tensão de cedência (diferentes para aços de alta e de baixa resistência), e para o módulo de elasticidade em função da temperatura. Ranawaka e Mahendran (Ranawaka e Mahendran, 2009) realizaram diversos ensaios de tração em regime estacionário com temperaturas variando entre os 20 e os 800°C, em provetes de aço das classes G550 e G250 com espessuras 0.60, 0.80 e 0.95 mm (Figura 2.17). As equações propostas por este autor têm em consideração uma tensão de cedência correspondente a uma extensão residual de 0,2%. Kankanamge e Mahendran (Kankanamge e Mahendran, 2011), realizaram, também, ensaios de tração em regime estacionário com temperaturas entre os 20 e os 700°C, em provetes de aço G250 com 1.55 e 1.95 mm de espessura e G450 com 1.50 e 1.90 mm.



a)



b)

Figura 2. 17 - a) Fatores de redução da tensão de cedência do aço G550 e G250 em função da temperatura; b) Fatores de redução do módulo de elasticidade do aço G550 e G250 em função da temperatura (Ranawaka e Mahendran, 2009).

Os resultados obtidos dos ensaios de Ranawaka e Mahendran (2009) e Kankanamge e Mahendran (2011) permitiram concluir que os fatores de redução da tensão de cedência em função da temperatura variam com base na classe estrutural do aço, mas que a espessura da chapa não influencia significativamente esses valores. Estes autores puderam verificar que os aços de baixa resistência perdem a sua resistência mais rapidamente que os de alta resistência, para baixas temperaturas, no entanto, aproximadamente a partir dos 400°C, a situação inverte-se e são os aços de alta resistência que registam um decréscimo mais acentuado da tensão de cedência. Como consequência, ambos os aços de alta e de baixa resistência apresentam valores similares da tensão de cedência a temperaturas mais elevadas. Os autores justificam esta diferença nas taxas de degradação da resistência dos dois tipos de aço pelo processo de enformagem a frio, indicando que quando submetidos a altas temperaturas, os aços enformados a frio tendem a perder a resistência que ganharam durante o processo de enformagem e que, portanto, os aços de alta resistência tendo ganho maior resistência durante esse processo, sofrerão maiores perdas a temperaturas mais elevadas. Por outro lado, não foi constatada qualquer influência relevante da classe do aço nem da espessura da chapa nos valores obtidos para os fatores de redução do módulo de elasticidade em função da temperatura. (Kankanamge e Mahendran, 2011).

**Kankanamge e Mahendran (2011)**, compararam as curvas tensão-extensão obtidas experimentalmente, não só, com os modelos tensão-extensão propostos por Ranawaka e Mahendran (2009) para aços de alta e baixa resistência, mas também, com os modelos tensão-extensão propostos por Chen e Young (2007) para aços de alta resistência. Estes, observaram que os modelos propostos por (Ranawaka e Mahendran, 2009) apresentam boa concordância com os resultados obtidos tanto para aços de alta como para baixa resistência e que os modelos



apresentados por (Chen e Young, 2007) estão de acordo com os obtidos apenas até 0.5% da extensão. De um modo geral, os resultados obtidos experimentalmente apresentam uma boa concordância com os modelos apresentados na região elástica da curva tensão-extensão, mas na região plástica estes modelos não preveem com rigor o comportamento do aço estudado. Desta forma, (Kankanamge e Mahendran, 2011) propõem um modelo tensão-extensão baseado nas equações propostas pelo modelo de Ramberg-Osgood (1943), onde apresentam um valor de  $\beta$  diferente, que melhor representam as curvas tensão-extensão obtidas experimentalmente por estes autores.

**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 °C (Figura 2.18). As propriedades dos aços resistentes ao fogo só diminuem as suas propriedades a partir dos 600 °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.

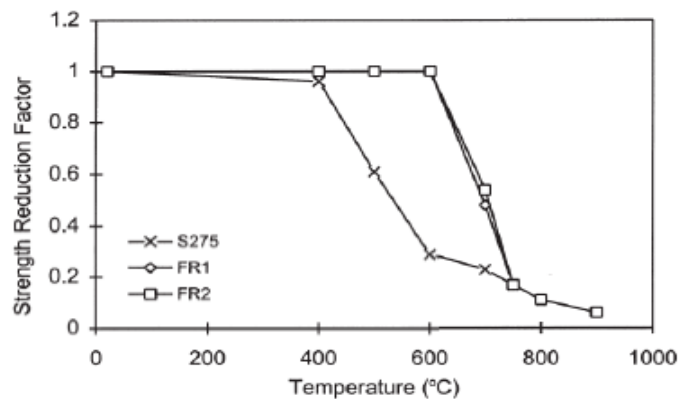


Figura 2. 18 - Factores de redução para os aços estudados (Kelly and Sha, 1999)

**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 testes em regime transiente e em regime estacionário. O “teste transiente” (taxa de aquecimento de 10K/min) foi realizado de modo a obter-se os parâmetros do aço, enquanto o regime 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 2.19 e 2.19b), 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 2.20a e Figura 2.20b).

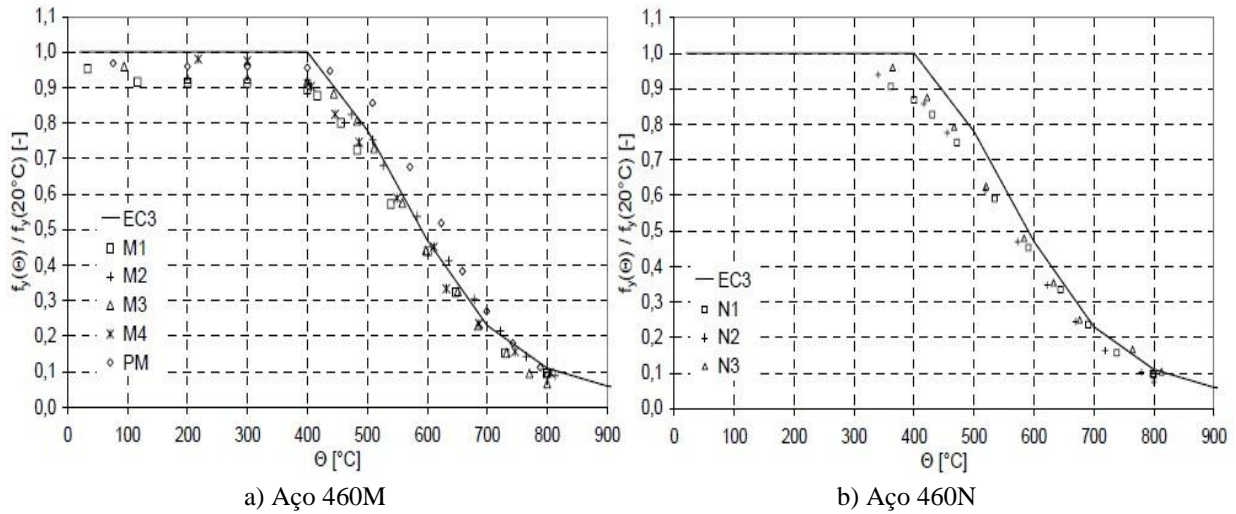


Figura 2. 19 - Factores de redução para a tensão de cedência, através do regime transiente (Schneider and Lange, 2009)

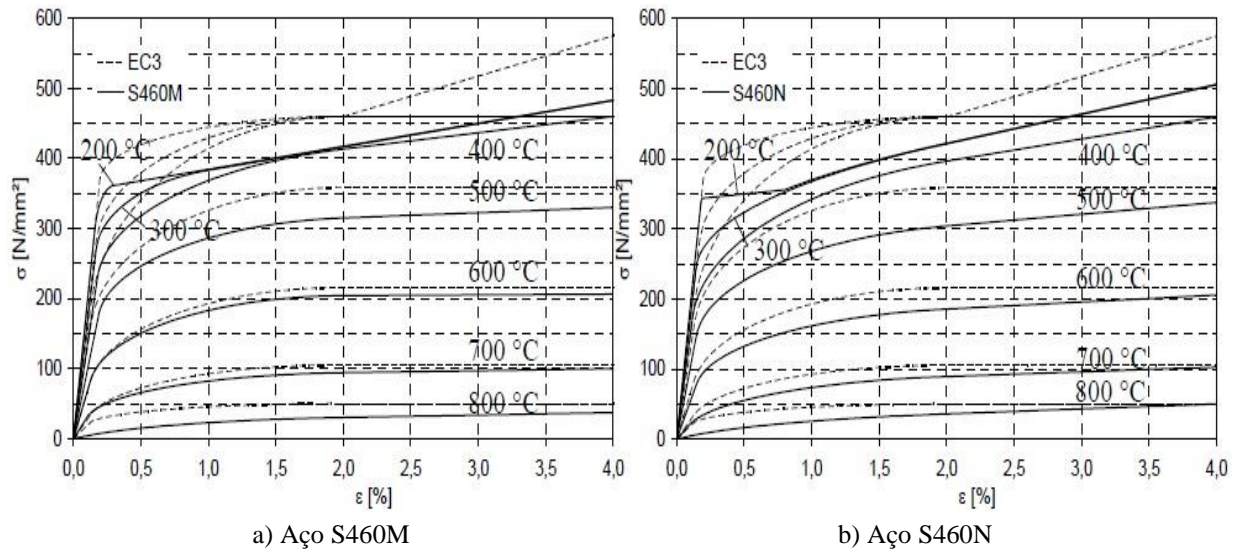


Figura 2. 20 - Comparação da relação tensão-extensão obtida pelos testes com a presente no Eurocódigo (Schneider and Lange, 2009)

*Qiang et al. (2011)* estudaram a variação do módulo de elasticidade do aço S690 para altas temperaturas (Tabela 2.15) realizando testes em regimes estacionários (taxa de deformação 0,005/min) e regimes transientes (taxa de aquecimento de 50 °C/min).

Tabela 2. 15 - Factores de redução para o módulo de elasticidade para o regime estacionário e regime transiente, respectivamente (Qiang et al., 2011)

Temperatura [°C]	Módulo de elasticidade [MP]	Fator de redução	Temperatura [°C]	Módulo de elasticidade [MP]	Fator de redução
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 2.21). É possível notar que os factores de redução obtidos para o regime estacionário são, na maior parte das vezes, superiores aos factores recolhidos para o regime 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.

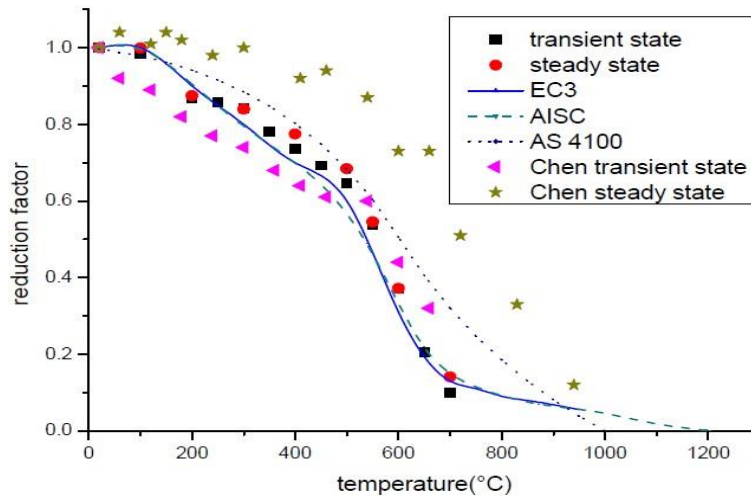


Figura 2. 21 - Comparação do módulo de elasticidade (Qiang et al., 2011)

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 regime 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 na Tabela 2.16.

Tabela 2. 16 - Redução do módulo de elasticidade dos aços S460 e S690 (Qiang et al., 2012b)

Temperatura	S460		S690	
	Módulo de Elasticidade [MPa]	Fator Residual	Módulo de Elasticidade [MPa]	Fator Residual
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	0.960
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.

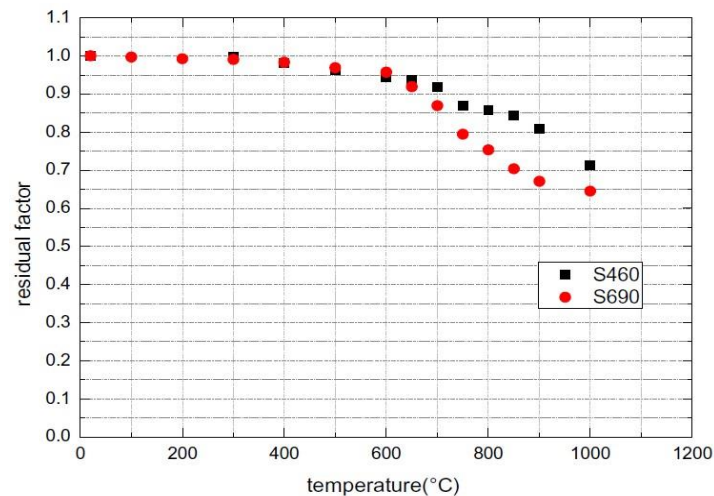


Figura 2. 22 - Factores de redução para o módulo de elasticidade dos aços S460 e S690 (Qiang et al., 2012b)

Na Figura 2.22 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 pelos 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 na Tabela 2.17 e 2.18, e foram elaborados gráficos que permitem uma melhor observação da redução desta propriedade (Figura 2.23 e 2.24).

Tabela 2. 17 - Tensão de cedência efectiva para os aços S460 e S690 (Qiang et al., 2012b)

Temperatura [°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.*

Tabela 2. 18 - Factores de redução para a tensão de cedência efectiva para os aços S460 e S690 (Qiang et al., 2012b)

Temperatura [°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	789	806	784	786
100	-	-	-	-	787	801	787	787
200	-	-	-	-	787	782	789	789
300	1.000	1.002	1.010	0.995	785	781	781	781
400	0.997	0.988	1.011	0.951	786	806	788	786
500	1.007	1.002	1.000	0.972	786	807	790	790
600	0.980	0.966	1.005	0.965	785	802	783	786
650	0.950	0.954	0.968	0.903	793	800	769	783
700	0.968	0.959	0.960	0.901	705	707	702	698
750	0.901	0.887	0.876	0.868	591	591	603	608
800	0.874	0.858	0.891	0.824	484	484	486	486
850	0.871	0.863	0.873	0.843	420	420	417	418
900	0.871	0.858	0.867	0.813	320	321	375	394
1000	0.763	0.758	0.790	0.764	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.

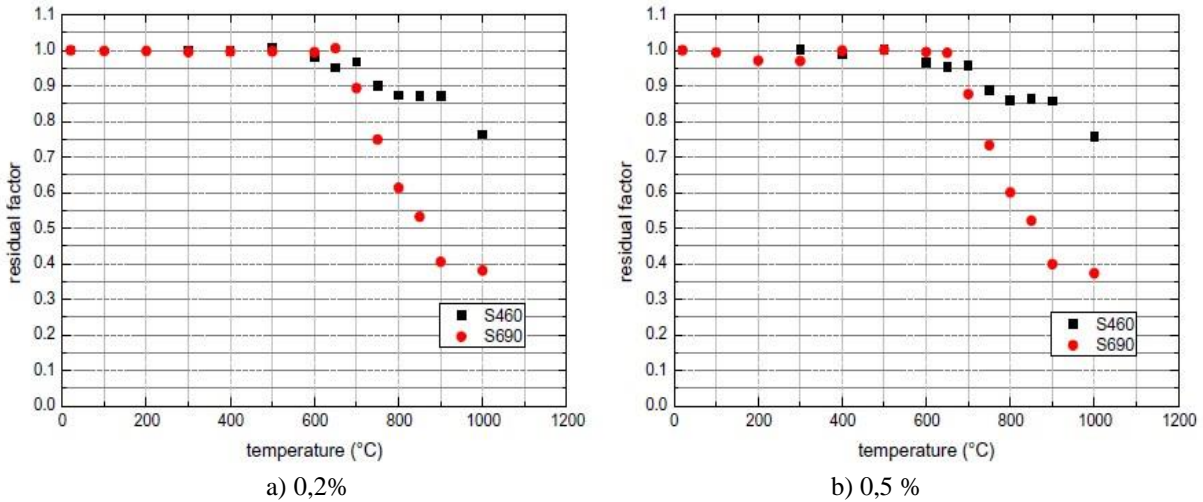


Figura 2. 23 - Factores de redução para a tensão de cedência de acordo com a extensão (Qiang et al., 2012b)

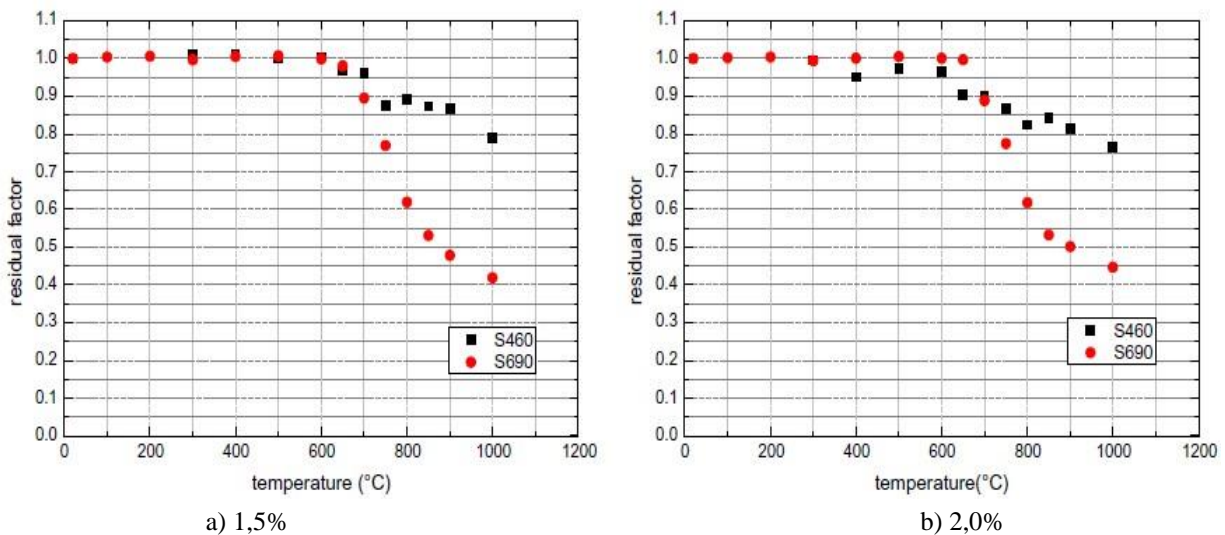


Figura 2. 24 - Factores de redução para a tensão de cedência de acordo com a extensão (Qiang et al., 2012b)

Através dos gráficos (Figura 2.23 e 2.24) 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 na Tabela 2.19 e na Figura 2.25. Tal como para as propriedades anteriores, os valores dos coeficientes de redução só são diferentes a partir dos 600 °C.



