



Análise de juntas soldadas em aços de alta resistência

ANTÓNIO JOSÉ DA ROCHA CORREIA

outubro de 2024

**Análise de juntas soldadas em aços de alta
resistência**

António José da Rocha Correia

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em
Materiais e Tecnologias de Fabrico**

Orientador: Professor Filipe Daniel Fernandes, Professor Adjunto, ISEP

Co-orientador: Professor Francisco José Gomes da Silva, Professor Coordenador, ISEP

Júri: Professor Carlos Miguel Almeida Leitão, Professor Auxiliar, Universidade de Coimbra

Presidente: Professora Rafaela Carla Barros Casais, Professor Adjunto, ISEP

Porto, Setembro de 2024

“Knowing is not enough, we must apply. Willing is not enough, we must do.”

Johann Wolfgang von Goethe

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostava de agradecer à estrutura da minha empresa Edirio Construções S.A. A filosofia de que a qualidade e melhoria do trabalho de cada um assenta no seu desenvolvimento técnico e pessoal foi-me sempre passada no dia a dia. O constante incentivo a formação profissional dos técnicos foi uma das principais razões que me levaram a embarcar no desafio que é o Mestrado em Engenharia Mecânica do ISEP, que culmina com a realização desta dissertação. Durante todo o percurso, os meus colegas demonstraram disponibilidade, flexibilidade e apoio que foram importantes para a concretização deste objetivo. Adicionalmente foram ainda mobilizados recursos por parte da empresa para realização da soldadura dos provetes TIG que foram utilizados neste trabalho.

Por tudo isto e mais, um muito obrigado a todos.

Agradeço também ao Engenheiro Carlos Rafael, chefe de serviço de ferramentaria da KIRCHHOFF Automotive Portugal S.A, pelo fornecimento das chapas que constituíram o material base para o estudo

Agradeço ainda ao Engenheiro Rui Manuel fazenda da Silva diretor geral da empresa Gislótica – Projeto e Fabrico de soluções Mecânicas, Lda, pelo corte das chapas.

Adicionalmente, agradeço ao Professor Arnaldo Pinto pela ajuda na disponibilização dos meios do laboratório de ensaios de materiais.

Por fim gostava de agradecer ao meu orientador desta dissertação, Professor Filipe Fernandes, pela ajuda e disponibilidade no desenvolvimento deste trabalho e por ter aceite a minha proposta de tema, que está muito próximo daquilo que é o meu trabalho no dia a dia e que me permitiu melhorar como técnico na minha área de atuação.

Resumo

A utilização de aços na produção de estruturas metálicas e equipamentos, é algo profundamente entranhado na indústria dos dias de hoje. Por consequência, um dos principais processos de união destes materiais, se não mesmo o mais utilizado, é a soldadura.

A utilização de aços de alta resistência (muito usados na indústria automível) permite uma maior abrangência e capacidade de aplicações. No entanto, com o desenvolvimento de novos materiais, surgem questões relativamente à sua resposta ao processo de soldadura que necessitam de ser respondidas. É extremamente importante entender de que forma cada material responde à soldadura e avaliar as propriedades das juntas soldadas para que estas possam ser utilizados na indústria com segurança e confiança.

É sabido que a aplicação de temperaturas elevadas em aços tem um forte efeito nas suas propriedades mecânicas e consequentemente comportamento. A soldadura é um processo extremamente agressivo para o material, uma vez que os ciclos de aquecimento e arrefecimento são muito rápidos. Deste modo considerou-se importante avaliar a influência de parâmetros de soldadura selecionados, nas propriedades de juntas soldadas de chapas de alta resistência usadas na indústria automível. Mais especificamente, estudou-se a variação a intensidade de corrente de soldadura nas propriedades das juntas soldadas.

A variação da intensidade de corrente, tem naturalmente uma consequência na quantidade de calor que é induzida às juntas durante a soldadura, e assim é natural concluir que existe uma relação entre a sua variação e as propriedades do aço.

Para levar este estudo a cabo, foram executadas soldaduras com três intensidades de corrente diferentes usando os processos TIG e soldadura por resistência na variante de pontos.

De seguida foram executados ensaios mecânicos aos vários provetes realizados de forma a entender as diferentes respostas do material.

Adicionalmente foram feitas análises macrográficas e micrográficas e de dureza, relacionando a resposta mecânica dos materiais com as alterações provocadas na microestrutura.

Foi constatado, para os dois processos, a clara influência da variação da intensidade na ductilidade do aço, sendo que quanto mais elevado este parâmetro, mais dúctil se mostrou o material. Essa tendência foi acompanhada por uma diminuição dos valores máximos de dureza.

Para o caso dos provetes de soldadura por resistência verificou-se também um aumento da resistência ao corte e arrancamento com o aumento da intensidade de corrente. Foi possível constatar que com intensidades de corrente maiores a quantidade de material fundido aumentava criando uma maior área resistente para a junta.

Por fim, as análises de microestrutura, permitiram distinguir as diferentes zonas da soldadura, onde se verificou o aparecimento de martensite na zona termicamente afetada das soldaduras, estruturas dendríticas nas zonas fundidas e um crescimento de grão na aproximação à ZTA.

PALAVRAS-CHAVE: Aços de alta resistência; Soldadura; TIG; Soldadura por Resistência

Abstract

The use of steel in the manufacture of metallic structures and equipments, is something that is profoundly rooted in today's industry. By consequence, welding is one of the main processes used to join the different parts of each structure.

The use of more complex steels (widely used in the automotive industry), allows us to have a broader spectrum of applications. However, with the development of new materials, it is natural that new questions arrive considering their reactions when submitted to the different welding processes. It is extremely important to understand the way how each material reacts to welding, so that they can be safely used with security and confidence.

It is known that the influence of temperature in steels has great and preponderance effect on the mechanical characteristics of the steels and consequent behavior. Welding is an extremely aggressive process to the material, due to the rapid cycles of heating and cooling. With that in mind, it is considered important to evaluate the variation of selected welding parameters that might have influence in the properties of high strength steels used in the automotive industry. More specifically, the intensity of the welding current, which will be the focus of the study.

The variation of the welding current, is, naturally, one of the deciding factors that influence the amount of heat induced in welded joints, so it is fair to conclude that there is a relationship between its variation and the properties of the steel.

With that in mind, three different current values were changed for the welds produced by TIG and resistance spot welding.

Several mechanical tests were conducted to understand the influence of the current variation on the different material responses/properties.

Additionally, several macrographic and micrographic analyses were made, to relate the mechanical responses to the alterations in the material microstructures.

It was possible to see, for both processes, the clear influence of the variation of the welding current in the ductility of the steel. The higher this parameter is, the more ductility the material is. This tendency was accompanied by a decrease of the maximum value of hardness.

Regarding the specimens produced by resistance spot welding, it was observed that the shear resistance and peeling tests rose when the welding current increase as well. For higher intensities, there was a bigger amount of fused material which in turn formed a bigger area of resistance.

Finally, from the microstructural results, it was possible to see a clear distinction between the various areas of the weld, with the appearance of martensite in the heat affected zones, dendritic structures in the fused areas, and grain growth in the steel vicinity of the heat affect zone with the base material.

KEYWORDS: HSS: High Strength Steel, Welding, TIG, Resistance spot welding

Índice

Lista de Figuras.....	xiv
Lista de Tabelas.....	xvii
Acrónimos e Símbolos.....	xix
1. Introdução.....	1
1.1. Contextualização.....	1
1.2. Objetivos do relatório.....	2
1.3. Metodologia.....	2
1.4. Estrutura do relatório.....	3
2. Revisão Bibliográfica.....	5
2.1. Aços de alta resistência.....	5
2.1.1. Ligas Fe-C.....	5
2.1.2. Aços de alta resistência temperados - Martensíticos.....	6
2.1.3. Aços de alta resistência de grão fino (HSLA).....	7
2.1.4. Aços de alta resistência avançados (AHSS).....	8
2.2. Aplicações para aços de alta resistência.....	11
2.2.1. Aplicações estruturais.....	11
2.2.2. Aplicações na indústria automóvel.....	14
2.3. Processos de soldadura.....	15
2.3.1. Classificação dos processos de soldadura.....	15
2.3.2. Soldadura por arco elétrico.....	16
2.3.3. Soldadura MIG/MAG.....	18
2.3.4. Soldadura por eletrodo revestido.....	19
2.3.5. Soldadura TIG.....	20
2.3.6. Soldadura por arco submerso.....	21
2.3.7. Soldadura por resistência - Pontos.....	22
2.4. Variáveis essenciais da soldadura.....	23
2.4.1. Carbono equivalente.....	23
2.4.2. Entrega térmica.....	24
2.5. Soldadura de aços de alta resistência.....	25
2.5.1. Soldadura de aços de grão fino.....	25
2.5.2. Soldadura de aços temperados.....	26
3. Procedimento experimental.....	30
3.1.1. Material de base.....	30
3.2. Soldadura TIG.....	30
3.2.1. Registo de parâmetros de soldadura.....	31
3.2.2. Extração de provetes.....	33

3.2.3. Descrição dos ensaios realizados	34
3.3. Soldadura por resistência - Pontos	38
3.3.1. Registo de parâmetros de soldadura	38
3.3.2. Descrição dos ensaios realizados	39
4. Resultados e Discussão	44
4.1. Soldadura TIG	44
4.1.1. Ensaio de tração	44
4.1.2. Dureza e microestrutura das juntas soldadas - TIG	48
4.2. Soldadura de resistência - pontos	56
4.2.1. Ensaio de corte por tração	56
4.2.2. Ensaio de arrancamento	58
4.2.3. Dureza e microestrutura das juntas soldadas - Resistência	60
5. Conclusão	68
5.1. Conclusões finais	68
5.2. Propostas de trabalhos futuros	69
Referências	72
Declaração de Integridade	74

Lista de Figuras

Figura 1 - Diagrama de fases Fe-C [adaptado de [2]].....	5
Figura 2 - Arrefecimento dos aços hipoeutectóides [3].....	6
Figura 3 - Formação do corpo TCC entre a austenite CFC [4]	7
Figura 4 - a) Efeito de elementos de liga micro-ligantes no tamanho do grão ferrítico; b) efeito de elementos de liga micro-ligantes na tensão de cedência [adaptada de [5]]	8
Figura 5 - Diagrama com a representação dos aços de elevada resistência [8]	11
Figura 6 - Curvas Tensão/Extensão dos vários aços [9]	12
Figura 7 - Ponte Akashi Kaikyo [11].....	13
Figura 8 – Estrutura de um chassis	15
Figura 9 - Processos de soldadura metais [adaptado de [13]].....	16
Figura 10 - Soldadura MIG/MAG [16]	17
Figura 11 - Ionização e dissociação [17].....	17
Figura 12 - Equipamento de soldadura MIG/MAG [16].....	18
Figura 13 - Esquema de soldadura eletrodo revestido [19].....	19
Figura 14 - Esquema soldadura TIG [20]	20
Figura 15 - Esquema soldadura arco submerso [21].....	21
Figura 16 - Esquema soldadura por pontos [14].....	22
Figura 17 – Variação da microestrutura numa junta soldada de aço temperado [26].....	27
Figura 18 - Fator de forma [27]	28
Figura 19 - Fissuração a frio	29
Figura 20 – Soldadura 100 Amperes	31
Figura 21 – Soldadura 110 Amperes	32
Figura 22 – Soldadura 125 Amperes	32
Figura 23 – Esquema para extração de provetes.....	33
Figura 24 - Provede de tração TIG	34
Figura 25 - Equipamento de ensaio de tração	35
Figura 26 - Amostras macrografia, micrografia e durezas	36
Figura 27 - Lixagem das amostras.....	37
Figura 28 - Ensaio de durezas.....	37
Figura 29 - Provede tração resistência	39
Figura 30 - Ensaio de corte por tração	40
Figura 31 - Provede ensaio de arrancamento.....	41
Figura 32 - Ensaio de arrancamento	42
Figura 33 – Curva tensão deformação da soldadura TIG realizada com 100 A	46
Figura 34 – Curva tensão deformação da soldadura TIG realizada com 110 A	47
Figura 35 - Curva tensão deformação da soldadura TIG realizada com 125 A	47
Figura 36 - Perfis de durezas TIG.....	49
Figura 37 - Provede TIG 125A - Macro e Micro.....	50
Figura 38 - Perfil de durezas TIG 125A.....	51
Figura 39 - Provede TIG 110A - Macro e Micro.....	52
Figura 40 - Perfil de durezas TIG 110A.....	52

Figura 41 - Provete TIG 100A - Macro e Micro.....	53
Figura 42 - Perfil de durezas TIG 100A.....	53
Figura 43 - Presença de Martensite na zona termicamente afetada (retirada do provete TIG 125A – Ampliação 20x)	54
Figura 44 - Provete TIG 125A - Micro cordão de soldadura (Ampliação 10x).....	54
Figura 45 - Crescimento do grão na passagem do material base para ZTA (retirado do provete de 100A – Ampliação 20x)	55
Figura 46 - Provete TIG 125A - Micro material base (Ampliação 20x).....	55
Figura 47 – Exemplo de provetes usados nos testes de corte para as várias intensidades de corrente: 50A, 72A, 95A.....	57
Figura 48 - Rotura de provete pela chapa.....	57
Figura 49 - Ensaio de arrancamento – Soldaduras de 50 Amperes	58
Figura 50 - Ensaio de arrancamento – Soldaduras de 72 Amperes	59
Figura 51 - Ensaio de arrancamento – Soldaduras de 95 Amperes	59
Figura 52 - Perfis de dureza das várias soldaduras executadas por resistência	61
Figura 53 - Provete Resistência 50A - Macro e Micro	62
Figura 54 - Perfil de durezas – Resistência 50A	62
Figura 55 - Provete Resistência 72A - Macro e Micro	63
Figura 56 - Perfil de durezas - Resistência 72A	63
Figura 57 - Provete Resistência 95A - Macro e Micro	64
Figura 58 - Perfil de durezas - Resistência 95A	64
Figura 59 –Material base típico das soldaduras de resistência (retirada do provete 50A – Ampliação 20x).....	65
Figura 60 - Crescimento de grão nas soldaduras de resistência (retirada do provete 50A – Ampliação 5x).....	65
Figura 61 - Aparecimento de martensite na zona linha de fusão (retirada do provete 95A – Ampliação 5x).....	66
Figura 62 - Estrutura dendrítica característica das zonas de fusão (retirada do provete 72A – Ampliação 5x).....	66

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Comparação dos aços TRIP com outros tipos de aços [8]	9
Tabela 2 - Soldabilidade em relação ao carbono equivalente	24
Tabela 3 – Propriedades Mecânicas do aço CRDP 800	30
Tabela 4 - Parâmetros soldadura 100 A	31
Tabela 5 - Parâmetros soldadura 110 A	32
Tabela 6 - Parâmetros soldadura 125 A	32
Tabela 7 - Medições iniciais, ensaio de tração	36
Tabela 8 – Parâmetros de soldadura por pontos	38
Tabela 9 – Resultados ensaios de tração	45
Tabela 10 - Média dos resultados do ensaio de tração	45
Tabela 11 - Modulo de resiliência e tenacidade	48
Tabela 12 - Resultados ensaio de dureza - TIG	48
Tabela 13 - Resultados ensaio de corte por tração - Resistência	56
Tabela 14 – Resultados ensaio de arrancamento - Resistência	58
Tabela 15 - Resultados ensaios de dureza - Resistência	60

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
CFC	Cubica de Faces Centradas
TCC	Tetragonal de Corpo Centrado
CCC	Cubica de Corpo Centrado
HSS	<i>High Strength Steel</i>
HSLA	<i>High-Strength low-alloy</i>
TMP	<i>Thermomechanical Processing</i>
AHSS	<i>Advanced High Strength Steel</i>
DP	<i>Dual Phase</i>
CP	<i>Complex Phase</i>
TRIP	<i>Transformation Induced Plasticity</i>
ZTA	Zona termicamente afetada
CS	Cordão de Soldadura
MB	Material Base
ZF	Zona de fusão
EI	Energia de Ionização
ED	Energia de Dissociação
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
CE	Carbono Equivalente

Lista de Símbolos

S	Enxofre (Símbolo Químico)
Pb	Chumbo (Símbolo Químico)
γ	Austenite
α	Ferrite
Fe ₃ C	Cementite
Nb	Nióbio (Símbolo Químico)
V	Vanádio (Símbolo Químico)
T	Titânio (Símbolo Químico)
Mn	Manganês (Símbolo Químico)

Cu	Cobre (Símbolo Químico)
Ni	Níquel (Símbolo Químico)
Cr	Crómio
Mo	Molibdénio
σ_r	Tensão de rotura
$\sigma_{0,2\%}$	Tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%
E	Módulo de Elasticidade longitudinal / Módulo de Young
A	Alongamento após rotura
Z	Estricção

1. Introdução

1.1. Contextualização

Nos dias de hoje a soldadura é o processo de união mais utilizado na indústria dos materiais metálicos. Pode ser enquadrado numa enorme gama de aplicações e representa-se como uma tecnologia fulcral em muitas unidades de fabrico. A indústria metalomecânica de construções metálicas é um setor que se encontra em franco crescimento no panorama nacional e internacional sendo necessária uma constante procura por um aperfeiçoamento dos processos de fabrico.

Dentro dos vários processos de união conhecidos, a soldadura pode ser considerada um processo especial. Durante a sua realização existe um grande conjunto de variáveis envolvido que influenciam diretamente a qualidade da junta soldada. Desde a composição química dos materiais envolvidos, condições atmosféricas, geometrias das peças a soldar e fatores relacionados com a perícia/experiência dos soldadores/operadores.

Um aspeto extremamente importante a ter em conta no estudo dos fenómenos de soldadura, é o facto de que cada junta soldada ser diferente. A soldadura é um processo que introduz violentas alterações à estrutura e composição química do material. Mesmo dentro do mesmo lote, se considerarmos uma análise à escala microscópica, os materiais metálicos não são completamente uniformes. Existe sempre a possibilidade da presença de impurezas inerentes ao processo de fabrico, tais como a presença de enxofre (*S*) e o chumbo (*Pb*), que quando interferem em maiores quantidades com o processo, podem condicionar a qualidade final da união. Apesar de ser possível levar a cabo análises por meios não destrutivos, de forma a identificar possíveis defeitos nas juntas, esses meios têm limitações que muitas vezes impossibilitam uma análise clara da junta soldada. Adicionalmente, sem o recurso a meios destrutivos, é impossível saber verdadeiramente o comportamento mecânico de cada junta. Conforme mencionado, e devido às várias variáveis envolvidas, é da maior importância que se consigam balizar as características dos materiais após submetidos a este processo para que possam ser utilizados com segurança nos diversos projetos de Engenharia.

Face ao exposto, o estudo da soldadura de aços de elevada resistência, torna-se um objeto de estudo ainda mais interessante. A soldadura, devido ao ciclo rápido de aquecimento e arrefecimento, origina endurecimento localizado do material, o que provoca o aparecimento de tensões e fases duras e frágeis e mesmo fissuras. Consequentemente, para que o material consiga suportar este esforço, tem de ter a capacidade de se deformar e acomodar as tensões

residuais. Considerando que os aços de elevada resistência têm tendência a ser menos dúcteis, e por isso genericamente menos deformáveis, o processo de soldadura torna-se mais difícil.

Desta forma a presente dissertação pretende estudar o comportamento destes aços quando soldados de forma a possibilitar a sua utilização com mais clareza e segurança em projetos mais complexos de Engenharia.

1.2. Objetivos do relatório

Esta dissertação tem por objetivo estudar e entender o comportamento dos aços de elevada resistência quando unidos por soldadura.

Pretende-se especificamente estudar o efeito da variação da intensidade de corrente dos processos de soldadura TIG e Soldadura por resistência/pontos nas propriedades das soldaduras realizadas.

Para atingir este objetivo, os seguintes sub-objetivos têm de ser satisfeitos:

- Análise da microestrutura dos revestimentos
- Avaliação da dureza ao longo da secção transversal do cordão de soldadura
- Avaliar a variação das propriedades mecânicas em função das várias intensidades de corrente usando os seguintes ensaios:
 - Tração – Para o processo TIG
 - Corte por tração – Para o processo de soldadura por resistência
 - Arrancamento – Para o processo de soldadura por resistência

1.3. Metodologia

No sentido de levar a cabo os objetivos fixados no ponto anterior seguir-se-á a seguinte metodologia:

- Abordagem sobre a relevância dos aços de elevada resistência na indústria.
- Identificação dos principais aços de elevada resistência utilizados na indústria, bem como as suas propriedades mais relevantes.
- Estudar os principais processos de soldadura utilizados na soldadura destes materiais.
- Estudo da influência da soldadura nos aços apresentados.
- Realização de provetes de soldadura variando a intensidade de corrente no processo de soldadura.
- Análise crítica e discussão dos resultados e conclusões.

1.4. Estrutura do relatório

Este relatório está estruturado em três capítulos. O presente capítulo, diz respeito à introdução e faz uma abordagem geral e enquadramento do tema a desenvolver.

No segundo capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica. Inicialmente são abordados os principais fatores que influenciam as propriedades dos aços em geral. De seguida apresentam-se os principais tipos de aços de alta resistência e o seu método de fabrico. Na parte seguinte apresentam-se genericamente vários procedimentos de soldadura que podem ser utilizados nestes materiais, e quais as principais características que os distinguem e caracterizam. A revisão bibliográfica termina com uma abordagem direta à soldadura de aços de alta resistência, procurando identificar os fatores mais relevantes que influenciam a soldadura destes materiais, bem como os principais problemas e medidas de mitigação dos mesmos.

No terceiro capítulo, é feita uma descrição dos ensaios e análises levados a cabo para o cumprimento dos objetivos supramencionados. Aí são enunciadas as normas de execução que serviram de suporte e linhas guia para os ensaios. São também mencionadas algumas condicionantes e testes prévios que foram necessários.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos em cada um dos ensaios fazendo-se uma análise crítica aos mesmos. A partir daí foram feitas considerações relativas à sua relação com a variação da intensidade de corrente. Adicionalmente é também feita uma avaliação das diferentes microestruturas resultantes dos processos de soldadura.

Por fim no capítulo quinto, são apresentadas as conclusões e considerações finais desta dissertação, bem como sugestões para trabalhos futuros de continuidade.

2. Revisão Bibliográfica

O presente capítulo aborda uma revisão bibliográfica relativamente aos tipos de aços de alta resistência usados na indústria bem como as suas propriedades mais relevantes.

Será também feito um estudo relativo aos processos de soldadura mais utilizados na união destes aços e os principais problemas que podem ocorrer.

2.1. Aços de alta resistência

2.1.1. Ligas Fe-C

O principal meio para classificação dos aços é o diagrama de fases Fe-C. Todas as ligas que contêm menos de 2,06% de carbono podem ser classificados como aços, enquanto aquelas com valor superior são classificadas como ferros fundidos. Para o efeito desta dissertação, será utilizada a designação “aços” para as ligas ferrocarbônicas com níveis de carbono entre 0% e 2%. [1]

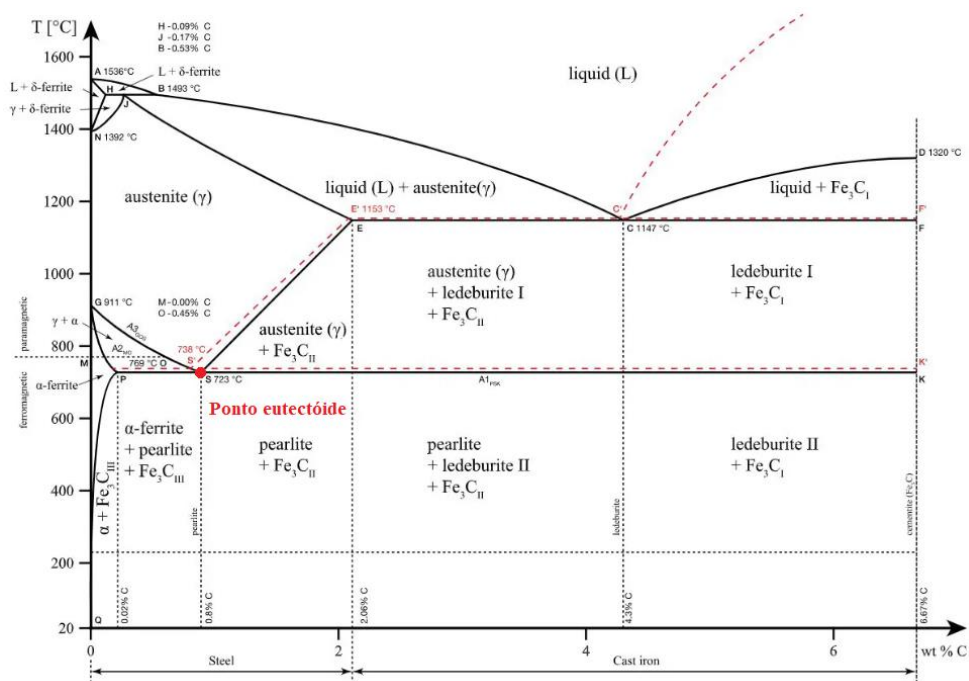


Figura 1 - Diagrama de fases Fe-C [adaptado de [2]]

Quando aços que têm um teor de carbono inferior ao ponto eutectóide (hipoeutectóides, <0,86%) são arrefecidos lentamente abaixo da temperatura de austenitização (911°C) começasse a precipitar ferrite (α) pró-eutectóide. Neste ponto, a estrutura cristalina passa de uma estrutura cúbica de faces centradas (CFC), que é característico da austenite (γ), para uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC), característico da ferrite (α). Esta mudança deve-se à precipitação de moléculas de carbono, devido ao arrefecimento do material que diminuí a solubilidade, forçando a um arranjo diferente da estrutura cristalina. Posteriormente, à medida que o material vai arrefecendo, passando o ponto eutectóide, a restante austenite (γ) transforma-se em perlite, que basicamente consiste em camadas alternadas de ferrite (α) e cementite (Fe_3C). A quantidade de perlite na estrutura aumenta com o aumento do teor de carbono. Da mesma forma, a resistência mecânica do aço aumenta também com o aumento de perlite, que quanto menor o espaçamento entre as camadas maior será essa resistência (devido à presença de uma estrutura mais refinada). [1] [3]

Arrefecimento típico de aços hipoeutectóides, a partir do campo monofásico γ :

Precipita α proeutectóide nas fronteiras de grão de γ (diminuição da solubilidade de Fe na austenite) – Ferrite proeutectóide.

