



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Pedro Miguel Rodrigues Fernandes

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
SOLDADURAS EM AÇO EM TRAÇÃO A
TEMPERATURAS ELEVADAS**

**Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de
Produção e Projeto orientada pela Professora Doutora Dulce Maria Esteves
Rodrigues e pelo Professor Doutor Carlos Miguel Almeida Leitão e apresentada ao
Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra.**

Fevereiro de 2020

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Comportamento Mecânico de Soldaduras em Aço em Tração a Temperaturas Elevadas

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

Tensile Behaviour of Welds in Steel at High Temperature

Autor

Pedro Miguel Rodrigues Fernandes

Orientadores

Professora Doutora Dulce Maria Esteves Rodrigues

Professor Doutor Carlos Miguel Almeida Leitão

Júri

Presidente	Professora Doutora Cristina Maria Gonçalves dos Santos Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Professora Doutora Dulce Maria Esteves Rodrigues Professora Adjunta da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor Rui Manuel Ferreira Leal Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Leiria Mestre David Gomes Andrade Investigador da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



*Institute for
Sustainability and
Innovation in
Structural
Engineering*



*Centre for Mechanical
Engineering,
Materials and
Processes*

Coimbra, fevereiro, 2020

To do something well is so worthwhile that to die trying to do it better cannot be foolhardy. Life is measured in achievement, not in years alone.

Bruce McLaren

Agradecimentos

Esta dissertação é o culminar de 17 anos de luta por um futuro melhor, para mim e para aqueles que me acompanham. Não foi fácil chegar aqui e perseguir este sonho, no entanto foi possível graças a algumas pessoas especiais a quem eu não posso deixar de dedicar este trabalho. Começando por aqueles que me acompanham há mais tempo e que foram o suporte a vários níveis.

Agradeço à minha mãe por tudo o que fez e ainda faz por mim e ao meu pai, que ao seu jeito também deu o seu grande contributo.

Agradeço ao meu irmão e à minha irmã, por serem os “Duques” que me deram tantas dores de cabeça, tantas alegrias e tanto apoio.

Agradeço às minhas sobrinhas, Yara e Laura, por serem o meu escape e por darem sentido a tudo.

Apesar de já não estar cá, agradeço à minha avó por ter acreditado em mim e por me ter apoiado da forma que consegui.

Agradeço à Joana, por todos os seus cozinhados e palavras de apoio.

Agradeço a todos os meus amigos, que felizmente são muitos, mas em especial ao Rafa, que é o meu companheiro desde sempre. Com o mesmo nível de importância agradeço ao João Costa, ao Marco, ao João Franco, ao Fábio, ao Leandro, ao César, ao Daniel, aos meus afilhados, ao Miguel Alves e ao Joel Quaresma.

Agradeço aos meus primos, Jéssica, Zeka, João e Ana.

Agradeço imenso à Professora Doutora Dulce Rodrigues, orientadora desta dissertação, por toda a dedicação, ensinamentos, conselhos e apoio. Mesmo frente a algumas adversidades não desistiu, nem deixou de prestar atenção.

Agradeço ao Doutor Carlos Leitão, orientador desta dissertação, por todo o suporte que me deu neste trabalho, por todo o seu humor e boa disposição e por toda a atenção que me dedicou. Devo ressaltar também a sua humildade.

Agradeço David Andrade por todo o companheirismo, boa disposição, paciência e conhecimentos transmitidos.

Ao Bernardo Jacob, agradeço pela amizade e por ter ajudado a iniciar este projeto, facilitando imenso a integração no mesmo.

Agradeço à Professora Doutora Cristina Santos, pela sua ajuda e abnegação.

Agradeço ao Professor Doutor Hélder Craveiro e ao Engenheiro Cláudio, pela ajuda na realização de alguns ensaios.

Ao senhor Fernando, agradeço por toda a paciência e ajuda, mas essencialmente por me confiar a sua oficina.

Por último, mas com o lugar mais especial, agradeço à Elsa Gonçalves, por todo o carinho, por todas as palavras de apoio, por todos os desafios, mas fundamentalmente por toda a força e confiança transmitida. Por isto e por todos os momentos passados juntos, o meu obrigado.

Resumo

A análise do comportamento mecânico de estruturas metálicas a temperaturas elevadas adquiriu especial relevo, a nível mundial, após o colapso de imponentes e notáveis edificações, sendo exemplo disso, o atentado às Torres Gémeas, nos EUA, que levou à perda de milhares de vidas humanas. Apesar da importância da informação e dos estudos realizados, no sentido de caracterizar os materiais de construção a temperaturas elevadas e após fogo, se terem multiplicado na última década, existe ainda uma grande lacuna na informação sobre o comportamento dos aços e respetivas soldaduras nestas condições. O trabalho desenvolvido nesta dissertação pretende, neste seguimento, estudar o comportamento mecânico de soldaduras MAG em aço S355 J2 e de soldaduras por elétrodo revestido em aço S460, à temperatura ambiente e em situação após fogo.

A avaliação dos materiais base e das respetivas soldaduras assentou na realização de testes de caracterização mecânica e numa caracterização microestrutural. Para a caracterização mecânica, realizaram-se ensaios de tração e de medição de dureza. A caracterização microestrutural, assentou na realização de observações metalográficas recorrendo a técnicas de microscopia ótica. Na avaliação das propriedades dos metais base e das soldaduras após fogo, realizaram-se dois tipos de ensaios de exposição a temperaturas elevadas: ensaios de reduzida taxa de aquecimento, numa gama de temperaturas variada (300 °C, 600 °C e 900 °C) e com arrefecimento lento, dentro do forno, e ensaios com taxa de aquecimento elevada, num forno de hidrocarbonetos, com arrefecimento ao ar. Estes últimos ensaios foram realizados apenas para o material base S355 J2 e respetivas soldaduras.

Apesar de o teor em carbono e de o modo de fabrico dos aços S355 J2 e S460 serem semelhantes, a análise dos metais base, à temperatura ambiente, revelou diferenças significativas quer na microestrutura, quer no comportamento mecânico, dos dois materiais base. A análise das propriedades dos metais base após fogo revelou também que ambos os aços sofreram uma redução acentuada, quer de resistência mecânica, quer de ductilidade, após exposição a temperaturas elevadas, em situações de aquecimento e arrefecimento lento. Já os ensaios realizados com taxa de aquecimento elevada no aço S355 J2 revelaram que, apesar da redução da resistência mecânica, para este material base ocorreu um aumento da

ductilidade após fogo. Nos tratamentos térmicos realizados com taxas de aquecimento e arrefecimento reduzidas, e exposição a 900 °C, tanto os metais base como as soldaduras, apresentaram uma redução generalizada da resistência mecânica em tração, da ductilidade e da dureza. Esta redução de resistência foi acompanhada por alterações microestruturais significativas. Com efeito, para esta temperatura, ambas as soldaduras tenderam a recuperar a microestrutura do material base nas zonas termicamente afetadas, apresentando deposições de ferrite em bandas, intercaladas com bandas de fases ricas em carbonetos. Comparando todos os resultados pode concluir-se que as soldaduras MAG em aço S355 J2, foram aquelas que apresentaram a maior diminuição percentual de resistência mecânica. Os tratamentos térmicos com elevada taxa de aquecimento revelaram ainda que maiores tempos de exposição, traduzem-se num maior decréscimo da dureza, quer no metal base, quer nas soldaduras.

No final deste trabalho, é ainda apresentado um conjunto de medidas de proteção de pessoas e bens, a ser desenvolvidos no futuro.

Palavras-chave: Aço estrutural, Soldadura MAG, Soldadura por elétrodo revestido, Após arrefecimento, Aço S355 J2, Aço S460, Taxa de aquecimento, Efeito de tratamento térmico.

Abstract

The analysis of the mechanical behaviour of metal structures at elevated temperatures acquired special relevance, worldwide, after the collapse of imposing and notable buildings, such as the attack on the World Trade Center in the USA, which led to the loss of thousands of human lives. Despite the importance of the information and studies carried out, in order to characterize construction materials at high temperatures and after fire, having multiplied in the last decade, there is still a lack of information on the behaviour of steels and the respective welds under these conditions. The work developed in this dissertation intends, in this segment, to study the mechanical behaviour of MAG welding in S355 J2 steel and by stick welding in S460 steel, at room temperature and after fire.

The evaluation of the base materials and the respective welds was based on the performance of mechanical characterization tests and on a microstructural characterization. For mechanical characterization, tensile and hardness measurement tests were performed. The microstructural characterization was based on metallographic observations using optical microscopy techniques. In the evaluation of the properties of the base metals and the welds after fire, two types of tests of exposure to high temperatures were carried out: tests of low heating rate, in a varied temperature range (300 °C, 600 °C and 900 °C) with slow cooling, inside the oven, and tests with high heating rate, in a hydrocarbon oven, with air cooling. These last tests were performed only for the base material S355 J2 and the respective welds.

Although the carbon content and the way of manufacturing S355 J2 and S460 steels are similar, the analysis of both base metals at room temperature revealed significant differences in the microstructure and in the mechanical behaviour of the two base materials. The analysis of the properties of base metals after fire also revealed that both steels underwent a marked reduction, both in mechanical strength and ductility, after exposure to high temperatures, in situations of heating and slow cooling. The tests carried out with high heating rate on S355 J2 steel revealed that, despite the reduction in mechanical strength, for this base material there was an increase in ductility after fire. In the heat treatments carried out with reduced heating and cooling rates, and exposure to 900 °C, both base metals and welds, showed a generalized reduction in mechanical tensile strength, ductility and hardness.

This reduction in strength was accompanied by significant microstructural changes. In fact, for this temperature, both welds tended to recover the microstructure of the base material in the thermal affected zones, showing depositions of ferrite in bands, interspersed with bands of phases rich in carbides. Comparing all the results it can be concluded that the MAG welds in steel S355 J2, were the ones that presented the biggest percentage decrease of mechanical resistance. Heat treatments with a high heating rate revealed that longer exposure times lead to a decrease in hardness, in the base metal and in the welds.

At the end of this work, a set of measures for the protection of people and goods, to be developed in the future, is also presented.

Keywords Structural steel, MAG welding, Stick welding, After cooling, Steel S355 J2, Steel S460, Heating rate, Heat treatment effect.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xv
Simbologia.....	xv
Siglas	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Considerações Iniciais e Motivação	1
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Estrutura Do Documento	4
2. Estado da arte.....	5
2.1. Aços Estruturais	5
2.1.1. Aço S355 J2.....	7
2.1.2. Aço S460	7
2.2. Caracterização Mecânica a Temperaturas Elevadas	8
2.2.1. Tipo de Ensaio	8
2.2.2. Metal Base	9
2.2.3. Soldaduras	13
2.3. Caracterização Mecânica Após Fogo	14
2.3.1. Tipo de Ensaio	15
2.3.2. Metal Base	15
2.3.3. Soldaduras	17
2.4. Importância na Proteção Civil	19
3. Procedimento Experimental	21
3.1. Material Base	21
3.2. Elaboração das Soldaduras	22
3.2.1. Preparação de Junta	22
3.2.2. Parâmetros das Soldaduras	22
3.3. Condições de Ensaio	23
3.3.1. Ensaios de Tração Axial	23
3.4. Amostragem.....	26
3.5. Técnicas de Caracterização.....	27
3.5.1. Ensaio de Dureza	27
3.5.2. Microscopia Ótica.....	27
4. Resultados e Discussão.....	29
4.1. Comportamento Mecânico à Temperatura Ambiente.....	29
4.1.1. Material Base	29
4.1.2. Soldaduras	31
4.2. Comportamento Mecânico Após Fogo	39
4.2.1. Material Base	39

4.2.2. Soldaduras	43
5. Conclusões	53
Comportamento Mecânico à Temperatura Ambiente	53
Comportamento Mecânico Após Fogo	53
Material Base.....	53
Soldaduras	54
6. Sugestões de trabalho futuro	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
ANEXO A-Estado da Arte.....	61
APÊNDICE A-Procedimento Experimental	64
APÊNDICE B-Ensaio Transientes	66
Procedimento Experimental	66
Resultados	70
APÊNDICE C-Conclusões.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Estrutura geral do projeto de investigação.....	3
Figura 2.1. Cronologia do desenvolvimento dos aços laminados (adaptado de (Maraveas, Fasoulakis, & Tsavdaridis, 2017) e baseado em (Schröter, 2006)).....	7
Figura 2.2. Resultados para o aço S355 J2 em ensaio em regime estacionário. a) Curvas tensão-deformação; b) Fatores de redução experimentais versus Eurocódigo 3 (adaptado de (Jacob, 2018)).	12
Figura 2.2. 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)).....	14
Figura 2.4. Curvas representativas da tensão-deformação para o aço S960 (VHSS). a) Elevadas temperaturas; b) Após arrefecimento (adaptado de (Qiang et al., 2016) e (Qiang et al., 2013)).	17
Figura 2.5. Evolução do perfil de dureza superior da soldadura com o aumento da temperatura para a soldadura MAG (adaptado de (Jacob, 2018)).....	18
Figura 2.6. Curvas tensão-deformação residual de juntas soldadas topo-a-topo. a) Arrefecimento natural (ao ar); b) Arrefecimento por água; (adaptado de (Zhang et al., 2017)).	19
Figura 3.1. Esquema de preparação de junta. a) Standard Data for Arc Welding; b) Informação do fabricante.....	22
Figura 3.2. Ciclo térmico de baixa taxa de aquecimento do ensaio desenvolvido no forno Termolab.	24
Figura 3.3. Forno Ceramifor DEC.....	24
Figura 3.4. Ciclo térmico de alta taxa de aquecimento do ensaio desenvolvido no forno Ceramifor.....	25
Figura 3.5. Sistema de ensaio de tração utilizado. 1) Máquina de tração SHIMADZU AGS-100kNX; 2) Extensómetro ótico ARAMIS Optical 3D Deformation & Strain measurement system.....	26
Figura 3.3. Esquema do perfil de durezas de uma amostra soldada.....	27
Figura 4.1. Curvas tensão-deformação de ambos os materiais base sem tratamento térmico.	30
Figura 4.2. Microestrutura do material base sem tratamento térmico. a) Aço S355 J2; b) Aço S460.	31
Figura 4.3. Curvas tensão-deformação para as soldaduras com MAG em aço S355 J2 e com eléctrodo revestido (ER) em aço S460 sem tratamento térmico.	32

Figura 4.4. Mapas de deformação de Von Mises do provete, no instante de carga máxima; a) Soldadura MAG em aço S355 J2; b) Soldadura com eletrodo revestido em aço S460.	33
Figura 4.5. Perfil de dureza de diferentes zonas da soldadura MAG em aço S355 J2 à temperatura ambiente.	34
Figura 4.6. Evolução da dureza ao longo da secção transversal da soldadura MAG em aço S355 J2.	34
Figura 4.7. Perfil de dureza de diferentes zonas da soldadura com eletrodo revestido S460 à temperatura ambiente.	35
Figura 4.8. Evolução da dureza ao longo da secção transversal da soldadura com eletrodo revestido.	35
Figura 4.9. Metalografia do aço S355 soldado com o processo MAG. a) Macroestrutura da soldadura; b) Interface entre ZTAGG e ZF; c) Interface entre ZF, ZTAGG e ZTAGF (adaptado de (Jacob, 2018)).	37
Figura 4.10. Metalografia da soldadura produzida através de MAG em aço S355 J2 sem tratamento térmico. a) Interface entre ZTAGG para ZF; b) Transição entre o MB e a ZTAGF; c) Interface entre ZF e ZTAGG; d) Transição entre a ZTAGF e o MB.	37
Figura 4.11. Metalografia do aço S460 soldado com eletrodo revestido. a) Macroestrutura da soldadura; b) Interface entre MB, ZTAGG e ZTAGF; c) Interface entre ZF, ZTAGG e ZTAGF.	38
Figura 4.12. Metalografia do aço S460 soldado com eletrodo revestido. a) Transição entre a ZTAGG e a ZF; b) Microestrutura da ZF; c) Microestrutura da ZTAGG; d) Interface entre a ZTAGF e o MB.	38
Figura 4.13. Curvas tensão-deformação de ambos os materiais base para os vários tratamentos térmicos de baixa taxa de aquecimento.	40
Figura 4.14. Curvas tensão-deformação do material base S355 J2 para os tratamentos térmicos de EDF.	41
Figura 4.15. Evolução da microestrutura do material base S355 J2 com os diferentes tratamentos térmicos. Sem tratamento térmico, (a), com tratamento térmico a 300 °C, (b), a 600 °C, (c), a 900 °C, (d). Com exposição direta ao fogo de curta duração, (e), de longa duração, (f).	42
Figura 4.16. Evolução da microestrutura do material base S460 com os diferentes tratamentos térmicos. a) Sem tratamento térmico; b) Com tratamento térmico a 900 °C, (reduzida taxa de aquecimento).	43
Figura 4.17. Curvas tensão-deformação para as soldaduras com MAG em aço S355 J2 e com eletrodo revestido em aço S460 para os vários tratamentos térmicos de baixa taxa de aquecimento.	44
Figura 4.18. Curvas tensão-deformação para as soldaduras com MAG em aço S355 J2 para os tratamentos térmicos de EDF.	45
Figura 4.19. Tensão limite elasticidade para os diferentes tratamentos térmicos.	46

Figura 4.20. Mapas de deformação de Von Mises, no instante de carga máxima. a) Soldadura MAG em aço S355 J2 para o ensaio EDF-(Curta Duração); b) Soldadura MAG em aço S355 J2 para o ensaio EDF-(Longa Duração); c) Soldadura com elétrodo revestido em aço S460.	46
Figura 4.21. Evolução dos perfis de dureza superiores da soldadura produzida com MAG em aço S355 para os vários tratamentos térmicos de baixa taxa de aquecimento.	47
Figura 4.22. Evolução dos perfis de dureza superiores da soldadura produzida com MAG em aço S355 para os vários tratamentos térmicos de exposição direta ao fogo....	49
Figura 4.23. Evolução dos perfis de dureza superiores da soldadura produzida com elétrodo revestido em aço S460 para os vários tratamentos térmicos.	49
Figura 4.24. Evolução da microestrutura das soldaduras MAG fabricadas em aço S355 J2, para as 3 zonas principais da soldadura. Sem tratamento térmico, (a), (b), (c), tratamento térmico a 300 °C, (d), (e), (f), a 600 °C, (g), (h), (i), a 900 °C, (j), (k) e (l). Exposição direta ao fogo curta duração, (m), (n), (o) e exposição de longa duração, (p), (q) e (u).....	51
Figura 4.25. Evolução da microestrutura das soldaduras fabricadas com elétrodo revestido em aço S460, para as 3 zonas principais da soldadura. Sem tratamento térmico, (a), (b), (c), com tratamento térmico a 900 °C, (baixa taxa de aquecimento), (d), (e) e (f).....	52
Figura AA. 1. Desenho técnico dos provetes S355 maquinados para realização dos ensaios experimentais.....	64
Figura AA. 2. Desenho técnico dos provetes S460 maquinados para realização dos ensaios experimentais.....	64
Figura AA. 3. Provetes de soldadura em aço S 460.	64
Figura AA. 4. Elemento estrutural de ponte pedonal.	65
Figura AA. 5. Plano de pormenor elemento estrutural de ponte pedonal.	65
Figura AB. 1. Plano geral do equipamento utilizado no ensaio transiente. 1) Máquina de tração Servosis-MCH 2000; 2) Extensómetro de alta temperatura Epsilon Model 3548HI; 3) Sistema de refrigeração Epsilon Caron 2050 model; 4) Forno elétrico cilíndrico Termolab; 5) Controlador Eurotherm Controler; 6) Data logger TDS 530.....	67
Figura AB. 2. Plano de pormenor do equipamento utilizado no ensaio transiente. 1) Forno elétrico cilíndrico Termolab; 2) Extensómetro de alta temperatura Epsilon Model 3548HI; 3) Proвете fraturado; 4) Proвете instrumentado pronto a ser ensaiado... ..	67
Figura AB. 3. Gráfico tipo de resultados obtidos em regime transiente. a) Tensão-Deformação; b) Temperatura-Deformação (adaptado de (J. Outinen & Mäkeläinen, 2002)).	68
Figura AB. 4. Gráfico tensão-extensão típica de um ensaio em regime transiente (adaptado de (J. Outinen & Mäkeläinen, 2002))......	69

Figura AB. 5. Garras utilizadas nos ensaios transientes. 69
Figura AB. 6. Caracterização do comportamento do aço S355 J2 em ensaios transientes. 70

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Resumo das características de cada subclasse de aço.....	6
Tabela 3.1. Composição química (%pd.) dos aços estudados. S355 J2 (fornecido por Rizhao Steel Holding Group CO., Ltd) e S460 (proveniente de um projeto de investigação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra).	21
Tabela 3.2. Interpretação do resultado para o carbono equivalente segundo (<i>General Requirements for Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes, and Sheet Piling</i> , 2018).....	21
Tabela 3.3. Composição química dos elétrodos revestidos EUROTROD MC 40 (pd%).	23
Tabela 3.4. Parâmetros utilizados na produção de soldaduras em aço S460.....	23
Tabela 3.5. Número de provetes e amostras fabricados para cada ensaio.	26
Tabela 4.1. Propriedade mecânicas dos materiais base à temperatura ambiente.	30
Tabela 4.2. Propriedades mecânicas das soldaduras à temperatura ambiente.....	32
Tabela 4.3. Propriedades mecânicas dos materiais base após tratamento térmico de baixa taxa de aquecimento.	40
Tabela 4.4. Propriedades mecânicas do material base S355 com tratamento térmico de EDF.	41
Tabela 4.5. Propriedades mecânicas das soldaduras após tratamento térmico de baixa taxa de aquecimento.....	44
Tabela 4.6. Propriedades mecânicas das soldaduras MAG S355 com tratamento térmico de exposição direta ao fogo.....	45

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

$\epsilon_{\text{constante}}$ – Deformação até à carga máxima

ϵ_{total} – Deformação até à carga de rotura

σ_0 – Tensão limite de elasticidade

σ_0 – Tensão máxima

Siglas

AISC – American Institute of Steel Construction

AISI – American Iron and Steel Institute

AS – Australian Standard

ASTM – American Society for Testing and Materials

BS – British Standard

CE – Carbono Equivalente

DEC – Departamento de Engenharia Civil

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

EC 3 – Eurocódigo 3

EDF – Exposição Direta ao Fogo (Elevada Taxa de Aquecimento)

ER – Eléctrodo Revestido

HSS – High Strength Steel (Aço de alta resistência)

ISO – International Organization for Standardization

MAG – Metal Active Gas

MB – Material Base

MS – Mild Steel (Aço Macio)

NIST – National Institute of Standards and Technology

T25 – Material Sem Qualquer Tratamento Térmico (referência)

T300 – Tratamento Térmico de Reduzida Taxa de Aquecimento a 300 °C

T600 – Tratamento Térmico de Reduzida Taxa de Aquecimento a 600 °C

T900 – Tratamento Térmico de Reduzida Taxa de Aquecimento a 900 °C

VHSS – Very High Strength Steel (Aço de resistência ultra elevada)

ZF – Zona Fundida

ZTAGF – Zona Termicamente Afetada de Grão Fino

ZTAGG – Zona Termicamente Afetada de Grão Grosseiro

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais e Motivação

Fazendo uma análise ao interesse pelo tema aqui estudado, este apenas se tornou alvo de investigação recentemente, com o desenvolvimento da construção metálica e pela quantidade e gravidade dos acidentes ocorridos, devido à exposição das estruturas a situações de incêndio. Este tema ganhou ainda mais relevância e importância após o colapso de grandes e importantes estruturas/edifícios, nomeadamente o complexo de edifícios *World Trade Center* que, alegadamente, colapsaram pela exposição ao calor gerado pela queima do combustível das aeronaves e não propriamente pelo embate dos aviões.