Tabela 2. 19 - Redução da tensão última para os aços S460 e S690 (Qiang et al., 2012b)

Temperatura [°C]	S460		S690	
	Tensão última	Factor residual	Tensão última	Factor residual
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	0.1887	485	0.592
1000	521	0.814	470	0.573

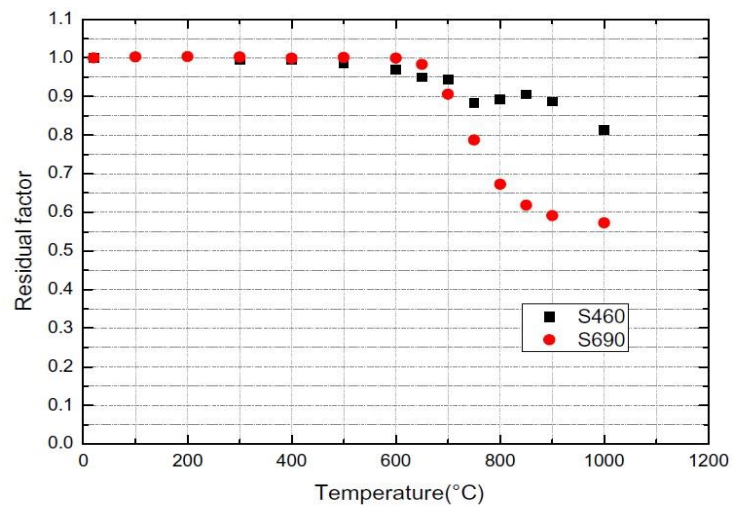


Figura 2. 25 - Factores de redução da tensão última para os aços S460 e S690 (Qiang et al., 2012b)

## 2.4 SOLDADURAS

### 2.4.1 Caracterização Mecânica a Temperaturas Elevadas

Em (Latham & Kirby, 1998), são investigadas as propriedades mecânicas, em condições de exposição a temperaturas elevadas, de soldaduras topo-topo produzidas por MAG e Arco Submerso, nos aços S275 e S355 JR. À semelhança do que já foi referido em outros artigos, também estes autores registaram um aumento da resistência mecânica do material base e das soldaduras, após exposição a temperaturas elevadas, tendo, mais uma vez, este comportamento sido justificado com a ocorrência de envelhecimento dinâmico. Por outro lado, a partir de 500 °C, os autores uma degradação da resistência mecânica das soldaduras com o aumento da temperatura de ensaio.

Conlon, Ricles, & Pessiki, (2009) estudaram a resistência mecânica a temperaturas elevadas de soldaduras topo-a-topo, fabricadas num aço equivalente ao S355 J2, (ASTM A588), segundo a norma EN 10025. Foi concluído por estes autores que, não só a resistência mecânica das soldaduras se degradava a partir de 400 °C, como também, a partir desta temperatura, a degradação da resistência das soldaduras era superior à do material base. Os autores concluíram também que os fatores de redução obtidos eram distintos dos estipulados no EC 3.

Jacob, (2018), que levou a cabo ensaios em regime permanente, de soldaduras no aço S355 J2, fabricadas pelo processo MAG, com arame convencional e fio fluxado concluiu que, apesar da redução da tensão máxima e da tensão limite de elasticidade (Figura 2.26a)), com o aumento da temperatura, o alongamento das soldaduras não foi afetado, sendo esta conclusão avançada a partir da análise dos mapas de distribuição de deformação obtidos por *Digital Image Correlation* (DIC). Este autor concluiu ainda que os fatores de redução para a tensão limite elasticidade obtidos no seu trabalho, eram superiores aos fatores de redução propostos pelo EC 3, apesar de a soldadura conter um defeito, o que leva o autor a concluir que os fatores apresentados naquela norma estão sobredimensionados, em relação a soldaduras produzidas pelo processo MAG neste material. O autor sugere assim a necessidade de proceder a uma revisão do documento.

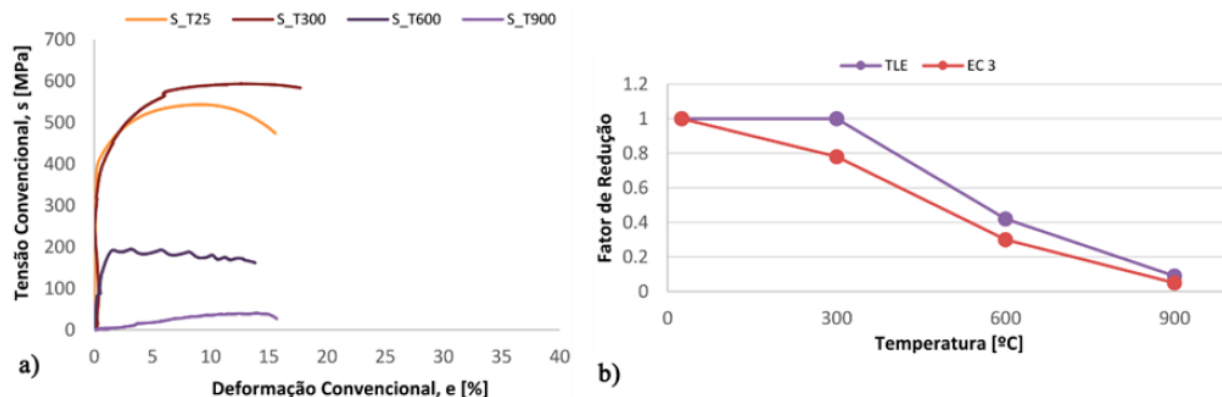


Figura 2. 26 - Resultados para as soldaduras MAG em ensaio em regime estacionário. a) Curvas tensão-deformação; b) Fatores de redução experimentais versus Eurocódigo 3 (adaptado de (Jacob, 2018)).

Jacob, (2018), registou ainda a ocorrência de crescimento de grão, com o aumento de temperatura. Este crescimento de grão foi mais acentuado, nas soldaduras ensaiadas a 900 °C. De referir ainda que, segundo este autor, para as amostras de soldadura ensaiadas em tração a



temperaturas até 300 °C, a rotura localizou-se no material base. Nas amostras de soldadura ensaiadas a 600 °C e 900 °C, a fratura localizou-se na soldadura. Contribuindo para uma redução acentuada do alongamento dos provetes.

A análise metalográfica dos provetes de tração permitiu ainda concluir que as amostras das soldaduras produzidas por MAG, e ensaiadas a 600 °C, fraturaram na interface entre a zona fundida (ZF) e a zona termicamente afetada de grão grosseiro (ZTAGG) por fissuração intergranular. No caso das soldaduras ensaiadas a 900 °C, a fratura deu-se na ZTAGG e propagou-se até à ZF. Nestas amostras também foi possível observar a presença de microporosidades. Em ambas as soldaduras, foram observadas inclusões de escória.

## 2.4.2 Caracterização Mecânica Após Fogo

Sendo as soldaduras uma região distinta à do material base, é fulcral conhecer o seu comportamento mecânico, assim como aferir a heterogeneidade de propriedades de propriedades por ela induzida.

A análise dos perfis de dureza das soldaduras permitiu concluir que, a dureza na zona fundida (ZF) e na zona termicamente afetada (ZTA) começou a decair a partir dos 600 °C, sendo essa queda mais acentuada para as amostras provenientes do tratamento térmico a 900 °C. Para este último caso, houve até uma homogeneização dos valores dos perfis de dureza, desaparecendo assim o perfil em “M”, tal como é possível observar na Figura 2.5.

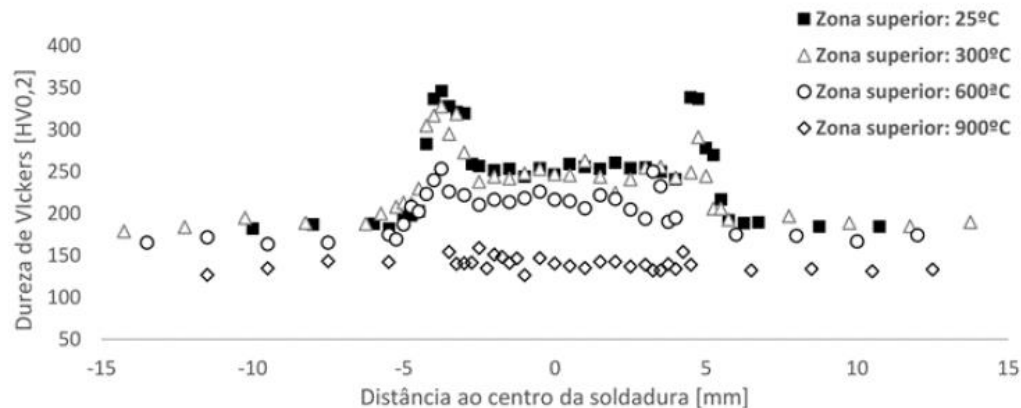


Figura 2. 27 - Evolução do perfil de dureza superior da soldadura com o aumento da temperatura para a soldadura MAG (adaptado de (Jacob, 2018)).

De acordo com Zhu, Cheng, Li, & Wang, (2016), as soldaduras são regiões críticas durante o arrefecimento de uma estrutura metálica. Este trabalho contou com a análise da resistência mecânica após-fogo de soldaduras em aço Q345B, tendo sido também avaliada a influência do método de arrefecimento nas propriedades mecânicas residuais. Estes autores concluíram que a capacidade de carga residual das soldaduras diminuiu com o aumento da temperatura a que estiveram sujeitas. Da comparação entre os métodos de arrefecimento, concluiu-se que a utilização de água conduziu a uma menor degradação da resistência das soldaduras.

À semelhança dos autores referidos no parágrafo anterior, (Araque, Arzola, & Hernández, 2018), também estudaram o efeito do método de arrefecimento nas propriedades das amostras soldadas, mas para o aço ASTM A-36 HR, depois de exposto a altas temperaturas e arrefecido. Também estes concluíram que o método mais conservativo, foi o arrefecimento a água.

Ainda na temática dos métodos de arrefecimento, Zhang, Zhu, Kodur, & Li, (2017) estudaram as propriedades residuais de soldaduras realizadas em aço Q345B depois de expostas a vários níveis de temperatura. Importa notar que, neste estudo, os provetes que foram sujeitos a tratamentos térmicos com temperaturas superiores a 400 °C, apresentaram rotura na zona fundida após solicitação em tração. Os autores concluíram que as amostras arrefecidas a água, conservavam melhor as propriedades do aço, sendo isto mais óbvio, para as amostras que foram sujeitas a tratamentos térmicos com temperaturas mais elevadas.

**D.M. Rodrigues et al. (2021)** realizaram um estudo experimental para avaliar e explicar as propriedades mecânicas residuais e modos de falha de ligações soldadas a topo, em aço S355 J2, produzidas pelos processos de soldadura semiautomática GMAW e FCAW, após exposição a elevadas temperaturas.

Nesta investigação, placas de 8 mm de espessura de aço S355 J2 foram usadas como material de base (BM). As placas com dimensões de 150 mm × 750 mm foram cortadas por cisalhamento de uma grande placa laminada a quente e unidas a topo usando os processos semiautomáticos GMAW (Gas Metal Arc Welding ou Soldadura ao Arco Elétrico com Atmosfera de Proteção Gasosa,) e FCAW (Flux-Cored Arc Welding ou Soldadura a Arco Fluxado). Os procedimentos de soldagem foram estabelecidos para garantir a falha no material de base à temperatura ambiente.

Concluíram que a maior degradação tanto do rendimento quanto da resistência última ocorreu para temperaturas na faixa eutetóide, ou seja, entre 700 e 900 °C, e que a temperatura crítica de exposição pode variar de acordo com a composição química dos aços / soldaduras e à duração da exposição ao calor. O aquecimento rápido e as condições de curta exposição podem promover uma diminuição da resistência e um aumento da ductilidade das articulações. No entanto, esse aumento da ductilidade desaparece quando a exposição a alta temperatura é mantida por longos períodos. Deve-se notar também que as recomendações feitas pela BS 5950-8 para a reutilização de aço após o fogo, subestima a perda de resistência ao escoamento, mas superestima ligeiramente a perda de resistência à tração experimentada pelo BM. A dureza na HAZ (zona afetada pelo calor) e FZ (zona de fusão) diminui entre 600 °C e 900 °C de exposição, devido à transformação das estruturas metaestáveis nessas zonas, mas após a exposição de 900 °C, FZ e HAZ têm microestruturas semelhantes à do BM e do a dureza também se torna semelhante. A diminuição da dureza na ZTA após exposição de 600 e 900 °C é responsável pela ruptura nas soldas das juntas FCAW, por valores de alongamento muito baixos. Isso também explica o ligeiro aumento na resistência à tração final e na resistência residual das juntas GMAW, devido a uma distribuição de deformação mais uniforme no corpo de prova.

Em ambos os cortes da Figura 2.28, também é possível observar a FZ, no meio, circundada por uma HAZ composta por várias sub-regiões. A imagem ampliada da região sinalizada na Figura 2.28 (a), que é mostrada na Figura 2.29 (a), permite concluir que as sub-regiões de HAZ correspondem à presença de uma região de granulação grossa (CGHAZ), próxima a o FZ, seguido por uma zona refinada de grãos (FGHAZ).

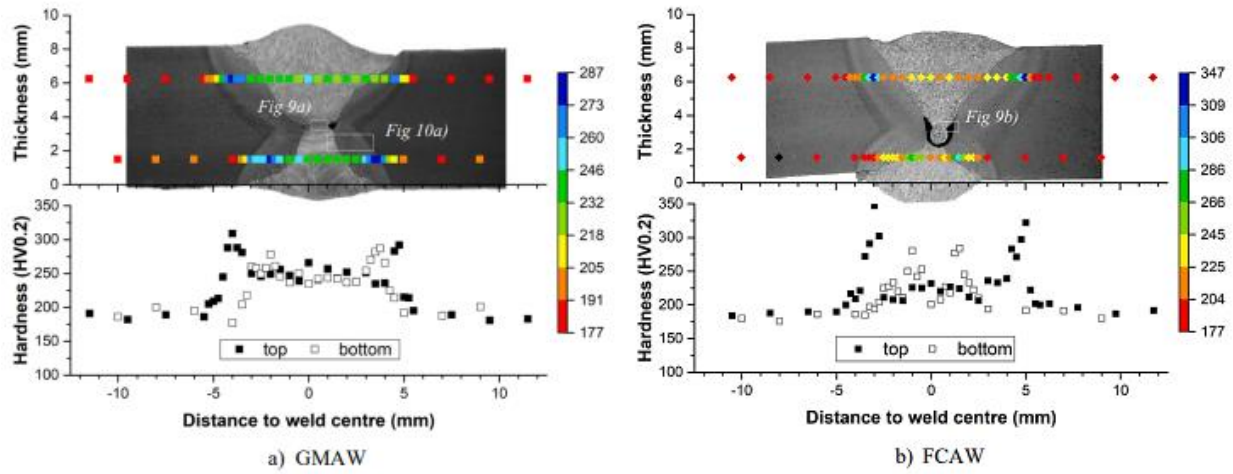


Figura 2. 28 - Seções transversais das juntas GMAW (a) e FCAW (b) e distribuições de dureza nas diferentes regiões das soldaduras. (Fonte: D.M. Rodrigues et al. (2021))

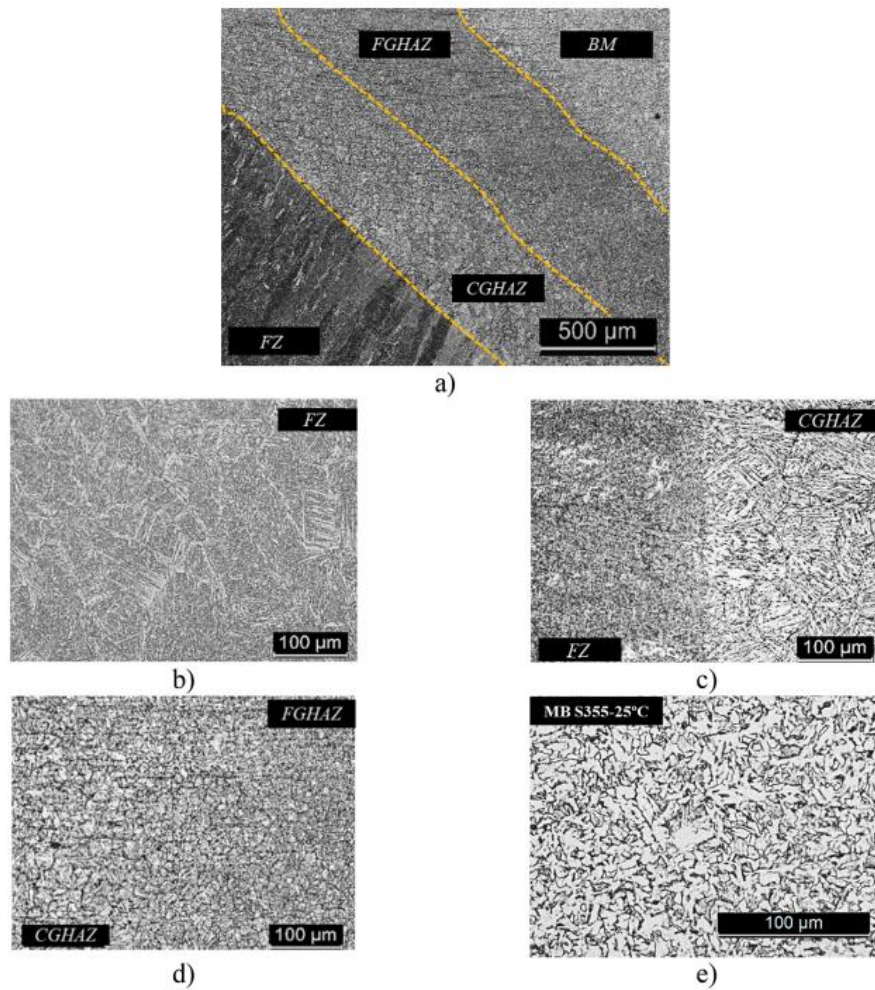


Figura 2. 29- Análise micrográfica da região da articulação GMAW sinalizada na Figura 3.24. (Fonte: D.M. Rodrigues et al. (2021))



A Figura 2.30 compara as microestruturas na condição de recepção e após a exposição ao calor do BM, do FZ da junta FCAW e do CGHAZ da junta GMAW. Comparando as micrografias do BM (Figura 2.30 (a), (d), (g) e (j)), é possível concluir que, entretanto para os corpos de prova expostos a 300 e 600 °C, a microestrutura permaneceu muito semelhante àquela da condição como recebida, apesar de algum engrossamento de grão e precipitação de carboneto ter ocorrido, para os corpos de prova expostos a 900 °C, uma mudança microestrutural muito importante ocorreu, caracterizada pela segregação de carboneto em bandas alinhadas com a direção de laminação das placas. As bandas de carboneto são distribuídas em uma matriz de ferrita primária de granulação grossa, muito diferente da microestrutura de ferrita acicular do material de base recebido.

