



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

Uma Contribuição para a Soldabilidade de Aços Inoxidáveis

Carlos Miguel Pereira da Fonseca

Dissertação

Mestrado em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor Adelino Mendes Cabral Trindade

Setembro de 2022



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

Uma Contribuição para a Soldabilidade de Aços Inoxidáveis

Carlos Miguel Pereira da Fonseca

Dissertação

Mestrado em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professor Doutor Adelino Mendes Cabral Trindade

Setembro de 2022

RESUMO

Nesta tese foram realizadas soldaduras em chapas de aço inoxidável AISI 316 com 6 mm de espessura em configuração de junta topo-a-topo, através do processo *Metal Inert Gas* (MIG). Este trabalho teve como principal objetivo, fazer uma análise de caráter didático, que permitisse avaliar a qualidade metalúrgica das soldaduras efetuadas e aprofundar conhecimentos úteis nesta área para o percurso profissional.

Numa primeira fase, foram selecionados os materiais de adição, recorrendo ao diagrama de Schaeffler com regiões de Bystran. A utilização deste diagrama é de extrema importância, pois permite fazer uma seleção adequada do metal de adição, permitindo prever e evitar problemas metalúrgicos no material fundido. Inicialmente, as soldaduras foram realizadas utilizando como material de adição o fio OK Autrod 308LSi da ESAB com 0,8 mm de diâmetro. Posteriormente, com o objetivo de melhorar as soldaduras obtidas, o metal de adição utilizado foi o fio OK Autrod 347Si com 1,2 mm de diâmetro.

Após inspeção visual, as amostras foram polidas e atacadas quimicamente para poderem ser observadas no microscópio ótico. Os reagentes utilizados (Glicerégia e Marble) apenas permitiram revelar a zona fundida da amostra, uma vez que é a única zona da amostra onde está presente ferrite. A microestrutura da zona fundida das amostras estudadas, caracteriza-se por ser uma matriz austenítica com a presença de ferrite δ com morfologia dendrítica.

Na sequência da análise micrográfica foram efetuados ensaios de dureza que revelaram que a amostra soldada com o fio OK Autrod 308LSi tem dureza mais elevada na zona termicamente afetada (ZTA) e na zona fundida. As amostras soldadas com o fio OK Autrod 347Si apresentaram menor dureza do que o metal de base na zona termicamente afetada (ZTA) e na zona fundida.

Os ensaios de tração permitiram concluir que nenhuma das amostras soldadas com o fio OK Autrod 308LSi são um conjunto soldado válido, uma vez que apresentaram uma resistência à tração menor do que a do metal de base. As amostras soldadas com o fio OK Autrod 347Si, mostraram resistência à tração igual ou superior à do metal de base, sendo por isso consideradas como conjuntos soldados válidos.

ABSTRACT

In this thesis, were performed welds on 6 mm thick AISI 316 stainless steel sheets, in butt joint weld, using the process Metal Inert Gas (MIG). The focus of this research was to carry out a didactic analysis that would allow the evaluation of the metallurgical quality of the welds made, using procedures such as visual inspection, metallographic analysis through the optical microscope, and some destructive tests, specifically, the tensile test and hardness test.

In a first stage, the consumable metals were selected, using the Schaeffler diagram with Bystran regions. The use of this diagram is extremely important because it allows an adequate selection of filler metal, allowing to predict and avoid metallurgical problems in the molten material. Initially, the welds were performed using ESAB's Ok Autrod 308LSi with Ø0,8 mm as filler metal. Subsequently, to improve the welds obtained, the filler metal used was OK Autrod 347Si with a diameter of 1,2 mm.

After visual inspection, the samples were polished and etched for microstructure characterization using optical microscope. The etchants used (Glyceregia and Marble) only allowed to reveal the weld metal zone, since it is the only area of the sample where ferrite is present. The microstructure of the weld zone of the samples is characterized by being an austenitic matrix with the presence of δ -ferrite with dendritic morphology.

The hardness tests revealed that the sample welded with OK Autrod 308LSi, has higher hardness in the heat affected zona (HAZ) and in the weld zone than the base metal. The samples welded with OK Autrod 347Si showed lower hardness than the base metal in the heat affected zone (HAZ) and in the weld zone.

The tensile tests allowed to conclude that none of the samples welded with OK Autrod 308LSi are a valid weld set, since they showed lower tensile strength than the base metal. The samples welded with OK Autrod 347Si, showed tensile strength equal or greater than the base metal, being therefore considered valid welded sets.

PALAVRAS-CHAVE

Aço Inoxidável

Soldadura

MIG

Material de adição

Resistência à tração

Dureza

Análise metalográfica

KEY WORDS

Stainless Steels

Welding

MIG

Filler metal

Tensile Strength

Hardness

Metallographic Analysis

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço à minha família, especialmente aos meus pais e às minhas irmãs, por todo o seu apoio incondicional, compreensão, incentivo e motivação durante o meu percurso académico.

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Adelino Mendes Cabral Trindade pela orientação concedida durante a realização deste trabalho, pela disponibilidade e compreensão prestada e pela partilha de conhecimento que tanto ajudou na elaboração deste trabalho.

Agradeço ao Eng. Nelson Rafael Rodrigues dos Santos, pela ajuda e disponibilidade prestada na elaboração das soldaduras, bem como dos provetes utilizados.

Agradeço aos meus colegas e amigos, pela partilha de experiências e conhecimento ao longo do nosso percurso académico.

INDICE GERAL

RESUMO	i
ABSTRACT	iii
PALAVRAS-CHAVE	v
KEY WORDS	vii
AGRADECIMENTOS	ix
INDICE GERAL	xi
INDICE DE FIGURAS	xiv
INDICE DE TABELAS	xix
ABREVIATURAS E SIGLAS	xx
1 Introdução	1
2 Enquadramento Teórico	3
2.1 Soldadura, Conceitos e Definição	3
2.1.1 Soldadura por fusão	4
2.2 Principais Processos por Arco Elétrico	4
2.2.1 Processo de soldadura TIG	4
2.2.2 Processo de soldadura SER	6
2.2.3 Processo de soldadura MIG	6
2.2.4 Principais parâmetros do processo MIG/MAG	8
2.3 Análise Térmica	16
2.3.1 Entrega térmica	16
2.3.2 Ciclo térmico	17
2.3.3 Repartição térmica	19
2.4 Soldabilidade	20
2.5 Defeitos de Soldadura	21
2.5.1 Porosidades	22

2.5.2	Fissuração a quente.....	22
2.5.3	Fissuração por corrosão	23
2.5.4	Inclusões	23
2.5.5	Mordeduras	24
2.5.6	Falta de penetração	24
2.6	Inspeção de Juntas Soldadas	24
2.6.1	Ensaio não destrutivo	25
2.6.2	Ensaio destrutivo	27
3	Trabalho Experimental	30
3.1	Material de Base	30
3.2	Seleção do Material de Adição	31
3.3	Soldaduras.....	33
3.3.1	Equipamento de soldadura.....	33
3.3.2	Soldaduras	34
3.4	Preparação para Análise Metalográfica	38
3.5	Caracterização Mecânica	39
3.5.1	Ensaio de Dureza	39
3.5.2	Ensaio de Tração.....	40
4	Análise de Resultados.....	41
4.1	Análise Metalográfica.....	41
4.1.1	Inspeção Visual	41
4.1.2	Estudo Micrográfico	47
4.2	Ensaio de Dureza.....	49
4.3	Ensaio de Tração	52
4.3.1	Amostra A	52
4.3.2	Amostra B.....	53
4.3.3	Amostra C.....	54

4.3.4	Amostra D	55
4.3.5	Amostra E.....	56
4.3.6	Amostra F	57
4.3.7	Amostra G	58
4.3.8	Amostra H	59
4.3.9	Amostra I.....	60
4.3.10	Amostra J.....	61
4.3.11	Amostra K	62
4.3.12	Comparação do comportamento de resistência dos provetes	63
5	Conclusões.....	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		70
ANEXO 1		72
ANEXO 2		73
ANEXO 3		74
ANEXO 4		76

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Distância Interatômica e distribuição de forças de atração e repulsão com distância entre átomos. [1].....	3
Figura 2 - Ilustração esquemática do processo de soldadura TIG.....	5
Figura 3 - Ilustração esquemática do processo de soldadura SER. [1]	6
Figura 4 - Ilustração esquemática do processo de soldadura MIG.....	7
Figura 5 - Equipamento para soldadura MIG. Adaptado de [6].....	7
Figura 6 - Ilustração esquemática do fluxo geral de calor na soldadura por fusão. Adaptado de [7]	8
Figura 7 - Variação da corrente vs. velocidade de alimentação para diferentes diâmetros de arames consumíveis. [1]	9
Figura 8 - Definição de stick-out, comprimento do arco e stand-out. [1]	10
Figura 9 - Efeito da polaridade do fio na penetração. Adaptado de [10]	11
Figura 10 - Modos de transferência metálica para diferentes condições de tensão e corrente. [8]	12
Figura 11 - Alteração rápida da frequência e tamanho das gotas. [1]	12
Figura 12 - Dependência da corrente de transição com o material de adição e diâmetro do eletrodo. [1]	13
Figura 13 - Ilustração esquemática dos tipos de posições da tocha.	15
Figura 14 - Secções transversais de soldadura para as diferentes posições da tocha “forehand” (esquerda), perpendicular (centro) e “backhand” (direita). [19].....	15
Figura 15 - Geometria dos cordões utilizando diferentes gases de proteção. [8].....	16
Figura 16 - Distribuição dos ciclos térmicos para distâncias ao cordão de soldadura. .	18
Figura 17 - Distribuição dos ciclos térmicos em alguns processos de soldadura. [1]...	18
Figura 18 - Ilustração esquemática das zonas afetadas pelo calor durante um processo de soldadura.....	19
Figura 19 - Ilustração da zona de diluição.....	20
Figura 20 - Ilustração esquemática de porosidades presentes num cordão de soldadura.	22
Figura 21 - Formas de fissuração a quente. [27]	22
Figura 22 - Fissuras de corrosão sob tensão de um aço inoxidável. [5].....	23
Figura 23 - Ilustração esquemática de inclusão de escória. [26].....	23

Figura 24 - Ilustração esquemática de mordeduras na última camada de um cordão de soldadura. [26].....	24
Figura 25 - Ilustração esquemática de falta de penetração numa junta soldada. [26] ...	24
Figura 26 - Ensaios de dureza. [36].....	29
Figura 27 - Diagrama de Schaeffler com regiões de Bystran para o metal de base AISI316 e os metais de adição utilizados.....	32
Figura 28 - Pormenor da figura 27.	33
Figura 29 – Mesa com guia mecanizada do processo de soldadura.	33
Figura 30 - Área de trabalho utilizada nas soldaduras.	34
Figura 31 - Ilustração esquemática da junta de soldadura utilizada.	34
Figura 32 - Ilustração esquemática da junta de soldadura da amostra A.	35
Figura 33 - Ilustração esquemática da junta de soldadura da amostra E.....	36
Figura 34 - Ilustração esquemática da junta de soldadura da amostra F.....	37
Figura 35 - Ilustração esquemática da linha de medição de dureza.	39
Figura 36 - Ilustração esquemática da geometria utilizada nos provetes.	40
Figura 37 - Cordão de soldadura da Amostra A. Arco não pulsado (a) e Arco Pulsado (b).	41
Figura 38 - Efeito túnel na amostra A.	42
Figura 39 - Cordão de soldadura e secção transversal dos provetes da amostra B.	42
Figura 40 – Vista do lado oposto dos provetes da amostra B, mostrando a falta de penetração.....	42
Figura 41 - Cordão de soldadura e secção transversal da Amostra C.	43
Figura 42 - Cordão de soldadura da Amostra D.....	43
Figura 43 – Vista posterior dos provetes da amostra D, mostrando a falta de penetração total.	43
Figura 44 - Cordão de soldadura e secção transversal da amostra E.....	44
Figura 45 – Vista posterior dos provetes da amostra E, mostrando a falta de penetração total.	44
Figura 46 - Cordões de soldadura da Amostra F. Primeiro passe (a) e Segundo passe (b).	44
Figura 47 - Secção transversal da amostra F.	45
Figura 48 - Cordão de soldadura da Amostra G.....	45
Figura 49 - Cordão de soldadura e secção transversal do provete da amostra H.	45

Figura 50 – Vista posterior dos provetes da amostra H, mostrando a falta de penetração total.	45
Figura 51 - Cordão de soldadura da amostra I.	46
Figura 52 - Secção transversal da amostra I.	46
Figura 53 - Cordão de soldadura da Amostra J.	46
Figura 54 - Cordão de soldadura da amostra K.	46
Figura 55 - Secção transversal da amostra K.	47
Figura 56 - Microestrutura da zona fundida da amostra D.	47
Figura 57 - Ferrite com estrutura colunar junto à zona de ligação da amostra D.	48
Figura 58 - Defeito por falta de fusão identificado na amostra D.	48
Figura 59 - Microestrutura da zona fundida da amostra K.	49
Figura 60 - Perfil de dureza da amostra F.	50
Figura 61 - Perfil de dureza da zona superior da amostra J.	51
Figura 62 - Perfil de dureza da amostra K, junto à superfície do cordão.	51
Figura 63 – Curvas de Tensão de Engenharia dos provetes A2 e A3.	52
Figura 64 - Provetes A1, A2 e A3, após ensaio de tração.	53
Figura 65 - Curvas de Tensão de Engenharia dos provetes B1 e B2.	54
Figura 66 - Provetes B1 e B2, após ensaio de tração.	54
Figura 67 - Curva de Tensão de Engenharia do provete C1.	55
Figura 68 - Provete C1, após ensaio de tração.	55
Figura 69 - Curvas de Tensão de Engenharia dos provetes D1 e D2.	56
Figura 70 - Provetes D1 e D2, após ensaio de tração.	56
Figura 71 - Curvas de Tensão de Engenharia dos provetes E1 e E2.	57
Figura 72 - Provetes E1 e E2, após ensaio de tração.	57
Figura 73 - Curvas de Tensão de Engenharia dos provetes F1 e F2.	58
Figura 74 - Provetes F1 e F2, após ensaio de tração.	58
Figura 75 - Curvas de Tensão de Engenharia dos provetes G1, G2 e G3.	59
Figura 76 - Provetes G1 e G2 após ensaio de tração.	59
Figura 77 - Curvas de Tensão de Engenharia dos provetes H1 e H2.	60
Figura 78 - Provetes H1 e H2, após ensaio de tração.	60
Figura 79 - Curvas de Tensão de Engenharia dos provetes I1, I2 e I3.	61
Figura 80 - Provetes I1 e I2 após ensaio de tração.	61
Figura 81 - Curvas de Tensão de Engenharia dos provetes J1, J2, J3 e J4.	62
Figura 82 - Provete J4, após ensaio de tração.	62

Figura 83 - Curvas de Tensão de Engenharia dos provetes K1 e K2.....	63
Figura 84 - Provete K2, após ensaio de tração.	63
Figura 85 - Curvas de Tensão de Engenharia obtidas para todos os provetes.	65
Figura 86 - Gráfico de barras dos valores de tensão de engenharia obtidos para todos os provetes.....	66
Figura 87 - Gráfico de barras das tensões de rotura médias das amostras A, G, J e K com respetivo desvio padrão.	67

INDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tensões convencionais para a soldadura MIG e tipos de transferência. Fonte: Adaptado de [8]	11
Tabela 2 - Corrente de transição para materiais de adição diferentes com diferentes diâmetros. [7].....	13
Tabela 3 - Eficiência térmica dos processos de soldadura. Fonte: Adaptado de [21] ...	17
Tabela 4 - Composição Química do aço AISI316. Dados obtidos pelo fornecedor.....	30
Tabela 5 - Composição química dos materiais de adição selecionados. Dados obtidos através da ficha técnica dos metais de adição (Anexo 3 e 4).	31
Tabela 6 - Parâmetros de soldadura utilizados na soldadura "A".....	35
Tabela 7 - Parâmetros de soldadura utilizados nas soldaduras “B”, “C”, “D”, “G” e “H”.	35
Tabela 8 - Dimensões da junta de soldadura das amostras B, C, D, G e H.....	36
Tabela 9 - Parâmetros de soldadura utilizados na soldadura “E”.....	36
Tabela 10 - Parâmetros de soldadura utilizados na soldadura “F”.	37
Tabela 11 - Parâmetros de soldadura utilizados nas soldaduras “I”, “J” e “K”.	37
Tabela 12 - Dimensões da junta de soldadura das amostras I, J e K.	38
Tabela 13 - Composição química dos reagentes utilizados.....	38
Tabela 14 - Tensão de rotura média e desvio padrão das amostras A, G, J e K.....	67

ABREVIATURAS E SIGLAS

SÍMBOLOS

d_c	Distância crítica
A_0	Área de contacto
v_f	Velocidade de fusão
v_a	Velocidade de alimentação
v_s	Velocidade de soldadura
I	Intensidade de corrente
I_{trans}	Intensidade de corrente de transição
U	Tensão elétrica
V_{arco}	Tensão do arco elétrico
f	Frequência de transferência das gotas
V	Volume das gotas
η	Rendimento do processo
k	Condutibilidade térmica
σ	Sigma (fase); Tensão
δ	Delta

ABREVIATURAS

D	Diluição
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>
FSW	<i>Friction Stir Welding</i>
IIW	<i>International Institute of Welding</i>
MA	Material de adição
MB	Material de base
MF	Metal fundido
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
SER	Soldadura por Eléctrodo Revestido
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
ZL	Zona de ligação
ZTA	Zona termicamente afetada

1 Introdução

A necessidade de ligar metais remete-nos para os primórdios do Homem que tinha necessidade de construir instrumentos fulcrais à sua sobrevivência. O uso de instrumentos metálicos é algo que acompanha o Homem desde há milhares de anos. Uma das maiores dificuldades era a sua perda pela ação da corrosão. Foi então que, em meados do século XX, a descoberta dos aços inoxidáveis revolucionou a indústria e marcou um grande avanço no desenvolvimento de materiais resistentes à corrosão e à oxidação. Atualmente, os aços inoxidáveis são amplamente utilizados pelas indústrias química, farmacêutica, alimentar, em centrais térmicas, indústria petrolífera e até mesmo para meios de criogenia.

A soldadura é um dos métodos de ligação mais utilizados atualmente, devido ao facto de ser um processo económico e eficiente, que permite ligar uma vasta gama de metais, com diferentes geometrias, espessuras e dimensões. Há uma variedade de processos de soldadura, que podem ser classificados segundo a fonte de energia, tais como a energia termoquímica, a energia eletrotérmica, a energia mecânica ou a energia por radiação.

O processo de soldadura que foi alvo de estudo no decorrer da presente dissertação foi o *Metal Inert Gas* (MIG). É um processo de soldadura por arco elétrico, semiautomático que permite soldar a maior parte dos metais, com um custo relativamente baixo quando comparado com outros processos de soldadura.

O presente estudo, teve como principal objetivo fazer uma análise metalúrgica e mecânica que permitisse fazer uma comparação e avaliação metalúrgica das soldaduras efetuadas. Incidiu na realização de soldaduras entre chapas de aço inoxidável AISI 316 de 6 mm de espessura, na configuração de junta topo-a-topo. As soldaduras foram realizadas em duas fases distintas utilizando dois materiais de adição diferentes. Este estudo consistiu na análise comparativa das soldaduras efetuadas, pela influência desses materiais de adição, do respetivo diâmetro de fio e, conseqüentemente, pelos parâmetros de soldadura.

Em termos de metodologia de avaliação de resultados foram realizadas análises metalográficas, mais concretamente inspeção visual e análise micrográfica, que permitiram fazer uma avaliação do aspeto do cordão de soldadura obtido, bem como identificar a microestrutura da zona fundida. Foram ainda realizados ensaios de dureza e ensaios de tração para se poder avaliar e comparar o comportamento mecânico das soldaduras realizadas.