Após o reconhecimento da importância desta temática e tendo em conta que um incêndio é uma das condições mais severas, de risco para uma estrutura metálica, têm vindo a ser desenvolvidos vários estudos de forma a caracterizar o comportamento de aços estruturais durante e após situações de incêndio, com especial foco nos aços estruturais de baixo teor em carbono, que são os mais usados em engenharia civil.

Quando se trata de analisar a estabilidade e resistência estrutural, é importante notar que todos os elementos constituintes da estrutura têm igual importância, sejam eles elementos estruturais (vigas, barras), ou elementos de ligação (parafusos, rebites, soldaduras). No caso em estudo, pretende-se dar enfoque às ligações soldadas, pois, existe uma lacuna de informação, na literatura, no que diz respeito ao seu comportamento durante e após exposição a altas temperaturas, existindo apenas informação vasta sobre as suas propriedades à temperatura ambiente. Isto traduz-se numa falta de regulamentação nesta componente do projeto de estruturas. De igual forma, é desejável também obter informação sobre o comportamento dos materiais base envolvidos na ligação.

Segundo Nunes, (2003), a resistência ao fogo de estruturas em aço, não protegidas (betão, tintas intumescentes, etc...), não excede, em regra, 15 minutos. Este intervalo depende, no entanto, do tipo e do modo de evolução do incêndio. Apesar disso, é possível concluir que a janela temporal para evacuar um edifício e para combater o incêndio de forma segura, é muito pequena. No entanto, é ainda necessário normalizar os métodos de

ensaio, pois é cientificamente e economicamente inviável realizar estudos à escala de um incêndio real para avaliar o comportamento das estruturas nestas condições.

Neste trabalho, por exemplo, foram levados a cabo dois tipos de ensaios. Ensaios de Exposição Direta ao Fogo (EDF), realizados com recurso à utilização de um forno de hidrocarbonetos, com elevada taxa de aquecimento, no qual se fez variar o tempo de manutenção após estabilização da temperatura máxima. E ainda, ensaios de exposição das estruturas a ambiente aquecido, utilizando-se para isso um forno elétrico com taxa de aquecimento reduzida. Após exposição, a cada uma das condições de aquecimento supra descritas, foram executados ensaios de tração, medições de dureza e análises metalográficas, quer em provetes de material base, quer em provetes de soldadura, com o objetivo de avaliar quaisquer alterações nas propriedades mecânicas resultantes da exposição às temperaturas elevadas.

Nesta dissertação, é ainda feita uma comparação com alguns dos resultados obtidos em Jacob, (2018), para algumas condições de exposição a altas temperaturas semelhantes às tratadas neste trabalho.

Por forma a ilustrar a investigação realizada, apresenta-se na Figura 1.1 os metais base e os diferentes tipos de testes utilizados no decorrer da dissertação. A figura mostra que foram testados dois metais base, ou seja, os aços S355 J2 e S460, a partir dos quais foram fabricadas soldaduras utilizando duas técnicas diferentes, nomeadamente, soldadura MAG para o aço S355 J2 e soldadura por Eléctrodo Revestido (ER) para o aço S460. Após execução das soldaduras, foram fabricados provetes com vista à caracterização mecânica e microestrutural dos metais base e das soldaduras.

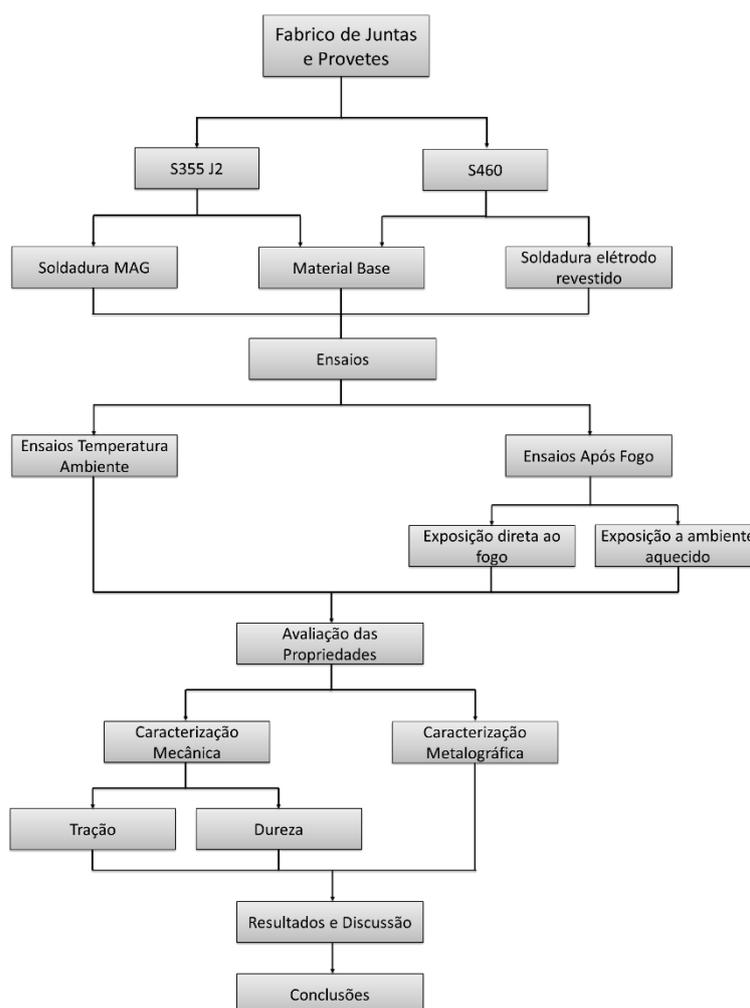


Figura 1.1. Estrutura geral do projeto de investigação.

1.2. Objetivos

O trabalho realizado nesta dissertação teve por objetivo estudar a degradação das propriedades mecânicas após fogo do aço de baixo teor em carbono S355 J2 e do aço de alta resistência S460. Mais concretamente:

- Analisou-se a influência de diferentes taxas de aquecimento no comportamento das soldaduras e dos metais base;
- Avaliou-se a aplicabilidade e adequabilidade dos tipos de ensaios utilizados neste estudo (ensaio após fogo);
- Compararam-se os resultados obtidos com outros de estudos existentes na bibliografia direcionada para esta temática;

- Determinaram-se curvas tensão-deformação, seguindo o protocolo de ensaio mais comumente usado e aceite, para ensaios de comportamento a alta temperatura dos aços em questão;
- Avaliou-se a influência das soldaduras no colapso de estruturas expostas a altas temperaturas (situações de incêndio).

Com a análise realizada pretende-se:

- Que os resultados/conclusões possam servir de base a trabalhos futuros;
- Que os resultados obtidos possam ter aplicação prática, na área da construção civil e na área da proteção civil;
- Que os resultados obtidos sirvam de base à formulação de sugestões de medidas de proteção de pessoas e bens;
- Que os resultados obtidos sirvam de base à avaliação da possibilidade de reutilização de espaços e estruturas afetadas por incêndios.

1.3. Estrutura Do Documento

Esta dissertação apresenta-se dividida em 6 partes principais. Inicia-se no presente capítulo, onde é efetuada uma introdução genérica à temática em análise. No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica relativamente ao tema proposto. No capítulo 3 são apresentados os procedimentos experimentais que serviram de base a este estudo. No capítulo 4 apresentam-se os resultados e respetiva discussão, que se baseou essencialmente na caracterização mecânica e microestrutural dos metais base e respetivas soldaduras, antes e após exposição a altas temperaturas. No capítulo 5 são apresentadas as conclusões retiradas deste estudo, onde há espaço para a sugestão de algumas medidas de proteção de pessoas e bens. No capítulo 6 são apresentadas propostas de trabalho futuro.

2. ESTADO DA ARTE

Os aços, ligas de ferro carbono, incluem na sua composição um teor de carbono inferior a 2%, (0.2% a 1.8%), até 15% de manganês e pequenas percentagens de enxofre, silício, fósforo e oxigénio. A estes elementos, podem ainda ser acrescentados outros, atendendo por objetivo adequar as propriedades dos aços às aplicações em vista. Tendo em conta as suas propriedades de resistência mecânica, a sua durabilidade, a sua versatilidade e o seu baixo custo, quando comparados com outros materiais/métodos de construção, os aços tornam-se materiais de eleição em construção civil. A sua versatilidade permite que se encontre este material nas mais variadas aplicações, nomeadamente, infraestruturas de edifícios comerciais, estruturas offshore ou até em naves de edifícios industriais.

Para serem utilizados de forma segura, é necessário que os aços utilizados em elementos estruturais, possuam uma boa capacidade de resistir a condições adversas, no caso, situações de incêndio.

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 Strenght Steel*)
- Aços de resistência ultra-elevada (VHSS)→(*Very High Strenght Steel*)

Para serem enquadrados na categoria dos aços macios, estes devem apresentar uma tensão limite de elasticidade inferior a 420 MPa. Este tipo de aço contém, na sua composição, normalmente entre 0,04% a 0,30% de carbono. Este tipo de aços é utilizado para diversos fins, tais como aplicações estruturais, de proteção ou até com objetivos estéticos, podendo ser encontrados em formatos, tais como: chapas planas ou vigas, entre outros. Tendo em conta a facilidade de fabrico e o custo que lhe é associado, aliado à sua versatilidade, os aços

estruturais têm sido o tipo de aço mais usado na construção de edifícios. De outro modo, para que possam ser enquadrados na categoria de aços de alta resistência, os aços deverão apresentar tensão limite elasticidade igual ou superior a 420 MPa. Isto pode ser conseguido através do processo de fabrico, mas, de um modo geral, consegue-se através da adição de elementos de liga. Este tipo de aços é, habitualmente, caracterizado por apresentar uma composição em carbono entre 0,31% a 0,60 e entre 0,060% a 1,65% de manganês. Na terceira categoria, a dos aços de resistência ultra-elevada, é exigido que a tensão limite elasticidade seja superior a 690 MPa. Esta propriedade é conseguida através de tratamentos termomecânicos e de uma escolha adequada da composição química. Os aços deste tipo apresentam, na sua composição, teores de carbono de cerca 0,61% a 1,50%. Atentando ao facto deste tipo de aços ser extremamente difícil de maquinar e ter baixa soldabilidade, a sua utilização torna-se mais limitada do que a dos aços anteriormente descritos. 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.

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

Nota: esta avaliação tem como base de comparação os aços macios (MS).

Na Figura 2.1 apresenta-se a evolução cronológica do desenvolvimento dos aços laminados e da evolução da tensão limite elasticidade. Nesta figura, é possível observar que o aço S355 J2 se enquadra na subclasse (MS) enquanto que o aço S460 se encontra na (HSS).

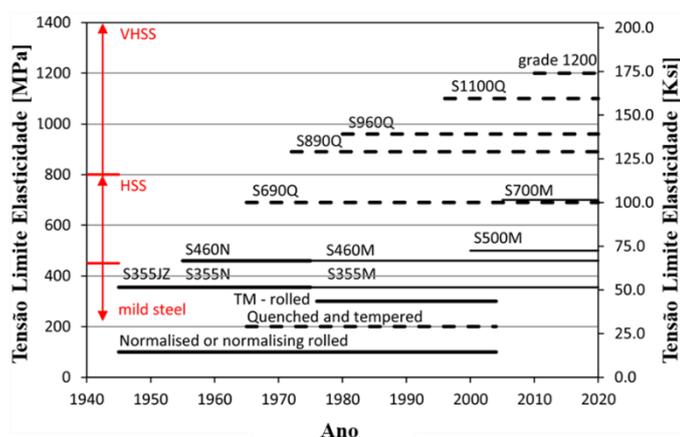


Figura 2.1. Cronologia do desenvolvimento dos aços laminados (adaptado de (Maraveas, Fasoulakis, & Tsavdaridis, 2017) e baseado em (Schröter, 2006)).

2.1.1. Aço S355 J2

A designação do aço em questão (S355 J2), desenvolvida de acordo com as normas, permite concluir que este aço é um aço estrutural, devido ao prefixo “S”. O número que se encontra a seguir ao prefixo (355), indica o limite inferior admissível para a tensão limite de elasticidade deste aço. O sufixo “J2” caracteriza a tenacidade do material.

Este aço é largamente usado em construção civil, seja em estruturas integralmente em aço, seja em construções híbridas (misto de componentes em aço e outros materiais), ou em construções em betão armado. A sua escolha justifica-se pela sua resistência mecânica e a boa soldabilidade, aliadas à sua boa relação resistência/preço. As propriedades que caracterizam este aço, devem-se ao facto de ser laminado a quente.

2.1.2. Aço S460

Nesta secção, apresenta-se o aço S460, que à semelhança do caso anterior, é um aço estrutural, como mostra o prefixo “S”. Neste caso, o limite inferior admissível da tensão limite de elasticidade assume o valor de 460 MPa. Tendo isto em atenção, é fácil depreender que se enquadra na subclasse dos aços de alta resistência (HSS).

As propriedades deste tipo de aços resultam de uma combinação da composição química do material, com o modo de fabrico. A adição de carbono permite um aumento da resistência do material, no entanto, reduz a sua ductilidade, dureza e a soldabilidade. De modo a compensar a redução destas propriedades, adicionam-se elementos de liga, tais como o nióbio e o vanádio ou molibdénio, por forma a obter a resistência adequada sem descorar as restantes propriedades. No contexto deste trabalho é importante referir que o elemento

molibdênio é o que fornece mais vantagens, nomeadamente melhorias na resistência mecânica, dureza soldabilidade, resistência a altas temperaturas e resistência à corrosão. Apesar de o preço variar com o tamanho e formato dos componentes a fabricar, e com o processo de fabrico, em média, os aços S460 são apenas 10% a 15% mais caros quando comparados com os aços S355. No entanto, é ainda de realçar que, os componentes fabricados em aços de alta resistência permitem a utilização de elementos mais esbeltos e leves, nas estruturas, devido à sua elevada resistência. Isto traduz-se numa poupança de material e, conseqüentemente, de dinheiro.

2.2. Caracterização Mecânica a Temperaturas Elevadas

Em estruturas soldadas, o comportamento do material base (MB) é diferente do comportamento das ligações, podendo esta diferença comprometer o comportamento de uma estrutura quando exposta a temperaturas elevadas.

O módulo de elasticidade é uma das principais propriedades mecânicas que caracteriza a generalidade dos materiais. Tendo em conta que esta propriedade se degrada bastante com o aumento da temperatura do material, a capacidade de carga da estrutura é afetada, podendo induzir a deformação do elemento ou até o colapso da mesma, nomeadamente através de fenómenos de flambagem, no caso de situações de carregamento em compressão. Por outro lado, a tensão limite de elasticidade é uma das outras propriedades fulcrais de um material. Esta, também é afetada de forma considerável pela exposição a altas temperaturas. Desta forma, este subcapítulo pretende mostrar algumas das singularidades das soldaduras e dos materiais base, mais especificamente quando sujeitos a situações de fogo ou altas temperaturas em situação de carregamento à tração.

2.2.1. Tipo de Ensaio

Para serem classificados como ensaios a temperaturas elevadas, a norma ISO 6892-2 2011 refere que os ensaios devem ser realizados a temperaturas superiores a 35 °C. (J. Outinen, Kaitila, & Mäkeläinen, 2000), como pioneiros no estudo da degradação das propriedades de aços a temperaturas elevadas, identificam duas metodologias de ensaio, em pequena escala, para a simulação da exposição dos materiais a condições de incêndio. Estas duas metodologias são: os ensaios em regime estacionário e os ensaios em regime transiente.

As metodologias de ensaio em regime estacionário, são mais simples do que as metodologias de ensaio em regime transiente. No entanto, é de consenso geral que os ensaios em regime transiente mimetizam melhor a situação real de um incêndio, fornecendo informação mais realista, principalmente em aços com baixo teor em carbono. Com efeito, nos ensaios em regime transiente, o provete é sujeito a uma carga constante aquecido com uma taxa de aquecimento constante, até se atingir uma temperatura objetivo ou até à rotura do provete a ensaiar, ou seja, simulam um elemento estrutural sob carga estática quando sujeito a fogo. Estes ensaios são realizados em controlo de carga. Durante a realização do ensaio, é medida a temperatura e a deformação do provete e é recorrente retirar-se, à curva obtida, uma componente referente aos fenómenos de fluência. De seguida, é feita uma conversão para as tradicionais curvas tensão-deformação, segundo o método mostrado em (J. Outinen & Mäkeläinen, 2002). Tendo esta curva, com a precisão adequada, é possível determinar a evolução das propriedades dos materiais, nomeadamente, do módulo de elasticidade e da tensão limite elasticidade, para uma gama variada de temperaturas de ensaio. Esta metodologia permite fazer uma avaliação preditiva do comportamento dos aços, quando sujeitos a condições de incêndio.

No caso dos ensaios em regime estacionário, os provetes são aquecidos até uma temperatura pré-estabelecida. Após a estabilização da temperatura, inicia-se o ensaio de tração. Nesta metodologia, é possível recolher diretamente a tensão e a deformação, para a avaliação das mesmas propriedades referidas anteriormente, no entanto, as condições de carregamento são diferentes daquelas que estão sujeitos os elementos estruturais em edifícios. Estes ensaios são realizados em controlo de deformação, i.e., a taxa de deformação é mantida constante.

2.2.2. Metal Base

2.2.2.1. S355 J2

Tendo em conta que o aço S355 J2 tem vindo a ser um dos aços estruturais mais comuns na construção, este já foi alvo de estudo por vários autores. Apesar da importância desta informação, a literatura ainda não dispõe dos dados suficientes para caracterização dos aços laminados a quente em situações de fogo, para que seja possível um dimensionamento seguro.

Segundo (Jyri Outinen & Mäkeläinen, 1994)), o aço S355 (RAEX 37-52), foi objeto de estudo, tendo sido feita uma comparação entre os resultados de testes em regime estacionário e testes em regime transiente, que indicava que os ensaios em regime estacionário foram mais conservativos. Os mesmos autores em (J. Outinen et al., 2000), estudaram o comportamento de vários aços, nomeadamente, o aço S355 J2H, que é laminado a frio, quando exposto a temperaturas elevadas. Para isto, os autores executaram ensaios em regime transiente e em regime estacionário. Os ensaios em regime transiente foram executados com uma taxa de aquecimento de 20 °C/min. No que diz respeito à tensão limite de elasticidade, para o aço S355 J2H, esta degradou-se a partir de 200 °C. Como tantos outros trabalhos, os fatores de redução calculados, i.e., a razão entre as propriedades a uma determinada temperatura e as propriedades mecânicas à temperatura ambiente, foram comparados com os disponibilizados no EC 3. Segundo os resultados e a comparação feita, seria seguro utilizar esta norma para o projeto de estruturas metálicas concebidas em aço S355 J2H. Por outro lado, em (Qiang, Bijlaard, & Kolstein, 2011), é dito que, a deterioração das propriedades mecânicas dos aços, em regime estacionário, está relacionada com a classe do mesmo. Consequentemente, as normas propostas poderão não ser válidas para o caso dos HSS, sendo necessário o cálculo de fatores de redução próprios para cada classe ou material.

De outro modo, em (J. Outinen & Mäkeläinen, 2002), foram estudados dois aço, S350GD+Z e o S355 J2H, sujeitando os mesmos a diferentes taxas de aquecimento em ensaios transientes. Foi concluído que, maiores taxas de aquecimento, resultam num menor decréscimo das propriedades de resistência dos materiais ensaiados.

Em (Forni, Chiaia, & Cadoni, 2016) foi estudada, com recurso a ensaios transientes, a resposta do aço S355 a altas taxas de deformação, quando sujeito a altas temperaturas. Este estudo pretendia prever o comportamento do material, para outros incidentes, tal como explosões. Os resultados obtidos dão conta de uma diminuição significativa da resistência do aço até aos 400 °C. No entanto, acima desta temperatura, e até 550 °C, os autores reportaram um ligeiro aumento da resistência a par de uma redução da extensão total dos provetes ensaiados. Por norma, este comportamento é acompanhado pela formação de um filme de óxidos azul, observado neste e em outros trabalhos, tais como, (Ranawaka & Mahendran, 2009) e (Jacob, 2018). Os autores deste trabalho, nomeiam este fenómeno como *blue brittleness*, atribuindo-o ao envelhecimento dinâmico dos aços ao carbono. Ou seja, para estes materiais, a temperaturas elevadas, há uma interação das

deslocações e dos átomos intersticiais, principalmente o carbono e o azoto, que conduz a um aumento da resistência do aço em resultado da formação de carbonetos, tal como explicado em (Dolzhenkov, 1971) e (Queiroz, 2013).

Chen & Young, (2006), apresentam um trabalho de caracterização dos aços inoxidáveis das classes EN 1.4462 (DUPLEX) e EN 1.4301 (AISI 304), quando sujeitos a temperaturas elevadas, mais propriamente no intervalo [20, 1000] °C. Estes autores observaram que as propriedades de ambos os aços se deterioravam para temperaturas a partir de 80 °C, tendo proposto uma equação unificada para a previsão dos fatores de redução e consequentemente as propriedades do aço

Em (Jacob, 2018), o objeto de estudo foi o aço S355 J2, sendo este caracterizado com base nos resultados obtidos em regime estacionário. Para temperaturas de cerca de 300 °C, foi verificado um aumento da resistência, que foi atribuído ao fenómeno supracitado, *blue brittleness*. Após esta temperatura verificou-se uma diminuição brusca da resistência. Foi constatado também que as roturas dos provetes foram do tipo dúctil. Até 600 °C, a rotura era antecedida da formação de estrição. A 900 °C, apesar de não ter ocorrido alteração significativa no comprimento do provete, a rotura não foi antecedida de estrição. Na Figura 2.2 a) são apresentadas as curvas tensão-deformação do material base, onde é possível verificar o aumento de resistência referido. Esta figura permite também efetuar uma comparação com os fatores de redução fornecidos pelo EC 3. Na Figura 2.2 b) é possível observar que os fatores de redução propostos pela norma e os determinados por (Jacob, 2018), para a tensão limite elasticidade, são semelhantes. Isto apesar de a 600 °C ser notada uma disparidade, sendo a tensão limite elasticidade determinada pelos autores, inferior à proposta da norma. Não sendo esta disparidade muito significativa, o autor afirma que é possível utilizar os fatores de redução proposto no EC3 para o projeto de estruturas metálicas.

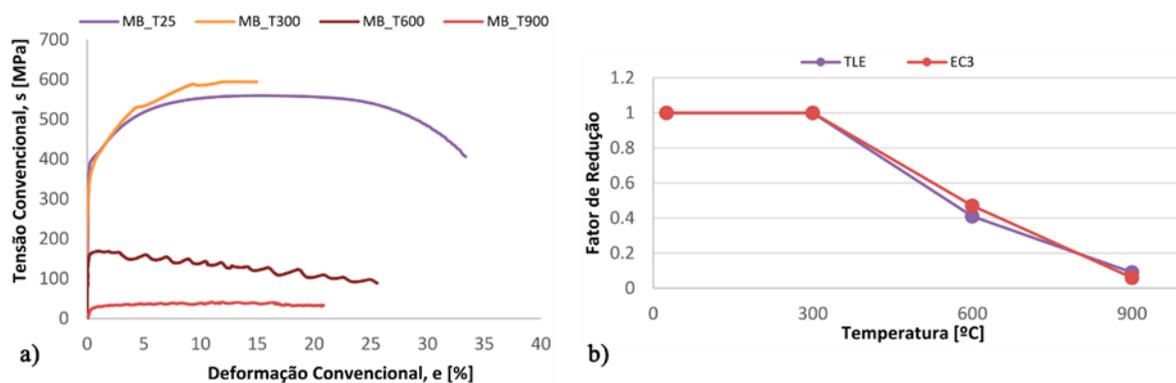


Figura 2.2. Resultados para o aço S355 J2 em ensaio em regime estacionário. a) Curvas tensão-deformação; b) Fatores de redução experimentais versus Eurocódigo 3 (adaptado de (Jacob, 2018)).