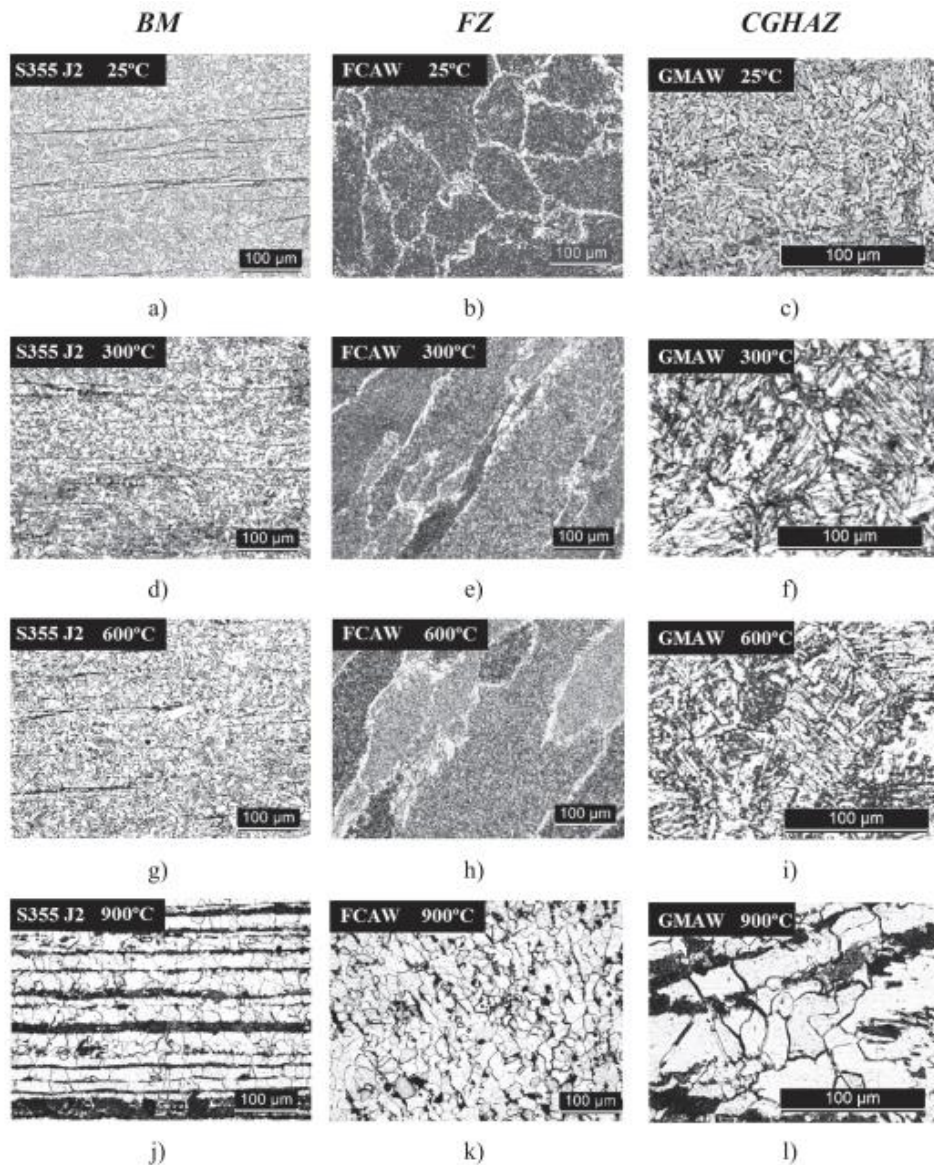


Figura 2. 30- Microestrutura na condição de recepção e após a exposição ao calor do BM (a, d, g, j), FZ da junta FCAW (b, e, h, k) e CGHAZ da junta GMAW (c , f, i, l). (Fonte: D.M. Rodrigues et al. (2021))

Na Figura 2.31 (a) a (c) são comparadas as microestruturas do BM, após as diferentes condições de exposição ao calor. A Figura 2.32 (a) permite concluir que a microestrutura do BM após aquecimento rápido já era completamente diferente daquela da condição de recebimento, o que prova que todas as transformações microestruturais ocorreram para temperaturas inferiores a 900 °C. No entanto, a figura também mostra que aumentar o tempo de manutenção a 900 °C promove o engrossamento progressivo dos grãos e a segregação de carboneto em faixas maiores. As curvas tensão-deformação plotadas na Figura 2.31 (d) mostram que as transformações microestruturais associadas ao rápido aquecimento e curta exposição a 900 °C, apesar de promoverem uma diminuição da resistência, aumentam a ductilidade do aço. No entanto, o aumento da ductilidade desaparece quando a exposição a 900 °C é mantida por longos períodos e as bandas de carboneto se tornam mais espessas e contínuas. A resistência do aço também diminui, quando o tempo de exposição aumenta, como resultado do engrossamento do grão.

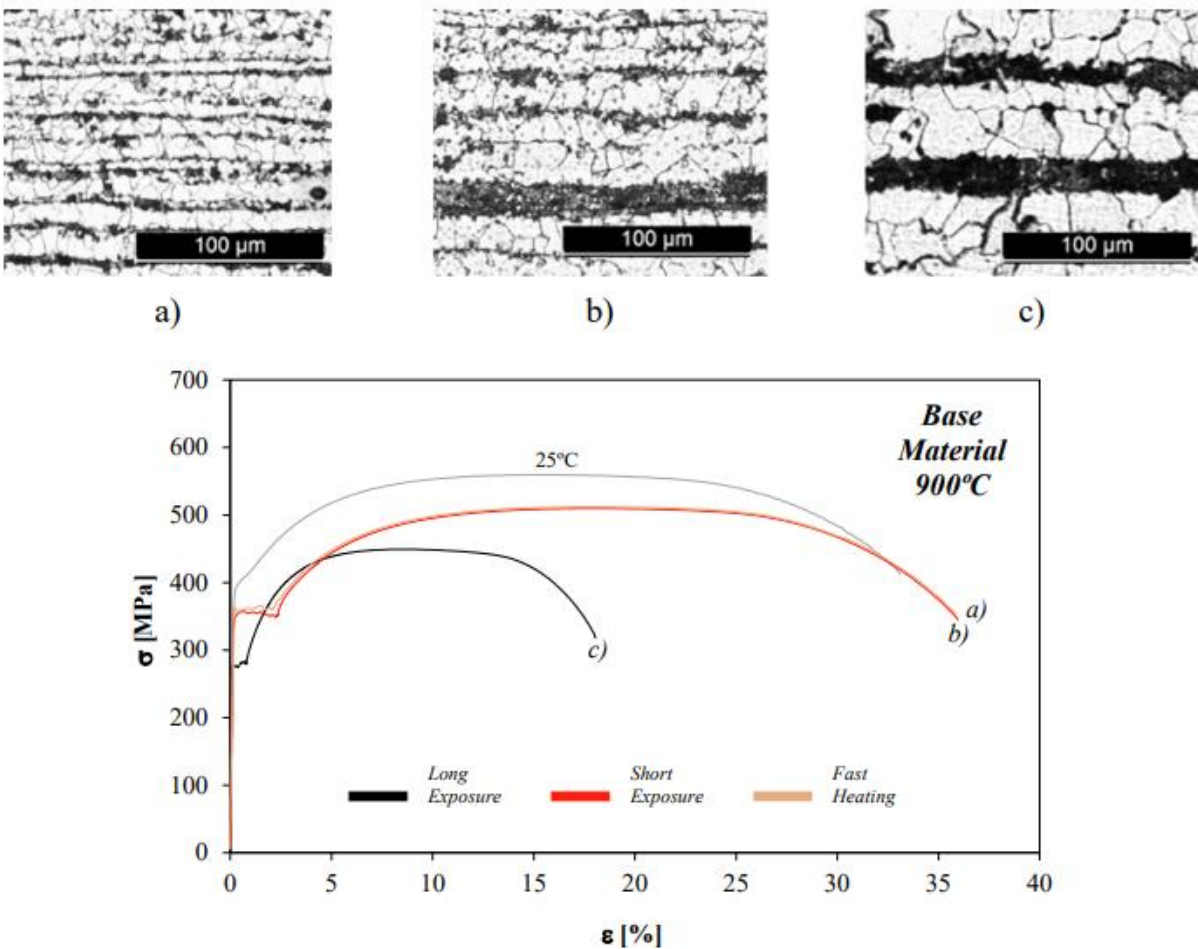


Figura 2. 31- Microestrutura do BM, após rápido aquecimento (a) e curta (b) e muito longa exposição (c) a 900 °C. (d) Curvas tensão-deformação para as amostras em a), b) e c). (Fonte: D.M. Rodrigues et al. (2021))

Após a análise do estado da arte é possível afirmar que o comportamento dos aços a temperaturas elevadas depende da classe do aço. Para além disto, as diferenças entre os fatores de redução obtidos para os diversos aços, nos diferentes trabalhos, e os propostos pelo EC 3, é comum a vários trabalhos. No caso das soldaduras após fogo, não foi possível fazer essa comparação, pois a norma não fornece fatores de redução para esta situação. Também é possível concluir que, mesmo que uma determinada estrutura não ceda durante um incêndio, deve ser feita uma avaliação à mesma. A estrutura pode não apresentar problemas de capacidade de carga, mas o incêndio poderá ter danificado o revestimento, sistemas de proteção da mesma ou ter causado deformações severas.

## 2.5 COMPORTAMENTO MECÂNICO À TEMPERATURA AMBIENTE

### 2.5.1 Metal Base S355J2

A caracterização à temperatura ambiente é necessária, para que se possa ter um termo de comparação para as análises seguintes. Esta avaliação assenta na realização de ensaios de tração, ensaios de dureza e análises metalográficas. Na Figura 2.32 estão representadas as curvas tensão-deformação convencionais, para os aços S355 J2 e para o aço S460.

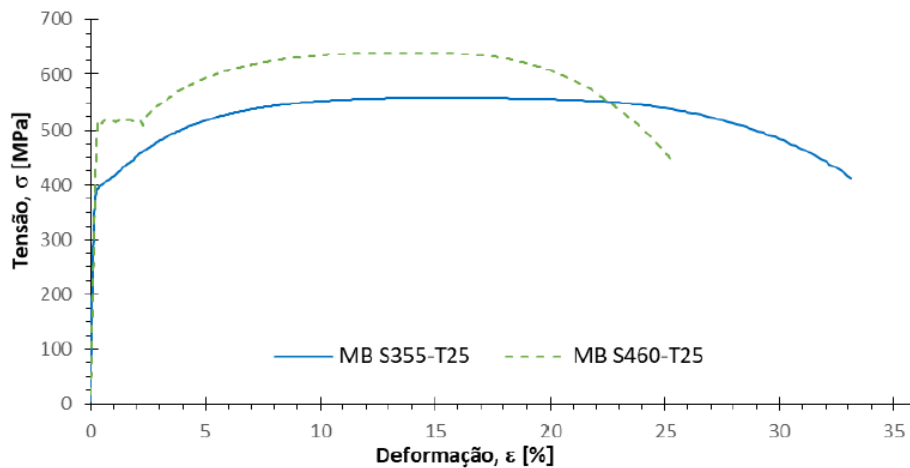


Figura 2. 32- Curvas tensão-deformação de ambos os materiais base sem tratamento térmico. (Fonte: Fernandes, Pedro “Comportamento Mecânico de Soldaduras em Aço em Tração a Temperaturas Elevadas”, fevereiro 2020)

Na tabela 2.20, descreve-se as propriedades do aço utilizado no presente estudo. Note que “ $\epsilon_{\text{constante}}$ ” representa a deformação até à tensão máxima.

Tabela 2. 20 – Propriedades mecânicas do material base à temperatura ambiente

	$\sigma_0$ [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{constante}}$ [%]	$\epsilon_{\text{total}}$ [%]
MB 355-T25	400	560	14.68	33.11

Na Figura 2.33, estão representadas as curvas tensão deformação para o aço S355 J2 após tratamento térmico. São também representadas as curvas de comportamento à temperatura ambiente, para que se possa analisar o efeito do aumento da temperatura.

Examinando as curvas, do aço S355 J2, para o tratamento T300, quando comparadas com a curva nominal, observa-se um acréscimo de 28% no que diz respeito à tensão limite elástica e um acréscimo para a tensão máxima. Para o tratamento T600, a tensão máxima apresenta-se similar, mas observa-se um aumento de cerca de 20% da tensão limite elástica. Para além disto, também é observável uma diminuição significativa da ductilidade do material.

De um modo genérico, para temperaturas suficientemente elevadas, os tratamentos térmicos deste tipo, parecem afetar significativamente as propriedades destes aços, destacando a tensão limite elástica, a tensão máxima e a ductilidade do material.

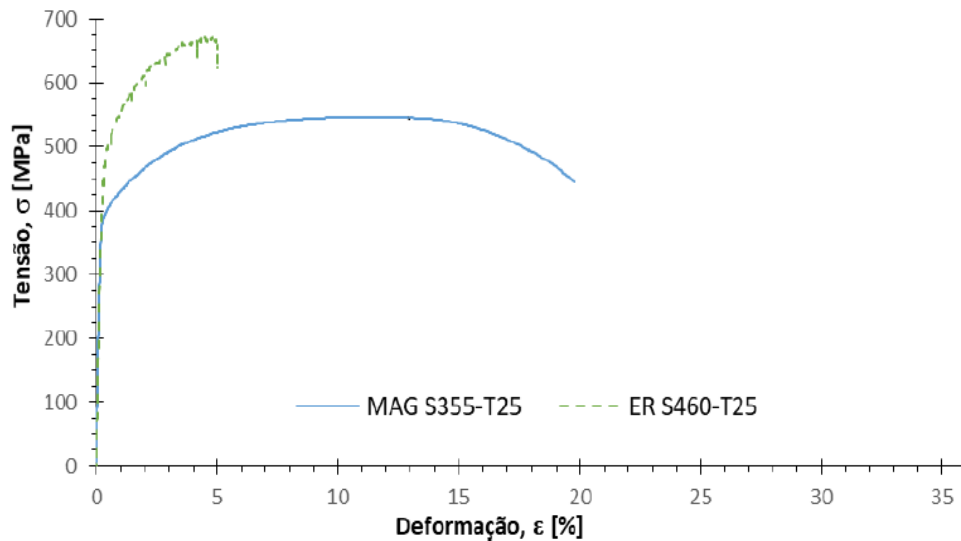


Figura 2. 33- Curvas tensão-deformação para as soldaduras com MAG em aço S355 J2 e com elétrodo revestido (ER) em aço S460 sem tratamento térmico. (Fonte: Fernandes, Pedro “Comportamento Mecânico de Soldaduras em Aço em Tração a Temperaturas Elevadas”, fevereiro 2020)

## CAPÍTULO 3

### 3.1 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Este capítulo trata da descrição detalhada da análise experimental levada a cabo no Laboratório de Ensaios de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra que consistiu na realização de ensaios de tração em regime transiente, em provetes de aço de classe S355 J2, conforme recomendações da norma EN ISO 6892-1 e 2.

Na tabela 3.1 e 3.2 é possível observar a composição química do aço S355 J2 e as suas características mecânicas a temperatura ambiente, respetivamente.