A estrutura deste trabalho está dividida em cinco capítulos. No capítulo dois é feito um enquadramento teórico dos conceitos relacionados com o tema abordado ao longo da tese. São abordados os principais processos de soldadura por arco elétrico e os principais parâmetros do processo MIG. Ainda no capítulo dois, é feita uma abordagem geral à análise térmica, à soldabilidade, aos defeitos de soldadura e às técnicas de inspeção de juntas soldadas. No capítulo três é apresentada a composição química do metal de base, bem como dos metais de adição utilizados e é também apresentada a metodologia do trabalho experimental. No quarto capítulo são expostos e analisados os resultados obtidos dos ensaios realizados, na análise metalográfica, nos ensaios de dureza e nos ensaios de tração. No quinto e último capítulo são apresentadas as conclusões.

2 Enquadramento Teórico

2.1 Soldadura, Conceitos e Definição

A soldadura é o método mais comum, económico e eficiente de ligar duas ou mais peças metálicas de forma a criar um conjunto que se comporta como uma peça única. Permite-nos ligar peças dentro de uma vasta gama de materiais metálicos, geometrias, espessuras e dimensões e, por isso, é um processo muito utilizado na construção naval, na construção metalomecânica, na indústria automóvel, entre outras áreas [1], [2]. Segundo o Instituto Internacional de Soldadura (*International Institute of Welding – IIW*), a soldadura pode ser definida como uma ligação inamovível, permanente, íntima e molecular caracterizada por uma continuidade estrutural e que garante propriedades metálicas similares ou superiores às do metal base. Define-se metal de base (MB) como o que constitui os componentes que se pretendem soldar e metal de adição (MA) como o material de que é feito o fio ou arame a depositar na junta de soldadura [1].

Para que ocorra a ligação entre os dois materiais, é necessário que haja uma aproximação interatômica de tal forma que a distância entre um átomo da superfície A e um átomo da superfície B seja menor do que a distância crítica d_c (fig.1). Desta forma, uma condição para que os metais soldem é que as forças de atração predominem [1], [3].

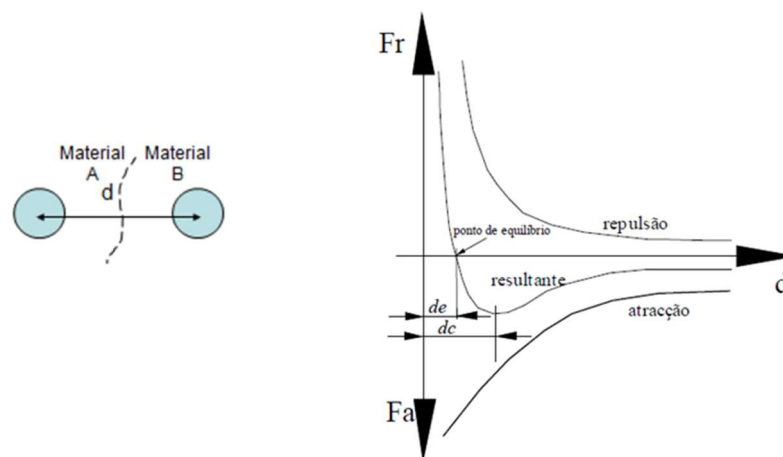


Figura 1 - Distância Interatômica e distribuição de forças de atração e repulsão com distância entre átomos. [1]

A aproximação à distância interatômica e continuidade estrutural consegue-se através da fusão ou da aplicação de calor e pressão. Nesta, o calor consegue-se, por exemplo, através de uma fonte externa de energia ou por atrito, sem que haja obstáculos superficiais entre as partes a soldar.

2.1.1 Soldadura por fusão

A fusão permite eliminar os obstáculos que impedem uma aproximação interatômica inferior à distância crítica d_c , tais como a rugosidade em escala microscópica e materiais contaminantes que podem estar presentes nas superfícies, como por exemplo, óxidos, poeiras e gorduras. O metal fundido, ao entrar em contacto com o metal de base, aquece-o e funde-o até uma determinada profundidade. Então, é no estado líquido que ocorre a combinação metálica dos materiais de base e de adição. De seguida, verifica-se a solidificação conjunta dos metais onde se dá a reconstituição da continuidade estrutural, formando-se assim o cordão de soldadura. Os materiais contaminantes são empurrados na frente de solidificação devido à baixa densidade, formando-se a escória [1], [3]. No entanto, devido aos fenómenos metalúrgicos que se desenvolvem durante o processo, o seu estudo torna-se mais complexo. Alguns problemas que terão de ser considerados são, por exemplo, nos ciclos térmicos (aparecimento de dilatações, contrações, tensões), a fissuração, alterações físico-químicas e difusão de gases [1], [4].

A soldadura por fusão inclui um conjunto de processos que são os mais utilizados na indústria atualmente. Existem variados processos de soldadura por fusão e por esse motivo torna-se necessário dividi-los em subgrupos de acordo com o tipo de fonte de energia utilizado [5]. Para que ocorra a fusão, é fornecida energia através da combustão de um gás ou outra mistura gasosa, pela energia elétrica ou por radiação. Entre os processos mais utilizados industrialmente, estão os que utilizam o arco elétrico como fonte de energia.

2.2 Principais Processos por Arco Elétrico

2.2.1 Processo de soldadura TIG

O processo de soldadura TIG ou GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) é um processo de soldadura por arco elétrico, que foi desenvolvido em 1940, utilizado com a finalidade para soldadura em aços inoxidáveis. É considerado um processo de soldadura de alta qualidade com

velocidade de soldadura moderada. Apresenta grandes vantagens nas soldaduras delicadas de chapas finas (entre 0.05mm e 5mm de espessura), soldadura em tubos sujeitos a pressão, passes de raiz ou acabamento, soldadura em quase todos os materiais em geral e em particular na ligação de materiais dissemelhantes [1], [2].

O princípio básico de funcionamento, tal como noutros processos por arco elétrico, é utilizar uma fonte de energia elétrica para criar um arco elétrico entre o eléctrodo não-consumível de tungsténio e os materiais a serem soldados. O arco elétrico cria um aumento elevado da temperatura que dá origem à fusão do material de base. Neste processo, pode ou não ser utilizado material de adição [2]. Caso se tenha materiais com espessuras pequenas não se utiliza material de adição. Durante o processo, é ainda utilizado um gás inerte projetado através da tocha de forma a criar uma atmosfera protetora para evitar que agentes existentes no meio envolvente possam contaminar o banho de fusão e a transferência do material de adição (caso exista).

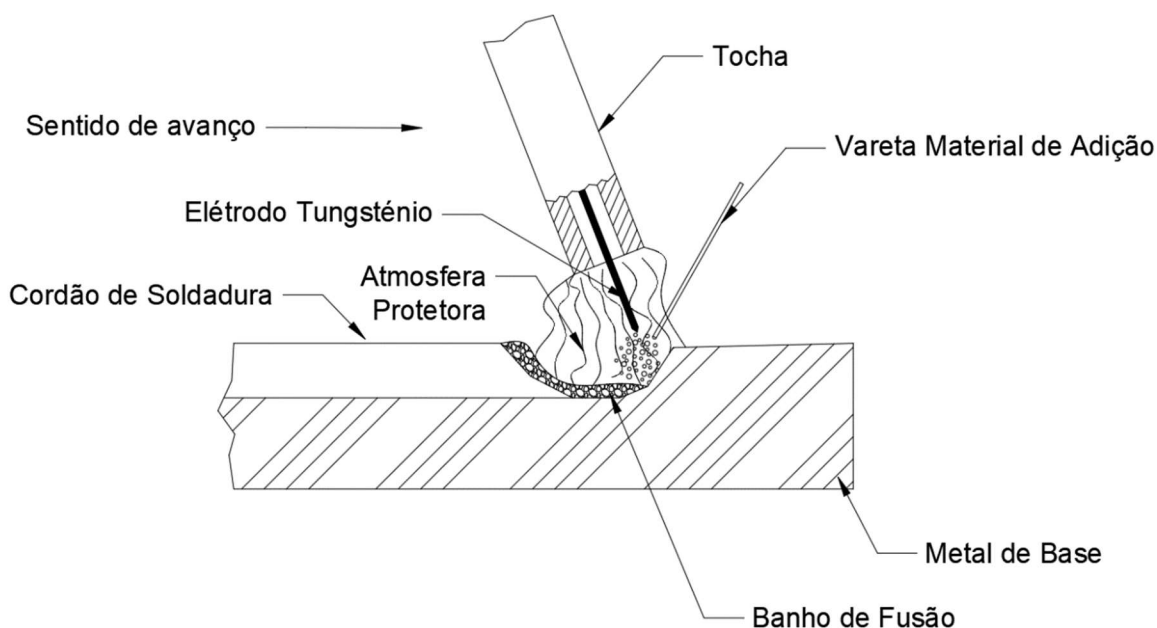


Figura 2 - Ilustração esquemática do processo de soldadura TIG.

Este processo não foi utilizado no trabalho pois é difícil automatizar e requer um soldador muito experiente, para obter boa repetibilidade.

2.2.2 Processo de soldadura SER

Este processo de soldadura por arco elétrico utiliza eléctodos revestidos. O arco dá-se por intermédio de uma corrente contínua ou alternada, que produz energia suficiente para fundir o metal, de modo que seja depositado na poça de fusão. As fontes de alimentação podem ser de corrente contínua ou alternada, monofásicas ou trifásicas. É um processo de soldadura versátil, relativamente barato e que permite obter resultados de boa qualidade. É aplicado na soldadura de todos os metais, em manutenção, recuperação e corte térmico [1].

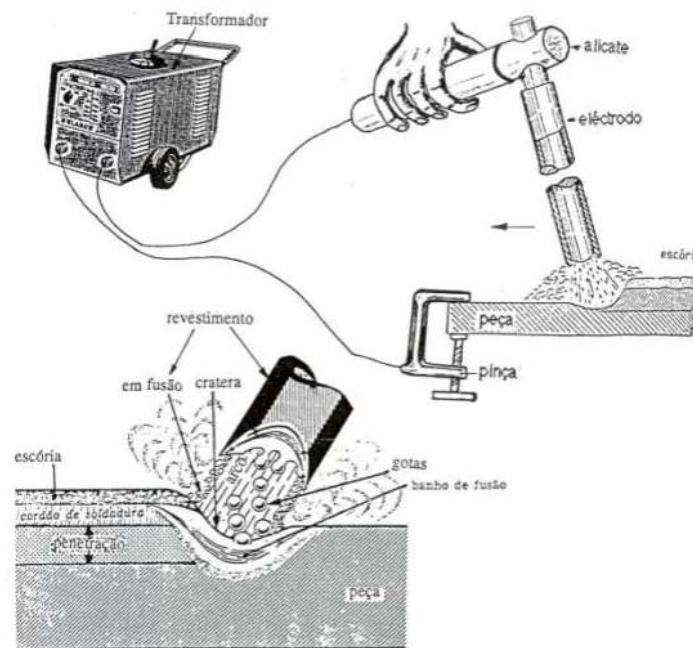


Figura 3 - Ilustração esquemática do processo de soldadura SER. [1]

2.2.3 Processo de soldadura MIG

O processo que será abordado ao longo deste capítulo, é o processo de soldadura MIG (*Metal Inert Gas*) por ser o que é utilizado em toda a fase experimental. É um processo de soldadura semiautomático, devido à saída automática de arame (material de adição) e do avanço de soldadura manual. O arco elétrico faz-se entre um eléctodo metálico contínuo de material de adição (MA) e os materiais de base.

Este processo apresenta variadíssimas características, tais como a sua versatilidade, devido à fácil utilização nos mais variados casos e à sua aplicabilidade na maior parte dos materiais. Além disso, o custo é relativamente baixo quando comparado com outros processos de soldadura e pode ser automatizado.

O eléctrodo consumível de MA, sob a forma de fio ou arame, é desenrolado continuamente por um sistema que o puxa e empurra até à tocha. Através do calor gerado pelo arco eléctrico entre os materiais a soldar e o fio de MA que vai sendo adicionado, vai ocorrendo a fusão da sua ponta. O material deste eléctrodo consumível é, então, transferido para o banho de fusão através do arco eléctrico (fig.4). Simultaneamente, através da tocha é injetado um gás inerte (árgon ou hélio) de forma a contribuir para a formação do arco eléctrico e criar uma atmosfera protetora, que proteja o material a elevada temperatura de elementos nocivos existentes no meio envolvente [4].

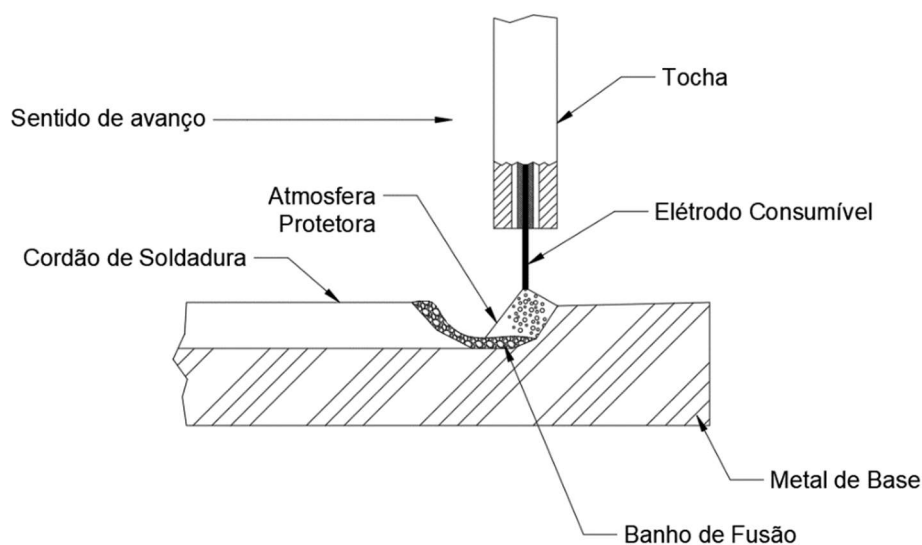


Figura 4 - Ilustração esquemática do processo de soldadura MIG.

Os principais componentes e consumíveis são (fig.5): a fonte de alimentação, o cilindro de gás e regulador de caudal, a bobine do material de adição, o alimentador do material de adição e a tocha [6].

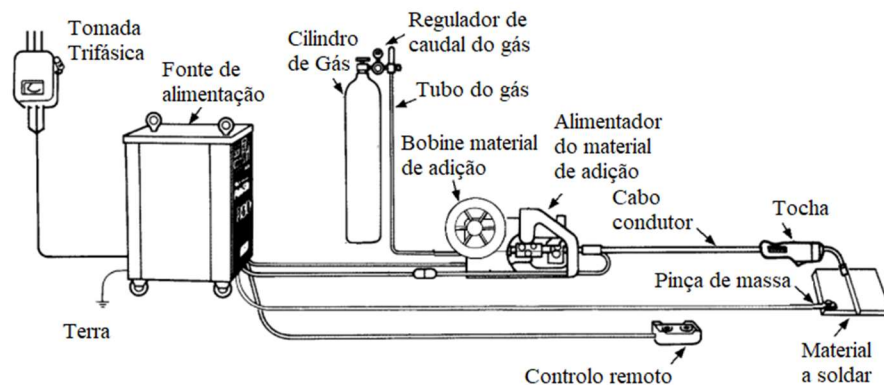


Figura 5 - Equipamento para soldadura MIG. Adaptado de [6]

2.2.4 Principais parâmetros do processo MIG/MAG

O arco elétrico é uma descarga contínua e autossustentável, gerado pela passagem de corrente elétrica entre o cátodo (-) e o ânodo (+) através de gases que com ele se ionizam, devido à libertação de eletrões [1], [4]. É um meio prático de gerar a energia necessária à soldadura, transformando energia elétrica em calorífica [4]. Esta energia calorífica é transferida através de uma área de contacto (A_0) que provoca o aquecimento do metal de base e do material de adição até à sua fusão. Todavia, devido à condutividade térmica dos metais e à diferença de temperatura existente, da região mais próxima para as mais afastadas da área de contacto, o calor difunde-se rapidamente. A condução de calor pela peça (fig.6), pode dificultar a soldadura em determinados casos [7]. De forma a evitar os problemas de soldadura associados à dissipação de calor na peça, a fonte deve funcionar a uma taxa de energia elevada para garantir a fusão rápida e localizada do metal de base.

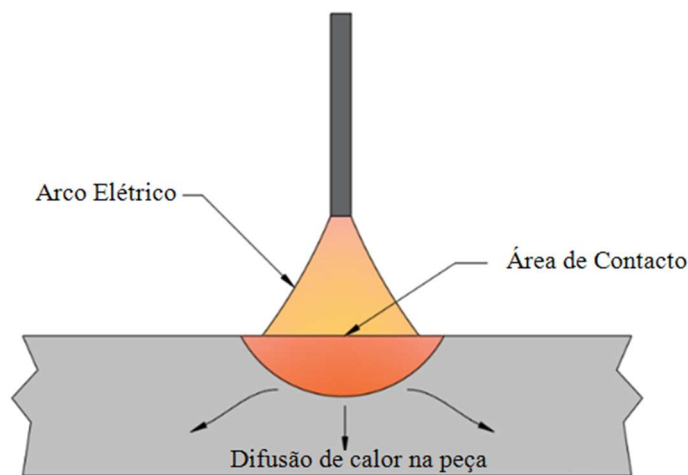


Figura 6 - Ilustração esquemática do fluxo geral de calor na soldadura por fusão. Adaptado de [7]

2.2.4.1 Intensidade e tensão do arco elétrico

A intensidade da corrente determina a temperatura do arco e conseqüentemente a facilidade de fundir o metal de base. A intensidade da corrente influencia a geometria final do cordão de soldadura, a transferência metálica e a velocidade de fusão (v_f). Este deve ser igual à velocidade de alimentação (v_a) para manter o comprimento do arco e a extensão do eletrodo fora do bico de contacto 1 (*stick out*). Neste processo, o valor de v_a depende do calor desenvolvido no arco elétrico (primeiro termo da equação) e do calor desenvolvido por efeito de Joule (segundo termo da equação), sendo I a intensidade de soldadura e α e β constantes [1],

[5]. Estas constantes dependem do metal a soldar e do diâmetro do fio apresentando-se na forma das curvas como na figura 7, para os casos do aço ao carbono e do alumínio.

$$v_a = \alpha I + \beta I^2 \quad (1)$$

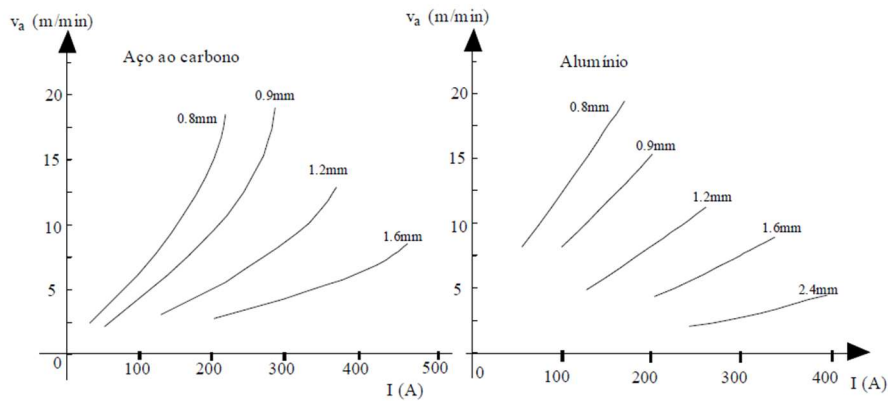


Figura 7 - Variação da corrente vs. velocidade de alimentação para diferentes diâmetros de arames consumíveis. [1]

A tensão do arco elétrico, V_{arco} , é um parâmetro de extrema importância nos processos, pois influencia o comprimento do arco, o tipo de deposição e a forma do cordão de soldadura. Contudo, é um parâmetro sem acesso direto pois depende diretamente da intensidade da corrente [1], [8].

2.2.4.2 Comprimento do arco, Stick-out e Stand-Out

O comprimento do arco é a distância entre a ponta do eletrodo em constante fusão e a superfície do banho de fusão (fig.8). É um parâmetro de grande importância para a obtenção de cordões de soldadura com bom aspeto e com boas propriedades mecânicas. O comprimento do arco varia de acordo com o tipo e diâmetro do eletrodo, a intensidade da corrente e também depende da posição de soldadura. Quanto maior for a diferença de potencial, maior será o comprimento do arco, o que pode originar uma proteção deficiente do material de adição durante e após a deposição, bem como provocar um elevado número de salpicos e uma trajetória irregular do arco, podendo dar origem à formação de porosidades no cordão de soldadura. De uma forma geral, o comprimento do arco ideal está relacionado com o valor do diâmetro do eletrodo. Usando um fio de maior diâmetro deve-se também aumentar a intensidade da corrente e o comprimento do arco [1], [4].

