

• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS  
E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA MECÂNICA

# Análise da resistência ao fogo de estruturas soldadas

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

## Analysis of fire resistance in welded structures

Autor

**Bernardo Severino Mestre Santos Jacob**

Orientadores

**Professora Doutora Dulce Maria Esteves Rodrigues**

**Professor Doutor Balakrishnan Marimuthu**

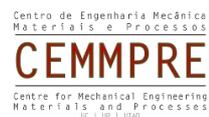
Júri

Presidente	<b>Professor Doutor Carlos Miguel Almeida Leitão</b> Professor Convidado da Universidade de Coimbra
Orientador	<b>Professora Doutor Dulce Maria Esteves Rodrigues</b> Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogais	<b>Professor Doutor Fernando António Gaspar Simões</b> Professor Coordenador do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Colaboração Institucional



*Institute for  
Sustainability and  
Innovation in  
Structural Engineering*



*Centre for Mechanical  
Engineering, Materials  
and Processes*

Coimbra, Setembro, 2018



“Never give up on what you really want to do. The person with big dreams is  
more powerful than the one with all the facts”

Albert Einstein







## Agradecimentos

Na sua essência, esta dissertação representa a superação de mais um degrau nas escadas da vida, que não seria possível sem o suporte imensurável de algumas pessoas. Deste modo, gostaria de partilhar a minha gratidão a todos aqueles que de forma consciente ou inconscientemente me incentivaram ao longo desta etapa:

À Professora Doutora Dulce Rodrigues, orientadora da presente dissertação, por toda a dedicação, disponibilidade, paciência, por todos os conhecimentos transmitidos e por me incentivar nos momentos mais difíceis ao longo da realização desta dissertação.

Ao Doutor Carlos Leitão, apesar de não ser um dos orientadores desta dissertação, por todo o tempo empregue, por todas as críticas construtivas, pelo seu incentivo e boa disposição e, mais que tudo, ao seu fantástico sentido de humor partilhado durante todo o percurso.

Ao Professor Joel, ao Sr. Fernando e ao Sr. Ilídio pela ajuda prestada na manufatura dos provetes e no decorrer dos ensaios experimentais.

Aos meus colegas e amigos de laboratório pelo companheirismo e pela sua ajuda.

Aos meus amigos que me ouviram e aconselharam ao longo da minha vida, e que estiveram sempre do meu lado.

À minha família, especialmente os meus pais e à minha irmã, quero agradecer pelo apoio incondicional e por fazerem de mim a pessoa que sou hoje.

Por último, gostaria de deixar um agradecimento especial à Laura Tomé, por todo o carinho, por todas as palavras de incentivo, por toda a força e confiança transmitida em todos os momentos. Por tudo, a minha imensa gratidão.



## Resumo

O trabalho realizado no âmbito desta dissertação teve como objetivo analisar o comportamento mecânico de soldaduras feitas em aço estrutural S355 J2 em situação de fogo e de após-fogo. Para fabricar as soldaduras, utilizou-se um processo de soldadura muito comum na indústria de construção metálica, ou seja, o processo de soldadura MAG utilizando fios sólidos e fios fluxados como material de adição.

A caracterização das soldaduras compreendeu a realização de testes de análise metalográfica, ensaios de dureza e ensaios de tração. Os ensaios de tração foram efetuados à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas (300°C, 600°C e 900°C). Foi ainda testada a resistência das soldaduras em condições após-fogo, testando provetes pré-aquecidos e arrefecidos a ar. A caracterização mecânica e metalográfica à temperatura ambiente demonstraram, apesar da utilização de diferentes consumíveis, resultados similares entre amostras de material base e soldaduras.

As curvas de tensão-deformação a temperaturas elevadas revelaram um aumento de resistência mecânica a 300°C, devido ao efeito conjugado do fenómeno blue brittleness com o fenómeno de envelhecimento dinâmico, ocorrendo depois a degradação da resistência mecânica. A análise metalográfica após rotura revelou que o fenómeno de fissuração a quente condicionou a resistência mecânica da soldadura GMAW testada a 600°C e a 900°C. A comparação dos fatores de redução da soldadura GMAW com os fatores de redução recomendados no Eurocódigo 3, demonstrou que a utilização de soldaduras GMAW pode conduzir ao sobredimensionamento da estrutura em situação de fogo.

A análise metalográfica em situação após-fogo revelou que até 600°C não ocorrem alterações na microestrutura das amostras de material base e das soldaduras. A 900°C observou-se tanto um aumento do tamanho de grão ferrítico como a formação de bandas de cor preta que podem conter carbonetos e fases de baixo ponto de fusão. Os ensaios de dureza permitiram verificar que a dureza das soldaduras não sofreram alterações significativas até 600°C. A 900°C, para além da redução acentuada de dureza, verificou-se a sua uniformização ao longo de toda a secção das amostras de soldadura. Os ensaios de tração após-fogo permitiram verificar que apenas ocorrem alterações significativas para

temperaturas superiores a 600°C. A análise metalográfica após rotura das soldaduras tratadas termicamente e os mapas da distribuição de deformação permitiram concluir que a rotura das soldaduras FCAW ocorreu devido à concentração de tensões resultantes do defeito de inclusão de escória.

**Palavras-chave:** Aço estrutural, Soldadura por fio fluxado, Soldadura por fio sólido, Velocidade de deformação, Taxa de aquecimento, Arrefecimento por ar, Eurocódigo 3.

## Abstract

analyzing the mechanical behavior of welds made in structural steel S355 J2 in a fire and post-fire situation. To manufacture the welds, a welding process very common in the metal building industry was used, that is, the MAG welding process using solid wires and flux wires as the addition material.

The characterization of the welds included the execution of metallographic analysis tests, hardness tests and tensile tests. The tensile tests were performed at room temperature and at elevated temperatures (300°C, 600°C and 900°C). The resistance of welds in post-fire conditions was tested by testing preheated and air-cooled test pieces. The mechanical and metallographic characterization at room temperature demonstrated, despite the use of different consumables, similar results between samples of base material and welds.

The stress-strain curves at elevated temperatures showed an increase in mechanical strength at 300°C due to the phenomenon of blue brittleness and dynamic aging, subsequently decreasing. The metallographic analysis after rupture revealed that the phenomenon of hot cracking conditioned the mechanical strength of the GMAW weld tested at 600°C and 900°C. The reduction factors obtained through the stress-strain test curves at elevated temperatures were compared to those provided by Eurocode 3. It was observed that the use of GMAW welds may lead to over-dimensioning of the structure in a fire situation.

Post-fire metallographic analysis revealed that up to 600°C there were no changes in the microstructure of the base material samples and the welds. At 900°C both an increase in ferritic grain size and the formation of black bands which may contain carbides and low melting phases were observed. The hardness tests allowed to verify that the hardness of the welds did not undergo significant changes until 600°C. At 900°C, in addition to the marked reduction of hardness, its uniformity was verified throughout the entire section of the weld samples. Post-fire stress-strain curves have allowed to observe only significant changes to occur at temperatures above 600°C. The metallographic analysis after rupture of the thermally treated welds and the maps of the strain distribution allowed to conclude that the rupture of the FCAW welds occurred due to the concentration of stresses resulting from the slag inclusion defect.

**Keywords** Structural Steel, Flux cored wire, Solid cored wire, Strain speed, Heating rate, Air cooling, Eurocode 3.

---

## Índice

Índice de Figuras .....	ix
Índice de Tabelas .....	xi
Simbologia e Siglas .....	xiii
Simbologia.....	xiii
Siglas .....	xiii
1. Introdução.....	1
2. Estado da Arte .....	3
2.1. Aços Estruturais .....	3
2.1.1. Aço S355 J2.....	4
2.2. Caracterização Mecânica a Temperaturas Elevadas.....	5
2.2.1. Tipos de Ensaio .....	5
2.2.2. Metais Base .....	5
2.2.3. Soldaduras .....	8
2.3. Caracterização Mecânica Após-fogo.....	9
2.3.1. Metais Base .....	9
2.3.1. Soldaduras .....	11
3. Procedimento Experimental .....	15
3.1. Metal Base .....	15
3.2. Elaboração das Soldaduras .....	15
3.2.1. Preparação da Junta .....	15
3.2.2. Parâmetros das Soldaduras .....	16
3.2.3. Amostragem .....	17
3.3. Análise Metalográfica.....	18
3.4. Caracterização Mecânica .....	18
3.4.1. Ensaio de Dureza .....	18
3.4.2. Ensaios de Tração à Temperatura Ambiente e Após-fogo.....	19
3.4.3. Ensaios de Tração a Temperaturas Elevadas.....	20
4. Resultados e Discussão.....	23
4.1. Caracterização Mecânica e Microestrutural .....	23
4.1.1. Temperatura Ambiente .....	23
4.1.2. Temperaturas Elevadas.....	30
4.1.3. Após-fogo .....	37
5. Conclusões.....	45
Referências Bibliográficas.....	47



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Curvas de tensão-deformação a temperaturas variáveis. a) Aço G250. b) Aço G550 (adaptado de Ranawaka e Mahendran (2009)).	7
Figura 2.2. Curvas convencionais de tensão-deformação em elevadas temperaturas (adaptado de Forni <i>et al</i> (2016)).	8
Figura 2.3. Curvas de tensão-deformação obtidas para diferentes temperaturas (adaptado de Gunalan e Mahedran (2014)).	10
Figura 2.4. Efeito do arrefecimento nas propriedades mecânicas do aço de elevada resistência (adaptado de Wang <i>et al</i> (2015)).	11
Figura 2.5. Efeito do arrefecimento nas propriedades mecânicas de soldaduras feitas de aço Q345B. a) Arrefecimento a ar. b) Arrefecimento por água. (adaptado de Zhang <i>et al</i> (2017)).	12
Figura 3.1. Esquema da junta e dimensões das chapas utilizadas.	16
Figura 3.2. Esquema de amostragem dos provetes.	17
Figura 3.3. Esquema do perfil de durezas de uma amostra soldada.	18
Figura 3.4. a) Extensómetro ótico <i>ARAMIS Optical 3D Deformation &amp; Strain measurement system</i> utilizado. b) Preparação da superfície dos provetes para medição com DIC.	19
Figura 3.5. Configuração do ensaio de temperaturas elevadas. a) Máquina de tração Servosis modelo ME402/20. b) Extensómetro Epsilon modelo HI358. c) TML modelo TDS60. d) Forno elétrico com resistência tubular. e) Fibra cerâmica.	21
Figura 4.1. Metalografia da amostra soldada por GMAW sem tratamento térmico. a) Macroestrutura da amostra. b) Diferentes regiões da soldadura. c) ZF. d) Interface entre ZTAGG e ZF. e) Interface entre ZTAGG e ZTAGF. f) Interface entre MB e ZTAGF.	24
Figura 4.2. Metalografia da amostra soldada por FCAW sem tratamento térmico. a) Macroestrutura da amostra. b) Diferentes regiões da soldadura. c) Interface entre ZTAGF e MB. d) Interface entre ZTAGG e ZTAGF. e) Interface entre ZF e ZTAGG. g) ZF.	25
Figura 4.3. Perfil de durezas da junta soldada por GMAW à temperatura ambiente.	26
Figura 4.4. Evolução da dureza na secção transversal da soldadura GMAW.	27
Figura 4.5. Perfil de durezas da junta soldada por FCAW à temperatura ambiente.	27
Figura 4.6. Evolução da dureza na secção transversal da soldadura FCAW.	27
Figura 4.7. Curvas de tensão-deformação do material base à temperatura ambiente.	29
Figura 4.8. Curvas de tensão-deformação da soldadura FCAW à temperatura ambiente.	29

Figura 4.9. Curvas de tensão-deformação da soldadura GMAW à temperatura ambiente.	29
Figura 4.10. Mapas de distribuição de deformação convencional, no instante de carga máxima. a) FCAW. b) GMAW.....	30
Figura 4.11. Curvas de tensão-deformação do material base para diferentes temperaturas. ....	32
Figura 4.12. Curvas de tensão-deformação da soldadura GMAW para diferentes temperaturas. ....	32
Figura 4.13. Localização da fratura nas amostras ensaiadas a diferentes temperaturas. a) MB. b) GMAW. ....	32
Figura 4.14. Metalografia da soldadura GMAW após teste a 600°C. a) Macroestrutura da soldadura. b) e c) Interface entre ZF e ZTAGG. d) Fissuração no aquecimento. e) Microporosidades. f) Inclusão de escória. ....	34
Figura 4.15. Metalografia da soldadura GMAW após teste a 900°C. a) Macroestrutura. b) Interface ZTAGG e ZF. c) Fissura no aquecimento. d) Microporosidades. e) Fases de baixo ponto de fusão. ....	34
Figura 4.16. Comparação entre os fatores de redução obtidos do BM e os disponibilizados pelo EC 3.....	36
Figura 4.17. Comparação entre os fatores de redução da soldadura GMAW e os disponibilizados pelo EC 3. ....	36
Figura 4.18. Microestruturas do aço S355 J2 e das soldaduras FCAW e GMAW, respetivamente, à temperatura ambiente, (a), (b), (c), e após tratamento térmico a 300°C, (d), (e), (f), 600°C, (g), (h), (i) e a 900°C, (j), (k), (l). ....	38
Figura 4.19. Variação do perfil de durezas superior da soldadura GMAW com o aumento da temperatura. ....	39
Figura 4.20. Variação do perfil de durezas superior da soldadura FCAW com o aumento da temperatura.....	39
Figura 4.21. Curvas de tensão-deformação após-fogo do material base para diferentes temperaturas. ....	41
Figura 4.22. Curvas de tensão-deformação após-fogo da soldadura GMAW para diferentes temperaturas. ....	41
Figura 4.23. Curvas de tensão-deformação após-fogo da soldadura por FCAW para diferentes temperaturas ....	41
Figura 4.24. Mapas de distribuição de deformação das soldaduras tratadas termicamente a 600°C, no instante de carga máxima. a) GMAW. b) FCAW. ....	42
Figura 4.25. Macrografia após-rotura da soldadura FCAW tratada termicamente a 900°C. ....	42
Figura 4.26. Evolução dos fatores de redução após-fogo do BM. ....	44
Figura 4.27. Evolução dos fatores de redução após-fogo da soldadura GMAW. ....	44
Figura 4.28. Evolução dos fatores de redução após-fogo da soldadura FCAW.....	44

---

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1. Composição química do aço estrutural S355 J2 (pd%).....	15
Tabela 3.2. Parâmetros utilizados na produção de soldaduras GMAW e FCAW.....	16
Tabela 3.3. Composição química do fio fluxado (pd%).....	17
Tabela 3.4. Composição química do fio sólido (pd%).....	17
Tabela 4.1. Propriedades mecânicas do material base e das soldaduras à temperatura ambiente. ....	30
Tabela 4.2. Propriedades mecânicas do material base e os fatores de redução para diferentes temperaturas.....	35
Tabela 4.3. Propriedades mecânicas da junta GMAW e os fatores de redução para diferentes temperaturas.....	35
Tabela 4.4. Propriedades mecânicas após-fogo e fatores de redução do MB. ....	43
Tabela 4.5. Propriedades mecânicas após-fogo e fatores de redução da soldadura FCAW.....	43
Tabela 4.6. Propriedades mecânicas após-fogo e fatores de redução da soldadura GMAW. ....	43



## SIMBOLOGIA E SIGLAS

### Simbologia

$\sigma_0$  – Tensão limite de elasticidade

$\sigma_{m\acute{a}x}$  – Tensão máxima

$e_{m\acute{a}x}$  – Deformação máxima

$\frac{\sigma_0(T)}{\sigma_0(25^\circ C)}$  – Fator de redução para temperaturas elevadas

$\frac{\sigma_0(T_{pf})}{\sigma_0(25^\circ C)}$  – Fator de redução residual

### Siglas

DIC – *Digital Image Correlation*

AISI – *American Iron and Steel Institute*

ISO – *International Organization for Standardization*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

EC 3 – Eurocódigo 3

GMAW – Soldadura MAG com Fio Sólido

FCAW – Soldadura MAG com Fio Fluxado

MB – Material Base

ZF – Zona Fundida

ZTA – Zona Termicamente Afetada

ZTAGF - Zona Termicamente Afetada de Grão Fino

ZTAGG - Zona Termicamente Afetada de Grão Grosseiro

DEC – Departamento de Engenharia Civil

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica



## 1. INTRODUÇÃO

Outrora o interesse em estudar a resistência das estruturas metálicas face à ocorrência de incêndio era mínimo. Foram apenas os incêndios em edifícios famosos que fizeram despoletar o interesse neste tipo de análise. Deste modo, vários estudos foram realizados para caracterizar o comportamento de aços estruturais durante e após situações de incêndio, com especial enfoque para os aços estruturais de baixo teor de carbono, por serem os mais utilizados em engenharia civil. 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 nos elementos de ligação, isto é, nas soldaduras. Apesar disso a informação disponível sobre a resistência mecânica a temperaturas elevadas de ligações soldadas é reduzida, tendo como principal foco as propriedades mecânicas das soldaduras à temperatura ambiente. Assim, é no contexto da escassez de informação sobre a resistência mecânica de soldaduras a temperaturas elevadas que se insere a presente dissertação, realizada com o intuito de relacionar o comportamento de soldaduras fabricadas em aço S355 J2, durante o fogo e após situação de fogo, com as mudanças que daí advêm. As soldaduras foram produzidas recorrendo ao processo de soldadura MAG, com fio sólido e com fio fluxado, por serem os consumíveis de soldadura mais utilizados na indústria de construção civil. O trabalho de caracterização das soldaduras compreendeu a realização de testes de análise metalográfica, ensaios de dureza e ensaios de tração à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas (300°C, 600°C e 900°C). Nos ensaios mecânicos foram consideradas condições de carregamento em situação de fogo e em situação após-fogo, com arrefecimento a ar dos elementos estruturais.