2.2.2.2. S460

(J. Outinen et al., 2000), para o caso do aço S460 M, observou que a tensão limite de elasticidade diferia da prevista pelo EC 3, até 500 °C, sendo que, a partir daí, os valores estavam próximos da previsão da norma.

Na revisão bibliográfica de (Maraveas et al., 2017), em que se confrontam os resultados de estudos experimentais e as recomendações das normas mais usuais, (Europeia (EN 1993-1-2, 2005 e EN 1993-1-12, 2007), Americana (AISC (American Institute of Steel Construction), 2010), Australian (AS (Australian Standard), 2012) e normas britânicas (BS (British Standard), 1998)), para estruturas em aço, mostrou não haver concordância entre estes dados, possivelmente devido às recomendações terem sido desenvolvidas com base no estudo de aços com baixo teor em carbono. Com base nesta constatação, aconselha-se a elaboração de novas recomendações para a subclasse dos aços de alta resistência (HSS) e conseqüentemente para o S460, o que também é corroborado por (Li & Young, 2017) e por (Qiang et al., 2011). Neste artigo, são ainda discutidos os efeitos do processo de fabrico, da microestrutura, das condições de carregamento, da temperatura máxima atingida e outros fatores, no comportamento após exposição a altas temperaturas.

As incoerências com as normas de projeto, principalmente com o EC 3, são também evidenciadas por outros trabalhos, nomeadamente, (Ranawaka & Mahendran, 2009) e (Qiang, Jiang, Bijlaard, & Kolstein, 2016).

Wang, Liu, & Liu, (2015) investigaram o aço Q460, que é temperado e revenido ao contrário do normalizado S460 NL que foi explorado por (Qiang, Bijlaard, & Kolstein, 2012c). Comparando os dois trabalhos, podem observar-se diferenças significativas no módulo elasticidade após exposição a temperaturas elevadas entre os aços Q460 e o S460.

Isto reforça a importância do processo de fabrico no comportamento mecânico do aço após ter sido sujeito a uma situação de fogo e arrefecido. Nomeadamente, o módulo de elasticidade do aço revenido manteve-se para temperaturas até 800 °C, enquanto que o do aço S460 decresceu cerca de 80 %.

Da investigação realizada ao aço S460 N e ao aço S460M, com base em ensaios transientes, em (Qiang, Bijlaard, & Kolstein, 2012a), pode ainda concluir-se que o código EC 3 é, em geral, conservativo para o aço S460 M, mas não o é para o aço S460 N. Concluindo então o autor que, a utilização da norma europeia e da AISC é segura para o aço S460 M, no que diz respeito ao módulo de elasticidade.

2.2.3. Soldaduras

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 2.2 a)), 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.

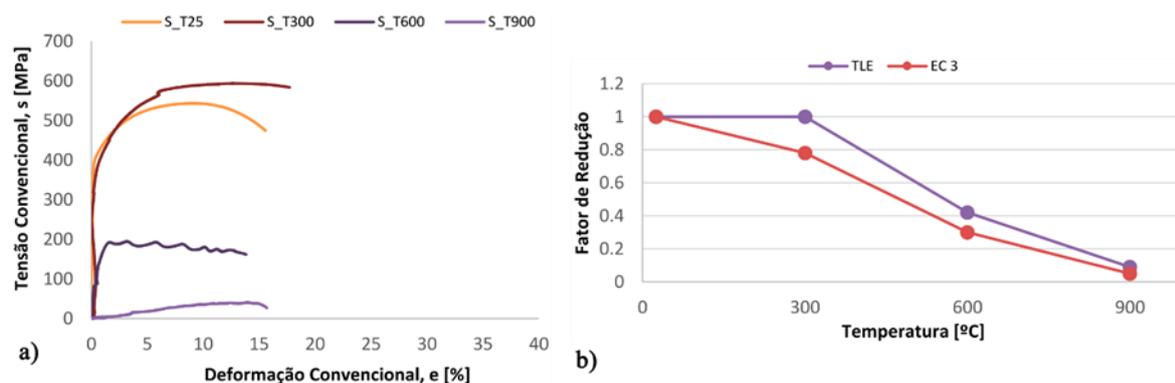


Figura 2.3. Resultados para as soldaduras MAG em ensaio em regime estacionário. a) Curvas tensão-deformação; b) Fatores de redução experimentais versus Eurocódigo 3 (adaptado de (Jacob, 2018)).

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.

2.3. Caracterização Mecânica Após Fogo

Neste subcapítulo, pretende-se fazer uma apresentação dos estudos de caracterização do comportamento e propriedades dos metais base e das soldaduras após exposição a ambiente aquecido, i.e., avaliação das propriedades residuais dos aços.

2.3.1. Tipo de Ensaio

Para este tipo de caracterização, aquilo que é feito habitualmente, é a exposição dos materiais e soldaduras, a altas temperaturas. Após ser atingida a temperatura objetivo, o material é arrefecido, até à temperatura ambiente, com base num método de arrefecimento estabelecido à priori. Alguns dos métodos mais habituais são o: arrefecimento ao ar ambiente, o arrefecimento no interior de forno fechado, o arrefecimento com escoamento de ar forçado ou até o arrefecimento com água. Outras duas variáveis deste tipo de ensaios são a taxa de aquecimento e o tempo de exposição. Após os provetes terem atingido a temperatura ambiente, é realizado um ensaio de tração típico.

2.3.2. Metal Base

Para os autores de (Qiang, Bijlaard, & Kolstein, 2012b), o colapso de estruturas metálicas, após fogo, é raro, pois, o aço recupera a resistência durante o arrefecimento. Entre 2012 e 2013, estes autores estudaram os aços S460, S690 e o S960, em (Qiang et al., 2012b) e (Qiang, Bijlaard, & Kolstein, 2013). Testemunharam que os aços de maior resistência, ou seja, os aços S690 e S960, sofriram maiores perdas de resistência mecânica do que o aço S460. Da comparação de resultados com o EC 3, concluíram que não houve uma concordância perfeita de resultados, no que diz respeito à resistência mecânica. Tal como estes autores, (Gunalan & Mahendran, 2014), também verificaram falta de coerência com a norma europeia, neste caso para os aços laminados a frio, (G300 (1mm), G500 (1.15mm) e G550 (0.95mm)).

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. Concluíram que o modo de arrefecimento, após exposição a temperaturas elevadas, afeta de forma significativa a resistência mecânica e a ductilidade do material relativamente à sua condição inicial. Para os tratamentos térmicos a temperaturas mais elevadas e com o arrefecimento a água, o material apresentou uma resistência residual superior à obtida com arrefecimento a ar.

Recorrendo novamente ao trabalho de Jacob, (2018), mas agora para a situação após fogo, retiraram-se também conclusões interessantes. Neste trabalho, o material foi sujeito a vários tratamentos térmicos, de sujeição a ambiente aquecido, a 300 °C, 600 °C e 900°C, de modo a analisar a influência da temperatura máxima atingida, nas propriedades

das soldaduras e do material base. Da análise metalográfica, foi concluído que só ocorrem alterações microestruturais significativas para as amostras sujeitas ao tratamento térmico de 900 °C, verificando-se um engrossamento do grão ferrítico, assim como a existência de carbonetos e fases de baixo ponto de fusão intercalados com a matriz ferrítica. A precipitação destes carbonetos em bandas, pode justificar a redução de alongamento dos provetes para este tratamento térmico.

No que diz respeito à resistência à tração, as amostras de material base sujeitas a 300 °C e 600 °C comportaram-se de forma semelhante às amostras não tratadas termicamente, contudo, para as amostras sujeitas a 900 °C, observou-se uma acentuada redução de resistência.

Importa também frisar que, as amostras foram sujeitas a uma baixa taxa de aquecimento, estando bastantes horas dentro do forno.

Em (J. Outinen & Mäkeläinen, 2002) foram ensaiados em tração, à temperatura ambiente provetes dos aços S355 J2H e S460 M, após exposição a temperaturas elevadas. No caso do aço S355 J2H, os autores concluíram que as propriedades mecânicas, após exposição ao calor, mantinham os valores nominais do aço S355. Tendo sido utilizadas diferentes taxas de aquecimento, para diferentes lotes de provetes, os autores constaram ainda que, para as taxas de aquecimento mais elevadas, ocorreu uma menor degradação da resistência no caso S355 J2H. No mesmo trabalho, os autores realizaram ainda testes de compressão a temperaturas elevadas. Nestes ensaios, as propriedades obtidas foram semelhantes aos valores nominais. No entanto, os provetes ensaiados apresentavam deformações significativas. Podemos então concluir com isto que, mesmo que os aços mantenham as propriedades, a deformações presentes, podem inviabilizar a reutilização das estruturas ou componentes.

Ainda com base na investigação de (Maraveas et al., 2017), é possível afirmar que os aços de alta resistência são mais instáveis, no caso de serem sujeitos a situações de fogo, pois, as temperaturas atingidas em contexto de incêndio podem alcançar ou até ultrapassar, as temperaturas utilizadas nos tratamentos termomecânicos utilizados para conferir ao material base as propriedades mecânicas que lhes são características. Para além disto, tendo em conta que as estruturas que utilizam as classes de aços de resistência mais elevada são mais esbeltas, podemos concluir que, isto afeta a inércia térmica dos componentes, i.e., sendo elementos de menor espessura, demoram menos tempo a serem

aquecidos. Por isto, a reciclagem e utilização de estruturas que utilizam aços de alta resistência torna-se mais desafiante.

Na Figura 2.4, é possível examinar as curvas tensão-deformação obtidas por (Qiang et al., 2016) e (Qiang et al., 2013) para o aço S960, para a situação de incêndio e após incêndio, Figura 2.4 a) e b), respectivamente. Para a situação de incêndio, facilmente se deduz que o decréscimo da resistência mecânica é acentuado a partir de 200 °C. Após arrefecimento, o decréscimo da resistência começa a ganhar relevância apenas a partir de 650 °C.

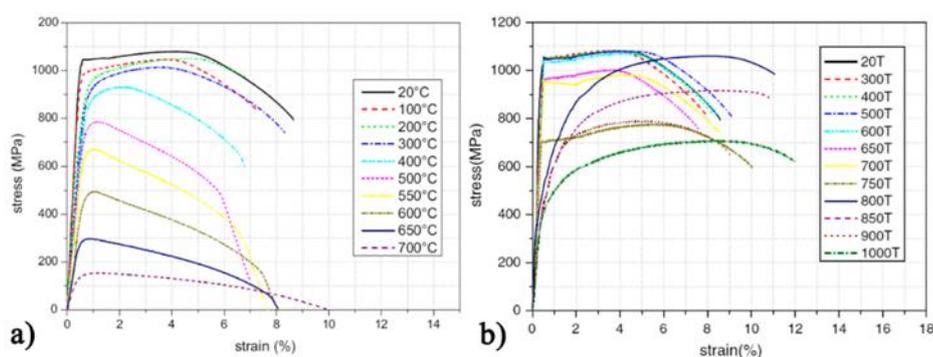


Figura 2.4. Curvas representativas da tensão-deformação para o aço S960 (VHSS). a) Elevadas temperaturas; b) Após arrefecimento (adaptado de (Qiang et al., 2016) e (Qiang et al., 2013)).

2.3.3. Soldaduras

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.

Para o caso das soldaduras Jacob, (2018), também observou o que é referido na secção 2.3.2, no que diz respeito à análise microestrutural para a mesma investigação.

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.

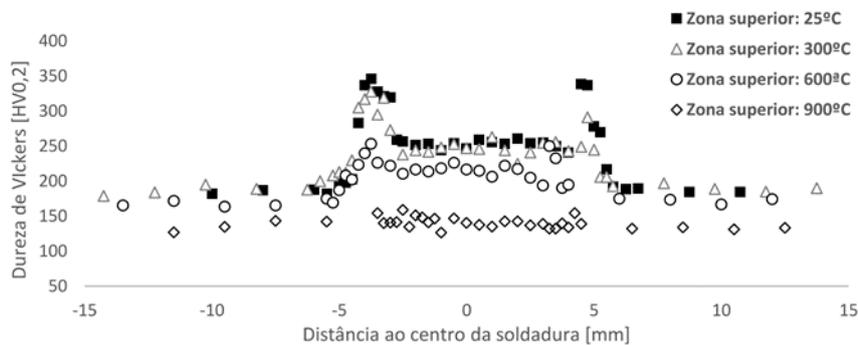


Figura 2.5. Evolução do perfil de dureza superior da soldadura com o aumento da temperatura para a soldadura MAG (adaptado de (Jacob, 2018)).

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 diminui com o aumento da temperatura a que estiveram sujeitas. Da comparação entre os métodos de arrefecimento, conclui-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. Na Figura 2.6 é possível observar graficamente os resultados do estudo, em função do método de arrefecimento. 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.

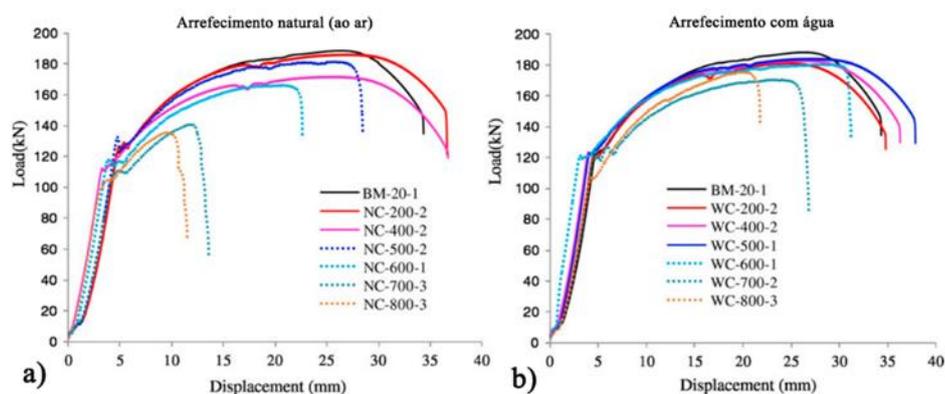


Figura 2.6. Curvas tensão-deformação residual de juntas soldadas topo-a-topo. a) Arrefecimento natural (ao ar); b) Arrefecimento por água; (adaptado de (Zhang et al., 2017)).

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.

2.4. Importância na Proteção Civil

No anexo A, apresenta-se uma pequena revisão bibliográfica sobre a importância do estudo da avaliação do efeito da temperatura no comportamento dos aços, utilizando como exemplo um dos maiores desastres que há memória nesta temática.

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo apresenta-se a componente experimental em que esta dissertação se fundamenta. Destacam-se os materiais utilizados, os processos de soldadura, os ciclos térmicos de simulação de fogo, assim como as técnicas de caracterização.

3.1. Material Base

Os materiais base selecionados para este estudo foram os aços estruturais S355 J2 e o S460, ambos laminados a quente, cuja composição química se encontra sumariada na Tabela 3.1. Para uma avaliação da soldabilidade, apresenta-se o valor de carbono equivalente (CE), obtido por recurso à equação (3.1), adotada pelo *International Institute of Welding*. Na Tabela 3.2 apresenta-se uma avaliação relativa à soldabilidade dos materiais em estudo, com base no carbono equivalente.

$$CE = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \left(\frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} \right) + \left(\frac{\%Cu + \%Ni}{15} \right), \quad (3.1)$$

Tabela 3.1. Composição química (%pd.) dos aços estudados. S355 J2 (fornecido por Rizhao Steel Holding Group CO., Ltd) e S460 (proveniente de um projeto de investigação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra).

	C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Cr	Mo	V	Fe	CE
S355 J2	0,17	0,21	1,45	0,23	0,07	0,33	-	-	-	-	Balanço	0,45
S460	0,2	0,6	1-1,7	0,03	0,025	0,02	0,55	0,30	0,1	0,12	Balanço	0,53-0,54

Tabela 3.2. Interpretação do resultado para o carbono equivalente segundo (*General Requirements for Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes, and Sheet Piling*, 2018)

Carbono equivalente [%Ce]	Soldabilidade
Até 0,35	Excelente
0,36-0,40	Muito boa
0,41-0,45	Boa
0,46-0,50	Razoável
Mais de 0,50	Baixa

Importa referir que o material base S355 J2 e respetivas soldaduras, faziam parte de um lote de material já investigado por (Jacob, 2018). Desta forma não serão apresentados, para este material, os procedimentos de preparação dos provetes nos subcapítulos e secções seguintes, pois esta informação pode ser obtida por consulta desta referência.

3.2. Elaboração das Soldaduras

As soldaduras no aço S355 J2 foram fabricadas recorrendo ao processo MAG, por ser o mais comum neste tipo de aplicação, enquanto que as fabricadas no aço S460 foram produzidas pelo processo de soldadura por Eléctrodo Revestido (ER).

3.2.1. Preparação de Junta

Para a preparação de junta no aço S460 seguiram-se os procedimentos do fabricante, definidas de acordo com a referência (Standard Data For Arc Welding), encontrando-se na Figura 3.1 o esquema da preparação de junta soldada.

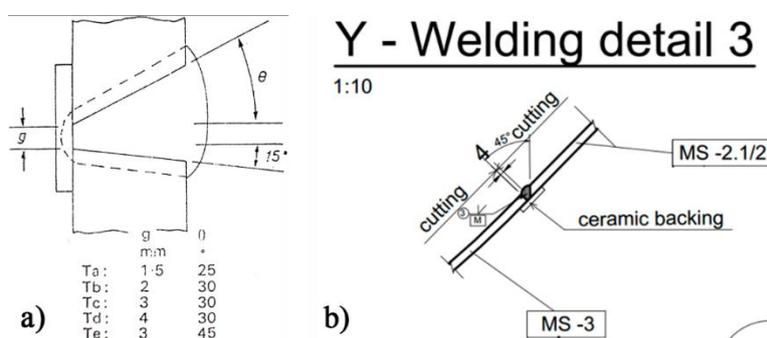


Figura 3.1. Esquema de preparação de junta. a) Standard Data for Arc Welding; b) Informação do fabricante.

3.2.2. Parâmetros das Soldaduras

Relativamente aos procedimentos adotados na fabricação das soldaduras no aço S355 J2 utilizando o processo MAG, esclarece-se que o material de adição obedeceu à norma ISO 15614-1:2017.

No que diz respeito às soldaduras realizadas em aço S460, foram utilizados eléctrodos revestidos, do tipo EUROTROD MC 40, segundo a norma AWS A5.5: E 11018-G, cuja composição se apresenta na Tabela 3.3. Os parâmetros de soldadura utilizados, definidos de acordo com as recomendações da referência (Standard Data For Arc Welding) apresentam-se na Tabela 3.4.

Tabela 3.3. Composição química dos eletrodos revestidos EUROTROD MC 40 (pd%).

Elemento	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Fe
	0,07	1,5	0,6	0,5	1,8	0,45	Balanço

Tabela 3.4. Parâmetros utilizados na produção de soldaduras em aço S460.

Parâmetros	Unidade			
Número de passes		1	2-4	5
Diâmetro do eletrodo	[mm]	3,15	4	5
Intensidade de corrente	[A]	110	170	190

3.3. Condições de Ensaio

A caracterização mecânica das soldaduras e dos metais base foi efetuada com recurso a dois tipos de ensaios mecânicos: o ensaio de dureza e o ensaio de tração uniaxial. Os ensaios de tração foram realizados à temperatura ambiente, quer para provetes nas condições após soldadura, quer para provetes expostos a altas temperaturas após soldadura. Foram ensaiados provetes de metal base e provetes das respetivas soldaduras. Quanto aos ensaios de dureza, também se estudaram amostras com e sem exposição a temperaturas elevadas.

3.3.1. Ensaios de Tração Axial

Para a avaliação do comportamento mecânico dos aços, foram realizados ensaios de tração axial, em lotes de provetes de metal base e soldaduras, sem tratamento térmico de exposição a temperaturas elevadas e após exposição a temperaturas elevadas. Nos ensaios de tração realizados após exposição, para ambos os aços, as amostras foram previamente aquecidas, através de um forno Termolab, com um controlador Eurotherm até à temperatura de 900 °C, (T900), com uma taxa de aquecimento de 5 °C/min e arrefecidas dentro do forno. Importa referir que, após atingida a temperatura objetivo, houve uma manutenção da mesma durante 20 minutos. Para além dos dados recolhidos neste ensaio, ainda é disponibilizada informação, apenas para o aço S355, retirada de (Jacob, 2018), relativa à caracterização de amostras sujeitas a tratamentos térmicos semelhantes, mas a 300 °C (T300) e 600 °C (T600). Para a realização dos ensaios de tração uniaxial, utilizou-se uma velocidade de solitação de 0.05 mm/s. Os ensaios de exposição a altas temperaturas e os ensaios de tração foram realizados no Departamento de Engenharia Mecânica da

Universidade de Coimbra (DEM), segundo a norma ISO 6892-1:2016. De forma gráfica, é possível observar os ciclos térmicos destes ensaios na Figura 3.2.

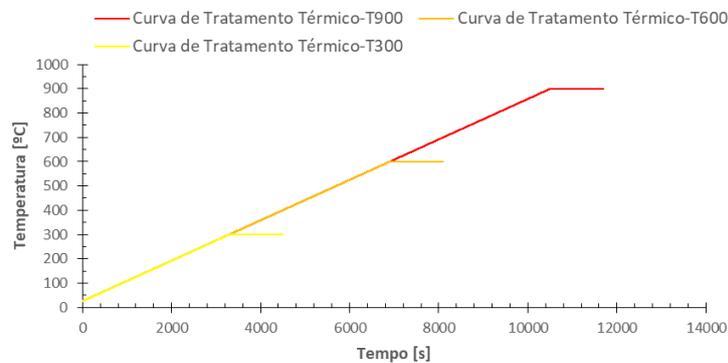


Figura 3.2. Ciclo térmico de baixa taxa de aquecimento do ensaio desenvolvido no forno Termolab.

Por outro lado, também se levaram a cabo, no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra (DEC), tratamentos térmicos recorrendo ao forno de hidrocarbonetos Ceramifor que se mostra na Figura 3.3, personalizado de acordo com as normas de resistência ao fogo. Este ensaio consistiu na exposição direta ao fogo (EDF), de vários lotes de provetes, de aço S355 J2, com elevada taxa de aquecimento, com o objetivo de simular um incêndio estrutural. A curva de aquecimento utilizada, baseia-se numa taxa de aquecimento média de cerca de 160 °C/min. Após ter sido atingida uma temperatura de cerca de 900 °C, nos provetes, o forno foi desligado tendo sido retirados do mesmo para se proceder ao seu arrefecimento ao ar. Um outro tratamento térmico foi realizado posteriormente, que incluiu a manutenção das amostras a 900 °C por cerca de cerca de 25 minutos. Para além dos termopares de placa, do tipo B, de controlo do forno, também foram instrumentados termopares em 3 provetes. Na Figura 3.4, é possível observar os ciclos térmicos destes dois ensaios, bem como os dados recolhidos num dos termopares do ambiente do forno.



Figura 3.3. Forno Ceramifor DEC.

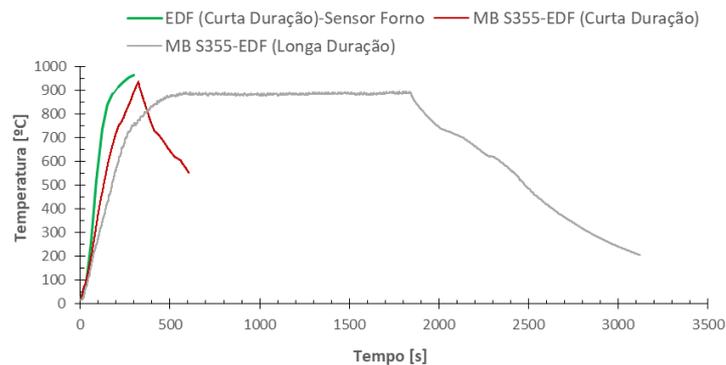


Figura 3.4. Ciclo térmico de alta taxa de aquecimento do ensaio desenvolvido no forno Ceramifor.