À temperatura eutectóide (723°C), a γ transforma-se em perlite.

Entre $T_{\text{eutectóide}}$ e T_{ambiente} precipita Fe_3C nas interfaces entre Fe_3C e as fronteiras de grão (diminuição da solubilidade do C na ferrite)

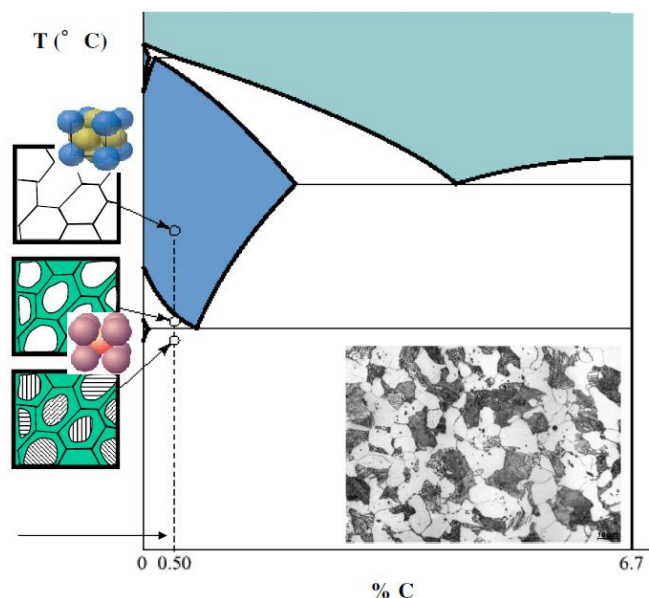


Figura 2 - Arrefecimento dos aços hipoeutectóides [3]

2.1.2. Aços de alta resistência temperados - Martensíticos

Quando uma liga Fe-C é arrefecida de uma forma mais abrupta por meio de tempera, ou seja, suficientemente rápido a partir da temperatura de austenitização, a existente austenite acima dos 911°C não se irá transformar em perlite, conforme referido anteriormente. Em vez disso transforma-se em martensite, correspondendo a uma fase metastável, não prevista pelo diagrama de equilíbrio. O carbono presente em solução sólida, precipita abruptamente e obriga a um rearranjo molecular passando de uma estrutura CFC, para uma estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC) que é característica da martensite. Como consequência desta diferença de estruturas moleculares são inculcidas ao aço propriedades mecânicas de resistência muito

superior e inferior ductilidade. Devido a estas propriedades, os aços martensíticos são utilizados para conseguir elevados desempenhos a nível de resistência e desgaste. [4] [1]

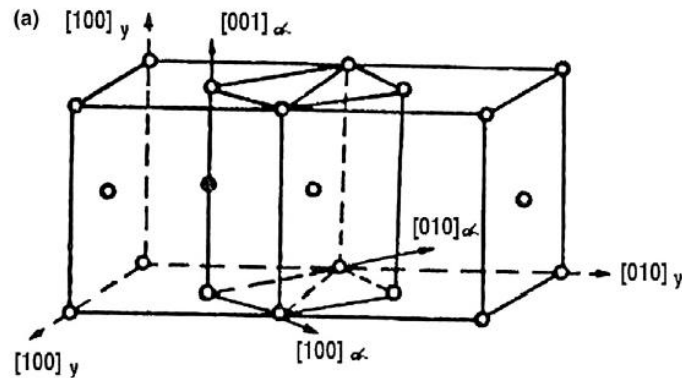


Figura 3 - Formação do corpo TCC entre a austenite CFC [4]

Conforme referido, para conseguir uma estrutura martensítica, é necessário um arrefecimento suficientemente rápido para evitar a formação de ferrite pro-eutectóide e perlite. Para contribuir para este processo, podem ser adicionados outros elementos de liga que atrasam a decomposição da austenite e assim aumentar a dureza dos aços. Quando a dureza aumenta, é possível diminuir a velocidade de arrefecimento facilitando o processo de tempera.

Aços de baixa liga que foram desenvolvidos para serem usados principalmente como martensíticos, são designados como aços tratados termicamente. Uma das principais preocupações destes tipos de aço é o seu endurecimento. Estes aços, normalmente, não são utilizados no seu estado puro após tempera. Passam posteriormente por um processo de tratamentos consecutivos de revenidos. Este processo resulta num amaciamento do aço pois permite um certo rearranjo molecular de forma a acomodar o carbono precipitado. [1]

2.1.3. Aços de alta resistência de grão fino (HSLA)

Embora os aços martensíticos tenham uma resistência consideravelmente superior aos aços ferrítico-perlíticos, esta estrutura muitas vezes é difícil de conseguir de uma forma equilibrada. Para tal é sempre necessário uma série de tratamentos térmicos consecutivos, tempera e revenidos, que tornam o processo mais complexo e caro. Os aços HSLA "High-strength low-alloy" são uma classe de aços que foram desenvolvidos para alcançar propriedades superiores aos ferrítico-perlíticos e propriedades comparáveis aos aços temperados de baixa liga martensíticos.

Os aços HSLA foram concebidos de forma a que as suas propriedades mecânicas adequadas fossem obtidas recorrendo a um processo de laminagem termomecânica (TMP). O aço produzido desta forma atravessa um processo contínuo de laminagem a quente e/ou forjamento. Na maioria dos casos promove-se também a adição de elementos de liga (micro-ligantes), tais como o nióbio (Nb), vanádio (V), e titânio (Ti), que controlam a evolução da microestrutura e diminuem drasticamente o tamanho do grão pela formação de carbonetos nas fronteiras de grão, impedindo o crescimento excessivo do tamanho de grão. Uma vez reduzido o tamanho de grão, o aumento do número de fronteiras dificulta a propagação de

deslocações na microestrutura aumentando a resistência mecânica dos aços sem uma fragilização tão grande como no caso dos martensíticos. Assim é conseguido um aço mais equilibrado com uma resistência superior e sem perda drástica de ductilidade. [1] [5] [6]

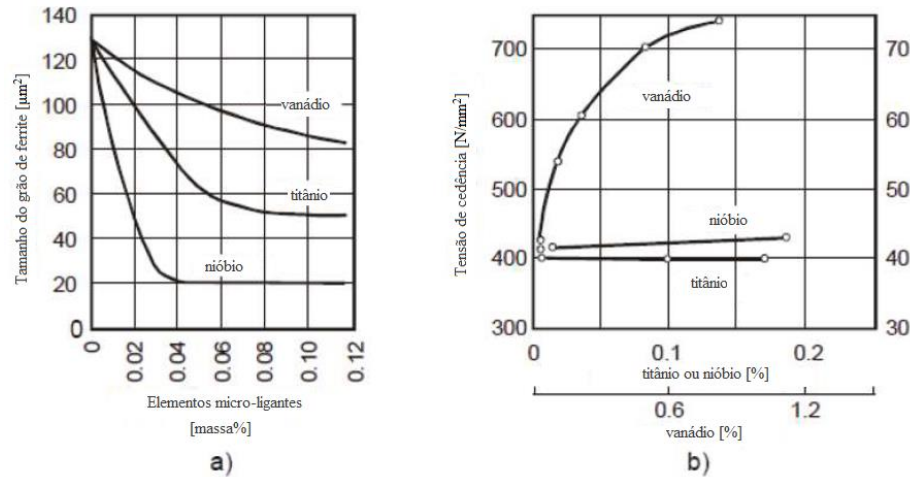


Figura 4 - a) Efeito de elementos de liga micro-ligantes no tamanho do grão ferrítico; b) efeito de elementos de liga micro-ligantes na tensão de cedência [adaptada de [5]]

2.1.4. Aços de alta resistência avançados (AHSS)

Aços de alta resistência avançados ou “Advanced High Strength Steels” (AHSS) estão referenciados como parte de uma nova geração de aços que proporciona níveis de resistência na gama dos 2000 MPa. Estes aços para além de oferecerem altas propriedades mecânicas têm elevada durabilidade enquanto mantêm a sua maneabilidade que é crucial para o processo de fabrico.

A maioria destes materiais são produzidos em linhas avançadas de revenidos contínuos, que proporcionam elevada temperatura, seguidas de um processo de arrefecimento rápido controlado da fase austenítica. Este ciclo pode ser repetido várias vezes dependendo das propriedades pretendidas.

A principal diferença que é consequência deste processo é a microestrutura resultante do aço. Os aços AHSS podem exibir uma variedade de diferentes microestruturas dependendo da sua classificação.

- **Aços bifásicos - Dual Phase Steels (DP)**

Os aços bifásicos são aços que contêm essencialmente ferrite e martensite. Estes aços têm baixas percentagens de carbono que contêm uma quantidade percentual de ilhas de martensite, entre os 5% a 50%, que estão dispersas numa matriz ferrítica. Adicionalmente também podem ser verificadas, ainda que de forma mais residual, fases de bainite e austenite residual. Estas variações na microestrutura proporcionam aos aços bifásicos um grande espectro de resistência e ductilidade, adicionalmente os aços DP têm a capacidade de absorver grandes quantidades de energia quando sujeitos a choques. [7] [8]

- **Aços forjados – Press-Hardened Steels (PHS)**

Os aços produzidos por forjamento passam por um processo diferenciado no seu fabrico, onde o aço é aquecido a uma temperatura mínima de 850°C e de seguida moldado na sua forma final enquanto é arrefecido de um modo controlado até alcançar as propriedades desejadas. A temperatura combinada com um arrefecimento rápido transforma a microestrutura em praticamente 100% martensite dotando o material de uma tensão de rotura na ordem dos 2000 Mpa. Este processo é referido de uma forma comum como “Hot Stamping”. O produto final pode ser classificado como um aço de elevada resistência avançado.

A implementação destes aços no mercado promove alternativas muito viáveis para a possível otimização de geometrias devido ao elevado rácio entre resistência e densidade. Assim, componentes fabricados com este material conseguem ter desempenhos em peças únicas que outrora obrigariam a elementos compostos por mais do que uma peça que teriam de ser soldados. [7]

- **Aços de plasticidade induzida por transformação – TRIP Steels**

Os aços TRIP são produzidos de uma forma similar aos aços bifásicos. Ambos requerem linhas de arrefecimento contínuo controlado, no entanto os aços TRIP têm um arrefecimento relativamente mais lento, sendo que durante esse processo o material é mantido a uma temperatura próxima ao ponto eutectóide durante mais tempo. Este passo, conjuntamente com uma percentagem de carbono superior e a adição de elementos de liga como silício e alumínio levam a formação de uma microestrutura com uma quantidade considerável de austenite residual no estado meta-estável. Esta microestrutura consiste em pelo menos 5% de austenite residual, que está embebida numa matriz principalmente ferrítica. Também estão presentes fases duras como martensite e bainite. Basicamente o silício e o alumínio adicionados, atuam como estabilizadores da austenite à temperatura ambiente.

Tabela 1 - Comparação dos aços TRIP com outros tipos de aços [8]

	Tensão de cedência (Mpa)	Tensão de rotura (Mpa)	Deformação elástica (%)	Deformação total (%)
Aços macios	181	296	21,4	42,4
340 HSLA	375	480	13	24
Dual Phase 600	355	623	19	26
Dual Phase 800	440	825	18	18
TRIP 800	503	831	21,5	27,6

Pelas propriedades mecânicas apresentadas na tabela 1, **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** é visível que a deformabilidade dos aços TRIP é comparável a dos aços carbono macios. [7] [8]

- **Aços de fase complexa – *Complex Phase Steels (CP)***

Os aços de fase complexa têm uma composição semelhante à dos aços TRIP, excetuando que esta é ajustada para que o produto final contenha menos austenite residual.

Os aços de fase complexa vão buscar o seu aumento de resistência mecânica à sua granulometria extremamente fina e microestrutura que contem pequenas quantidades de martensite, perlite e austenite residual, que estão embebidas numa matriz de ferrite e bainite. Concordante com o referido anteriormente, o refinamento da matriz é obtido através da precipitação de Nb, Ti e V nas fronteiras de grão.

Os aços CP podem ser produzidos por laminação a quente ou frio e têm, de um modo geral, a possibilidade de produção de elementos com espessuras superiores, o que aumenta a sua gama de aplicabilidade para fins estruturais. [7] [8]

- **Aços de plasticidade induzida por maclagem – TWIP Steels**

Os aços TWIP "*Twinning Induced Plasticity*" fazem parte de uma segunda geração de aços de alta resistência. Estes aços são concebidos para alcançarem uma combinação de alta resistência e alta ductilidade.

Em contraste com os aços de matriz ferrítica, que caracteriza os aços referidos anteriormente, esta geração é caracterizada por uma matriz austenítica com uma estrutura cubica de faces centradas, que é conseguida pela adição de grandes quantidades de manganês. Os aços mais recentes conseguem alcançar propriedades resistentes na ordem dos 1000 Mpa com um alongamento total de 50%. No entanto esta combinação vem com um custo extremamente elevado. Com níveis de manganês na ordem dos 20%, o custo destes aços é espetável que entre na ordem de grandeza dos aços inoxidáveis e alumínio. O seu custo representa um desafio a sua aplicabilidade na indústria, e poderá ser um fator limitador para a sua utilização. [8]

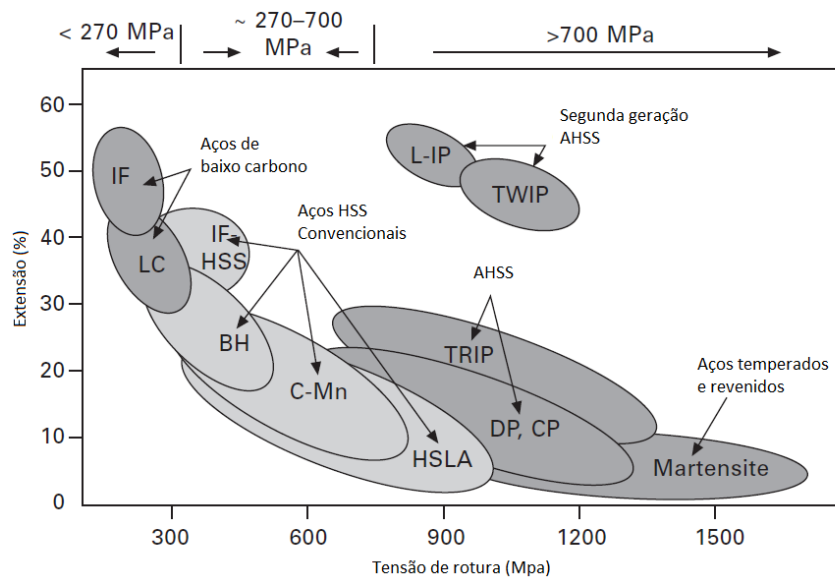


Figura 5 - Diagrama com a representação dos aços de elevada resistência [8]

2.2. Aplicações para aços de alta resistência

2.2.1. Aplicações estruturais

Genericamente, de acordo com os Eurocódigos, a aplicação de aços em estruturas metálicas para construção está restringida aos aços entre a gama S235 e S460. No entanto em alguns casos especiais podem ser aplicados materiais até ao S690. Existe, no entanto, uma grande necessidade e estender esta aplicabilidade para aços de maior resistência, em particular para o uso em estruturas de veículos ou gruas móveis e pontes temporárias. A principal razão prende-se com a intenção em reduzir a espessura dos elementos e conseqüentemente o peso próprio.

Deste modo é importante entender que fenômenos influenciam de forma relevante o comportamento destes materiais para poder implementar novos critérios de dimensionamento e conceção que passem a permitir a sua utilização de uma forma segura. [9]

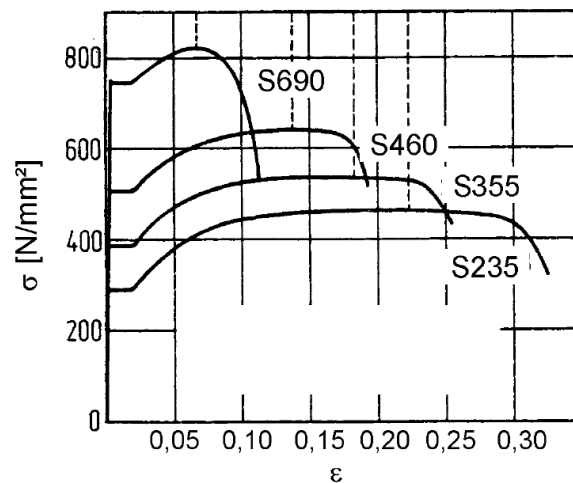


Figura 6 - Curvas Tensão/Extensão dos vários aços [9]

A figura 6 apresenta a resistência mecânica de diferentes aços de alta resistência em função da sua deformação. Perante a análise das curvas anteriores, é possível entender que os aços de alta resistência são mais sensíveis à perda de resistência mecânica que os aços convencionais, principalmente quando se trata de aplicações que necessitam de elevada ductilidade.

A verificações feitas para os estados limites, de acordo com os Eurocódigos, tem por base a premissa de que o material tem um mínimo de ductilidade. Tais premissas só são válidas até aos aços S460. Assim:

- Momentos de segunda ordem em ligações de elementos em treliça que resultam da restrição de movimento são desconsiderados.
- Esforços residuais criados por soldadura são negligenciados.
- Efeitos de pontos de concentração de tensões que resultam de excentricidades ou entalhes criados pelas geometrias das estruturas são desconsiderados e são adotados esforços nominais lineares.
- São feitas suposições que simplificam a análise de forma a não ser considerada uma distribuição plástica de esforços.

Tais suposições são possíveis para aços de classificação S235 a S460 pois estes possuem um nível de tenacidade muito superior resultante de uma grande região plástica. Assim é possível concluir que cuidados adicionais são necessários para que seja possível a utilização mais corrente destes materiais. [9]

Entretanto, no Japão, vários estudos foram levados a cabo em aços de classes de 500 Mpa e 600Mpa na década de 1950. E muitos destes materiais, posteriormente designados por JIS SM50Y e JIS SM58Y foram adicionados às “*Highway Bridge Specifications*” em 1967. Aproximadamente metade das pontes contruídas no Japão entre 1973 e 1975, contaram com a aplicação destes materiais. [10]

O uso de aços da classe 800 Mpa começou no ano de 1963 com a sua aplicação em reservatórios sob pressão. Posteriormente a sua utilização migrou para as pontes em 1964 com a construção da ponte *Hanawa Overpass* e em 1974 na ponte *Minato Ohashi*. [10]

Para a implementação destes materiais foram tidas as seguintes preocupações:

- Não poderia haver risco de fratura frágil acima de -150°C
- A temperatura de transição dúctil-frágil de juntas soldadas teria que estar acima dos 0°C .
- A temperatura necessária de pré-aquecimento não poderia ser superior a 150°C para aços de resistência de 800 Mpa com 100mm de espessura.

Posteriormente foi construída em 1998 a ponte *Akashi Kaikyo*, que é atualmente uma das maiores pontes suspensas do mundo, onde foram implementadas grandes quantidades de aço da classe de 800 Mpa na treliça que constitui a estrutura principal, de modo a reduzir o peso próprio. Poderá dizer-se que esta é a utilização mais apropriada para estes aços. [10]



Figura 7 - Ponte Akashi Kaikyo [11]

Os aços utilizados nestas pontes requerem uma temperatura de pré-aquecimento relativamente alta, entre os 100°C e os 120°C , de forma a mitigar a ocorrência de fissuração durante a soldadura. Consequentemente, este fator cria condições de soldaduras extremamente adversas. Assim verificou-se uma grande necessidade de desenvolver aços com esta capacidade resistente que não necessitassem de tanto pré-aquecimento. A ideia que tem por base este desenvolvimento reside na melhoria da soldabilidade através da redução de elementos que afetam a dureza nas zonas termicamente afetadas ZTA. A resistência do aço advém da escolha de elementos que endurecem por precipitação e que podem ser aplicados em tecnologias de processamento termomecânico.

Em geral, a fissuração a frio em soldaduras acontece devido à existência de hidrogénio nos materiais e na atmosfera, sendo que este pode causar fissuração tardia nas soldaduras de materiais duros nas zonas termicamente afetadas. A redução da dureza desta região pode ser

conseguida pela redução do teor de carbono no material. De forma a assegurar resistência sem sacrificar a soldabilidade, podem ser adicionados elementos de liga ao material base, como por exemplo cobre, para tirar vantagem do fenómeno de endurecimento por precipitação referido anteriormente. [10]

2.2.2. Aplicações na indústria automóvel

A utilização do aço tem um domínio muito relevante na construção de estruturas para chassis de automóveis.

Primeiramente começaram por ser utilizados aços macios nesta indústria, no entanto à medida que a necessidade de economizarão de combustível e melhoria de performance se tornou num fator importante, o processo de conceção começou a apontar para materiais que diminuíssem o peso próprio dos componentes. Com o crescimento da utilização de estruturas de corpo integral, nos anos 70 e 80, começaram a surgir alternativas de design mais eficientes que não requeriam chassis tão pesados. Assim surgiu o cenário ideal para a utilização de aços de alta resistência.

Apesar de tudo, numa fase inicial, a baixa ductilidade dos aços mais duros, comparada com os aços de baixo carbono em geral, trouxe dificuldades à sua implementação. As tentativas iniciais para a utilização destes aços resultaram na formação de fissuras e outros problemas.

As utilizações de aços com níveis de carbono abaixo dos 0,13% são comuns na indústria automóvel em painéis e componentes estruturais. A combinação do seu baixo custo, boa capacidade de deformação e soldabilidade têm contribuído para a sua preferência ao longo dos anos. No entanto, com o desenvolvimento das técnicas de fabricação de novos materiais metálicos, como os referidos nos capítulos anteriores, a sua utilização tem vindo a ser substituída pelos aços de alta resistência. Estes aços são também produzidos com baixo teor de carbono e frequentemente contêm elementos de liga que lhes conferem capacidades de deformação superiores, conjuntamente com capacidades resistentes muito elevadas. Estes fatores são extremamente vantajosos quando aplicados a técnicas de estampagem para partes difíceis de fabricar. A adição de elementos microligantes como o nióbio também produzem aços com grande resistência e deformabilidade. Neste caso os HSLA são muito utilizados na estrutura dos chassis, especialmente em componentes que são submetidos a esforços elevados e em que é necessária boa soldabilidade por pontos. Estes aços combinam a boa capacidade de deformação e resistência com um custo moderado e acabam por ser muito utilizados nas peças principais do chassis. [8]



Figura 8 – Estrutura de um chassi

2.3. Processos de soldadura

A soldadura é um tipo de processo de união de materiais permanente que é essencial ao funcionamento da indústria de hoje em dia. A soldadura tem por objetivo a junção de dois materiais, não necessariamente aços, que de não podem ser fabricados de outra forma como peça única.

A utilização de soldadura pode ser datada até 6000 anos atrás, onde se submetiam duas peças metálicas à ação de chama e martelagem, sendo a união conseguida finalmente por forjamento.

Atualmente, temos à disposição vários processos de soldadura que utilizam outros métodos para conseguir a união de materiais.

Nos subcapítulos que se seguem irá ser desenvolvido um pouco sobre como funcionam e como se classificam os processos, no que dizem respeito a materiais metálicos. [12]

2.3.1. Classificação dos processos de soldadura

Os processos de soldadura podem ser classificados quanto ao modo de obtenção da união ou quanto aos tipos de energia.