O texto da dissertação está dividido em cinco partes distintas. No capítulo 1 apresenta-se uma breve introdução do tema desta dissertação. No capítulo 2 mostra-se uma revisão da literatura sobre as propriedades mecânicas dos metais base e das soldaduras, com especial enfoque nas questões alusivas ao tema desta dissertação. No capítulo 3 encontra-se descrito o procedimento experimental, o qual engloba a manufatura das soldaduras até ao processo utilizado nos ensaios de tração. No capítulo 4 são apresentados os resultados da caracterização mecânica e microestrutural das soldaduras, antes, durante e após a exposição

a temperaturas elevadas. Finalmente, no capítulo 5 apresentam-se as conclusões do estudo realizado.

## 2. ESTADO DA ARTE

Os aços, ligas de ferro e carbono, incluem na sua composição um teor de carbono inferior a 2%, até 15% de manganês e pequenas percentagens de enxofre, silício, fósforo e oxigênio, são materiais de eleição em construção civil, devido à sua durabilidade, elevada resistência mecânica e ao baixo custo de aquisição, sendo aplicados em infraestruturas de edifícios comerciais, estruturas offshore, ferramentas, automóveis e navios de carga. De acordo com o *American Iron and Steel Institute* (AISI), os aços podem ser classificados, tendo em conta a sua composição química, em aços ligados, que contêm na sua constituição uma pequena percentagem de um ou mais elementos para além do ferro, em aços inoxidáveis, possuidores de uma elevada resistência à corrosão por apresentarem na sua constituição entre 1 a 20% de crómio, aços para ferramentas, constituídos essencialmente por tungsténio, e aços estruturais, que, por serem os tipos de aços visados nesta dissertação, serão caracterizados em mais detalhe no subcapítulo que se segue.

### 2.1. Aços Estruturais

Os aços estruturais, também designados por aços carbono, são o material padrão utilizado em construção civil, desde na manufatura de infraestruturas edificadas, tais como arranha-céus e pontes, à construção de estruturas *offshore*, pois dispõem das propriedades mecânicas necessárias para resistir às condições adversas, como por exemplo à situação de incêndio. Na Europa, os aços estruturais têm que estar em concordância com a Norma Europeia designada por Eurocódigo 3. Esta norma estabelece os princípios base para o projeto de estruturas em aços com componentes de espessura superior a 3mm, e classifica os aços estruturais em três subclasses (NP EN 1993-1-1 2010):

- Aços de baixo teor em carbono ou aços macios (MS);
- Aços de alta resistência (HSS);
- Aços de elevada resistência (VHSS);

De acordo com o Eurocódigo 3, são considerados aços macios, os aços que apresentam uma tensão limite de elasticidade inferior a 420MPa. Os aços macios contêm na

sua estrutura, tipicamente, entre 0,04% a 0,30% de teor em carbono. Esta classe de aços pode ser encontrada no mercado numa grande diversidade de formatos, desde chapas planas a vigas estruturais, sendo, por isso, a classe mais utilizada na construção de edifícios. Por outro lado, os aços de alta resistência possuem um teor de carbono entre os 0,31% a 0,60% e de manganês entre os 0,060% a 1,65%. Este tipo de aço carbono é mais resistente do que os aços macios, possuindo uma tensão limite de elasticidade igual ou superior a 420MPa. Devido à sua reduzida soldabilidade e enformabilidade a utilização dos aços de alta resistência torna-se mais dispendiosa do que a dos aços macios. Os aços de elevado teor de carbono, correntemente conhecidos como aços de elevada resistência, apresentam tensão limite de elasticidade superior a 690MPa, possuindo teores em carbono entre 0,61% e 1,50%. Esta classe de aços é extremamente difícil de maquinar e de soldar, o que, comparativamente aos aços macios, condiciona a sua utilização.

Nesta dissertação avalia-se a resistência ao fogo de soldaduras em aço macio S355 J2. De seguida faz-se uma descrição sucinta das principais características deste tipo de aço.

### **2.1.1. Aço S355 J2**

O aço estrutural da classe S355 J2 é classificado como um aço macio ou um aço de baixo teor de carbono e, segundo Qiang *et al* (2012), é o principal aço de construção de chapas laminadas a quente e de secções em H na Europa. Na designação deste aço, S representa o fato de ser um aço estrutural, 355 representa a sua tensão limite inferior de elasticidade e J2 a tenacidade do material relativamente ao ensaio de Charpy. O aço S355 J2 é vastamente utilizado no campo da construção civil, sendo aplicado em arranha-céus, pontes e em estruturas offshore, por apresentar bons valores de resistência mecânica, bem como boas propriedades de soldabilidade. As excelentes propriedades mecânicas destes aços devem-se ao facto de serem laminado a quente. Segundo Chung e Ip (2000), na indústria de construção civil, os aços laminados a quente são correntemente utilizados em membros estruturais primários, enquanto que os aços laminados a frio são utilizados como membros secundários.

---

## 2.2. Caracterização Mecânica a Temperaturas Elevadas

O comportamento mecânico de provetes de metal base difere do comportamento mecânico de provetes com soldaduras. Assim sendo, este subcapítulo encontra-se dividido em três partes. Primeiro apresenta-se uma breve introdução dos diferentes tipos de ensaio que se podem realizar. Segundo, apresentam-se os vários estudos efetuados relativamente a provetes de metal base sujeitos a temperaturas elevadas. Finalmente, apresentam-se alguns estudos efetuados em amostras de soldadura sujeitas a fogo.

### 2.2.1. Tipos de Ensaio

A Norma ISO 6892-2 2011 define ensaios a temperaturas elevadas como todos os ensaios realizados a temperaturas superiores a 35°C. Outinen e Mäkeläinen (2000), pioneiros no estudo das propriedades de várias classes de aços a temperaturas elevadas, referem que existem duas metodologias distintas para caracterizar o comportamento dos aços quando sujeitos a condições de incêndio, ou seja, método de ensaio em regime estacionário e em regime transiente. Os ensaios em regime estacionário são os mais comuns e provavelmente os mais fáceis de se concretizar, uma vez que as curvas de tensão-deformação são obtidas diretamente a partir dos dados registrados, reduzindo a eventualidade de erros humanos. Os testes em regime estacionário consistem em aquecer as amostras até uma determinada temperatura e, após um período de uniformização de temperatura, procede-se ao seu carregamento. Por outro lado, os ensaios em regime transiente são considerados os mais realistas na medida em que simulam um membro estrutural sob carga estática e sujeita ao fogo. Estes testes consistem em carregar os provetes enquanto são aquecidos até à temperatura desejada. No entanto, ao contrário do ensaio em regime estacionário, a partir dos ensaios em regime transiente obtêm-se curvas temperatura-deformação, sendo necessário à sua conversão em curvas de tensão-deformação (Craveiro *et al.* (2016)).

### 2.2.2. Metais Base

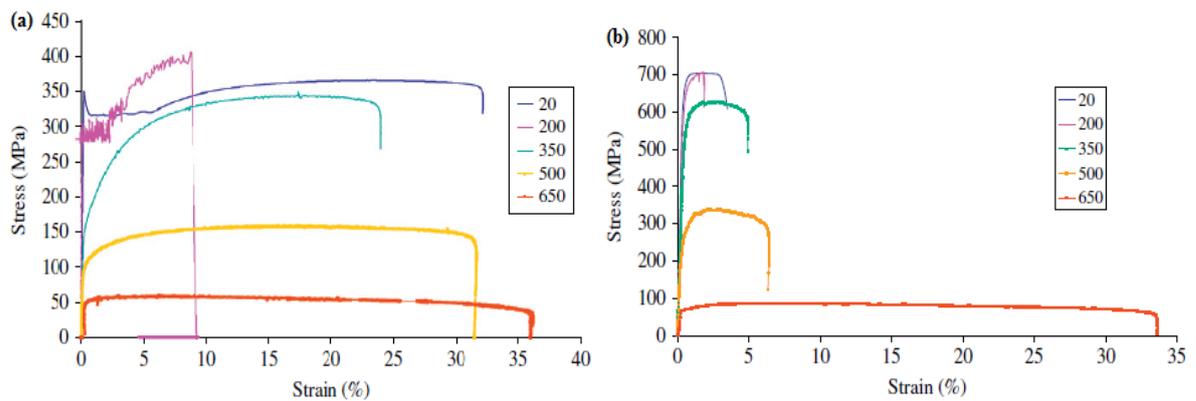
Existem várias situações em que os aços estruturais podem ser expostos a temperaturas elevadas, seja por acidente, quer por erro humano. Assim, o estudo do comportamento dos aços estruturais com o aumento da temperatura é vital para o projeto de

estruturas metálicas. Apesar de nos últimos anos os aços serem muito utilizados na construção de estruturas de edifícios, os dados publicados sobre a caracterização de aços laminados a quente durante a exposição a temperaturas elevadas são limitados. Apesar disso é possível encontrar alguns estudos sobre a variação da resistência mecânica de várias classes de aços com o aumento da temperatura.

Outinen *et al* (2000) estudaram o comportamento do aço S355 J2H laminado a frio, quando sujeito a temperaturas elevadas. Estes autores recorreram à realização de ensaios em regime estacionário, com uma taxa de aquecimento de 20°C/min para testar o aço. De acordo com os resultados obtidos, a deterioração da resistência deste aço ocorre a partir dos 200°C. Os autores compararam os fatores de redução, ou seja, a razão entre as propriedades mecânicas a temperaturas elevadas e as propriedades mecânicas à temperatura ambiente, do aço S355 J2H, com os disponibilizados pelo Eurocódigo 3 (EC 3). Verificaram que os fatores de redução obtidos eram similares aos normalizados, pelo que será seguro utilizar a norma para o projeto de estruturas metálicas fabricadas em aço S355 J2H.

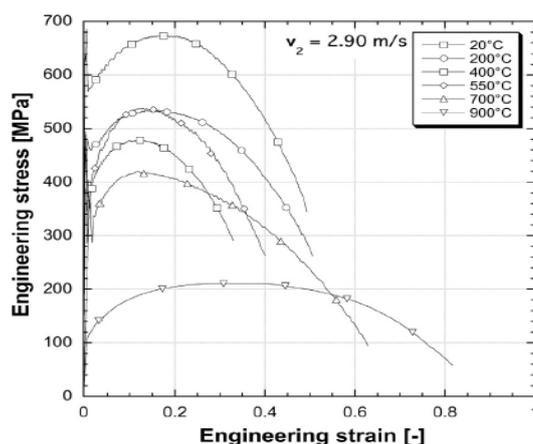
Chen e Young (2006) recorreram aos ensaios em regime estacionário e em regime transiente para caracterizarem as propriedades mecânicas de aços inoxidáveis de diferentes classes (EN 1.4462 e EN 1.4301) quando expostos a temperaturas a variar entre 22°C e 760°C. Concluíram que a resistência de ambos os aços deteriorava-se para valores de temperatura superiores a 80°C. Estes autores também compararam os fatores de redução da tensão limite de elasticidade de ambos os aços com os recomendados pelo EC 3. Concluíram que o Eurocódigo não consegue prever com precisão o comportamento de ambos os aços.

Ranawaka e Mahendran (2009) analisaram o comportamento do aço de baixa resistência G250 (Figura 2.1 (a)) e do aço de elevada resistência G550 (Figura 2.1 (b)) durante a exposição a temperaturas elevadas utilizando ensaios em regime estacionário. Os resultados obtidos demonstram que, para baixas temperaturas, o comportamento do aço G550 é totalmente diferente do aço G250. Para a temperatura de 200°C observaram que a tensão máxima do aço G250 era superior à registada à temperatura ambiente e que a sua ductilidade diminuía. O aumento da resistência foi atribuído à presença de azoto na composição deste aço. Para temperaturas superiores a 200°C os autores observaram uma redução significativa da resistência mecânica para ambos os aços. Estes autores compararam os fatores de redução obtidos com os fatores fornecidos pelo EC 3. Verificaram que os fatores de redução obtidos eram inferiores aos normalizados.



**Figura 2.1.** Curvas de tensão-deformação a temperaturas variáveis. a) Aço G250. b) Aço G550 (adaptado de Ranawaka e Mahendran (2009)).

Forni *et al* (2016) analisaram a resistência mecânica de estruturas metálicas em aço estrutural S355 a temperaturas elevadas. Estes autores realizaram ensaios em regime transite e utilizaram elevadas taxas de deformação. Os resultados obtidos mostram-se na Figura 2.2, onde é possível observar uma diminuição significativa da resistência do aço até aos 400°C. Já na gama de temperaturas de 400°C e 550°C, é possível observar tanto um ligeiro aumento da resistência, acompanhada por uma diminuição da extensão total do provete. Este aumento de resistência é idêntico ao referenciado por Ranawaka e Mahendran (2009). Segundo Forni *et al* (2016) o aumento de resistência deve-se a um fenómeno designado por *blue brittleness*, muito comum em aços carbono e é atribuído ao envelhecimento dinâmico. Segundo Dolzhenkov (1971) e Berenice *et al* (2013) o fenómeno *blue brittleness* resulta do envelhecimento dinâmico do aço, que consiste na interação de deslocamentos e átomos intersticiais, principalmente carbono e azoto, ocorrendo quando o aço é exposto a temperaturas elevadas, levando ao aumento da resistência do material devido à formação de carbonetos.



**Figura 2.2.** Curvas convencionais de tensão-deformação em elevadas temperaturas (adaptado de Forni *et al* (2016)).

Li e Young (2017) estudaram a resistência mecânica dos aços de elevada resistência S690 e S960. Estes autores observaram um aumento de resistência destes materiais para temperaturas entre 200°C e 300°C. No entanto, ao contrário dos estudos referidos anteriormente, os fenómenos adjacentes ao aumento de resistência não são abordados por estes autores.

De acordo com os trabalhos analisados, os aços estruturais, de um modo geral, apresentam um aumento de resistência quando ensaiados a temperaturas elevadas. Os valores de temperaturas para os quais se verifica o aumento de resistência depende da classe de aço ensaiado.

### 2.2.3. Soldaduras

Da literatura é possível retirar alguma informação pertinente para o estudo das propriedades mecânicas de soldaduras a temperaturas elevadas.

Cresson (1998) investigou as propriedades mecânicas de soldaduras topo-a-topo produzidas por MAG e por arco submerso, nos aços S275 e S355 JR. Estes autores observaram um aumento de resistência na gama de temperaturas de 250°C e 300°C, no material base e na soldadura, o qual foi atribuído à ocorrência de envelhecimento dinâmico. Observaram também que a degradação da resistência mecânicas das soldaduras dava-se para temperaturas superiores a 500°C.

Conlon (2009) estudou a resistência mecânica a temperaturas elevadas de soldaduras topo-a-topo, fabricadas em aço ASTM A588, equivalente ao aço S355 J2, segundo a norma EN 10025. O autor concluiu que a resistência mecânica da soldadura se degradava a partir de 400°C. Verificou também que, para temperaturas superiores a 400°C, a degradação de resistência era superior, em comparação ao material base, na soldadura. No entanto, esse fenômeno não é abordado pelo autor. Estes autores compararam os fatores de redução das soldaduras com os recomendados pelo Eurocódigo 3 (1995). Os autores concluíram, de um modo geral, que os fatores de redução obtidos eram distintos aos disponibilizados pelo Eurocódigo 3. Na gama de temperaturas de 200 a 400°C, os fatores de redução obtidos eram inferiores aos disponibilizados, enquanto que para temperaturas superiores a 760°C, os fatores eram superiores.

Ozyurt *et al* (2014) realizaram um estudo de simulação numérica, com recurso ao software ABAQUS, a fim de avaliar o efeito da temperatura na resistência mecânica de juntas soldadas em T fabricadas no aço S355. Os autores simularam ensaio em regime estacionário e concluíram que com o aumento de temperatura, a tensão máxima reduzia de forma mais acentuada que a tensão limite de elasticidade da soldadura, ou seja, observaram alterações no comportamento plástico do material com o aumento da temperatura.

## **2.3. Caracterização Mecânica Após-fogo**

Neste subcapítulo apresentam-se, de forma dividida, os estudos de caracterização de metais base e de soldaduras em situação de após-fogo.