Tabela 3. 1 – Composição química do aço S355. (Fonte: EN 10025-2)

Designação		Método de desoxidação	C em % máx. para a espessura nominal do produto em mm			Si % Máx.	Mn % Máx.	P % Máx.	S % Máx.	N % Máx.	Cu % Máx.	Outros % Máx.
Segundo EN10027-1 e CR10260	Segundo EN10027-2	b	≤16	>16 e ≤40	>40 <sup>c</sup>			d	d e	f	g	h
S355J2	1.0577	FF	0,20 <sup>j</sup>	0,20 <sup>k</sup>	0,22	0,55	1,60	0,025	0,025	-	0,55	-

Tabela 3. 2 – Características mecânicas a temperatura ambiente. (Fonte: EN 10025-2)

Designação		Tensão de cedência superior mínima R <sub>eH</sub> [MPa]									Tensão de rotura R <sub>m</sub> [MPa]					
		Espessura nominal [mm]									Espessura nominal [mm]					
		≤16	>16 ≤40	>40 ≤63	>63 ≤80	>80 ≤100	>100 ≤150	>150 ≤200	>200 ≤250	>250 ≤400	<3	≥3 ≤100	>100 ≤150	>150 ≤250	>250 ≤400	
Segundo a EN 10027-1 e CR 10260	Segundo EN 10027-2	355	345	335	325	315	295	285	275	- 265	510 a 680	470 a 630	450 a 600	450 a 600	- 450 a 600	
S355J2	1.0577	Percentagem mínima de extensão após rotura %														
		Orientação Do Provete	L <sub>0</sub> = 80 mm Espessura nominal [mm]					L <sub>0</sub> = 5.65√S <sub>0</sub> Espessura nominal [mm]								
			≤ 1	> 1 ≤ 1.5	> 1.5 ≤ 2	> 2 ≤ 2.5	> 2.5 ≤ 3	≥ 3 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 250	> 250 ≤ 400			
t	12	13	14	15	16	20	19	18	18	17	17					



### 3.1.1 Protocolo Experimental

Os procedimentos adotados nos ensaios para a determinação das propriedades mecânicas a elevadas temperaturas seguiram os procedimentos básicos definidos na EN ISO 6892-1. Tratando-se de um ensaio realizado em regime transiente foram adotados os seguintes procedimentos: o provete de ensaio deve ser submetido uma carga constante, mantida nesse patamar sob um aumento de temperatura, aquecido até à ruptura; o provete não deve exceder a carga requerida durante o seu aquecimento; o extensómetro deve ser zerado antes do início do ensaio; a força aplicada durante o ensaio deve garantir que o comprimento de medida do provete se mantenha submetido apenas a esforço axial para prevenir a flexão e a torção; os provetes de ensaio devem ser suportados por meios adequados tais como cunhas, apertos aparafusados e apertos através de uma mandíbula.

O sistema experimental utilizado para a caracterização das propriedades mecânicas engloba, um sistema para aplicação do carregamento mecânico (máquina universal de ensaios SERVOSIS), um sistema para aplicação da ação térmica (forno elétrico tubular do tipo split) e um sistema para monitorização das extensões (extensómetro de elevadas temperaturas Epsilon HI3548 conectado a um sistema de aquisição de dados Data logger TDS 530) do provete.

O sistema para aplicação do carregamento mecânico é constituído por uma prensa da SERVOSIS modelo MUE404/100 com capacidade 100 toneladas (Figura 3.1(1)). Para medir a extensão do provete ao longo do ensaio foi usado um extensómetro de altas temperaturas “Epsilon model HI3548” (Figura 3.1(5)), acoplado diretamente ao provete.

No decorrer dos ensaios a temperaturas elevadas foi usado um sistema de refrigeração Epsilon Caron 2050 model (Figura 3.1(6)), por forma a proteger o extensómetro. Em todos os ensaios foram monitorizadas temperaturas, deslocamentos e força de tração através de um Data logger, modelo TDS-530 (Figura 3.1(2))

O sistema de aplicação da ação térmica consiste num forno tubular elétrico (Figura 3.1(4)), e num instrumento de programação da potência com controladores EURO THERM (Figura 3.1(3)). O instrumento de programação da potência é constituído por dois monitores da EURO THERM, um para as resistências superiores e outro para as resistências inferiores no interior do forno, que permitem o controlo da temperatura de ensaio desejada.

O forno utilizado nos experimentos em que os provetes foram submetidos a altas temperaturas também da Servosis com capacidade de temperatura máxima de 1100°C, composta por duas garras que traciona o provete.

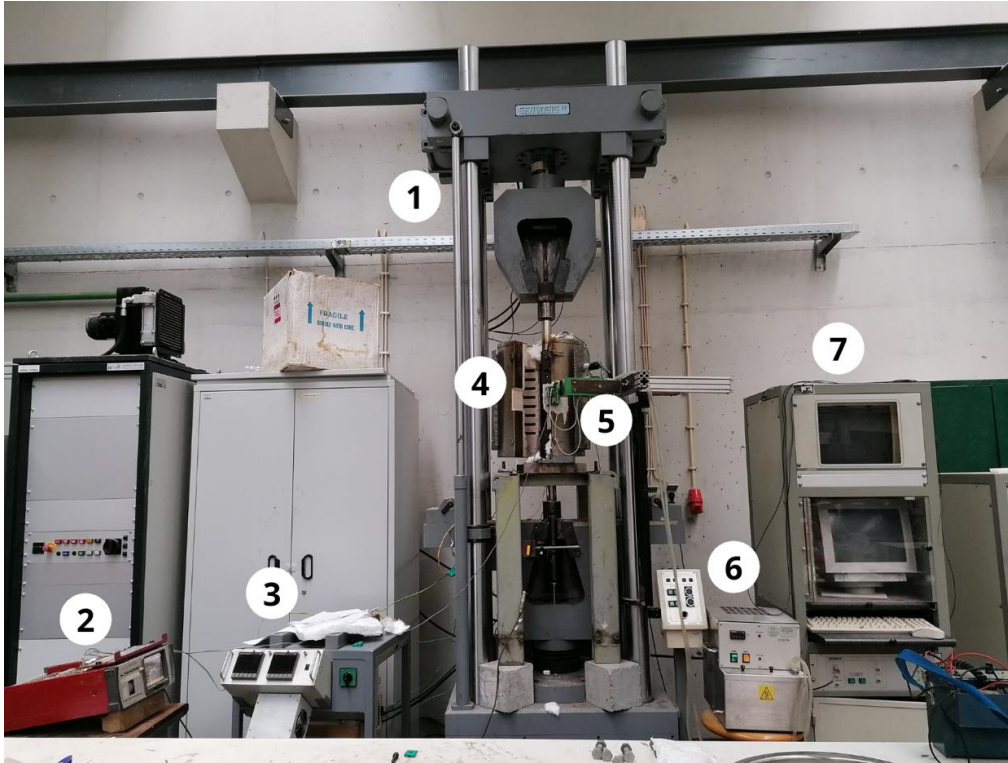


Figura 3.1 - Sistema experimental utilizado (Fonte: Autor)

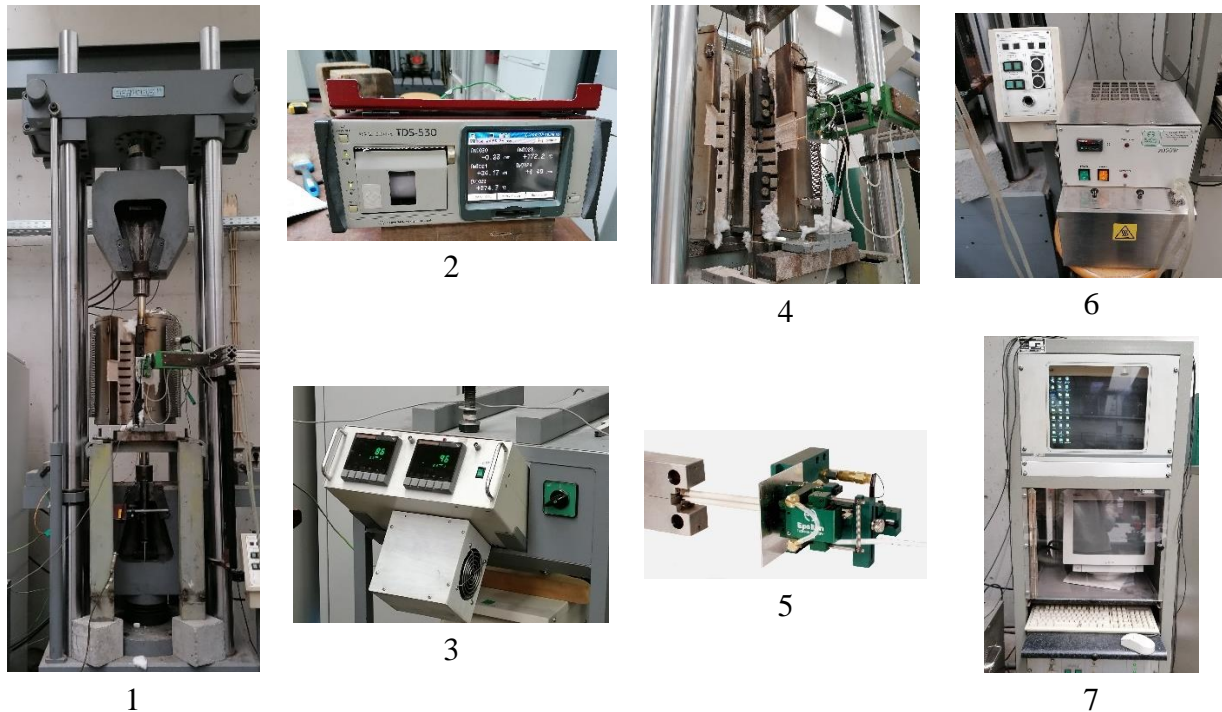


Figura 3.2 – 1) SERVOSIS modelo MUE404/100; 2) Data Logger, modelo TDS-530; 3) EUROTHERM temperature controller; 4) Forno tubular elétrico; 5) Extensômetro de elevadas temperaturas Epsilon HI3548; 6) sistema de refrigeração Epsilon Caron 2050 modelo; 7) Monitores SERVOSIS (Fonte: Autor)

O sistema de fixação das amostras à prensa mecânica foi projetado respeitando as dimensões internas do forno, já que a peça devia estar completamente envolvida pelo aparelho durante todo o ensaio e foi baseado no arranjo sugerido pela EN ISO 6892, sendo composto por dois conjuntos simétricos (fixação da parte superior e fixação da parte inferior da amostra).

Todos os itens integrantes do sistema de ligação foram fabricados sob medida de forma a garantir uma fixação adequada do provete à máquina de ensaio mecânico. Para isso, foi necessário obter um encaixe bem centralizado da peça em relação ao equipamento de tração, para que a carga fosse aplicada da forma mais centrada possível, evitando qualquer tipo de distorção da amostra durante o ensaio mecânico. A Figura 3.3 apresenta imagens mais ampliadas do forno aberto e fechado.



Figura 3. 3 – Forno elétrico: a) Fechado; b) Aberto. (Fonte: Autor)

### 3.1.2 Provetes de ensaio

A figura 3.4 apresenta a geometria e dimensões dos provetes de ensaio.

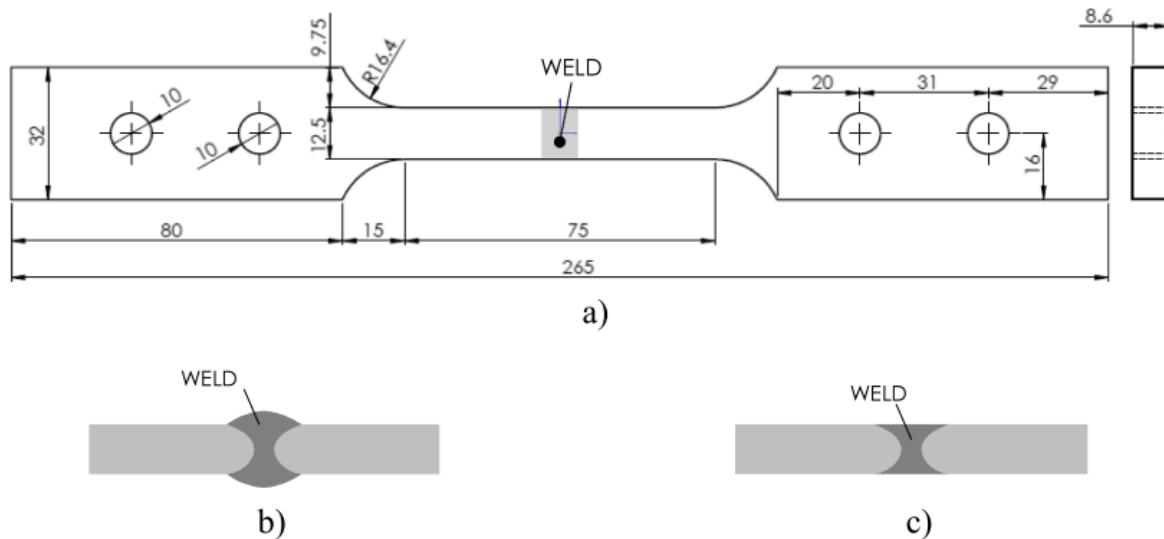


Figura 3. 4 – a) Geometria e dimensões dos provetes de ensaio, b) Geometria de seção transversal como soldada; c) Geometria de seção transversal constante. (Fonte: D.M. Rodrigues et al.,2021)

Para conseguir acoplar o provete às garras, foram feitos dois furos nas duas extremidades do provete com 10 mm de diâmetro (Figura 3.4). O recurso a dois furos em cada extremidade deve-se à prevenção de fenómenos de rotura localizada e garantir um aperto bem ajustado aos dispositivos de fixação da máquina de ensaios de tração. Devido às altas temperaturas a que o provete precisava de estar sujeito, foram usadas garras em aço refratário (Figura 3.5a) que permite oscilações de temperaturas sem danos no material. Para mitigar efeitos de escorregamento entre as varetas e o provete durante o ensaio, foi colocada massa refratária, resistente a temperaturas até 1500°C, nas zonas de contacto entre as varetas e o provete (Figura 3.5b). Foi realizado um ensaio para cada valor de carga, totalizando assim 14 experimentos. Estes provetes foram nomeados individualmente de acordo com a ordem ensaiada e o valor de carga utilizado em cada ensaio. Alguns provetes utilizados nos ensaios podem ser vistos na Figura 3.5c.



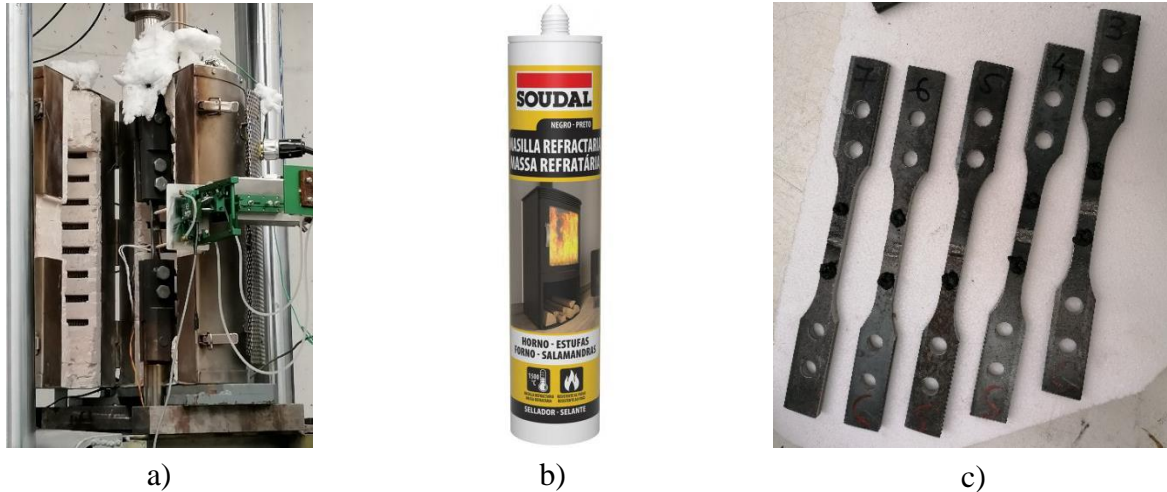


Figura 3. 5 - a) Garras de aço refratário usadas no desenvolvimento dos ensaios de tração; b) Massa refratária; c) Ilustração de alguns provetes utilizados nos ensaios. (Fonte: Autor)

Antes do início de cada ensaio, foram medidas as dimensões correspondentes à largura (b) e à espessura dos provetes com o auxílio de um micrômetro. Por forma a determinar o valor médio da área do provete, foram feitas medições em três pontos ao longo do comprimento do provete determinando a espessura e altura para todos os provetes ensaiados, pois, observou-se inicialmente não serem todos iguais. Realizaram-se medições em duas situações independentes e não menos importantes, antes da colocação do provete no sistema de ensaio e depois de ensaiado. A figura 3.4 representa os pontos medidos do provete.



Figura 3. 6 – Pontos medidos ao longo do comprimento do provete. (Fonte: Autor)

Estas dimensões foram usadas no cálculo das áreas das seções transversais dos provetes, as quais serviram como base para análise de tensões possibilitando, posteriormente, o traçado das curvas tensão-deformação-temperatura de cada provete considerado. As dimensões dos provetes (espessura e largura), medidas com o micrômetro, e respectivos valores de carga estão apresentados na Tabela 3.3.

Foram realizados ensaios em regime transiente para catorze (14) patamares de tensões instaladas. Os patamares de tensão instalados no provete no começo do ensaio são percentagem da tensão de cedência. Esta decisão não é exigida para este tipo de ensaio; foi adotada esta metodologia por ser a mais utilizada pelos autores consultados no desenvolvimento deste trabalho. A tensão de cedência usada para definir as tensões pré-instaladas foi de 400MPa. Assim sendo, os valores de tensão utilizados para o aço S355 encontram-se também na Tabela 3.3. A tabela está organizada por ordem crescente do valor de tensão pré-instaladas.