Quanto aos modos de obtenção da união podem ser classificados como:

- Soldadura por fusão – ex: MIG, TIG, Laser, Resistência
- Soldadura no estado sólido – ex: Explosão, Forjamento, ultra-sons
- Brasagem

Quanto aos tipos de energia que utilizam dizem respeito a processos de funcionamento a energia:

- Elétrica – Soldadura por arco, Resistência, Indução

- Mecânica – Fricção, Pressão
- Química – Chama, Fluxo, Explosão

Os processos que normalmente são mais utilizados para a união de materiais metálicos são os apresentados na figura 9:

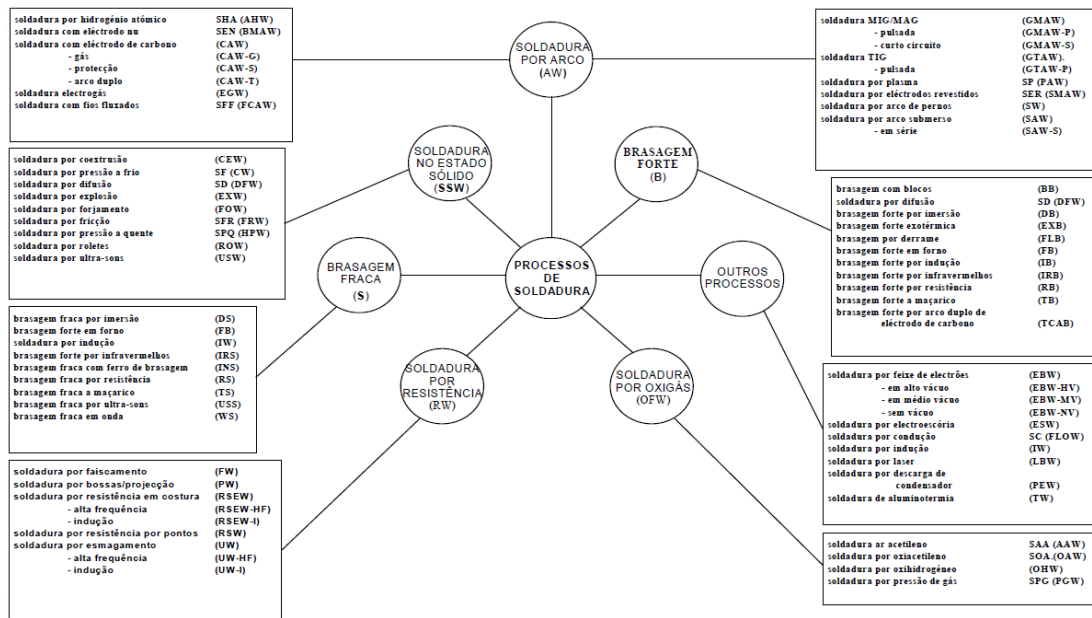


Figura 9 - Processos de soldadura metálica [adaptado de [13]]

Sendo que os processos de soldadura por arco elétrico acabam por ser os mais versáteis na indústria, uma vez que podem ser utilizados para uma gama de aplicações, será dada especial atenção a estes processos. Além do exposto, os processos com arco são aqueles cujos parâmetros conseguem ser mais facilmente medidos, controlados e quantificáveis. [13]

2.3.2. Soldadura por arco elétrico

Um arco elétrico pode ser definido como um condutor gasoso no qual se transforma energia elétrica em energia calorífica.

Numa soldadura por arco elétrico, o arco advém da descarga elétrica, que ocorre entre dois eléctrodos através de um gás ionizado a alta temperatura. O eléctrodo negativo, a partir do qual são emitidos electrões passam através do gás, é chamado de cátodo. O eléctrodo positivo, e conhecido como ânodo. O deslocamento dos electrões ocorre do resultado da diferença de potencial que se cria entre estes dois eléctrodos. [14] [15]

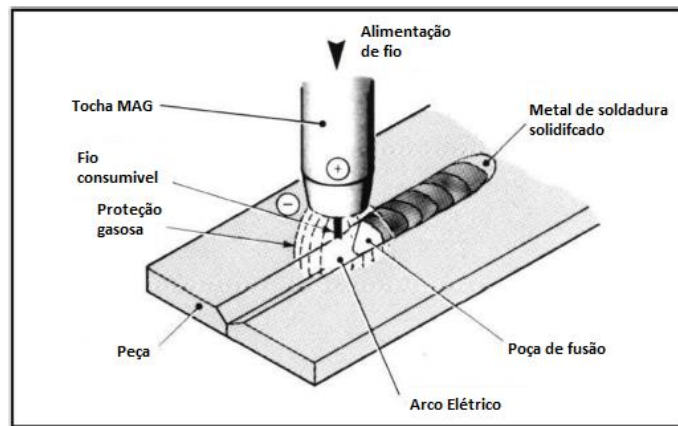


Figura 10 - Soldadura MIG/MAG [16]

Na figura 10 está representado um exemplo de soldadura MIG/MAG onde são apresentados como eléttodos o fio de soldadura no polo positivo, e a peça como polo negativo. A peça torna-se num elemento condutor através da fixação de um cabo de massa que está ligado à fonte de potência do equipamento, fazendo um circuito elétrico completo. [16]

Relativamente ao gás de soldadura utilizado, este pode ser induzido no processo por meio de uma garrafa de gás ligada ao equipamento, como é o caso apresentado na soldadura MIG/MAG, ou pode ser resultante da fusão do revestimento de um eléttrodo ou da fusão de fluxo, como são os casos do eléttrodo revestido, fios autoprottegidos e do arco submerso. [14]

Um gás com baixa energia de ionização, como o árgon, transforma alguns átomos em iões, o que por sua vez produz um arco elétrico mais estável. No entanto um gás com elevado potencial de ionização pode ter um arco mais instável, como é o caso do hélio ou de alguns gases ativos como o dióxido de carbono e o oxigénio. No entanto estes gases permitem desenvolver mais calor na peça, melhorando a capacidade de penetração da soldadura. [14] [15]. A figura 11 representa os processos separação de eletrões e formação de iões que permitem a formação do arco elétrico.

Energia de Ionização e dissociação:

- Menor EI implica um arco elétrico mais estável e mais fácil de criar.
- Átomos diatômicos requerem maior EI/ED. Proporcionam um arco elétrico mais instável, mas com maior temperatura, permitindo maior penetração e velocidade de soldadura.

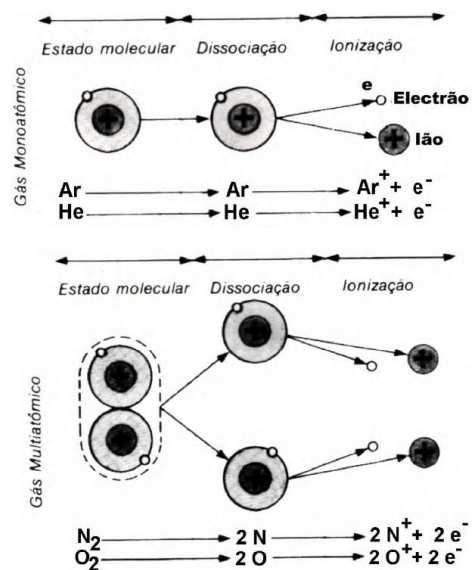


Figura 11 - Ionização e dissociação [17]

2.3.3. Soldadura MIG/MAG

A soldadura MIG/MAG é um tipo de soldadura por arco elétrico com gás de proteção, que introduzido no processo por meio da ligação de uma garrafa ligada à tocha de soldadura. A designação MIG/MAG vem de *Metal Inert Gas e Metal Active Gas*, para soldadura com gás inerte exclusivamente (Argon), ou utilização de gás ativo na mistura de gases.

É comumente designado como um processo de soldadura semiautomático, pois tira partido de um sistema que introduz de forma automática e contínua na soldadura um eléctrodo consumível sobre a forma de fio, deixando a componente de manobra da tocha sob forma manual para o soldador. [14] [16] [18]. A figura 12 representa um esquema dos vários componentes necessários à soldadura MIG/MAG.

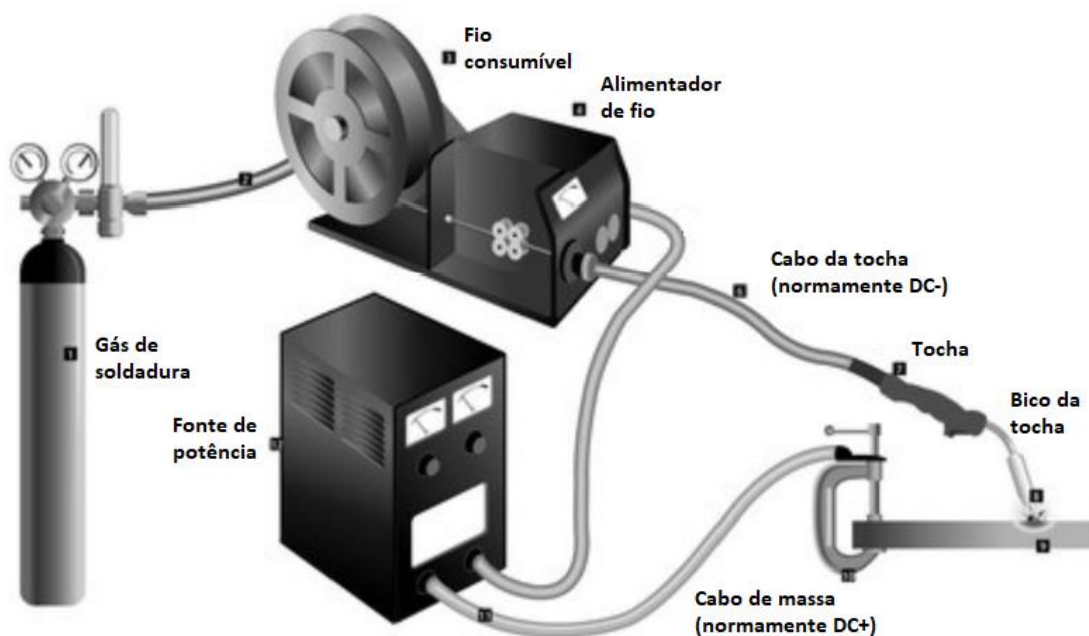


Figura 12 - Equipamento de soldadura MIG/MAG [16]

Este processo pode ser automatizado por ligação da tocha a um carrinho assente em pista movel ou cabeça de soldadura. Essa pista tanto pode ser executada em formato linear ou orbital.

Além do rendimento elevado de trabalho que este processo tem, uma das grandes vantagens da sua utilização é a versatilidade que o mesmo permite à construção a nível de aplicabilidade. O facto de poder ser usado de forma semiautomática e totalmente automática, permite a sua utilização em peças com formatos mais complexos sem comprometer o rendimento. Este processo abrange também uma grande gama de espessuras, devido às várias variantes que existem deste processo, desde a possibilidade de variação na espessura de fio para aumentar o rendimento e taxa de deposição, até à utilização de fios de alma metálica ou fios fluxados.

A principal desvantagem deste processo é que não permite soldadura ao ar livre, devido à dissipação do gás com as correntes de ar. [14] [16] [18]

2.3.4. Soldadura por eléctrodo revestido

A soldadura por eléctrodo revestido, também conhecida por soldadura manual, é o processo mais antigo dentro da categoria das soldaduras por arco eléctrico. É caracterizado pela sua grande versatilidade, simplicidade e flexibilidade.

A nível de diversidade de implementação em materiais, consegue alcançar uma abrangência superior à do MIG/MAG.

Este tipo de soldadura é caracterizado pela utilização de eléctrodos sobre a forma de varetas consumíveis que são acoplados num alicate, também designado de tocha. A medida que a soldadura vai sendo executada, a vareta vai sendo consumida e o soldador tem de ir aproximando a tocha da peça. [14] [19] [18]. A figura 13 representa um esquema dos vários componentes necessários à soldadura por eléctrodo revestido.

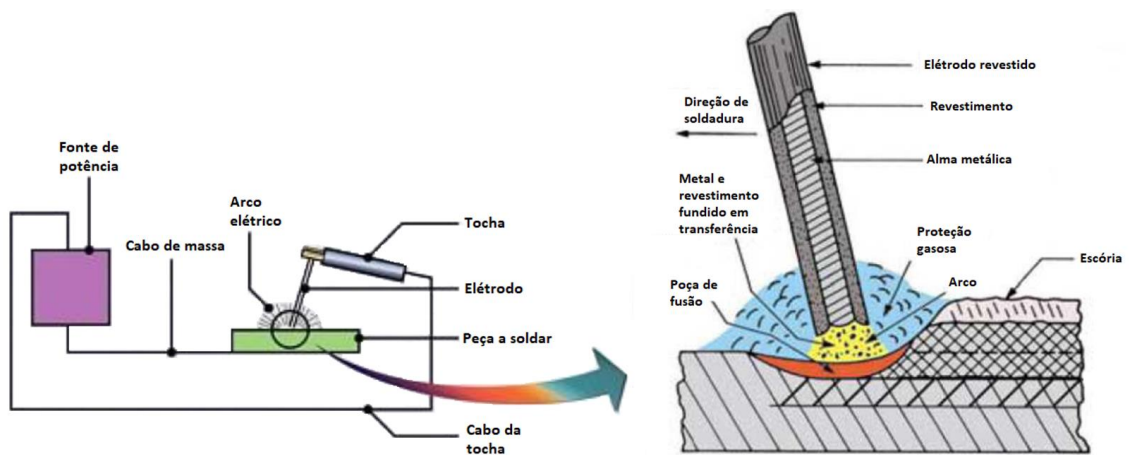


Figura 13 - Esquema de soldadura eléctrodo revestido [19]

A passagem de corrente eléctrica, no eléctrodo, é feita através da alma metálica, que quando esta encosta à peça a soldar, fecha o circuito. Quando o escorvamento é feito, cria-se uma diferença de potencial que funde o revestimento e cria-se uma protecção gasosa localizada. Este gás permite assim a formação de um arco eléctrico que assegura a continuidade do processo de fusão da alma metálica e do revestimento.

Este processo é caracterizado também pela segregação de escória na parte superior do cordão soldado. A escória tem como função a protecção e controlo de arrefecimento da soldadura, bem como a estabilização do banho de fusão em soldaduras à posição.

Este é um processo muito utilizado para soldaduras de campo, principalmente reparações, pois os equipamentos são bastante portáteis, relativamente a outros processos, e não necessita da utilização de gás em garrafa como o processo anterior.

Em contrapartida, devido à necessidade de reposição manual do eléctrodo consumível, e de utilizar parâmetros de soldadura inferiores, a soldadura tem taxas de deposição inferiores afetando o rendimento. [14] [18]

2.3.5. Soldadura TIG

A soldadura TIG, da mesma forma que o MIG/MAG, é também um tipo de soldadura por arco eléctrico que utiliza gás de protecção, e que tira partido da ionização desse gás para a criação do arco eléctrico. A designação TIG vem de "*Tungsten Inert Gas*". Como o nome indica, esta soldadura utiliza praticamente sempre gases inertes como por exemplo o Árgon.

A principal diferença deste tipo de soldadura para os referidos anteriormente é que neste caso o eléctrodo utilizado no circuito é feito de Tungsténio e não é consumível, ou seja, não deve ser adicionado ao material de adição. [14] [20].

A figura 14 Figura 14 - Esquema soldadura TIG representa um esquema do funcionamento da soldadura TIG.

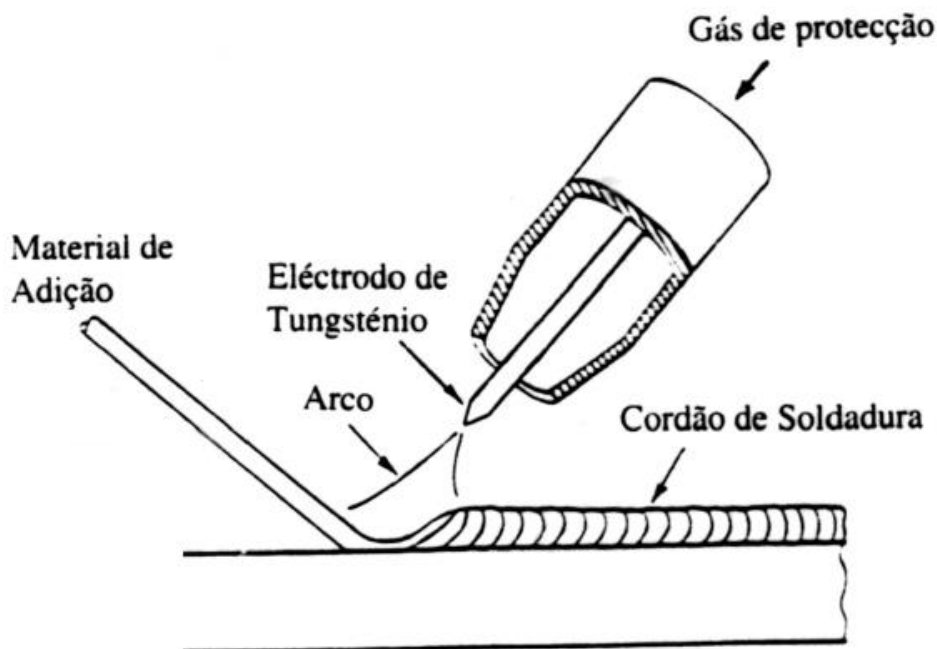


Figura 14 - Esquema soldadura TIG [20]

Neste processo o cordão de soldadura pode ser obtido de duas formas, apenas pela fusão dos dois materiais base, sem adição externa de material (soldadura autogénea), ou com adição de material através da utilização de uma vareta a frio.

Este processo trabalha com parâmetros de corrente e voltagem inferiores aos dois processos apresentados anteriormente, especialmente relativamente ao MIG/MAG. No entanto permite um trabalho e controlo do arco durante a soldadura muito superior, ainda que o processo seja mais moroso. É adequado a soldaduras de precisão, como por exemplo em tubagens e passes de raiz em equipamentos sob pressão.

Este processo tira partido da elevada temperatura de fusão do tungsténio em relação ao aço, partindo do princípio de que o eléctrodo é apenas um elemento condutivo e não funde. No entanto um dos defeitos mais comuns deste tipo de soldadura são as inclusões de tungsténio no material do cordão de soldadura, pela fusão de pequenas partículas do eléctrodo. [14] [20]

2.3.6. Soldadura por arco submerso

A soldadura por arco submerso difere dos outros tipos de soldadura referidos no sentido em que uma camada fundível granular de um material designado fluxo é utilizada para proteger a soldadura e criar o arco eléctrico. Da mesma forma que o revestimento no processo de eléctrodo revestido funde e cria gás que ao ionizar forma um arco eléctrico, neste caso é o fluxo a cumprir essa função. No entanto nesta situação o arco eléctrico não é visível, pois está submerso pelo fluxo. Uma vez que tudo acontece debaixo do fluxo, a soldadura é executada sem o feixe luminoso, salpicos e faíscas que caracterizam as soldaduras referidas anteriormente.

Da mesma forma que no processo de eléctrodo revestido, a fusão do fluxo cria uma escória sobre o material fundido, o que permite controlar o arrefecimento e forma do cordão. [14] [18]

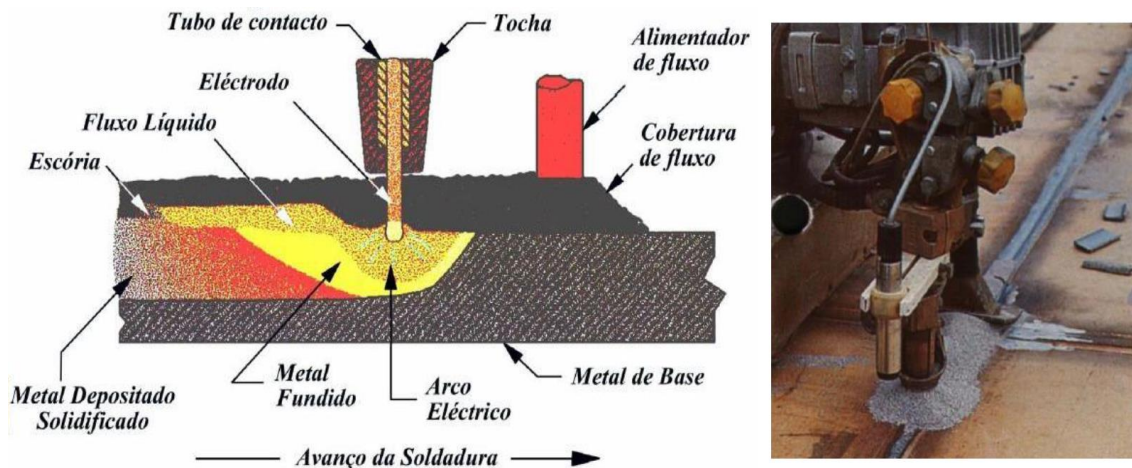


Figura 15 - Esquema soldadura arco submerso [21]

Tipicamente este processo é totalmente mecanizado ou automatizado. Da mesma forma que na soldadura semiautomática o fio é alimentado por uma bobine. A tocha é normalmente empurrada por um carrinho ou a peça é movimentada por um posicionador móvel, linear ou rotativo.

Neste tipo de soldadura é típico o uso de correntes de soldadura muito elevadas, permitindo uma taxa de deposição grande e conseqüentemente um rendimento também elevado.

Em contrapartida, uma vez que são empregues entregas térmicas muito elevadas, muitas vezes os materiais sofrem empenos significativos. Desta forma é bastante desaconselhada a sua utilização em chapas finas.

Embora a automatização facilite a produção mais rápida e com qualidade de elementos, esta retira versatilidade ao processo, uma vez que este não permite soldadura em formas complexas e não lineares. Este processo também não permite a soldaduras verticais ou sobre a cabeça, uma vez que a utilização do fluxo é um fator limitador nesse sentido. [14] [18] [21]

2.3.7. Soldadura por resistência - Pontos

A soldadura por pontos, é uma soldadura que pertence ao grupo de processos de soldadura por resistência. Neste tipo de processos a união dos metais é conseguida pela geração de calor nas peças devido a resistência à passagem de corrente elétrica em cada uma das peças, sendo que o calor é gerado pelo efeito de joule. É exercida força na junta por dois elétrodos, que é sempre aplicada antes, durante e depois da passagem da corrente, confinando a zona de soldadura, forjando o material no pós-aquecimento [14]. A figura 16 representa um esquema da soldadura por pontos.

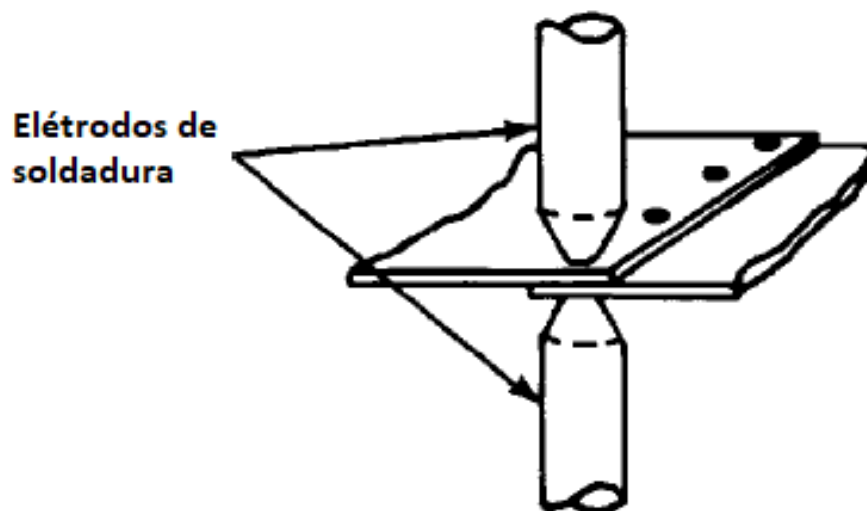


Figura 16 - Esquema soldadura por pontos [14]

A soldadura por pontos envolve a aplicação coordenada de corrente elétrica e pressão e duração suficientes. A corrente deve passar dos elétrodos para as peças.

Este tipo de processo é muito utilizado de forma automatizada, mas também pode ser utilizado da forma manual. É comumente utilizado na indústria automóvel, pois é indicado para a utilização em chapas mais finas e permite que as soldaduras sejam feitas de uma forma rápida

e em serie. Não necessita de material de adição e isso faz com que praticamente todos os materiais que sejam capazes de conduzir corrente possam ser soldados desta forma.

A execução de soldaduras desta forma pode ser uma vantagem, mas também uma limitação, uma vez que a necessidade de sobreposição das chapas torna limitados os tipos de junta que podem ser utilizados. O tipo de junta e soldadura também limita a capacidade resistente uma vez que não se trata de uma soldadura continua.

2.4. Variáveis essenciais da soldadura

A capacidade de soldar aços estruturais é um aspeto essencial para a fabricação de vários elementos da indústria. Sem este processo de união muitos elementos seriam muito mais dispendiosos ou completamente impossíveis de construir.

A soldabilidade dos aços depende de vários parâmetros: tipo de estrutura e composição química do material de base, parâmetros do processo e procedimento de soldadura, tipo de material de adição e suas propriedades, pré-aquecimento e tratamentos térmicos posteriores à soldadura, entre outros.

De um modo geral, para a soldadura de um aço ser bem conseguida, devem ser utilizados consumíveis de uma composição aproximada à dos materiais base, de forma que a qualidade da junta soldada tenha propriedades semelhantes. De qualquer forma, será sempre importante o desenvolvimento de um procedimento de soldadura de acordo com a norma EN 15607 para que se possa, até certo ponto, balizar os fatores relevantes que contribuem para que o resultado cumpra a sua função como se fosse o material base.

Esta norma, distingue um conjunto de variáveis que considera como essenciais para o desenvolvimento de um procedimento de soldadura, ou seja, variáveis que ao serem alteradas originam mudanças nas propriedades mecânicas da junta soldada. [22] [23]

Estas variáveis são:

- Material de base – Tipo, espessura e diâmetro
- Material de adição – Consumíveis e gases
- Processo de soldadura – Tipo e parâmetros
- Tipo de junta – Topo a topo ou canto
- Condições de execução – Posição de soldadura e acessibilidade à junta

2.4.1. Carbono equivalente

O carbono equivalente, como fator de caracterização do material base, é utilizado para prever a capacidade de endurecimento dos aços, soldabilidade e fissuração induzida por hidrogénio. Naturalmente, materiais mais duros, e menos dúcteis, têm tendência para ser mais difíceis de soldar, uma vez que a junta não está preparada para absorver as deformações induzidas da variação térmica resultante de um procedimento de soldadura.

O valor do carbono equivalente é uma medida da tendência que uma junta tem para formar martensite durante o arrefecimento, e por consequência poder vir a sofrer uma fratura frágil.

De acordo com o “*International Institute of Welding*”, a forma de cálculo para o carbono equivalente é a que se segue:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (1)$$

Em que os símbolos químicos apresentados correspondem à percentagem de cada elemento no material a caracterizar.