### **2.3.1. Metais Base**

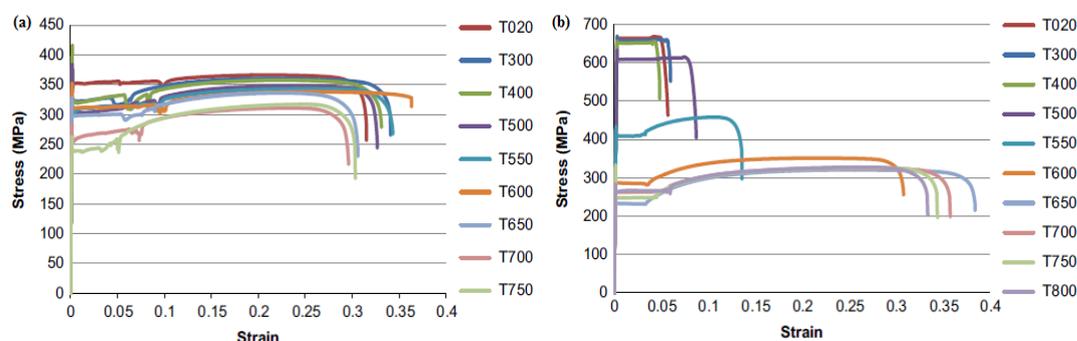
Segundo Qiang *et al* (2012) o colapso de estruturas metálicas é raro pois, após fogo, a resistência do aço é recuperada durante o arrefecimento, o que faz com que a estrutura retenha alguma capacidade de carga. Qiang *et al* (2012) e Qiang *et al* (2013) examinaram o comportamento em tração dos aços de elevada resistência S460, S690 e S960 sujeito a tratamentos térmicos através de ensaios em regime estacionário e constataram que para temperaturas inferiores a 600°C o módulo de elasticidade era constante, mas diminuía para valores de temperatura superiores a 600°C. Concluíram também que os aços de maior resistência (S690 e S960) experienciaram maiores perdas de resistência do que o aço S460.

Estes autores compararam os resultados obtidos com o Eurocódigo 3. Acabaram por concluir, que existe um desentendimento entre os resultados que obtiveram e os disponibilizados pelo Eurocódigo 3. Segundo Qiang *et al* (2012), as recomendações do EC 3 foram baseadas principalmente em aços macios com tensão limite de elasticidade inferior a 325 MPa. Assim sendo, é necessário uma norma que englobe o comportamento mecânico após-fogo de todos os aços.

Dhua *et al* (2000) estudaram as propriedades mecânicas do aço de elevada resistência HSLA de classe 100 em situação após-fogo. Verificaram que a dureza, a tensão limite de elasticidade e a tensão máxima mantinham-se constantes com o aumento da temperatura de tratamento térmico até 400°C. A 450°C, observaram um aumento da resistência mecânica do aço. Para temperaturas superiores a 450°C, as propriedades mecânicas do aço começavam-se a degradar.

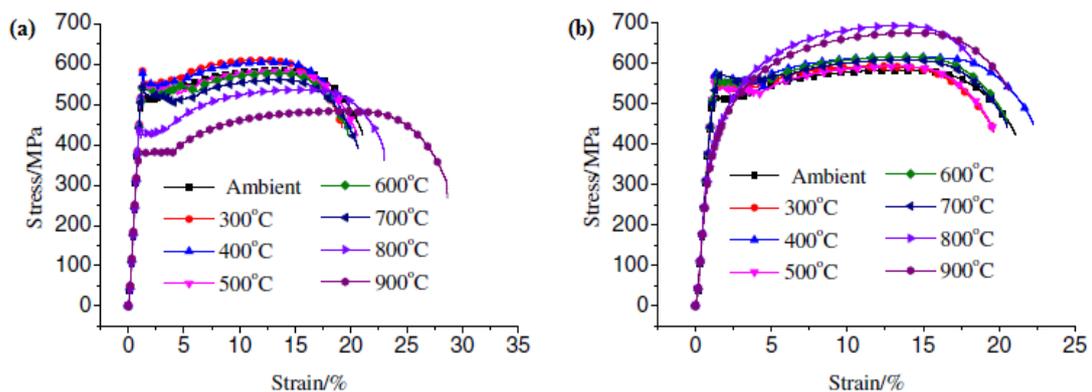
Shen *et al* (2005) estudaram as propriedades do aço Q235 em situação após-fogo e concluíram que a resistência do aço diminuía com o aumento da temperatura, mas, por outro lado, o módulo de elasticidade mantinha-se praticamente contante até 400°C.

Gunalan e Mahedran (2014) investigaram as propriedades mecânicas após-fogo dos aços G300 (1mm), G500 (1,15mm) e G550 (0,95mm) laminados a frio. As amostras de aço foram expostas a diferentes temperaturas, até 800°C, e, antes de serem testadas à tração, foram arrefecidas, ao ar, até à temperatura ambiente. Na Figura 2.3 b) mostra-se que a resistência mecânica destes aços apresentava uma redução significativa para temperaturas superiores a 300°C. Estes autores compararam os resultados obtidos com o EC 3. Verificaram, tal como Qiang *et al* (2012) e Qiang *et al* (2013), que existe um desentendimento entre os resultados obtidos e os recomendados pelo EC 3.



**Figura 2.3.** Curvas de tensão-deformação obtidas para diferentes temperaturas (adaptado de Gunalan e Mahedran (2014)).

Wang *et al* (2015) estudaram o efeito do método de arrefecimento na resistência mecânica em tração do aço de elevada resistência, GB Q460, quando sujeito a temperaturas até 900°C. Constataram que o método de arrefecimento influencia bastante a resistência mecânica e o alongamento a temperaturas elevadas. Tal como se mostra na Figura 2.4, as curvas de tensão-deformação das amostras arrefecidas ao ar (Figura 2.4 a)) revelaram que a resistência mecânica diminui à medida que a temperatura de exposição aumenta. Para as amostras tratadas termicamente a 800°C e 900°C, e posteriormente arrefecidas por água (Figura 2.4 b)), registaram uma maior resistência que à temperatura ambiente. Concluíram que o método de arrefecimento influencia diretamente a microestrutura final do material, o que conduz a diferentes resistências à medida que a temperatura de tratamento térmico aumenta.



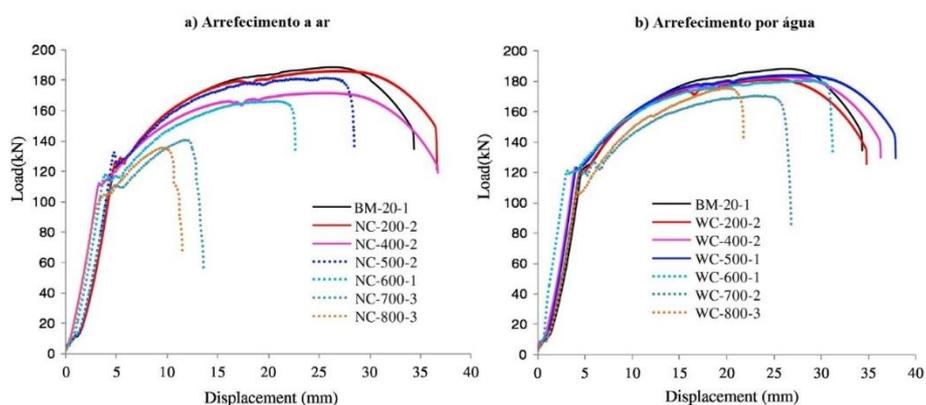
**Figura 2.4.** Efeito do arrefecimento nas propriedades mecânicas do aço de elevada resistência (adaptado de Wang *et al* (2015)).

### 2.3.1. Soldaduras

Segundo Meichun *et al* (2016) a soldadura é das regiões mais críticas durante o arrefecimento de uma estrutura metálica. Estes autores avaliaram a resistência mecânica após-fogo de soldaduras em aço Q345B, e ainda a influência do método de arrefecimento nas propriedades mecânicas. Concluíram que a resistência residual após-fogo das soldaduras, ou seja, a capacidade de carga que um material pode suportar após ter sido submetido a temperaturas elevadas, diminui com o aumento da temperatura a que estiveram sujeitas durante o incêndio. Por outro lado, concluíram também que o arrefecimento por água

conduz a uma menor degradação de resistência da soldadura do que o arrefecimento ao ar. Estes autores compararam os fatores de redução obtidos com os recomendados pelo EC 3. Verificaram que os fatores recomendados eram cerca de 20% inferiores do que os obtidos.

Zhang *et al.* (2017) estudaram as propriedades residuais de soldaduras em aço Q345B depois de expostas a temperaturas entre 200°C e 800°C. Tal como os autores anteriores, analisaram a influência do método de arrefecimento nas propriedades do aço. Os resultados dos ensaios demonstraram que a rotura dos provetes soldados ocorre na zona fundida quando a temperatura de tratamento térmico ultrapassa os 400°C. Concluíram também, tal como os autores anteriores, que as amostras que foram arrefecidas ao ar (Figura 2.5 a)) apresentavam menor resistência do que as amostras arrefecidas por água (Figura 2.5 b)).



**Figura 2.5.** Efeito do arrefecimento nas propriedades mecânicas de soldaduras feitas de aço Q345B. a) Arrefecimento a ar. b) Arrefecimento por água. (adaptado de Zhang *et al* (2017)).

Liu *et al* (2017) avaliaram as propriedades mecânicas após-fogo de soldaduras topo-a-topo feitas nos aços Q235 e Q345. As amostras foram submetidas a temperaturas de 400°C a 800°C e posteriormente arrefecidas ao ar. Os autores observaram que a tensão limite de elasticidade e a tensão máxima eram dependentes da classe do material e da temperatura a que foram expostas. Constataram também que a tensão limite de elasticidade das soldaduras diminuía quando a temperatura a que estiveram expostas superava os 600°C. A tensão limite de elasticidade manteve-se constante para temperaturas de exposição inferiores a 400°C.

Araque *et al* (2018), tal como os autores anteriores, analisaram o efeito do método de arrefecimento nas propriedades mecânicas de amostras soldadas de aço ASTM A-36 HR, em situação após-fogo. Concluíram que soldaduras arrefecidas por água atingiram a maior probabilidade de sobrevivência, comparativamente às juntas arrefecidas por ar, ou seja, as propriedades mecânicas das soldaduras arrefecidas ao ar degradaram-se de forma mais acentuada, em comparação às arrefecidas por água.

Da análise bibliográfica pode concluir-se que o comportamento mecânico dos aços a temperaturas elevadas encontra-se dependente da classe de cada aço, sendo possível verificar que, para temperaturas superiores à temperatura ambiente, ocorre um aumento da resistência dos provetes, tanto em soldaduras como em amostras de material base. Este aumento de resistência poderá ser atribuído ao fenómeno de envelhecimento dinâmico. Após esse aumento, verifica-se, à medida que a temperatura aumenta, a degradação das propriedades mecânicas. Por outro lado, em situação após-fogo, conclui-se que a resistência dos aços é condicionada pelo método de arrefecimento, sendo que o arrefecimento por água conduz a uma menor redução de resistência do que a utilização de arrefecimento ao ar. Contudo, independentemente do método de arrefecimento, pode também concluir-se que com o aumento da temperatura de tratamento térmico até 600°C, não afeta a tensão limite de elasticidade mantinha-se, mas provoca uma redução da tensão máxima das amostras. No entanto, tal como a temperaturas elevadas, verifica-se que o comportamento de um aço depende essencialmente da sua classe.

De um modo geral, verifica-se que existe um desentendimento entre os fatores de redução obtidos com os recomendados pelo EC 3, à exceção de soldaduras em situação após-fogo, em que nenhum autor comparou os fatores de redução obtidos com os recomendados pelo EC 3.



## 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

### 3.1. Metal Base

Neste trabalho foi utilizado como material base o aço laminado a quente, S355 J2. A composição química deste aço, disponibilizada pela empresa fornecedora Rizhao Steel Holding Group CO., Ltd, é apresentada na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1.** Composição química do aço estrutural S355 J2 (pd%).

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Al	Fe
	0.17	0.21	1.45	0.23	0.07	0.33	Balanço

### 3.2. Elaboração das Soldaduras

As soldaduras foram produzidas utilizando o processo de soldadura MAG, na empresa J. Rascão Lda, em Coimbra, Portugal. Foram produzidos dois tipos de soldaduras, utilizando como consumíveis fios sólidos e fios fluxados. No decorrer da dissertação, as soldaduras produzidas com fio sólido serão designadas por GMAW e as soldaduras produzidas com fio fluxado serão designadas por FCAW.

#### 3.2.1. Preparação da Junta

A geometria da junta planeada, de acordo com o Eurocódigo 3, encontra-se representada na Figura 3.1.

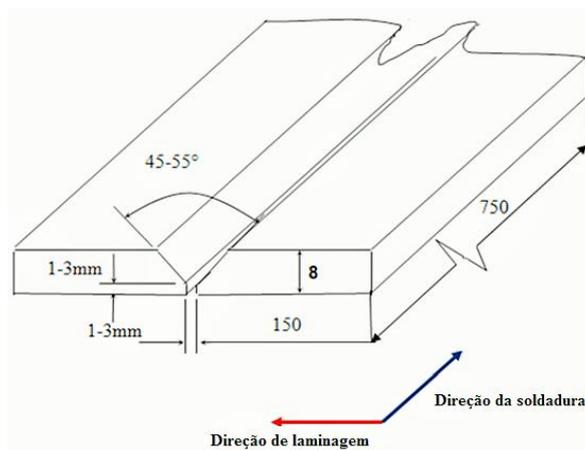


Figura 3.1. Esquema da junta e dimensões das chapas utilizadas.

### 3.2.2. Parâmetros das Soldaduras

Na Tabela 3.2 mostram-se os parâmetros utilizados na produção das soldaduras fabricadas com os dois tipos de material de adição, segundo a norma ISO 15614-1:2017. As composições químicas dos materiais de adição são apresentadas, respectivamente, na Tabela 3.3 (fio fluxado) e na Tabela 3.4 (fio sólido).

Tabela 3.2. Parâmetros utilizados na produção de soldaduras GMAW e FCAW.

Parâmetros	Unidade	GMAW	FCAW
<b>Diâmetro do eletrodo</b>	[mm]	1.2	1.2
<b>Temperatura de pré-aquecimento</b>	[°C]	-	-
<b>Temperatura de entressaque</b>	[°C]	135	135
<b>Gás protetor (20% Ar + CO<sub>2</sub>)</b>	[l/min]	15	12
<b>Estilo do bocal</b>		Longo	Longo
<b>Corrente</b>	[A]	145	152
<b>Voltagem</b>	[V]	22.5	23.3
<b>Velocidade</b>	[mm/min]	185	175
<b>Input de aquecimento</b>	[kJ/mm]	1.06	1.214

**Tabela 3.3.** Composição química do fio fluxado (pd%).

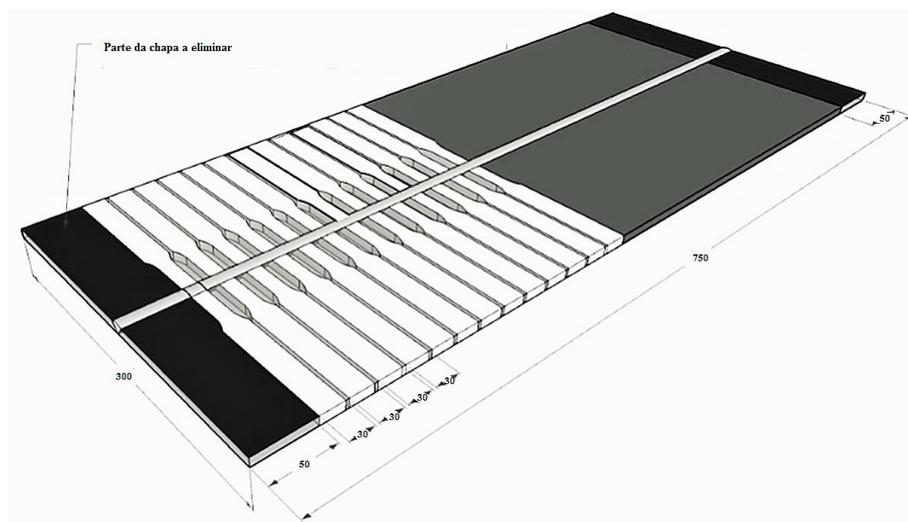
Elemento	C	Mn	Si	S	P	Al	Cu	Fe
	0.045	1.242	0.287	0.008	0.005	0.006	0.072	Balanço

**Tabela 3.4.** Composição química do fio sólido (pd%).

Elemento	C	Mn	Si	S	P	Al	Cu	Fe
	0.090	1.390	0.820	0.011	0.009	0.004	0.340	Balanço

### 3.2.3. Amostragem

A extração de provetes para análise metalográfica e para caracterização mecânica, à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas, foi efetuada tendo em conta o esquema de amostragem que se representa na Figura 3.2. De maneira a suprimir prováveis defeitos na soldadura, eliminaram-se 50 mm de ambas as extremidades da placa soldada. Para além dos provetes soldados, fabricaram-se provetes de material base. Foram produzidos 9 provetes para medição de dureza e análise metalográfica, e 66 provetes para a caracterização mecânica, perfazendo um total de 75 provetes.