Para facilitar a visualização na secção de resultados, foi criado um código de cores para a representação de cada curva, com base no tratamento a que o provete a ensaiar foi sujeito. Daqui em diante, os resultados seguem os códigos de cores que se identificam nas Figura 3.2 e Figura 3.4.

Para os três tipos de tratamento térmico, nos ensaios de resistência mecânica, foi utilizada uma máquina de tração SHIMADZU AGS-100kNX Figura 3.5 (1), e o sistema de extensometria ótica, *ARAMIS Optical 3D Deformation & Strain measurement system*, representado na Figura 3.5 (2), com o objetivo de fazer a medição da deformação durante o ensaio de tração. A utilização deste equipamento, requer uma preparação prévia dos provetes a serem ensaiados. Para isto preparou-se a superfície a analisar, de acordo com o procedimento esclarecido em (Leitão, Galvão, Leal, & Rodrigues, 2012) e (Leitão, Costa, Khanijomdi, & Rodrigues, 2013). Utilizando *Digital Image Correlation* (DIC), foi ainda possível a construção de mapas de distribuição de deformação nas amostras de soldadura.

Por forma a garantir a repetibilidade dos resultados, os ensaios foram repetidos 3 vezes.



Figura 3.5. Sistema de ensaio de tração utilizado. 1) Máquina de tração SHIMADZU AGS-100kNX; 2) Extensómetro ótico ARAMIS Optical 3D Deformation & Strain measurement system.

3.4. Amostragem

Para se proceder à extração de provetes de tração, e amostras para ensaios de metalografia e dureza, recorreu-se a procedimentos estipulados em trabalhos de investigação anteriores, nomeadamente, em Jacob, (2018).

Antes da realização dos ensaios mecânicos, foi necessário proceder ao corte e maquinação dos provetes a serem ensaiados. Além de provetes de material base, para ambos os aços, produziram-se também provetes de soldadura do tipo MAG e ER, para os aços S355 J2 e S460, respetivamente. O número total de amostras ensaiadas encontra-se sumariado na Tabela 3.5, que mostra que, foram produzidos 78 provetes para ensaios de tração e 14 amostras de metalografia.

Tabela 3.5. Número de provetes e amostras fabricados para cada ensaio.

Ensaio	S355 J2	S460
Temperatura Ambiente (referência)	6	6
Transientes	36	-
Exposição Direta ao Fogo (EDF)	18	-
Exposição a Altas Temperaturas	6	6
Dureza	10	4
Análise Metalográfica	9	4

Todos os provetes foram extraídos de acordo com as normas: ISO-6892-2 (Figura AA. 1 do Apêndice A) e ISO-6892-2 (Figura AA. 2 do Apêndice A) para os aços S355 J2 e S460, respetivamente. No caso das soldaduras, devido à localização das mesmas, não foi possível seguir a mesma norma, tendo sido maquinadas conforme a Figura AA. 3, que consta no apêndice A, extraídas de um elemento estrutural, como se pode ver na Figura AA. 4 e Figura AA. 5 do mesmo apêndice.

3.5. Técnicas de Caracterização

3.5.1. Ensaio de Dureza

A dureza é uma medida da resistência de um material à deformação plástica. Esta propriedade mecânica foi avaliada utilizando um microdurómetro SHIMADZU HMV-G com indentador Vickers (HV), com uma carga P de 1,961 N (HV0,2), aplicada durante 15 segundos. O mesmo equipamento, permitiu o cálculo da média das diagonais da indentação realizada (d), por microscopia ótica, permitindo obter o valor da dureza de acordo com a equação (3.2).

$$HV = \frac{1,854P}{d^2}, \quad (3.2)$$

As medições efetuadas seguiram 3 procedimentos, tal como se indica na Figura 3.6, ou seja, foi efetuada uma linha de medições vertical, ao centro da soldadura, e duas linhas de medição horizontais, de modo a avaliar as regiões superior e inferior da junta.

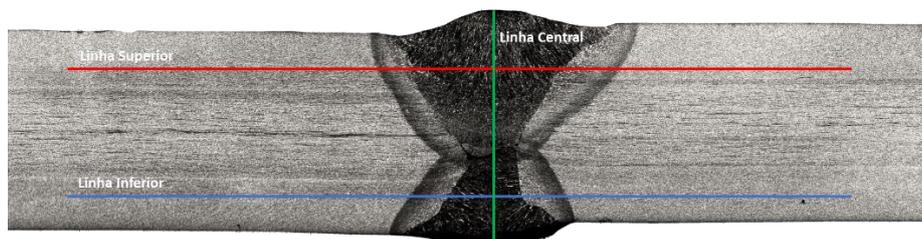


Figura 3.6. Esquema do perfil de durezas de uma amostra soldada.

3.5.2. Microscopia Ótica

A microscopia ótica foi utilizada para a realização de análises metalográficas dos materiais em estudo. Esta análise seguiu o protocolo normal, ou seja, corte da zona a estudar seguido do respetivo polimento e ataque químico. O reagente utilizado foi o Nital (2% de ácido nítrico (HNO_3) e 98% de etanol ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$)). A aquisição e processamento das micro- e

macrografias foi conseguida com recurso a um microscópio ótico, da marca *Leica Microsystems*, modelo DM 4000M e respetivo software, segundo a norma ISO 643:2012.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são expostos os resultados obtidos, para a avaliação do efeito de diferentes tratamentos térmicos nas propriedades mecânicas e no comportamento dos aços S355 J2 e S460. Para o aço S355 J2 são apresentados os resultados das propriedades mecânicas à temperatura ambiente e após tratamento térmico, para o material base e soldadura, para quatro tratamentos térmicos distintos. Para o aço S460, são apresentados os resultados das propriedades mecânicas do material base e respetiva soldadura sem tratamento térmico e após tratamento térmico a 900 °C.

4.1. Comportamento Mecânico à Temperatura Ambiente

Este subcapítulo pretende apresentar e analisar os resultados obtidos para a avaliação feita à temperatura ambiente, para os materiais base e soldaduras. 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.

Por forma a sistematizar os resultados, este subcapítulo divide-se em dois grandes grupos, a caracterização dos materiais base e a caracterização das soldaduras.

4.1.1. Material Base

Na Figura 4.1 estão representadas as curvas tensão-deformação convencionais, para os aços S355 J2 e para o aço S460. Tal como seria de esperar, o conjunto de propriedades, Tabela 4.1, obtidas nesta caracterização enquadram-se naquilo que é referenciado na literatura para ambos os aços, Tabela 2.1. Quando comparado com o aço S355 J2 (MS), o aço S460 (HSS) apresenta uma maior tensão limite de elasticidade e uma tensão máxima superior. Para além do patamar de cedência que o aço de alta resistência apresenta, também é possível verificar uma menor ductilidade, dado que a deformação total é cerca de 24% menor. Quanto ao módulo de elasticidade, em termos qualitativos, os dois aços apresentam um comportamento semelhante. Para ambos os aços e em todos os provetes

ensaiados, verificou-se a ocorrência de estrição, na fase final do ensaio, o que indica uma fratura do tipo dúctil.

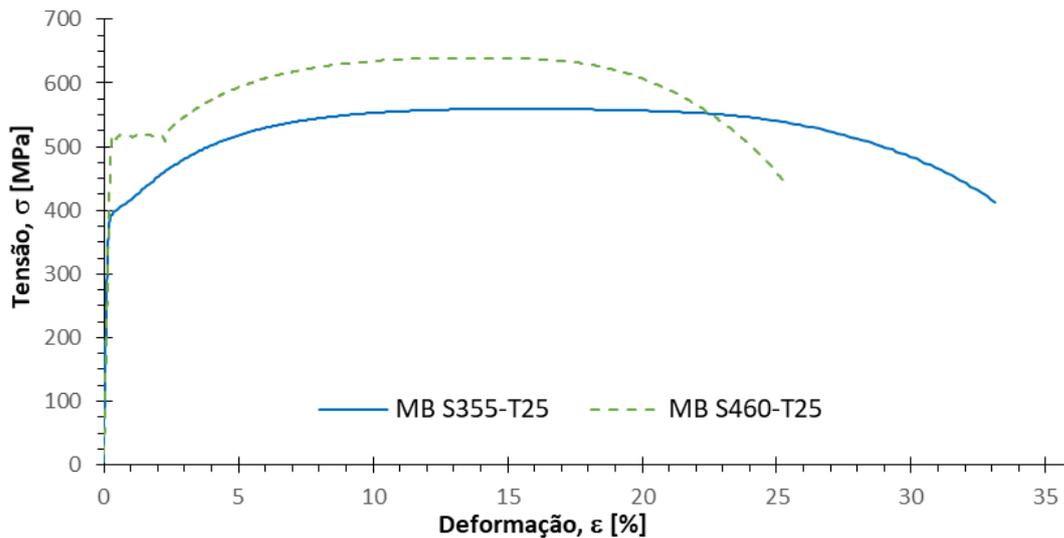


Figura 4.1. Curvas tensão-deformação de ambos os materiais base sem tratamento térmico.

Na Tabela 4.1, descrevem-se as propriedades destes dois aços utilizados no presente estudo. É importante notar que, a “ $\epsilon_{\text{constante}}$ ” representa a deformação até à tensão máxima.

Tabela 4.1. Propriedade mecânicas dos materiais base à temperatura ambiente.

	σ_0 [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{constante}}$ [%]	ϵ_{total} [%]
MB S355-T25	400	560	14,68	33,11
MB S460-T25	518	640	14,07	25,28

De seguida apresenta-se a microestrutura nominal dos materiais base dos aços analisados. Na Figura 4.2 a), é possível observar a microestrutura do aço S355 J2 depois de fabricado, já na Figura 4.2 b) é mostrada de forma semelhante o mesmo mas para o aço S460. O aço S355 J2 apresenta uma microestrutura tipicamente ferrítico perlítica, com grãos equiaxiais de ferrite, (fase branca), contendo perlite, (fase preta), nas fronteiras de grão. O aço S460, apresenta também uma microestrutura ferrítico perlítica, mas, apesar do teor em carbono ser semelhante e ambas as chapas serem fabricadas por laminagem a quente, exhibe uma morfologia diferente, tal como observável na Figura 4.2 b). Durante a laminagem pode ocorrer separação entre as fases ferríticas e perlíticas em bandas, originando propriedades microestruturais diferentes que, aparentemente, é o que acontece para o caso do aço S460.

A microestrutura deste aço, apresenta bandas de ferrite, (fase branca), alternadas com fases ricas em carbonetos, (fase escura). Enquanto que a fase ferrítica é pouco dura e dúctil, o constituinte bifásico (perlite) é duro e frágil. Estas diferenças podem ser também atribuídas à adição de elementos de liga ou a possíveis diferença de parâmetros, durante o fabrico das chapas. A adição de alguns elementos de liga, ainda que em baixa quantidade, tais como o molibdénio e o vanádio, permitem incrementar as propriedades mecânicas sem afetar de forma severa a soldabilidade, oferecendo assim uma boa relação resistência/soldabilidade. Para ambos os aços, as microestruturas, estão de acordo com as microestruturas típicas para estes materiais.

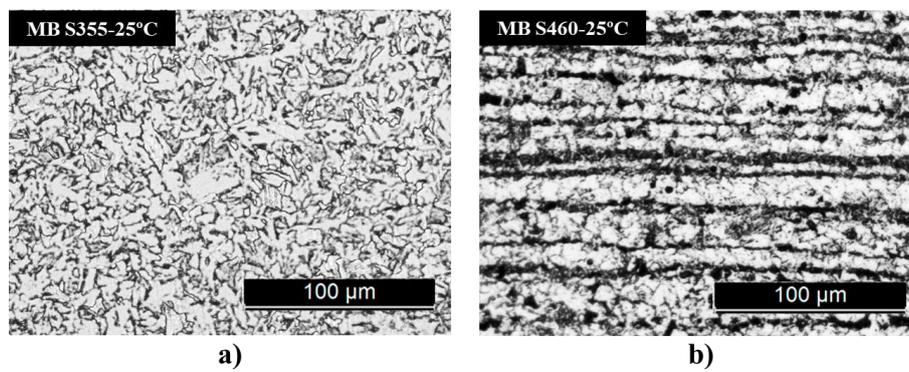


Figura 4.2. Microestrutura do material base sem tratamento térmico. a) Aço S355 J2; b) Aço S460.

4.1.2. Soldaduras

Para o caso das soldaduras MAG em aço S355 J2 e para as soldaduras ER em aço S460, apresenta-se o comportamento mecânico na Figura 4.3. Comparando o comportamento mecânico da soldadura MAG em aço S355 J2, Figura 4.3, com o comportamento do material base, Figura 4.1, verifica-se que a tensão limite elasticidade, tensão máxima e módulo de elasticidade mantiveram os mesmos valores, no entanto, o mesmo não acontece com a deformação, (40% menor), indicando um decréscimo na ductilidade na soldadura. Fazendo a mesma comparação, mas para a soldadura ER, verifica-se que a tensão limite elasticidade, tensão máxima e módulo de elasticidade também se mantêm, no entanto, o patamar de cedência desaparece. Quanto à deformação, verifica-se que diminui bastante, cerca de 80%, conseqüentemente apresenta uma menor ductilidade.

Comparando as duas soldaduras, observa-se que a ductilidade da soldadura MAG do aço S355 J2 é superior à da soldadura ER do aço S460, não obstante, exibe valores de tensão limite de elasticidade e tensão máxima menores. Os valores do módulo de elasticidade mantiveram-se semelhantes.

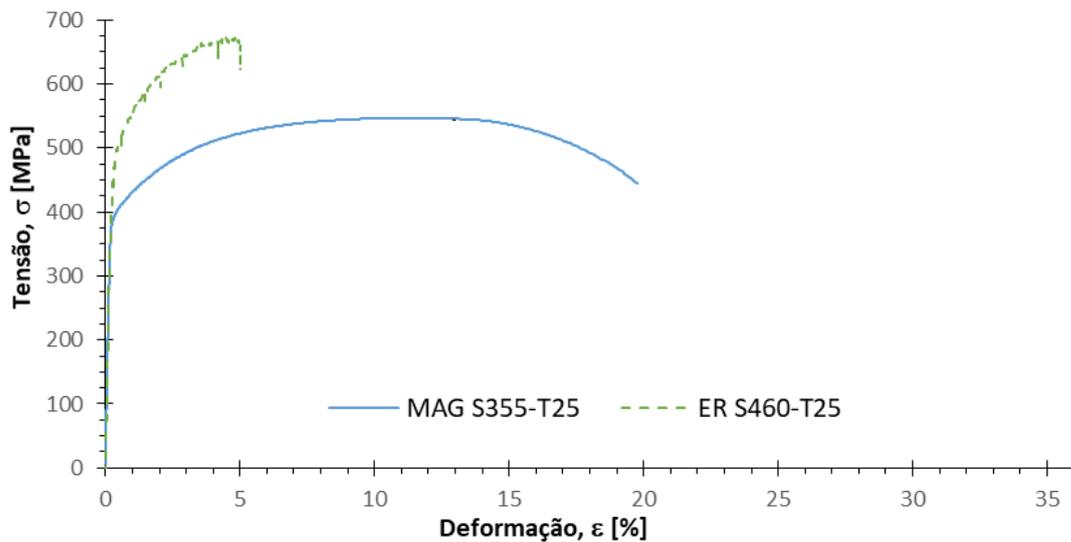


Figura 4.3. Curvas tensão-deformação para as soldaduras com MAG em aço S355 J2 e com eletrodo revestido (ER) em aço S460 sem tratamento térmico.

Resumindo as principais propriedades das juntas soldadas, apresenta-se a Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Propriedades mecânicas das soldaduras à temperatura ambiente.

	σ_0 [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{constante}}$ [%]	ϵ_{total} [%]
MAG S355-T25	400	547	11,69	19,76
ER S460-T25	506	671	4,34	5

A localização da fratura, apresenta-se num mapa de deformação, Figura 4.4, obtido através de *Digital Image Correlation* (DIC), obtido para a secção transversal à soldadura, na situação de tensão máxima, para ambas as soldaduras. Apresentando-se a deformação equivalente de Von Mises, facilmente se deduz que a fratura ocorreu na zona do material base. A escolha de apresentação da deformação equivalente de Von Mises, justifica-se com base na sobre-espessura, dado que, apesar da solicitação ser uniaxial, a alteração de geometria pode induzir tensões em direções diferentes à da solicitação.

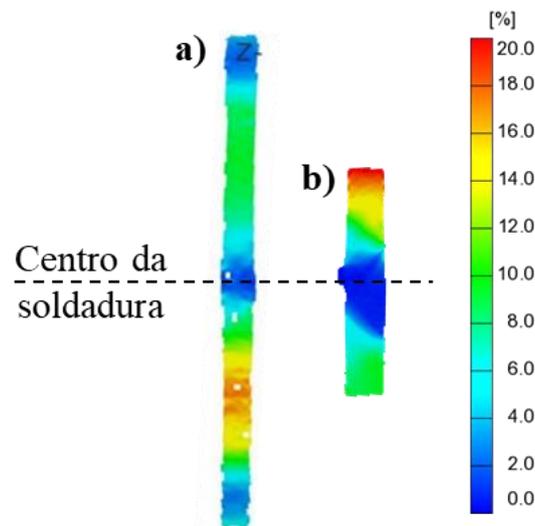


Figura 4.4. Mapas de deformação de Von Mises do provete, no instante de carga máxima; a) Soldadura MAG em aço S355 J2; b) Soldadura com eletrodo revestido em aço S460.

No que diz respeito à análise de dureza, a Figura 4.5 e Figura 4.6 apresentam os valores obtidos para as diferentes zonas da secção transversal da soldadura MAG. Por forma a explicar melhor a evolução dos perfis de dureza desta amostra, apresenta-se o gráfico da Figura 4.5, sob forma de mapa de distribuição de cores, sobreposto a uma macrografia da secção transversal soldadura, o que permite realizar uma análise qualitativa da evolução da durezas nas diferentes regiões da soldadura. Por outro lado, de forma a ser possível uma melhor leitura, na Figura 4.6 são expostos os resultados dos perfis de dureza desta amostra. De um modo análogo, apresentam-se os gráficos da Figura 4.7, para indicação das zonas onde foram realizadas as indentações, e a Figura 4.8, para indicação dos resultados, para a soldadura ER em aço S460. Ambas as soldaduras apresentam um perfil em “M”, tal como observado em (Fydrych, Łabanowski, & Rogalski, 2013), que é comum para este tipo de soldaduras, no entanto, este perfil é mais acentuado para o caso da soldadura por ER, a par de apresentar durezas superiores para as diferentes zonas. A soldadura MAG tem um pico de dureza, cerca de 66% superior ao material base respetivo, enquanto que a soldadura por ER, apresenta um pico 118% superior, quando comparado com o material base de fabrico. Da análise da Figura 4.5 e Figura 4.7, no que trata apenas da zona de soldadura, para ambos os casos, verifica-se que os picos de dureza estão localizados na ZTAGG. Por outro lado, os menores valores de dureza, foram registados na zona termicamente afetada de grão fino (ZTAGF). Estas zonas, são facilmente observadas na Figura 4.9 e Figura 4.11.

Verificando que a inclusão de escória, assinalada na Figura 4.5, não comprometeu a rotura do provete da soldadura MAG em aço S355, estes resultados validam a rotura apresentada durante os ensaios de tração.

Para facilitar a análise e a comparação de resultados, a partir desta subsecção, apenas serão apresentados os perfis superiores de dureza, visto que as diferentes zonas não conduziram a perfis de dureza significativamente distintos.

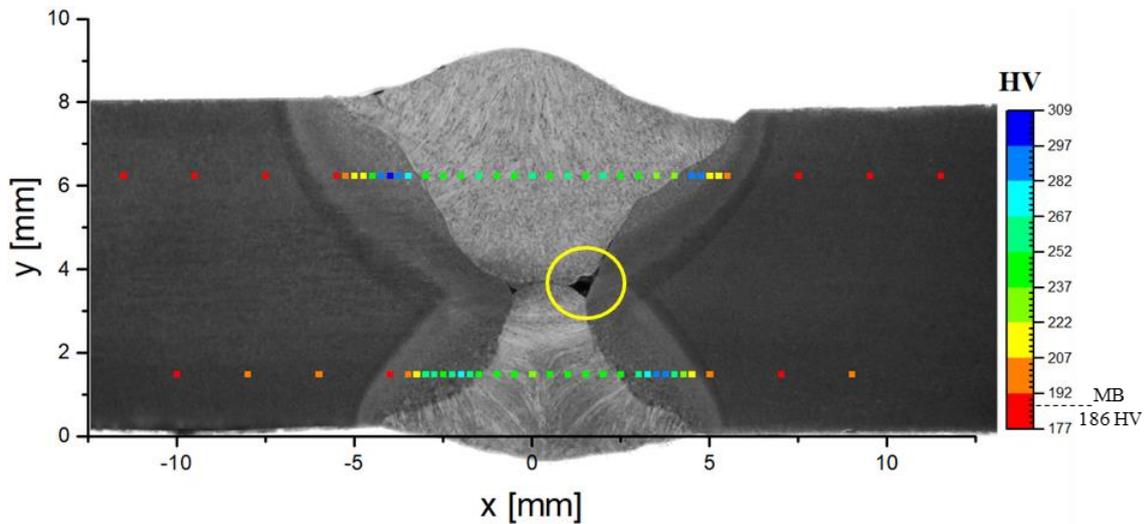


Figura 4.5. Perfil de dureza de diferentes zonas da soldadura MAG em aço S355 J2 à temperatura ambiente.

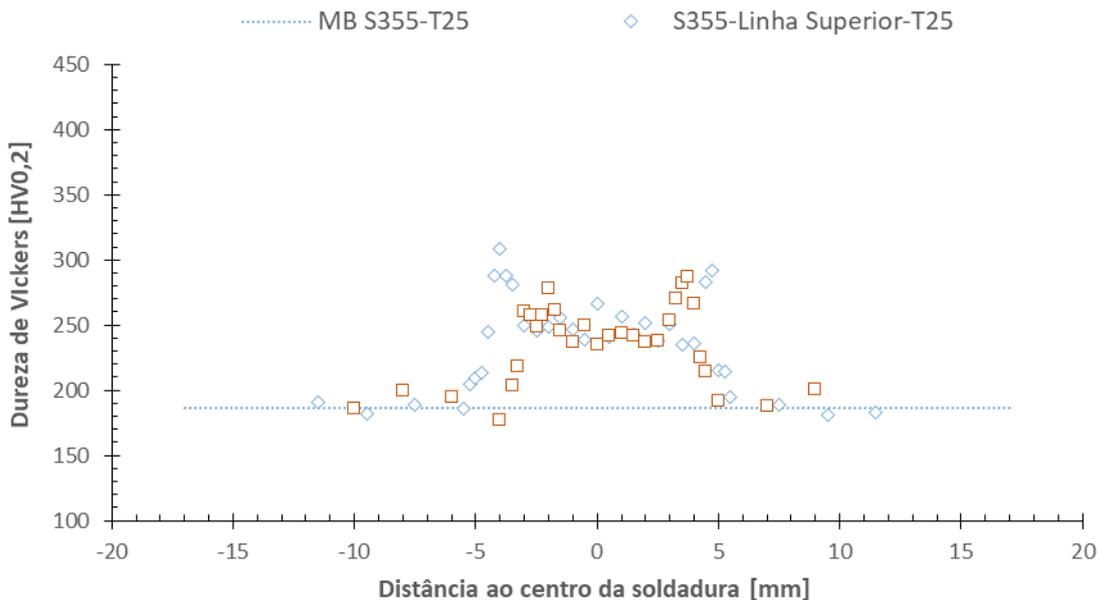


Figura 4.6. Evolução da dureza ao longo da secção transversal da soldadura MAG em aço S355 J2.