Genericamente, para valores mais elevados será necessária a execução de pré-aquecimento antes da soldadura. De forma que o arrefecimento do material seja mais lento, e este não fique tão fragilizado.

Tabela 2 - Soldabilidade em relação ao carbono equivalente

Carbono equivalente (CE)	Soldabilidade	Pré-aquecimento
Até 0,35	Excelente	Não necessário
0,36 – 0,40	Muito boa	Recomendado
0,41 – 0,45	Boa	Necessário
0,46 – 0,50	Razoável	Necessário
Acima de 0,51	Má	Necessário

Conforme apresentado na tabela 2, verifica-se que quando menor for o valor do carbono equivalente, melhor é a soldabilidade do material.

No entanto a soldabilidade e suscetibilidade dos aços não é apenas determinada pela composição química, sendo que também é importante considerar a espessura do material e comprimento da junta soldada. [24]

2.4.2. Entrega térmica

Para a maioria dos aços, o arrefecimento abrupto da soldadura deve ser evitado, devido ao risco de endurecimento excessivo e fissuração. Por esta razão, dependendo do tipo de material, espessura e entrega térmica, pré-aquecimento e manutenção da temperatura pode ser necessário.

A entrega térmica durante a soldadura pode ser vista como um dos principais fatores que influenciam as propriedades das juntas de aços ferríticos e ferrítico-austeníticos.

É caracterizada por ser um indicador do rácio de energia térmica sobre tempo de ciclo durante a soldadura, sendo que a sua unidade é kJ/mm.

O valor da entrega térmica deve ser calculado conforme a seguinte expressão:

$$Q = k \frac{U \times I}{v} \times 10^{-3} \text{ kJ/mm} \quad (2)$$

Em que:

Q: Entrega térmica

k: eficiência térmica associada ao processo de soldadura

U: voltagem do arco elétrico (Volt)

I: Intensidade de corrente do arco elétrico (Ampere)

v: Velocidade de soldadura (mm/s)

Conforme é possível deduzir da expressão a entrega térmica é um indicador que resulta diretamente dos parâmetros de soldadura empregues no processo, voltagem, intensidade de corrente e velocidade de avanço da soldadura.

Utilizando este indicador passa a ser possível, de uma forma mais clara, relacionar as propriedades das juntas com os parâmetros utilizados durante a soldadura. [22]

2.5. Soldadura de aços de alta resistência

Conforme elaborado nos subcapítulos anteriores, existem vários tipos de aços de elevada resistência que têm conceitos diferentes na sua produção, ou seja, diferentes maneiras de desenvolver as propriedades resistentes do material. Isso leva à a que diferentes aspetos tenham de ser tidos em consideração para a soldadura de cada um. [25]

2.5.1. Soldadura de aços de grão fino

Os aços de grão fino são normalmente caracterizados por um processamento termomecânico com adição de micro-ligantes, que possuem uma melhoria de propriedades devido a grande quantidade de fronteiras de grão que formam no material, impedido a movimentação de deslocações.

Nestes aços existem dois problemas principais que podem ocorrer devido à execução de soldadura.

Em primeiro lugar pode verificar-se a perda de propriedades mecânicas devido à taxa de arrefecimento da soldadura. Deve ser objetivo da soldadura que as propriedades da junta sejam, pelo menos, semelhantes às propriedades originais do aço a soldar. Nestes aços, caso haja temperatura em excesso durante a soldadura, o arrefecimento será mais lento, e consequentemente o aço será menos resistente. Assim é necessária uma atenção especial ao processo de arrefecimento, para que este não seja demasiado lento ou demasiado rápido.

Em segundo lugar, pode dar-se o crescimento excessivo do grão na ZTA por consequência do calor fornecido à junta.

Conclui-se, portanto, que a utilização de calor excessivo nestes aços pode danificar as suas propriedades base. Normalmente restringe-se o valor da entrega térmica para a soldadura destes aços a 2,5 kJ/mm, tendo por referência chapas de 15mm.

Em contrapartida, a utilização de pouco calor durante a soldadura, isto é, de parâmetros muito baixos, ou uma velocidade muito elevada, pode levar a arrefecimentos demasiado rápidos e a formação de fases metaestáveis frágeis em demasia. No entanto, de um modo geral, os aços termomecânicos têm uma boa capacidade de resistir à perda de tenacidade e endurecimento excessivo pois possuem níveis de carbono equivalente muito baixos, o que faz deles aços altamente soldáveis.

Normalmente a correta gestão do calor de soldadura nestes aços, pela entrega térmica e medição das temperaturas de interpasso consegue-se facilmente resolver os problemas de soldadura associados a estes materiais. [5]

2.5.2. Soldadura de aços temperados

Da mesma forma que o alumínio, os aços temperados podem sofrer uma redução significativa das suas propriedades mecânicas quando soldados, devido à alteração da microestrutura na ZTA, caso o calor durante a soldadura não seja controlado.

Diferentes tipos de microestruturas são formados tanto na zona do cordão soldado como na ZTA adjacente. Esta situação deve-se às mudanças de fase que ocorrem devido ao gradiente de temperaturas máximas que acontece durante a soldadura, sendo as zonas de temperatura entre os 800°C e os 500°C aquelas em que se verifica a maior dispersão [26]. A figura 17 é uma representação esquemática das possíveis microestruturas que se podem encontrar numa junta típica destes aços.

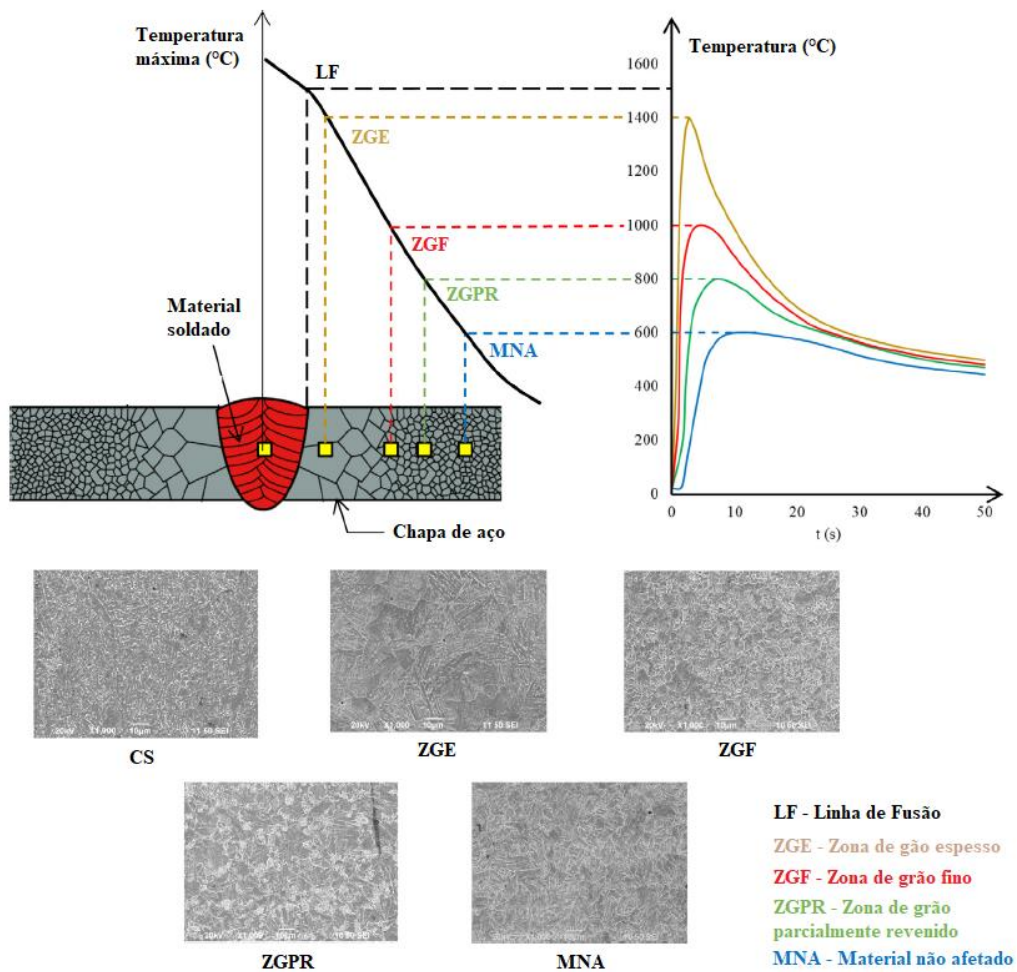


Figura 17 – Variação da microestrutura numa junta soldada de aço temperado [26]

Esta variação drástica de microestruturas, e conseqüentemente de propriedades, faz com que durante o processo de soldadura se criem grandes zonas de concentração de tensões que podem conduzir a fissuração durante o arrefecimento.

Foi concluído que a fissuração no arrefecimento pode ser controlada mantendo a entrega térmica próxima de valores na ordem de 1 kJ/mm. [25] [26]

Outro fator que é importante no controlo da fissuração no arrefecimento é o fator de forma da junta, que é dado pela relação entre profundidade e largura do cordão tal como mostrado na figura 18.

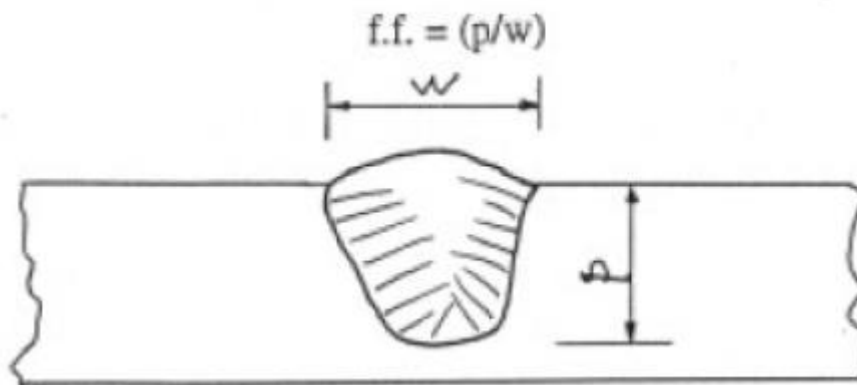


Figura 18 - Fator de forma [27]

Este fator de forma deverá andar o mais próximo possível de 1. Uma vez que a solidificação da junta se dá de fora para dentro, ou seja, da zona de temperatura inferior para a superior, se o material não tiver ductilidade suficiente para absorver as deformações do material, à medida que este vai solidificando as tensões serão cada vez maiores, e poderá dar-se o fenómeno de fissuração a meio. Outra situação que também é de possível ocorrência é o caso de existirem impurezas em demasia como enxofre e fosforo, que tendem a segregar e solidificar no final. Apesar de tudo este último fator não é uma grande preocupação uma vez que os aços de elevada resistência têm inerentes uma produção e controle de composição química muito apertado.

Fazendo uso de pré-aquecimento, controlo da entrega térmica e um design de junta adequado é possível mitigar este fenómeno de fissuração, pois diminui-se a possibilidade de formação de martensite, devido ao arrefecimento mais lento, o que consequentemente diminui a quantidade de tensões no material. [27] [22]

Outro perigo associado à soldadura dos aços temperados é a fissuração a frio ou induzida pela presença de hidrogénio, que podem aparecer até 48 horas depois da execução da soldadura. A figura 19 mostra o aspeto de uma peça onde ocorreu fissuração a frio.

Para este tipo de fissuração acontecer terão de ser conjugados os seguintes fatores:

1. Presença do hidrogénio - Poderá advir de humidade na junta ou nos materiais de adição.
2. Tensões de tração a atuar na junta – Que se tornam extremamente elevadas devido à baixa ductilidade destes aços.
3. Presença de uma microestrutura suscetível - Como é o caso da muito presente martensite nestes aços
4. Baixas temperaturas



Figura 19 - Fissuração a frio

Devido ao aumento da temperatura na soldadura, a solubilidade do hidrogénio no metal é elevada, sendo que esta é muito mais elevada na austenite que na ferrite. O hidrogénio difunde-se na ZTA e após a mudança de fase este fica retido em pequenas descontinuidades entre grãos passando à fase molecular. Esta acumulação de H_2 origina grandes pressões de ultimamente conduzem à fissuração. [27]

Um dos métodos de mitigação deste tipo de fissuração é o pré-aquecimento do material de base, permitindo que o hidrogénio se difunda sem causar danos. Outro método que deve ser usado em conjunto com o anterior é a utilização de consumíveis (elétrodos, revestimentos e fluxos) com baixo teor de hidrogénio.

De notar que para qualquer um dos fenómenos de fissuração referidos o pré-aquecimento deve ser mantido dentro de limites para evitar demasiada alteração da microestrutura na ZTA e perda de resistência. [25]

3. Procedimento experimental

Neste capítulo são apresentados os materiais e os ensaios/técnicas utilizados/as para caracterizar as várias soldaduras, bem como o respetivo enquadramento normativo.

3.1.1. Material de base

O material base utilizado no presente estudo foi uma chapa de 2mm de um aço *Dual Phase* (de duas fases) conformado a frio de designação comum CRDP 800.

As suas propriedades mecânicas, antes da intervenção por soldadura, apresentam-se na tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades Mecânicas do aço CRDP 800

CRDP 800	
Tensão de cedência (MPa)	420 – 550
Tensão de rotura (MPa)	780 – 900
Extensão na rotura (%)	14

O material foi disponibilizado pela empresa KIRCHHOFF Automotive Portugal S.A.

Este material é normalmente utilizado na indústria automóvel, mais especificamente na produção de dispositivos estruturais de segurança. Conforme descrito no capítulo 2.1.4, este material passa por um processo de tratamento térmico especial que lhe confere uma estrutura de duas fases. Uma fase ferrítica que lhe atribui um elevado grau de confortabilidade, e uma estrutura martensítica que lhe atribui maior resistência mecânica.

De forma a possibilitar uma análise clara da influência da variação da intensidade de corrente nas propriedades do material soldado, foram definidos três patamares de intensidade de corrente para cada processo de soldadura estudados nesta tese.

3.2. Soldadura TIG

Para a produção dos provetes por soldadura TIG, foi considerado como guia a norma EN 15614-1 [28], que rege a qualificação para utilização na indústria de procedimentos de soldadura por arco elétrico. Esta norma serviu também de base de consideração para a escolha dos ensaios a

levar a cabo para melhor caracterizar este processo, considerando quais seriam as variáveis essenciais aplicáveis em casos reais.

Tendo em conta a aplicação desta norma concluiu-se que os ensaios mais importantes a realizar seriam os ensaios de tração, dureza, análise macrográfica e micrográfica.

No caso do ensaio de impacto, este poderia também ser uma opção importante, no entanto, devido à espessura reduzida da chapa, não foi possível a sua realização.

Tratando-se de uma chapa fina de 2mm, não foi possível utilizar uma gama de parâmetros muito abrangente. Tanto para o processo TIG como o processo de soldadura por resistência, verificou-se uma limitação no uso de uma corrente baixa pautada pela intensidade mínima a que era possível obter uma soldadura eficaz/com bom apeto, e também uma limitação na escolha do valor de corrente superior pelo ponto em que a soldadura tende a vaziar o material.

3.2.1. Registo de parâmetros de soldadura

Sendo o material de base uma chapa de 2mm, e por isso de espessura relativamente reduzida, não foi necessária a abertura de chanfro para a execução das soldaduras. Deste modo foi possível a execução de soldaduras autogéneas, ou seja, sem material de adição. Assim, podemos ter a certeza de que as eventuais alterações às propriedades mecânicas da junta dependem exclusivamente dos parâmetros utilizados, uma vez que não há mistura de materiais com composições químicas diferentes. Tal acontece normalmente nas soldaduras onde é utilizado material de adição, seja ele sobre forma de vareta ou fio.

Tendo em conta as especificações de soldadura apresentadas de seguida, foi possível obter uma junta “sã” com apenas uma passagem do arco elétrico de cada lado.

As soldaduras TIG foram realizadas variando a corrente de soldadura 3 vezes: 100, 110 e 125 A. As tabelas 4, 5 e 6 resumem os parâmetros de soldadura usados na união das chapas para as 3 correntes.

Tabela 4 - Parâmetros soldadura 100 A

Processo	142
Técnica	Corrido
Polaridade	DC -
Amperagem [A]	100
Tensão [V]	12
Velocidade de soldadura [mm/s]	4,03
Entrega térmica [kJ/mm]	0,18



Figura 20 – Soldadura 100 Amperes

Tabela 5 - Parâmetros soldadura 110 A

Processo	142
Técnica	Corrido
Polaridade	DC -
Amperagem [A]	110
Tensão [V]	12,5
Velocidade de soldadura [mm/s]	4,31
Entrega térmica [kJ/mm]	0,19

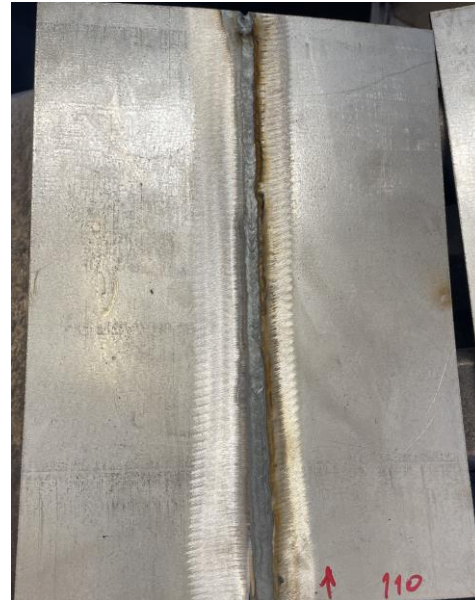


Figura 21 – Soldadura 110 Amperes

Tabela 6 - Parâmetros soldadura 125 A

Processo	142
Técnica	Corrido
Polaridade	DC -
Amperagem [A]	125
Tensão [V]	13
Velocidade de soldadura [mm/s]	4,83
Entrega térmica [kJ/mm]	0,20

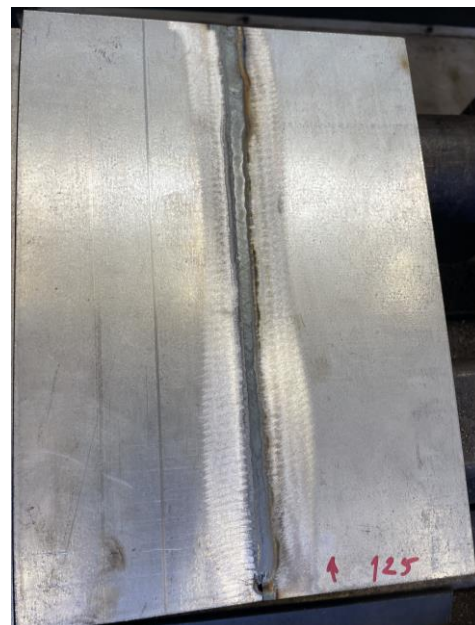


Figura 22 – Soldadura 125 Amperes

Tendo em conta que a soldadura TIG é um processo manual e que a velocidade de soldadura e tensão variam consoante o manuseamento da tocha, será importante referir que se tentou

manter iguais, dentro do possível, todos os parâmetros de soldadura, com exceção à intensidade de corrente e conseqüentemente voltagem.

3.2.2. Extração de provetes

Tendo em conta os ensaios a levar a cabo os provetes foram extraídos de acordo com a figura 23.

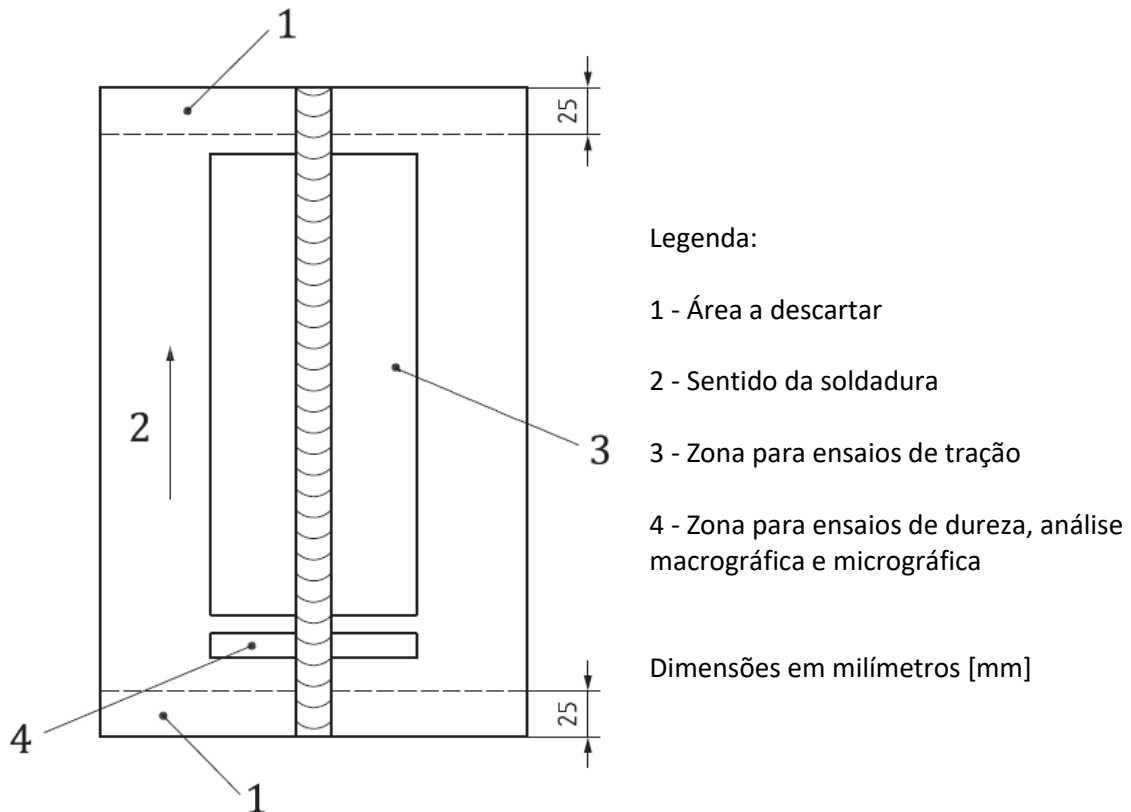


Figura 23 – Esquema para extração de provetes

De acordo com o que exige a norma, o primeiro provete no a ser extraído segundo o sentido da soldadura, deverá ser o provete de análise de durezas. Uma vez que na zona inicial da soldadura a chapa está mais fria, o arrefecimento ocorre mais depressa, influenciando diretamente a dureza.

Desta forma, em cada uma das chapas, foi extraído um provete da zona 4 para ensaios de dureza, e três provetes da zona 3 para ensaios de tração.

3.2.3. Descrição dos ensaios realizados

Para a caracterização das juntas soldadas pelo processo TIG foram levados a cabo os seguintes ensaios:

➤ **Ensaio de tração**

O ensaio de tração foi executado de acordo com a norma EN ISO 4136 – *Destructive tests on welds in metallic materials – Transverse tensile test* [29], à temperatura ambiente.

Após o corte dos provetes da chapa, estes foram maquinados até atingirem a forma regulamentar apresentada no esquema da figura 24.

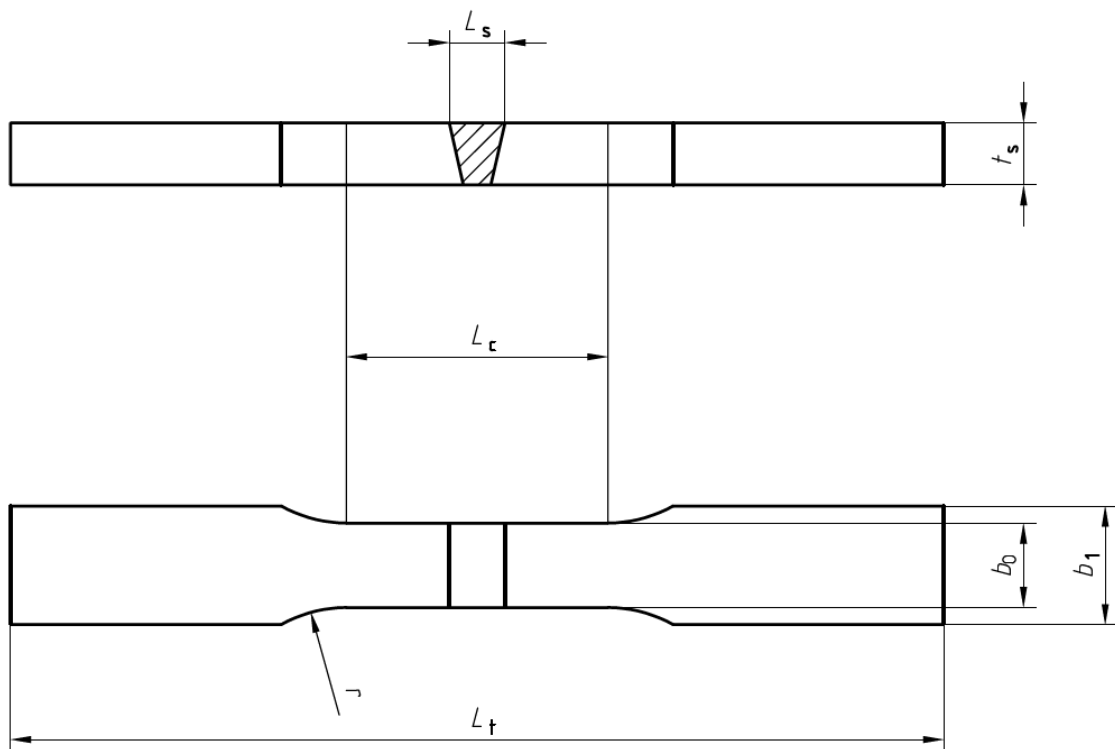


Figura 24 - Provette de tração TIG

Sendo:

L_s – Largura do cordão de soldadura: Para este valor foram adotados **30mm**, de forma a abranger toda a área do cordão de soldadura e zona termicamente afetada.