**Figura 3.2.** Esquema de amostragem dos provetes.

### 3.3. Análise Metalográfica

Para a realização da análise metalográfica, as amostras das soldaduras e de material base foram cortadas, lixadas, polidas e atacadas posteriormente, de modo a revelar a microestrutura do material. Para o ataque químico foi utilizado o reagente Nital, constituído por 2% de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) e 98% de etanol ( $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ ). De forma a evitar que o reagente queimasse a amostra, não foi efetuada a imersão das amostras no reagente, tendo-se optado por colocar o reagente em algodão e aplicá-lo, de seguida, na superfície da amostra.

As microestruturas dos provetes das soldaduras e do material base, foram examinadas através do microscópio ótico Leica DM 4000M, recorrendo a ampliações de 50x, 100x, 200x, 500x e 1000x, segundo a norma ISO 643:2012.

### 3.4. Caracterização Mecânica

A caracterização mecânica das soldaduras e do material base assentou na realização de ensaios de dureza e de ensaios de tração. Os ensaios de tração foram realizados à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas. À temperatura ambiente foram testadas amostras nas condições após soldadura e após fogo.

#### 3.4.1. Ensaio de Dureza

As medições de dureza foram efetuadas recorrendo ao equipamento de medição Struers Type Duramin 1, com uma carga de 1.961 N aplicada durante 15 segundos. Os perfis de dureza, em Vickers (HV), resultaram de medições efetuadas na secção transversal das soldaduras e no material base, tal como se pode observar na Figura 3.3.

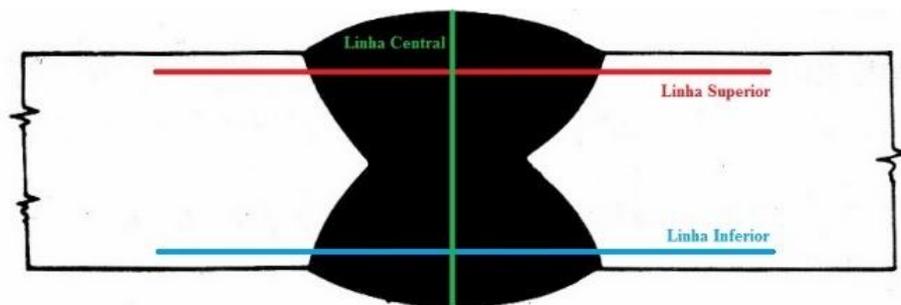
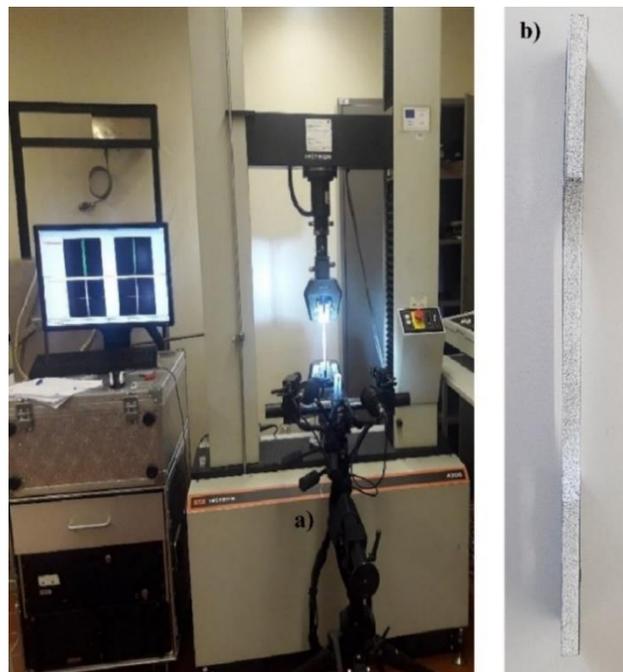


Figura 3.3. Esquema do perfil de durezas de uma amostra soldada.

### 3.4.2. Ensaios de Tração à Temperatura Ambiente e Após-fogo

A resistência mecânica do material base e das soldaduras, à temperatura ambiente e em situação após-fogo foi avaliada por meio da realização de ensaios de tração uniaxial, com uma velocidade de 0.01 mm/s. Nos ensaios de tração após-fogo foram utilizadas amostras previamente aquecidas, através de um forno Termolab, com um controlador Eurotherm, até à temperatura de 300°C, 600°C e 900°C e arrefecidas ao ar. Estes ensaios foram executados no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra (DEM), segundo a norma ISO 6892-1:2016. O extensómetro ótico, *ARAMIS Optical 3D Deformation & Strain measurement system*, representado na Figura 3.4 a), foi utilizado de forma a ser possível a medição da deformação a que o provete esteve sujeito durante o ensaio de tração. Para isso foi imprescindível preparar, previamente, a superfície das amostras a ensaiar, de acordo com o procedimento esclarecido em Leitão *et al* (2012) e Leitão *et al* (2013). Para tal, como se pode observar na Figura 3.4 b), aplicou-se uma camada inicial de tinta branca na superfície das amostras, e, após a secagem, aplicaram-se aleatoriamente pequenas gotas de tinta preta ao longo da secção do provete. Todos os ensaios foram repetidos três vezes, de modo a garantir a reprodutibilidade dos resultados



**Figura 3.4.** a) Extensómetro ótico *ARAMIS Optical 3D Deformation & Strain measurement system* utilizado.  
b) Preparação da superfície dos provetes para medição com DIC.

### 3.4.3. Ensaios de Tração a Temperaturas Elevadas

Recorreu-se ao ensaio de tração em regime estacionário com a finalidade de avaliar as propriedades mecânicas a temperaturas elevadas das soldaduras e do material base. Como já foi referido anteriormente, este ensaio consiste em aquecer a amostra até ao valor de temperatura desejado e, após um período de estabilização de temperatura, aplicar uma carga de tração. Os ensaios foram realizados no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra (DEC), segundo a norma ISO 6892-2: 2011, numa máquina Servosis modelo ME402/20 com capacidade de carga de 200 kN, tal como se mostra na Figura 3.5 a). Os provetes das soldaduras e do material base foram ensaiados a 300°C, 600°C e 900°C. O aquecimento foi realizado a uma taxa de 5°C/min. Após a temperatura desejada ter sido atingida, esperou-se 20 minutos (período de estabilização de temperatura) para que a temperatura do provete uniformizasse, iniciando-se o ensaio de seguida. Todos os ensaios foram realizados com uma taxa de deslocamento de 0.01 mm/s. A aquisição da deformação foi feita recorrendo ao extensómetro mecânico de temperaturas elevadas, Epsilon modelo HI358, representado na Figura 3.5 b). Este extensómetro possui um comprimento útil de 50 mm e com capacidade de expansão até 25.4 mm, sendo arrefecido por água através de um sistema Caron 2050 série 3. O extensómetro foi previamente calibrado, recorrendo a um extensómetro de deformação FLA-6-11. Com a finalidade de prevenir o escorregamento das varetas do extensómetro durante o ensaio de tração, utilizou-se silicone de temperaturas elevadas, com capacidade até 1200°C. Para garantir que, quer a taxa de aquecimento, quer a temperatura do provete fossem as desejadas, utilizaram-se três termopares e um sistema de aquisição de dados, TML modelo TDS60 (Figura 3.5 c)). As amostras foram aquecidas recorrendo a um forno de resistência tubular elétrica com um controlador Eurotherm (Figura 3.5 d)). Para que não ocorresse dissipação de calor para o exterior, aplicou-se isolamento de fibra de cerâmica, de cor branca, nos orifícios do forno (Figura 3.5 e)). Para cada temperatura foram efetuados três ensaios, de modo a averiguar a reprodutibilidade dos resultados.



**Figura 3.5.** Configuração do ensaio de temperaturas elevadas. a) Máquina de tração Servosis modelo ME402/20. b) Extensómetro Epsilon modelo HI358. c) TML modelo TDS60. d) Forno elétrico com resistência tubular. e) Fibra cerâmica.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados da caracterização mecânica e microestrutural, antes, durante e após a exposição do aço S355 J2 e das soldaduras a temperaturas elevadas.

### 4.1. Caracterização Mecânica e Microestrutural

#### 4.1.1. Temperatura Ambiente

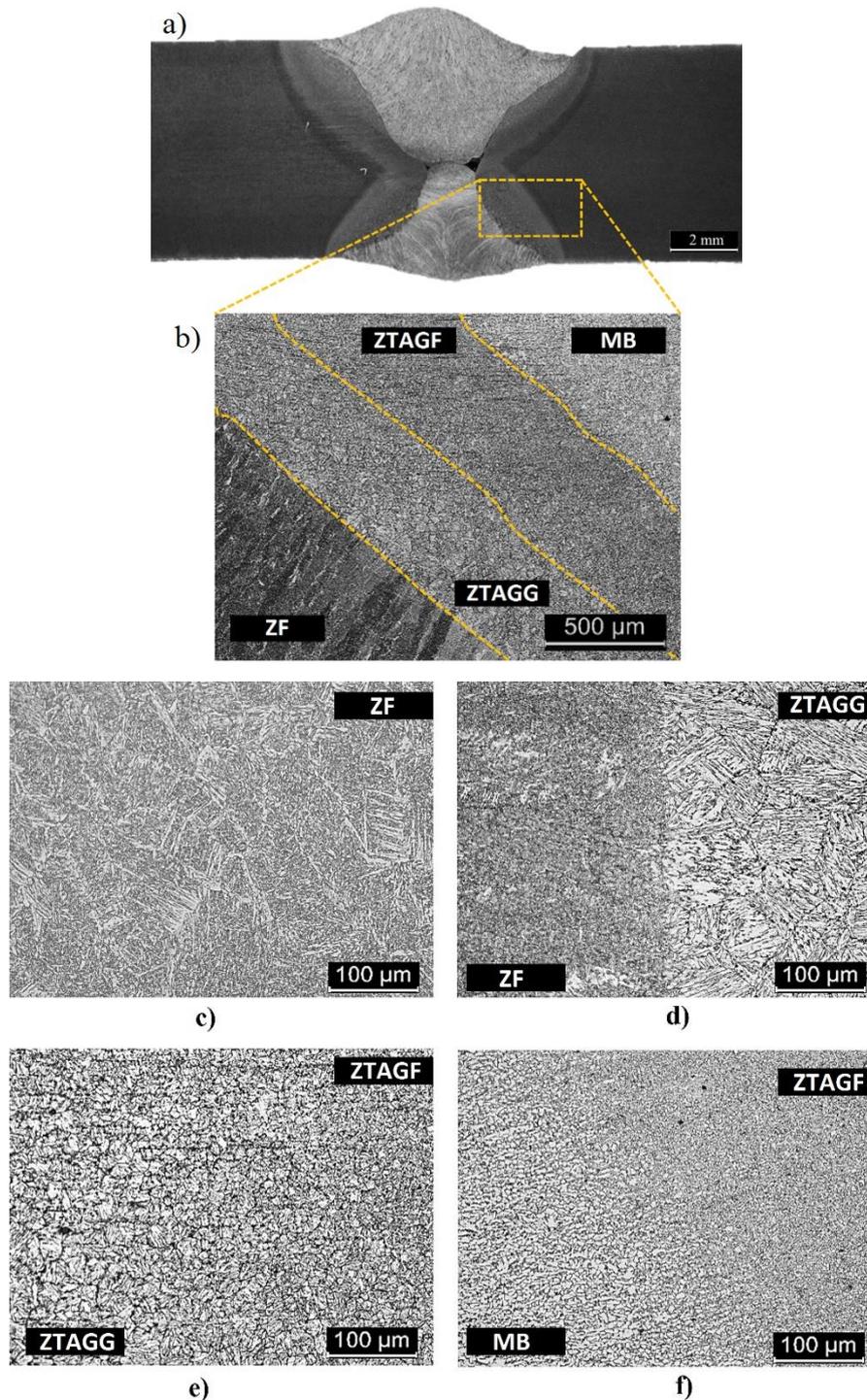
De seguida mostram-se os resultados da caracterização à temperatura ambiente do material base e das soldaduras FCAW e GMAW. A caracterização consistiu na realização de análises metalográficas, ensaios de dureza e ensaios de tração.

##### 4.1.1.1. Análise Metalográfica

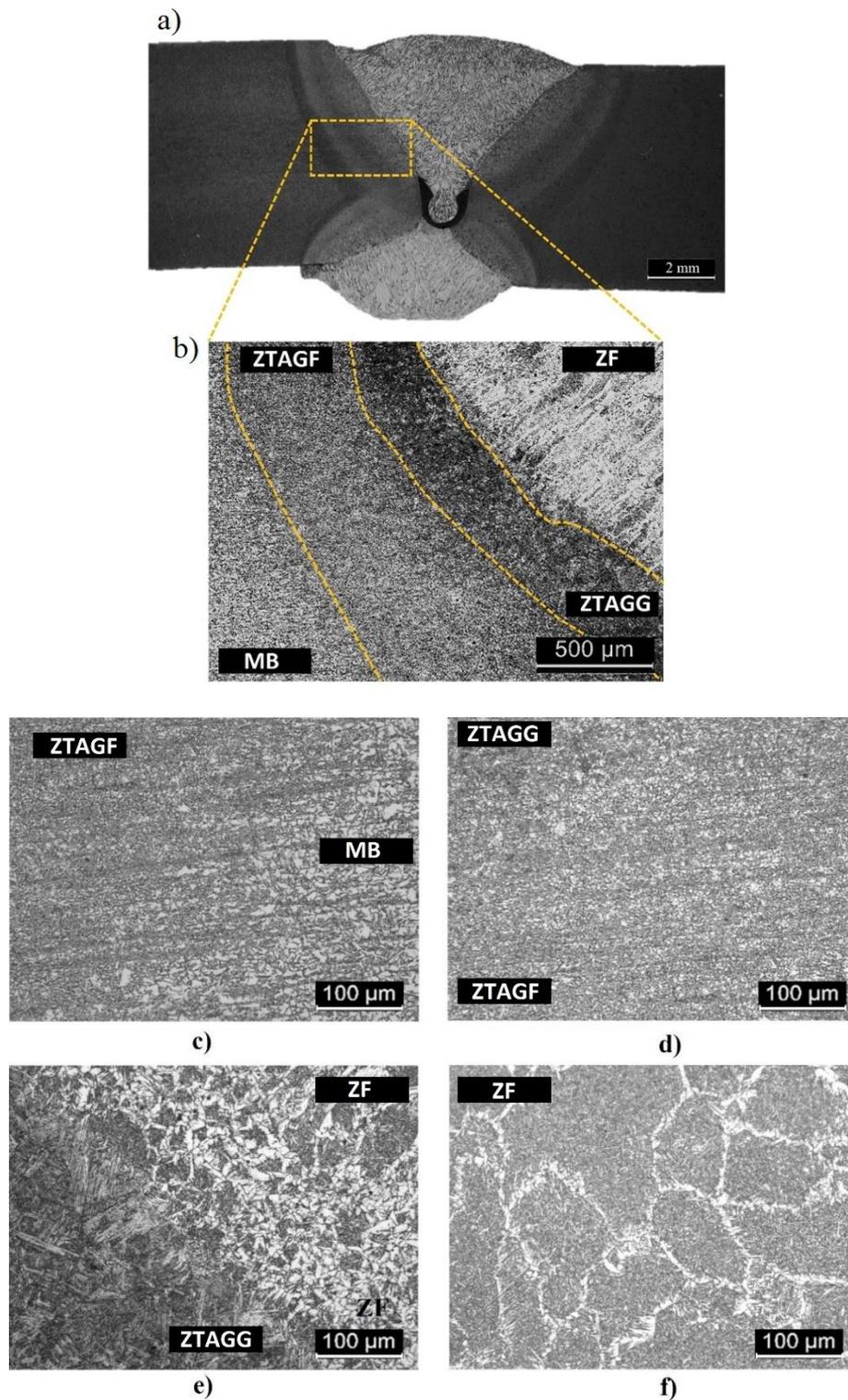
Na Figura 4.1 encontra-se representada a macroestrutura da secção transversal da soldadura GMAW (Figura 4.1 a)) e as microestruturas nas diferentes regiões assinaladas na Figura 4.1 b). É claramente visível na Figura 4.1 a) a presença de uma inclusão de escória na interface dos dois cordões de soldadura que compõe a zona fundida (ZF). Na Figura 4.1 c), onde se mostra um detalhe da microestrutura na ZF, é possível observar a presença de ferrite de diversas morfologias com alinhamento de fases de carbono e bainite. Na Figura 4.1 d) observa-se a evidência de crescimento epitaxial de ferrite na interface entre a ZF e a zona termicamente afetada de grão grosseiro (ZTAGG). As Figuras 4.1 e) e f) representam a microestrutura da interface entre a ZTAGG e a zona termicamente afetada de grão fino (ZTAGF) e a interface entre a ZTAGF e o MB, respetivamente.