O stick-out corresponde à distância livre do eletrodo no exterior do bocal da tocha. Com valores baixos de stick-out há uma geração de calor insuficiente e por outro lado, com valores elevados pode haver instabilidade no arco elétrico e flexão no fio [1], [4], [7].

O stand-out é a distância livre desde a extremidade da tocha até à superfície de trabalho. Se esta distância for elevada, o gás dispersa muito e pode influenciar a proteção gasosa.

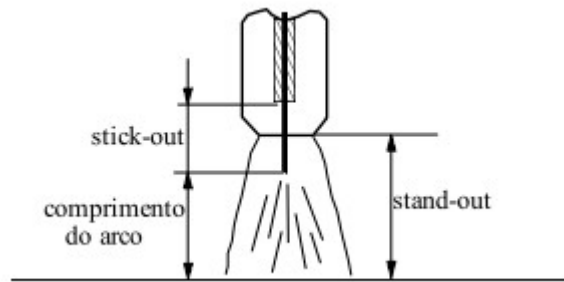


Figura 8 - Definição de stick-out, comprimento do arco e stand-out. [1]

2.2.4.3 Velocidade de Soldadura

A velocidade de soldadura (v_s) relaciona o deslocamento linear do eletrodo sobre a junta por unidade de tempo. Este parâmetro depende do tipo e da intensidade da corrente, da polaridade (no caso de corrente contínua), da velocidade de fusão do eletrodo, do tipo e dimensão da junta e do próprio estado superficial do metal de base [4]. O valor de v_s influencia a entrega térmica e a fluidez do banho de fusão sob o arco elétrico. Quando a velocidade de soldadura é baixa, o banho de fusão escoava sob o arco elétrico, impedindo que este chegue aos cantos inferiores da junta, que poderá dar origem a casos de fusão incompleta. Por outro lado, aumentar o seu valor reduz a entrega térmica na soldadura. No entanto velocidades excessivas podem originar fusão incompleta nas laterais da junta, uma vez que há um défice de aquecimento nessa região devido à diminuição da entrega térmica [4], [9].

2.2.4.4 Polaridade

O processo de soldadura MIG utiliza valores elevados de corrente ($I > 100 \text{ A/mm}^2$) e utiliza, normalmente, corrente contínua de polaridade inversa (pólo positivo ligado ao eletrodo). Ao utilizar-se polaridade inversa, os eletrões deslocar-se-ão da peça para o material de adição, aquecendo-o mais rapidamente e conseqüentemente melhorando a fusão do mesmo, tendo

influência na forma e dimensão da secção do cordão de soldadura [4], [10], como é esquematizado na figura 9. A polaridade negativa (pólo negativo ligado ao fio) raramente é utilizada devido à instabilidade do arco elétrico.

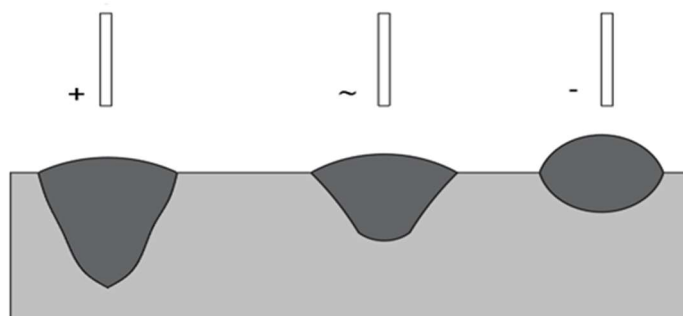


Figura 9 - Efeito da polaridade do fio na penetração. Adaptado de [10]

2.2.4.5 Modos de Transferência Metálica

O processo de soldadura MIG, dispõe de vários modos de transferência metálica. Pode dar-se essencialmente, por intermédio de um dos cinco modos: por spray, globular, por curto-circuito, por CMT (Cold Metal Transfer) e por corrente pulsada [11]. Estes modos de transferência metálica dependem dos parâmetros de tensão e corrente (fig.10), mas também de outros tais como o diâmetro e a composição do eletrodo, o *stick-out* e a composição do gás de proteção utilizado [12].

O modo de transferência metálica tem uma grande influência nas características operacionais do processo, tais como, na estabilidade, no nível de respingos, no formato e na espessura do cordão e na penetração. Como o modo de transferência metálica está dependente da sensibilidade de regulação e configuração dos parâmetros e fatores acima referidos, torna-se fundamental, se for possível, fazer uma seleção adequada destes parâmetros para obter a qualidade de soldadura desejada [9], [13].

Tabela 1 - Tensões convencionais para a soldadura MIG e tipos de transferência. Fonte: Adaptado de [8]

Tipo de Transferência Gás de Proteção	Transferência Globular (V)					Transferência por Curto-Circuito (V)			
	Ar	He	Ar-He (25%- 75%)	Ar-O2 (1% a 5%)	CO ₂	Ar	Ar-He (25%- 75%)	Ar-O2 (1% a 5%)	CO ₂
Metal									
Alumínio	25	30	29	-	-	19	-	-	-
Aço Carbono	-	-	-	28	30	17	18	19	20
Aços Inoxidáveis	24	-	-	26	-	18	19	21	-

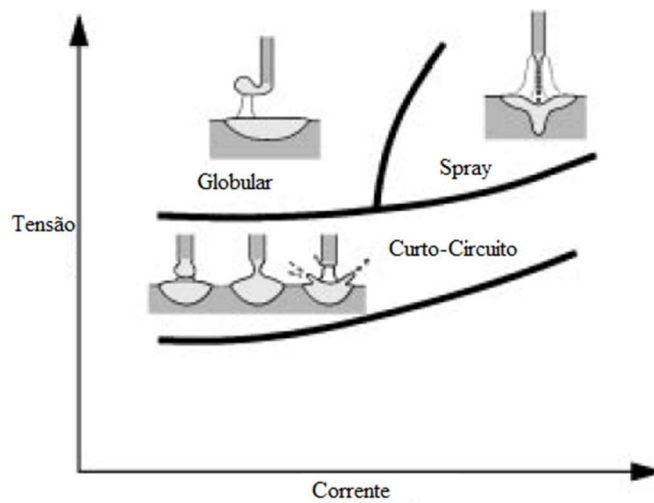


Figura 10 - Modos de transferência metálica para diferentes condições de tensão e corrente. [8]

A figura 11 mostra que há uma alteração bem definida da frequência (f) de transferência das gotas, ou do volume das gotas (V). Este valor de intensidade, denomina-se corrente de transição (I_{trans}) [1]. Atingindo níveis de corrente superiores a I_{trans} , dá-se uma redução brusca do diâmetro das gotas e, devido a predominarem forças eletromagnéticas no destacamento das gotas, passa a transferência por spray.

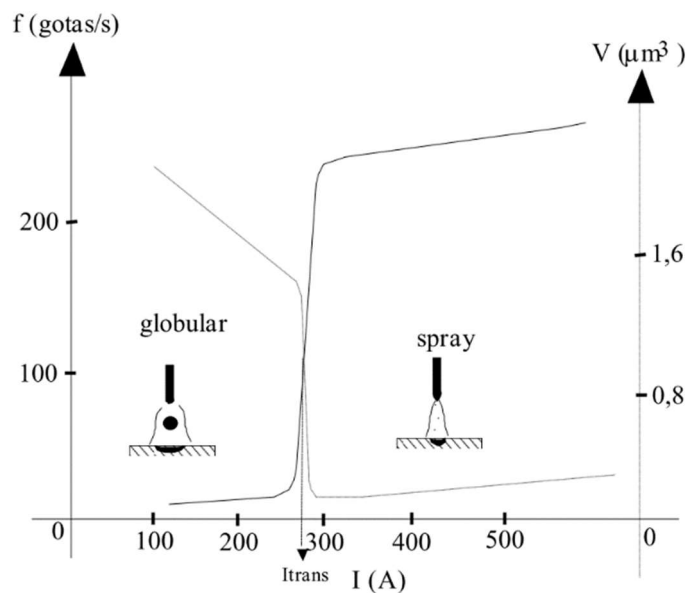


Figura 11 - Alteração rápida da frequência e tamanho das gotas. [1]

Como apresentado na figura 12, o valor de I_{trans} depende do material de adição e do diâmetro do eletrodo. Na tabela 2 são apresentados alguns valores da corrente de transição para diferentes metais de adição, com diferentes diâmetros de eletrodo e para diferentes gases protetores.

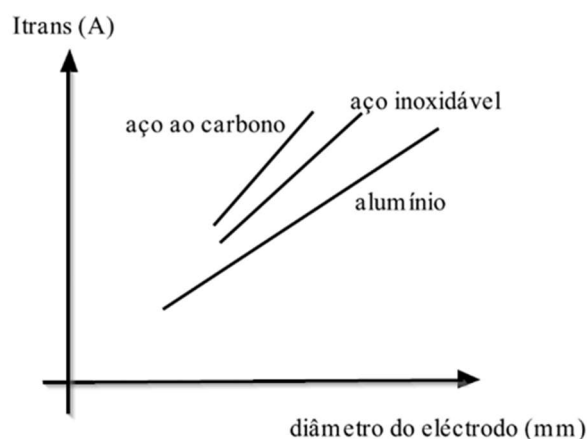


Figura 12 - Dependência da corrente de transição com o material de adição e diâmetro do eléctrodo. [1]

Tabela 2 - Corrente de transição para materiais de adição diferentes com diferentes diâmetros. [7]

Diâmetro Do arame (mm)	Corrente de Transição (A)		
	Aço carbono (Ar+2%O ₂)	Aço Inoxidável (Ar+2%O ₂)	Alumínio (Ar)
0,8	160		90
1,0	185	170	100
1,2	220	225	120
1,6	275	285	170

A transferência globular resulta de elevados valores de tensão e com corrente de soldadura abaixo da corrente de transição (I_{trans}). Caracteriza-se pela deposição de gotas de metal fundido com diâmetro igual ou superior ao do eléctrodo sendo controlada pela força da gravidade. Quando as gotas têm dimensões elevadas, pode ocorrer a formação de salpicos aquando da sua deposição [7], [8].

O modo de transferência por spray só pode ser utilizado em condições de elevada densidade de corrente, acima da I_{trans} . A transferência tende a ser estável, com mínimas perturbações no arco e poucos respingos. O metal é transferido através de um fluxo contínuo de pequenas gotas. Acima da corrente de transição, a transferência passa a ser controlada pelas forças de Lorentz, devidas ao campo eletromagnético, fazendo as gotas soltarem-se do eléctrodo, que estavam presas devido à ação da tensão superficial. As gotas são lançadas para o banho de fusão independentemente da posição de soldadura. Devido à corrente elevada, o modo de transferência por spray inviabiliza a soldadura de chapas finas e fica limitada à posição de soldadura horizontal [7], [10].

A transferência por curto-circuito dá-se a baixos valores de tensão e de corrente. A transferência metálica dá-se quando o eléctrodo entra em contacto com o banho de fusão, sendo que não há transferência através do arco eléctrico. Devido às baixas correntes e baixas tensões, este modo de transferência metálica é preferencialmente utilizado na soldadura entre materiais de baixas espessuras [14], [15].

2.2.4.6 Posição da tocha

A orientação da tocha, e por sua vez, a direcção de incidência do fio de MA, é crucial para a qualidade da soldadura final. Esta orientação afeta a penetração, a quantidade de respingos, a estabilidade e a orientação do arco eléctrico, o perfil, a forma e a largura do cordão e a microestrutura do material depositado. O incorreto posicionamento pode dar origem a problemas, tais como o aprisionamento de partículas sólidas, porosidades e mordeduras [4], [16], [17]. Considera-se a posição da tocha em função de fatores como o diâmetro do eléctrodo, a posição de soldadura e a geometria da junta [4].

Os termos mais utilizados para descrever os ângulos da tocha são *forehand*, perpendicular e *backhand*. A posição *forehand* (fig.13 (a)) permite boa visibilidade da junta de soldadura. A penetração é menor, o arco eléctrico é menos estável e há uma maior probabilidade de formação de respingos. Como esta posição aumenta a molhabilidade, origina um cordão largo e baixo e é geralmente utilizada no modo de transferência por curto-circuito [1], [16], [18], [19]. A posição perpendicular (fig.13 (b)) apresenta uma melhor estabilidade do arco do que na posição *forehand* e cria menos respingos. Permite uma boa penetração e origina um cordão mais estreito e mais alto [16], [18]. A posição *backhand* (fig.13 (c)) permite uma boa visibilidade do cordão de soldadura. Nesta posição, a penetração é maior, o arco eléctrico é mais estável e reduz significativamente a formação de respingos. Também origina um cordão mais estreito e mais alto quando comparado às duas posições anteriores e é geralmente o mais utilizado com transferência por spray [1], [16], [18]. A figura 14 ilustra bem o resultado da forma dos cordões com a utilização destes conceitos.

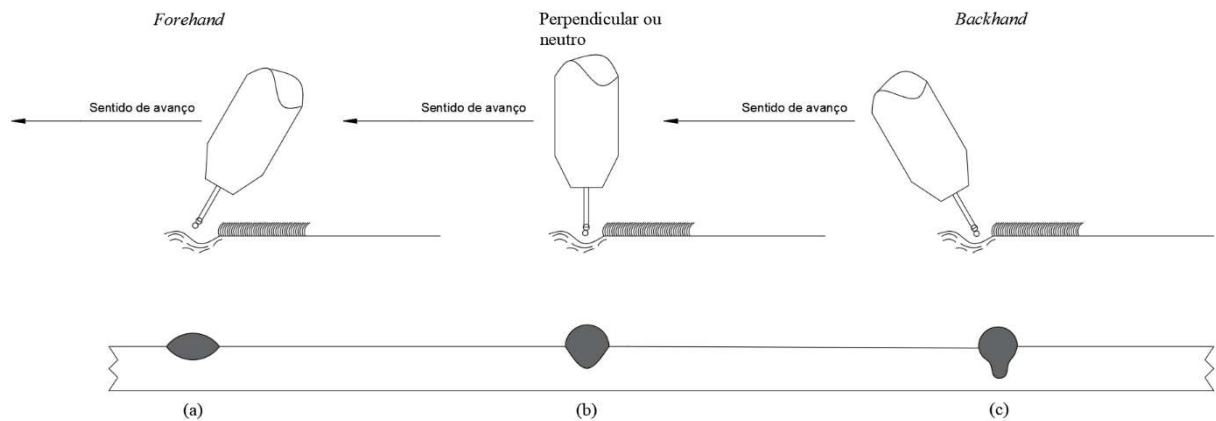


Figura 13 - Ilustração esquemática dos tipos de posições da tocha.



Figura 14 - Secções transversais de soldadura para as diferentes posições da tocha “forehand” (esquerda), perpendicular (centro) e “backhand” (direita). [19]

2.2.4.7 Gás de Proteção

O gás que sai do bocal da tocha tem como objetivos a formação do arco elétrico e fazer a proteção do banho de fusão de elementos presentes no ar atmosférico (azoto, oxigénio e hidrogénio) prevenindo a formação de porosidades e inclusões de escória. Para além disso, tem também um papel importante na estabilidade do arco e no modo de transferência metálica [5], [8].

Os gases inertes mais utilizados são o argón (Ar) e o hélio (He), sendo que cada um oferece características diferentes à soldadura. O Ar, permite obter um arco mais estável, uma boa decapagem, velocidade baixa de arco e permite também efetuar soldadura de posição. É mais denso que o He, fornecendo maior proteção gasosa e é também mais barato. No entanto o He por ser mais emissivo, permite uma maior penetração do cordão e uma maior velocidade de soldadura [1], [2]. Quando o argón puro é utilizado como gás de proteção em soldaduras de ligas ferrosas, o arco pode tornar-se irregular e há uma tendência para a formação de

mordeduras [14]. A mistura de dióxido de carbono (CO_2) com Ar permite melhorar a entrega térmica e a penetração do cordão. A adição de mistura de oxigénio (O_2) com Ar permite melhorar a estabilidade do arco e a fluidez do banho metálico, contudo as proporções de oxigénio devem ser controladas para restringir a oxidação [15].

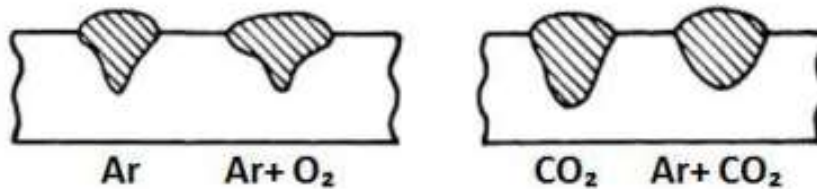


Figura 15- Geometria dos cordões utilizando diferentes gases de proteção. [8]

2.3 Análise Térmica

Nos processos de soldadura por fusão, o calor gerado que chega à superfície do metal de base fundindo o material de adição até uma certa profundidade, compreendem a análise térmica. Depois, quando ocorre a solidificação conjunta, forma-se o cordão de soldadura [2], [3]. O balanço entre o calor gerado no arco elétrico, nas reações químicas presentes durante o processo e na transformação do material definem a análise térmica. Esta, pode ser feita através do ciclo térmico e através da repartição térmica [1], [2].

2.3.1 Entrega térmica

A entrega térmica define-se como a energia adicionada a um material, por unidade de comprimento, a qual afeta o ciclo térmico de soldadura [20], [21]. Depende de parâmetros de soldadura tais como a tensão de soldadura (U), a corrente de soldadura (I_s) e a velocidade de soldadura (v_s). Depende também do rendimento do processo (η), que demonstra a energia efetivamente transferida para a peça, estando essencialmente dependente do processo de soldadura utilizado [21]. A entrega térmica, segundo a norma EN 1011-1 [22], é dada pela equação 2:

$$Q = \eta \times \frac{U \times I}{v_s} \quad (2)$$

Na tabela 3 são apresentados os valores de η para cada tipo de processo de soldadura.

Tabela 3 - Eficiência térmica dos processos de soldadura. Fonte: Adaptado de [21]

Nº do Processo	Processo	η
121	Soldadura por arco submerso	1
111	Soldadura por eléctrodo revestido	0,8
135	Soldadura MAG	0,8
114	Soldadura com eléctrodo c/ fluxo e sem gás de proteção	0,8
138	Sold. c/ eléctrodo tubular c/ núcleo metálico e gás ativo de proteção	0,8
141	Soldadura TIG	0,6

A entrega térmica é fulcral para a qualidade metalúrgica das soldaduras. Quanto maior for a entrega térmica, maior é a quantidade de calor transferida para a peça a soldar e maior será o banho de fusão [8], [20].

2.3.2 Ciclo térmico

Devido à evolução da temperatura registada durante a soldadura, o material de base fica sujeito a um ciclo térmico [5]. É possível que sejam feitas aproximações com o intuito de prever e explicar quais os efeitos do calor sobre um determinado metal em condições práticas [1], [2]. O ciclo térmico define a forma como a temperatura de um determinado ponto, na proximidade do local de soldadura, evolui com o tempo. Os principais fatores que influenciam o ciclo térmico são o processo de soldadura, o material e a espessura das peças, o tipo de junta, a temperatura inicial, a posição do ponto segundo a espessura da peça e a sua posição em relação ao eixo do cordão [1]. Relativamente à distribuição dos ciclos térmicos em função da distância ao cordão de soldadura e com o apoio da figura 16 podem ser feitas algumas observações. A primeira é o facto de as temperaturas máximas diminuírem quando a distância aumenta em relação ao cordão de soldadura. Pode-se também observar que as temperaturas máximas não são atingidas simultaneamente, devido à condutibilidade térmica que afeta o escoamento do calor entre um ponto (A) e outro (B) mais afastado da fonte de calor [1].