L_c – Valor mínimo de $L_s + 60\text{mm}$, por imposição da norma.

t_s – Espessura do provete: **2mm**. Para chapas inferiores a 30mm esta espessura deve ser igual à da chapa soldada.

b_0 – **12mm**: Imposição normativa para chapas de espessura menor ou igual a 2mm.

b_1 – **24mm**: $b_0 + 12\text{mm}$, por imposição da norma.

L_t – Foi adaptado de acordo com as maxilas do equipamento a ser utilizado.

J – Raio de **25mm**.

Será importante referir que as chapas foram inicialmente cortadas a laser, no entanto depois foi realizada sua maquinação para chegar às dimensões finais assegurando que as propriedades das chapas dos provetes não foram alteradas devido ao calor gerado no processo laser.

O ensaio de tração permite a caracterização mecânica do material através da obtenção direta da tensão máxima (σ_m), da tensão limite convencional de proporcionalidade a 0,2%, alongamento após rotura (A) e estirção (Z). As duas últimas propriedades foram calculadas de acordo com as fórmulas (3) e (4).

$$A = \frac{l_u - l_0}{l_0} \quad (3)$$

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100 \quad (4)$$

A obtenção do gráfico tensão-deformação permitiu obter o modulo de elasticidade (E) pelo declive obtido na equação da curva no regime elástico e permitiu calcular o módulo de resiliência (U_r) e tenacidade (U_t) do material, que foram obtidos com as fórmulas (5) e (6).

$$U_r = \frac{\sigma_{0,2\%}^2}{2 \times E} \quad (5)$$

$$U_t = \frac{\sigma_r + \sigma_{0,2\%}}{2} \times \varepsilon_f \quad (6)$$

Através da análise dos elementos referidos, pretende-se assim caracterizar o material após ser submetido a operação de soldadura e comparar com as características mecânicas previstas na ficha técnica.



Figura 25 - Equipamento de ensaio de tração

O equipamento utilizado para o ensaio foi a máquina Shimadzu 100kN.

Foi utilizado adicionalmente um extensómetro ótico onde é possível ver o seu processo de calibração na figura 25.

Todos os ensaios foram realizados a uma velocidade de 2mm/min, à exceção do provete 100T1, que foi realizado a 5mm/min. A velocidade 5mm/min foi utilizada no primeiro provete como teste inicial, e foi alterada para 2mm/min após se verificar muito rápida. Na análise das diferentes propriedades obtidas nos ensaios de tração só consideraram os ensaios realizados com uma velocidade 2 mm/min.

O levantamento das medições iniciais do provete e extensómetro apresenta-se na tabela 7:

Tabela 7 - Medições iniciais, ensaio de tração

Provete	Largura (valor médio)	Extensão inicial (L_e)
100-T1	12,63 mm	50,05 mm
100-T2	12,64 mm	50,38 mm
100-T3	12,54 mm	50,58 mm
110-T1	12,65 mm	49,53 mm
110-T2	12,66 mm	49,62 mm
110-T3	12,56 mm	50,48 mm
125-T1	12,59 mm	50,96 mm
125-T2	12,65 mm	50,86 mm
125-T3	12,65 mm	50,17 mm

➤ **Análise macrográfica, micrográfica e medição de dureza**

Para a realização destas análises foram tidas em consideração as indicações da norma ISO 17639: “*Destructive tests on welds in metallic materials — Macroscopic and microscopic examination of welds*” [30].

Assim amostras de soldadura foram maquinadas no sentido de possibilitar a análise da sua secção transversal, tal como apresentado na figura 26.



Figura 26 - Amostras macrografia, micrografia e durezas

Posteriormente foi necessária a execução de lixagem e polimento das amostras, de forma a possibilitar uma análise clara da superfície.

Neste processo foram utilizadas três lixas de granulometria: 220, 500 e 1000.



Figura 27 - Lixagem das amostras

No processo de polimento foram utilizados abrasivos de 3 μm e 1 μm .

De forma a enaltecer as diferentes zonas provocadas pela execução de soldadura, foi executado um ataque químico. Para tal as amostras foram mergulhadas numa solução de nital a 4%, que consiste numa solução de etanol 96% de ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) e 4% de ácido nítrico (HNO_3)

Posteriormente ao processo de ataque químico, o aspeto da soldadura foi observado com recurso a uma lupa de bancada e a morfologia observada em microscópio ótico.

Após as análises macrográfica e micrográfica, realizaram-se os ensaios de dureza, de acordo com a norma ISO 9015: “*Destructive tests on welds in metallic materials – Hardness testing*” [31] e ISO 6507 “*Metallic materials – Vickers hardness test*” [32]. A carga usada nos ensaios foi de 49,03 N, fornecendo os resultados de dureza em HV5 de acordo com o método/dureza de Vickers.

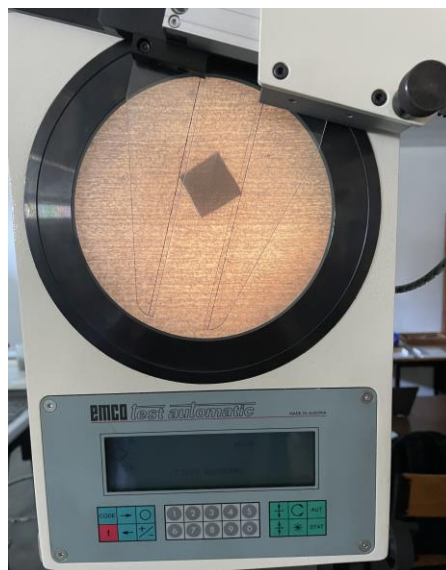


Figura 28 - Ensaio de durezas

O perfil de dureza foi obtido iniciando os ensaios no substrato virgem, passando pela zona termicamente afetada, cordão de soldadura, até voltar de novo ao substrato. Durante a

execução deste ensaio, procurou-se respeitar a distância mínima entre indentações de 0,5mm ao mesmo tempo que se registavam medições das várias zonas da junta soldada. Para obter o perfil de dureza foram realizadas 14 medições.

Será importante referir que as diferentes zonas dos cordões estudados têm diferentes tamanhos, devido à mudança de parâmetros e ao balancear da tocha durante a soldadura. Sendo que a deslocação do indentador foi ajustada de forma manual, é possível que os perfis que se venham a obter sejam mais difíceis de comparar, em função dos números de medições em cada uma das zonas.

3.3. Soldadura por resistência - Pontos

Para a produção dos provetes pelo processo de resistência foi seguida a norma EN 15614-12 [33], que rege a qualificação destas soldaduras para este tipo de processo de soldadura. Da mesma forma que no processo anterior, esta norma serviu também de base de consideração quais os ensaios a levar a cabo para melhor caracterizar este processo, considerando quais seriam as variáveis essenciais aplicáveis em casos reais. Assim, optou-se pela realização dos ensaios de corte por tração, arrancamento e durezas. Adicionalmente, fez-se também uma análise macrográfica e micrográfica da junta soldada

3.3.1. Registo de parâmetros de soldadura

Tendo por base a utilização de juntas soldadas sobrepostas, este processo é bastante adequado para a soldadura de chapas de baixa gama de espessuras, na qual a chapa disponibilizada de 2mm se enquadra perfeitamente. Conforme explicado anteriormente, sendo a fusão da chapa conseguida através do efeito de joule, não podem ser utilizadas chapas com espessuras muito elevadas.

Na tabela 8 apresentam-se os parâmetros utilizados nas soldaduras dos provetes. Sendo que a premissa base foi a de variação da amperagem de 50 Amperes, 72 Amperes e 95 Amperes.

Tabela 8 – Parâmetros de soldadura por pontos

	Provetes 50	Provetes 72	Provetes 90
Força de aperto (kN)	10	10	10
Tempo aperto pré-soldadura (ciclos)	6	6	6
Tempo de soldadura (ciclos)	33	33	33
Amperagem	50	72	90

A medição em ciclos do tempo deve ser entendida como 1 ciclo = 1/50 de segundo, sendo a frequência da corrente, neste caso, 50 Hz.

A soldadura por pontos é um processo com um grau de automação superior ao TIG, deste modo, foi possível fixar todos os parâmetros, com exceção à corrente, que foi variada de propósito.

Os parâmetros que se mantiveram fixos foram selecionados após testes preliminares. No entanto, na maioria dos processos de soldadura, a variação dos diferentes parâmetros está

interligada entre si, de forma a promover um equilíbrio, ou seja, à medida que um parâmetro varia os outros devem variar em conformidade. No caso do processo TIG, e outros processos manuais, este ajuste é feito através do manuseamento da tocha, quer seja na velocidade de avanço da mesma, quer seja na distância à peça.

Uma vez que não se trata de um processo por arco elétrico manual, em que os parâmetros dependem não só do manuseamento da tocha mas também da vertente gasosa da condução da corrente. No processo por resistência, o circuito elétrico é mais simples e, por ser um processo automático, o ajuste dos parâmetros depende apenas da fonte de potencia.

No entanto, tal não quer dizer que, não tenha de existir também uma harmonia entre as várias configurações. Assim não foi possível obter uma gama de parâmetros muito abrangente, pois mantendo fixos todos os outros parâmetros, não é possível uma variação muito ampla da intensidade.

3.3.2. Descrição dos ensaios realizados

No caso das soldaduras por resistência, não foi necessária a extração de provetes a partir de uma chapa soldada previamente. Neste caso, foi possível soldar já os provetes na sua forma final consoante o ensaio a realizar.

Para a caracterização das juntas soldadas pelo processo de soldadura por resistência foram levados a cabo os seguintes ensaios:

➤ Ensaio de corte por tração

A realização deste ensaio seguiu a norma ISO 14273: “Resistance welding – Destructive testing of welds - Specimen dimensions and procedure for tensile shear testing resistance spot, seam and embossed projection welds” [34].

A preparação dos provetes foi feita de acordo com a figura 29.

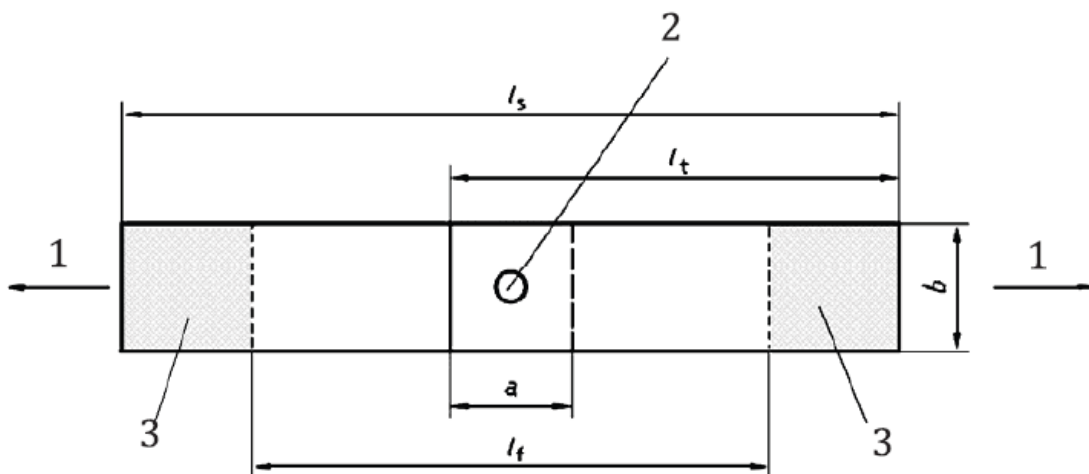


Figura 29 - Proвете tração resistência

Sendo a espessura de 2mm:

a – Sobreposição: **45mm**.

b – Largura do provete: **60mm**.

l_s – Comprimento do provete: **230mm**.

l_f – Comprimento entre zonas de fixação de mandíbulas **105mm**.

l_t – Comprimento da chapa antes da soldadura: **138mm**.

1 – Direção de ensaio.

2 - Soldadura.

3 - Zonas de fixação de mandíbulas.



Figura 30 - Ensaio de corte por tração

A velocidade de ensaio utilizada foi de 2mm/min.

➤ **Ensaio de arrancamento**

A realização deste ensaio seguiu a norma ISO 14270: “Resistance welding – Destructive testing of welds – Specimen dimensions and procedure for mechanized peel testing resistance spot, seam and embossed projection welds” [35]

A preparação dos provetes foi feita de acordo com a figura 31.

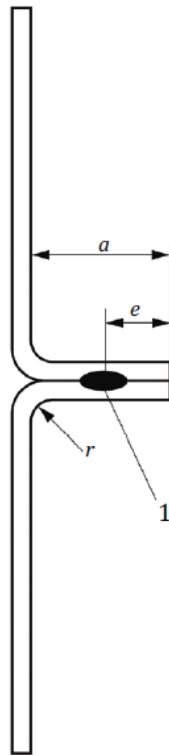


Figura 31 - Provete ensaio de arrancamento

Sendo:

a – Comprimento da flange: **50mm**.

b – Largura do provete: **50mm**.

e – Distancia da soldadura ao bordo: **25mm**.

1 – Soldadura.



Figura 32 - Ensaio de arrancamento

A velocidade de ensaio foi de 10mm/min, com exceção aos provetes 50T1 e 50T2, onde foram usadas velocidades de 2mm/min, e 10mm/min para o provete 50T1 e 20mm/min e 10mm/min para o provete 50T2. Estas velocidades foram inicialmente testadas para otimização dos parâmetros para ensaios finais.

➤ **Ensaio de durezas, análise macrográfica e micrográfica**

No que à avaliação da dureza e microestrutura das juntas soldadas, de uma forma geral, foi seguido o mesmo procedimento utilizado para os provetes soldados a TIG.

Considerando que se tratam de juntas sobrepostas, para o traçado dos perfis de dureza, as medições foram feitas aos pares entre a chapa superior e inferior, sempre no mesmo alinhamento transversal sendo retiradas 16 (8+8) medições.

4. Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios descritos anteriormente de forma a retirar as conclusões sobre o efeito da variação da intensidade de corrente para os processos de soldadura usados.

4.1. Soldadura TIG

Apesar de o objetivo principal deste trabalho ser o estudo dos efeitos da variação da intensidade de corrente, na análise das soldaduras por arco elétrico, é necessário considerar toda a conjuntura de parâmetros utilizados, de forma a quantificar melhor o calor que é empregue nas soldaduras e de que forma este altera o material. Adicionalmente, temos ainda de considerar que estamos a analisar um processo de soldadura manual, onde a variação dos parâmetros depende também do manuseamento da tocha por parte do soldador, tornando praticamente impossível singularizar a variação da intensidade de corrente na análise, mantendo todos os outros parâmetros estáveis.

Assim a forma mais correta de o fazer, será utilizar o valor da entrega térmica como principal fator de comparação com os vários resultados obtidos nas análises levadas a cabo.

De acordo com o referido no capítulo 2.4.2, na equação 2, podemos ver que a intensidade de corrente é um fator que faz parte do cálculo desta grandeza, sendo que se verifica uma relação proporcional entre os dois. No entanto, a título de exemplo, basta que a velocidade de avanço da tocha aumente, no momento da soldadura, para que a entrega térmica baixe e consequentemente o calor empregue também.

4.1.1. Ensaio de tração

Os resultados dos ensaios de tração (tensão de cedência/rotura, módulo de elasticidade, alongamento, estrição e módulo de tenacidade/resiliência) realizados aos provetes TIG em função da corrente utilizada apresentam-se na tabela 9. 3 repetições dos ensaios foram realizadas para cada condição de corrente para assegurar a reprodutibilidade dos resultados. Para fácil identificação as amostras foram identificadas como XTY, em que X representa o valor de corrente utilizado e Y o número do teste realizado.

Tabela 9 – Resultados ensaios de tração

Provete	σ_r (MPa)	$\sigma_{0,2\%}$ (MPa)	A	E (GPa)	Z(%)
100T1	693,10	465,34	0,02	209,37	2,61
100T2	705,11	435,29	0,03	181,45	2,48
100T3	684,76	561,01	0,02	187,00	1,14
110T1	750,87	481,48	0,07	184,28	11,90
110T2	765,28	435,04	0,07	172,37	11,98
110T3	770,25	521,74	0,07	198,54	11,36
125T1	771,61	453,21	0,08	183,92	12,02
125T2	767,26	462,67	0,08	163,44	12,43
125T3	752,93	483,08	0,07	175,48	12,51

Para uma melhor interpretação dos resultados a tabela 10, apresenta a média dos resultados dos vários ensaios para cada condição de corrente.

Tabela 10 - Média dos resultados do ensaio de tração

Provete	σ_r (MPa)	$\sigma_{0,2\%}$ (MPa)	A	E (GPa)	Z(%)
100A	694,33	487,22	0,02	192,61	2,08
110A	762,13	479,32	0,07	185,06	11,75
125A	763,93	466,32	0,08	174,28	12,32

Tal como se pode observar a partir da tabela 10, os valores de resistência mecânica são muito semelhantes e praticamente não variam com a alteração da corrente no processo de soldadura. Este resultado seria de esperar uma vez que as soldaduras foram realizadas sem material de adição, fazendo com que a composição química do material seja a mesma. Assim, seria de esperar alguma uniformidade dos valores obtidos. Apesar de tudo, isto não quer dizer que a introdução de ciclos térmicos deste tipo não alterem a resistência mecânica do material. Devido à baixa espessura da chapa, não foi possível utilizar uma gama de parâmetro de uma abrangência tal que isso se notasse. Outro fator importante é o facto de estarmos a falar uma chapa que já tem um tratamento térmico de base, ou seja, a introdução de um novo ciclo térmico, como a soldadura, poderá sim, contrariar os efeitos pretendidos desse processo.

Relativamente à ductilidade, pela análise do alongamento estrição e módulo de elasticidade, podemos verificar que quanto maior a entrega térmica, mais dúctil é o material, uma vez que se obtêm valores superiores para o alongamento e estrição, e módulo de elasticidade inferior. Ao fornecer mais calor ao material, o tempo de arrefecimento é maior. Assim o endurecimento provocado pela variação brusca de temperatura é menos incisivo.

Outro aspeto importante a ressaltar é que considerando os critérios da norma EN 15614, nenhuma destas especificações de soldadura poderá ser aceite para utilização em ambiente de produção. A nível de características mecânicas os valores para a tensão de rotura estão abaixo dos valores originais do material, que se situa nos 780 MPa. Esta norma tem como premissa

principal que o processo de soldadura utilizado não prejudique as características mecânicas consideradas em projeto, que são as do material base.

No entanto podemos dizer que as especificações de soldadura para este material não estão totalmente incorretas, mas sim incompletas. Uma vez que este material é um aço de grão fino que contem algum teor de martensite, é possível assumir que o processo de soldadura em si poderá ter algum efeito de revenimento do material, diminuindo esse teor de forma residual nas juntas e fazendo com que o material fique ligeiramente menos resistente, ou simplesmente pelo crescimento de grão provocado pelo calor da soldadura. Desta forma, para completar a especificação de soldadura seria necessário considerar um tratamento térmico após a execução da mesma, conferindo uma tempera ao material que iria devolver a sua resistência para níveis aceitáveis.

Nas figuras 33, 34 e 35 podemos ver a compilação dos gráficos obtidos nos ensaios para cada um dos provetes.

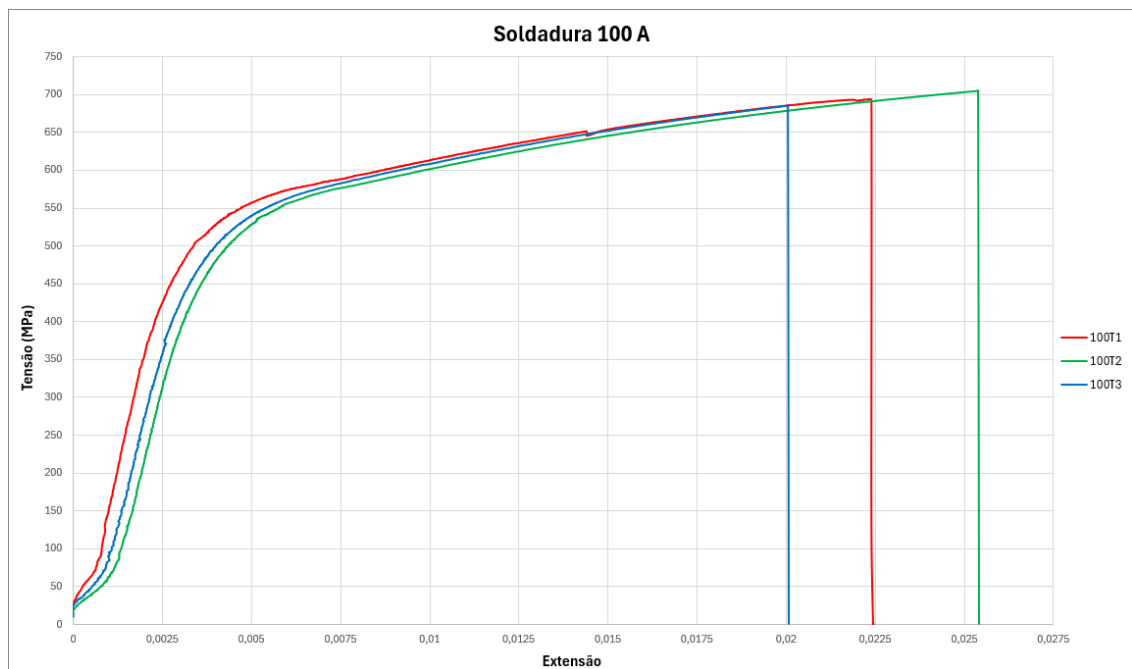


Figura 33 – Curva tensão deformação da soldadura TIG realizada com 100 A

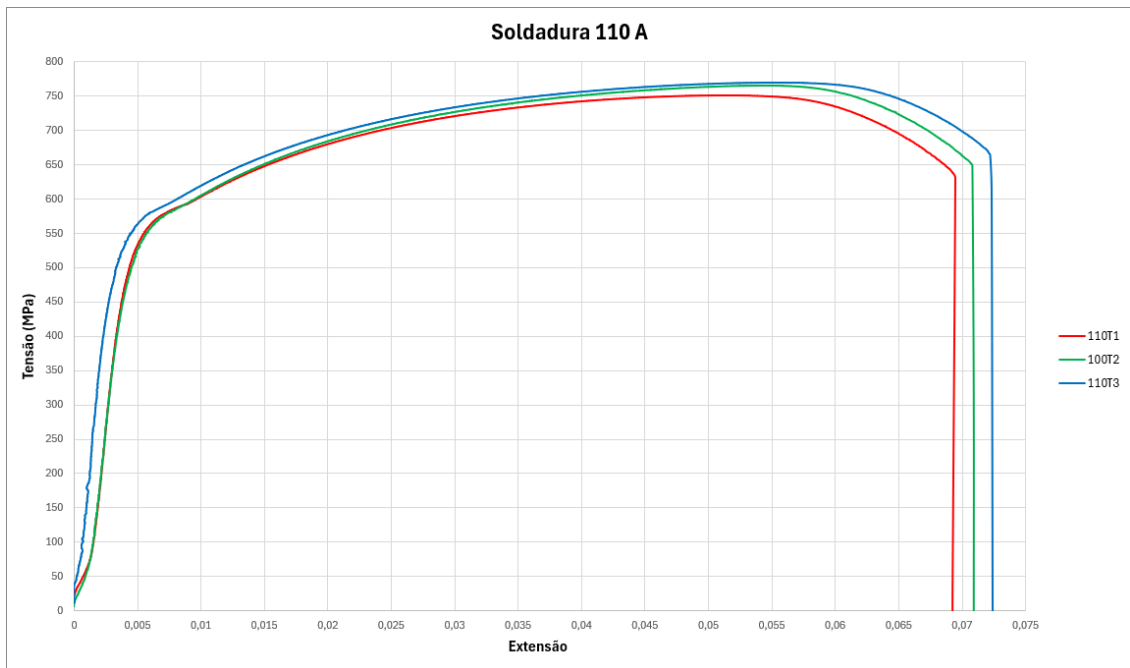


Figura 34 – Curva tensão deformação da soldadura TIG realizada com 110 A

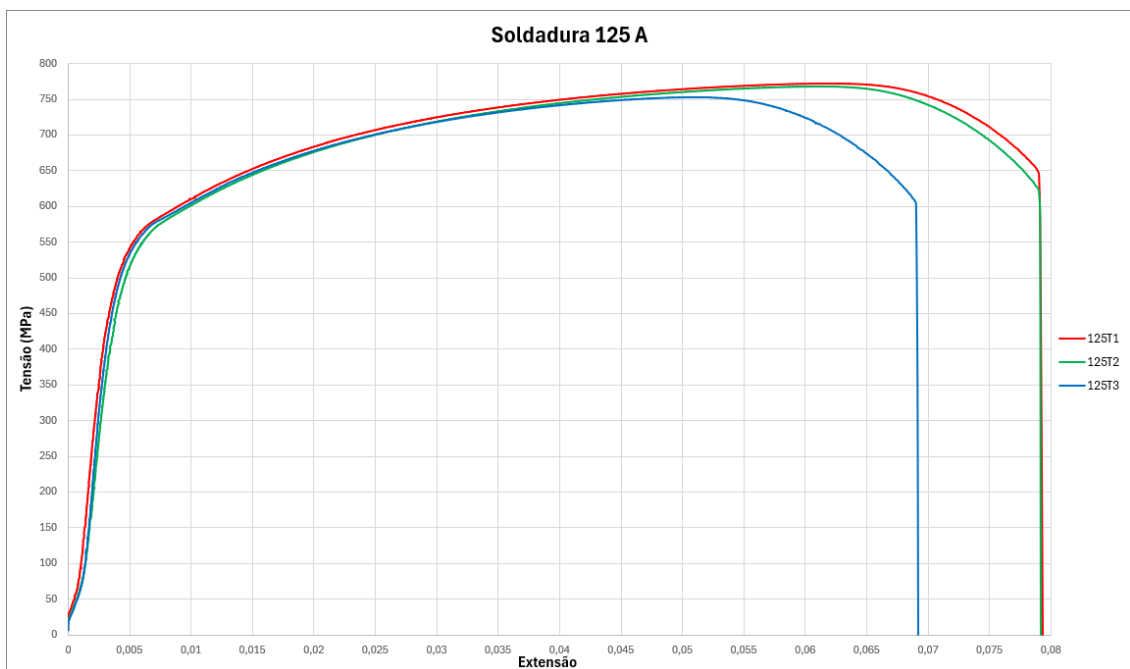


Figura 35 - Curva tensão deformação da soldadura TIG realizada com 125 A

De notar que o alongamento para a soldadura de 100 amperes é de uma ordem de grandeza inferior ao dos provetes soldados com maior amperagem. Assim considerando que os valores de tensão não são muito dispares, para um alongamento consideravelmente inferior, naturalmente iremos obter valores de resiliência e tenacidade inferiores.