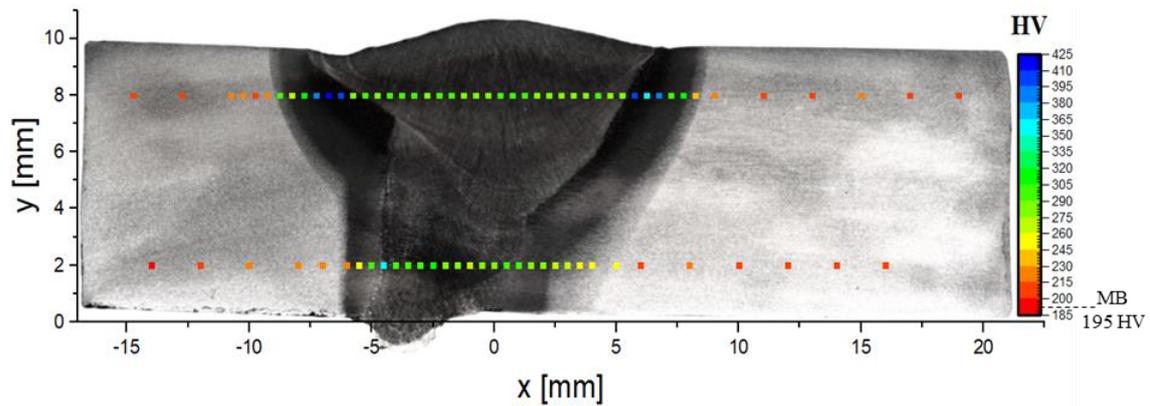


Figura 4.7. Perfil de dureza de diferentes zonas da soldadura com eletrodo revestido S460 à temperatura ambiente.

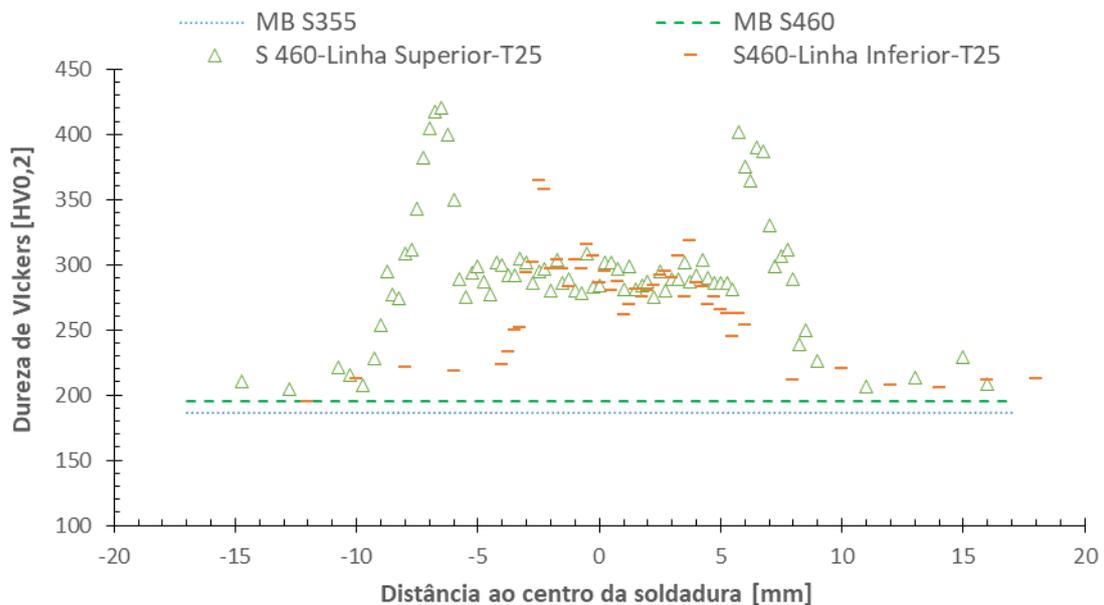


Figura 4.8. Evolução da dureza ao longo da secção transversal da soldadura com eletrodo revestido.

Relativamente à análise metalográfica, apresenta-se na Figura 4.9 a) uma macrografia da soldadura MAG produzida em aço S355 J2, onde é possível observar um defeito na zona de interface do cordão de soldadura superior e inferior, que se veio a verificar ser escória. Na Figura 4.9 b) e Figura 4.9 c) são apresentadas micrografias de zonas de transição, onde se identificam perfeitamente as diferentes zonas da soldadura. Para uma análise da microestrutura, apresentam-se na Figura 4.10, com uma ampliação superior, as microestruturas das diferentes regiões de soldadura, onde se identificam as diferentes morfologias das diferentes zonas. Na Figura 4.10 a) é observável a ZTAGG e a zona fundida (ZF), onde é possível notar um alinhamento da fase ferrítica e das fases ricas em carbonetos para o caso da zona termicamente afetada. A Figura 4.10 b), apresenta a transição da zona

do MB para a ZTAGF, onde se observa um refinamento do grão, para esta última zona. A Figura 4.10 c), apresenta, também uma transição da ZTAGG, para a zona fundida (ZF), onde mais facilmente se observa um alinhamento dendrítico da ferrite. O arranjo da microestrutura da zona termicamente afetada de grão grosseiro, pode justificar os picos de dureza referidos, validando assim a descrição feita para este caso.

De forma similar, apresenta-se uma macrografia da junta soldada por ER na Figura 4.11 a) e micrografias das diferentes zonas na Figura 4.11 b) e Figura 4.11 c). Relativamente à amostra de soldadura por MAG, as principais diferenças da soldadura por ER, manifestam-se na ZF, dado que foram utilizados consumíveis diferentes, tal como se pode notar na Figura 4.12 b). No que diz respeito às outras zonas, a ZTAGG é a que apresenta a microestrutura mais distinta, podendo também assim justificar o aumento abrupto de dureza que é descrito para este caso. Comparando esta zona, com a zona homóloga, para o caso da soldadura MAG em aço S355, Figura 4.10 c), é possível notar mais fases de cor escura, podendo indicar a presença de uma maior quantidade de fases ricas em carbonetos, validando o facto de a dureza, nesta zona, ser superior para o caso da amostra da soldadura ER em aço S460. Para a ZTAGF é possível verificar que esta, Figura 4.12 d), apresenta uma microestrutura semelhante à do material base, mas em que ocorre um refinamento de grão.

Em suma, os resultados observados aqui, parecem validar o comportamento mecânico observado neste capítulo.

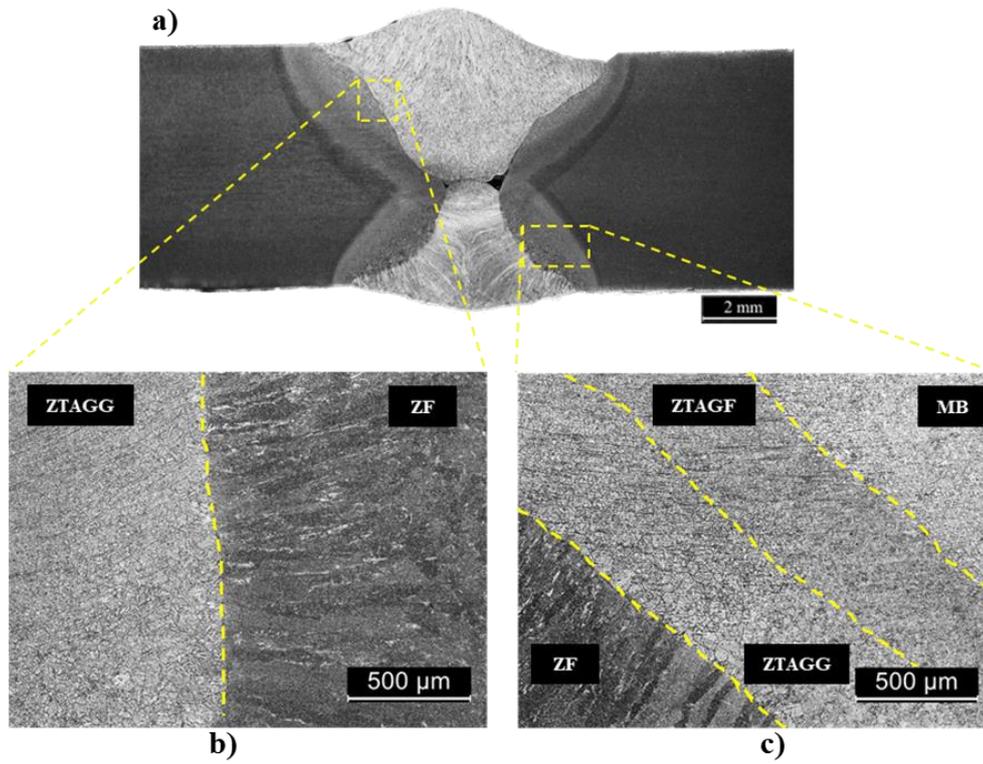


Figura 4.9. Metalografia do aço S355 soldado com o processo MAG. a) Macroestrutura da soldadura; b) Interface entre ZTAGG e ZF; c) Interface entre ZF, ZTAGG e ZTAGF (adaptado de (Jacob, 2018)).

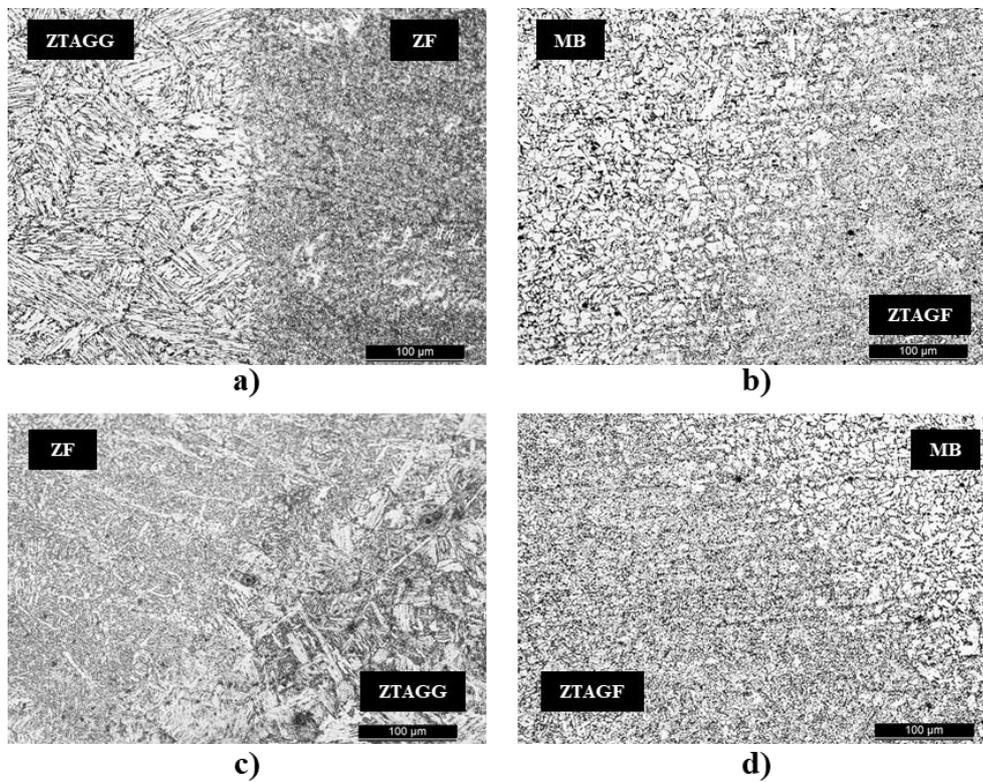


Figura 4.10. Metalografia da soldadura produzida através de MAG em aço S355 J2 sem tratamento térmico. a) Interface entre ZTAGG para ZF; b) Transição entre o MB e a ZTAGF; c) Interface entre ZF e ZTAGG; d) Transição entre a ZTAGF e o MB.

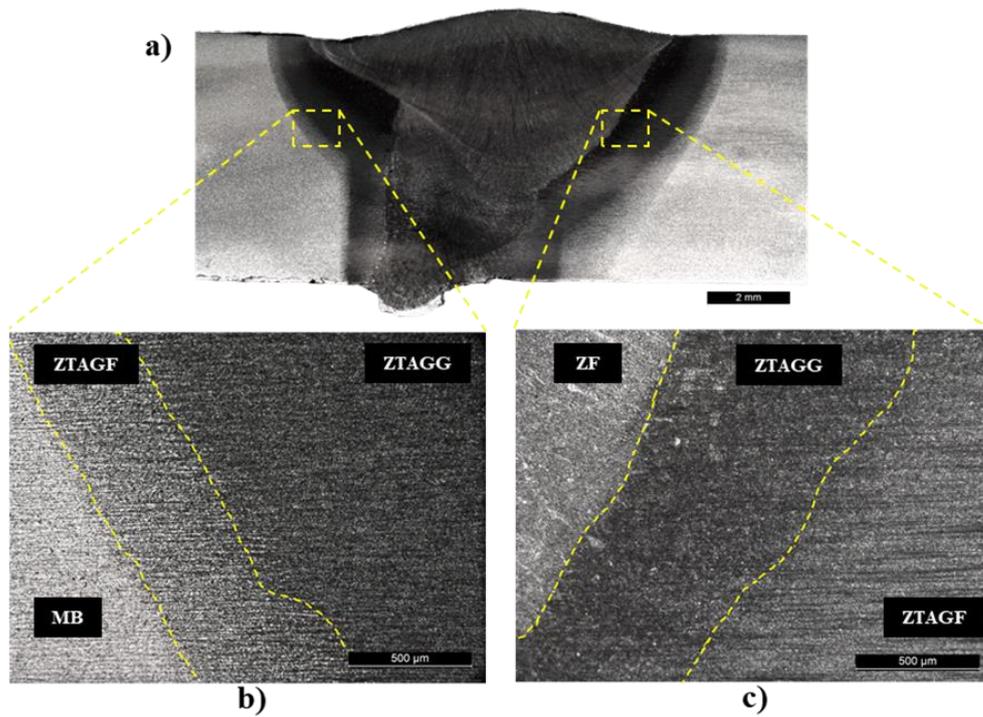


Figura 4.11. Metalografia do aço S460 soldado com eléctrodo revestido. a) Macroestrutura da soldadura; b) Interface entre MB, ZTAGG e ZTAGF; c) Interface entre ZF, ZTAGG e ZTAGF.

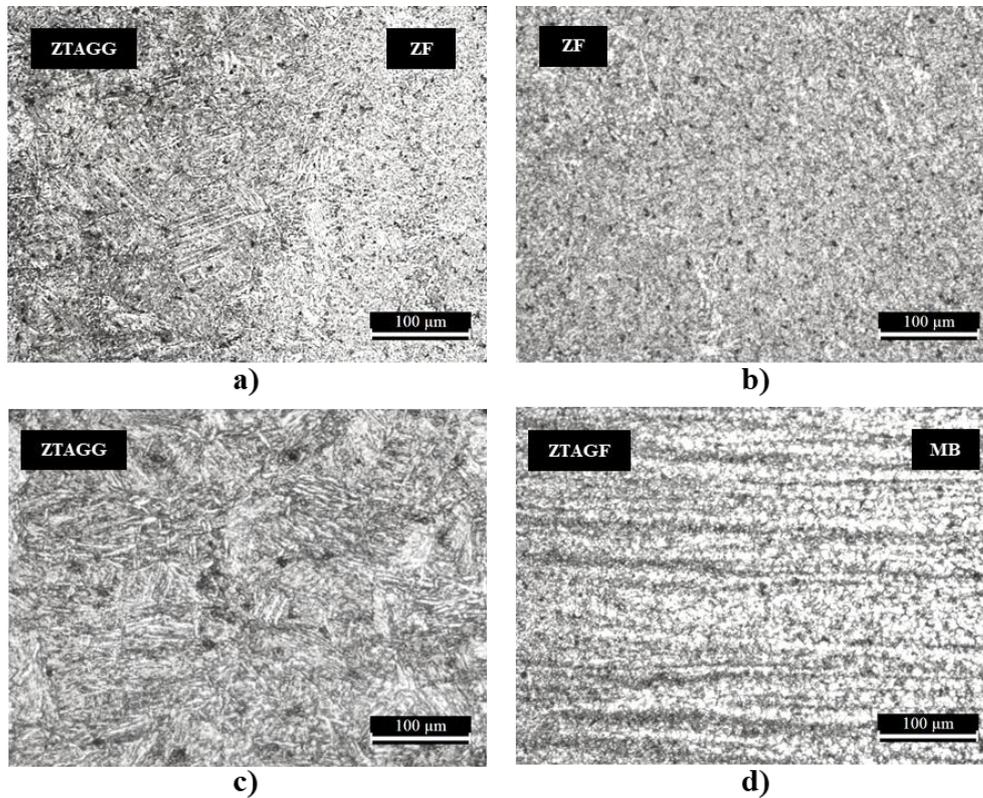


Figura 4.12. Metalografia do aço S460 soldado com eléctrodo revestido. a) Transição entre a ZTAGG e a ZF; b) Microestrutura da ZF; c) Microestrutura da ZTAGG; d) Interface entre a ZTAGF e o MB.

4.2. Comportamento Mecânico Após Fogo

Neste subcapítulo insere-se a informação referente à evolução das propriedades mecânicas após tratamento térmico, tentando aferir as principais propriedades mecânicas residuais. Para isto, mostram-se os resultados da caracterização mecânica e microestrutural de ambos os aços e respectivas soldaduras. Tal como é apresentado no capítulo do procedimento experimental, (capítulo 3), os provetes do aço S355 e S460 foram sujeitos a diferentes tratamentos térmicos.

4.2.1. Material Base

Na Figura 4.13, estão representadas as curvas tensão deformação para os dois materiais base, 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 e para o tratamento T600, facilmente se conclui que não há diferenças significativas nas propriedades mecânicas, quando comparadas com a curva nominal. O mesmo não acontece para o tratamento térmico T900, onde se observa uma queda de cerca de 31%, no que diz respeito à tensão limite elástica e 18% para a tensão máxima, para além de que esta curva apresenta um patamar de cedência, o que não acontece para o material sem tratamento térmico. Para além disto, também é observável uma diminuição significativa da ductilidade do material.

No que diz respeito ao material base do aço S460, observa-se um decréscimo de cerca de 22%, no que trata da tensão limite elasticidade a par de uma ligeira redução do patamar de cedência. Para a tensão máxima, a redução foi de cerca de 15%. Relativamente à ductilidade, o tratamento térmico não parece ter afetado, de forma significativa, o material, pois apresenta deformações semelhantes às apresentadas para o material sem tratamento térmico. As amostras à temperatura ambiente e após tratamento térmico, apresentam fraturas do tipo dúctil. O módulo de elasticidade, não expôs diferenças significativas, entre os provetes de material base sem tratamento térmico e com tratamento térmico.

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. Para

o tratamento T900, comparando os dois aços, o decréscimo da tensão limite elástica e tensão máxima foi superior para o caso do aço S355 J2.

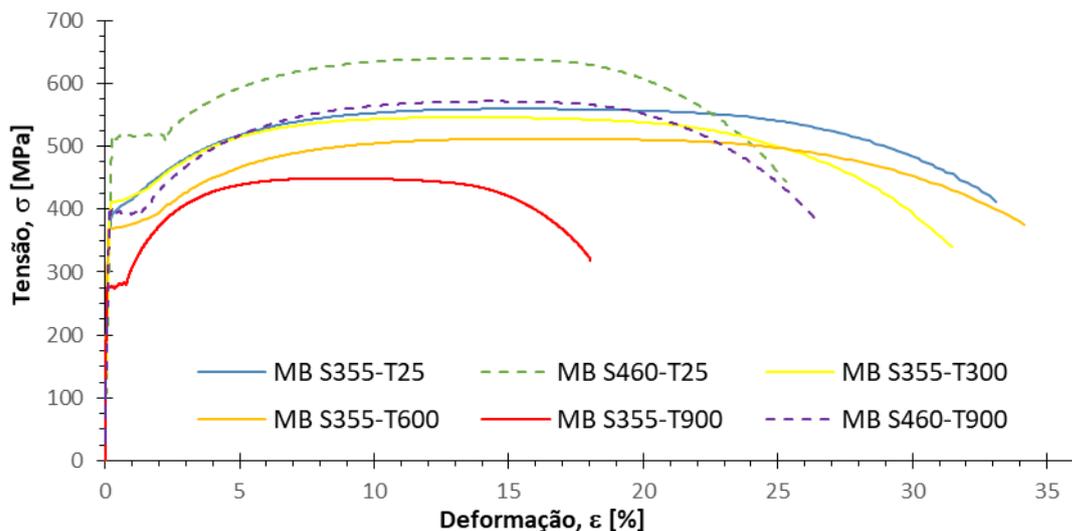


Figura 4.13. Curvas tensão-deformação de ambos os materiais base para os vários tratamentos térmicos de baixa taxa de aquecimento.

Por forma a facilitar a visualização do gráfico e para comprovar o que foi descrito, apresenta-se a Tabela 4.3. Tabela 4.3. Propriedades mecânicas dos materiais base após tratamento térmico de baixa taxa de aquecimento.

Tabela 4.3. Propriedades mecânicas dos materiais base após tratamento térmico de baixa taxa de aquecimento.

	σ_0 [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{constante}}$ [%]	ϵ_{total} [%]
MB S355-T300	412	546	13,38	31,48
MB S355-T600	367	512	18,1	34,2
MB S355-T900	276	449	8,2	18,04
MB S460-T900	396	572	14,7	26,48

À semelhança do que é apresentado na Figura 4.13, apresenta-se a Figura 4.14, mas para o caso dos ensaios de exposição direta ao fogo em forno de hidrocarbonetos, de curta duração e de longa duração, tal como descrito no procedimento experimental, (capítulo 3). Para facilitar a análise, apresenta-se também a curva que traduz o comportamento do material à temperatura ambiente. De uma análise preliminar, destaca-se o facto de os tratamentos térmicos EDF-(Curta Duração)/(Longa Duração), não apresentarem comportamentos com diferenças significativas, em termos de propriedades mecânicas.

Comparando as curvas dos tratamentos térmicos, com a curva do comportamento nominal, é possível reparar num decréscimo de cerca de 12% para a tensão limite elástica e de 9% para a tensão máxima. Destaca-se também, a presença do patamar de cedência para os materiais tratados termicamente. Fazendo uma análise no sentido da ductilidade, os tratamentos térmicos aparentam ter causado um amaciamento no aço, provocando assim um aumento da ductilidade. Para estes tratamentos térmicos, os provetes também apresentaram uma rotura no modo dúctil. Para o módulo de elasticidade, também é possível afirmar que não existiram diferenças consideráveis.

Em suma, há um decréscimo da tensão limite elasticidade e da tensão máxima, mas por outro lado, há um aumento da ductilidade do material.

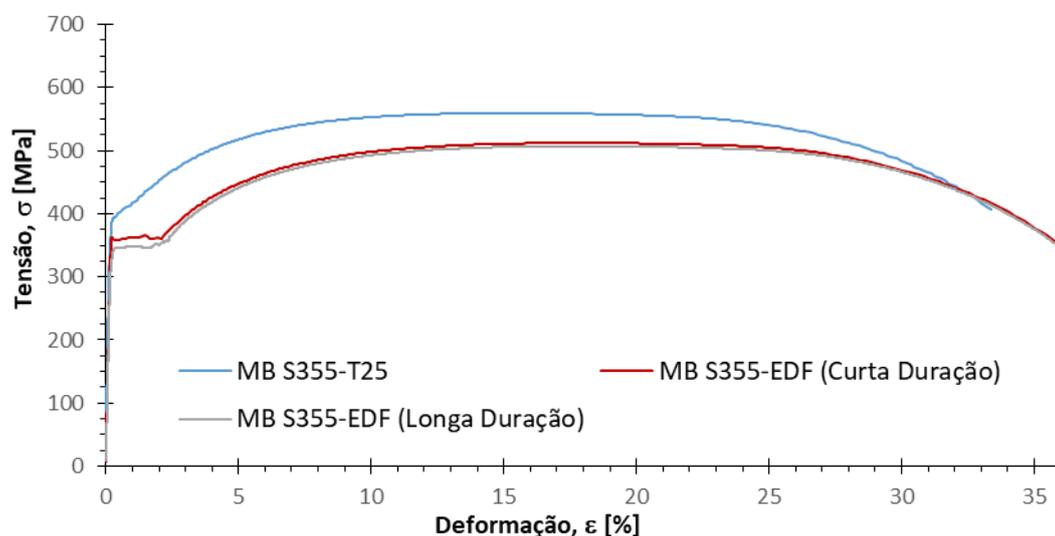


Figura 4.14. Curvas tensão-deformação do material base S355 J2 para os tratamentos térmicos de EDF.