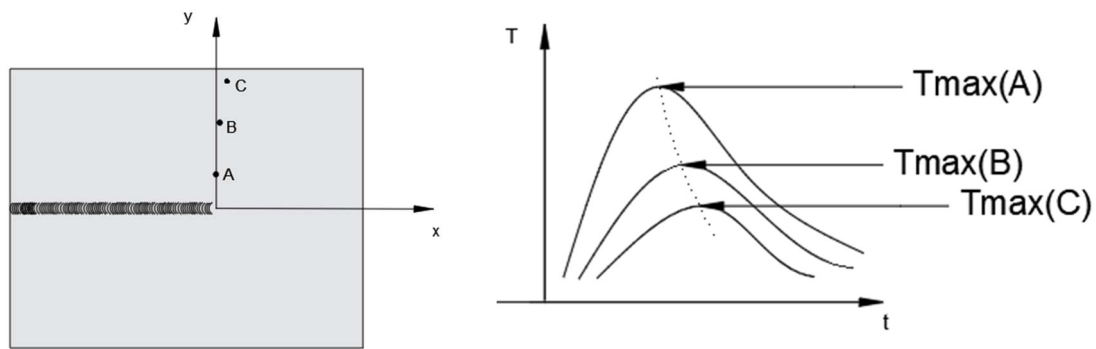


Figura 16 - Distribuição dos ciclos térmicos para distâncias ao cordão de soldadura.

Para a mesma temperatura máxima, os processos de soldadura menos energéticos são caracterizados por terem ciclos térmicos mais lentos e extensos. Por outro lado, os processos de soldadura mais energéticos têm ciclos térmicos mais rápidos e menor gradiente no arrefecimento [1], [2].

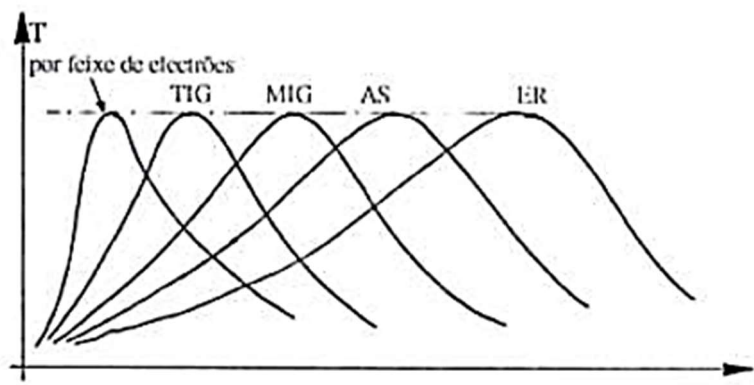


Figura 17 - Distribuição dos ciclos térmicos em alguns processos de soldadura. [1]

Existem fatores, relativos à peça a soldar, que também influenciam o ciclo térmico. Um desses fatores é a condutibilidade térmica (k) do material. Quanto maior k , menor será a temperatura máxima, para igual entrega térmica, pelo que se obtêm gradientes de temperatura maiores no arrefecimento. Assim, o ciclo térmico causa um aquecimento mais lento e um arrefecimento mais rápido devido à capacidade de o material dissipar calor. Quando a espessura das peças ou o número de vias de escoamento de calor aumentam, o ciclo térmico sofre alterações idênticas às provocadas pelo aumento da condutibilidade térmica [2].

2.3.3 Repartição térmica

Durante a soldadura por fusão, algum metal é aquecido até fundir, arrefecendo depois até à temperatura ambiente. Devido à condutibilidade térmica, quanto mais próximo do cordão maiores serão as temperaturas máximas (ou de pico), mas o metal mais afastado do cordão de soldadura também irá aquecer, resultando numa microestrutura complexa [23]. A repartição térmica é o perfil de temperatura com a distância. Na evolução desta, vai-se passando por alterações microestruturais que são resultantes das transformações de fase.

As diferenças a nível microestrutural, permitem identificar e analisar as zonas afetadas pelo calor. Com isto podem ser estudadas as influências dos parâmetros de soldadura, da dimensão da junta e da velocidade de soldadura. Na figura 17 é apresentada uma ilustração esquemática que generaliza as diferentes zonas afetadas pelo calor durante o processo de soldadura.

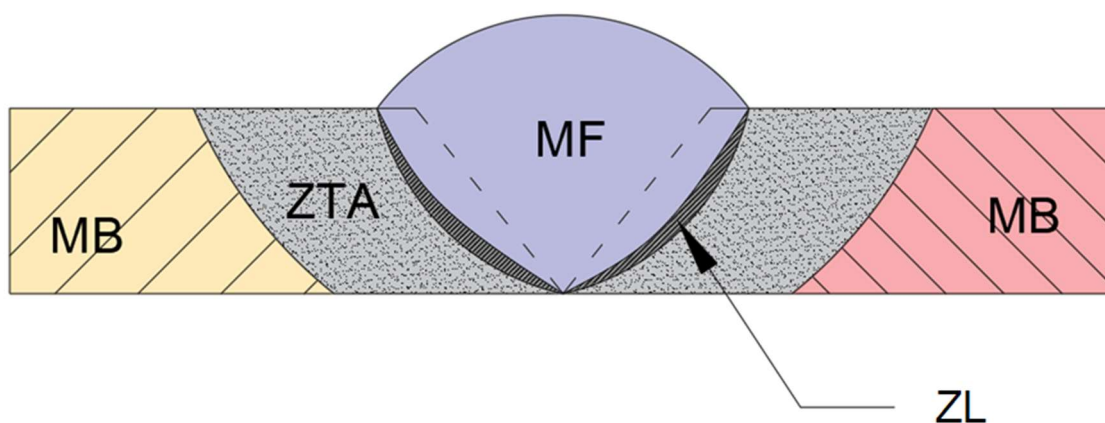


Figura 18 - Ilustração esquemática das zonas afetadas pelo calor durante um processo de soldadura.

O metal de base (MB) corresponde àquele que não sofreu alterações microestruturais, pois apesar de haver variação de temperatura nestas zonas, não é suficiente para originar alterações microestruturais no metal. No entanto, pode criar um estado de tensão e haver o aparecimento de deformações residuais [1], [5].

A zona termicamente afetada (ZTA) é a região vizinha do cordão de soldadura e onde, devido ao efeito das temperaturas máximas registadas nesta zona, ocorrem transformações de fases, ou seja, dá-se alteração ao nível da microestrutura do material, alterando-se assim as suas propriedades originais [1]. Segundo Jaehong Yoo et al., citado em [5], dentro da zona termicamente afetada existem várias subzonas com diferentes tipos de grão. Não é possível

delimitar exatamente a fronteira entre cada uma das subzonas, pois o que se verifica é um gradiente contínuo de microestruturas, que estão na definição da soldadura.

A zona de ligação (ZL), diz respeito a uma faixa estreita, que nem sempre existe, e que se caracteriza por “registar temperaturas máximas abaixo da temperatura de fusão”, em casos onde ocorre apenas uma fusão parcial do material nesta região [1].

Quando as temperaturas máximas ultrapassam a temperatura de fusão dos materiais, o metal de base funde conjuntamente com o material de adição (caso seja utilizado), no banho de fusão [1], [5]. A zona de metal fundido (MF) corresponde à área onde as temperaturas máximas ultrapassaram a temperatura de fusão e que definem o cordão de soldadura [1].

A diluição (D) relaciona a quantidade de metal de base que fundiu e que contribuiu para o cordão de soldadura. O valor da diluição (D) depende do processo de soldadura, do material e da preparação da junta. Preferencialmente deve ser um valor elevado. Este valor é calculado através da equação 3.

$$D = \frac{\text{Área (ou volume) de MB fundido}}{\text{Área (ou volume) total de metal fundido}} \quad (3)$$

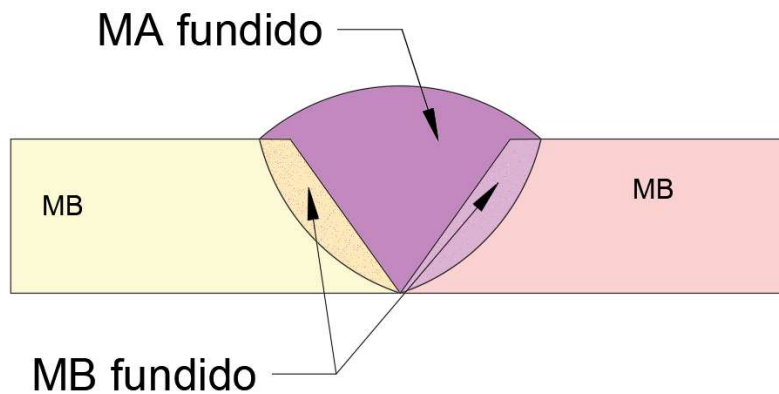


Figura 19 - Ilustração da zona de diluição.

2.4 Soldabilidade

A soldabilidade é a capacidade que os metais têm para se ligarem através da fusão formando um conjunto contínuo e sólido, sem alterarem significativamente as suas propriedades mecânicas originais, atendendo aos requisitos pré-estabelecidos em normas e projetos [24]. Segundo a norma ISO581/80, citado em [25], a soldabilidade de um metal pode

ser definida, por um conjunto de procedimentos e aplicações específicas de uma técnica adequada, quando já não é só a continuidade estrutural da junta que está em causa, mas também cumprir requisitos prescritos no que diz respeito às suas propriedades locais e à sua influência na construção da qual é parte integrante.

A soldabilidade pode ser dividida em duas componentes: a soldabilidade metalúrgica e a soldabilidade construtiva (ou operatória). A soldabilidade metalúrgica considera a metalurgia da junta através do estudo das alterações físico-químicas do metal causadas pela energia térmica. A forma como se dá o arrefecimento afeta a organização microestrutural e, conseqüentemente, as propriedades resultantes, como o tamanho e forma de grão que podem originar zonas frágeis que potenciam o aparecimento de fissuras. A soldabilidade metalúrgica é afetada pelos mesmos parâmetros e procedimentos que influenciam o ciclo térmico [1]. É a capacidade do material responder bem a todos os fenómenos metalúrgicos impostos pelo processo de soldadura adotado, incluindo todo o ciclo térmico e em toda a região definida pela repartição térmica [24].

A soldabilidade construtiva considera todos os outros parâmetros que influenciam a qualidade da soldadura, que estão dependentes do modo e dos componentes usados na soldadura. Alguns desses parâmetros são o tipo de junta, características do processo de soldadura, os parâmetros de soldadura, a própria peça, o modo de deposição, etc. [1], [25].

A soldabilidade não depende só dos materiais a serem soldados, mas depende também de outros fatores, tais como o modo de arrefecimento, o tipo de preparação de junta etc. Há materiais que necessitam de muitos cuidados e um controlo apertado durante o processo de soldadura, são denominados de materiais com baixa soldabilidade. Por outro lado, materiais que exigem poucos cuidados e um menor controlo durante o processo de soldadura são denominados materiais com boa ou alta soldabilidade.

2.5 Defeitos de Soldadura

Devido aos fenómenos metalúrgicos que se desenvolvem durante o processo e à técnica de soldadura (soldabilidade operatória), a soldadura é um processo suscetível à formação de defeitos, tensões residuais e distorção. Os defeitos ocorrem na ZTA, na zona MF ou à superfície destas. Os defeitos são, essencialmente, porosidades, fissuras, inclusões de escória, mordeduras e falta de penetração.

2.5.1 Porosidades

As porosidades ocorrem quando bolhas de gás de reduzida dimensão ficam retidas no interior aquando da solidificação do metal. Geralmente os poros têm um formato aproximadamente esférico, embora possam ser formados poros alongados associados ao hidrogénio [26]. As principais causas para a formação de porosidades estão relacionadas com a humidade existente nas peças, uma deficiente proteção gasosa do material fundido e reações químicas no metal fundido [5].

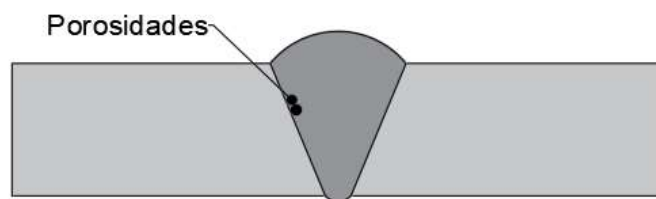


Figura 20 - Ilustração esquemática de porosidades presentes num cordão de soldadura.

2.5.2 Fissuração a quente

A fissuração a quente é geralmente intergranular (nas fronteiras entre os grãos), ou seja, a fissura propaga-se ao longo das fases com baixo ponto de fusão. Este tipo de fissuração ocorre na zona fundida, antes de o cordão arrefecer. A fissuração na solidificação dá-se devido à existência de elementos com tendência a formar fases com baixo ponto de fusão, reduzindo a resistência mecânica a quente [27], ou à criação de um elevado estado de tensão.

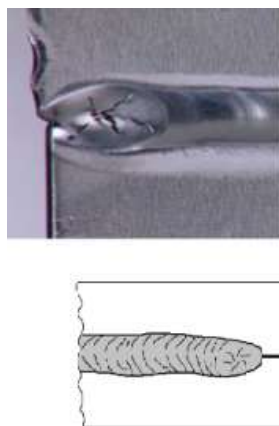


Figura 21 - Formas de fissuração a quente. [27]

2.5.3 Fissuração por corrosão

Este tipo de fissuração ocorre em materiais que estão expostos a ambientes corrosivos, embora não seja um problema específico da junta soldada, é potenciado pela presença de tensões residuais resultantes do processo de soldadura. Uma forma de prevenir a formação deste defeito é submeter a junta soldada a um tratamento térmico de alívio de tensões [5].

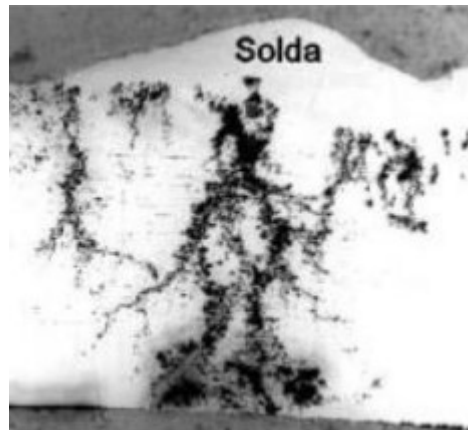


Figura 22 - Fissuras de corrosão sob tensão de um aço inoxidável. [5]

2.5.4 Inclusões

As inclusões ocorrem quando partículas de óxido, escória ou outros sólidos não-metálicos ficam aprisionados entre o cordão de soldadura e o metal de base, ou entre passes de soldadura subsequentes. Alguns fatores que favorecem a formação deste defeito são, por exemplo, a má preparação da junta (chanfro muito fechado), a formação de um cordão irregular ou uma manipulação inadequada da tocha que pode fazer com que a escória escoe à frente da poça de fusão, ficando assim retida no cordão de soldadura [26]. As inclusões atuam como um concentrador de tensões que podem dar origem a fissuras.



Figura 23 - Ilustração esquemática de inclusão de escória. [26]

2.5.5 Mordeduras

As mordeduras são reentrâncias formadas pela ação da fonte de calor do arco entre um passe de soldadura e o metal de base ou outro passe adjacente [26]. É um defeito comum em juntas de ângulos sobrepostos, no entanto, pode também ocorrer em juntas de topo. Este defeito é geralmente resultado do uso inadequado de parâmetros de soldadura, particularmente a velocidade de soldadura e a tensão do arco elétrico [28]. Quando as mordeduras são formadas na última camada do cordão, há uma redução da espessura da junta que atua como um foco de concentração de tensões [26].



Figura 24 - Ilustração esquemática de mordeduras na última camada de um cordão de soldadura. [26]

2.5.6 Falta de penetração

A falta de penetração do cordão pode ser causada pelo uso de parâmetros inadequados durante o processo de soldadura, por uma má seleção da preparação da junta de soldadura ou por algum desalinhamento [5]. O defeito refere-se à falha de enchimento completo, geralmente na raiz do cordão de soldadura, que origina uma redução da secção útil do cordão reduzindo a resistência e atuando também como um concentrador de tensões [26].



Figura 25 - Ilustração esquemática de falta de penetração numa junta soldada. [26]

2.6 Inspeção de Juntas Soldadas

A inspeção de um conjunto soldado envolve atividades relacionadas com o processo de soldadura, a metalurgia da soldadura, métodos de avaliação dimensional, visual e não destrutiva e também diferentes tipos de testes destrutivos, nomeadamente ensaios mecânicos que cumprem diferentes normas. A inspeção, após a soldadura, deve englobar alguns passos como a verificação da conformidade com os desenhos e especificações, a limpeza, a inspeção com

ensaios não destrutivos, a inspeção com ensaios destrutivos (em amostras), controlo de tratamento térmico após a soldadura (caso necessário) e o preenchimento da documentação das atividades de fabrico e inspeção [26].

2.6.1 Ensaios não destrutivos

2.6.1.1 Inspeção visual

A inspeção visual é o método imediato, menos dispendioso e o mais utilizado, numa primeira fase de verificar possíveis defeitos na soldadura. Quando realizada corretamente pode ser uma boa triagem de inspeção de soldadura para a maioria das aplicações. Geralmente, precede qualquer outro tipo de ensaio. Permite determinar o tamanho, a forma e o acabamento de defeitos superficiais. Podem ainda ser utilizados instrumentos adequados de medição e gabaritos [26].

2.6.1.2 Líquidos penetrantes

A inspeção por líquidos penetrantes é um ensaio não destrutivo que tem por objetivo detetar discontinuidades presentes à superfície da soldadura, tais como, poros e fissuras. O ensaio é feito através de um líquido que penetra nas discontinuidades e, após a aplicação de um revelador, há revelação das mesmas [29]. O líquido penetrante é aplicado sobre a superfície do cordão. Para isso, deve estar devidamente limpo e seco, de forma a facilitar a penetração do líquido nas discontinuidades. Após algum tempo, é removido o excesso de líquido penetrante e é aplicado um revelador. O revelador vai atuar no líquido presente nas discontinuidades e desta forma revelá-lo-á, permitindo a visualização das discontinuidades para que sejam avaliadas [30]. É um processo simples que pode ser aplicado em todos os materiais.

2.6.1.3 Partículas magnéticas

O ensaio por partículas magnéticas é um ensaio não destrutivo que tem como objetivo revelar discontinuidades superficiais e subsuperficiais em materiais ferromagnéticos. A peça em estudo é magnetizada e são colocadas pequenas partículas magnéticas (pó de ferro) sobre a superfície. Quando é aplicado um campo magnético, as partículas de pó alinham-se segundo a distribuição do campo magnético, apresentando discontinuidades quando há interrupção desse campo por algum tipo de defeito [26], [31]. Este ensaio não destrutivo é relativamente fácil de utilizar, o equipamento e o material necessários são de baixo custo e quando comparado com o

ensaio por líquidos penetrantes mostra ser mais rápido e mais sensível na deteção de descontinuidades.

2.6.1.4 Ultrassons

O ensaio por ultrassons é um método não destrutivo. É baseado no uso de ultrassons de elevada frequência no material a ser estudado, com o objetivo de detetar descontinuidades e determinar o seu tamanho, a forma e a localização [26], [31]. A propagação da onda sofre reflexões nas interfaces da peça e nos defeitos (como fissuras, inclusões, poros e faltas de fusão) que atuam como interface, permitindo assim que seja feita a sua deteção [30]. O ensaio convencional por ultrassons apresenta algumas vantagens, tais como, a possibilidade de serem detetadas não só descontinuidades internas como também descontinuidades superficiais. Permite detetar a presença de corrosão ou desgaste dos materiais e é um equipamento leve e portátil. No entanto apresenta algumas limitações como a interpretação dos resultados ser relativamente difícil, o que geralmente requer um profissional com elevado grau de experiência, tanto na execução do ensaio como na análise das descontinuidades. Para além disso, superfícies irregulares podem reduzir a eficácia do ensaio e secções finas podem apresentar problemas para a sua execução ou exigir a implementação de técnicas especiais [26], [30], [32].