Na Figura 4.2 é apresentada a macroestrutura da soldadura FCAW (Figura 4.2 a)) e as microestruturas nas diferentes regiões indicadas na Figura 4.2 b). A Figura 4.2 a) permite, uma vez mais, observar a presença de uma inclusão de escória na ZF, de maior dimensão do que a observada na soldadura GMAW. Apesar de terem sido utilizados dois tipos diferentes de material de adição, pode-se observar que as microestruturas nas diferentes

regiões são similares para as soldaduras GMAW e FCAW. A única diferença a assinalar, será na Figura 4.2 e), alusiva à interface entre a ZTAGG e a ZF, onde é possível observar morfologias equiaxiais de ferrite.



**Figura 4.1.** Metalografia da amostra soldada por GMAW sem tratamento térmico. a) Macroestrutura da amostra. b) Diferentes regiões da soldadura. c) ZF. d) Interface entre ZTAGG e ZF. e) Interface entre ZTAGG e ZTAGF. f) Interface entre MB e ZTAGF.



**Figura 4.2.** Metalografia da amostra soldada por FCAW sem tratamento térmico. a) Macroestrutura da amostra. b) Diferentes regiões da soldadura. c) Interface entre ZTAGF e MB. d) Interface entre ZTAGG e ZTAGF. e) Interface entre ZF e ZTAGG. g) ZF.

#### 4.1.1.2. Ensaios de Dureza

Nas Figuras 4.3 a 4.6 mostram-se os perfis de dureza medidos nas secções transversais das amostras GMAW (Figura 4.3 e 4.4) e FCAW (Figura 4.5 e 4.6). A análise das figuras permite concluir que a utilização de consumíveis sólidos e fluxados não conduziu a diferenças significativas nos valores de dureza nas diferentes zonas das soldaduras. Com efeito, é possível observar nas Figuras 4.3 e 4.5, perfis de dureza em “M” muito comuns nas soldaduras em aços estruturais. No entanto, pode-se observar que o perfil de durezas da zona superior das soldaduras difere do perfil de durezas da zona inferior. Esta desigualdade resulta da diferença de larguras dos cordões superior e inferior. De maneira a compreender a localização dos valores máximos e mínimos de dureza em ambas as soldaduras, apresentam-se as Figuras 4.4 e 4.6, onde se sobrepõe os valores de dureza da soldadura GMAW e FCAW, respetivamente, com uma imagem da secção transversal onde as medições foram efetuadas. Estas figuras mostram que os valores máximos e mínimos de dureza são semelhantes em ambas as soldaduras. Em ambas as soldaduras os valores máximos de dureza foram registados na ZTAGG, enquanto que os valores mínimos de dureza foram registados na ZTAGF.

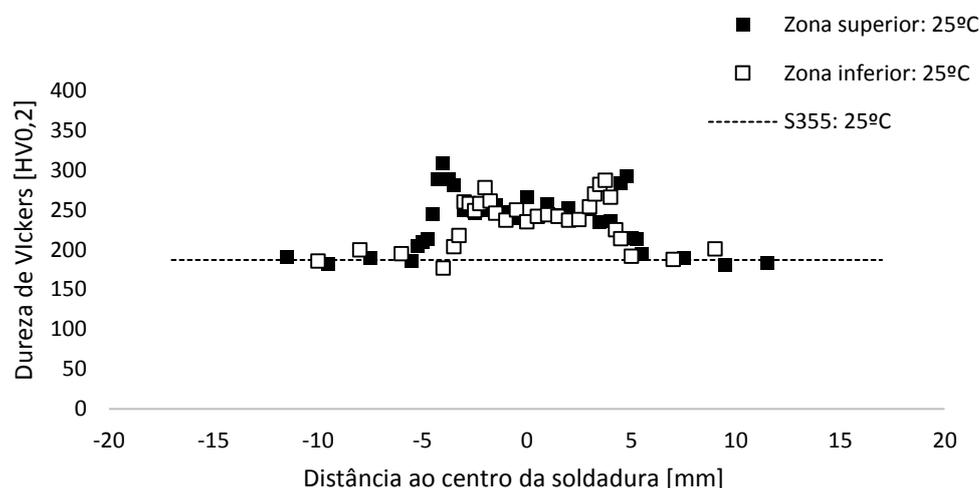


Figura 4.3. Perfil de durezas da junta soldada por GMAW à temperatura ambiente.

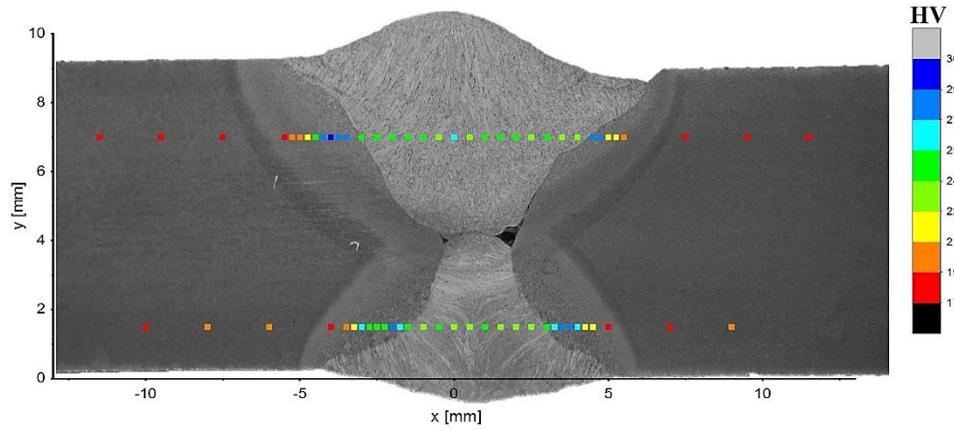


Figura 4.4. Evolução da dureza na secção transversal da soldadura GMAW.

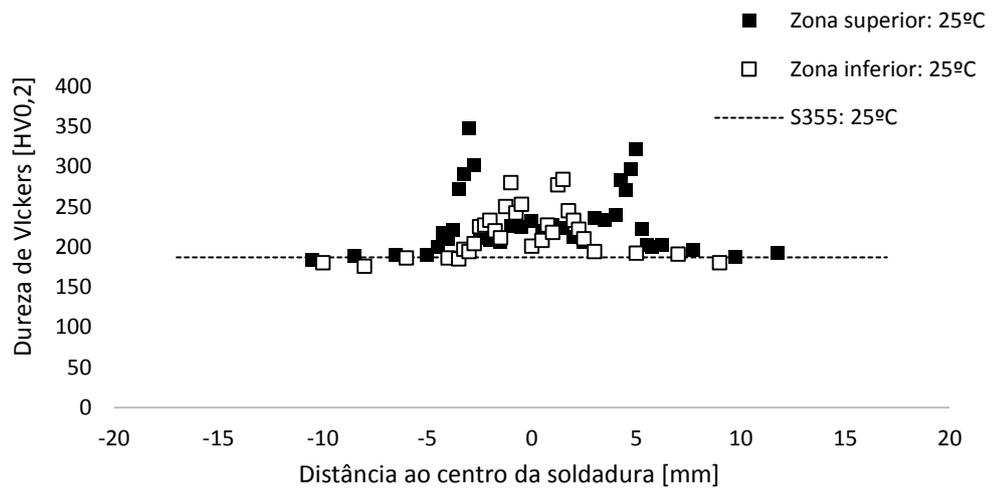


Figura 4.5. Perfil de durezas da junta soldada por FCAW à temperatura ambiente.

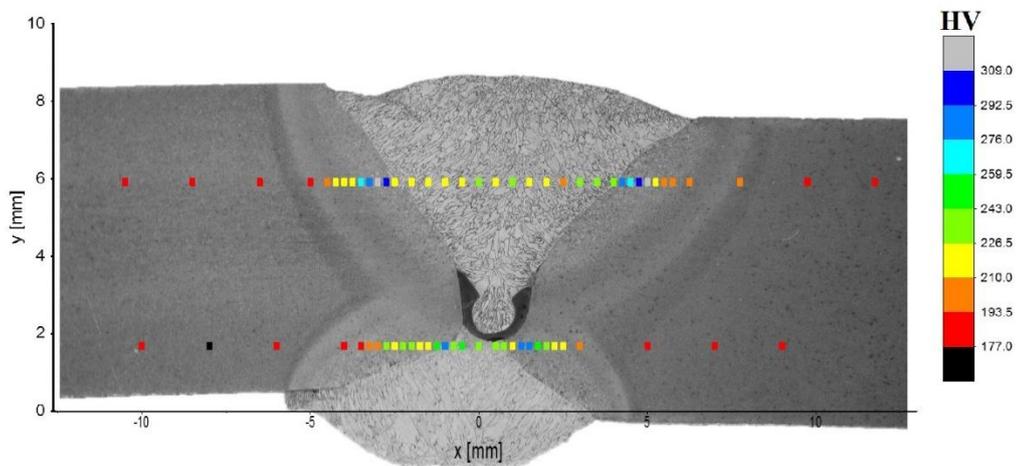


Figura 4.6. Evolução da dureza na secção transversal da soldadura FCAW.

#### 4.1.1.3. Ensaio de Tração

Nas Figuras 4.7 a 4.9 estão representadas as curvas convencionais tensão-deformação obtidas nos ensaios de tração uniaxial do material base (Figura 4.7) e das soldaduras FCAW (Figura 4.8) e GMAW (Figura 4.9). As curvas mostram a excelente concordância dos resultados obtidos nos ensaios efetuados para cada material. Na Tabela 4.1 compilam-se os valores da tensão limite de elasticidade ( $\sigma_0$ ), da tensão máxima ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ) e da deformação até à carga máxima ( $e_{m\acute{a}x}$ ) obtidos com base nas curvas de tração. Os dados apresentados na tabela permitem concluir que a tensão limite de elasticidade dos provetes soldados foi semelhante à do material base, independentemente do consumível de soldadura utilizado. Já a tensão máxima e a deformação máxima dos provetes das soldaduras, comparativamente ao material base, apresentaram valores mais reduzidos. Este comportamento deve-se à existência da região da soldadura que, tal como se concluiu no subcapítulo 4.1.2, possui uma dureza superior à do material base. Na Figura 4.10 são apresentados dois mapas com a distribuição da deformação em duas amostras das soldaduras, no instante em que foi atingida a carga máxima. A análise das figuras permite concluir que a região da soldadura apresentou valores de deformação praticamente nulos, quer nas soldaduras FCAW (Figura 4.10 a)), quer nas soldaduras GMAW (Figura 4.10 b)). As imagens permitem também observar que a deformação plástica, e subsequentemente rotura das amostras, ocorreu no material base, para as duas soldaduras. É ainda possível concluir que o defeito originado pela inclusão de escória na ZF (Subcapítulo 4.1.1.1., Figura 4.1 a) e Figura 4.2 a)) não condicionou a resistência mecânica das soldaduras à temperatura ambiente.

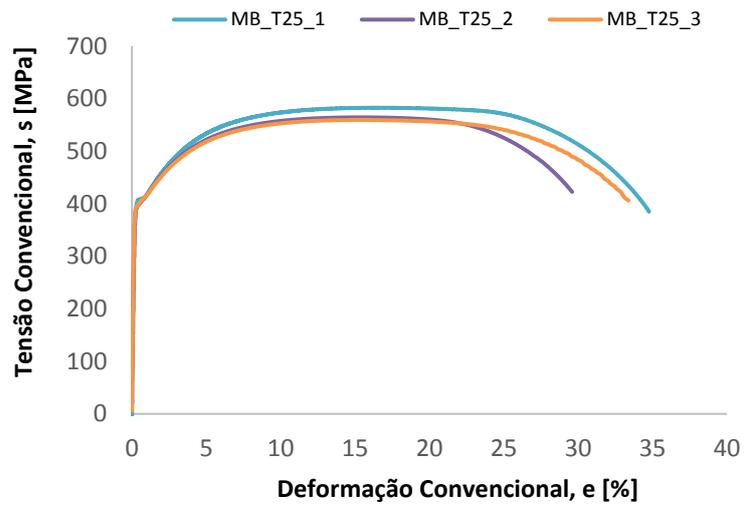


Figura 4.7. Curvas de tensão-deformação do material base à temperatura ambiente.

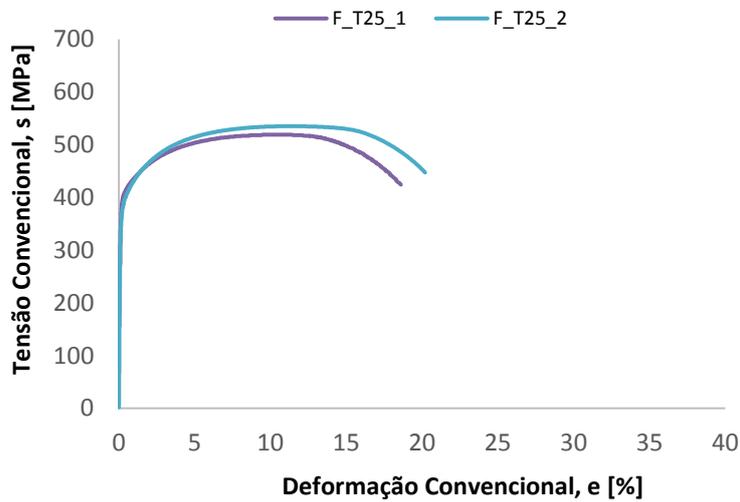


Figura 4.8. Curvas de tensão-deformação da soldadura FCAW à temperatura ambiente.

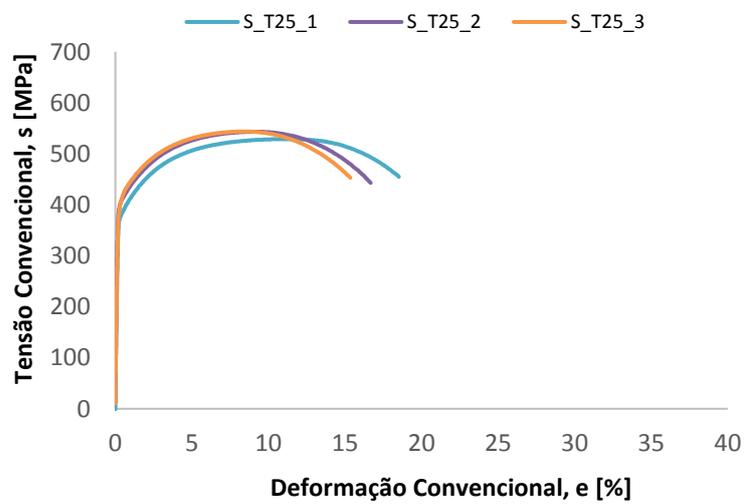
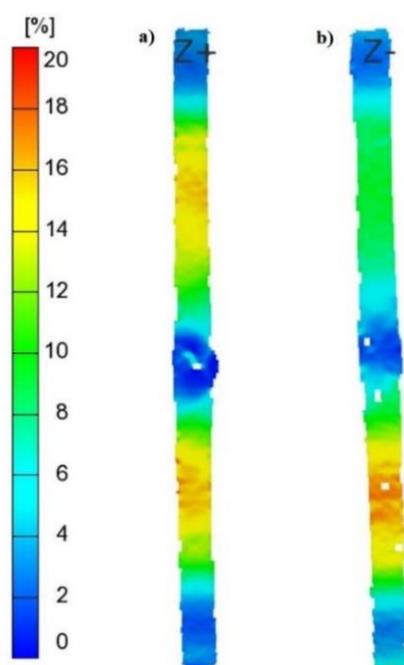


Figura 4.9. Curvas de tensão-deformação da soldadura GMAW à temperatura ambiente.

**Tabela 4.1.** Propriedades mecânicas do material base e das soldaduras à temperatura ambiente.

25°C	MB_1	MB_2	MB_3	S_1	S_2	S_3	F_1	F_2
$\sigma_0$ [MPa]	400	400	400	395	400	400	400	400
$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	582	544	560	529	543	544	519	535
$e_{m\acute{a}x}$ [%]	34	30	33	19	17	16	19	20

**Figura 4.10.** Mapas de distribuição de deformação convencional, no instante de carga máxima. a) FCAW. b) GMAW.

#### 4.1.2. Temperaturas Elevadas

Neste subcapítulo mostram-se os resultados da caracterização mecânica do material base e da soldadura GMAW, bem como a análise microestrutural, após rotura, das soldaduras testadas a 600°C e 900°C. É feita a comparação dos fatores de redução do MB e da soldadura GMAW com os disponibilizados pelo Eurocódigo 3. Os fatores de redução representam a razão entre as propriedades mecânicas a temperaturas elevadas e as propriedades mecânicas à temperatura ambiente. As amostras das soldaduras FCAW foram excluídas desta análise devido à dimensão do defeito de soldadura.