De forma obter uma informação mais concreta sobre a resiliência e tenacidade das juntas soldadas, calcularam-se estas grandezas recorrendo às equações (5) e (6) apresentadas no capítulo anterior. Estes valores estão apresentados na tabela 11.

Tabela 11 - Modulo de resiliência e tenacidade

Provete	U_r	U_t
100A	2,50	13,38
110A	2,56	44,02
125A	2,64	46,70

Considerando os valores da tabela 11 podemos verificar que existe uma grande diferença nos valores de tenacidade do material em função da intensidade de corrente.

Sendo que a tenacidade é um indicador extremamente representativo no que toca à resistência à propagação de fissuras num material, será razoável concluir que esta característica está bastante relacionada com a intensidade e o calor do processo de soldadura. Será importante referir, que a ductilidade e a resistência à propagação de fissuras são características extremamente importantes no que diz respeito à construção soldada, uma vez que é necessário que o material tenha capacidade de absorver as tensões provocadas pela contração no arrefecimento dos cordões de soldadura, e que quando em serviço, as estruturas tenham capacidade de absorver esforços de fadiga provocados pela utilização, sem que eventuais defeitos se propaguem, sejam eles provenientes da soldadura ou do próprio fabrico do aço em siderurgia.

4.1.2. Dureza e microestrutura das juntas soldadas - TIG

➤ Perfis de dureza

Na Tabela 12 apresentam-se os resultados de dureza obtidos para cada um dos provetes produzidos com várias correntes de soldadura. Os valores de dureza apresentados estão expressos em HV5.

Tabela 12 - Resultados ensaio de dureza - TIG

Leitura	Soldadura 100 A	Soldadura 110 A	Soldadura 125 A
1	241	232	253
2	243	225	254
3	230	234	252
4	212	267	244
5	372	366	240
6	435	410	412
7	410	388	408
8	408	395	401
9	421	398	403
10	389	421	408
11	228	397	297
12	242	287	267
13	248	205	254
14	252	231	267

Para cada um dos casos foi assinalado a **vermelho** o valor máximo de entre as várias leituras.

Na figura 36 apresentam-se os gráficos com os respetivos perfis de dureza obtidos a partir das leituras anteriores.

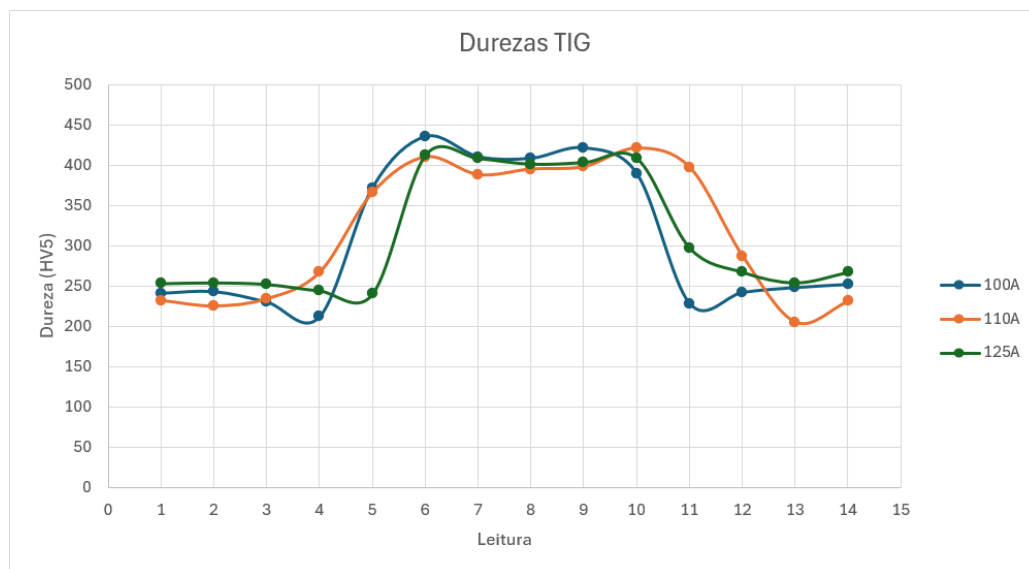


Figura 36 - Perfis de durezas TIG

De uma forma geral não se verificam grandes diferenças nos perfis de dureza obtidos. Sendo a chapa fina, não foi também possível a utilização de parâmetros maiores para se observar uma diferença mais significativa.

Podemos verificar que para todos os casos, a dureza é maior nas ZTA, depois no cordão de soldadura, e por fim, no material base. Isto é naturalmente uma consequência do ciclo térmico com arrefecimento brusco provocado pela soldadura. Na ZTA e cordão de soldadura, verificou-se uma mudança de fase no aço, e por isso a consequente formação de fases duras no arrefecimento. Sendo que a ZTA é uma zona onde existiu mudança de fase, mas não se atingiu temperatura suficiente para a fusão do material, será aí que o arrefecimento será mais rápido, e por isso terá maior dureza.

Considerando o critério de avaliação da EN 15614, uma comparação importante a fazer, será entre os valores máximos obtidos. Aqui podemos verificar que os valores decrescem com o aumento da entrega térmica. Podemos assim dizer que, de certa forma, aqui já se verifica uma indicação de que com maior calor na soldadura, maior será o gradiente térmico, e maior será o tempo de arrefecimento geral. Assim, é possível concluir, que os limites máximos de dureza nas juntas podem ser condicionados por este fator.

A variação da dureza após uma intervenção por soldadura é, naturalmente, uma consequência do ciclo brusco de aquecimento e arrefecimento provocado pelo processo. De notar que, conforme referido no capítulo 3.2.2, relativo à extração de provetes, os mesmos foram retirados da zona inicial da soldadura, considerando o sentido da mesma. Desta forma obtemos resultados mais relevantes no que diz respeito a esta análise, pois o efeito do arrefecimento

rápido é mais pronunciado quando a chapa ainda esta fria no início da soldadura. Assim os valores de dureza mais elevados serão, teoricamente, sempre extraídos dessa zona.

Da mesma forma que no resultado anterior e seguindo o raciocínio em questão, podemos concluir que quanto mais calor fornecermos ao material, seja ele sobre forma de aumento de parâmetros ou tempo de soldadura, mais longo será o período de arrefecimento, promovendo a reorganização a microestrutura e diminuindo a dureza do material. Assim podemos considerar que os resultados apresentados seguem esta linha de pensamento, em que quanto mais alta a intensidade de corrente, para velocidades de soldadura próximas, mais alta será também a entrega térmica e mais baixa será a dureza.

➤ **Análise macrográfica e micrográfica**

Os valores de dureza apresentados anteriormente podem ser complementados por uma análise de imagiologia para cada uma das zonas da soldadura – Material base, Zona termicamente afetada e cordão de soldadura.

Na figura 37, podemos ver claramente a distinção entre as zonas referidas para o provete de 125 Amperes, representativo para todas as soldaduras.

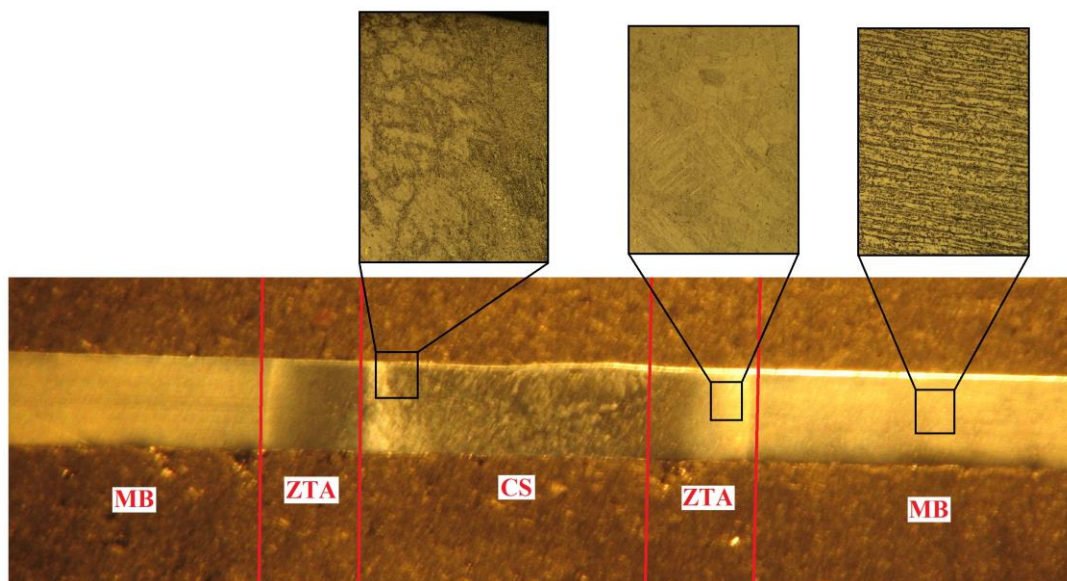


Figura 37 - Provette TIG 125A - Macro e Micro

Tendo em conta as diferentes zonas apresentadas é importante fazer também o seu enquadramento tendo em conta o respetivo perfil de durezas, sendo que na figura 38 é possível fazer essa comparação.

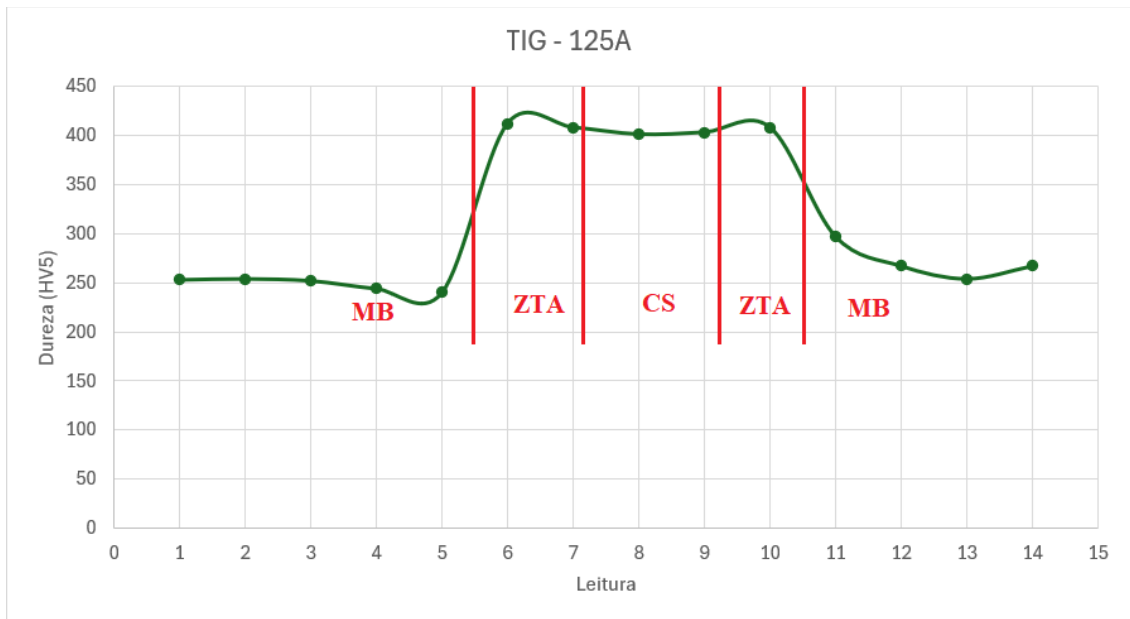


Figura 38 - Perfil de durezas TIG 125A

Como é possível verificar a dureza aumenta drasticamente quando se entra na Zona Termicamente Afetada, sendo que é a partir daqui que se verificam as mudanças de fase no material. É importante notar e justificar que as durezas são maioritariamente superiores na ZTA do que na zona do Cordão de Soldadura. Na ZTA, não se verifica fusão de material, no entanto atingem-se temperaturas na ordem dos 723°C, que é a temperatura de transição para a mudança de fase. Uma vez que nesta zona se verificam estas alterações a uma temperatura mais baixa, a mudança de fase no arrefecimento irá ser mais brusca, potenciando a formação de fases metastáveis como a martensite, com características de dureza superior, mas tenacidade inferior.

Nas figuras 39 e 40, podemos fazer a mesma análise para soldadura de 110 amperes, onde é possível de igual forma verificar um perfil de durezas coerente com as diferentes zonas evidenciadas na análise macrográfica.

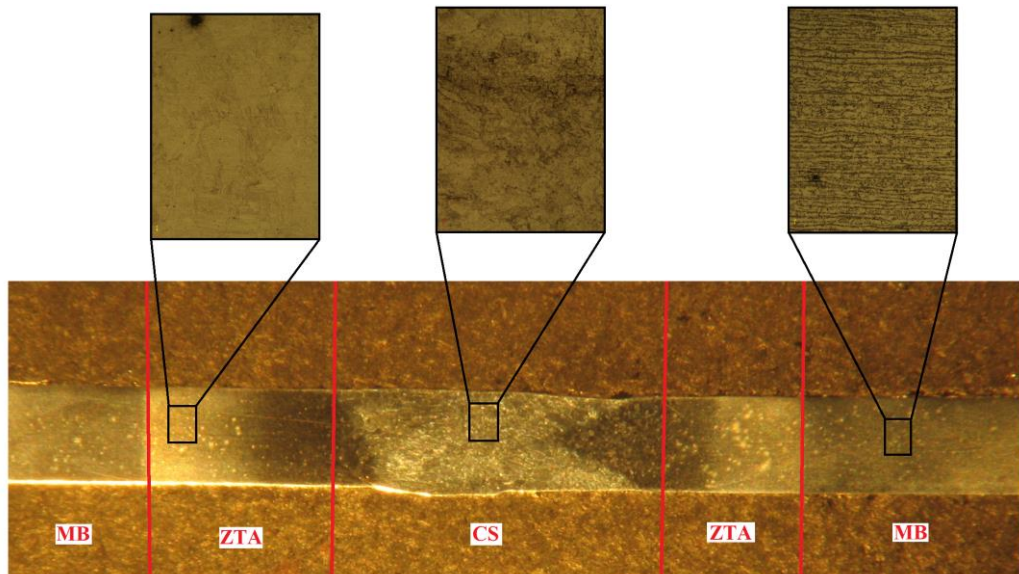


Figura 39 - Provette TIG 110A - Macro e Micro

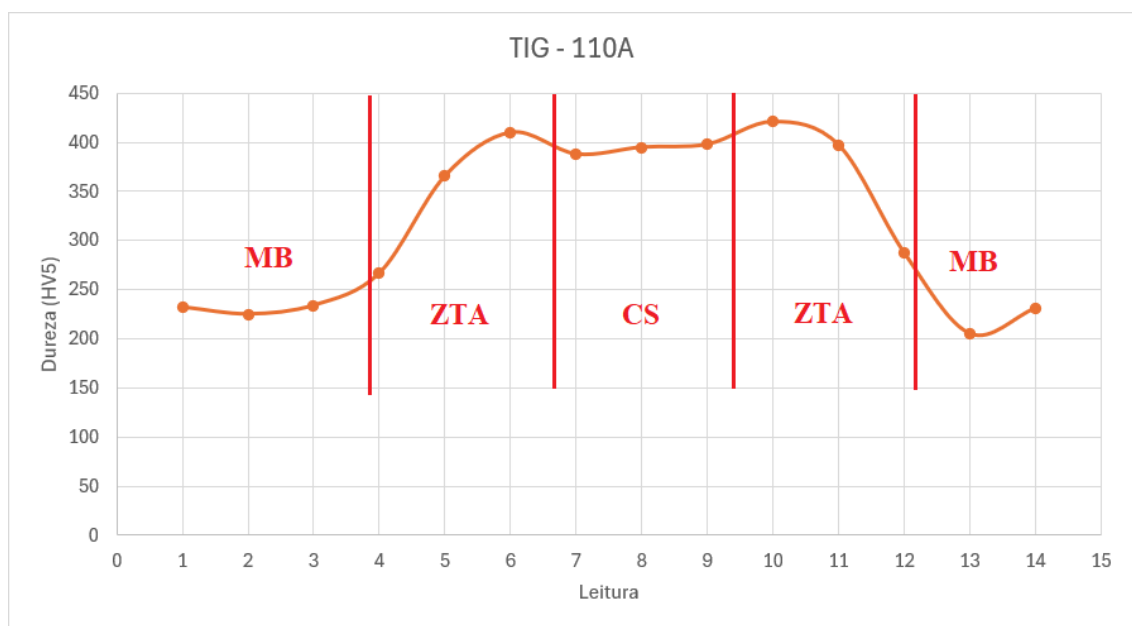


Figura 40 - Perfil de durezas TIG 110A

Nas figuras 41 e 42, repetimos a mesma análise para a soldadura de 100 amperes.

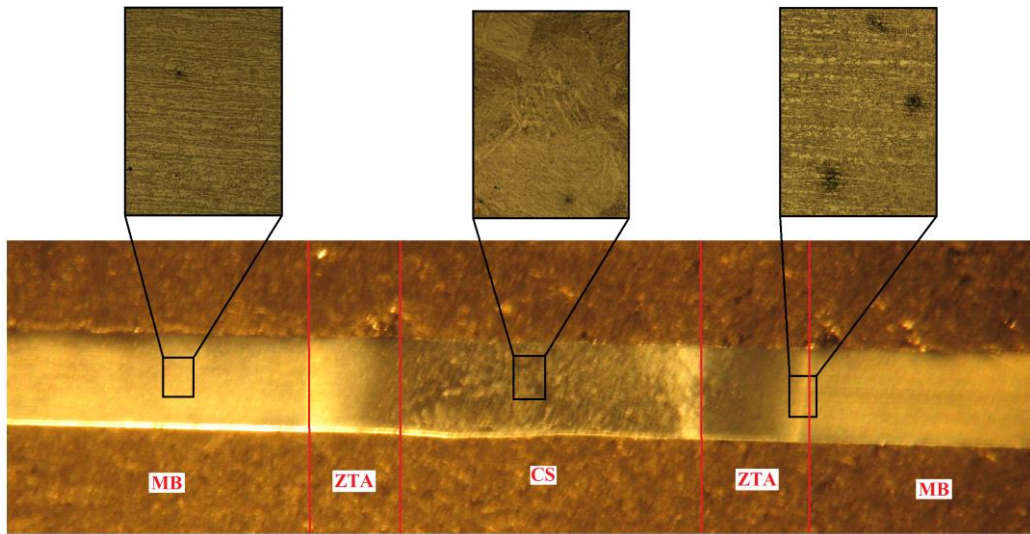


Figura 41 - Provette TIG 100A - Macro e Micro

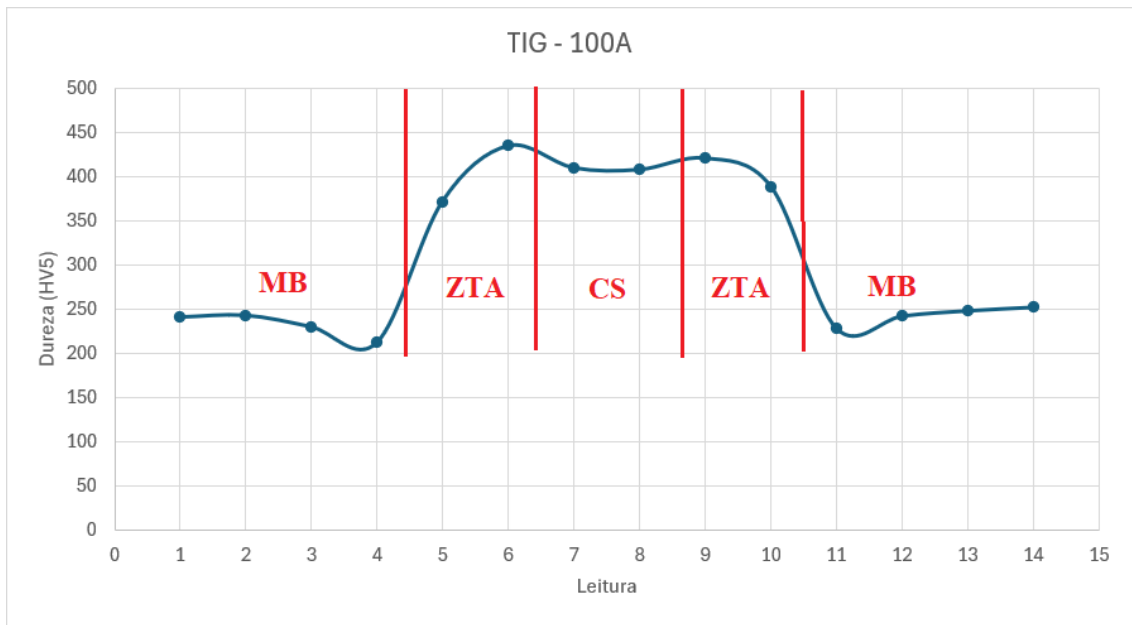


Figura 42 - Perfil de durezas TIG 100A

Na micrografia da figura 43, podemos ver com mais clareza um exemplo da formação de martensite numa das zonas termicamente afetadas, neste caso da soldadura de 125 amperes.



Figura 43 - Presença de Martensite na zona termicamente afetada (retirada do provete TIG 125A – Ampliação 200x)

Relativamente a constituintes metalográficos adicionais encontrados, podemos verificar uma estrutura dendrítica clássica na zona do cordão de soldadura conforme apresentado na figura 44.



Figura 44 - Provete TIG 125A - Micro cordão de soldadura (Ampliação 100x)

Aqui é visível a linha de fusão característica da zona de transição de material que foi totalmente fundido para não fundido. Mais à direita começamos a ver uma estrutura arredondada resultante da afetação do arco elétrico sobre o material, sendo que esta é constituída por uma zona muito agulhada que vai afunilando para o centro, na direção do arrefecimento do material que ocorre de dentro para fora. Naturalmente a ampliação desta imagem é inferior à da figura 43, para que seja possível ver a morfologia do cordão.

Caminhando mais para longe do cordão de soldadura propriamente dito, podemos ver também na figura 45, a transição do material base para a zona termicamente afetada.

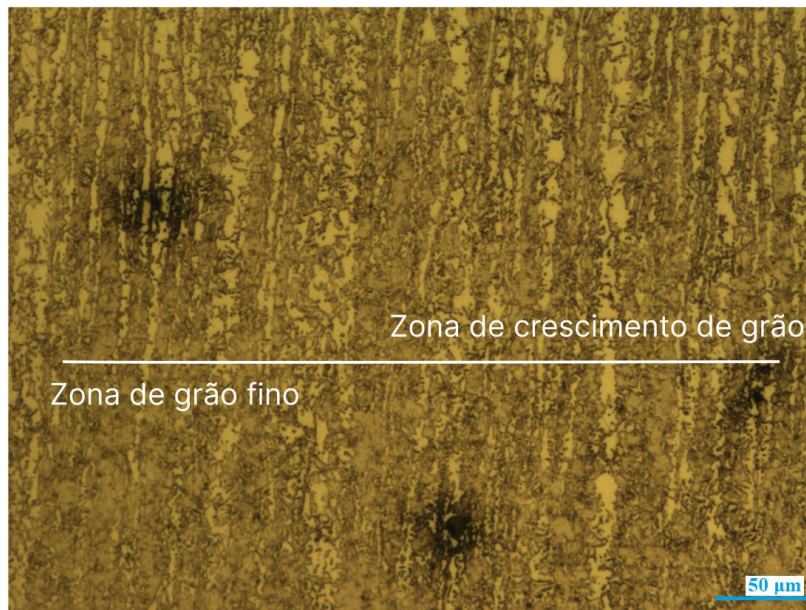


Figura 45 - Crescimento do grão na passagem do material base para ZTA (retirado do provete de 100A – Ampliação 50x)

Nesta zona, apesar de mesma ter sido afetada pelo calor, como se pode ver pelo crescimento de grão, a temperatura aqui já não foi suficiente para a ocorrência da mudança de fase, sendo que, nestes casos não se chega a formar martensite. No entanto, pode verificar-se algum endurecimento devido ao crescimento do grão, uma vez que estão ao aumentar, faz com que se diminua o número de fronteiras entre eles. Sendo que as fronteiras, são dos principais impedimentos ao deslocamento das imperfeições na estrutura cristalina, a existência de menos fronteiras faz com que aqui também se alterem, ainda que de forma mais residual, as propriedades mecânicas.