2.6.1.5 Radiografia

O ensaio por radiografia é um ensaio não destrutivo que se baseia nas variações da absorção de radiação eletromagnética penetrante, como por exemplo, os raios-X e os raios gama, pelo material em estudo [26]. O objetivo deste ensaio é detetar variações de espessura e outros defeitos ou falhas. Devido às descontinuidades, às diferenças de densidade e alterações de geometria, o feixe de radiação penetrante sofrerá uma maior ou menor absorção pelo material em estudo que pode ser detetada através de um filme ou outro sistema de deteção. A variação de absorção registada indicará a existência de uma falha ou defeito interno no material a ser estudado [29], [31]. A radiografia é um ensaio que pode ser utilizado na maioria dos materiais, geometrias e estruturas, como por exemplo, soldaduras, peças fundidas, compósitos entre outros. Ademais, providencia um registo permanente e de alta sensibilidade. Em contrapartida, este ensaio tem algumas limitações, como por exemplo, espessura limitada com base na densidade do material, a orientação de descontinuidades planares que pode ser crítica em certas situações e o perigo de radiação [31].

2.6.2 Ensaios destrutivos

Os ensaios destrutivos são métodos utilizados para avaliar o efeito de um fator ou parâmetro no desempenho da soldadura. Comumente, é realizado através do seccionamento do conjunto soldado avaliando várias características mecânicas e físicas. Estes ensaios provocam a inutilização do material [32], [33]. Geralmente os ensaios destrutivos são realizados para fazer uma qualificação do processo de soldadura, teste de qualificação de desempenho de soldadores e realizar o controlo de qualidade dos materiais, recorrendo a ensaios químicos, metalográficos e mecânicos [34], [35].

2.6.2.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração é um ensaio destrutivo que é utilizado para avaliar a resistência mecânica de um determinado material. Neste ensaio, utilizando uma força de tração, deforma-se um provete até à fratura, num intervalo de tempo relativamente curto e com uma velocidade constante [35], [36]. A carga aplicada ao provete é controlada através de células de carga com registo contínuo da evolução de valores de força e deslocamento do provete. O ensaio de tração permite obter propriedades mecânicas dos materiais, tais como, o módulo de elasticidade, tensão de cedência a 0.2%, tensão de rotura, alongamento percentual até à fratura e percentagem de redução de área à fratura [36].

2.6.2.2 Ensaio de dobragem

O ensaio de dobragem é um método que tem como objetivo determinar a capacidade dos materiais para suportar deformação plástica imposta por dobragem mantendo a sua integridade. Consiste na deformação de um provete por efeito de dobragem, sem alterar o sentido da aplicação da força até ser atingido o ângulo de dobragem, especificado na norma do produto [32], [35]. A força aplicada deve ser progressivamente crescente, sem variações bruscas nem vibrações, e a velocidade de ensaio não deve ser muito elevada para que o ensaio seja considerado como ensaio estático. De um modo geral, o ensaio de dobragem terá resultados satisfatórios na ausência de fissuras na parte convexa do provete, no entanto a interpretação dos resultados deve ser feita de acordo com as exigências normativas do produto a ser ensaiado [32].

2.6.2.3 Ensaio de choque (ensaio *Charpy*)

O ensaio *Charpy* consiste em atingir um provete entalhado com impacto de um martelo-pêndulo, com o objetivo de determinar a energia absorvida pelo material em estudo. Um provete simples com um entalhe é fixado pelas extremidades. O martelo é solto de uma altura pré-definida e bate na peça de teste na face oposta ao entalhe maquinado, fazendo com que se divida. Através da altura que o pêndulo alcança, depois do embate, é possível calcular a energia absorvida no impacto. Após o ensaio, é feita uma inspeção visual da superfície da fratura de forma a caracterizar o tipo de fratura, se é frágil ou dúctil [35], [37].

2.6.2.4 Ensaio de dureza

A dureza é uma medida da resistência de um material metálico à deformação plástica. É medida pressionando, com uma força aplicada ao indentador contra a superfície da amostra, de forma a determinar a resistência do material à penetração. O indentador é feito de um material muito mais duro que o material a ser ensaiado, e é geralmente de forma esférica ou piramidal [35], [36]. Após um tempo predefinido, o indentador retrocede e deixa uma marca na superfície, a indentação residual, e pode então determinar-se um valor de dureza empírico [36]. Os ensaios de dureza mais comuns são *Brinell*, *Vickers*, *Knoop* e *Rockwell*. No entanto, para a obtenção de um perfil de durezas de uma junta soldada, utiliza-se, geralmente, o ensaio de dureza *Vickers*, uma vez que este produz indentações de menores dimensões e que facilita a sua identificação e medição. A variação de dureza permite identificar alterações de propriedades nas diferentes regiões da junta soldada [35], [36]. É importante realçar que o ensaio de dureza pode ser não-destrutivo, pois o teste pode ser feito à superfície da peça, não prejudicando a utilização do material.

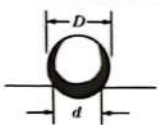
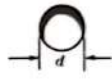
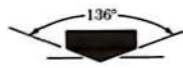



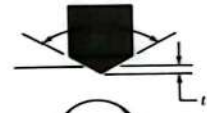

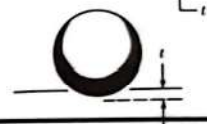

Ensaio	Indentador	Forma da indentação		Carga	Fórmula do número de dureza
		Vista lateral	Vista de topo		
Brinell	Esfera de aço ou carboneto de tungsténio, com 10 mm de diâmetro			P	$NDB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Pirâmide de diamante			P	$NDV = \frac{1,854 P}{d^2}$
Microdureza Knoop	Pirâmide de diamante			P	$NDK = \frac{14,2 P}{l^2}$
Rockwell					
A C D	Cone de diamante			60 kg R_A	100-500r
				150 kg R_C	
B F G	Esfera de aço com 1,6 mm de diâmetro			100 kg R_B	
				60 kg R_1	130-500r
				150 kg R_2	
E	Esfera de aço, com 3,2 mm de diâmetro			100 kg R_E	

Figura 26 - Ensaios de dureza. [36]

3 Trabalho Experimental

3.1 Material de Base

Neste estudo, o material de base utilizado foi uma barra de aço inoxidável austenítico AISI 316 com 6 mm de espessura. A sua composição é apresentada na tabela 4.

Tabela 4 - Composição Química do aço AISI316. Dados obtidos pelo fornecedor.

Material	Cr %	Ni %	Mn %	Mo %	Si %	N %	P %	C %	S %
AISI316	18,5	13,0	2,0	2,5	1,0	0,11	0,045	0,07	0,03

A utilização do diagrama de Schaeffler permite confirmar o tipo de aço inoxidável. A percentagem de cromo e níquel equivalente são dadas pelas expressões do referido diagrama, equações (4) e (5).

$$\%Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 1,5 \times \%Si + 0,5 \times Nb \quad (4)$$

$$\%Ni_{eq} = \%Ni + 30 \times \%C + 0,5 \times \%Mn \quad (5)$$

As percentagens de cromo equivalente e de níquel equivalente do aço inoxidável utilizado são apresentadas abaixo.

$$\%Cr_{eqAIS1316} = 22,2 \%$$

$$\%Ni_{eqAIS1316} = 16,1\%$$

Estes valores, no diagrama de Schaeffler, confirmam que se trata, de facto, de um aço inoxidável austenítico.

3.2 Seleção do Material de Adição

De forma a fazer uma seleção adequada do metal de adição a ser utilizado, o recurso ao diagrama de Schaeffler com sobreposição das regiões de risco de Bystran permite que sejam observadas as regiões de riscos e assim prever e evitar problemas no metal que é fundido.

Os materiais de adição utilizados foram o OK AUTROD 308LSi com Ø0.8mm e o OK AUTROD 347Si com Ø1.2mm.

As composições químicas dos materiais de adição selecionados são apresentadas na tabela 5.

Tabela 5 - Composição química dos materiais de adição selecionados. Dados obtidos através da ficha técnica dos metais de adição (Anexo 3 e 4).

Material	%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Ni	%Cr	%Mo	%Cu	%N	%Nb
OK AUTROD 308LSi	0,01	1,8	0,8	0,01	0,01	10,0	20,0	0,1	0,10	0,06	-
OK AUTROD 347Si	0,04	1,7	0,7	-	-	9,8	19,0	0,1	0,1	-	0,6

Através das equações 4 e 5, as percentagens de cromo e níquel equivalente dos materiais de adição utilizados são:

$$\%Cr_{eqOK308LSi} = 21,3 \%$$

$$\%Ni_{eqOK308LSi} = 11,2\%$$

$$\%Cr_{eqOK347Si} = 20,45 \%$$

$$\%Ni_{eqOK347Si} = 11,85\%$$

Os valores típicos da diluição para o processo MIG são da ordem de 25%. Tendo em conta os valores de cromo e níquel equivalentes, anteriormente calculados, observa-se que o material de adição OK AUTROD 308LSi está fora das zonas de risco ilustradas no diagrama de Schaeffler com as regiões de risco de Bystran para aços inoxidáveis (fig.27). O material de adição OK AUTROD 347Si também se encontra fora das zonas de risco ilustradas no diagrama (fig.27). O ponto 1 representa o metal de base e os pontos 2 e 4 representam os metais de adição OK AUTROD 347Si e OK AUTROD 308LSi, respetivamente. Os pontos 3 e 5 representam o resultado final. Na figura 28 é apresentado um pormenor dos pontos apresentados na figura 27.

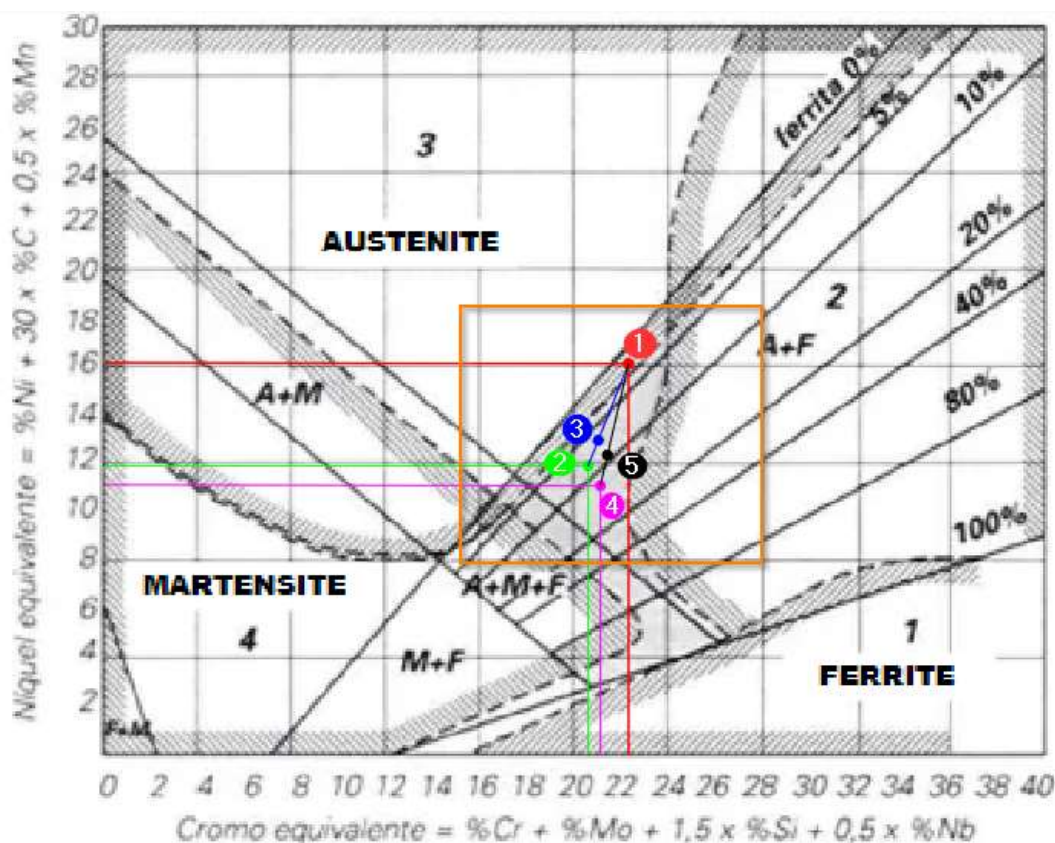


Figura 27 - Diagrama de Schaeffler com regiões de Bystran para o metal de base AISI316 e os metais de adição utilizados.

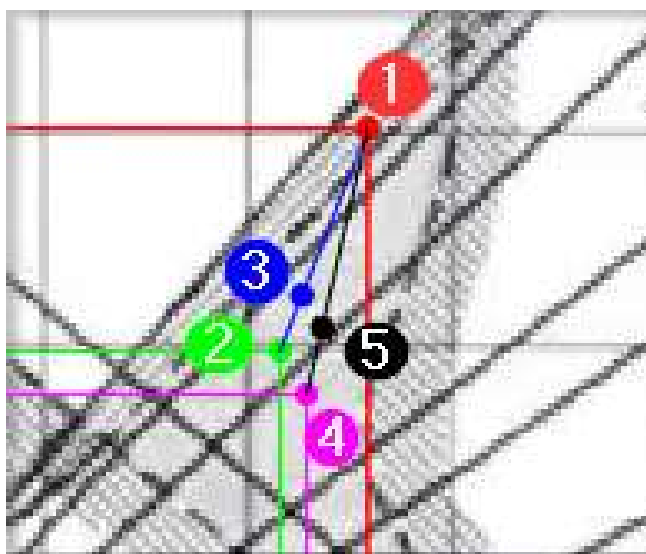


Figura 28 - Pormenor da figura 27.

3.3 Soldaduras

3.3.1 Equipamento de soldadura

As soldaduras realizadas pelo processo MIG, foram produzidas nas oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial do Instituto Politécnico de Viseu, com o auxílio de um mecanismo constituído por uma guia de forma a tornar o processo com movimento automático. A guia é constituída por um motor de passo, um controlador e um driver (fig.29). A máquina de soldadura utilizada foi a Safmig 480 TRS da SAF (fig.30).

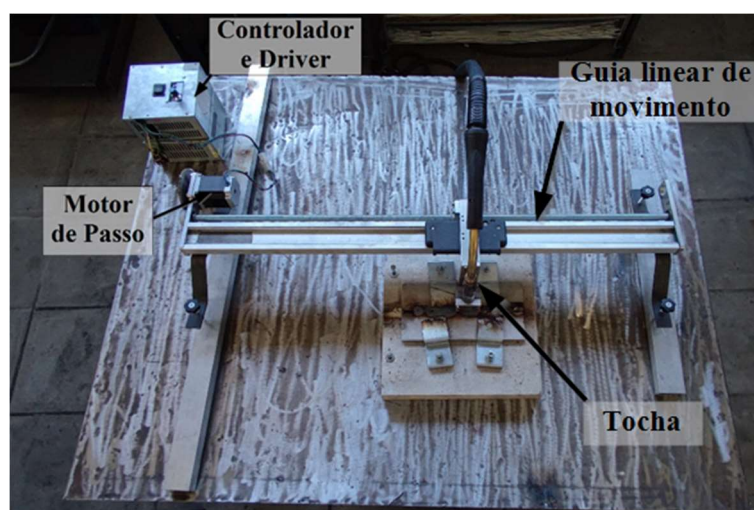


Figura 29 – Mesa com guia mecanizada do processo de soldadura.

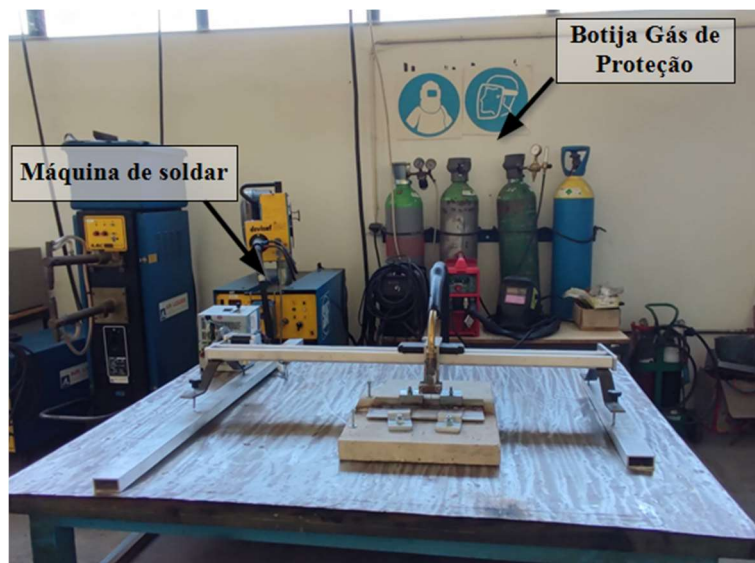


Figura 30 - Área de trabalho utilizada nas soldaduras.

3.3.2 Soldaduras

Foram realizadas soldaduras pelo processo MIG em chapas de aço inoxidável de 6mm de espessura e em juntas de topo. Nos subcapítulos seguintes são apresentados os parâmetros e a preparação de junta utilizados em cada soldadura. Para todas as soldaduras realizadas, o gás de proteção utilizado foi argon puro. Na figura 31 é apresentada o tipo de preparação genérica de junta utilizada nas amostras B, C, D, E, G, H, I, J e K. O valor f , representa a folga entre as chapas a soldar, t representa o talão e α representa o ângulo de abertura do chanfro.

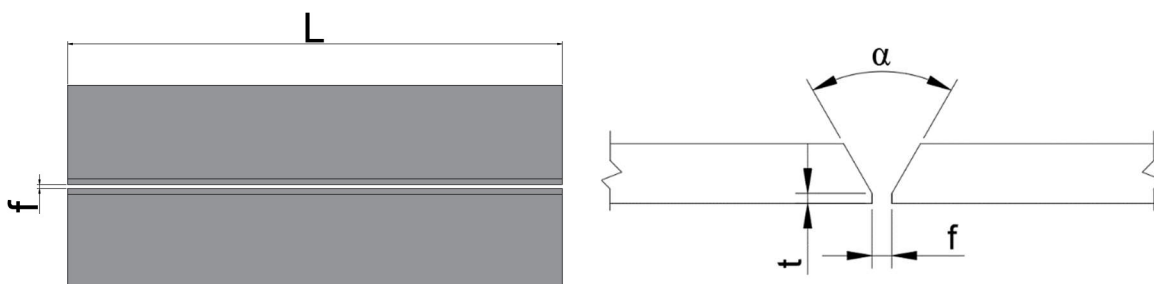


Figura 31 - Ilustração esquemática da junta de soldadura utilizada.

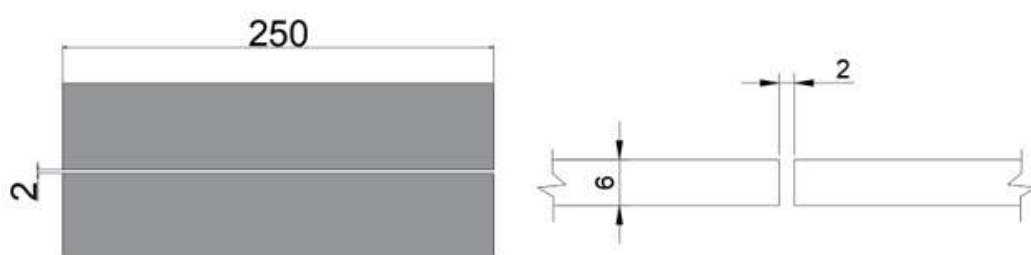
3.3.2.1 Soldadura “A”

Para a soldadura “A”, foram realizadas soldaduras nos dois lados da junta. Esta, destaca-se das outras por ter sido realizada com diferente preparação de junta e em 2 passes. Os parâmetros utilizados são apresentados na tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros de soldadura utilizados na soldadura "A".

Soldadura "A"	Material de Adição	Caudal do Gás de Proteção (l/min)	I _s (A)	v _s (mm/s)
1º Lado (Arco Pulsado)	Ø0.8 OK	15	62	-
2º Lado (Não Pulsado)	AUTROD 308LSi		160	-

Para esta amostra, a junta utilizada foi com $\alpha=0^\circ$ e $f=2$ mm entre as chapas a soldar (fig.32). O comprimento de soldadura foi de 250 mm.