Tal como para as análises anteriores, é apresentada a Tabela 4.4, que resume as principais propriedades do aço, após exposição a estes tratamentos térmicos.

Tabela 4.4. Propriedades mecânicas do material base S355 com tratamento térmico de EDF.

	σ_0 [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{constante}}$ [%]	ϵ_{total} [%]
MB S355-EDF (Curta Duração)	362	512	17,6	35,9
MB S355-EDF (Longa Duração)	351	510	18,2	35,97

Analisando agora a evolução microestrutural do material base S355 J2, Figura 4.15, verifica-se que as alterações mais significativas ocorrem para os ensaios que atingiram a temperatura de 900 °C, no caso, o ensaio T900 e os ensaios de exposição direta ao fogo.

Para o caso do tratamento T300 e T600, apesar de serem visíveis algumas alterações na microestrutura, a morfologia aparenta manter-se. Estas temperaturas, sendo inferiores à temperatura eutetóide, não tendo saído do domínio ferrítico perlítico, correspondem a tratamentos de recozimento de alívio de tensões, que mostra ser coerente com o que foi observado para os ensaios de tração. Para o caso dos tratamentos que atingiram os 900 °C, apesar de não ultrapassarem a temperatura de austenitização e das fases se manterem, é notável um total rearranjo da microestrutura, demonstrando uma deposição de ferrite em bandas, (fase branca), alternadas com fases ricas em carbonetos, (fase preta). Posto isto e dado que a temperatura de aquecimento e o método de arrefecimento coincidiram com a zona de “ferrite + austenite”, nos diagramas de arrefecimento contínuo para este material, é previsível que apresente menores durezas e menor tensão limite de elasticidade, estando de acordo com os resultados apresentados para estas propriedades. No que concerne ao tempo de exposição, é possível afirmar que, quanto maior o tempo de exposição ou manutenção a temperaturas elevadas, maiores são as bandas de ferrite, as fases ricas em carbonetos e também o tamanho de grão.

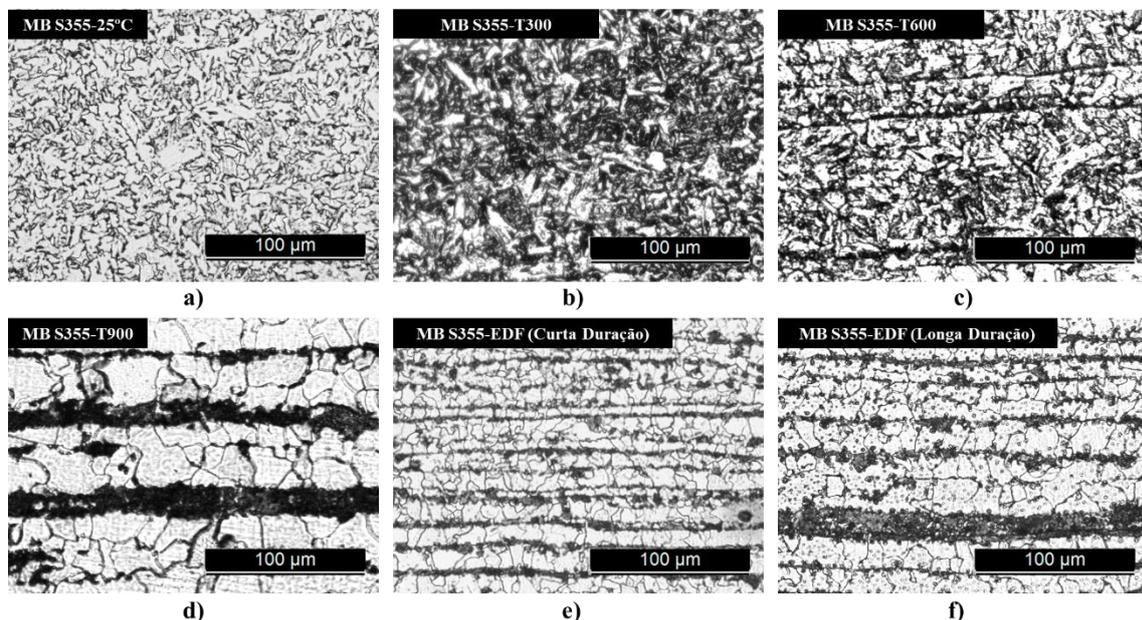


Figura 4.15. Evolução da microestrutura do material base S355 J2 com os diferentes tratamentos térmicos. Sem tratamento térmico, (a), com tratamento térmico a 300 °C, (b), a 600 °C, (c), a 900 °C, (d). Com exposição direta ao fogo de curta duração, (e), de longa duração, (f).

Analisando agora, a Figura 4.16, que corresponde ao aço S460 para o tratamento T900, é possível reparar que a microestrutura e a morfologia deste aço se mantêm, havendo apenas um crescimento das bandas de ferrite e de fases ricas em carbonetos e o inerente

crescimento de grão. Ao decréscimo da tensão limite elasticidade, verificado na Figura 4.13, pode ser atribuído este crescimento de grão. Analisando estes 2 dados, denota-se que há coerência, não se verificando nada de anormal, quando comparados. Para este aço, o aquecimento a que foi sujeito foi suficiente para se atingir o regime austenítico, em que pelo arrefecimento imposto, cruzou com o domínio da ferrite e da bainite, segundo os diagramas de transformação de arrefecimento contínuo. Deve notar-se então, que existe a possibilidade da presença de fases bainíticas nas amostras tratadas termicamente.

Será também relevante dizer que, esta deposição em bandas poderá melhorar a tenacidade à fratura, pois qualquer fenda que se inicie, poderá ter dificuldades em propagar-se ao encontrar as bandas de diferentes tipologias, no entanto é necessário um estudo mais aprofundado nesta temática.

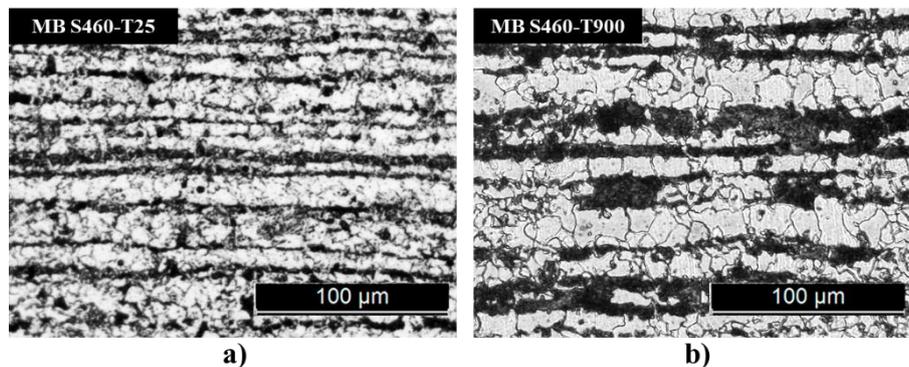


Figura 4.16. Evolução da microestrutura do material base S460 com os diferentes tratamentos térmicos. a) Sem tratamento térmico; b) Com tratamento térmico a 900 °C, (reduzida taxa de aquecimento).

4.2.2. Soldaduras

De forma análoga ao que foi feito para o material base, apresenta-se a Figura 4.17, expondo as curvas tensão-deformação para os provetes que continham soldaduras. Para além de se apresentarem as curvas caracterizadoras do comportamento do material à temperatura ambiente, apresentam-se também as curvas que descrevem o comportamento para os sucessivos tratamentos térmicos, para ambas as soldaduras. Analisando a curva referente à soldadura MAG sujeito ao tratamento T300, é possível observar que há um aumento da tensão limite elástica, aumento de cerca de 6%, e da tensão máxima, aumento de cerca de 4%, acompanhado de uma redução da ductilidade do material em 51%. Para a curva referente ao tratamento térmico T600, o material apresenta praticamente a mesma tensão limite elasticidade, quanto à tensão máxima, existe um decréscimo de cerca de 3%. Quanto à deformação total, há também um decréscimo nesta propriedade, cerca de 25%,

traduzindo-se assim numa menor ductilidade. No caso do tratamento térmico T900, não foi possível obter a curva, considerando que houve problemas na aquisição de dados. Para o aço S460, é possível observar um decréscimo acentuado da tensão limite elasticidade, (redução em 23%), e uma diminuição em cerca de 16% para a tensão máxima. É ainda observável um patamar de cedência. No que trata da deformação total, existe um aumento considerável, cerca de 150%.

Comparando os dois tipos de soldadura, percebe-se que a tensão limite elasticidade da junta soldada por ER, tratada a 900 °C, fica próxima da tensão limite elasticidade da junta soldada com MAG, tratada a 600°C, no entanto, a tensão máxima é superior para o caso da junta soldada em aço S460.

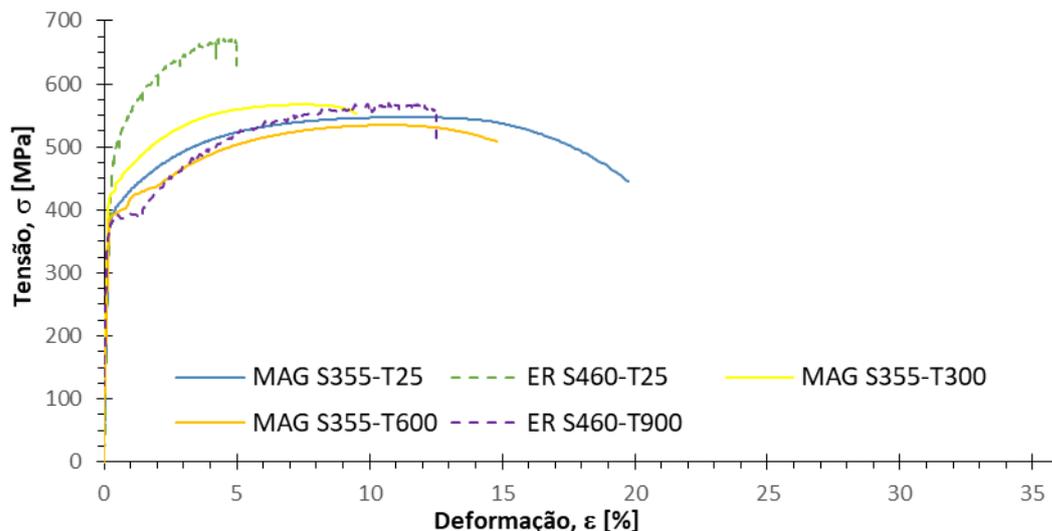


Figura 4.17. Curvas tensão-deformação para as soldaduras com MAG em aço S355 J2 e com eletrodo revestido em aço S460 para os vários tratamentos térmicos de baixa taxa de aquecimento.

A Tabela 4.5 apresenta um resumo das propriedades relevantes, para as três situações em análise.

Tabela 4.5. Propriedades mecânicas das soldaduras após tratamento térmico de baixa taxa de aquecimento.

	σ_0 [MPa]	$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{constante}}$ [%]	ϵ_{total} [%]
MAG S355-T300	422	567	7,89	9,51
MAG S355-T600	395	534	11,6	14,8
ER S460-T900	390	567	9,88	12,5

A Figura 4.18. Curvas tensão-deformação para as soldaduras com MAG em aço S355 J2 para os tratamentos térmicos de EDF. Figura 4.18, expõe os resultados referentes aos ensaios de tração após tratamento térmico de exposição direta ao fogo, tendo como referencia a curva de comportamento sem qualquer tratamento térmico para o material base e para a soldadura. Da análise da figura referida, facilmente se percebe que os provetes expostos a este tipo de ensaios, apresentam um comportamento semelhante, destacando apenas um ligeiro aumento da tensão máxima em cerca de 7%, na soldadura MAG EDF- (Longa Duração), quando comparada com a soldadura MAG EDF- (Curta Duração). É ainda possível observar um patamar de cedência com alguma relevância.

Para os ensaios de exposição direta ao fogo, a diferença temporal de exposição não parecer ter conduzido a diferenças significativas nas propriedades mecânicas, quando comparados entre si, no entanto, ambos conduziram a um decréscimo, relevante, cerca de 15%, da tensão limite de elasticidade e tensão máxima, tendo por outro lado, provocado um amaciamento do material, permitindo maiores deformações e consequentemente uma maior ductilidade.

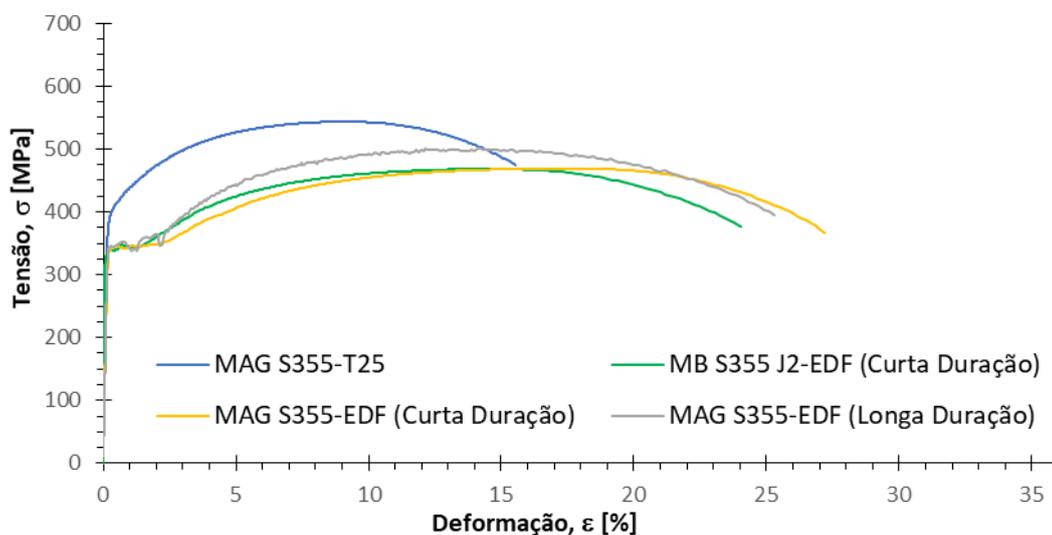


Figura 4.18. Curvas tensão-deformação para as soldaduras com MAG em aço S355 J2 para os tratamentos térmicos de EDF.

As propriedades relevantes, encontram-se sumarizadas na Figura 4.7.

Tabela 4.6. Propriedades mecânicas das soldaduras MAG S355 com tratamento térmico de exposição direta ao fogo.

	σ_0 [MPa]	$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	$\epsilon_{constante}$ [%]	ϵ_{total} [%]
MAG S355-EDF (Curta Duração)	346	469	17,2	27,2
MAG S355-EDF (Longa Duração)	339	500	12,5	25,3

Para se perceber a evolução da tensão limite elasticidade com os sucessivos tratamentos térmicos, apresenta-se a Figura 4.19.

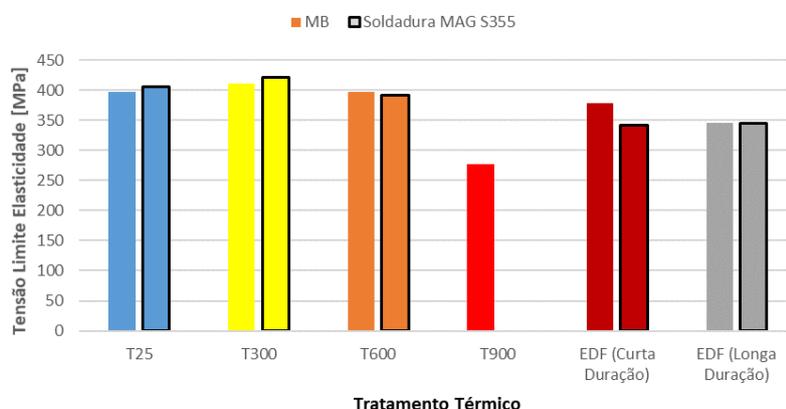


Figura 4.19. Tensão limite elasticidade para os diferentes tratamentos térmicos.

Para demonstrar que a rotura ocorreu fora da zona de soldadura, apresentam-se os mapas de deformação nos provetes soldados em aço S355, para os ensaios de exposição direta ao fogo e provetes soldados em aço S460, para o ensaio T900, Figura 4.20 a) e b) e Figura 4.20 c), respetivamente. Para os três casos, facilmente se verifica que a deformação e rotura se verificou na zona do material base.

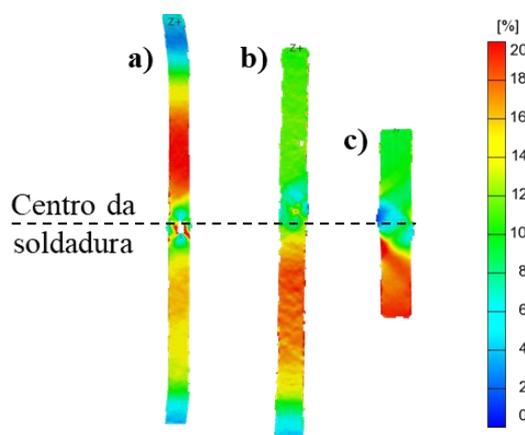


Figura 4.20. Mapas de deformação de Von Mises, no instante de carga máxima. a) Soldadura MAG em aço S355 J2 para o ensaio EDF-(Curta Duração); b) Soldadura MAG em aço S355 J2 para o ensaio EDF-(Longa Duração); c) Soldadura com elétrodo revestido em aço S460.

No que concerne à evolução da dureza, para os ensaios após fogo ou temperaturas elevadas, apresentam-se os resultados para esta propriedade. Começando pela Figura 4.21, onde se apresentam os resultados da evolução dos perfis superiores de dureza das amostras de soldadura MAG em aço S355 tratadas termicamente, com o ensaio de reduzida taxa de aquecimento. Para o tratamento T300, é possível perceber que o decréscimo não é significativo, sendo que o perfil segue praticamente o mesmo comportamento que o perfil de durezas da amostra sem tratamento, ratificando assim o que acontece para o caso do ensaio à tração para a tensão limite elástica para o mesmo tratamento térmico. Analisando o perfil de dureza para o tratamento T600, o decréscimo já é notório, principalmente para a zona termicamente afetada, onde se observa uma redução dos picos de dureza em cerca de 26%. Na zona do material base, verifica-se também uma ligeira redução. O decréscimo nos valores de dureza é mais acentuado para o caso do tratamento térmico T900, onde é possível constatar que, para além do decréscimo de dureza no material base, quando comparado com o perfil de referência, há um brutal decréscimo da dureza na zona termicamente afetada e na zona fundida, assumindo os valores de dureza equivalentes ao do material base para esse tratamento térmico. A título de exemplo, os picos de dureza da zona termicamente afetada, decrescem cerca de 200 [HV], que equivale a um decréscimo de 57%. Comparando este comportamento com os resultados do ensaio de tração obtidos para o mesmo tratamento térmico, verifica-se que os resultados são coerentes, pois, obtendo uma menor dureza foi obtida uma menor resistência à tração.

Para uma melhor caracterização do material, recorreu-se a alguns dados de um trabalho anterior, (Jacob, 2018), nomeadamente o tratamento térmico T300 e T600.

Em geral, apesar de o incremento de temperatura ser similar entre tratamentos térmicos, a maior degradação das propriedades mecânicas dá-se para temperaturas entre os 600 °C e os 900 °C.

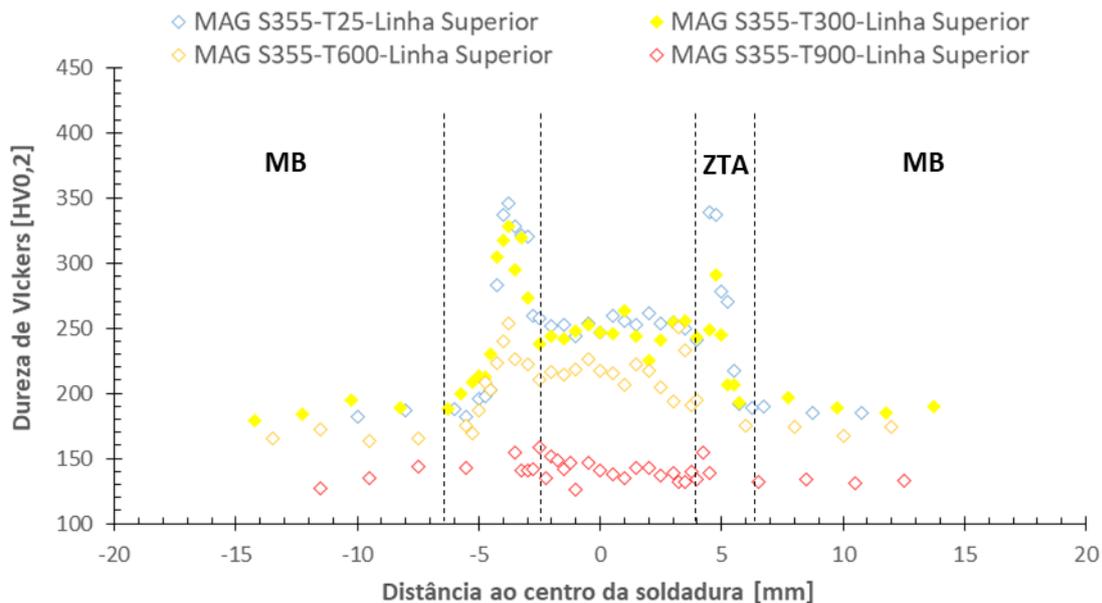


Figura 4.21. Evolução dos perfis de dureza superiores da soldadura produzida com MAG em aço S355 para os vários tratamentos térmicos de baixa taxa de aquecimento.

Estudando agora o comportamento do aço S355 J2, para os ensaios de EDF, na Figura 4.22, verifica-se que, para além da temperatura atingida, o tempo de exposição também poderá ser relevante. Para o tratamento térmico de EDF-(Curta Duração), atesta-se que provoca um decréscimo relevante nos picos de dureza da zona termicamente afetada, assumindo assim valores na ordem daqueles que se verificam na zona fundida. De um modo geral, há uma redução da dureza em toda a secção analisada, quando se faz a comparação com o perfil de dureza sem tratamento térmico. Apesar de não ser uma redução severa, parece ter sido suficiente para alterar o comportamento à tração do material. Para as mesmas condições de ensaio, mas para uma exposição mais prolongada, analisa-se a curva referente ao ensaio de EDF-(Longa Duração). Para este caso, a queda dos valores de dureza é observável e digna de referência em toda a secção da soldadura analisada. Também aqui, os valores de dureza na ZTA e na ZF, se aproximam dos valores de dureza do material base. Apesar de a temperatura atingida neste ensaio ser a mesma do ensaio T900, as condições de arrefecimento não foram as mesmas. No ensaio T900, as amostras e provetes arrefeceram dentro do forno (arrefecimento lento), no ensaio de exposição direta ao fogo, as amostras arrefeceram ao ar ambiente (arrefecimento rápido). Com esta informação, e analisando os perfis e linhas de referência, percebe-se que a degradação da dureza não foi tão severa, no caso dos ensaios de exposição direta ao fogo, como para o ensaio T900, revelando assim que

as condições de aquecimento e arrefecimento têm bastante importância na conservação ou degradação da dureza do material e das soldaduras. Valida-se esta afirmação, com a comparação dos perfis de dureza em estudo com a linha de referência S355-T900, Figura 4.22, que mostra a dureza média do perfil de dureza da amostra do ensaio T900. Comparando esta informação com aquela que foi recolhida para os ensaios de tração, verifica-se a coerência dos mesmos, validando assim o comportamento obtido para ambos os ensaios e validando assim também a importância das condições de aquecimento e arrefecimento.