Tabela 3. 3 - Dimensões dos provetes ensaiados (espessura e largura), medidas com o micrômetro, e valores de tensões.

#	<b>b</b> [mm]	<b>h</b> [mm]	<b>A</b> [mm <sup>2</sup> ]	<b>%f<sub>y</sub></b>	<b>σ</b> [MPa]	<b>Carga</b> [kN]
10	8.02	12.59	100.97	10%	40	4.04
7	7.92	12.52	99.16	15%	60	5.95
8	7.95	12.52	99.53	25%	100	9.95
11	7.95	12.45	98.98	35%	140	13.86
4	8.03	12.62	101.34	45%	180	18.24
5	7.91	12.46	98.56	55%	220	21.68
6	7.9	12.49	98.67	65%	260	25.65
3	8.02	12.65	101.45	75%	300	30.44
2	7.99	12.59	100.59	85%	340	34.20
12	7.92	12.47	98.76	90%	360	35.55
9	7.92	12.58	99.63	95%	380	37.86
1	8.04	13.02	104.68	100%	400	41.87
13	7.96	12.65	100.69	110%	440	44.31
14	7.96	12.65	100.69	120%	480	48.33

*Nota: São apresentados apenas os valores médios da espessura e largura dos provetes.*

## 3.2 RESULTADOS E COMPARAÇÕES

Serão apresentados e comentados os estados finais dos provetes ensaiados. Posteriormente, são destacadas as curvas tensão-extensão-temperatura correspondentes a cada experimento e calculados os fatores de redução das propriedades mecânicas de acordo com os resultados obtidos. Também são explicitadas as comparações com os trabalhos de diferentes autores e as normas citadas nas referências bibliográficas.

### 3.2.1 Modos de rutura

A Figura 3.7 apresenta os provetes após o término dos ensaios de tração, correspondentes a cada valor de tensão. Nota-se que em alguns provetes no ponto de ruptura sofreram um estreitamento maior em relação aos outros provetes, ou seja, estes provetes deformaram-se mais antes de romper. O modo de ruptura deu-se, para todos os provetes, na zona antes da solda.



Figura 3.7 - Ilustração dos provetes, correspondente a cada temperatura, após término dos ensaios (Modos de rutura dos ensaios em regime transiente - S355). (Fonte: Autor)

Na tabela 3.4 é possível observar o tempo que cada provete levou até à ruptura. Nos ensaios cujos provetes foram submetidos a cargas superiores a tensão de cedência, o tempo decorrido durante o teste de tração foi de aproximadamente 48 minutos, ou seja, os provetes levaram menos tempo para romper quando submetidos a tensões mais elevadas.

Tabela 3. 4 – Tempo decorrido para ruptura dos provetes ensaiados

<b>Provete #</b>	<b>%f<sub>y</sub></b>	<b>σ [MPa]</b>	<b>Carga [kN]</b>	<b>Tempo [min]</b>
10	10%	40	4.04	88
7	15%	60	5.95	83
8	25%	100	9.95	66
11	35%	140	13.86	58
4	45%	180	18.24	63
5	55%	220	21.68	64
6	65%	260	25.65	58
3	75%	300	30.44	51
2	85%	340	34.20	55
12	90%	360	35.55	63
9	95%	380	37.86	44
1	100%	400	41.87	54
13	110%	440	44.31	48
14	120%	480	48.33	47

### 3.2.2 Curvas temperatura-extensão

Para melhor análise dos resultados foi feita uma plotagem de todos os gráficos. Os gráficos dos dados recolhidos nos ensaios em regime transiente são fornecidos na Figura 3.8. Deste gráfico pode-se verificar que existe um patamar inicial onde se submete o provete à carga pretendida, a temperatura ambiente. De seguida, existe um regime próximo da linearidade onde a extensão aumenta com o aumento da temperatura. Posteriormente, existe uma fase onde se verifica uma acentuada quebra das propriedades mecânicas do aço, onde a extensão tem um aumento substancial para um intervalo relativamente baixa de temperatura. A rotura do material dá-se para extensões relativamente baixas, evidenciando um aço com comportamento frágil, não assumindo grandes deformações antes da rotura.



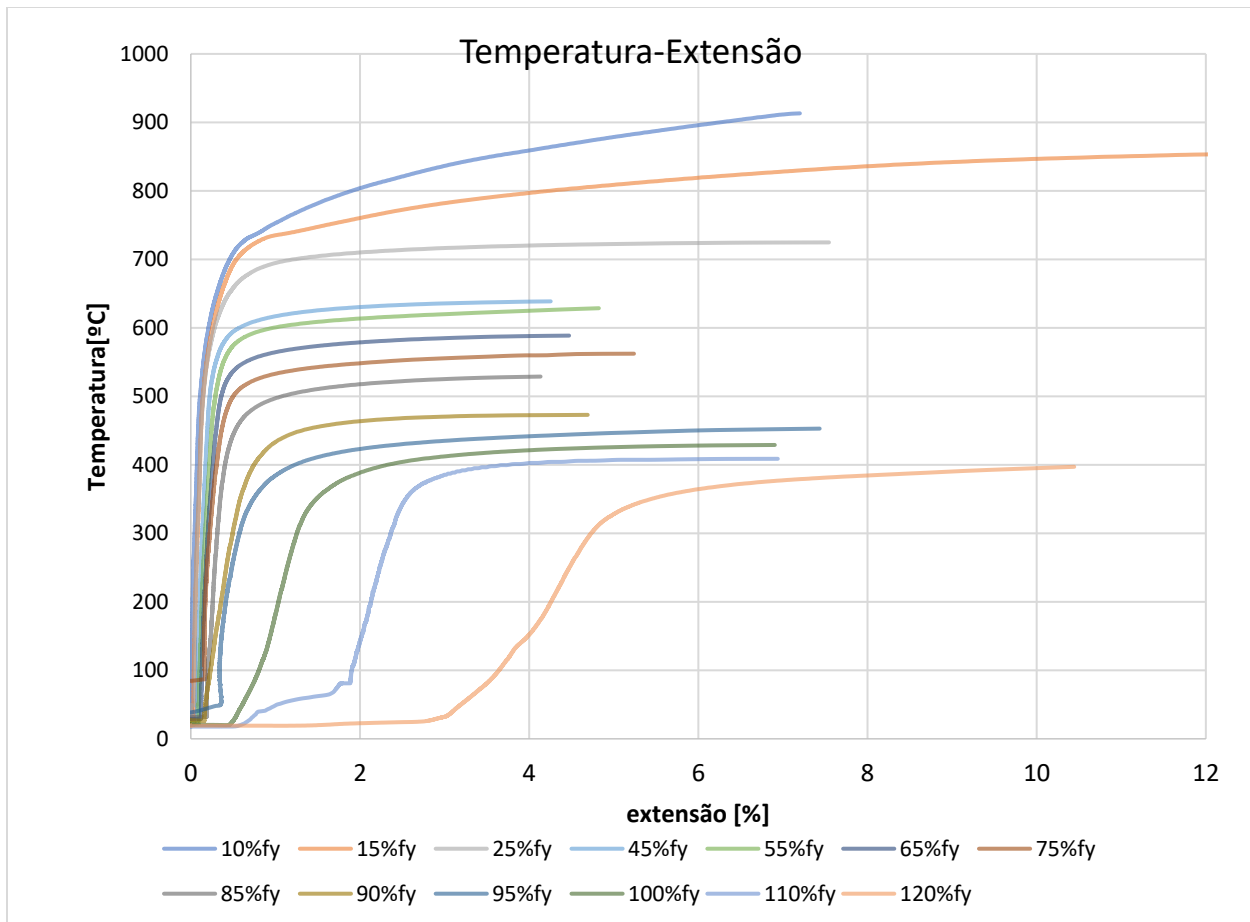


Figura 3. 8 - Gráfico Temperatura-Extensão fornecido por cada ensaio em regime transiente – S355 J2. (Fonte: Autor)

### 3.2.3 Curvas tensão-extensão

A construção da curva tensão-extensão associada a cada temperatura é feita determinando a extensão a uma dada temperatura (20°C – 900°C) para todos os patamares de tensão ensaiados. Desta forma, o rigor da curva tensão-extensão (Figura 3.9) é proporcional à quantidade de tensões pré-instaladas ensaiadas.

Observa-se que o aumento da deformação do aço não apresenta um comportamento linear, apresentando diversas oscilações, sendo que para 700°C há um aumento considerável da extensão e posteriormente uma diminuição para a temperatura de 800°C e novamente um aumento aos 900°C.

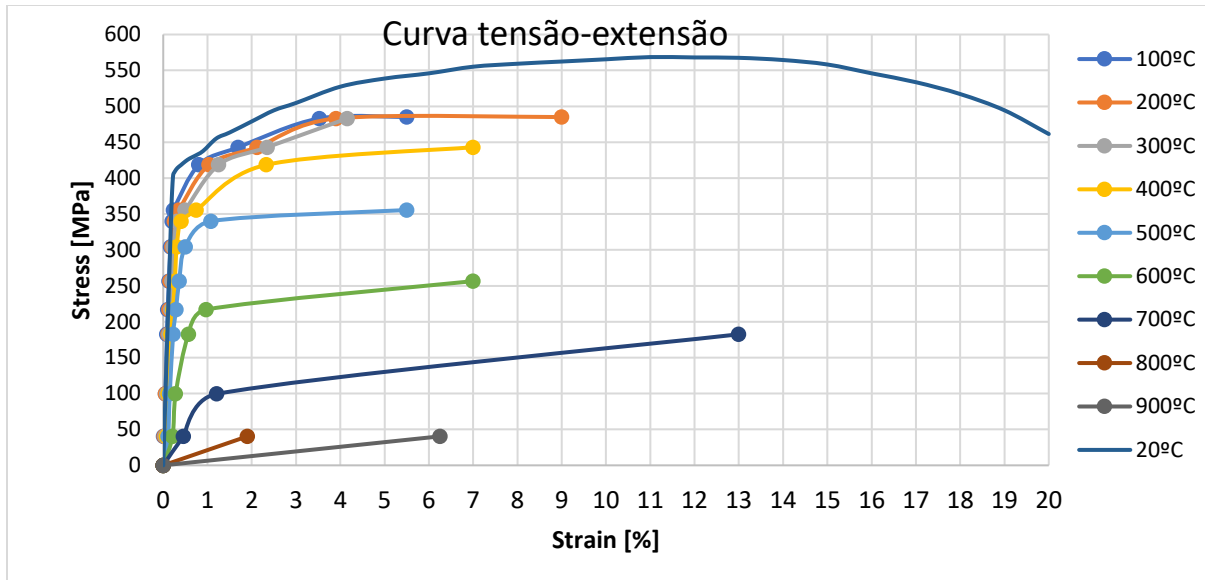


Figura 3. 9 - Curvas tensão-extensão obtidas nos ensaios em regime transiente - S355. (Fonte: Autor)

Da figura, observa-se que o aumento da deformação do aço não apresenta um comportamento linear, apresentando diversas oscilações, sendo que para 700°C há um aumento considerável da extensão e posteriormente uma diminuição considerável para as temperaturas acima.

### 3.2.4 Fatores de Redução da Tensão de Cedência ( $K_{y,\theta}$ )

Da análise da curva tensão-extensão à temperatura ambiente foi determinada a tensão de cedência. O método que reúne maior consenso entre os diversos autores para determinar este parâmetro é estudar a interceção entre uma reta paralela ao módulo de elasticidade com ponto inicial na abcissa correspondente a 0.2% de extensão (Figura 3.10). Também foi estudada a tensão de cedência associadas à extensão de 0.5%, 1.5% e 2.0%.

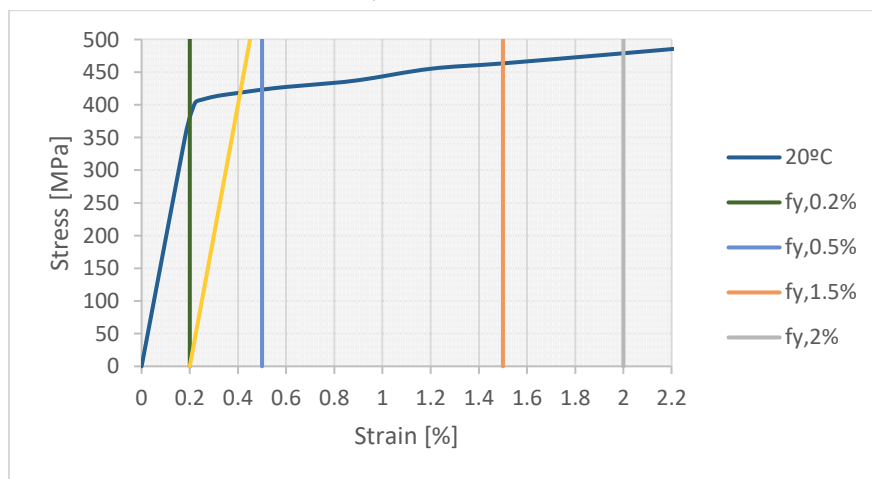


Figura 3. 10 – Determinação da tensão de cedência

Por forma a realizar uma análise mais detalhada, estudaram-se os fatores de redução relativos à tensão de cedência associados às diversas extensões supracitadas anteriormente ( $f_{y0.2\%,\theta}$ ,  $f_{y0.5\%,\theta}$ ,  $f_{y1.5\%,\theta}$ ,  $f_{y2.0\%,\theta}$ ). Pode-se verificar na Tabela 3.5 os fatores de redução calculados para o aço S355 para regime transiente.

Tabela 3. 5- Fatores de redução S355 - Regime Transiente

$\Theta$ [°C]	Fatores de Redução Tensão de Cedência $k_{y,\theta}$				
	0,20%	0,50%	1,50%	2,00%	Média
	$f_{y,\theta}/f_{y20}$	$f_{y,\theta}/f_{y20}$	$f_{y,\theta}/f_{y20}$	$f_{y,\theta}/f_{y20}$	$f_{y,\theta}/f_{y20}$
20	1	1.01	1.11	1.14	1.066
100	0.92	0.93	1.01	1.07	0.985
200	0.87	0.87	0.99	1.02	0.938
300	0.84	0.85	0.98	1.01	0.920
400	0.83	0.83	0.95	0.97	0.897
500	0.76	0.72	0.83	0.84	0.788
600	0.48	0.39	0.54	0.55	0.491
700	0.24	0.12	0.25	0.25	0.213
800	0.10	0.04	0.09	0.11	0.087

Nesta tabela é possível visualizar que à temperatura de 100°C as extensões de 1.5% e 2.0% apresentam fatores de redução superiores a um, que correspondem a valores de resistência superiores aos obtidos à temperatura ambiente, assim como à temperatura de 300°C para extensões de 2.0%. A Figura 3.11 representa graficamente os fatores de redução da tensão de cedência obtidos experimentalmente.

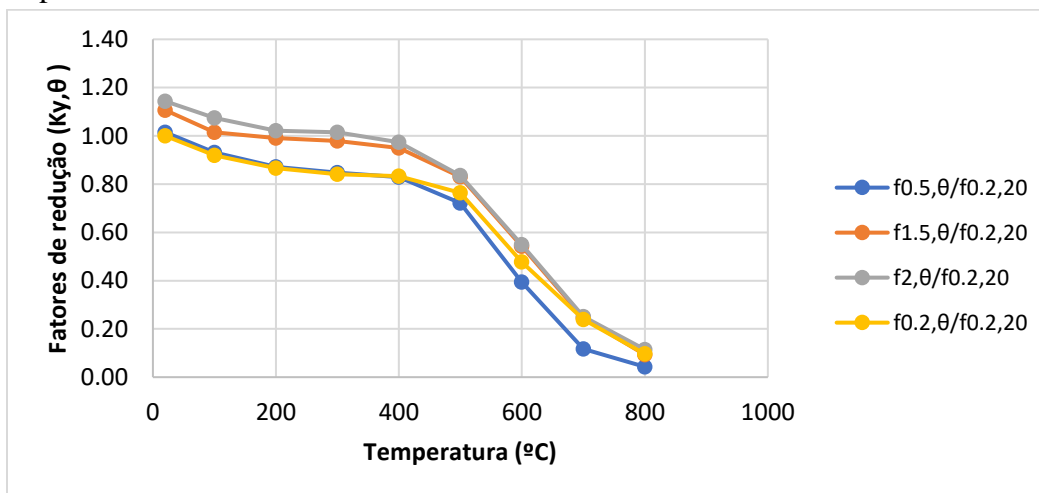


Figura 3. 11 – Fatores de redução  $K_{y,\theta}$  obtidos. (Fonte: Autor)

### 3.2.5 Comparação dos resultados obtidos com as diversas normas

Os resultados obtidos experimentalmente foram confrontados com algumas normas, a EN 1993-1-2 (2010), BS 5950 – Parte 8 (1990) e AS 4100 (1998). A norma britânica (BS 5950-8) é a única que apresenta fatores de redução específicos para aço enformado a frio, no entanto apenas apresenta valores para a tensão de cedência associados a extensões de 0.5%, 1.5% e 2%. A norma europeia (EN 19931-2, 2010) propõe os mesmos fatores de redução de aços laminados a quente de classe 4 para aço enformado a frio, facto que se revela pouco consensual entre os autores (Outinen, 2004; Li, 2017).