**Figura 32** - Ilustração esquemática da junta de soldadura da amostra A.

3.3.2.2 Soldaduras "B", "C", "D", "G" e "H"

Todas as soldaduras realizadas para as amostras deste subcapítulo foram efetuadas com mono passe. Os parâmetros utilizados nas soldaduras "B", "C", "D", "G" e "H" são apresentados na tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros de soldadura utilizados nas soldaduras "B", "C", "D", "G" e "H".

	Material de Adição	Caudal do Gás de Proteção (l/min)	I _s (A)	v _s (mm/s)
Soldadura "B"	Ø0.8 OK AUTROD 308LSi	15	110	1,64
Soldadura "C"			132	3,62
Soldadura "D"			128	3,69
Soldadura "G"			126	4,05
Soldadura "H"			128	3,08

As dimensões de preparação das juntas de soldadura (fig.31) das amostras supramencionadas são apresentadas na tabela 8.

Tabela 8 - Dimensões da junta de soldadura das amostras B, C, D, G e H.

	f (mm)	t (mm)	α	L (mm)
Soldadura “B”	2	1	60°	100
Soldadura “C”				95
Soldadura “D”				85
Soldadura “G”	2	2	70°	200
Soldadura “H”		1		

3.3.2.3 Soldadura “E”

Os parâmetros utilizados na soldadura “E” são apresentados na tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros de soldadura utilizados na soldadura “E”.

Soldadura “E”	Material de Adição	Caudal do Gás de Proteção (l/min)	I _s (A)	v _s (mm/s)
1º Passe	Ø0.8 OK AUTROD	15	100	3,85
2º Passe	308LSi		68	3,85

A preparação da junta para a amostra E (fig.33) foi em “V” com ângulo de 60°, talão de 1 mm e folga de 2 mm entre as chapas a soldar. O comprimento de soldadura foi de 155 mm.

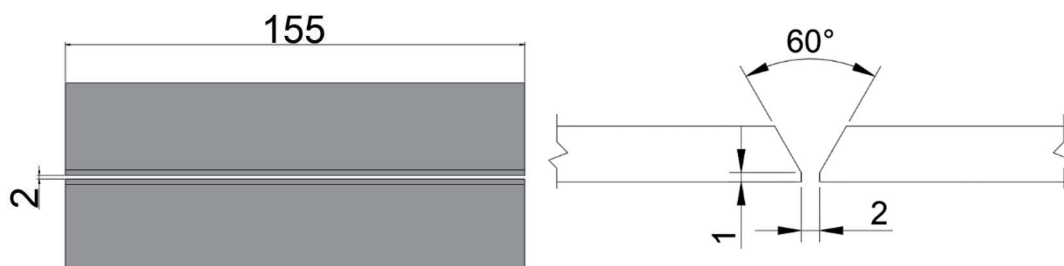


Figura 33 - Ilustração esquemática da junta de soldadura da amostra E.

3.3.2.4 Soldadura “F”

Os parâmetros utilizados na soldadura “F” são apresentados na tabela 10.

Tabela 10 - Parâmetros de soldadura utilizados na soldadura “F”.

Soldadura “F”	Material de Adição	Caudal do Gás de Proteção (l/min)	I _s (A)	v _s (mm/s)
1º Passe	Ø0.8 OK AUTROD 308LSi	15	80	3,51
2º Passe			80	3,70

A preparação da junta para a amostra F (fig.34) foi em “X” com ângulo de 60°, talão de 1 mm e folga de 2 mm entre as chapas a soldar. O comprimento de soldadura foi de 200 mm.

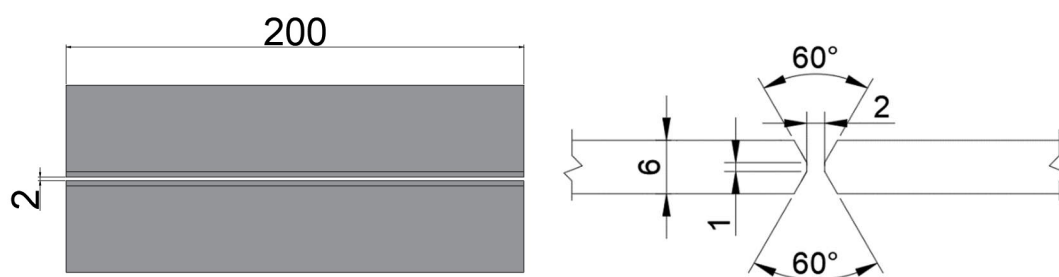


Figura 34 - Ilustração esquemática da junta de soldadura da amostra F.

3.3.2.5 Soldaduras “I”, “J” e “K”

Os parâmetros utilizados nas soldaduras “I”, “J” e “K” são apresentados na tabela 11.

Tabela 11 - Parâmetros de soldadura utilizados nas soldaduras “I”, “J” e “K”.

	Material de Adição	Caudal do Gás de Proteção (l/min)	I _s (A)	v _s (mm/s)
Soldadura “I”	Ø1.2 OK AUTROD 347Si	15	170	2,53
Soldadura “J”			200	3,97
Soldadura “K”			200	4,90

As dimensões de preparação das juntas de soldadura das amostras I, J e K, são apresentadas na tabela 12.

Tabela 12 - Dimensões da junta de soldadura das amostras I, J e K.

	f (mm)	t (mm)	α	L (mm)
Soldadura "I"	4	1	70°	200
Soldadura "J"	1,5			
Soldadura "K"	2			

3.4 Preparação para Análise Metalográfica

Numa primeira fase foi feita uma inspeção visual das soldaduras, com o intuito de detetar eventuais defeitos macroscópicos como falta de penetração e fissuras.

Os corpos de soldadura foram cortados na direção transversal ao cordão, para obter provetes para ensaio de resistência à tração e outros para análise micrográfica e de dureza. De seguida, as amostras para análise micrográfica e análise de dureza, foram polidas com lixas de granulometria decrescente (P80, P120, P240, P500, P800 e P1200). Por último, algumas amostras foram submetidas a ataque químico com o reagente Glicerégia e outras foram submetidas a ataque químico com o reagente Marble de forma a revelar a sua microestrutura. A composição dos reagentes utilizados é apresentada na tabela 13.

Tabela 13 - Composição química dos reagentes utilizados.

Reagente	Constituintes	Alíquota	Método de Ataque
Glicerégia	- Ácido Clorídrico HCl	45 ml	Esfregar algodão na superfície
	- Glicerol C ₃ H ₈ O ₃	30 ml	
	- Ácido Nítrico HNO ₃	12 ml	
Marble	- Ácido Clorídrico HCl	50 ml	Mergulhar durante 30 segundos
	- Sulfato de cobre CuSO ₄	25 ml	
	- Água H ₂ O	25 ml	

A análise metalográfica foi obtida por meio ótico com recurso ao microscópio Axiotech 100 HD. Este microscópio dispõe de capacidade de ampliação de 50x, 100x, 200x e 500x. Além disso, está apetrechado com uma câmara que permite visualizar, e capturar a imagem obtida pelo mesmo, através de um software (Zeiss Zen Blue Edition).

3.5 Caracterização Mecânica

3.5.1 Ensaio de Dureza

Os ensaios de dureza Vickers foram efetuados no microdurómetro HMV-2000 da Shimadzu. Em cada ensaio, o indentador atuou durante 15 segundos com uma carga de 500g. As indentações foram realizadas na secção transversal conforme esquematizado na figura 35, sendo o espaçamento entre elas de 0,5 mm (fig.35).

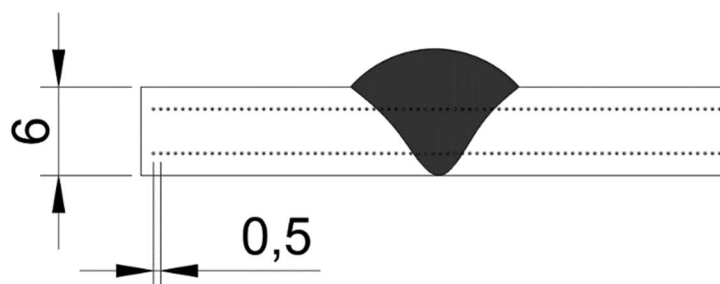


Figura 35 - Ilustração esquemática da linha de medição de dureza.

A avaliação da dureza foi efetuada nas amostras F, J e K. A razão desta seleção das amostras ficou a dever-se a resultados mais significativos na evolução das soldaduras.

3.5.2 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração das soldaduras foram realizados na máquina Instron 4206. A geometria generalizada dos provetes é apresentada na figura 36.

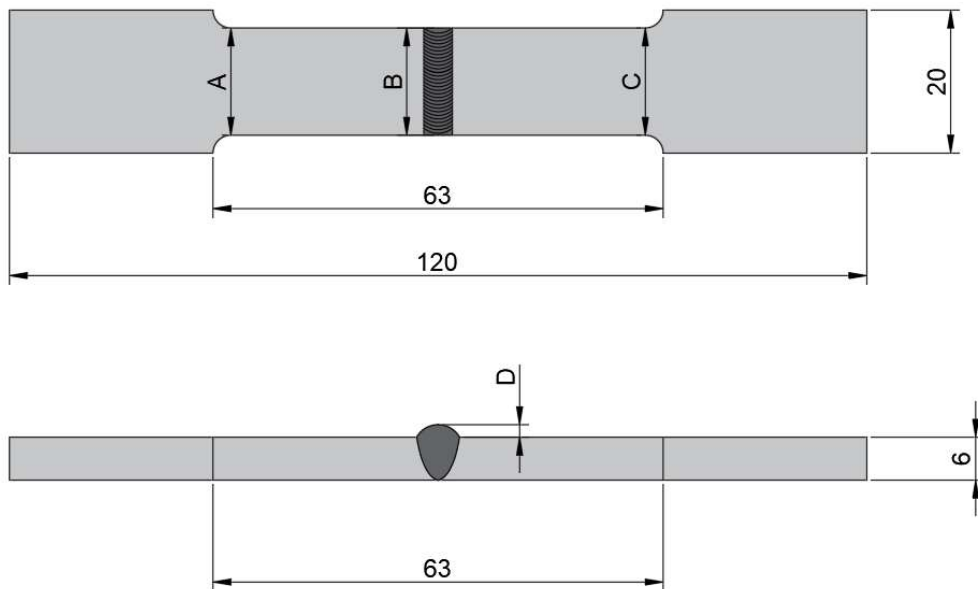


Figura 36 - Ilustração esquemática da geometria utilizada nos provetes.

Para cada amostra de soldadura, foram cortados e maquinados entre um e quatro provetes. A designação genérica de cada provete é do tipo “XN” em que “X” corresponde à designação da amostra e “N” ao número que lhe foi atribuído por ordem de execução. As dimensões dos provetes de cada amostra são apresentadas no Anexo 1.

4 Análise de Resultados

4.1 Análise Metalográfica

Neste subcapítulo são apresentados os resultados obtidos durante a análise metalográfica das amostras, mais concretamente através da inspeção visual e do estudo micrográfico.

4.1.1 Inspeção Visual

Realizadas as soldaduras foi feita a inspeção visual em todas as amostras com o objetivo de caracterizar o cordão de soldadura e de detetar eventuais defeitos macroscópicos. Nas imagens apresentadas abaixo, são apresentados apenas os cordões de soldadura.

O cordão da amostra A foi executado conforme apresentado na tabela 6. O lado executado com arco normal, apresentava o aspeto mostrado na figura 37 (a), sendo este um cordão estreito e irregular. Do lado oposto, o cordão que foi obtido através de arco pulsado (fig.37 (b)) é mais largo e menos irregular. Em ambos os lados, verificou-se a presença de alguns salpicos. Após o corte da secção transversal da soldadura, é visível uma descontinuidade que se assemelha ao defeito do tipo “túnel” (fig.38), que é uma designação, comumente observada nas soldaduras obtidas através do processo *Friction Stir Welding* (FSW). O defeito “túnel” é uma cavidade que surge na raiz de cada passe, ficando um pequeno espaço sem MA e se estende ao longo do cordão de soldadura. Deve-se à falta de penetração total quando a deposição de MA é feita dos dois lados. Este é um defeito que não deve existir, particularmente numa junta de topo.



Figura 37 - Cordão de soldadura da Amostra A. Arco não pulsado (a) e Arco Pulsado (b).

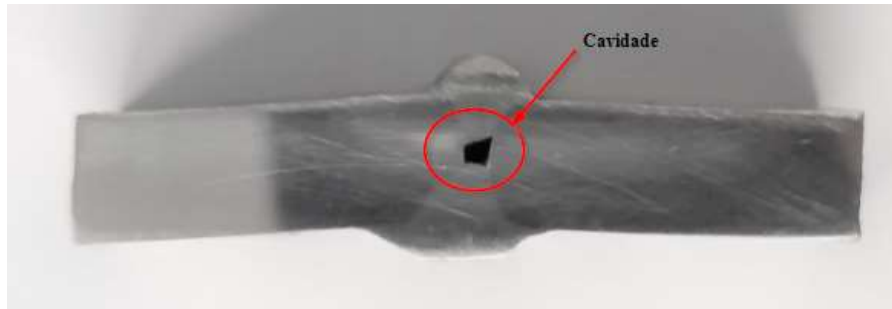


Figura 38 - Efeito túnel na amostra A.

O cordão de soldadura da amostra B (fig.39) apresenta um aspeto irregular e rugoso. Durante a soldadura verificaram-se alguns respingos. Isto pode dever-se ao facto de a velocidade de alimentação do fio ser baixa ($\approx 5,9$ m/min) em relação à velocidade de soldadura. Neste caso, reduziu-se o valor do stick-out e, conseqüentemente, aumenta o comprimento do arco elétrico, que quando muito longo, origina a formação de respingos. A amostra B, apresentou falta de penetração total (fig.40), que pode ser justificada pela baixa velocidade de soldadura (v_s), que faz com que o arco elétrico incida mais sobre o banho de fusão do que sobre o metal de base, dando origem a fraca penetração.

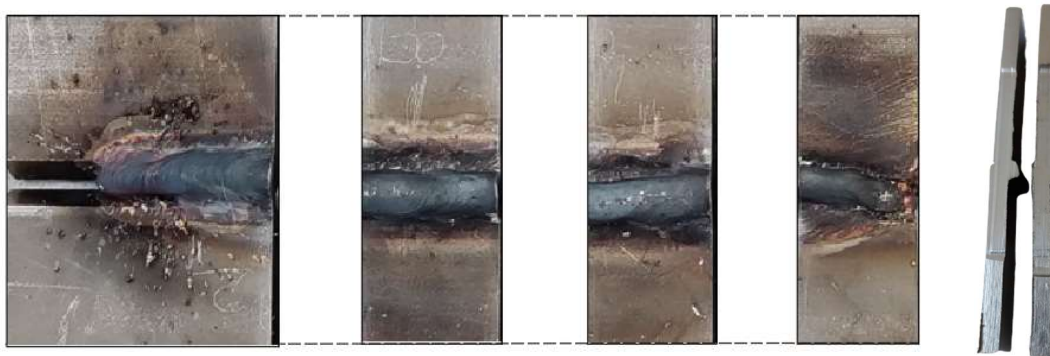


Figura 39 - Cordão de soldadura e secção transversal dos provetes da amostra B.

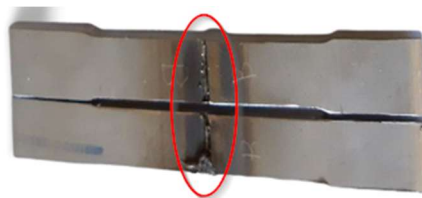


Figura 40 – Vista do lado oposto dos provetes da amostra B, mostrando a falta de penetração.

A amostra C apresenta um cordão irregular, rugoso e com altura inferior a 1 mm (fig.41). Durante a soldadura verificou-se a presença de respingos e dificuldade de estabilidade do arco elétrico, no início. A velocidade de alimentação utilizada, foi de aproximadamente 12,9 m/min, valor mais elevado do que na amostra B. Neste caso, a velocidade de alimentação do fio foi

elevada, o que provocou o aumento do stick-out, aumentando assim a flexão no fio e consequentemente a instabilidade do arco elétrico, provocando a formação de respingos numa fase inicial. O aumento do stick-out também teve efeito na geometria do cordão, uma vez que a largura e a penetração do cordão são inversamente proporcionais ao stick-out. Daí, a altura D do cordão obtida na amostra C ser baixa.

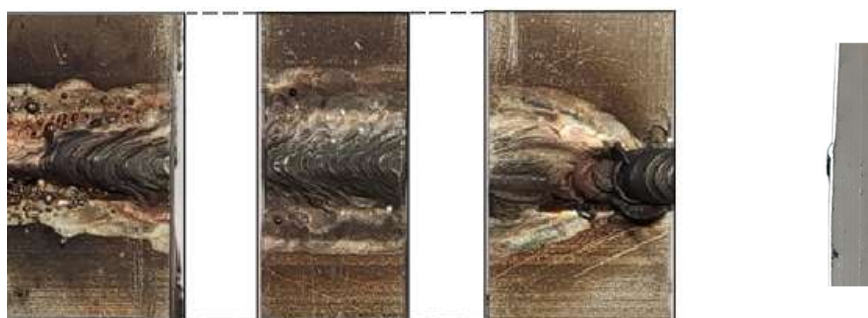


Figura 41 - Cordão de soldadura e secção transversal da Amostra C.

Na amostra D verificou-se falta de penetração, que pode estar relacionada com um possível desalinhamento da junta de soldadura, por a fixação das peças a soldar na mesa de trabalho ter sido menos adequada. O cordão é largo e irregular e apresenta uma banda larga de oxidação, como se pode ver na figura 42.



Figura 42 - Cordão de soldadura da Amostra D.

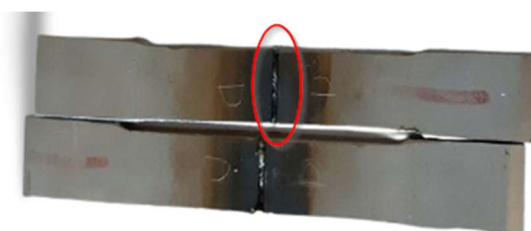


Figura 43 – Vista posterior dos provetes da amostra D, mostrando a falta de penetração total.

A amostra E apresenta um cordão mais regular do que os cordões das amostras anteriores (fig.44). A altura D do cordão aumenta com a evolução da soldadura. Durante a soldadura, o processo foi interrompido algumas vezes devido ao arame encravar. Isto deve-se ao facto de a velocidade de alimentação ser muito elevada. Foi identificada falta de penetração (fig.45), que se deveu essencialmente aos baixos valores de corrente utilizados.



Figura 44 - Cordão de soldadura e secção transversal da amostra E.

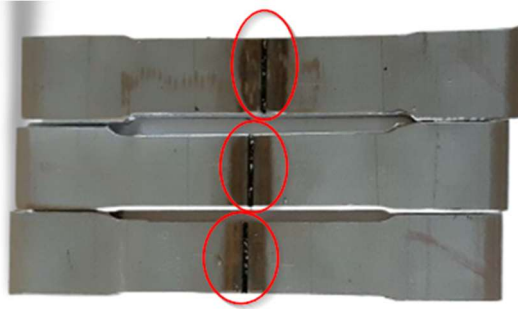


Figura 45 – Vista posterior dos provetes da amostra E, mostrando a falta de penetração total.

O cordão do primeiro passe da amostra F (fig.46 (a)), é um cordão estreito e irregular, apresentando alguma variação de largura num dos lados da junta. A primeira justificação pode dever-se a que na preparação desta junta, não se tinha conseguido uma boa simetria na preparação dos chanfros. No entanto, este problema foi resolvido na preparação das amostras seguintes. Isto demonstra, que a preparação da junta deve ser cuidada em todos os seus pormenores. No segundo passe da amostra F (fig.46 (b)), também se verifica a irregularidade do cordão, bem como falta de fusão.