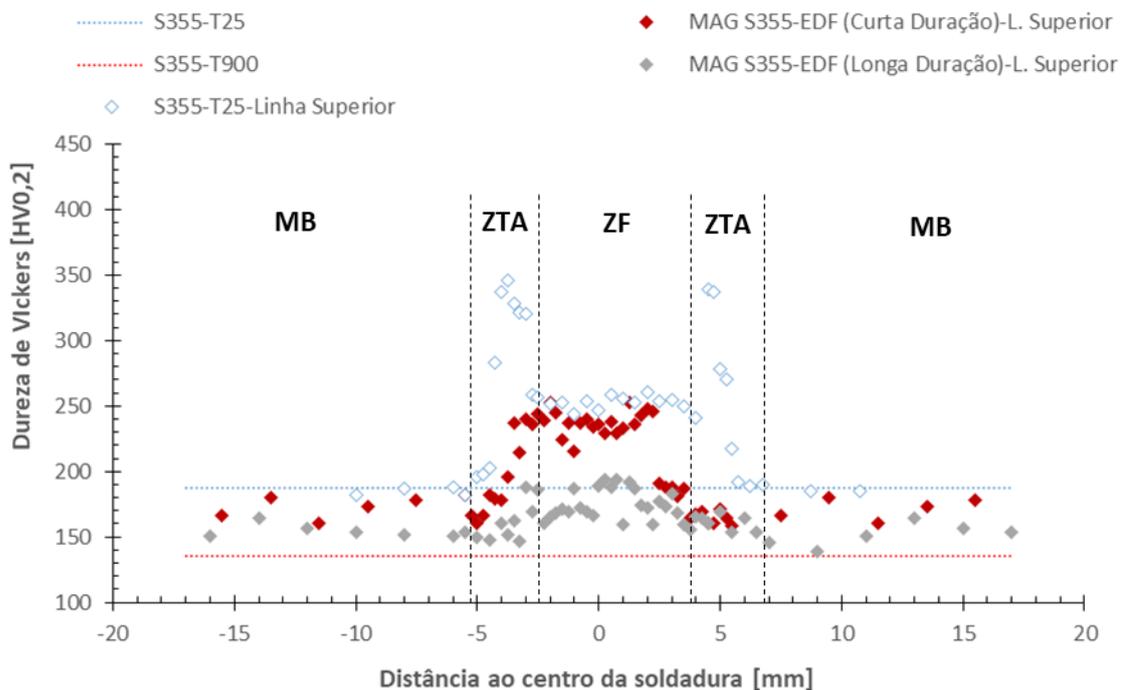


Figura 4.22. Evolução dos perfis de dureza superiores da soldadura produzida com MAG em aço S355 para os vários tratamentos térmicos de exposição direta ao fogo.

Para o caso da soldadura ER em aço S460, que se encontra representado na Figura 4.23, observa-se um comportamento semelhante ao das soldaduras MAG em aço S355 J2. Para além do decréscimo da dureza no material base, também se verifica uma diminuição da dureza em toda a secção da soldadura.

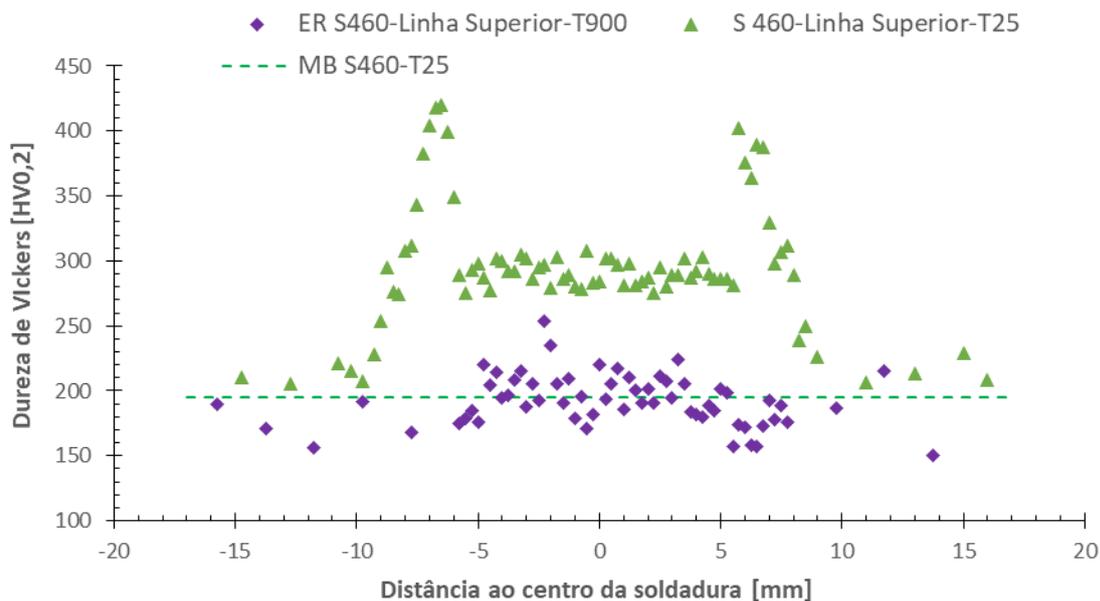


Figura 4.23. Evolução dos perfis de dureza superiores da soldadura produzida com elétrodo revestido em aço S460 para os vários tratamentos térmicos.

Embora que ainda seja possível perceber uma ligeira diferença entre os valores de dureza da zona da soldadura e a dureza do material base, estes encontram-se muito próximos denunciando assim que esta soldadura e material não se degradou tanto quanto o caso do aço S355 J2 em situação semelhante.

Para se perceber o que acontece com as soldaduras, a nível microestrutural, apresenta-se a Figura 4.24, onde é feita uma análise comparativa entre as 3 principais zonas de soldadura MAG em aço S355 J2, para os diversos tratamentos térmicos. Da mesma, retira-se que as alterações mais significativas ocorrem para os ensaios que atingiram a temperatura de 900 °C, onde é observável um aumento do tamanho de grão ferrítico, a par de uma reorganização das fases ricas em carbonetos, representadas a cor escura. Estas alterações ocorrem, tanto na ZTA como na ZF. Dado que a resistência e a tenacidade dependem do tamanho, da textura e da forma do grão, em aços ferrítico perlíticos, estas alterações microestruturais, ajudam a justificar o comportamento à tração, bem como os resultados de dureza apresentadas para as amostras expostas a temperaturas de 900 °C. Para o caso do ensaio de EDF-(Longa Duração), ressalva-se que a microestrutura da ZTAGF e a ZTAGG, tendem em adotar a microestrutura que foi verificada na Figura 4.15, no material base para o mesmo tratamento térmico, daí a aproximação dos valores de dureza que se verificou na Figura 4.21. Inerente ao decréscimo dos valores de dureza, está a alteração do valor da

resistência do material, verificado na Figura 4.18, sendo comprovado com esta análise metalográfica.

É de grande relevância referir que, o ensaio de EDF foi realizado num forno de hidrocarbonetos, (metano), existindo, deste modo, a possibilidade de ocorrer cementação das superfícies dos materiais. As propriedades típicas da cementação não se manifestam porque não foram aferidas na superfície, mas sim no interior dos provetes.

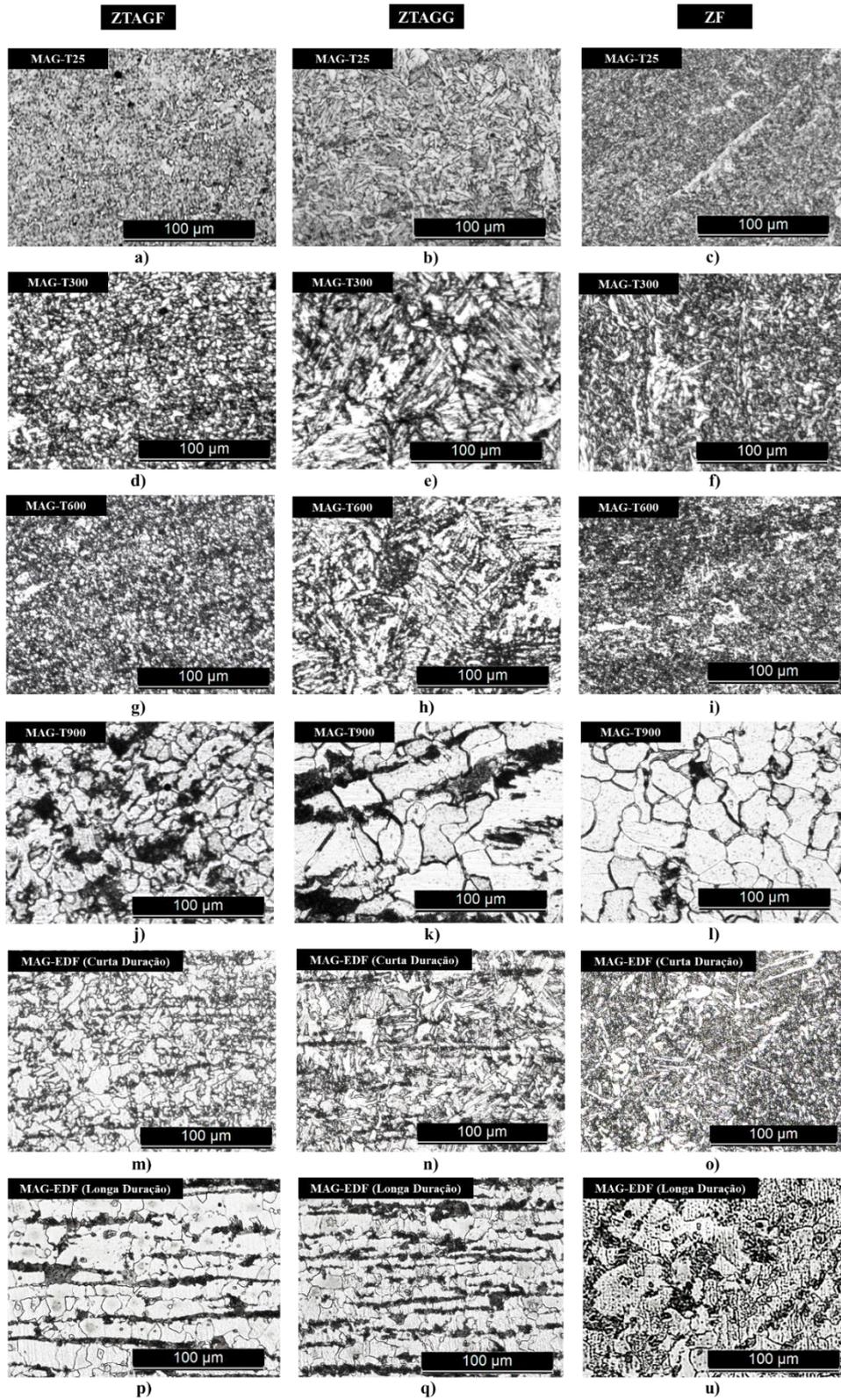


Figura 4.24. Evolução da microestrutura das soldaduras MAG fabricadas em aço S355 J2, para as 3 zonas principais da soldadura. Sem tratamento térmico, (a), (b), (c), tratamento térmico a 300 °C, (d), (e), (f), a 600 °C, (g), (h), (i), a 900 °C, (j), (k) e (l). Exposição direta ao fogo curta duração, (m), (n), (o) e exposição de longa duração, (p), (q) e (u).

De modo similar ao que foi feito para as soldaduras MAG, insere-se a análise metalográfica das soldaduras produzidas por ER em aço S460 na Figura 4.25. Olhando para a figura em questão, facilmente se obvia que houve uma reorganização da microestrutura para as três diferentes zonas, sendo o crescimento de grão comum a todas. Para além de se verificar que existe mais ferrite visível, fase representada a cor branca, há uma deposição em bandas da mesma, alternadas com fases ricas em carbonetos, fase representada a cor escura. Concluiu-se então que, a microestrutura das zonas termicamente afetadas, tende em recuperar a morfologia da microestrutura observada na Figura 4.16, associando-se a isto o decréscimo do valor da dureza para estas zonas. No que trata da zona fundida, as diferenças também são consideráveis, em que o aumento do tamanho de grão justifica também a diminuição da dureza e a degradação da resistência, quando comparadas com a temperatura ambiente.

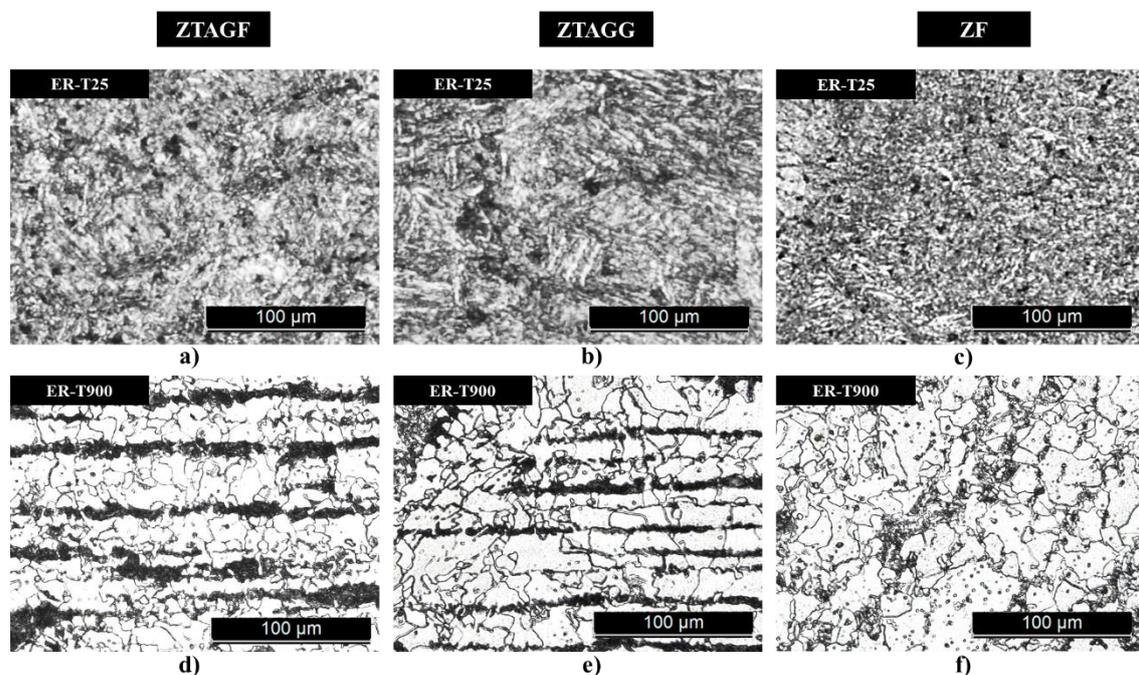


Figura 4.25. Evolução da microestrutura das soldaduras fabricadas com eléctrodo revestido em aço S460, para as 3 zonas principais da soldadura. Sem tratamento térmico, (a), (b), (c), com tratamento térmico a 900 °C, (baixa taxa de aquecimento), (d), (e) e (f).

5. CONCLUSÕES

O trabalho de investigação apresentado nesta dissertação destinou-se a fazer uma caracterização e análise do comportamento de dois tipos de soldadura, soldadura MAG em aço S355 J2 e soldadura por ER em aço S460, em situação após soldadura e em situação após fogo. Depois da exposição dos resultados e respetiva discussão, importa agora uma apresentação das principais conclusões obtidas, estando estas listada a seguir:

Comportamento Mecânico à Temperatura Ambiente

- ❖ Os dois tipos de materiais base, apresentam características microestruturais distintas, apesar de o modo de fabrico ser o mesmo e o teor em carbono ser semelhante.
- ❖ Há uma redução acentuada na ductilidade das soldaduras, quando comparados com os materiais base. Esta redução é superior para o caso da soldadura ER em aço S460.
- ❖ O aumento percentual do valor da dureza, após soldadura, é superior no caso da soldadura ER em aço S460 do que a soldadura MAG em aço S355 J2.

Comportamento Mecânico Após Fogo

Material Base

- ❖ Os ensaios de tração após fogo, revelaram que a degradação da resistência mecânica foi significativa para o tratamento térmico T900.
- ❖ O decréscimo percentual da resistência mecânica foi superior para o aço S355 J2.
- ❖ A ductilidade do aço S355 J2 sofreu uma redução acentuada depois de sujeito ao tratamento térmico T900.
- ❖ O material exposto ao tratamento térmico de EDF, apresentou uma ductilidade superior.

- ❖ A microestrutura apresentou alterações significativas para os tratamentos térmicos que atingiram os 900 °C. Estas alterações foram mais severas para o aço S355 J2.

Soldaduras

- ❖ A ductilidade das soldaduras MAG em aço S355 J2, apresentou uma redução significativa depois de expostas ao tratamento T300. Para o tratamento T600, também existe uma redução da mesma propriedade, porém, não é tão acentuada.
- ❖ A soldadura por ER em aço S460 apresenta uma redução significativa na resistência mecânica para o tratamento térmico T900.
- ❖ A soldadura por ER em aço S460 sofreu uma redução acentuada na ductilidade para o tratamento térmico T900.
- ❖ As soldaduras MAG em aço S355 J2 sujeitas ao tratamento térmico de EDF, apresentaram um aumento da ductilidade.
- ❖ As soldaduras MAG em aço S355 J2 e as soldaduras ER em aço S460, apresentaram uma redução acentuada nos valores de dureza para a ZTA e para a ZF.
- ❖ Os perfis de dureza traçados para os dois ensaios de EDF em aço S355 J2, revelaram que um maior tempo de exposição se traduz numa redução mais acentuada da dureza do material e soldadura.
- ❖ O tratamento térmico T900 provocou uma redução mais significativa dos perfis de dureza das soldaduras em aço S355 J2 do que o tratamento de EDF.
- ❖ As alterações microestruturais mais significativas foram registadas para o tratamento térmico T900, para ambas as soldaduras.

Dado que os trabalhos de investigação não têm utilidade se não conduzirem a aplicações práticas ou a informações que possam servir outros trabalhos, apresentam-se um conjunto de sugestões de medidas de proteção de pessoas e bens. Por se considerar que ultrapassa o objetivo desta dissertação, esta informação é remetida para o apêndice C.

6. SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO

O objetivo inicial deste estudo, centrava-se numa caracterização dos materiais e soldaduras em regime transiente, no entanto, devido a um problema técnico no extensómetro de alta temperatura, de grave relevância, foi necessário interromper a realização dos ensaios em regime transiente. Tendo em conta que não foi possível resolver o problema em tempo útil, optou-se por suspender esses ensaios, conduzindo este estudo para uma vertente de pós fogo, por forma a avaliar as propriedades residuais dos aços. Dada a importância da informação que se pretende recolher e tendo em conta que todo o trabalho de pesquisa e de logística para o desenvolvimento destes ensaios já foi realizado, é deixado em aberto este trabalho para que um próximo complemento o aqui apresentado.

Tendo em conta que os resultados obtidos são insuficientes para uma correta caracterização do comportamento do aço S355 J2 e das respetivas soldaduras MAG, durante a exposição a altas temperaturas, o procedimento experimental e os resultados destes ensaios são apresentados no apêndice B.

Para além disto, recomenda-se também a:

- Realização de um estudo da influência dos hidrocarbonetos nas propriedades mecânicas após fogo (realização de ensaios sujeitos às mesmas condições, mas sem exposição a hidrocarbonetos).
- Avaliação aprofundada da influência do método de aquecimento e arrefecimento da estrutura, no comportamento do material na situação após fogo, como por exemplo arrefecimento a água.
- Estudo da influência de outros parâmetros, na resistência de estruturas expostas a altas temperaturas, nomeadamente a taxa de aquecimento/arrefecimento, a geometria do elemento em estudo, a velocidade de solitação (velocidade do ensaio), etc...
- Estudar o comportamento de juntas soldadas, utilizando outros processos de soldadura.

- Continuação da realização dos ensaios transientes e num leque mais alargado de carregamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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. *Materials*, 11(4), 594. <https://doi.org/10.3390/ma11040594>

ASTM A588 / A588M-19, Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Structural Steel, up to 50 ksi [345 MPa] Minimum Yield Point, with Atmospheric Corrosion Resistance, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org

ASTM A6/A6M-17a: (2018) – General Requirements for Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes, and Sheet Piling.

AWS A5.5: E 11018-G

Chen, J., & Young, B. (2006). Stress-strain curves for stainless steel at elevated temperatures. *Engineering Structures*, 28(2), 229–239. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.07.005>

Conlon, K., Ricles, J., & Pessiki, S. (2009). Strength of Transverse Fillet Welds at Elevated and Post-elevated Temperatures. Retrieved from <https://preserve.lehigh.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1112&context=enr-civil-environmental-atlss-reports>

Dolzhenkov, I. E. (1971). The Nature Of Blue Brittleness Of Steel. 379(1), 350–379.

EN 10025:2004. European structural steel standard. Corus Construction & Industrial.

Eurocode 3 (NP EN 1993-1-1, (2010)): Design of steel structures.

Forni, D., Chiaia, B., & Cadoni, E. (2016). High strain rate response of S355 at high temperatures. *Materials and Design*, 94, 467–478. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.12.160>

Fydrych, D., Łabanowski, J., & Rogalski, G. (2013). Weldability of high strength steels in wet welding conditions. *Polish Maritime Research*, 20(2), 67–73. <https://doi.org/10.2478/pomr-2013-0018>

General Requirements for Rolled Structural Steel Bars, Plates, Shapes, and Sheet Piling. (2018).

Gunalan, S., & Mahendran, M. (2014). Experimental investigation of post-fire mechanical properties of cold-formed steels. *Thin-Walled Structures*, 84, 241–254. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2014.06.010>

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

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 643 (2019) — Steels — Micrographic determination of the apparent grain size. International Organization for Standardization.

ISO Standard 6892-1: (2016). Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature. International Organization for Standardization, 79.

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

Latham, D., & Kirby, B. (1998). *Elevated temperature behaviour of welded joints in structural steels.pdf*. Swinden.

Leitão, C., Costa, M. I., Khanijomdi, K., & Rodrigues, D. M. (2013). Assessing strength and local plastic behaviour of welds by shear testing. *Materials and Design*, 51, 968–974. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.04.100>

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 and Design*, 33(1), 69–74. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.07.009>

Li, H. T., & Young, B. (2017). Material properties of cold-formed high strength steel at elevated temperatures. *Thin-Walled Structures*, 115(115), 289–299. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.02.019>

Maraveas, C., Fasoulakis, Z. C., & Tsavdaridis, K. D. (2017). Mechanical properties of High and Very High Steel at elevated temperatures and after cooling down. *Fire Science Reviews*, 6(1), 3. <https://doi.org/10.1186/s40038-017-0017-6>

Nunes, L. B. (2003). *Construção Civil-Volume II*. Sintra.

Standard Data for Arc Welding (1975). Tables of synthetic times and consumable usage for arc welding. The Welding Institute.

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.