Adicionalmente resta analisar a micrografia do material base, que pode ser vista na figura 46.



Figura 46 - Provete TIG 110A - Micro material base (Ampliação 200x)

É possível verificar uma microestrutura constituída por zonas perlíticas, mais escuras, bastante características dos aços carbono. Esta estrutura é constituída por lamelas de ferrite e cementite. Adicionalmente, considerando as características técnicas do material base, as zonas mais claras da figura, representam zonas de ferrite martensite. A expressão em camadas que é visível na figura, resulta do processo de laminagem.

4.2. Soldadura de resistência - pontos

Para o caso da soldadura por pontos, tratando-se de um processo de soldadura diferente do anterior, a análise comparativa não pode ser feita pelo cálculo da entrega térmica. A utilização da fórmula referida no capítulo 2.4.2, apenas é aplicável a soldaduras por arco elétrico.

No entanto, neste caso, tal não é necessário, pois a soldadura por resistência é um processo com um grau de automação superior ao TIG. Deste modo, foi possível fixar os demais parâmetros de forma a singularizar a intensidade de corrente na análise.

De qualquer modo, o conceito teórico relativo ao calor fornecido às juntas soldadas é coerente com o processo anterior, sendo que o efeito da variação da intensidade de corrente implica diretamente maior temperatura na soldadura.

Outro aspeto importante a referir é que, nesta análise, os ensaios executados são diferentes dos da anterior, não sendo possível estabelecer uma relação direta entre os dois processos. Ainda mais porque a sua utilização na indústria tem também fins bastante diferentes.

4.2.1. Ensaio de corte por tração

A tabela 13 apresenta os valores da força de resistência ao corte obtidos nos ensaios de corte por tração dos vários provetes produzidos por variação de corrente. Para uma fácil identificação os provetes são designados por XcY, onde X diz respeito ao valor de corrente usada no processo de soldadura e Y o número do teste.

Tabela 13 - Resultados ensaio de corte por tração - Resistência

Proвете	F _r (kN)	Média (kN)
50c1	18,227	16,62348
50c2	13,197	
50c3	18,447	
72c1	24,122	24,68001
72c2	23,910	
72c3	26,007	
95c1	33,529	33,62079
95c2	34,439	
95c3	32,894	

Pela análise dos resultados pode verificar-se uma tendência clara para o aumento da resistência ao corte em função do aumento da intensidade de corrente de soldadura. Isto pode ser

justificado com duas razões principais: a melhoria da qualidade da soldadura e a quantidade de material fundido.



Figura 47 – Exemplo de provetes usados nos testes de corte para as várias intensidades de corrente: 50A, 72A, 95A.

Conforme é possível ver na figura 47, o anel que reflete a área de material soldado aumenta consideravelmente com a evolução da amperagem. Assim será razoável concluir que a área resistente que constitui a junta é também maior, em concordância a resistência da amostra. Podemos ver no caso da figura 48 que no provete produzido com 95A a rotura nem sequer ocorreu na junta soldada.



Figura 48 - Rotura de provete pela chapa

Apesar de se observar que nas soldaduras por pontos o aumento da corrente permite melhorar a capacidade das juntas resistirem a forças de corte as, não quer dizer que sempre que maior for a amperagem, melhor será a qualidade da junta soldada. Existem sempre outros fatores que é necessário considerar, tal como a possibilidade de furar completamente as chapas por simples existência de temperatura em excesso, ou até mesmo a possibilidade da existência de salpicos

e projeções de material que podem causar defeitos e falhas na soldadura. A existência destes salpicos é bem visível pelas marcas de expulsão junto aos anéis, que se notam maiores com o aumento da intensidade. Além disso é normal com o aumento da corrente para pressões de aperto iguais produzir soldaduras com depressões na zona soldada devido à maior temperatura e facilidade de deformar o material.

4.2.2. Ensaio de arrancamento

Na tabela 14 podemos verificar os resultados dos ensaios de arrancamento dos vários provetes.

Tabela 14 – Resultados ensaio de arrancamento - Resistência

Proвете	F_r (N)	Média (N)
50c1	2595,456	2021,254
50c2	1467,371	
50c3	2000,936	
72c1	2860,848	2941,227
72c2	3183,222	
72c3	2779,611	
95c1	3517,675	3556,182
95c2	3704,643	
95c3	3446,229	

Neste caso podemos retirar sensivelmente as mesmas conclusões que no ensaio anterior. De facto, verifica-se um aumento da resistência ao arrancamento com o aumento da intensidade de corrente.

Analisando os gráficos de cada um dos provetes é possível retirar algumas conclusões adicionais.

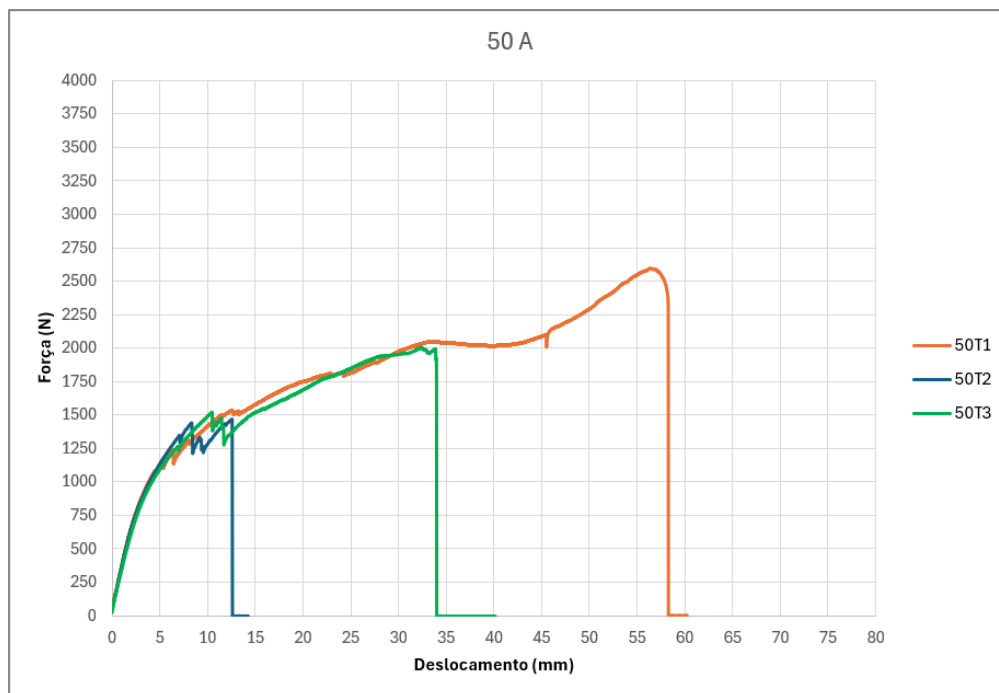


Figura 49 - Ensaio de arrancamento – Soldaduras de 50 Amperes

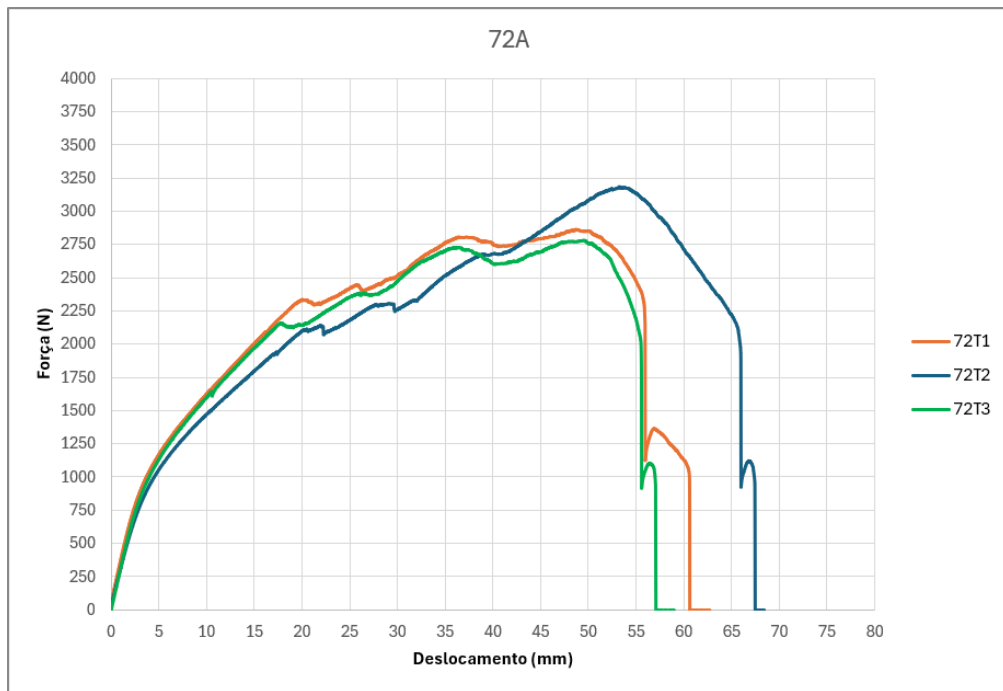


Figura 50 - Ensaio de arrancamento – Soldaduras de 72 Amperes

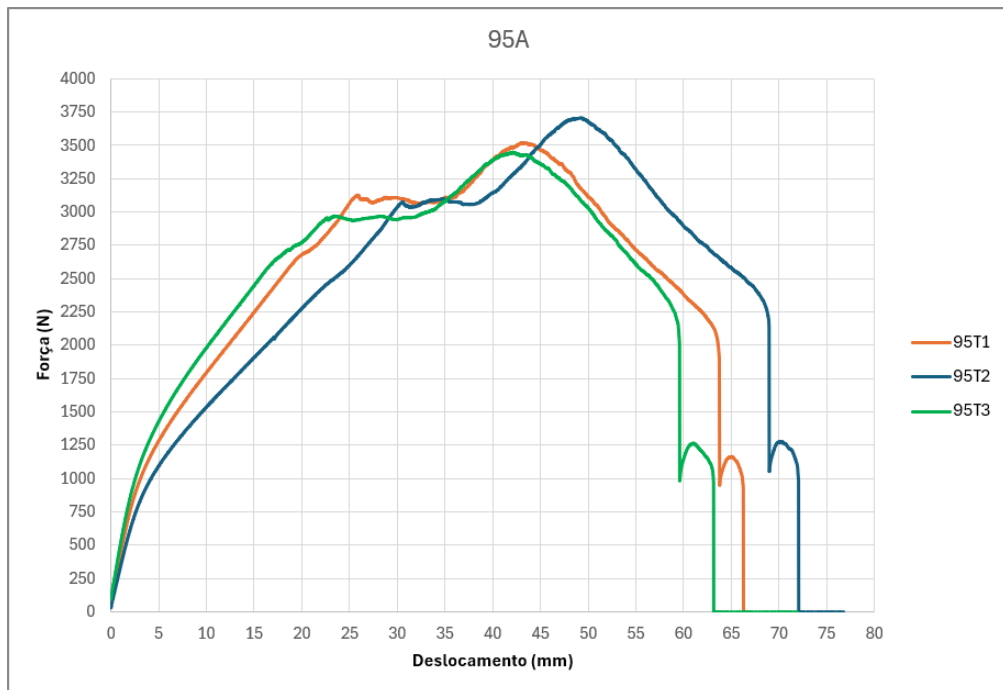


Figura 51 - Ensaio de arrancamento – Soldaduras de 95 Amperes

No capítulo anterior foi referido que os dois primeiros ensaios executados (provetes 50c1 e 50c2), foram feitos a velocidades diferentes dos restantes. Isto justifica a grande diferença de alongamentos obtidas nestes ensaios em relação aos demais.

Analisando mais especificamente as características de cada um dos gráficos podemos verificar que em todos eles existem vários patamares onde o provete vai cedendo aos poucos até chegar à rotura definitiva. Pode observar-se uma diferença significativa entre os provetes de 50 amperes e os demais, sendo que nestes casos, a rotura acontece logo após a força máxima. Adicionalmente, os patamares de cedência nestes casos são muito mais bruscos e repentinos.

Essa expressão também é diferenciável entre as soldaduras de 72 Amperes e 95 Amperes, sendo que os patamares vão ficando mais suaves e alongados consoante o aumento deste parâmetro. Adicionalmente, podemos ver que nestes dois casos, existe ainda um patamar após a aplicação da força máxima.

Isto poderá ser relevante, pois estendendo esta linha de pensamento para estruturas em serviço, a existência de possíveis indicadores de colapso eminente podem permitir a sua deteção por parte dos utilizadores ou em eventuais manutenções. No colapso estruturas frágeis, não se verificam indicações de que a estrutura poderá vir a ceder, uma vez que não existem deformações visíveis anteriores.

Quando temos roturas mais dúcteis, existe uma maior possibilidade de detetar deteriorações no material antes de colapso, e assim preveni-lo, evitando acidentes.

Assim em conclusão podemos verificar que as roturas são mais dúcteis, consoante o aumento da intensidade de corrente.

4.2.3. Dureza e microestrutura das juntas soldadas - Resistência

➤ Perfis de dureza

Na Tabela 12 - Resultados ensaio de dureza - TIGela 15 são apresentados os valores de dureza obtidos na secção transversal das juntas soldadas, desde o substrato, passando pela soldadura e novamente substrato.

Conforme referido no capítulo anterior, como neste caso se tratam de juntas com chapas sobrepostas, as medições de dureza foram feitas duas a duas entre a chapa superior e inferior. Foram feitos 8 pares de duas medições. Os valores que se apresentam abaixo são as medias resultantes dessas parelhas.

Os valores apresentam-se em HV5.

Tabela 15 - Resultados ensaios de dureza - Resistência

Leitura	Soldadura 50 A	Soldadura 72 A	Soldadura 95 A
1	246,5	253	244
2	244	258	251
3	248	429	430,5
4	297	439	434
5	463,5	428	434,5
6	469,5	257	254,5
7	242	244	251
8	245	246,5	244,5

Para cada um dos casos foi assinalado a **vermelho** o valor máximo de dureza medidos em cada perfil.

De seguida, na figura 52 apresentam-se graficamente os valores de dureza da tabela 15.

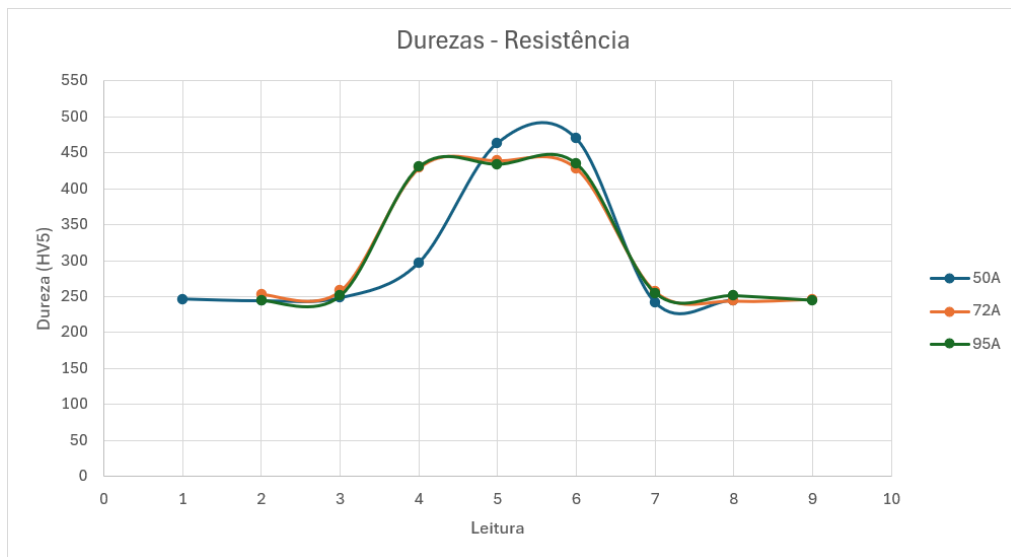


Figura 52 - Perfis de dureza das várias soldaduras executadas por resistência

Considerando os valores máximos obtidos nos ensaios, podemos verificar um decréscimo de dureza com o aumento da intensidade de corrente. Da mesma forma que no processo anterior, existe uma relação entre o arrefecimento e a dureza máxima obtida. Sendo que com maior intensidade, há maior calor, e mais tempo de arrefecimento, diminuindo a dureza.

No entanto considerando os gráficos da figura 52, a avaliação da diferença de durezas apenas é clara para a soldadura de 50 amperes. Conforme já referido anteriormente, a comparação direta entre os vários perfis de dureza é difícil, uma vez que as diferentes zonas da soldadura podem ter diferentes tamanhos e é muito provável não apanhar as zonas mais duras.

➤ **Análise macrográfica e micrográfica**

Em complemento à informação anterior, podemos também relacionar os perfis de dureza traçados, com as várias zonas de soldadura encontradas nas análises de macrografia e micrografia. Da mesma forma que nos provetes da soldadura TIG, podemos encontrar claramente as zonas de fusão, zona termicamente afetada e material de base. No entanto as dimensões das mesmas relativamente umas às outras são diferentes comparando com o processo anterior. Por força da execução da soldadura de forma praticamente instantânea, as zonas termicamente afetadas, e da própria zona de fusão em si, são muito mais pequenas.

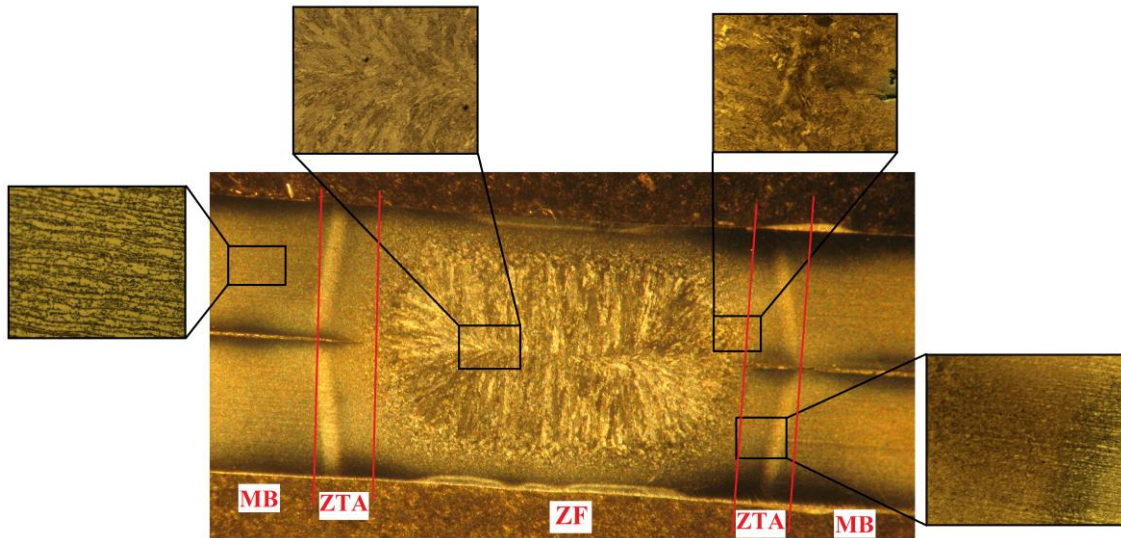


Figura 53 - Provette Resistência 50A - Macro e Micro

Na figura 53 é possível distinguir as várias zonas da soldadura. Desde uma estrutura perlítica e martensítica no material base, passando por um inicial crescimento de grão na ZTA até mesmo a formação de martensite mais junto à zona de fusão.

Com o referido anteriormente, podemos relacionar a figura 53 com o perfil de durezas da soldadura de 50 amperes, que é apresentado na figura 54.

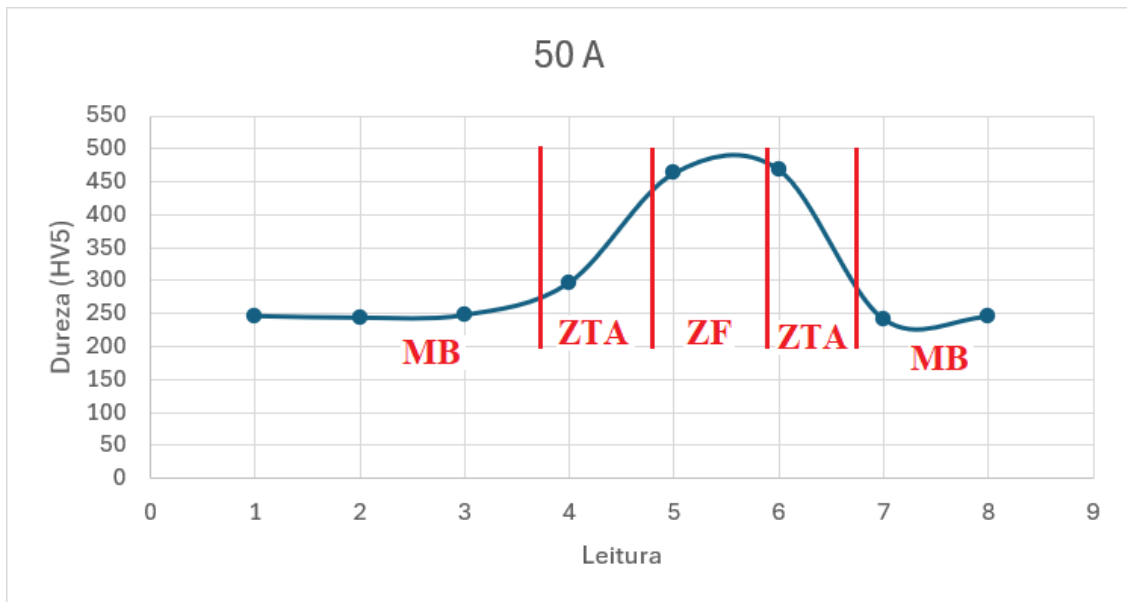


Figura 54 - Perfil de durezas – Resistência 50A

Neste perfil podemos verificar que a distribuição escolhida para execução das medições de dureza não foi a melhor. As linhas que se apresentam, têm forçosamente de ser consideradas como indicativas, dado que os locais onde acaba e começa cada uma das zonas, não são propriamente exatos. No entanto, é possível verificar claramente um aumento de durezas na ZTA e a zona de fusão relativamente ao material base

Na figura 55 podemos ver a macro e micros da soldadura por resistência de 72 amperes.

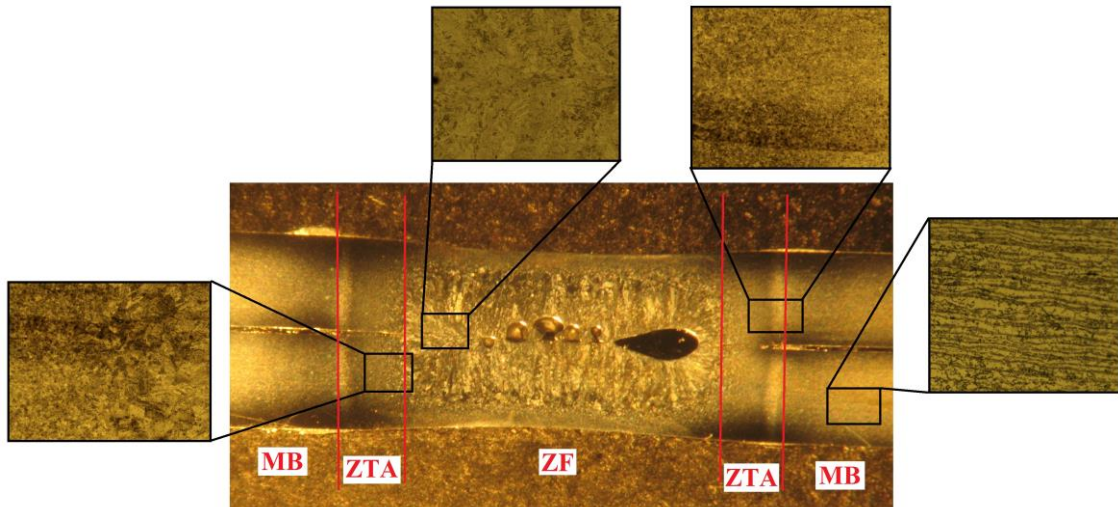


Figura 55 - Provette Resistência 72A - Macro e Micro

Podemos verificar de igual forma que existe uma distinção clara entre as várias zonas da soldadura. Podemos verificar adicionalmente que a zona de fusão é mais larga que no caso anterior. Este fenómeno foi também possível de verificar nos provetes dos ensaios de corte, após sua execução. Da mesma forma que referido anteriormente, as soldaduras com maior amperagem, têm tendência a causar expulsões mais violentas de material, como se pode verificar pelo defeito claro de soldadura encontrada nesta macro.

De seguida podemos comparar a figura 55 com o perfil de durezas desta soldadura da figura 56.