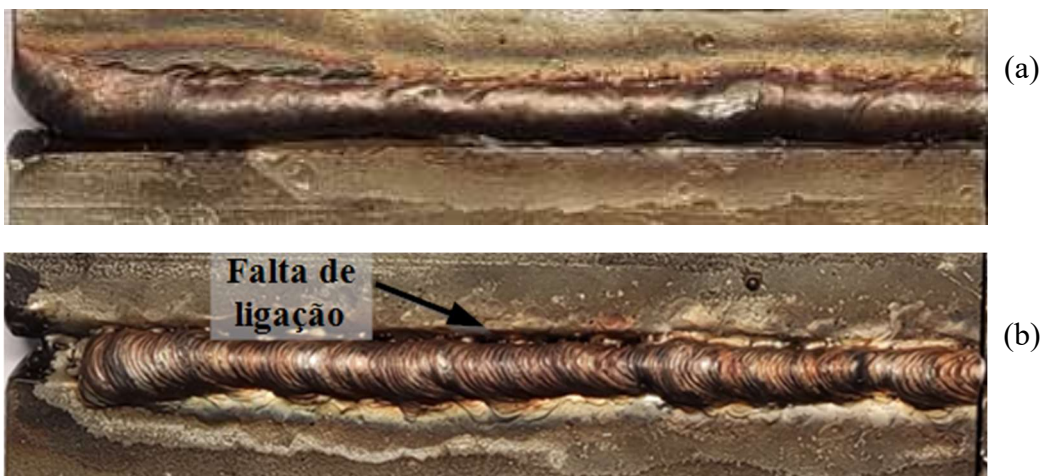


Figura 46 - Cordões de soldadura da Amostra F. Primeiro passe (a) e Segundo passe (b).



Figura 47 - Secção transversal da amostra F.

O cordão de soldadura da amostra G (fig.48), apresenta um aspeto muito rugoso, largo e irregular. Isto ficou a dever-se à maior abertura da junta, combinado com uma maior velocidade de soldadura ($\approx 4,05$ mm/s).



Figura 48 - Cordão de soldadura da Amostra G.

O cordão de soldadura da amostra H (fig.49) é mais regular do que o da amostra G, mas apresentou apenas alguma falta de penetração. Comparada com a anterior, a diminuição da velocidade de soldadura ($\approx 3,08$ mm/s) é a grande responsável pela melhoria. Foram ainda detetadas falhas de preenchimento de soldadura em alguns pontos do cordão



Figura 49 - Cordão de soldadura e secção transversal do provete da amostra H.

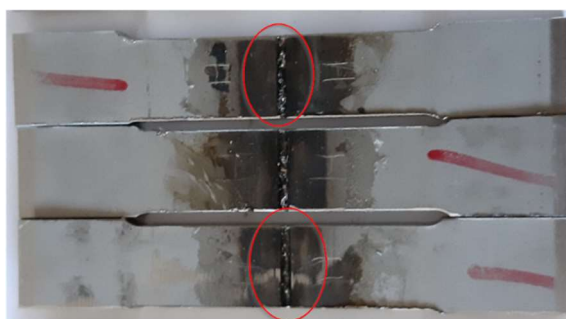


Figura 50 – Vista posterior dos provetes da amostra H, mostrando a falta de penetração total.

A amostra I, à semelhança da amostra G, apresenta um cordão rugoso e irregular (fig.51). Na origem disto, esteve o valor exagerado de folga na definição de junta. Devido a esta folga,

a colocação da chapa de arranque permitiu uma boa ignição do arco elétrico, aproveitando melhor a soldadura no início.

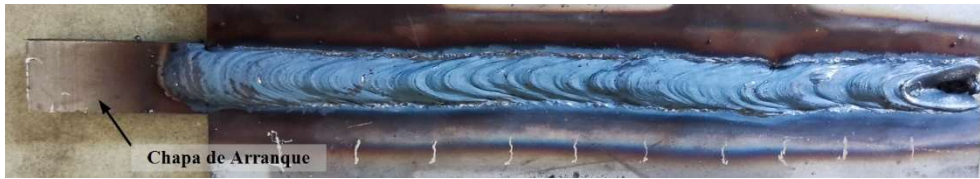


Figura 51 - Cordão de soldadura da amostra I.



Figura 52 - Secção transversal da amostra I.

Como na amostra H, o cordão da amostra J apresenta uma pequena falta de penetração, que pode ser justificada pela elevada velocidade de soldadura. No entanto, o cordão tem um aspeto regular, como pode ser observado na figura 53.



Figura 53 - Cordão de soldadura da Amostra J.

A amostra K apresenta um cordão ainda um pouco rugoso e irregular e com presença de alguns salpicos no início do processo de soldadura, atenuando depois. Apesar disto e, devido a obterem-se cordões de penetração total e com bom aspeto na raiz, considerou-se que se tinha alcançado boa qualidade de soldadura. A macrografia da soldadura da amostra K é apresentada na figura 54.



Figura 54 - Cordão de soldadura da amostra K.



Figura 55 - Secção transversal da amostra K.

4.1.2 Estudo Micrográfico

Após inspeção visual, foram analisadas as microestruturas das secções transversais das amostras D e K.

Para a amostra D, o reagente utilizado foi a “glicerégia” cuja composição química foi apresentada no capítulo 3.4. Na zona fundida é possível identificar a presença de ferrite δ (zonas escuras), com morfologia dendrítica na matriz austenítica (zona clara) (fig.56). Este resultado, também foi observado por Wen et al. [38] para os casos das suas amostras soldadas com procedimento análogo ao aqui apresentado. Outros autores como Chen et al. [39], observaram microestruturas semelhantes mas com a presença de fase σ em pequenas percentagens. No entanto, Chen et al. [39] verificaram que esta fase é eliminada após se submeter a peça a tratamento térmico.

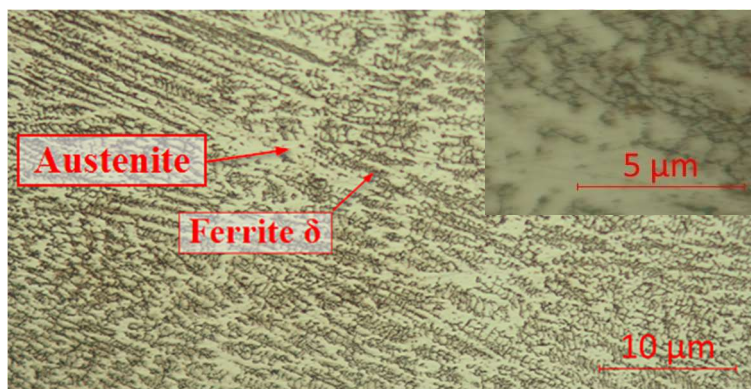


Figura 56 - Microestrutura da zona fundida da amostra D.

Nas proximidades da zona de ligação (ZL), foi possível identificar grãos colunares de ferrite δ (zona 1, fig.57). Belotti et al, citado em [40], também verificou a presença de ferrite com morfologia colunar junto à zona de ligação. Segundo os autores, a taxa de arrefecimento

diminui, alterando o modo de solidificação do material depositado. Nas zonas mais interiores do cordão (zona 2, fig.57), a ferrite δ exibe predominantemente morfologia vermicular. Cardoso et al. [41], também observaram resultados semelhantes quanto à microestrutura da zona fundida. Estes verificaram, ainda, que a percentagem de ferrite varia com a intensidade de energia imposta ao sistema. Quanto maior é a energia fornecida, menor é a quantidade de ferrite presente na zona fundida. Isto está relacionado com a taxa de arrefecimento da soldadura, que tende a diminuir com o aumento da energia [41].

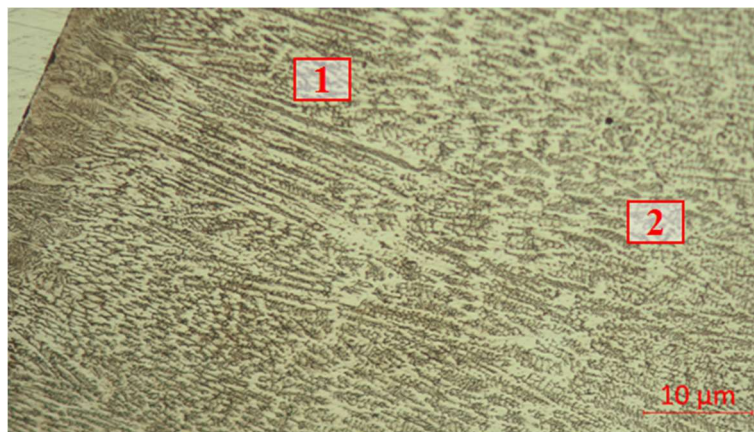


Figura 57 - Ferrite com estrutura colunar junto à zona de ligação da amostra D.

Durante a análise da amostra D ao microscópio foi detetada falta de fusão num dos lados do cordão de soldadura (fig.58). Este defeito pode ter sido provocado por contaminação da superfície, uma vez que junto à falha foi possível detetar alguma oxidação.

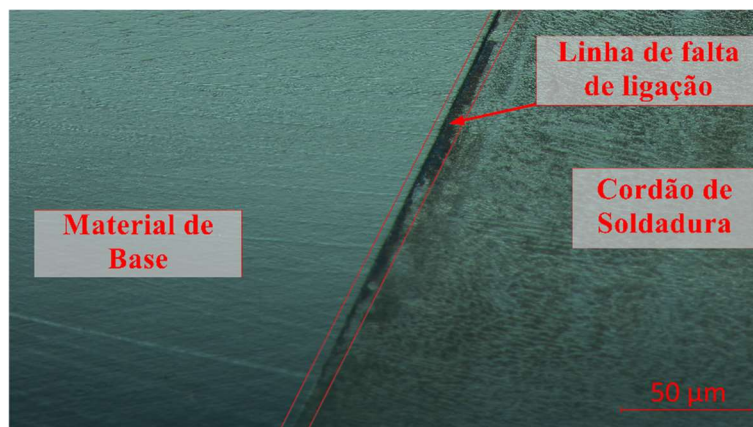


Figura 58 - Defeito por falta de fusão identificado na amostra D.

Para a amostra K, foi utilizado o reagente “marble”, que à semelhança da “glicerégia”, apenas permite revelar a microestrutura do cordão de soldadura. A microestrutura da zona fundida da amostra K, revelou a presença de ferrite δ predominantemente com morfologia

dendrítica na matriz austenítica (fig.59). Não foram detetados quaisquer tipos de defeitos microscópicos na amostra K.

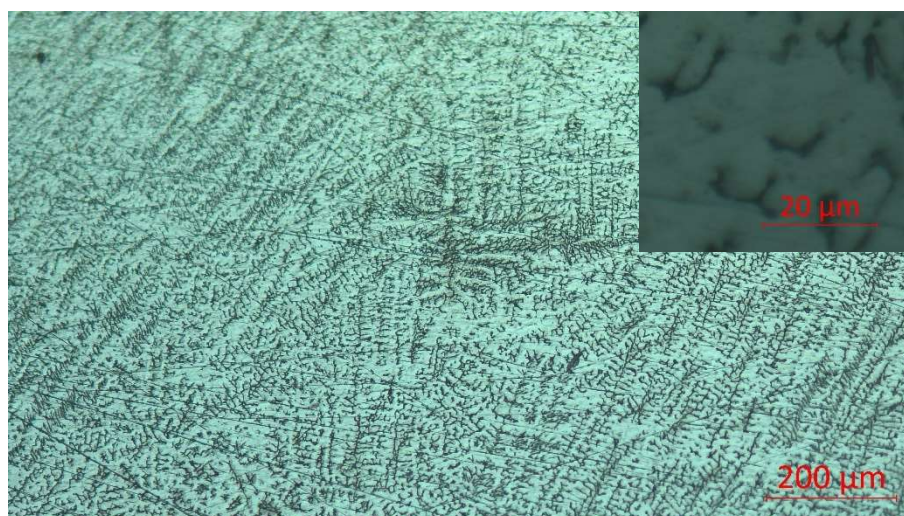


Figura 59 - Microestrutura da zona fundida da amostra K.

4.2 Ensaio de Dureza

Neste capítulo são apresentados os perfis de dureza registados para as amostras F, J e K. Normalmente, o valor indicado de dureza é $HV \leq 200$, mas a norma EN 10088-3 [42] permite valores até 218 HV.

O perfil de dureza da amostra F é apresentado na figura 60. A amostra apresenta uma zona termicamente afetada que se caracteriza com maior dureza do que o material de base. Na zona do cordão propriamente dito, ou zona que fundiu, também é maior do que o material de base.

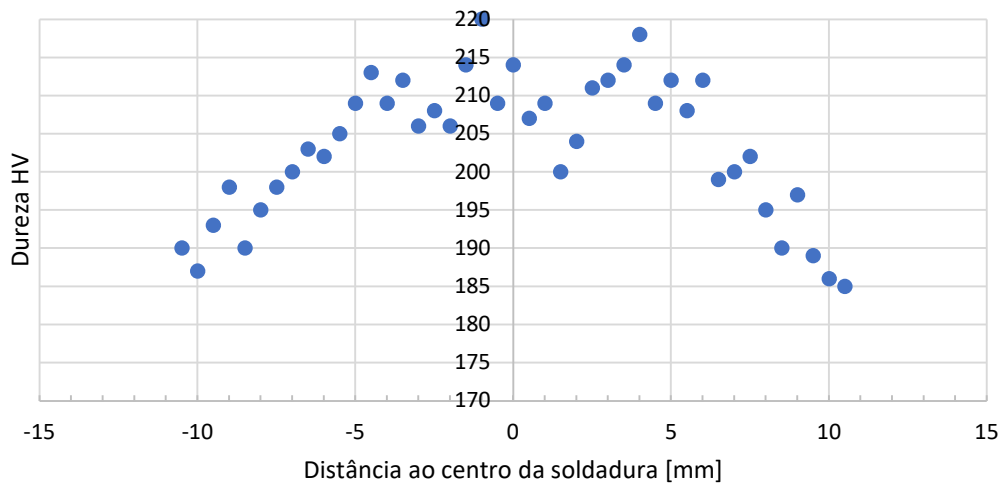


Figura 60 - Perfil de dureza da amostra F.

Os perfis de dureza obtidos para a amostra J são apresentados na figura 61. Verifica-se que o material de base tem dureza mais elevada do que na ZTA e na zona fundida. Este fenómeno pode ocorrer por diversos motivos, tais como a taxa de arrefecimento, as condições de recristalização, que influenciam o tamanho de grão e consequentemente a dureza. Pode também ocorrer devido à mistura de materiais dissimilares, sendo eles o material de adição e o material de base. Mansjur et al. [43] obtiveram perfis de dureza com valores mais elevados na região do metal de base do que na ZTA e na zona fundida. Após análise microestrutural, através do microscópio ótico, verificaram que o metal de base apresentava grão mais fino do que na ZTA e na zona fundida. O engrossamento do grão nestas regiões ocorre durante o processo de soldadura, devido ao aumento da entrega térmica. O perfil de dureza no fundo é ligeiramente mais estreito do que no cima, o que está de acordo com a preparação da junta em “V” e consequente forma do cordão.

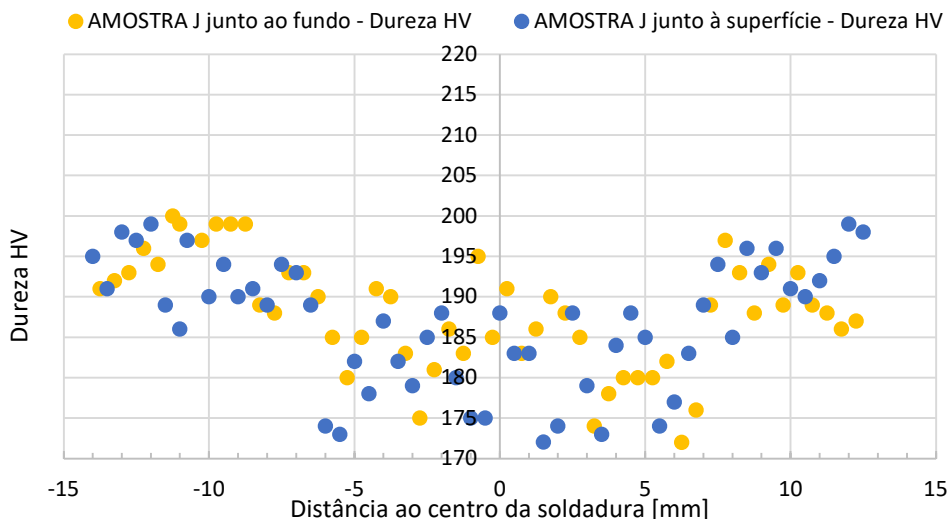


Figura 61 - Perfil de dureza da zona superior da amostra J.

Tal como as amostras anteriores, a amostra K apresenta um perfil de durezas simétrico, como se pode ver na figura 62. Esta apresenta valores de dureza inferiores às do metal de base na ZTA e na zona do cordão. Isto deve-se essencialmente ao MA, embora com este, a rotura deu-se no metal de base. Este perfil de dureza foi medido junto à superfície do cordão.

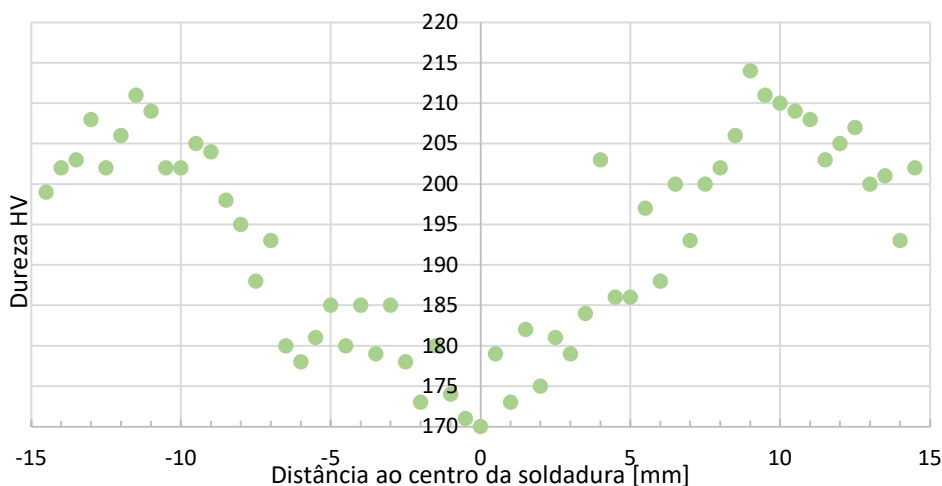


Figura 62 - Perfil de dureza da amostra K, junto à superfície do cordão.

Em suma, os valores de dureza das amostras estudadas variam entre 170HV_{0,5/15} (designação segundo a norma ISO 6507-1:2018) e 210HV_{0,5/15}. Os valores de dureza obtidos para o metal de base, estão na ordem dos 200HV, o que está de acordo com o previsto pela norma EN 10088-3.

4.3 Ensaios de Tração

A resistência das ligações efetuadas foi testada por intermédio das curvas de tensão de engenharia obtidas através dos ensaios de tração feitos nas respetivas amostras. Segundo a norma EN ISO 15614-1 [44], para que um conjunto soldado seja considerado válido, a sua tensão de rotura não pode ser inferior ao valor mínimo correspondente do material de base. Segundo a norma EN 10028-7 [45], norma aplicável ao aço inoxidável utilizado, a tensão de rotura do material de base (X5CrNi17-12-2) está compreendida entre 520 MPa e 680MPa. A resistência à tração do material de base utilizado, encontra-se dentro do intervalo de valores previsto pela norma, sendo este valor de 628 MPa.

4.3.1 Amostra A

O comportamento de resistência dos provetes retirados da amostra A é analisado na figura 63. Como se pode observar, os provetes A2 e A3 apresentam resistência até à rotura inferior ao do material de base, obtendo um valor de tensão de rotura de 565 MPa e 467MPa, respetivamente. A rotura dos provetes deu-se numa zona do cordão de soldadura, junto à cavidade presente que aí existia. A origem da resistência ser mais baixa, deve-se ao defeito de “túnel” apresentado na figura 38.