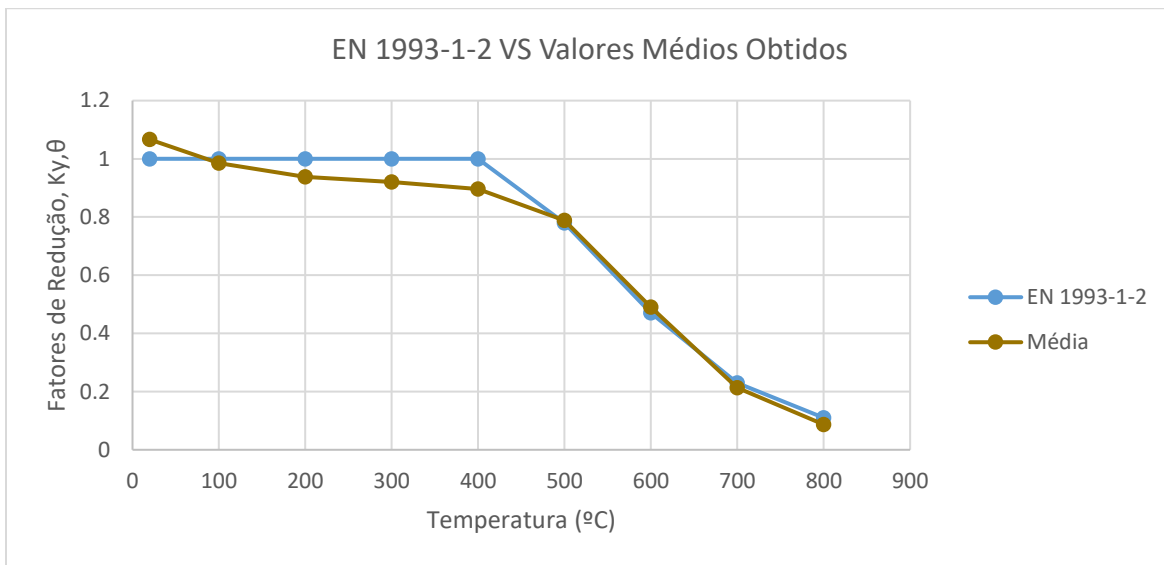


Figura 3. 12 – Comparação dos valores médios dos fatores de redução obtidos com a norma EN 1993-1-2

Da figura 3.12 podemos constatar uma semelhança entre a curva dos fatores de redução da tensão de cedência relativa ao aço em estudo associados à média das extensões obtidas e a curva preconizada pela NP EN 1993-1-2:2010 (2010) para aços laminados a quente da classe 4 utilizada. Nota-se que os fatores de redução obtidos são inferiores aos da norma até uma temperatura de 500°C, após esta temperatura a curva é muito semelhante.

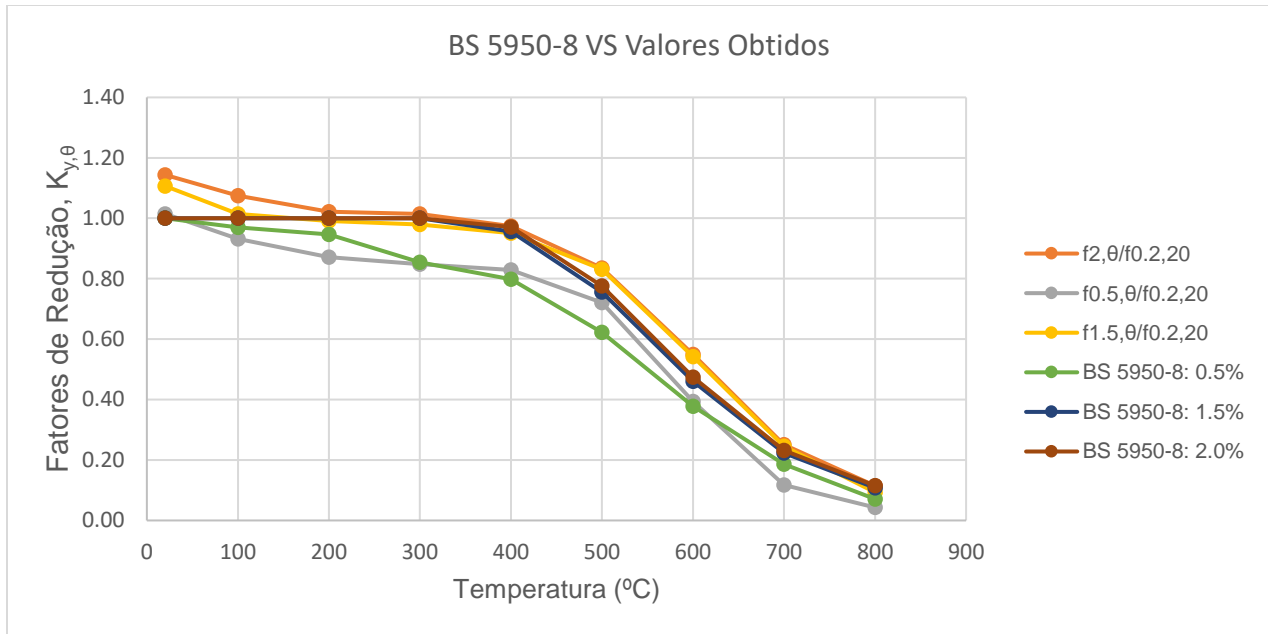


Figura 3.13 – Comparação dos fatores de redução obtidos com a norma BS 5950-8

De forma detalhada, na Figura 3.13 podemos constatar uma semelhança entre a curva dos fatores de redução da tensão de cedência relativa ao aço em estudo associados a extensões de 1.5 e 2.0% e a curva preconizada pela norma britânica BS 5950-8.

Nota-se variações para as curvas dos fatores de redução da tensão de cedência relativa ao aço em estudo associados à extensão de 0.5% a curva preconizada pela norma britânica BS 5950-8. Até 300°C os valores obtidos são inferiores à norma, entre 300°C – 600°C os valores obtidos são superiores à norma, e acima de 600°C os valores obtidos voltam a ser inferiores à norma BS 5950-8. Em relação aos valores médios obtidos e os valores médios da norma britânica (Figura 3.14) as curvas assemelham-se.

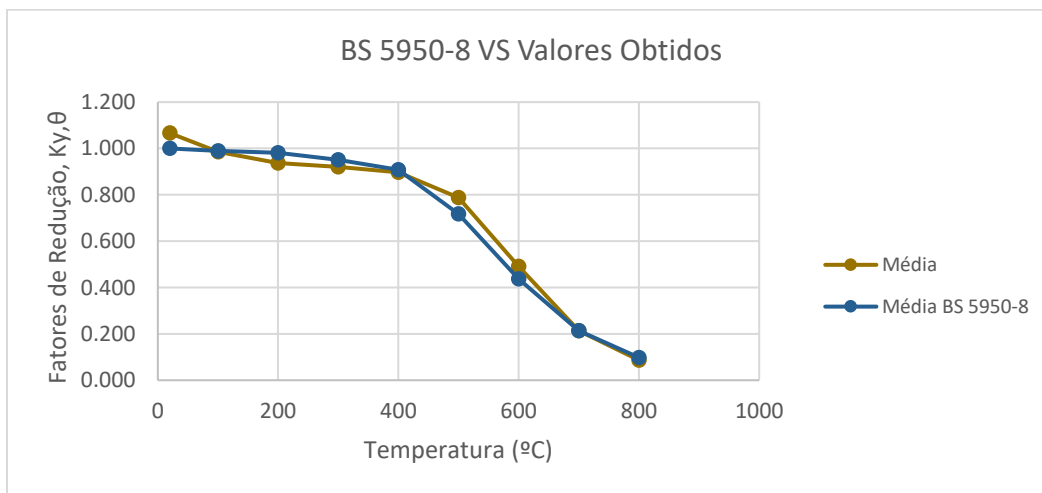


Figura 3.14 – Comparação entre os valores médios dos fatores de redução obtidos com a norma BS 5950-8

A figura 3.15 representa a curva dos valores médios dos fatores de redução obtidos e os valores médios dos fatores de redução da norma BS 5950-8. Nota-se que a curva é semelhante, entretanto apresenta algumas variações, até 400°C os fatores de redução obtidos são inferiores à norma e de 400°C-700°C apresenta valores superiores à norma. Acima de 700°C são semelhantes.

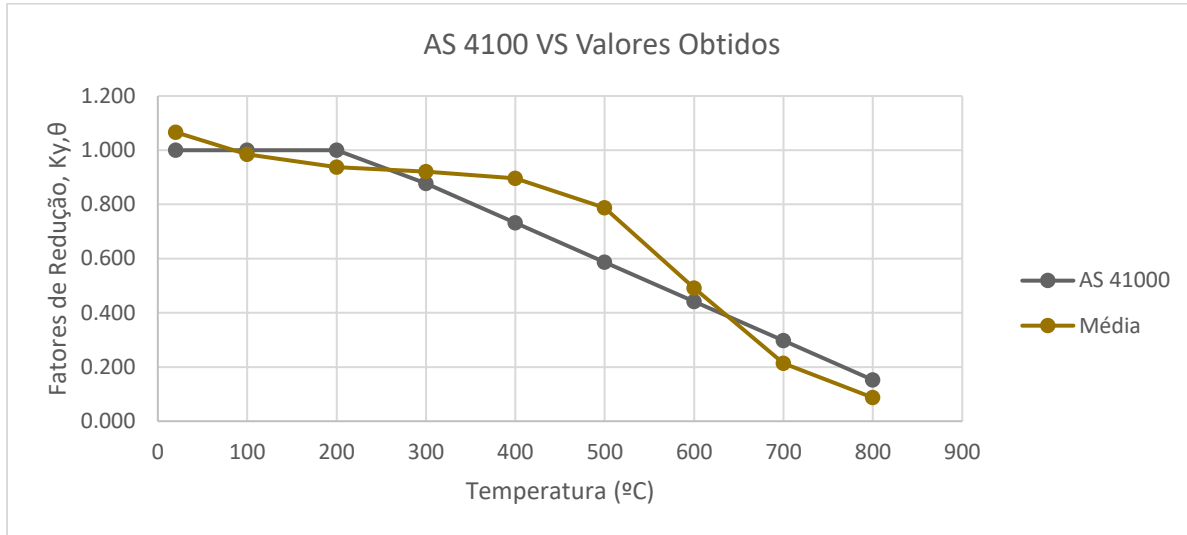


Figura 3. 15 – Comparação entre os valores médios dos fatores de redução obtidos com a norma americana AS 4100

A norma americana AS 4100 apresenta valores conservativos, não existindo qualquer semelhança em relação aos valores obtidos experimentalmente.

### 3.2.6 Comparação dos resultados obtidos com bibliografia existente

A Figura 3.16 apresenta os resultados obtidos dos fatores de redução da tensão de cedência em comparação com outros estudos realizados.

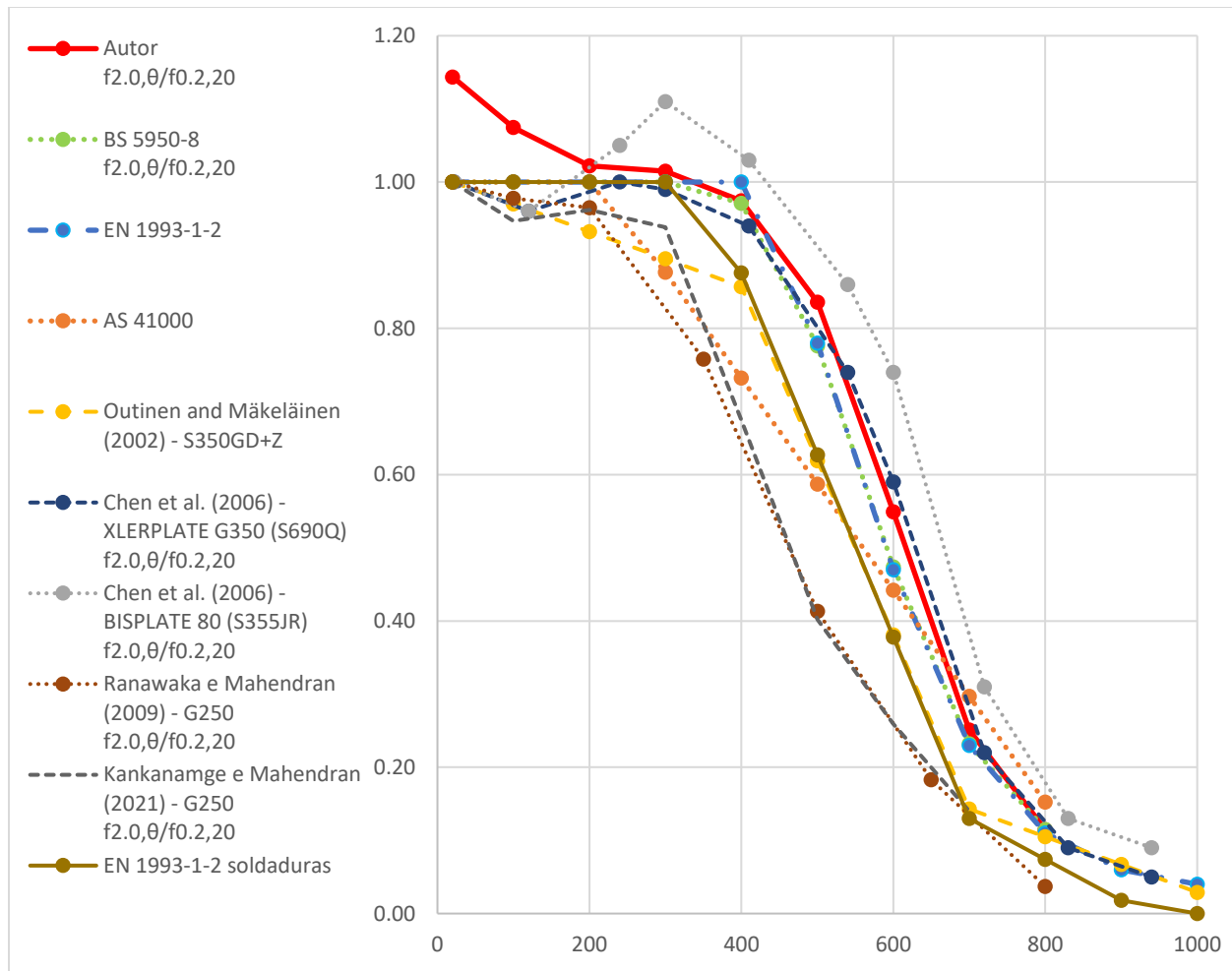


Figura 3. 16 - Fatores de redução obtidos comparados com a bibliografia existente

Da análise da Figura 3.16, verificou-se que os fatores de redução da tensão de cedência do aço em estudo apresentam um comportamento bastante semelhante aos estudos realizados por Chen et al. (2006) para o aço XLERPLATE Grade 350 que equivale a um aço S690Q, de igual modo, mostrou-se semelhante às normas EN1993-1-2 e BS.

A curva apresentou valores inferiores comparando com a curva de Chen et al. (2006) para o aço BISPLATE 80 que equivale a um aço S355JR.

A curva apresenta valores de fator de redução superiores em comparação com os estudos realizados por Outinen e Mäkeläinen (2002) – S350GD+Z, Ranawaka e Mahendran (2009) – G250 e Kankanamge e Mahendran (2011) – G250.

### 3.3 ANÁLISE METALOGRÁFICA

#### 3.3.1 Ensaio de Dureza Vickers

A dureza Vickers se baseia na resistência que o material oferece à penetração de uma pirâmide de diamante de base quadrada e ângulo entre faces de 136°, submetida a determinada carga. A indentação é feita por um período que varia entre 10 e 15 segundos, com carga entre 1 kgf e 100 kgf, e o resultado são marcas diagonais na peça.

O indentedor Pirâmide de Diamante Vickers tem a forma de uma pirâmide quadrada com 136° entre faces. Para calcular o valor da dureza de Pirâmide de diamante Vickers, ambas as diagonais da indentação são medidas, e a média destes valores é usada na fórmula acima para a determinação do valor HV.

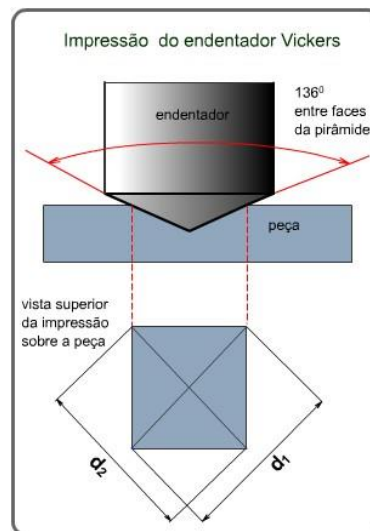


Figura 3. 17 – Impressão do edentedor Vickers

O Número Vickers (HV) é então determinado pela razão entre a carga (kgf) e a área superficial da impressão (mm<sup>2</sup>). O valor de dureza Vickers (HV) é o quociente da carga aplicada pela área de impressão deixada no corpo ensaiado. Essa relação, expressa em linguagem matemática é a seguinte:

$$HV = F / A$$

Onde:

F= é a carga em kgf

d = é a média aritmética entre as duas diagonais, d1 e d2 em mm

HV = é a dureza Vickers



### **Aplicação**

- É possível utilizar a microdureza para determinar a dureza individual de uma microestrutura, de superfícies cementadas e temperadas. Até peças extremamente pequenas e finas podem ter sua dureza determinadas pelo ensaio de dureza Vickers.
- Fornece uma escala contínua de dureza, medindo todas as gamas de valores de dureza numa única escala.
- As impressões são extremamente pequenas e, na maioria dos casos, não inutilizam as peças, mesmo as acabadas.
- Grande precisão de medida,
- O penetrador, por ser de diamante, é praticamente indeformável.
- Aplicação para toda a gama de durezas encontradas nos diversos materiais,
- Pode ser aplicado para qualquer espessura de material, podendo medir também dureza superficiais, tudo isso graças à utilização de cargas relativamente baixas e do tipo de penetrador.