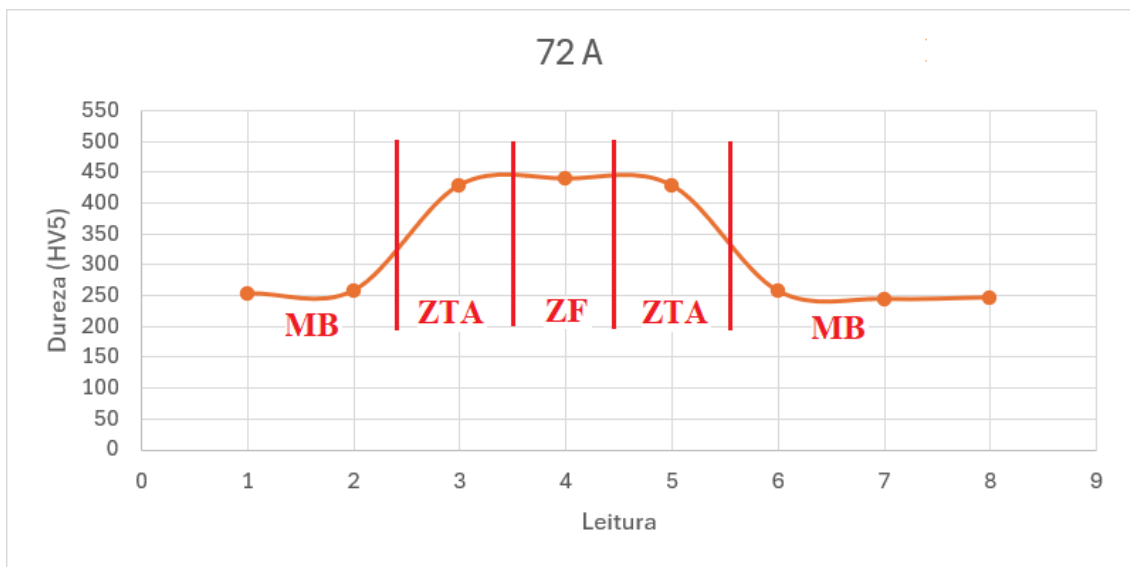


Figura 56 - Perfil de durezas - Resistência 72A

Neste caso a distribuição dos pontos de indentação foram já mais bem conseguidos, podendo expressar mais claramente o perfil típico de durezas de uma soldadura. Uma vez que é quase sempre expectável que os pontos de maior dureza sejam nas ZTA, uma vez que as taxas de arrefecimento aí são superiores.

De seguida podemos ver na figura 57, a macro e micros respeitante à soldadura de 95 amperes.

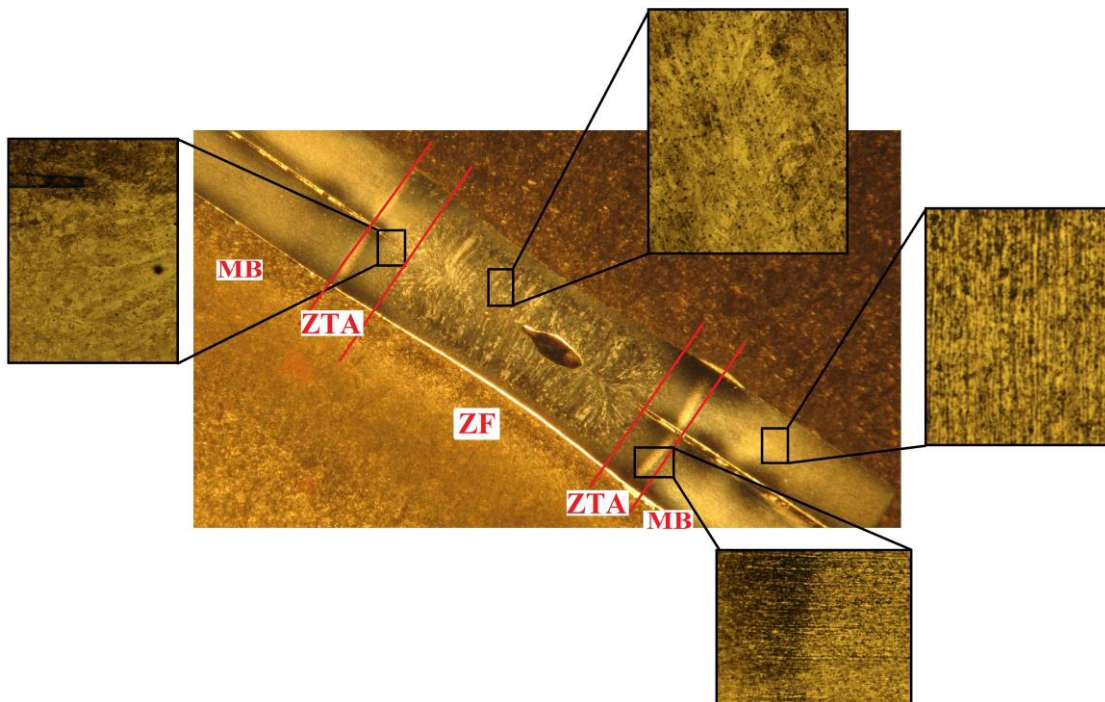


Figura 57 - Provete Resistência 95A - Macro e Micro

Comparando esta com os casos anteriores, é possível ver ainda mais o crescimento da largura da zona de fusão. É possível também verificar um defeito resultante da expulsão de material.

De seguida apresenta-se o perfil de durezas para a soldadura de 95 amperes na figura 58.

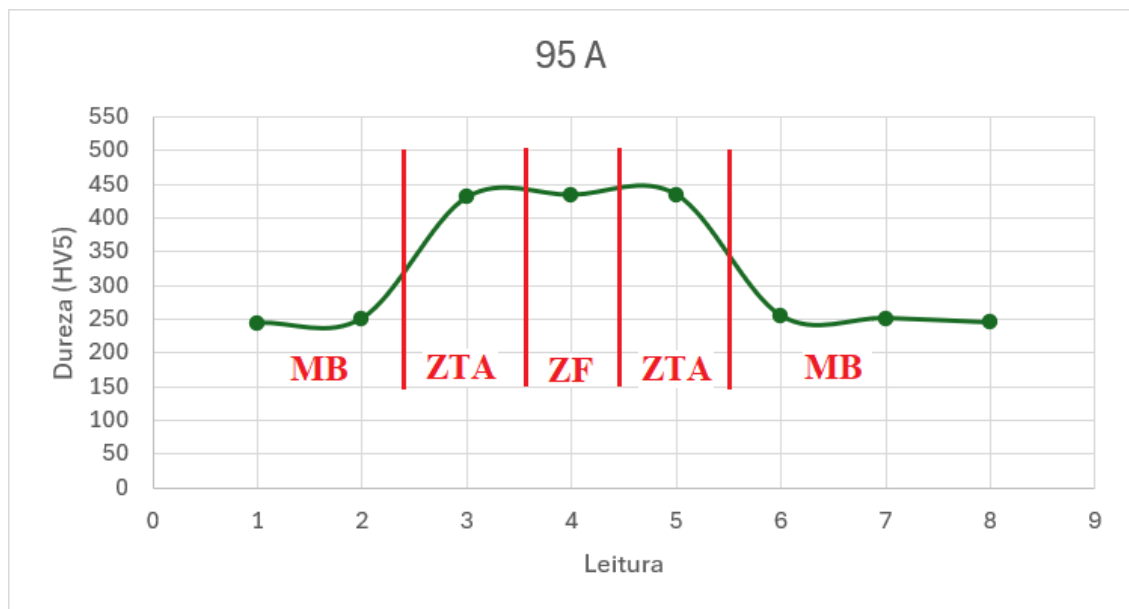


Figura 58 - Perfil de durezas - Resistência 95A

Relativamente aos tipos de constituintes metalográficos encontrados, os mesmos são coerentes nos três casos. Na figura 59 verificamos perlite, nas zonas mais escuras, constituída por ferrite e cementite, e depois nas zonas mais claras, áreas de ferrite e martensite.

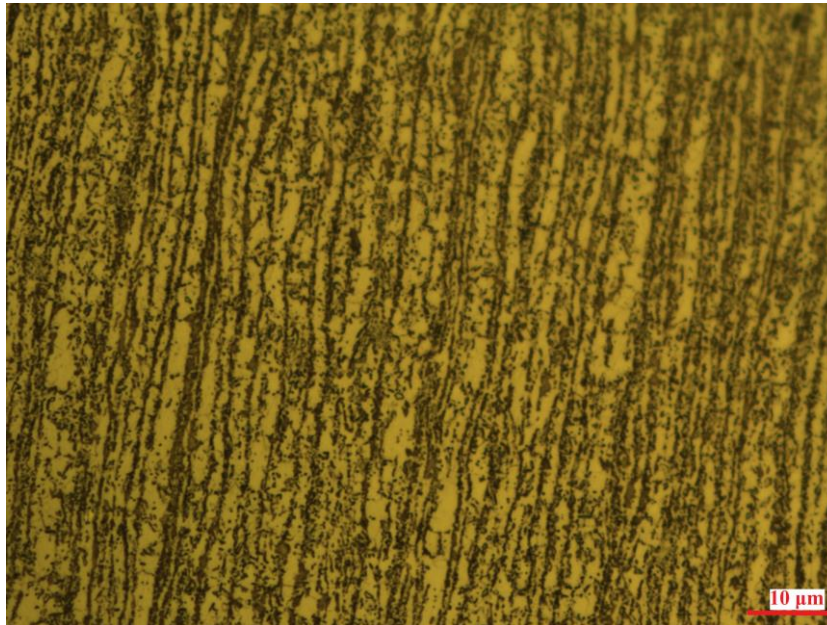


Figura 59 –Material base típico das soldaduras de resistência (retirada do provete 50A – Ampliação 200x)

A medida que nos vamos aproximando da zona da soldadura, denota-se um crescimento de grão devido à influência do calor. Tal pode ser visível na figura 60.

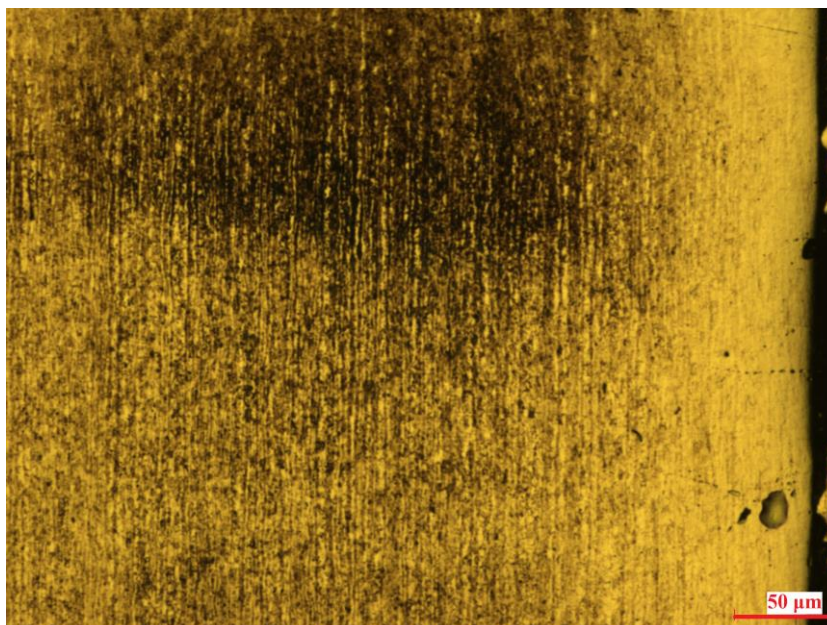


Figura 60 - Crescimento de grão nas soldaduras de resistência (retirada do provete 95A – Ampliação 50x)

Entrando na zona termicamente afetada e mais próximo ainda da zona propriamente fundida, começamos a verificar o aparecimento de alguma martensite, que depois acaba por se transformar na estrutura dendrítica característica das zonas de fusão nas soldaduras.

Na figura 61 podemos ver claramente a zona de transição entre material fundido e não fundido, estando este rodeado de estruturas em agulha típicas da martensite.

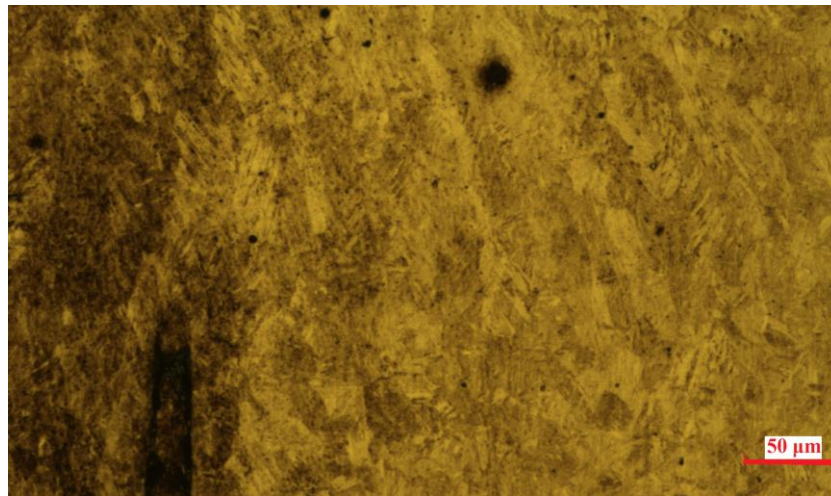


Figura 61 - Aparecimento de martensite na zona linha de fusão (retirada do provete 95A – Ampliação 50x)

Na figura 62 verificamos a estrutura dendrítica das zonas fundidas onde se verifica uma estrutura em que as várias agulhas convergem no centro.

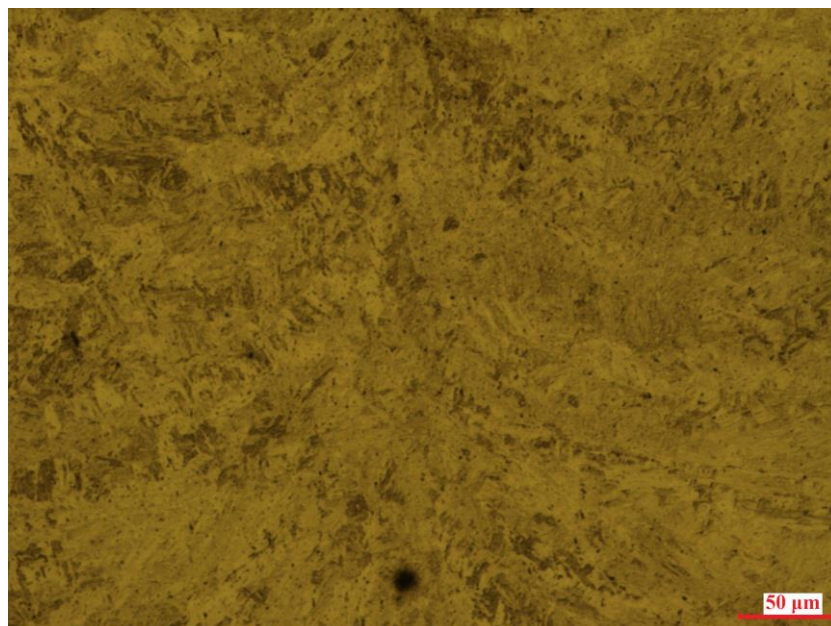


Figura 62 - Estrutura dendrítica característica das zonas de fusão (retirada do provete 72A – Ampliação 50x)

5. Conclusão

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões finais retiradas da análise da variação da intensidade de corrente na soldadura de aços de alta resistência.

Serão apresentadas também sugestões de trabalhos futuros que visem continuar a investigação da influência dos parâmetros de soldadura nos materiais.

5.1. Conclusões finais

Na presente dissertação, foi estudado o efeito da variação da intensidade de corrente de soldadura num aço de alta resistência. Para tal foram levadas a cabo soldaduras executadas por dois processos diferentes, TIG e soldadura por resistência na variante de pontos.

Para cada processo a corrente foi variada 3 vezes, sendo que se procurou variar da forma mais significativa possível este parâmetro, mantendo todos os demais parâmetros fixos. Para o processo de resistência isso foi perfeitamente conseguido, no entanto, para o processo TIG, foi necessário calcular a entrega térmica respetiva para cada um dos casos, uma vez que se trata de um processo manual onde o manuseamento da tocha influencia a conjuntura de parâmetros empregues.

Para cada uma das soldaduras TIG, foram retirados três provetes de cada uma para a execução de ensaios de tração. De cada soldadura foi também retirado um provete, para realização de ensaios de durezas, análises macrográficas e micrográficas.

Para o processo de soldadura por resistência, para cada corrente usada foram retirados três provetes, para ensaios de corte e arrancamento. Adicionalmente, da mesma forma que no processo anterior, foram também retirados provetes para ensaios de dureza, análises macrográficas e micrográficas.

Os ensaios mecânicos realizados aos provetes das soldaduras TIG permitiram concluir que, de uma forma geral, a ductilidade do material é a propriedade mais afetado pela variação da intensidade de corrente. Tal foi possível constatar pelo aumento do alongamento, estricção e módulo de tenacidade, enquanto o módulo de elasticidade diminuiu.

Outra conclusão possível de retirar foi que, coerentemente com o aumento da ductilidade para correntes maiores, verificou-se também um decréscimo nos valores máximos de durezas, apesar de que, de uma forma geral os perfis de dureza não variassem muito.

No que toca à resistência mecânica dos provetes TIG, não se verificou uma grande diferença entre os vários resultados, uma vez que foram executadas soldaduras autógenas (sem adição

de material), e, portanto, a composição química manteve-se. Será importante realçar que a soldadura induz no aço um processo de tempera localizado, e por isso, provavelmente para variações maiores de corrente podem ocorrer alterações mais significativas.

No caso dos provetes de soldadura por resistência, verificou-se uma tendência clara do aumento das resistências ao corte e arrancamento, com o aumento da intensidade de corrente. Com maior intensidade, maior era a área de material fundido e, portanto, maior resistência. No entanto deve ser acautelada a questão de que quanto maior intensidade de corrente, maior será a possibilidade de aparecimento de defeitos por expulsão de material ou de vazamento completo da chapa.

Foi adicionalmente possível constatar que, para as soldaduras dos provetes soldados por resistência, obtiveram-se maiores alongamentos dos ensaios de arrancamento. Da mesma forma que no processo anterior, estes resultados demonstraram um aumento da ductilidade quando a intensidade de corrente foi maior.

Relativamente às alterações provocadas por ambos os processos na microestrutura do material, podemos verificar o aparecimento de várias zonas. Sendo que de uma forma geral, as alterações da microestrutura criaram distinções claras entre zona fundida, zona termicamente afetada e material de base. Estas diferenças foram também coerentes com os perfis de dureza. Nas zonas termicamente afetadas, onde há um arrefecimento mais brusco, verificou o aparecimento de martensite e durezas geralmente maiores. No centro, nas zonas de fusão, verificaram-se também durezas altas, ainda que menores que na ZTA. Foi possível constatar nestes locais, o aparecimento de dendrites que se inclinavam no sentido do arrefecimento. Por fim, no material base, verificou-se a existência de perlite muito característica dos aços carbono, e também a existência de ferrite e martensite, coerentes com a descrição técnica do aço fornecido.

Tendo este estudo incidido sobre um aço de alta resistência, e sendo este amplamente usado na indústria automóvel, foi importante entender como é que a variação corrente pode influenciar as propriedades do material base. É imperativo que, após soldadura, o material retenha, de uma forma geral, as suas propriedades chave. Só com esta premissa, os materiais podem ser utilizados em projeto com a devida confiança.

Conforme foi possível constatar o material perdeu capacidade resistente, como consequência da diminuição da quantidade de martensite original, ou pela natural consequência do crescimento de grão provocada pelo aquecimento. O ideal seria caminhar para uma otimização de parâmetros que diminuísse, ou sessasse, a necessidade de tratamentos térmicos posteriores.

5.2. Propostas de trabalhos futuros

De forma a permitir a continuidade e aprofundamento do tema desta dissertação, apresentam-se as seguintes propostas de estudos:

- Execução de soldaduras em chapas com maior espessura, de forma a permitir a aplicação de parâmetros mais abrangentes para as soldaduras de arco elétrico. Assim

será possível estudar com mais evidencia a alteração das várias propriedades dos aços. Chapas mais espessas permitiriam também a execução de ensaios de impacto.

- Utilização de processos de soldadura diferentes com maior capacidade de corrente, como por exemplo MAG (com soldadura até 500 amperes), Arco Submerso (com soldadura até 1000 amperes) ou Pernos (com soldadura até 2000 amperes).
- Utilização de materiais diferentes, sejam eles aços mais macios ou aços temperados. Deste modo seria visível os diferentes efeitos em aços com composições e microestruturas diferentes.

Referências

- [1] W. Garrison, "Steels: Classifications," *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, pp. 8840-8843, 2001.
- [2] A. Velling, "Iron-Carbon Phase Diagram Explained," 10 03 2020. [Online]. Available: <https://fractory.com/iron-carbon-phase-diagram/>.
- [3] R. Santos, *Ligas Fe-C*, ISQ - Instituto de Soldadura e Qualidade, 2019.
- [4] J. V. G. T. L.C.F. Canale, *Introduction to Steel Heat Treatment*, G. F. B. C. J. V. T. B. Y. Saleem Hashmi, Ed., 2014.
- [5] A. Ferreira, *Aços de Elevada Resistência*, ISQ - Instituto de Soldadura e Qualidade, 2020.
- [6] J. Boyd, *Steels, High-Strength Low-Alloy*, R. W. C. M. C. F. B. I. E. J. K. S. M. P. V. K.H. Jürgen Buschow, Ed., 2002.
- [7] National Materail Company, "The Applications of Advanced High-Strength Steel," 29 11 2017. [Online]. Available: <https://www.nationalmaterial.com/applications-advanced-high-strength-steel/>.
- [8] C. Horvath, "Advanced steels for lightweight automotive structures," *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*, pp. 35-78, 2010.
- [9] C. M. Gerhard Sedlacek, *HIGH STRENGTH STEELS IN STEEL CONSTRUCTION*, Institute of Steel Construction RWTH Aachen, Germany, 2016.
- [10] K. H. T. T. C Miki, "Journal of Constructional Steel Research," *High strength and high performance steels and their use in bridge structures*, pp. 3-20, 2002.
- [11] "Akashi Kaikyo Bridge, Akashi Strait, Japan," 1988 - 1998. [Online]. Available: <https://www.roadtraffic-technology.com/projects/akashi-kaikyo-bridge-strait-japan/>.
- [12] G. SLV, *The Welding Engineer's Current Knowlege*, 2018.
- [13] I. Fernandes, *Introdução geral à tecnologia de soldadura*, ISQ - Instituto de Soldadura e Qualidade, 2017.
- [14] American Welding Society, *Welding Handbook*, Miami: Leonard P. Connor, 1987.
- [15] I. Fernandes, *Técologia de Soldadura - Arco Elétrico*, ISQ - Instituto de Soldadura e Qualidade, 2018.
- [16] A. Ferreira, *GMAW Welding (MIG/MAG)*, ISQ - Instituto de Soldadura e Qualidade, 2019.
- [17] R. S. F. D. K. M. M. Q. Omer W. Blodgett, *Fabricator's and Erector's Guide to Welded Steel Construction*, James F. Lincoln Arc Welding Foundation, 1999.
- [18] A. Ferreira, *MMA/SMAW Welding (Elétrodo Revestido)*, ISQ - Instituto de Soldadura e Qualidade, 2019.
- [19] I. Fernandes, *Processo de Soldadura com Elétrodo não consumível de Tungstênio e Proteção Gasosa Inerte*, ISQ - Instituto de Soldadura e Qualidade, 2017.
- [20] A. Ferreira, *SAW Welding (Soldadura por Arco Submerso)*, ISQ - Instituto de Soldadura e Qualidade.
- [21] *EN 1011: Welding - Recommendations for welding of metallic materials*, 2008.
- [22] *EN 15607: Specification and qualification of welding procedures for metallic materials*, 2003.

- [23] Y. B. Mankaila Alhassan, "World of Journal of Engineering and Technology," *Carbon Equivalent Fundamentals in Evaluating the Weldability of Microalloy and Low Alloy Steels*, pp. 782-792, 09 2021.
- [24] T. Tankova, "Soldadura de aço de alta resistência: é realmente um problema?," *Revista CMM*, p. 34, 06 2019.
- [25] K.-F. C. H.-C. H. M. X. Z.-X. H. D. A. N. Xiao Liu, "Mechanical behavior of high strength S690-QT steel welded sections with various heat input energy," *Engineering Structures* 175, pp. 245-256, 2018.
- [26] A. Ferreira, *Fenómenos de Fissuração nos Aços*, ISQ - Instituto de Soldadura e Qualidade, 2019.
- [27] *EN ISO 15614-1 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*, 2017.
- [28] *EN ISO 4136 - Destructive tests on welds in metallic materials - Transverse tensile test*, 2022.
- [29] *ISO 17639: Destructive tests on welds in metallic materials - Macroscopic and microscopic examination of welds*, 2003.
- [30] *ISO 9015: Destructive tests on welds in metallic materials – Hardness testing*, 2000.
- [31] *ISO 6507: Metallic materials – Vickers hardness test*.
- [32] *EN ISO 15614-12: Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure test - Part 12: Spot, Seam and Projection Welding*", 2001.
- [33] *ISO 14273: Resistance welding - Destructive testing of welds - Specimen dimensions and procedure for tensile shear testing resistance spot, seam and embossed projection welds*, 2015.
- [34] *ISO 14270: Resistance welding – Destructive testing of welds – Specimen dimensions and procedure for mechanized peel testing resistance spot, seam and embossed projection welds*, 2015.
- [35] I. Fernandes, *Gases de Proteção*, ISQ - Instituto de Soldadura e Qualidade, 2017.

Declaração de Integridade

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração. Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim. Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO. ISEP,

NOME: António José da Rocha Correia

Porto, 09 de Setembro de 2024