Outinen, J., & Mäkeläinen, P. (2002). Mechanical properties of structural steel at elevated temperatures. *Advances in Steel Structures (ICASS '02)*, II, 1103–1110. <https://doi.org/10.1016/b978-008044017-0/50129-3>

Outinen, Jyri, & Mäkeläinen, P. (1994). Transient state tensile test results of structural steel S355 (RAEX37-52) at elevated temperatures. *Rakenteiden Mekaniikka*, 28(1), 3–18. Retrieved from <https://www.semanticscholar.org/paper/TRANSIENT-STATE-TENSILE-TEST-RESULTS-OF-STRUCTURAL-Outinen-Mäkeläinen/4b579a21bd6243cf5338cbb61e7fdd88b0f71b26>

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. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2012.04.028>

Qiang, X., Bijlaard, F. S. K., & Kolstein, H. (2012a). Deterioration of mechanical properties of high strength structural steel S460N under transient state fire condition. *Materials and Design*, 40, 521–527. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.04.028>

Qiang, X., Bijlaard, F. S. K., & Kolstein, H. (2012b). Deterioration of mechanical properties of high strength structural steel S460N under transient state fire condition. *Materials and Design*, 40(40), 521–527. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.04.028>

Qiang, X., Bijlaard, F. S. K., & Kolstein, H. (2012c). Post-fire mechanical properties of high strength structural steels S460 and S690. *Engineering Structures*, 35, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.11.005>

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. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.09.002>

Qiang, X., Jiang, X., Bijlaard, F. S. K., & Kolstein, H. (2016). Mechanical properties and design recommendations of very high strength steel S960 in fire. *Engineering Structures*, 112, 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.01.008>

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., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.06.006>

São Pedro, D. S. (2018). Avaliação das propriedades mecânicas a temperaturas elevadas de aços enformados a frio Assessment of mechanical properties of cold-formed steel at elevated temperatures. Universidade de Coimbra.

Schröter, F. (2006). Trends of using high-strength steel for heavy steel structures. *Proceedings of the 11th International Conference on Metal Structures, ICMS-2006 - Progress in Steel, Composite and Aluminium Structures*, 292–293.

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. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.07.019>

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. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.12.004>

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. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1249.2016.06620>

ANEXO A-ESTADO DA ARTE

Aqui pretende-se demarcar a importância destes estudos no campo da proteção civil. Infelizmente, é recorrente a ocorrência de incêndios urbanos e industriais, no entanto ainda existe uma grande lacuna de informação no que diz respeito ao comportamento das estruturas e elementos constituintes, não só na literatura, mas também por parte dos elementos de proteção civil que ocorrem a estas situações.

Tal como referido na introdução, um dos mais importantes acidentes nesta área e um dos que mais relevância deu, nas últimas décadas, a este tema foi a queda do complexo de edifícios *World Trade Center*. Apesar de, neste subcapítulo só ser descrito este acontecimento, as observações e problemas são extensivos a tantas outras situações.

Como é do conhecimento geral, as torres daquele complexo não colapsaram de imediato com o colapso dos aviões, mas cerca de duas horas depois. O que permite afirmar que não foi o impacto direto das aeronaves que desencadeou o que se seguiu. Esta afirmação também é fundamentada por um dos relatórios preliminares, que diz que as torres ficaram bem, estruturalmente, após o impacto, no entanto o incêndio que se seguiu despoletou a cedência da estrutura ¹. Neste relatório é descrito que os incêndios enfraqueceram as vigas que suportavam os pisos causando assim o “afundamento” dos mesmos. As colunas exteriores de aço foram puxadas por este “afundamento” dos pisos, causando um encurvamento nestas, iniciando assim o conjunto de fenómenos que levaram à cedência da estrutura inteira. Este relatório referia também que foram encontradas caixas de escadas e escadas de evacuação de emergência que não estavam corretamente reforçadas para permitir a evacuação das pessoas, em segurança, que estavam a cima da zona de embate ².

Após a queda, foram levados a cabo vários estudos para se perceber o motivo da queda daquele complexo de edifícios.

¹ Sigmund, Pete (25 de setembro de 2002). «[Building a Terror-Proof Skyscraper: Experts Debate Feasibility, Options](#)». Consultado em 6 de abril de 2013

² «[Translating WTC Recommendations Into Model Building Codes](#)». National Institute of Standards and Technology. 25 de outubro de 2007. Consultado em 6 de abril de 2013. [Cópia arquivada em 10 de Março de 2011](#)

O NIST, (National Institute of Standards and Technology), investigou este acidente, por forma a perceber o motivo do desmoronamento daquela edificação, mas também quais as medidas de proteção contra incêndios estavam aplicadas no local, para que fosse possível melhorar as construções futuras, nesse campo ³ e ⁴. Os investigadores deste instituto verificaram que o dispositivo em aço que servia de proteção contra incêndios foi arrancado devido à penetração dos aviões no interior dos edifícios, especulando que, caso isso não tivesse acontecido, a estrutura podia ter resistido ⁵.

À semelhança do estudo elaborado pelos investigadores do NIST, investigadores da Universidade de Purdue, declararam que o embate do avião tinha causado um arrancamento do isolamento térmico da estrutura, tendo o calor gerado pelo incêndio em curso, causado um enfraquecimento das vigas e colunas expostas ⁶ e ⁷.

No caso de a estrutura não ter cedido, a reutilização do espaço poderia estar comprometida devido às possíveis baixas propriedades residuais dos elementos expostos ou às deformações excessivas causadas pelo impacto e pelo calor. No caso de a estrutura ter resistido, havia a necessidade de avaliar a estrutura do edifício ao pormenor para se perceber a possibilidade de reutilização do mesmo, sendo para isso necessário utilizar ou criar ferramentas adequadas.

Para além das vidas de civis que foram ceifadas nesta tragédia, foram levadas também muitas vidas de bombeiros e elementos de proteção civil que se dirigiram ao interior do edifício com o intuito de socorrer. Já para não falar dos prejuízos económicos que isto acarretou, direta e indiretamente.

Um conhecimento aprofundado sobre esta temática, aliado a ferramentas de apoio à decisão irá permitir um combate aos incêndios mais eficaz e seguro. Para além disto,

³ [«NIST's World Trade Center Investigation»](#). National Institute of Standards and Technology. U.S. Department of Commerce. 14 de dezembro de 2007. Consultado em 6 de abril de 2013

⁴ [«NIST WTC 7 Investigation Finds Building Fires Caused Collapse»](#). The National Institute of Standards and Technology. Consultado em 6 de abril de 2013

⁵ National Construction Safety Team (Setembro de 2005). «Executive Summary». [Final Report on the Collapse of the World Trade Center Towers](#). National Institute of Standards and Technology. [S.l.]: United States Department of Commerce. Consultado em 6 de abril de 2013

⁶ Irfanoglu, A.; Hoffmann, C. M. (2008). «Engineering Perspective of the Collapse of WTC-I». [American Society of Civil Engineers](#). *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 22. 62 páginas. doi:10.1061/(ASCE)0887-3828(2008)22:1(62)

⁷ Tally, Steve (12 de junho de 2007). [«Purdue creates scientifically based animation of 9/11 attack»](#). Purdue News Service. Consultado em 6 de abril de 2013

também será possível a criação de normas e procedimentos para avaliação da possibilidade de reutilização ou reciclagem de estruturas.

APÊNDICE A-PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

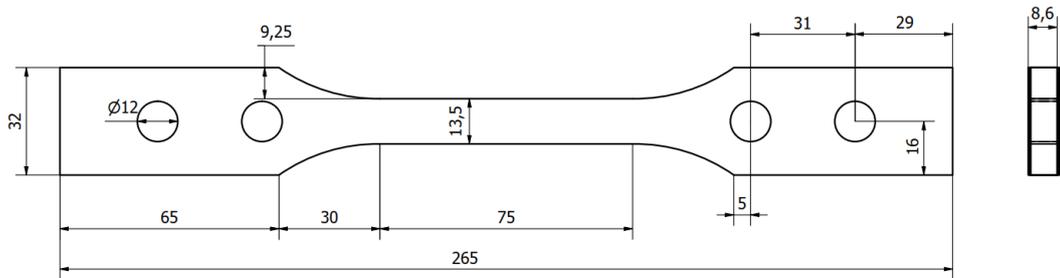


Figura AA. 1. Desenho técnico dos provetes S355 maquinados para realização dos ensaios experimentais.

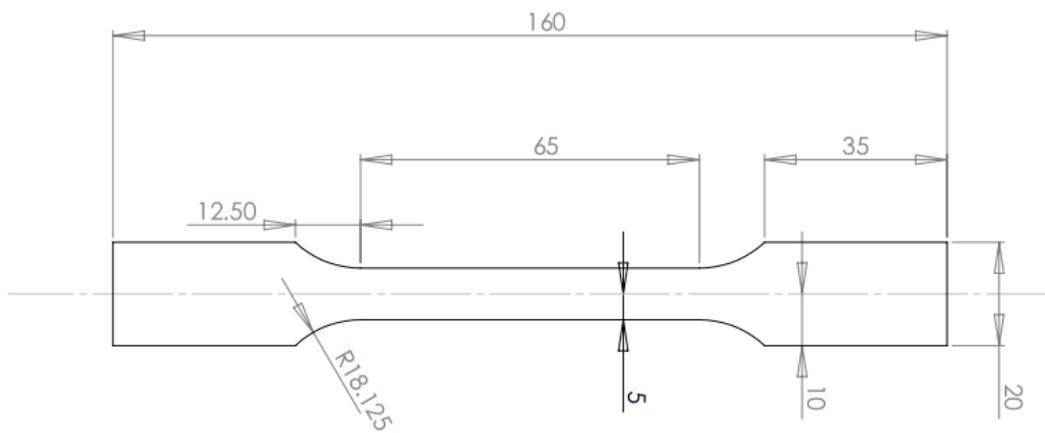


Figura AA. 2. Desenho técnico dos provetes S460 maquinados para realização dos ensaios experimentais.



Figura AA. 3. Provetes de soldadura em aço S 460.

Os provetes, Figura AA. 3, foram fabricados com as seguintes medidas: 80 mm de comprimento, 10 mm de largura e 4 mm de espessura.



Figura AA. 4. Elemento estrutural de ponte pedonal.



Figura AA. 5. Plano de pormenor elemento estrutural de ponte pedonal.

APÊNDICE B-ENSAIOS TRANSIENTES

O trabalho de caracterização mecânica, a elevadas temperaturas, levado a cabo nesta dissertação, compreendeu a realização de ensaios de tração em regime transiente, para vários níveis de carga, por forma a aproximar os ensaios de uma situação real, pois, segundo (São Pedro, 2018), os estudos já desenvolvidos para aços laminados a quente indicavam que este tipo de ensaio era aquele que traduzia com maior rigor o comportamento do aço devido às considerações mais realistas em que este tipo de ensaio se baseia.

Procedimento Experimental

Nesta secção, pretende-se apresentar de uma forma detalhada o ensaio realizado com vista ao estudo da degradação das propriedades do aço S355 J2 e respetivas soldaduras, quando expostos a temperaturas elevadas. Para o efeito, foi levada a cabo a realização de ensaios em regime transiente, com valores de carga, aplicados ao provete, de $0,1 \sigma_0$, $0,25 \sigma_0$, $0,5 \sigma_0$, $0,7 \sigma_0$ e σ_0 . Sendo que, para este material, $\sigma_0 = 400$ MPa. Para além disto, também importa especificar que os ensaios foram realizados com uma taxa de aquecimento de 15 °C/min.

Os ensaios em regime transiente foram concretizados numa máquina de tração Servosis-MCH 2000, representada na Figura AB. 1 (1). Para se efetuar a medição da extensão do provete com o decorrer do ensaio, foi usado um extensómetro de alta temperatura Epsilon Model 3548HI, apresentado na Figura AB. 1 (2) e Figura AB. 1 (2), estando este munido de duas varetas com ponteira cónica, adequadas a este tipo de procedimento. As duas ponteiras estão distanciadas $50,4$ mm entre si, tendo o extensómetro capacidade de medir deformações até $25,4$ mm, em tração. Tendo em conta a tipologia do ensaio, é necessário proteger o extensómetro das altas temperaturas, utilizando um sistema de refrigeração Epsilon Caron 2050 model, Figura AB. 1 (3). Para o aquecimento do provete, recorreu-se a um forno elétrico cilíndrico Termolab, Figura AB. 1 (4), sendo este regulado, durante o processo, por um controlador Eurotherm Controller, Figura AB. 1 (5). Na Figura AB. 2 é possível observar um plano de pormenor do equipamento utilizado.



Figura AB. 1. Plano geral do equipamento utilizado no ensaio transiente. 1) Máquina de tração Servosis-MCH 2000; 2) Extensômetro de alta temperatura Epsilon Model 3548HI; 3) Sistema de refrigeração Epsilon Caron 2050 model; 4) Forno elétrico cilíndrico Termolab; 5) Controlador Eurotherm Controller; 6) Data logger TDS 530.

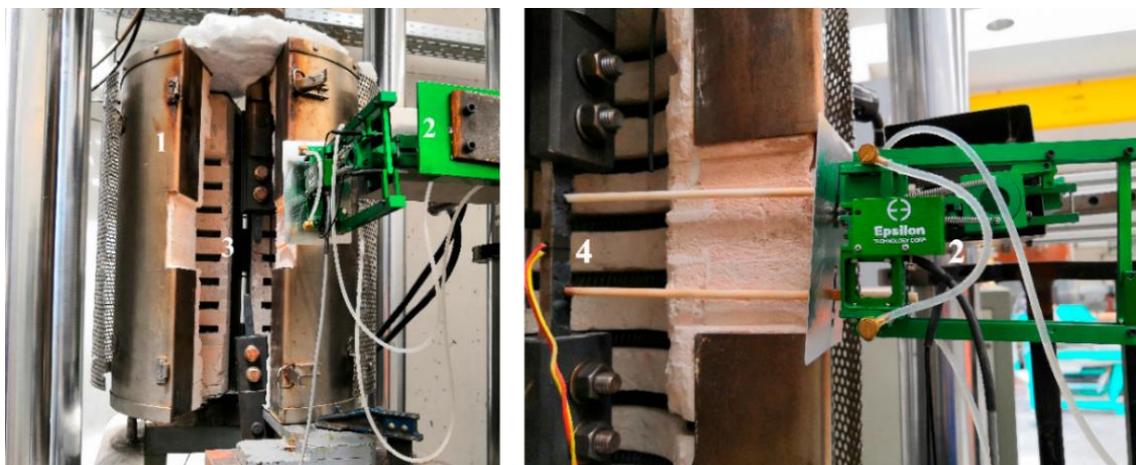


Figura AB. 2. Plano de pormenor do equipamento utilizado no ensaio transiente. 1) Forno elétrico cilíndrico Termolab; 2) Extensômetro de alta temperatura Epsilon Model 3548HI; 3) Provete fraturado; 4) Provete instrumentado pronto a ser ensaiado.

Antes de se iniciar o ensaio, foi necessário proceder à calibração do extensômetro de alta temperatura, recorrendo a um extensômetro mecânico FLA-6-11, em simultâneo, e efetuando uma comparação dos resultados obtidos pelos dois métodos, para assim se definir um coeficiente de correção. Para além disto, também foi necessário aplicar

silicone de alta temperatura, nas superfícies do provete para evitar o escorregamento das varetas.

Tendo em conta que a temperatura é um dos parâmetros fundamentais, foi instrumentado um termopar no provete e um termopar no ambiente do forno, para além dos dois termopares de controlo do forno, por forma a garantir a fiabilidade dos resultados. Este ensaio seguiu as recomendações apresentadas na norma ISO 6892-2.

Nos ensaios em regime transiente foi aplicada, previamente, uma carga de serviço definida, com uma taxa de deslocamento de 0,01 mm/s. Após a estabilização da carga, deu-se início ao aquecimento do ambiente do forno, até ocorrer a rotura do provete. Recorrendo a um Data Logger TDS 530, Figura AB. 1(6), foram registados, a cada instante, a temperatura e o deslocamento. Após tratamento da informação registada, foi possível relacionar a tensão-deformação, Figura AB. 3 (a), com a temperatura-deformação, Figura AB. 3 (b), recorrendo ao método exemplo apresentado em (J. Outinen & Mäkeläinen, 2002).

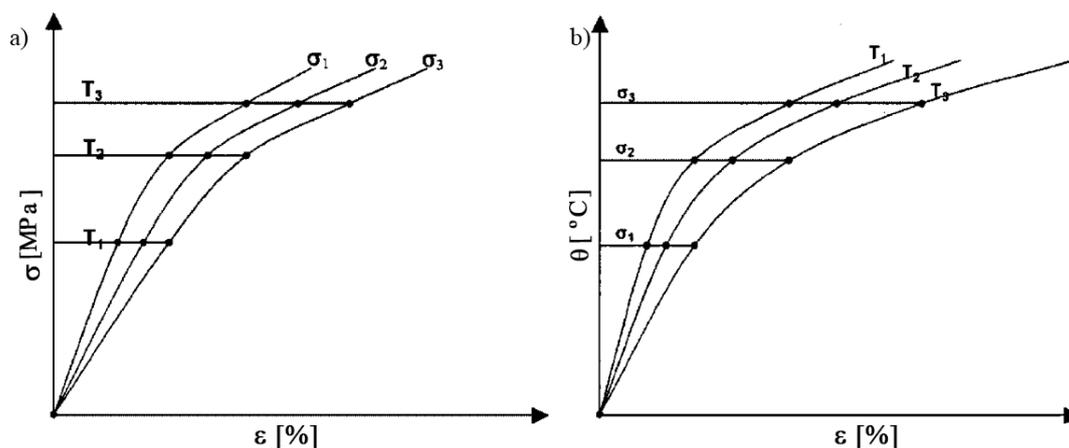


Figura AB. 3. Gráfico tipo de resultados obtidos em regime transiente. a) Tensão-Deformação; b) Temperatura-Deformação (adaptado de (J. Outinen & Mäkeläinen, 2002)).

Do gráfico da Figura AB. 3, é possível perceber que a curva tensão-deformação é tanto mais fiável quanto o número de ensaios realizados, isto é, a precisão do gráfico é diretamente proporcional à quantidade de níveis de carga utilizados.

Depois de efetuado o tratamento de dados, uma análise crítica e uma montagem dos pontos selecionados, foi construída a curva tensão-deformação, para cada temperatura, apresentando-se assim uma curva modelo na Figura AB. 4.

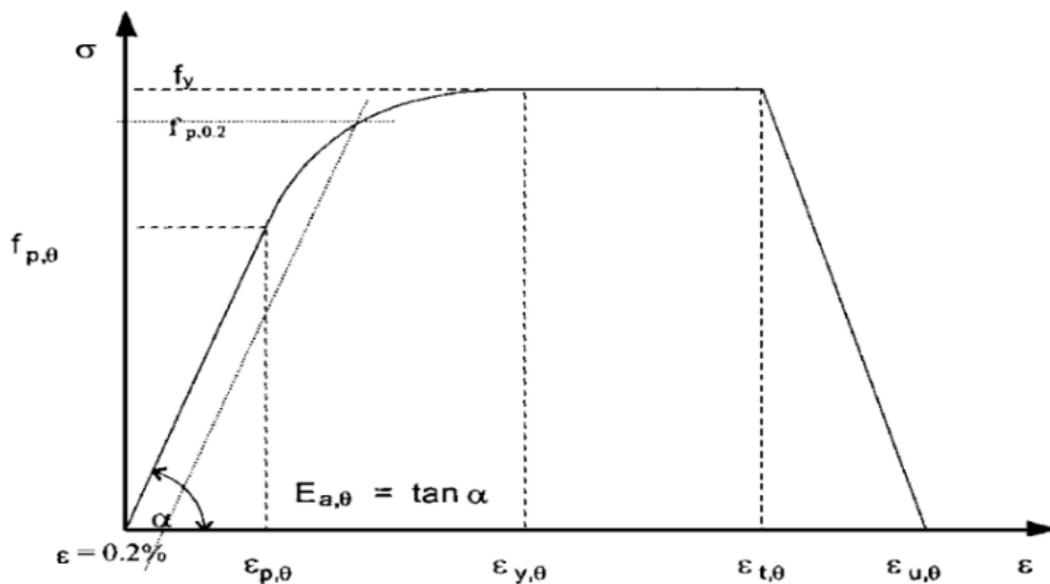


Figura AB. 4. Gráfico tensão-extensão típica de um ensaio em regime transiente (adaptado de (J. Outinen & Mäkeläinen, 2002)).

No caso dos ensaios de tração a alta temperatura, para evitar qualquer possibilidade de “escorregamento” nas garras e/ou fenômenos de rotura localizada nos provetes, foram maquinados dois furos em cada extremidade por forma a introduzir parafusos de fixação e, além disso, foram também usadas garras em aço refratário indicadas para este tipo de ensaios, Figura AB. 5.



Figura AB. 5. Garras utilizadas nos ensaios transientes.

Resultados

Na Figura AB. 6, apresentam-se os dados recolhidos. Como é possível verificar, os dados apresentados são insuficientes para se retirar conclusões satisfatórias, daí ser considerado um trabalho inacabado. De referir também, que apenas são apresentados os dados para a caracterização do material base.

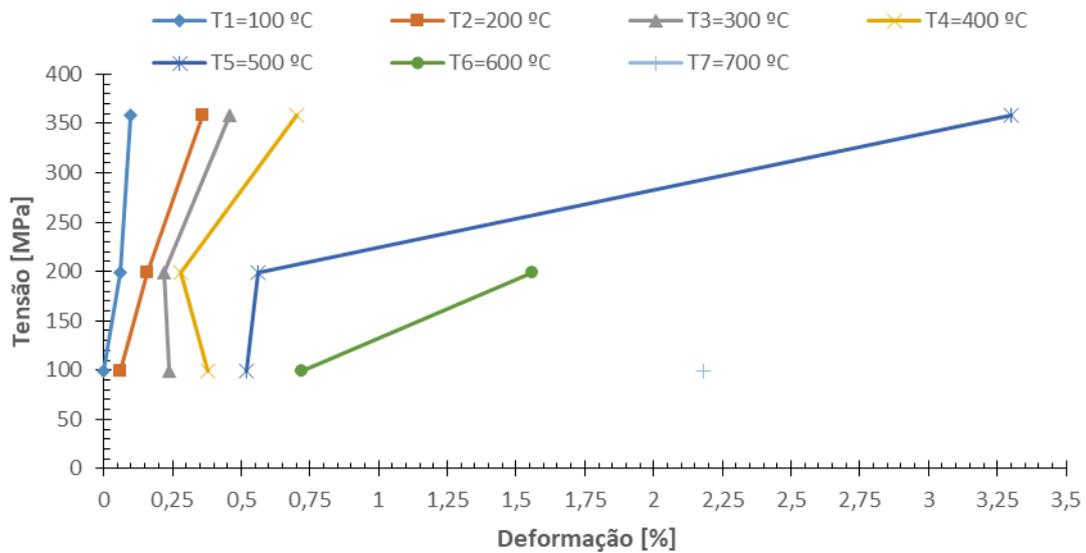


Figura AB. 6. Caracterização do comportamento do aço S355 J2 em ensaios transientes.

APÊNDICE C-CONCLUSÕES

O conjunto de propostas referido no capítulo de conclusões, encontram-se listados abaixo:

-Utilização de termopares em zonas estratégicas das estruturas, (pontos sensíveis ou de grande risco, suscetíveis de colapso ou de maior classe de importância), ligados a um sistema de aquisição e registo de dados, (dispositivo semelhante a uma caixa negra de um avião), que começa a registar a temperatura assim que seja detetado o incêndio. Este dispositivo de segurança poderá permitir às unidades de proteção civil consultar a informação registada em tempo real, por forma a que se perceba a localização e evolução do incêndio, servindo assim como ferramenta de apoio à decisão. Este equipamento poderia poupar muitas vidas, visto que iria permitir perceber a possibilidade de entrar com segurança, no edifício afetado durante e após o acidente. Após incêndio, da análise de dados e com base em informação normativa, seria possível perceber a possibilidade de reutilização de um edifício afetado por um incêndio.

-Mesmo que o edifício não colapse, não indica que a estrutura está pronta a ser reutilizada. A camada de óxido que se forma, após a exposição ao fogo/água, indica que a estrutura, no caso de reutilização ou reciclagem, precisa ser intervencionada, nomeadamente decapada e pintada de novo.

-As estruturas de edifícios que sejam consideradas de alto risco, em termos de ocorrência de incêndio, devem também ser dimensionadas ao fogo com base em temperaturas e carregamentos críticos;

-Recomenda-se também a formulação de normas e recomendações ou atualização das já existentes, para avaliação da possibilidade de reutilização de estruturas expostas a situações de incêndio.