O ensaio de dureza tipo Vickers é também muito utilizado em juntas soldadas, em especial na detecção de heterogeneidades. Estas podem ser devido a transformações metalúrgicas ocasionadas pelos ciclos térmicos da soldagem. Assim, determinam-se durezas das diversas zonas de uma junta soldada. Desde o metal de base que não sofreu qualquer alteração metalúrgica, até o metal que fundiu, passando pela zona afetada pelo calor (ZAC) e pela linha de ligação. Isso permite detectar as transformações metalúrgicas capazes de comprometer o comportamento da junta soldada.

### **Limitações**

Devem-se tomar cuidados especiais para evitar erros de medida ou de aplicação de carga, que alteram muito os valores reais de dureza e garantir resultados satisfatórios.

A superfície ou área de interesse deve estar preparada através de retificação/polimento, limpa e plana. A preparação do provete para microdureza deve ser feita, obrigatoriamente, por metalografia, utilizando-se, de preferência, o polimento eletrolítico, para evitar o encruamento superficial. Quando se usam cargas menores do que 300 gf, pode haver recuperação elástica, dificultando a medida das diagonais. A máquina de dureza Vickers requer aferição constante, pois qualquer erro na velocidade de aplicação da carga traz grandes diferenças nos valores de dureza.

### 3.3.2 Descrição do ensaio

Nesta seção é detalhada o ensaio de dureza e a análise microestrutural realizada Laboratório de Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra.

As amostras utilizadas para a realização das análises foram adquiridas a partir dos provetes de ensaio após a rotura em regime transiente, sendo que foram cortadas antes da zona de soldadura. Foram cortadas em partes menores para facilitar a preparação. Após o corte as amostras foram embutidas, posteriormente lixadas, polidas, lavadas, atacadas e retiradas do molde, para assim passar pelas análises. Foram utilizadas três amostras. Os procedimentos estão descritos a seguir.

#### Corte

Comumente é necessário dividir o provete para se obter amostras que servirão para realização das análises. Operações mecânicas como torneamento aplainamentos e outras, impõem rigorosas alterações microestruturais por consequência do trabalho mecânico a frio. O corte abrasivo tem a melhor solução para este seccionamento, pois retira por completo o trabalho mecânico a frio, resultando em superfícies planas com baixa rugosidade, de modo rápido e seguro.

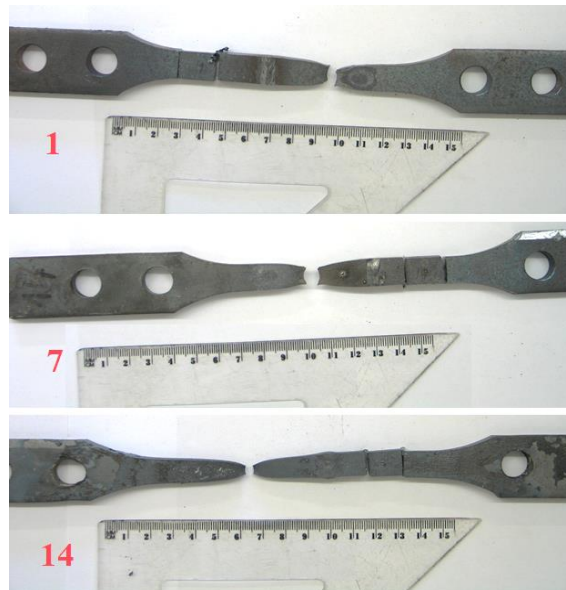


Figura 3. 18 – Amostras cortadas dos provetes de ensaio 1, 7 e 14. (Fonte: Autor)

#### Embutimento

O embutimento da amostra é realizado para facilitar o manuseio de peças pequenas, evitando assim a danificação da lixa ou do pano de polir, e para o não entortamento da peça enquanto preparada. O embutimento consiste em cobrir a amostra com um material adequado, formando um único corpo. Existem dois tipos de embutimento, a frio e a quente. No trabalho descrito, em todas as amostras foi utilizado o embutimento a frio, onde a amostra é colocada em um molde que é preenchido com resinas sintéticas de polimerização rápida. Este embutimento é

feito com resinas auto polimerizáveis, as quais consistem geralmente de duas substâncias formando um líquido viscoso quando misturadas. Esta mistura é vertida dentro de um molde plástico onde se encontra a amostra, polemizando-se após certo tempo.



Figura 3. 19 – a) Amostras no molde; b) Resinas utilizadas (Castable (Cold) Mounting Compound Liquid|Hardner + Castable (Cold) Mounting Compound Powder); c) Amostras embutidas na resina. (Fonte: Autor)

### Polimento

Devido ao grau de perfeição desejada no acabamento de uma amostra metalográfica perfeitamente preparada, é essencial que cada etapa da preparação da amostra seja executada com cuidado, pois é um dos processos mais demorados da preparação de amostras metalográficas.

O polimento visa um acabamento superficial polido e isento de marcas, utiliza para isso abrasivo como pasta de diamante. Antes de realizar o polimento é necessária uma limpeza na superfície da amostra, de modo a deixá-la isentam de traços abrasivos, solventes, poeiras e outros. A operação de limpeza foi feita com álcool etílico para que a secagem seja rápida. O processo utilizado foi o processo Mecânico de polimento.

Cuidados observados no polimento:

- A superfície deve estar rigorosamente limpa;
- A escolha adequada do material do polimento;
- Evitar polimentos demorados;
- Nunca polir amostras diferentes sobre o mesmo pano de polimento;
- Evitar fricção excessiva;
- Evitar pressão excessiva sobre a amostra.

Foram utilizados papéis abrasivos Buehler CarbiMet™ de diferentes tamanhos, sendo P60, P180, P320, P6000, P1000, P2500, P5000.

Para se conseguir um polimento eficaz é necessário o uso adequado da técnica de lixamento, pois de acordo com a natureza da amostra, a pressão de trabalho e a velocidade de polimento, surgem deformações plásticas em toda a superfície por amassamento e aumento de temperatura.



Figura 3. 20 - papeis abrasivos Buehler CarbiMet™ de diferentes tamanhos. (Fonte: Autor)

Foram utilizadas pasta de diamante, juntamente com um lubrificante até não transparecer mais riscos na superfície das amostras, os materiais estão mostrados nas Figura 3.21.



Figura 3. 21 – Pastas de diamante e lubrificante utilizado para o polimento. (Fonte: Autor)

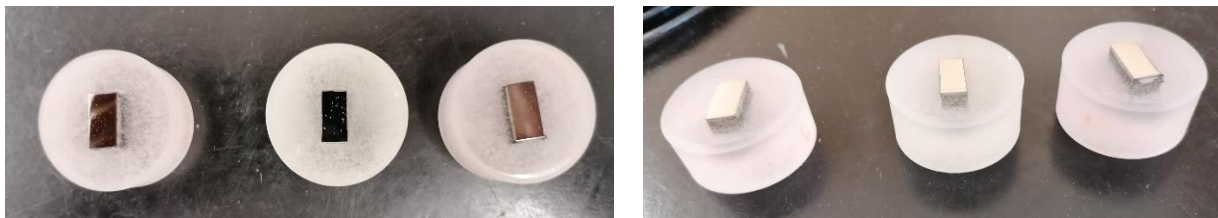


Figura 3. 22 – Aspetto final: uma superfície completamente lisa. (Fonte: Autor)

### **Limpeza**

Antes das amostras sofrerem o ataque químico, as mesmas devem estar perfeitamente limpas e secas, por isso utilizam-se líquidos de baixo ponto de ebulição como o álcool, éter, etc., os quais são posteriormente secados rapidamente através de um jato de ar quente fornecido por um secador. Para a limpeza da peça, visa remover eventuais partículas que possam estar aderidas à superfície recém-lixada ou no embutimento. Estas partículas podem comprometer o resultado da próxima etapa de preparação, o polimento.

### **Ataque químico**

Para as análises metalográficas de microscopia óptica, foi realizado o ataque químico nas amostras. Seu objetivo é permitir a visualização dos contornos de grão e as diferentes fases na microestrutura. Um reagente ácido é colocado em contato com a superfície da peça por certo tempo. O reagente causará a corrosão da superfície. O processo realizado nas amostras foi com o reagente Nital a 2% composto por 98 % de álcool etílico 2% de ácido nítrico. As amostras foram atacadas por meio de esfregamento, durante um período de dez segundos. Após esse período, a amostra foi lavada com água corrente para interromper o ataque químico e em seguida secada por meio de um jato de ar frio. Em caso de pouco ataque, realizou-se novamente o processo de ataque por cinco segundos.

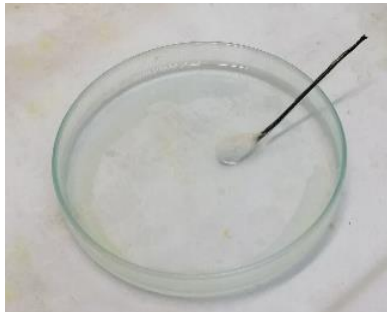


Figura 3. 23 – Reagente Nital para ataque químico

### **3.3.3 Metodologia para Ensaio Microscopia Óptica**

Após o ataque químico, as amostras foram levadas a sala onde são realizadas as microscopias ópticas, e com o auxílio do microscópio foram feitas as análises dos provetes e os resultados são armazenados em um computador que está conectado ao microscópio. O equipamento utilizado para a realização das análises foi o microscópio óptico LEICA DM4000 M LED (Figura 3.24).



Figura 3. 24 – Microscópio óptico LEICA DM4000 M LED. (Fonte: Autor)

A microscopia óptica foi realizada nas três amostras em corte longitudinal. As análises foram feitas em campos de ampliação de 50 um para todas as amostras.

O procedimento Vickers para esta máquina consiste em:

- 1) Definir a carga aplicada em cada amostra;
- 2) Posicionar amostra na máquina;
- 3) Focalizar amostra até encontrar uma superfície lisa, apresentando somente riscos, sem nenhuma impressão de ensaios anteriores;
- 4) Selecionar carga escolhida anteriormente para a amostra;
- 5) Aplicar carga cuidadosamente por meio da alavanca hidráulica e mantê-la durante tempo definido anteriormente (Para todos materiais adotou-se 10 segundos);
- 6) Fazer as duas leituras das diagonais da impressão formada;
- 7) Calcular média das duas leituras;
- 8) Encontrar relação entre a média das diagonais e da carga aplicada na tabela fornecida, para se obter o valor de dureza Vickers.



### 3.3.4 Caracterização Microestrutural

A Figura 3.25 apresenta a microestrutura do Aço S355 das amostras retiradas da seção longitudinal em ampliações de 5um.

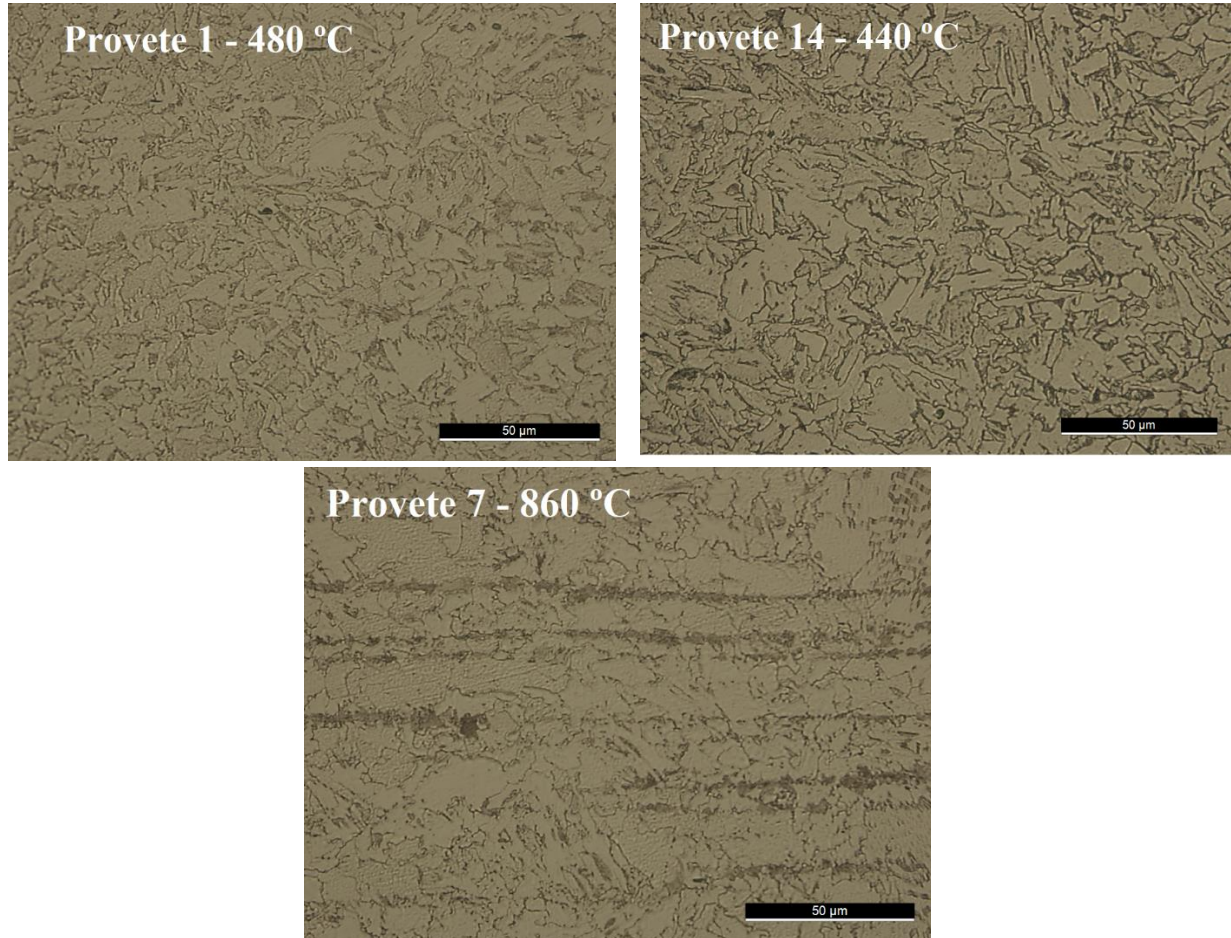


Figura 3. 25 - Microestrutura aço S355J2 em corte Longitudinal

A microestrutura das amostras 1 e 14, aquecidas a 480 °C e 440 °C respectivamente, mostra uma característica semelhante que compreende ferrita acicular com perlita embutida. Mas a amostra 7, aquecida acima de 860 °C, mostra características diferentes que compreendem ferrita primária de granulação grossa e nucleação de grãos finos equiaxiais ao longo das bandas de cisalhamento. Isso prova que junto com a temperatura, a deformação plástica também contribui para a transformação microestrutural.

### 3.3.5 Resultados de Microdureza Vickers

Os resultados de microdureza das impressões realizadas estão mostrados nas tabelas a seguir.

Hardness Tester Type	HMV-G21D
Indenter Type	Vickers
Test Load	HV0.2 (1.961 N)
Duration Time	15
Number of Tests	6
Shape of Test Piece	Flat