#### 4.1.2.1. Ensaio de Tração em Regime estacionário

Os ensaios de tração a temperaturas elevadas, em regime estacionário, foram realizados de acordo com o procedimento descrito no subcapítulo 3.4.3. Nas Figuras 4.11 e 4.12 apresentam-se as curvas tensão-deformação do MB e das soldaduras GMAW. As curvas de tensão-deformação mostram um aumento de resistência, quer do MB, quer da soldadura GMAW durante os ensaios realizados a 300°C. Este aumento foi também observado por outros autores, tendo sido já discutido no subcapítulo 2.3. Mais concretamente, o aumento da resistência pode ser atribuído ao fenómeno *blue brittleness* resulta do envelhecimento dinâmico do material durante a deformação. Para temperaturas de ensaio superiores a 300°C, registou-se uma diminuição brusca de resistência, quer do MB, quer da soldadura. Apesar da redução da tensão máxima e da tensão limite de elasticidade, com o aumento da temperatura, pode observar-se que o alongamento das soldaduras não foi afetado. De maneira a ilustrar melhor esse comportamento, na Figura 4.13 apresentam-se as fotografias das amostras ensaiadas, após rotura. Pode constatar-se que as roturas do MB foram do tipo dúctil e ocorreram sempre dentro do comprimento útil do provete. Até 600°C é possível observar a formação de estrição antes da rotura. Por sua vez, a 900°C, pode-se observar que, apesar de não ter ocorrido alteração do alongamento do provete, a rotura não foi antecedida de estrição. Quanto às amostras soldadas (Figura 4.13 b)), nota-se que a rotura foi dúctil em todos os ensaios realizados até à temperatura de 300°C. Para esta temperatura, a fratura localizou-se no material base, ocorrendo estrição antes da rotura. Já para os ensaios realizados a 600°C e a 900°C, pode verificar-se que a rotura ocorreu na soldadura, resultando num alongamento inferior ao registados para as amostras de material base.

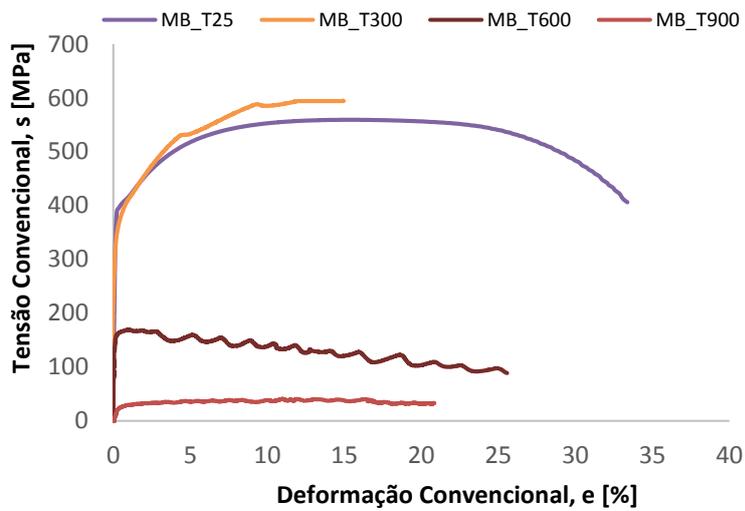


Figura 4.11. Curvas de tensão-deformação do material base para diferentes temperaturas.

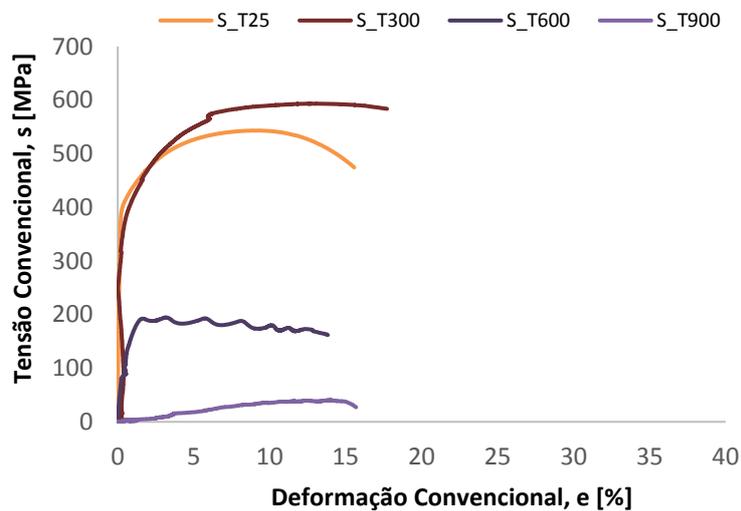


Figura 4.12. Curvas de tensão-deformação da soldadura GMAW para diferentes temperaturas.

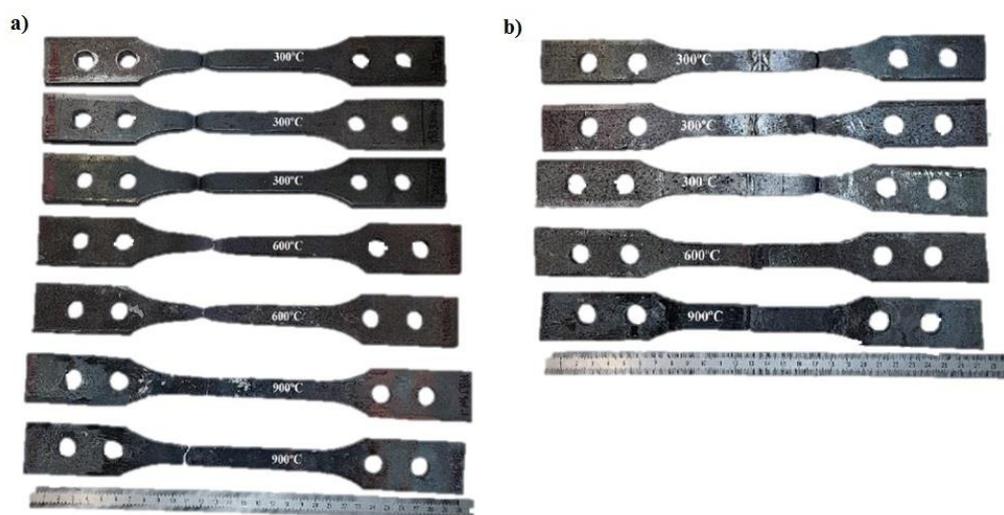
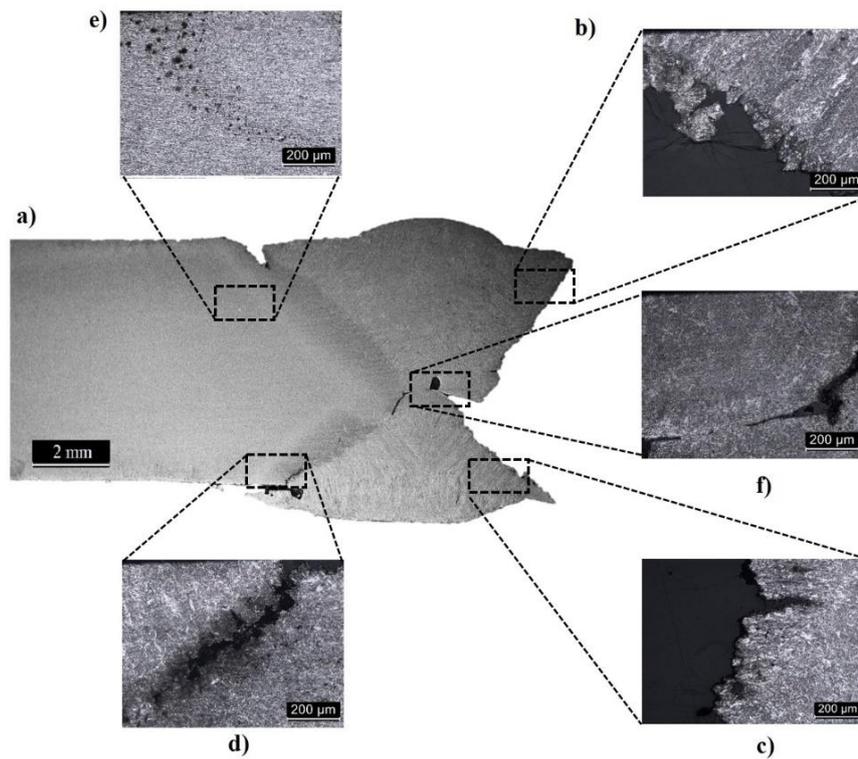


Figura 4.13. Localização da fratura nas amostras ensaiadas a diferentes temperaturas. a) MB. b) GMAW.

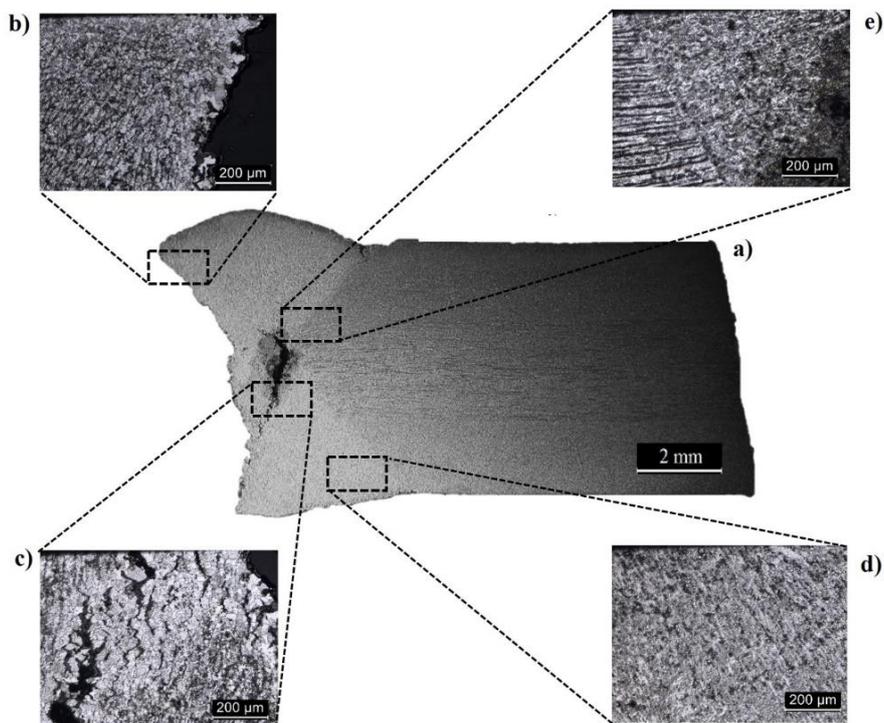
#### 4.1.2.2. Análise Metalográfica Após Ruptura

De maneira a melhor entender o comportamento mecânico das soldaduras GMAW, quando solicitadas em tração a temperaturas elevadas, nas Figuras 4.14 e 4.15, mostram-se macrografias e micrografias retiradas à temperatura ambiente dos provetes testados a 600°C e 900°C. Através da análise das Figuras 4.14 a), b) e c), relativamente à amostra ensaiada a 600°C, é possível concluir que a ruptura ocorreu na interface entre a ZF e a ZTAGG e que se propagou ao longo das fronteiras de grão (fissuração intergranular), sugerindo a ocorrência de fissuração nas soldaduras durante o aquecimento das amostras para o ensaio de tração. Na Figura 4.14 d) pode mesmo observar-se uma destas fissuras, na face do provete oposta aquela onde ocorreu a ruptura. A Figura 4.14 e) ilustra também a presença de múltiplas microporosidades no material base, formadas durante o ensaio de tração a temperaturas elevadas, as quais poderiam funcionar como núcleos para a iniciação e propagação de outras fendas. A Figura 4.14 f) permite mais uma vez observar a inclusão de escória a meio da soldadura. Apesar da gravidade deste defeito, a imagem mostra que este não teve qualquer influência na resistência mecânica das soldaduras. A macroestrutura do provete de soldadura GMAW, testado a 900°C, representado na Figura 4.15 a), permite observar que nesta amostra a ruptura se iniciou na interface da ZTAGG e se propagou até ao centro da ZF. Tal como se observou na macroestrutura da amostra ensaiada a 600°C, nota-se a existência de uma fissura de aspeto serrilhado (Figura 4.15 c)), situada na raiz dos cordões de soldadura. Esta fissura terá sido formada durante o aquecimento da amostra antes da realização do ensaio, devido à existência de microporosidades (Figura 4.15 d)), de carbonetos e de fases de baixo ponto de fusão ao longo das fronteiras de grão (Figura 4.15 e)) e que provocam uma diminuição da ductilidade local do cordão de soldadura.

Assim, pode concluir-se que a ocorrência de fissuração na soldadura GMAW durante o aquecimento para o ensaio de tração, condicionou a resistência mecânica a temperaturas elevadas, e que a existência de carbonetos e fases de baixo ponto de fusão limitou o alongamento da amostra de MB ensaiada a 900°C.



**Figura 4.14.** Metalografia da soldadura GMAW após teste a 600°C. a) Macroestrutura da soldadura. b) e c) Interface entre ZF e ZTAGG. d) Fissuração no aquecimento. e) Microporosidades. f) Inclusão de escória.



**Figura 4.15.** Metalografia da soldadura GMAW após teste a 900°C. a) Macroestrutura. b) Interface ZTAGG e ZF. c) Fissura no aquecimento. d) Microporosidades. e) Fases de baixo ponto de fusão.

#### 4.1.2.3. Comparação com o Eurocódigo 3

O Eurocódigo 3 é a norma Europeia mais utilizada no projeto de estruturas metálicas em situações de fogo. Assim, é de extrema importância verificar se os fatores de redução disponibilizados pela norma refletem corretamente o comportamento de aços utilizados em estruturas. Deste modo, nas Tabelas 4.2 e 4.3 são disponibilizados os fatores de redução das amostras de MB e das soldaduras GMAW, respectivamente. Nas Figuras 4.16 e 4.17 são comparados os fatores de redução da tensão limite de elasticidade, (TLE), com os fatores de redução prescritos pelo EC 3, Eurocódigo 3 (EN 1993-1 Parte 2 2005, Quadro 3.1, Quadro E.1).

**Tabela 4.2.** Propriedades mecânicas do material base e os fatores de redução para diferentes temperaturas.

Temperatura	Amostra	$\sigma_0$ [MPa]	$\frac{\sigma_0(T)}{\sigma_0(25^\circ C)}$
25°C	MB_T25	400	1.00
300°C	MB_T300	400	1.00
600°C	MB_T600	163	0.41
900°C	MB_T900	35	0.09

**Tabela 4.3.** Propriedades mecânicas da junta GMAW e os fatores de redução para diferentes temperaturas.

Temperatura	Amostra	$\sigma_0$ [MPa]	$\frac{\sigma_0(T)}{\sigma_0(25^\circ C)}$
25°C	S_T25	400	1.00
300°C	S_T300	400	1.01
600°C	S_T600	162	0.42
900°C	S_T900	35	0.09

A Figura 4.16 permite observar a similaridade entre os fatores de redução do MB e os fatores de redução do EC3 (Quadro 3.1). Contudo, nota-se que a 600°C, os fatores de redução da TLE do MB são inferiores aos do EC3. No entanto, essa discrepância não é

significativa, pelo que é seguro a utilização dos fatores de redução do EC 3 para o projeto de estruturas metálicas.

Na Figura 4.17, comparam-se os fatores para a soldadura com os disponibilizados pelo EC 3 (Quadro E.1). É de notar que, apesar da inclusão de escória, os fatores de redução, em todas as temperaturas testadas, são superiores aos normalizados. No entanto, a existência de um defeito nas soldaduras permite concluir que a temperaturas elevadas os fatores de redução cedidos pelo EC3 encontram-se sobredimensionados em relação aos da soldadura GMAW. Portanto, torna-se necessário rever a norma face à utilização de juntas GMAW fabricadas em aço S355 J2 a temperaturas elevadas.

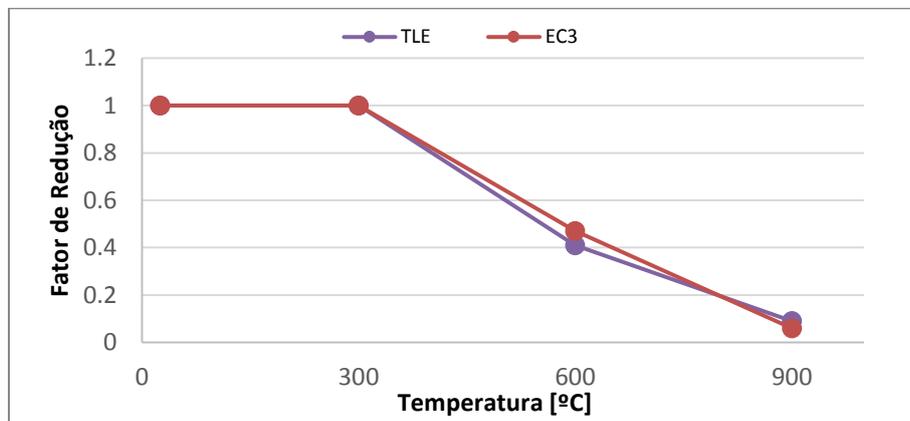


Figura 4.16. Comparação entre os fatores de redução obtidos do BM e os disponibilizados pelo EC 3.