Tabela 3. 6 - Resultados de microdureza

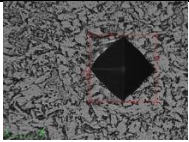
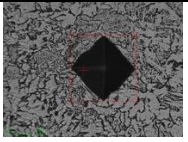
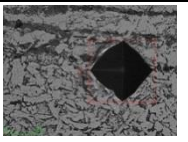
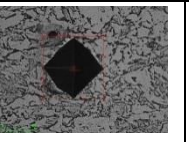
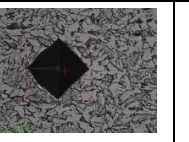
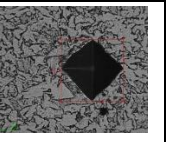
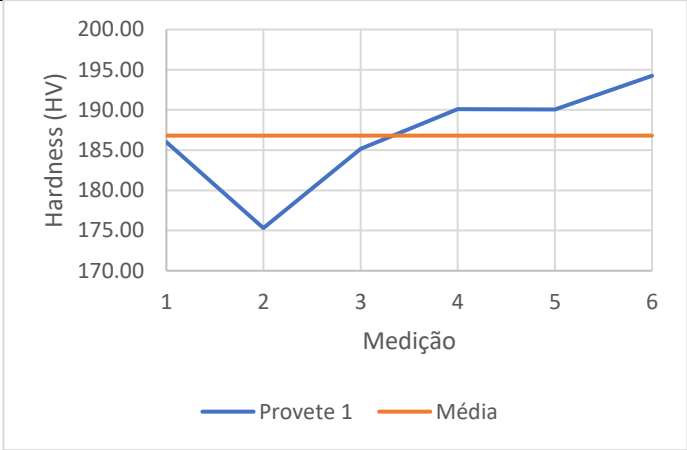
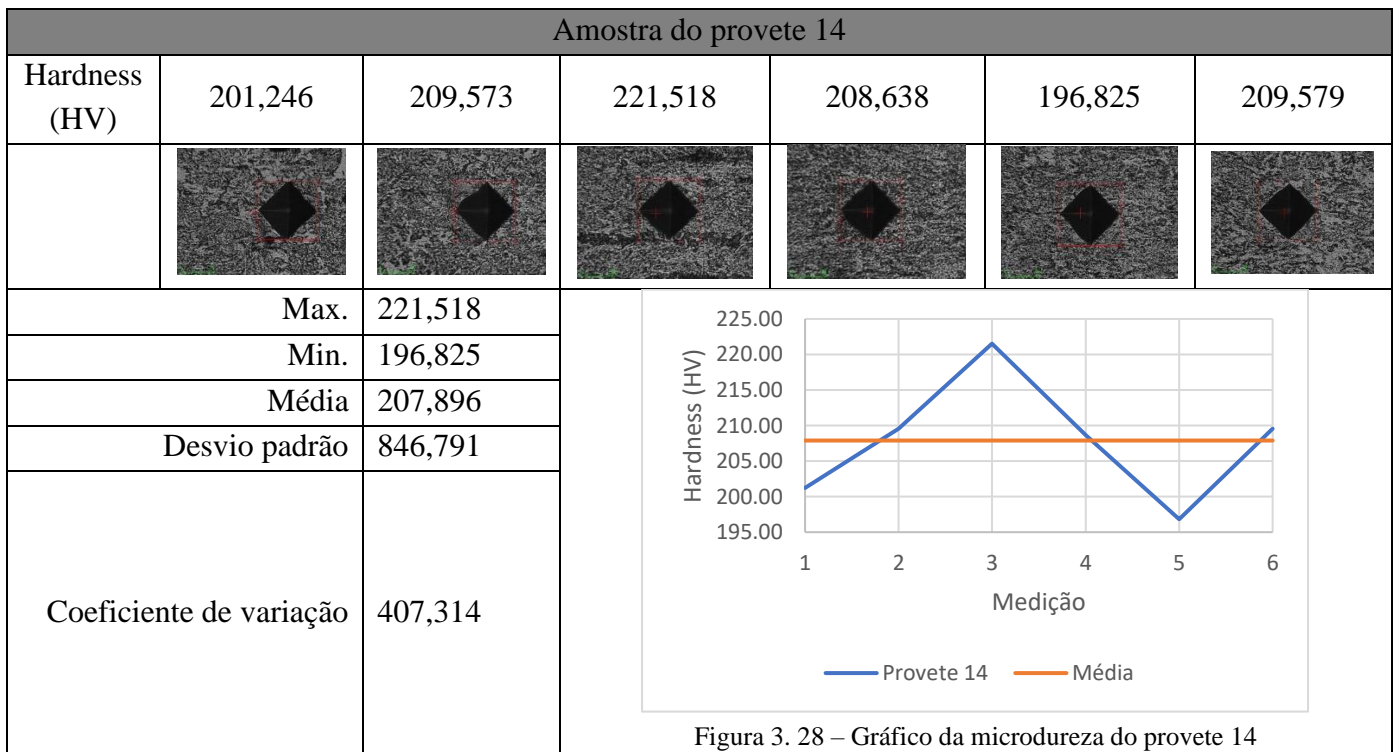
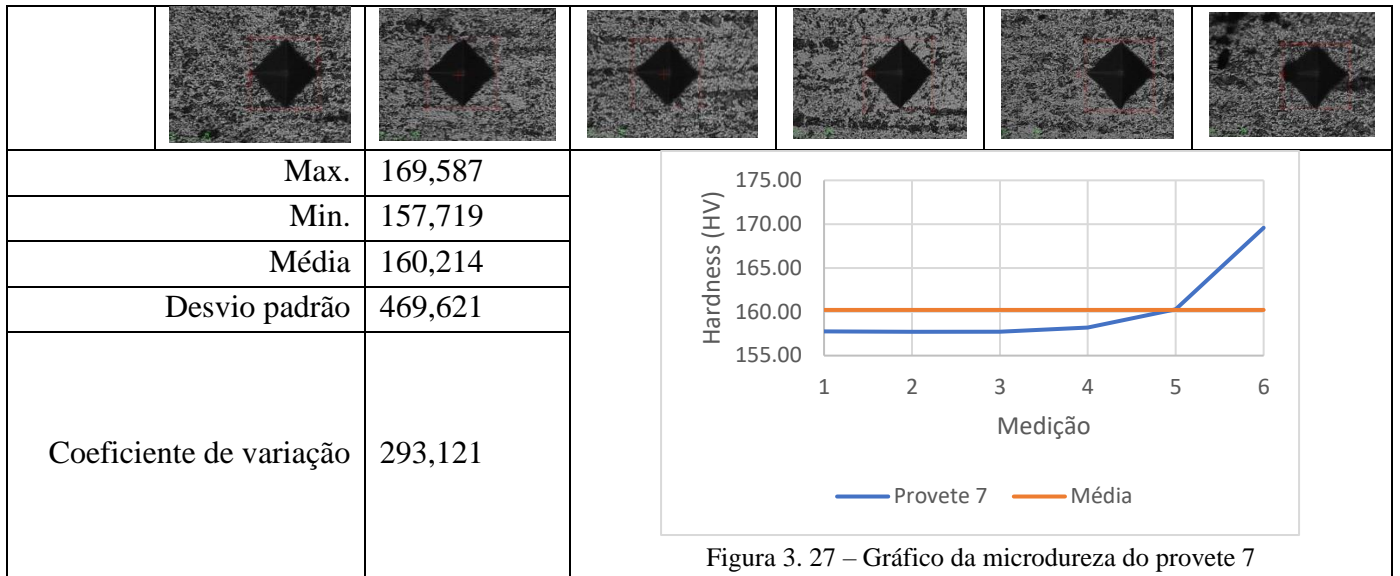
Amostra do provete 1						
No.	1	2	3	4	5	6
Hardness (HV)	185,994	175,307	185,167	190,076	190,036	194,241
						
	Max.	194,241				
	Min.	175,307				
	Média	186,803				
	Desvio padrão	651,106				
	Coeficiente de variação	348,552				

Figura 3. 26 – Gráfico da microdureza do provete 1

Amostra do provete 7						
Hardness (HV)	1	2	3	4	5	6
	157,762	157,719	157,732	158,209	160,273	169,587





De acordo com a coleta dos dados pelo método de Microdureza Vickers, é feita a plotagem dos gráficos onde mostra a variação nos valores em cada amostra e os valores médios determinados. Os valores médios de dureza são calculados e apresentados na Figura 4.29. Pode-se inferir que conforme a temperatura de exposição aumenta, os valores de dureza diminuem. A queda na dureza da amostra 7 é devido ao aquecimento das amostras acima da temperatura eutetóide, ou

seja, 720 °C. Embora a temperatura da amostra 1 seja mais baixa do que a temperatura eutetóide, o tempo de exposição diminui a dureza.

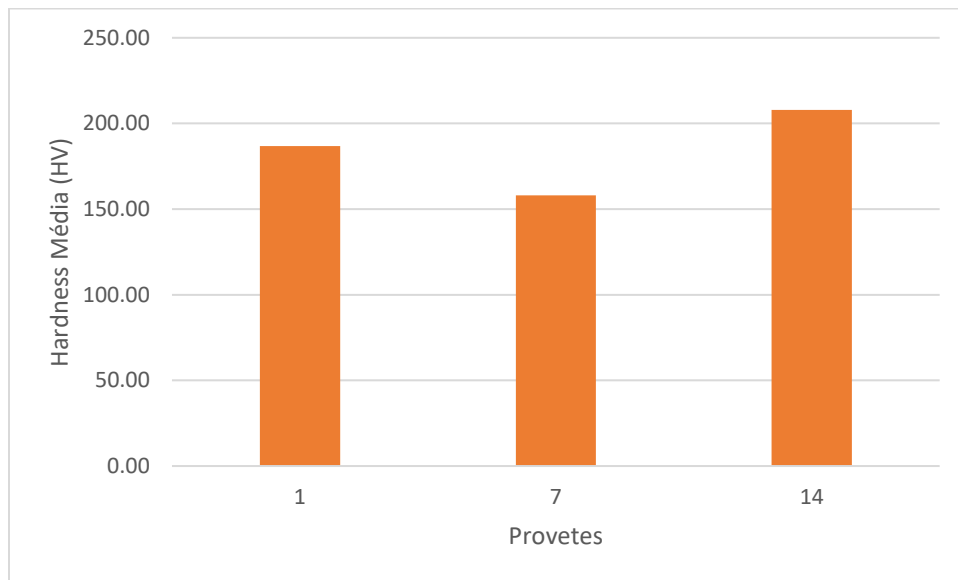


Figura 3. 29 - Microdureza Vickers

## CONCLUSÃO E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

No âmbito desta investigação foram realizados 14 ensaios com a intenção de estudar a degradação das propriedades mecânicas do aço S355 J2 submetido a altas temperaturas.

Foram realizados ensaios em regime transiente. De salientar que em regime transiente, a amostra é mantida sob carga constante enquanto a temperatura é elevada até que a falha seja alcançada.

Este estudo foi feito com base na análise de diversos códigos e de resultados provenientes de ensaios realizados por outros autores, comparando-os de acordo com a classe do aço.

De acordo com as comparações efectuadas concluiu-se que:

- Os valores obtidos, pelo regime transiente, dos fatores de redução da tensão de cedência relativa ao aço em estudo e as curvas preconizadas pela norma britânica BS 5950-8 e os propostos pela EN 1993-1-2 apresentaram-se semelhantes, no entanto, com algumas particularidades: até 500°C, os fatores de redução obtidos são inferiores aos propostos pela norma EN 1993-1-2. Após 500°C são praticamente idênticos;
- Comparando com a norma britânica BS 5950-8, até 400°C os fatores de redução obtidos são inferiores à norma, de 400°C-700°C apresenta valores superiores à norma. Acima de 700°C são idênticos;
- A norma americana AS 4100 mostrou-se conservativa;
- Verificou-se que os fatores de redução da tensão de cedência do aço em estudo apresentam um comportamento bastante semelhante aos estudos realizados por Chen et al. (2006) para o aço XLERPLATE Grade 350 que equivale a um aço S690Q. A curva apresentou valores inferiores comparando com a curva de Chen et al. (2006) para o aço BISPLATE 80 que equivale a um aço S355JR.
- A curva apresenta valores de fator de redução superiores em comparação com os estudos realizados por Outinen e Mäkeläinen (2002) – S350GD+Z, Ranawaka e Mahendran (2009) – G250 e Kankanamge e Mahendran (2011) – G250.
- Quanto à microestrutura, as amostras aquecidas a 440 °C e 480 °C mostraram uma característica semelhante que compreende ferrita acicular com perlita embutida. Mas a amostra aquecida acima de 860 °C, mostra características diferentes que compreendem ferrita primária de granulação grossa e nucleação de grãos finos equiaxiais ao longo das bandas de cisalhamento. Isso prova que junto com a temperatura, a deformação plástica também contribui para a transformação microestrutural. A ductilidade de aço mostrou-se ser inferior à medida que a temperatura aumenta.

**Para trabalhos de investigação futuros, sugere-se:**

- Realizar uma campanha maior de ensaios em regime transiente capaz de caracterizar o comportamento do aço com maior rigor, nomeadamente a fase de endurecimento e a fase de rotura do material;
- Estudar o comportamento dos fatores de redução para o módulo de elasticidade;
- Levar a cabo um trabalho de investigação para se estudar a diferença entre ensaios em regime transiente e regime estacionário suficientemente complexa para que se consiga tirar conclusões mais rigorosas. Nomeadamente, realizar ensaios de fluência para que se verifique se este é fator de grande relevo ou se introduz um erro desprezível, mesmo para ensaios de menor duração (menos de uma hora);
- Propor equações do comportamento do aço a altas temperaturas em função da classe do material.

## BIBLIOGRAFIA

Araque, O., Arzola, N., & Hernández, E. (2018). The effect of weld reinforcement and post-welding cooling cycles on fatigue strength of butt-welded joints under cyclic tensile loading.

AS 4100:1998. “Steel Structures. Standard Australian Limited”. Sydney, Australia, 1998;

ASTM A588 / A588M-19. “Standard Specification for High-Strength Low-Alloy”;

ASTM E28, 2017. “Standard Test Method for Micro Indentation Hardness of Materials”;

ASTM E3-11, 2017. “Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens”;

ASTM: C1327-03. “Standard Test Method for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramics”;

ASTM E384. “Standard Test Method for microindentation Materials”;

ASTM E92-82(2003)e2. “Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials”;

ASTM Revisão da E92-82(2003)e2. “WK7683 Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials”;

BS 5950-8:1990. “Structural use of steelwork in building, Part 8: Code of practice for fire resistant design”;

Chen et al. (2006). “Behaviour of high strength structural steel at elevated temperatures”. Journal of Structural Engineering, Volume 132, No 12, pp. 1948-1954, 2006;

Chen, J., & Young, B. (2006). “Stress-strain curves for stainless steel at elevated temperatures”. Engineering Structures, 28(2), 229–239;

Chen, J., e Young, B. (2006). “Corner properties of cold-formed steel sections at elevated temperatures”. Thin-Walled Structures, Vol. 44, Issue 2, pp. 216–223;

Chen, J., Young, B. (2007). “Experimental investigation of cold-formed steel material at elevated temperatures”. Thin-Walled Structures, Vol. 45, pp. 96-110;

Conlon, K., Ricles, J., & Pessiki, S. (2009). “Strength of Transverse Fillet Welds at Elevated and Post-elevated Temperatures.”

Craveiro, H. D., Rodrigues, J. P. C., Santiago, A., & Laím, L. (2016). “Review of the high temperature mechanical and thermal properties of the steels used in cold formed steel structures - The case of the S280 Gd+Z steel”;

CRAVEIRO, H. (2013). “Comportamento ao Fogo de Elementos Comprimidos de Aço Enformado a Frio”;

Dolzhenkov I. E. (1971). “The nature of blue brittleness of steel”;

D.M Rodrigues, C. Leitão, M. Balakrishnan, H.D. Craveiro, A. Santiago (2021) (D.M Rodrigues et al., 2021). “Tensile properties of S355 butt welds after exposure to high temperatures”;

D.M. Schneider e Lange (2009). “Constitutive equations of structural steel S460 at high temperatures” Nordic Steel Construction Conference, pp. 204-211, 2009, Malmö, Sweden.

EN 10002-1:2001. “Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at ambient temperature”. Brussels, 2001;

EN 10002-5:1991. “Metallic materials – Tensile testing – Part 5: Method of test at elevated temperature”. Brussels, 1991;

EN 1993-1-3 (2006). “Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-3: General rules, Supplementary rules for cold-formed members and sheeting”;

Forni, D., Chiaia, B., & Cadoni, E. (2016). “High strain rate response of S355 at high temperatures”. *Materials and Design*, 94, 467–478;

Gunalan, S., & Mahendran, M. (2014). “Experimental investigation of post-fire mechanical properties of cold-formed steels”. *Thin-Walled Structures*, 84, 241–254;

ISO 6507 (1997). “Metallic materials - Vickers hardness test; - Part 1: Test method; - Part 2: Verification of testing machines; - Part 3: Calibration of reference blocks”;

ISO Standard 643 (2019). “Steels — Micrographic determination of the apparent grain size”;

ISO Standard 6892-1: (2016). “Metallic materials – Tensile testing – Part 1”;

ISO Standard 6892-2, (2011). “Metallic materials – Tensile testing – Part 2: Method of test at elevated temperatures. International Organization for Standardization”;

Jacob, B. S. M. S. (2018). “Análise da resistência ao fogo de estruturas soldadas”. Universidade de Coimbra.

Kankanamge, D. e Mahendran, M. (2011). “Mechanical properties of cold-formed steels at elevated temperatures”. *Thin-Walled Structures*. 49 (2011). pp. 26-44;

Kauê Fernandes Marinho do Carmo (2021). “Ensaio de Dureza-Hardness Ensaio não Destrutivo. Análise Atômica”. Unip Universidade Paulista;

Kelly e Sha, (1999). “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;

Latham, D., & Kirby, B. (1998). “Elevated temperature behaviour of welded joints in structural steels.”

Maraveas, C., Fasoulakis, Z. C., & Tsavdaridis, K. D. (2017). “Mechanical properties of High and Very High Steel at elevated temperatures and after cooling down”;

Outinen et al. (2000). “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, J. (2006). “Mechanical properties of structural steels at elevated temperatures and after cooling down”. In *Proceedings of the Fire and Materials Conference*. San Francisco, USA, 2006. 15 p;

OUTINEN, J. e MÄKELÄINEN, P. (2002). “Mechanical properties of structural steel at elevated temperatures and after cooling down”. In *Proceedings of the 2nd International Workshop of Structures in Fire*, Christchurch, New Zealand, 2002. pp. 273- 290;

Outinen, Jyri, & Mäkeläinen, P. (1994). “Transient state tensile test results of structural steel S355 (RAEX37-52) at elevated temperatures”;

Qiang et al. (2011). “Elevated temperature effect on elastic modulus of high strength steel S690”;

Qiang et al. (2012). “Dependence of mechanical properties of high strength steel S690 on elevated temperatures”. *Engineering Structures*, Volume 30, pp. 73-79, 2012;

Qiang, X., Bijlaard, F. S. K., & Kolstein, H. (2011). “Deterioration of mechanical properties of high strength structural steel S460N under transient state fire condition”. *Materials & Design*, 40, 521–527;

Qiang, X., Bijlaard, F. S. K., & Kolstein, H. (2013). “Post-fire performance of very high strength steel S960”. *Journal of Constructional Steel Research*, 80, 235–242;

Queiroz, R. R. U. (2013). “Envelhecimento Dinâmico em Aço Dual Phase de 600 MPa de Limite de Resistência”. Universidade Federal de Minas Gerais Programa;

RANAWAKA, T. e MAHENDRAN, M. (2009). “Experimental study of the mechanical properties of light gauge cold-formed steels at elevated temperatures”. *Fire Safety Journal*. 44 (2009) pp. 219-229;

Wang, W., Liu, T., & Liu, J. (2015). “Experimental study on post-fire mechanical properties of high strength Q460 steel”. *Journal of Constructional Steel Research*, 114, 100–109;

Zhang, G., Zhu, M. C., Kodur, V., & Li, G. Q. (2017). “Behavior of welded connections after exposure to elevated temperature”. *Journal of Constructional Steel Research*, 130, 88– 95;

Zhu, M., Cheng, L., Li, G., & Wang, Y. (2016). “Experiment on strength of transverse fillet weld connections after high temperature treatment”. *Shenzhen Daxue Xuebao (Ligong Ban)/Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 33(6), 620–626.