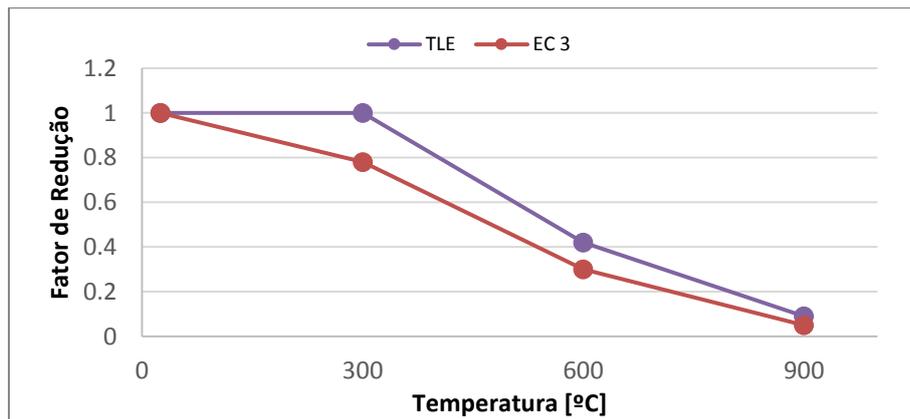


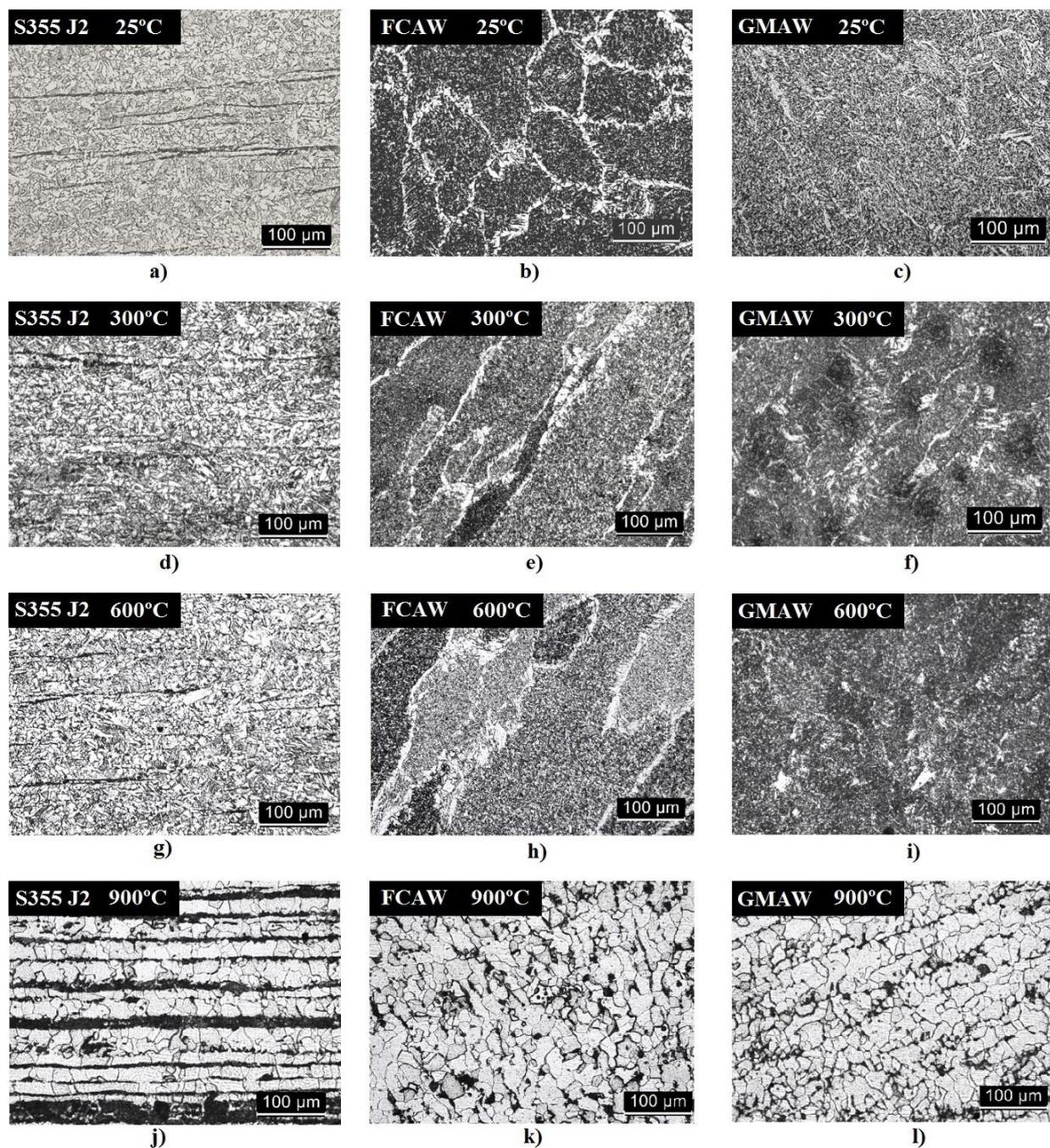
Figura 4.17. Comparação entre os fatores de redução da soldadura GMAW e os disponibilizados pelo EC 3.

### 4.1.3. Aapós-fogo

Neste subcapítulo mostram-se os resultados da caracterização mecânica e microestrutural do material base e das soldaduras GMAW e FCAW após-fogo. Como referido no procedimento experimental, a caracterização mecânica após-fogo contemplou a realização de ensaios de dureza e de tração em amostras tratadas termicamente e posteriormente arrefecidas a ar. Mais uma vez será efetuada a comparação dos fatores de redução residuais com os fatores cedidos pelo Eurocódigo 3. É de referir que a soldadura GMAW, tratada termicamente a 900°C, foi excluída da análise devido a dificuldades na aquisição da deformação durante o ensaio de tração. Deste modo, apenas se apresentam os mapas de distribuição de deformação até a 600°C.

#### 4.1.3.1. Análise Metalográfica

Na Figura 4.18 comparam-se as microestruturas do MB e das soldaduras FCAW e GMAW, respetivamente, à temperatura ambiente (Figura 4.18 a), b) e c)) e após tratamento térmico a 300°C (Figura 4.18 d), e) e f), a 600°C (Figura 4.18 g), h) e i)) e a 900°C (Figura 4.18 j), k) e l)) . À temperatura ambiente o material base apresenta uma estrutura metálica ferrita-perlítica, típica dos aços laminados a quente de baixo teor de carbono. Da análise da imagem é possível observar que não ocorrem alterações significativas na microestrutura do material base e das soldaduras após tratamento térmico a 300°C e a 600°C. A 900°C pode observar-se, tanto no material base (Figura 4.18 j)), como nas soldaduras ((Figura 4.18 k) e l)), um engrossamento do grão ferrítico, bem como a existência de carbonetos e fases de baixo ponto fusão (cor escura) intercalados com a matriz ferrítica (cor branca).

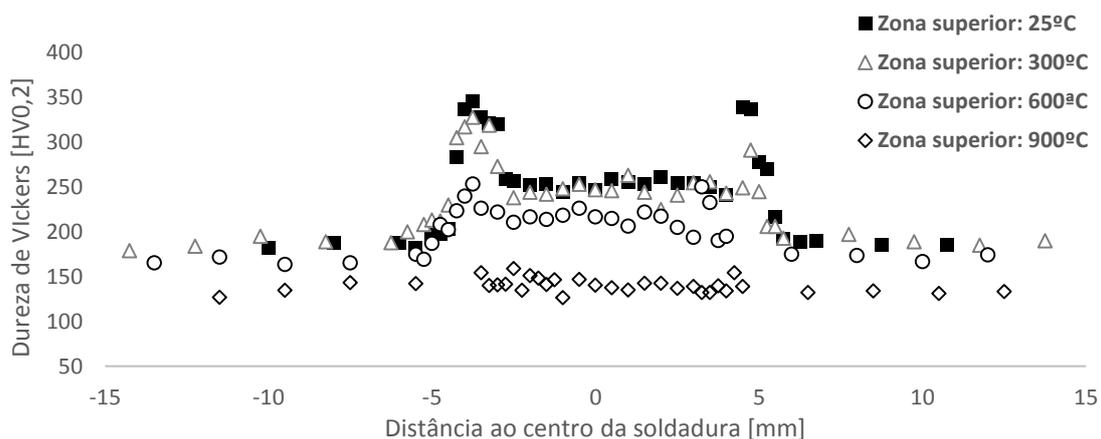


**Figura 4.18.** Microestruturas do aço S355 J2 e das soldaduras FCAW e GMAW, respetivamente, à temperatura ambiente, (a), (b), (c), e após tratamento térmico a 300°C, (d), (e), (f), 600°C, (g), (h), (i) e a 900°C, (j), (k), (l).

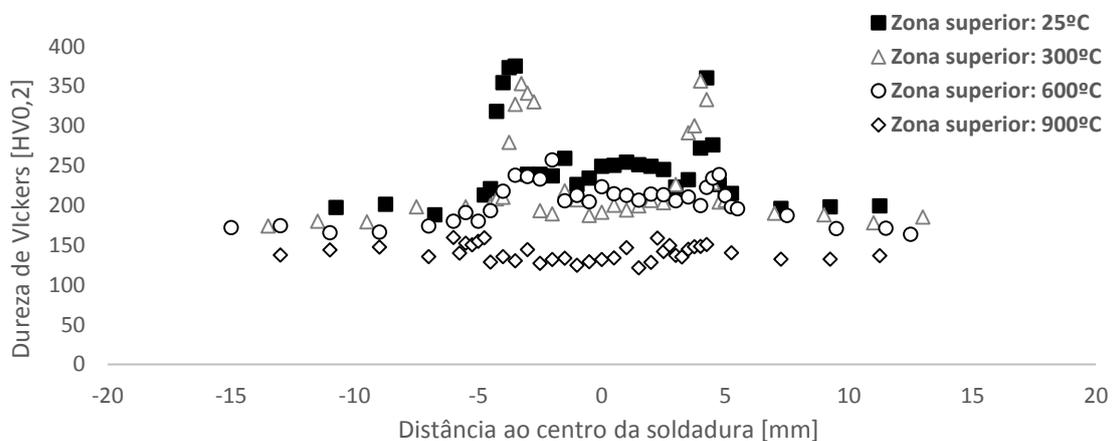
#### 4.1.3.2. Ensaio de Dureza

De forma a facilitar a compreensão do efeito da temperatura na resistência das soldaduras GMAW e FCAW, são comparados, nas Figuras 4.19 e 4.20, respetivamente, os

perfis de dureza correspondentes a amostras em estado após-soldadura e após tratamento térmico a diversas temperaturas. Os perfis foram obtidos na zona superior das soldaduras. As figuras permitem constatar que os perfis de dureza das soldaduras aquecidas a 300°C são idênticos aos das soldaduras não tratadas termicamente. Quando a temperatura de tratamento térmico aumenta para 600°C, a dureza das soldaduras começa a diminuir, no entanto, o perfil em “M”, característico dos aços carbono, não é significativamente alterado. Finalmente, quando as soldaduras são sujeitas a temperaturas de tratamento térmico de 900°C, para além de uma redução acentuada da dureza, na ZTA e na ZF, pode observar-se uma uniformização desta ao longo da secção transversal de soldadura. Este decréscimo de dureza é explicado através do engrossamento do grão ferrítico em toda a secção transversal das amostras, evidenciado na análise metalográfica.



**Figura 4.19.** Variação do perfil de durezas superior da soldadura GMAW com o aumento da temperatura.



**Figura 4.20.** Variação do perfil de durezas superior da soldadura FCAW com o aumento da temperatura.

#### 4.1.3.3. Ensaios de Tração

Os ensaios de tração foram realizados de acordo com o procedimento referente aos ensaios de tração após-fogo convencionais e que se encontra descrito no subcapítulo 3.4.3. De seguida são apresentadas as curvas de tensão-deformação das amostras de MB (Figura 4.21) e das soldaduras GMAW (Figura 4.22) e FCAW (Figura 4.23). A análise das figuras permite concluir que a resistência após-fogo das amostras de MB e das soldaduras FCAW e GMAW, sujeitas a temperaturas de 300°C e 600°C, é idêntica à das amostras que não sofreram qualquer tratamento térmico. Contudo, após 600°C, pode observar-se uma redução acentuada de resistência nas amostras de MB e das soldaduras FCAW. A degradação da tensão máxima e da tensão limite de elasticidade é explicada pela redução acentuada de dureza nas amostras tratadas termicamente a 900°C. No entanto, relativamente às amostras de MB, a redução do alongamento deve-se à precipitação de carbonetos em bandas observadas na microestrutura do material base.

Na Figura 4.24 mostram-se os mapas de distribuição da deformação em provetes das soldaduras GMAW e FCAW, ensaiados a 600°C, no momento em que foi atingida a carga máxima. A Figura 4.24 a) permite observar que a região da soldadura GMAW não sofreu deformação considerável, verificando-se a ocorrência de deformação máxima na região do material base. Por outro lado, na Figura 4.24 b) é possível observar que a rotura da soldadura FCAW ocorreu ao longo da linha de fusão.

Na Figura 4.25 apresenta-se a macrografia da soldadura FCAW após-rotura. Da análise da figura é possível verificar que não se observa a presença de fissuras, resultantes do fenómeno de fissuração no aquecimento, na soldadura testada a 900°C. Deste modo, a ocorrência de rotura paralela à linha de fusão, para as soldaduras ensaiadas após tratamento térmico a 600°C e a 900°C, terá resultado da concentração de tensões na descontinuidade associada à inclusão de escória. A concentração de tensões no defeito deve-se à uniformização de propriedades ao longo da soldadura registada nos ensaios de dureza. A propagação da rotura ao longo da linha de fusão deve-se à concentração de carbonetos e fases de baixo ponto de fusão na região de descontinuidade microestrutural.

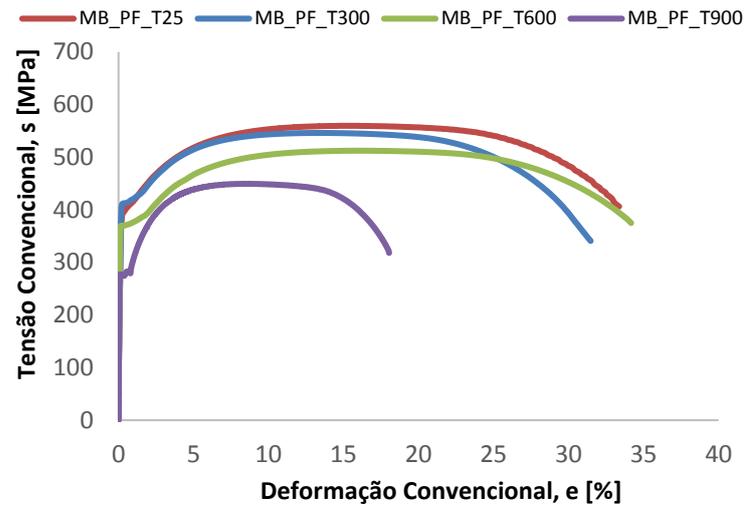


Figura 4.21. Curvas de tensão-deformação após-fogo do material base para diferentes temperaturas.

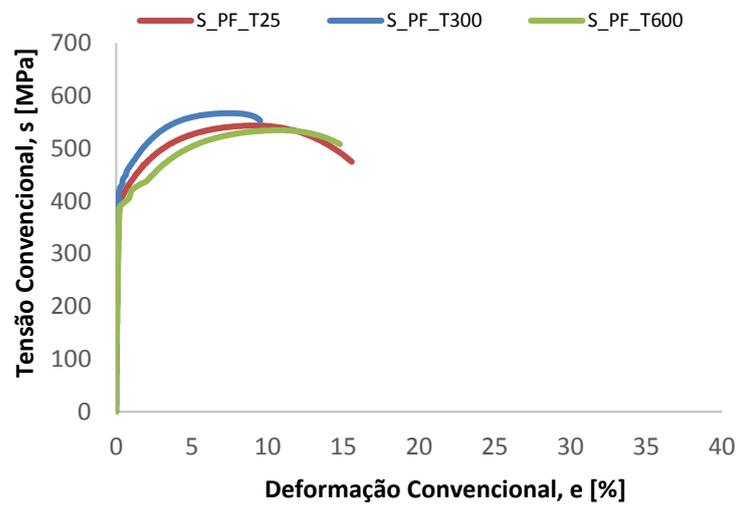


Figura 4.22. Curvas de tensão-deformação após-fogo da soldadura GMAW para diferentes temperaturas.

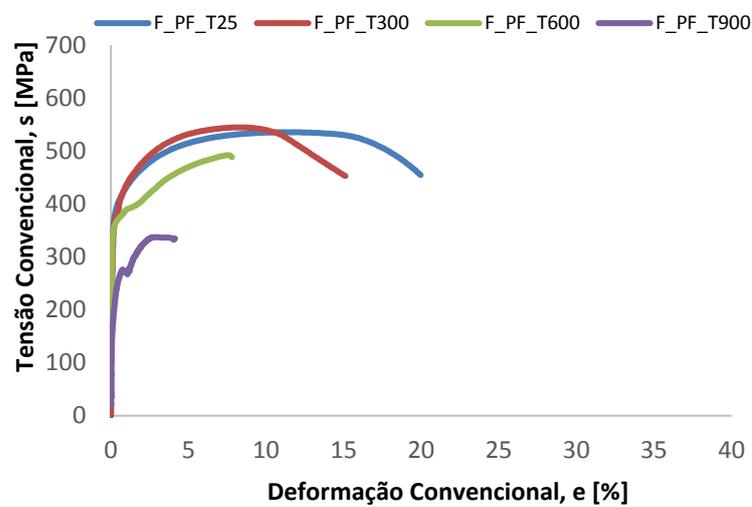
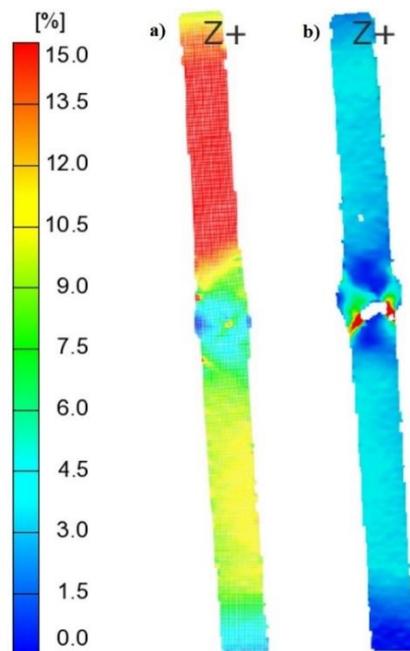
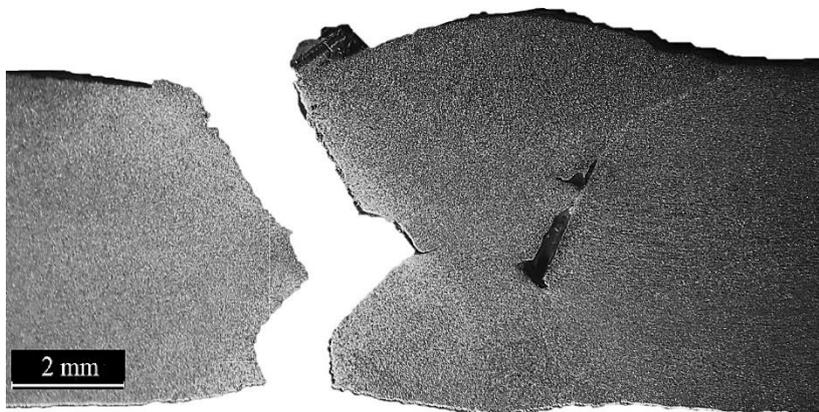


Figura 4.23. Curvas de tensão-deformação após-fogo da soldadura por FCAW para diferentes temperaturas



**Figura 4.24.** Mapas de distribuição de deformação das soldaduras tratadas termicamente a 600°C, no instante de carga máxima. a) GMAW. b) FCAW.



**Figura 4.25.** Macrografia após-rotura da soldadura FCAW tratada termicamente a 900°C.

#### 4.1.3.4. Fatores de redução residuais

Nas Tabelas 4.4 a 4.6 apresentam-se os fatores residuais, razão entre as propriedades mecânicas das amostras que foram expostas a fogo e as propriedades mecânicas à temperatura ambiente, obtidos nesta dissertação.

**Tabela 4.4.** Propriedades mecânicas após-fogo e fatores de redução do MB.

Temperatura	Amostra	$\sigma_0$ [MPa]	$\frac{\sigma_0(T_{pf})}{\sigma_0(25^\circ C)}$
25°C	MB_PF_T25	400	1.00
300°C	MB_PF_T300	405	1.02
600°C	MB_PF_T600	395	0.98
900°C	MB_PF_T900	290	0.72

**Tabela 4.5.** Propriedades mecânicas após-fogo e fatores de redução da soldadura FCAW.

Temperatura	Amostra	$\sigma_0$ [MPa]	$\frac{\sigma_0(T_{pf})}{\sigma_0(25^\circ C)}$
25°C	F_PF_T25	400	1.00
300°C	F_PF_T300	405	1.01
600°C	F_PF_T600	390	0.98
900°C	F_PF_T900	290	0.72

**Tabela 4.6.** Propriedades mecânicas após-fogo e fatores de redução da soldadura GMAW.

Temperatura	Amostra	$\sigma_0$ [MPa]	$\frac{\sigma_0(T_{pf})}{\sigma_0(25^\circ C)}$
25°C	S_PF_T25	400	1.00
300°C	S_PF_T300	400	1.01
600°C	S_PF_T600	395	0.99

O Eurocódigo 3 não prevê os fatores de redução de estruturas que foram sujeitas a fogo, uma vez que, em situação após-fogo apenas se verifica a possibilidade de reutilizar uma dada estrutura. Deste modo, ao contrário da análise realizada para temperaturas

elevadas, apenas se apresenta a evolução dos fatores de redução residuais obtidos com o aumento da temperatura de tratamento térmico.

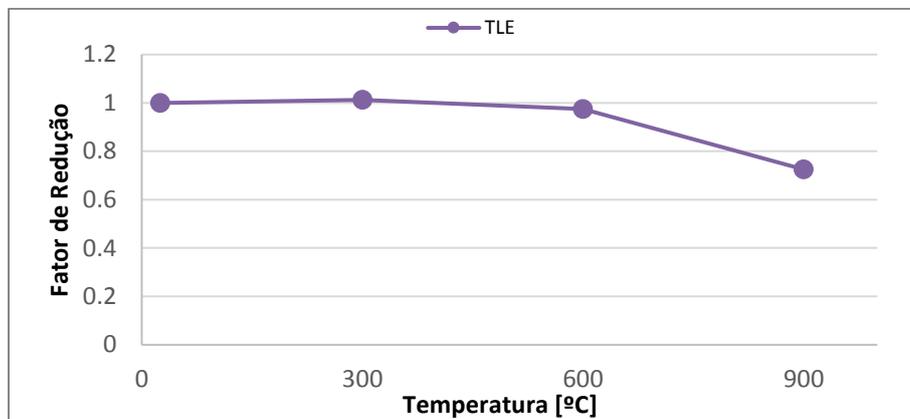


Figura 4.26. Evolução dos fatores de redução após-fogo do BM.

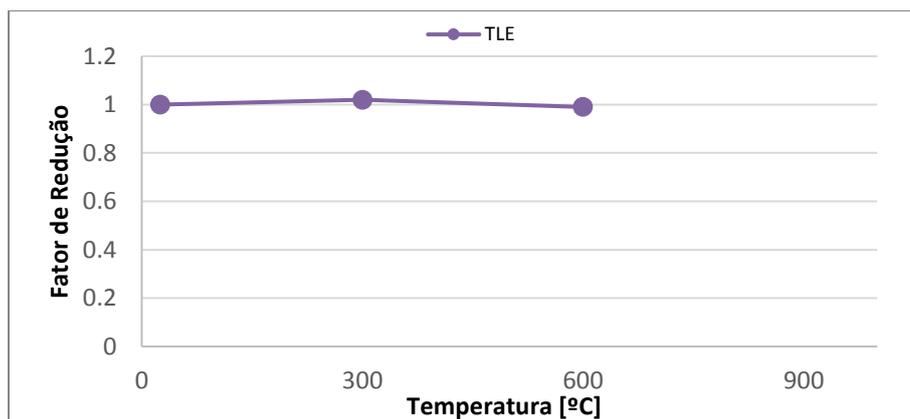


Figura 4.27. Evolução dos fatores de redução após-fogo da soldadura GMAW.

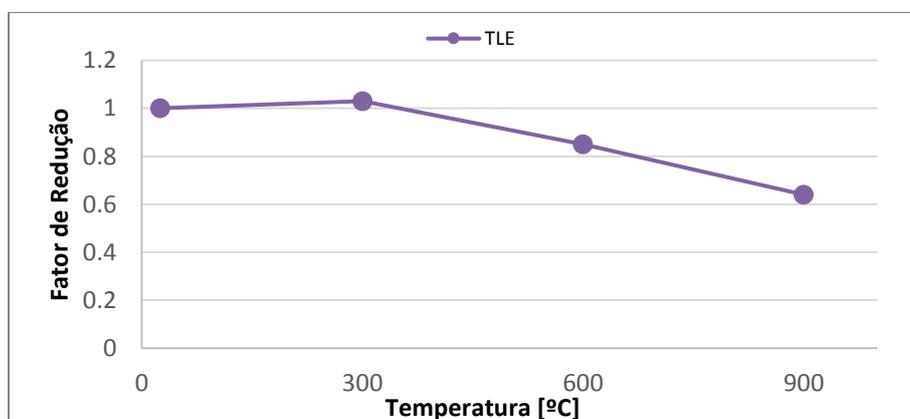


Figura 4.28. Evolução dos fatores de redução após-fogo da soldadura FCAW.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho de investigação teve como objetivo a análise da resistência mecânica, em situação de fogo e após-fogo, de soldaduras no aço S335 J2. As soldaduras foram produzidas pelo processo MAG, tendo sido utilizados fios sólidos e fios fluxados como consumíveis. Com base nos resultados obtidos, podem-se retirar as seguintes conclusões:

### **Temperatura Ambiente:**

- Os dois tipos de soldadura apresentaram características microestruturais semelhantes e inclusões de escória.
- Os perfis de dureza das duas soldaduras demonstraram ser semelhantes, o que indica propriedades mecânicas semelhantes.
- Os ensaios de tração permitiram concluir que as inclusões de escória não condicionaram a resistência mecânica em tração à temperatura ambiente.

### **Temperaturas Elevadas:**

- Os ensaios de tração a temperaturas elevadas permitiram observar um aumento da resistência mecânica a 300°C, atribuído ao fenómeno de *blue brittleness*. Para temperaturas de ensaio superiores a 300°C, observou-se uma redução brusca de resistência mecânica na amostra de MB e na soldadura GMAW.
- A análise metalográfica após-rotura permitiu concluir que ocorreu fissuração a quente nas soldaduras GMAW testadas a 600°C e a 900°C.
- A comparação dos fatores de redução do MB a temperaturas elevadas permitiu concluir que é seguro utilizar os fatores de redução recomendados pelo EC 3. Por outro lado, a comparação dos fatores de redução das soldaduras GMAW permitiu concluir que a utilização dos fatores de redução cedidos pelo EC 3 pode conduzir a um sobredimensionamento da estrutura.

**Após-fogo:**

- A análise metalográfica das soldaduras e do material base em situação após-fogo, permitiu concluir que só ocorrem alterações microestruturais significativas para temperaturas superiores a 600°C.
- As medições de dureza permitiram também concluir que a dureza das soldaduras sofre uma redução acentuada apenas para temperaturas superiores a 900°C. Para esta temperatura ocorre também uma uniformização da dureza ao longo de toda a secção transversal das juntas soldadas.
- Os ensaios de tração após-fogo permitiram observar semelhanças importantes na resistência mecânica, entre as soldaduras e o MB, nos ensaios realizados em provetes tratados termicamente a temperaturas inferiores a 600°C. Para temperaturas superiores a 600°C observou-se a degradação da resistência mecânica do MB e das soldaduras.
- Os mapas da distribuição de deformação e a análise metalográfica após-rotura permitiram concluir que o alongamento da soldadura FCAW foi limitado pela concentração de tensões resultante do defeito de inclusão de escória.

## **SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO**

Como sugestões de trabalho futuro, recomenda-se:

- A análise da influência de diferentes velocidades de ensaios, de diferentes taxas de aquecimento e da geometria da junta na resistência ao fogo das soldaduras.
- A realização de ensaios de tração num leque mais alargado de temperaturas.
- A realização de ensaios em regime transiente e a comparação dos resultados obtidos com os resultados do ensaio em regime estacionário.
- A utilização de diferentes métodos de arrefecimento, tais como arrefecimento por água, nos ensaios de tração após-fogo.
- O estudo da resistência ao fogo de aços de elevada resistência como por exemplo S690, S960 e S1200.
- O estudo da resistência ao fogo de soldaduras produzidas por outras tecnologias, tais como, o processo de soldadura por arco submerso.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araque O., N. Arzola, E. Hernández, (2018). The Effect of Weld Reinforcement and Post-Welding Cooling Cycles on Fatigue Strength of Butt-Welded Joints under Cyclic Tensile Loading.
- ASTM E3-11, 2017. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.
- ASTM E28, 2017. Standard Test Method for Micro Indentation Hardness of Materials.
- Berenice O., D., Gonzalez, M. (2013). Envelhecimento Dinâmico em Aço Dual Phase de 600 MPa de Limite de Resistência.
- Cam, G., Erim, S., Yeni, C., & Kocak, M. (1999). Determination of mechanical and fracture properties of laser beam welded steel joints. *Welding Journal Supplement*, (June), 193–201.
- CEN. (2010). Eurocodigo 3: Parte 1–2: Verificação da resistência ao fogo. *En 1993-1-2*.
- Chen, J., & Young, B. (2006). Stress-strain curves for stainless steel at elevated temperatures. *Engineering Structures*, 28(2), 229–239.
- 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. *Thin-Walled Structures*, 98, 154–168.
- Cresson É. (1998). Elevated temperature behaviour of welded joints in structural steel.
- Chung, K. F., & Ip, K. H. (2000). Finite element modeling of bolted connections between cold- formed steel strips and hot rolled steel plates under static shear loading. *Engineering Structures*, 22, 1271–1284.
- Conlon, K. (2009). Strength of Transverse Fillet Welds at Elevated and Post-elevated Temperatures, (May).
- Dhua, S. K., Mukerjee, D., & Sarma, D. S. (2001). Influence of tempering on the microstructure and mechanical properties of HSLA-100 steel plates. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 32(9), 2259–2270.
- Dolzhenkov I. E. (1971). The nature of blue brittleness of steel.

- Du, X.-L., Tian, Y.-D., Tian, R.-J., & Zhang, L. (2009). Experimental research on the mechanical properties of SFRVHC. *Beijing Gongye Daxue Xuebao / Journal of Beijing University of Technology*, 35(9), 1071–1076.
- 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 15614-1, 2017. Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – Welding procedure test – Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys.
- ISO Standard 6892-1:2016. (2016). Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature. *International Organization for Standardization*, 79.
- ISO Standard 6892-2, 2009. Metallic materials – Tensile testing – Part 2: Method of test at elevated temperatures. *International Organization for Standardization*.
- Leitão, C.; Costa, M.I.; Khanijomdi, K.; Rodrigues, D.M. (2013). "Assessing strength and local plastic behaviour of welds by shear testing", *Materials & Design*, 51: 968 - 974.
- Leitão, C.; Galvão, I.; Leal, R.M.; Rodrigues, D.M. (2012). "Determination of local constitutive properties of aluminium friction stir welds using digital image correlation", *Materials & Design* 33, 1: 69 - 74.
- Li, H. T., & Young, B. (2017). Material properties of cold-formed high strength steel at elevated temperatures. *Thin-Walled Structures*, 115(July 2016), 289–299.
- Meichun Z., C. Liang, L. Guoqiang, W. Ying. (2016). Experiment in strength of transverse fillet weld connections after high temperature treatment.
- Outinen, J., Kaitila, O., & Mäkeläinen, P. (2000). A Study for the Development of the Design of Steel Structures in Fire Conditions. *1st International Workshop of Structures in Fire*, 267–281.
- Ozyurt, E., Wang, Y. C., & Tan, K. H. (2014). Elevated temperature resistance of welded tubular joints under axial load in the brace member. *Engineering Structures*, 59, 574–586.
- Pavlina, E. J., & Van Tyne, C. J. (2008). Correlation of Yield strength and Tensile strength with hardness for steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 17(6), 888–893.
- Qiang, X., Bijlaard, F. S. K., & Kolstein, H. (2013). Deterioration of mechanical properties of high strength structural steel S460N under transient state fire condition. *Materials and Design*, 40, 521–527.

- Qiang, X., Bijlaard, F. S. K., & Kolstein, H. (2012). Deterioration of mechanical properties of high strength structural steel S460N under steady state fire condition. *Materials and Design*, *36*, 438–442.
- Ranawaka, T., Mahendran, M. (2009). Experimental study of the mechanical properties of light gauge cold-formed steels at elevated temperatures. *Fire Safety Journal*, *44*(2), 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.