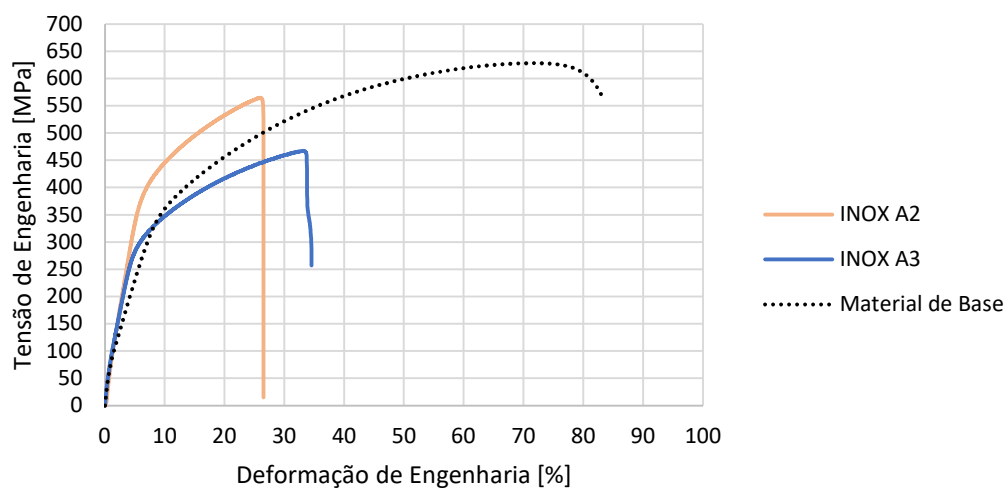


Figura 63 – Curvas de Tensão de Engenharia dos provetes A2 e A3.

Para a amostra A, foram realizados três ensaios de tração, no provete A1, no provete A2 e no provete A3 (fig.64). O provete A1, não apresentou resultados significativos da curva de tensão de engenharia obtida, não sendo considerado.



Figura 64 - Provetes A1, A2 e A3, após ensaio de tração.

Após análise dos resultados obtidos para os provetes A2 e A3 e tendo em conta a norma EN ISO 15614-1 [44], é possível afirmar que a amostra A não é considerada um conjunto soldado aceitável, pois nenhum dos provetes testados apresentou resistência à tração igual ou superior à do metal de base. Apesar disto, numa aplicação que não ultrapasse o domínio elástico, a ligação suportaria a sollicitação aplicada.

4.3.2 Amostra B

As curvas de tensão de engenharia obtidas para os provetes B1 e B2 são apresentadas na figura 65. O provete B1, apresenta uma tensão de rotura de 460 MPa, valor este que é inferior aos valores previstos na norma (EN ISO 15614-1 [44]) para o material de base utilizado. O provete B2, apresenta um comportamento pior que o B1, com uma tensão de rotura de 317MPa. A rotura dos provetes deu-se pelo cordão de soldadura (fig 66). A inspeção visual da soldadura, figuras 39 e 40, apresentava um cordão irregular, rugoso e sem penetração total. Isto está na origem destes menores valores de resistência à tração.

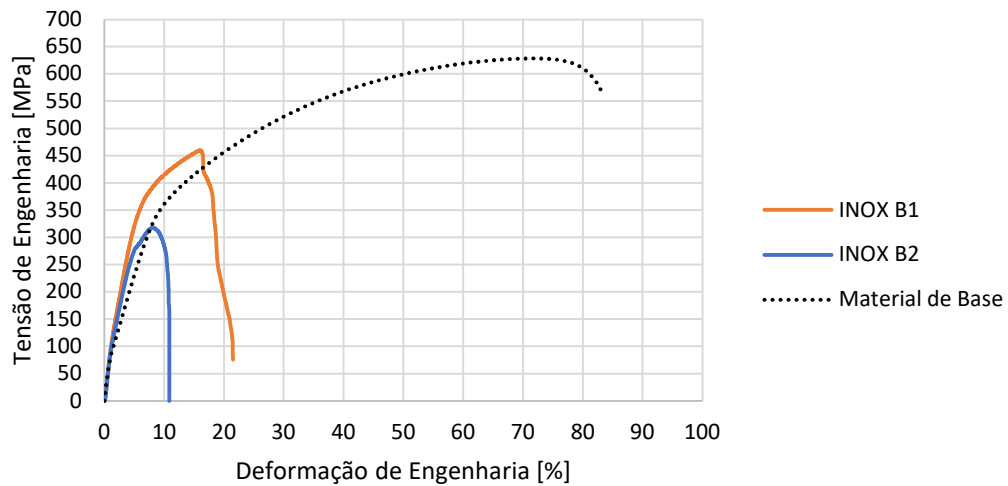


Figura 65 - Curvas de Tensão de Engenharia dos provetes B1 e B2.

Podemos afirmar que a resistência mecânica da amostra B é inferior à do material de base e, portanto, de acordo com a definição de soldadura do IIW e com a norma EN 15614-1, a amostra B não é considerada um conjunto soldado válido.



Figura 66 - Provetes B1 e B2, após ensaio de tração.

4.3.3 Amostra C

Na figura 72 está representada a curva de tensão de engenharia do provete C1. Como se pode observar, o ensaio não foi concluído. A tensão máxima obtida para este provete foi de 556 MPa. Isto ficou a dever-se a uma configuração na máquina de tração, que limitou a medição de valores até se atingir um determinado valor de extensão. Embora não tenha sido possível concluir o ensaio, o seu comportamento criou boas expectativas. Apesar do aspeto irregular do cordão, o aumento da corrente permitiu uma melhor penetração quando comparado com a amostra B. Isto está na origem da melhoria da resistência da amostra C em relação à amostra B.

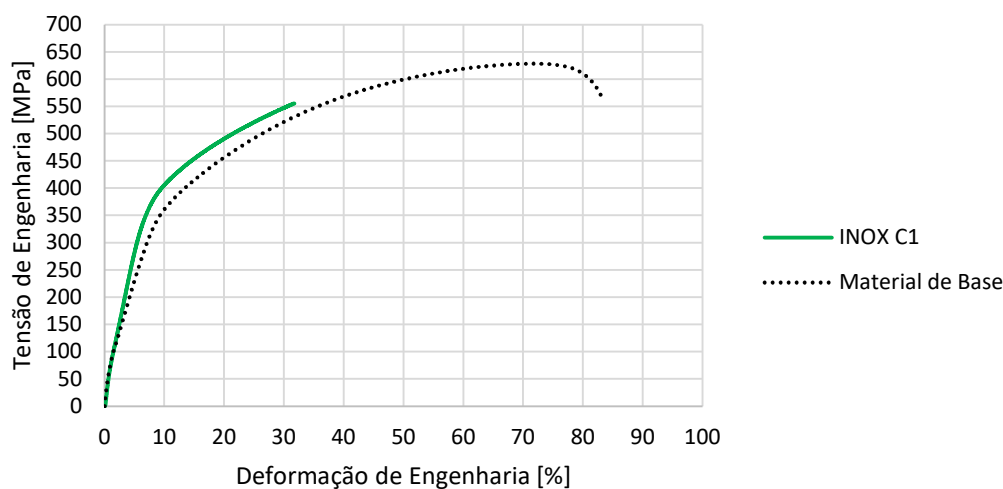


Figura 67 - Curva de Tensão de Engenharia do provete C1.



Figura 68 - Provete C1, após ensaio de tração.

4.3.4 Amostra D

As curvas de tensão de engenharia dos provetes D1 e D2 é apresentada na figura 69. À semelhança do sucedido na amostra C, no provete D1 também não foi possível obter a curva de tensão de engenharia completa até à fratura, devido ao limite máximo de extensão imposto nas configurações iniciais da máquina de tração. Apesar disto, obteve-se uma tensão máxima de 552 MPa, sendo um bom indicativo da resistência mecânica do provete. O provete D2, teve um comportamento pior do que D1, apresentando uma tensão de rotura de 473 MPa. Neste, a rotura ocorreu numa zona do cordão de soldadura (fig.70). A falta de penetração detetada na inspeção visual (fig.43), combinada com a falta de fusão identificada durante o estudo micrográfico (fig.58), estão na origem destes menores valores de resistência.

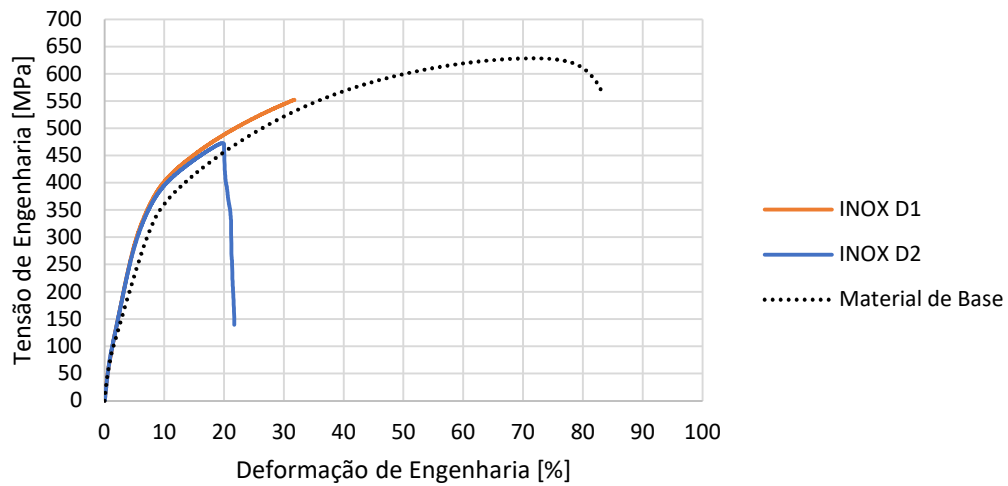


Figura 69 - Curvas de Tensão de Engenharia dos provetes D1 e D2.

Através dos resultados obtidos para os provetes D1 e D2, a amostra D não é considerada um conjunto soldado aceitável, pois não foi possível concluir o ensaio de um dos provetes, e o outro apresentou resistência à tração inferior à do metal de base.



Figura 70 - Provetes D1 e D2, após ensaio de tração.

4.3.5 Amostra E

Na figura 71 estão representadas as curvas de tensão de engenharia obtidas para os provetes E1 e E2. A ruptura em ambos os provetes ocorreu numa zona do cordão de soldadura (fig.72) e os valores de tensão rotura obtidos foram, respetivamente, 295 MPa e 272 MPa. A amostra E apresentou uma resistência muito inferior à do metal de base. A principal justificação da menor resistência à tração é a falta de penetração detetada na inspeção visual, figura 44, que teve como origem os baixos valores de corrente utilizados. Então, pelo critério seguido anteriormente, a amostra E não é considerada um conjunto soldado aceitável.

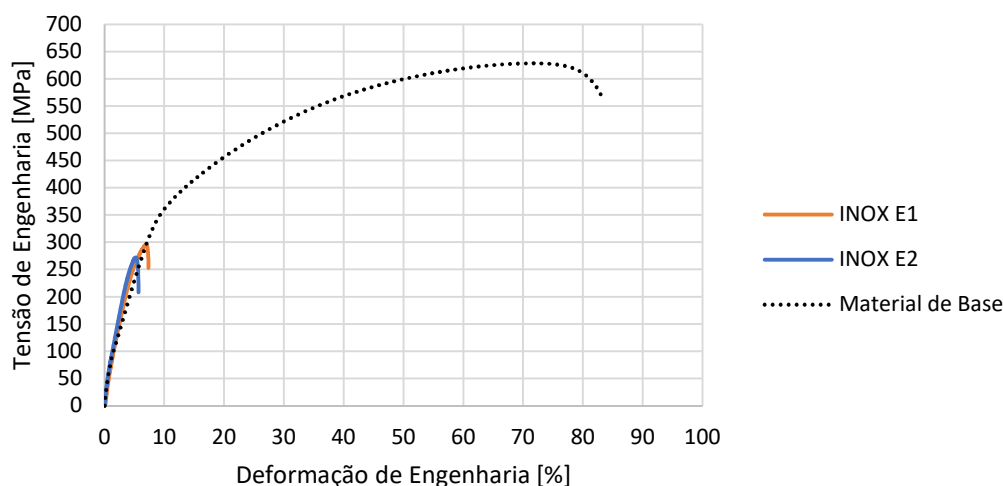


Figura 71 - Curvas de Tensão de Engenharia dos provetes E1 e E2.



Figura 72 - Provetes E1 e E2, após ensaio de tração.

4.3.6 Amostra F

O comportamento de resistência dos provetes F1 e F2 são analisados na figura 73, comparando as curvas de tensão de engenharia obtidas. A maior tensão de rotura obtida foi de 313 MPa e a rotura deu-se pela zona do cordão de soldadura em ambos os provetes (fig.74). A origem da menor resistência deve-se à assimetria dos chanfros que ocorreu durante a preparação da junta, combinada com os baixos valores de corrente utilizados que deram a origem a um cordão um pouco estreito e irregular. Através dos resultados obtidos para os provetes da amostra F, é possível afirmar que esta amostra não é um conjunto soldado válido, uma vez que ambos os provetes apresentam uma tensão de rotura inferior à do metal de base utilizado.

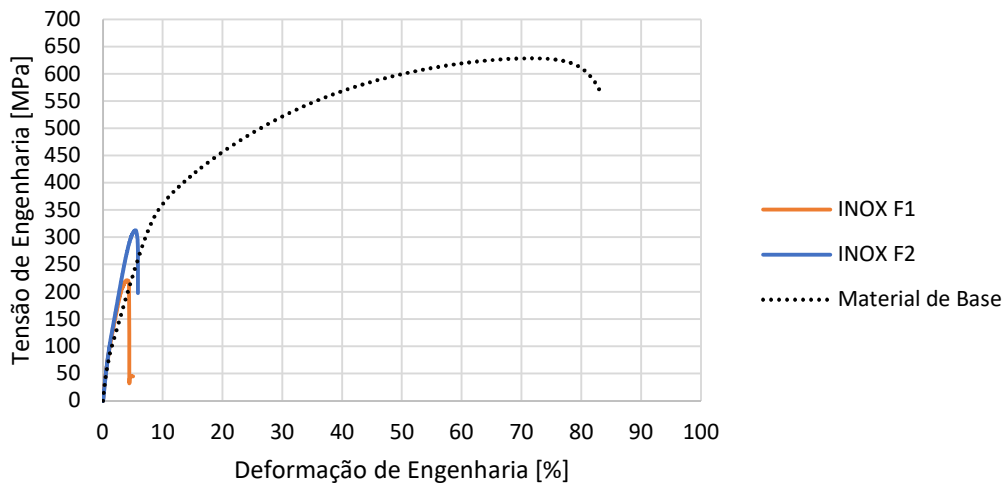


Figura 73 - Curvas de Tensão de Engenharia dos provetes F1 e F2.



Figura 74 - Provetes F1 e F2, após ensaio de tração.

4.3.7 Amostra G

As curvas de tensão de engenharia obtidas para os provetes G1, G2 e G3 são apresentadas na figura 75. Com o provete G1, obteve-se uma tensão máxima de 623 MPa, valor este que está compreendido entre os valores previstos pela norma para o aço AISI 316. No provete G1 não se obteve a curva de tensão de engenharia na totalidade até à fratura, devido ao ensaio ter parado sem motivo conhecido. Não obstante, o ensaio foi validado devido a apresentar uma resistência maior do que o metal de base. As tensões de rotura obtidas para os provetes G2 e G3 foram, respetivamente, de 520 MPa e 511 MPa. A rotura deu-se pela zona do cordão de soldadura em ambos os provetes (fig.76). Isto deve-se ao cordão ser irregular e rugoso, combinado com a velocidade de soldadura excessiva que deram origem a esta diferença de resistência.

Apesar do provete G1 apresentar uma tensão de rotura semelhante à do material de base, os provetes G2 e G3 apresentam menor resistência à tração do que o metal de base utilizado. Esta disposição de comportamento é inconveniente e, deste modo, conclui-se que a amostra G não é um conjunto soldado aceitável.

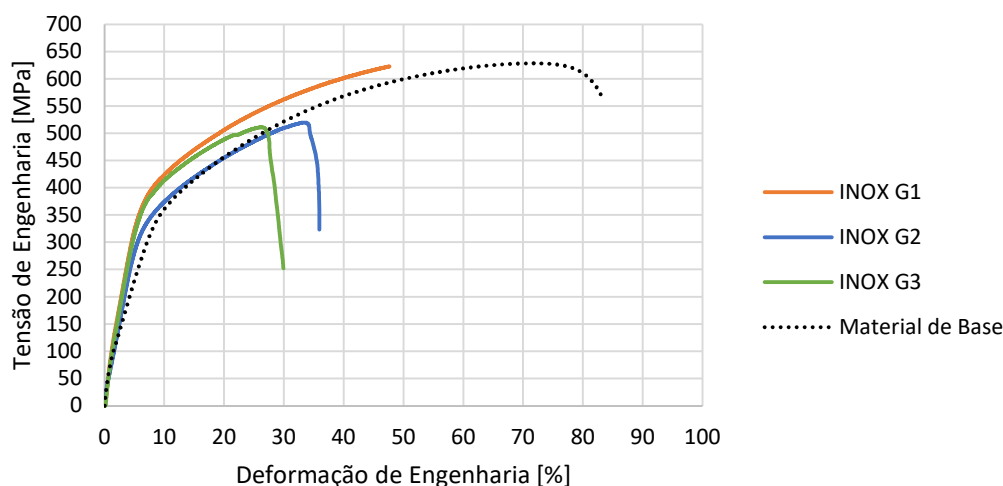


Figura 75 - Curvas de Tensão de Engenharia dos provetes G1, G2 e G3.



Figura 76 - Provetes G1 e G2 após ensaio de tração.

4.3.8 Amostra H

O comportamento de resistência dos provetes H1 e H2 é analisado na figura 77 comparando as curvas de tensão de engenharia obtidas com a curva de tensão do metal de base. A máxima tensão de ruptura obtida para este provete foi de 285 MPa e a ruptura ocorreu no cordão de soldadura nos dois provetes (fig.78). Apesar do aspeto mais regular do cordão de soldadura, a falta de penetração e de preenchimento em algumas zonas do cordão estão na origem dos valores menores de resistência obtidos.

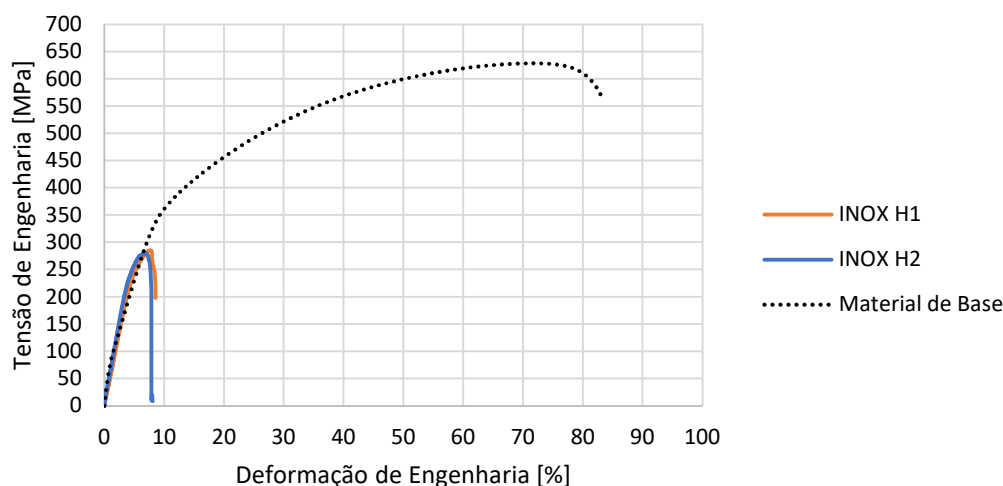


Figura 77 - Curvas de Tensão de Engenharia dos provetes H1 e H2.

Os resultados obtidos nos provetes H1 e H2 permitem afirmar que a amostra H tem uma resistência à tração inferior à do material de base. Por conseguinte, segundo a norma EN15614-1 [44], a amostra H não é considerada um conjunto soldado aceitável.



Figura 78 - Provetes H1 e H2, após ensaio de tração.

4.3.9 Amostra I

As curvas de tensão de engenharia obtidas para os provetes I1, I2 e I3 são apresentadas na figura 79. A maior tensão de ruptura obtida foi de 605 MPa no provete I1, valor este que está compreendido entre os valores previstos pela norma. As tensões de ruptura obtidas para os provetes I2 e I3 foram, na devida ordem, 457 MPa e 534 MPa. A ruptura destes provetes ocorreu numa zona do cordão de soldadura. Todos os provetes apresentaram um comportamento de resistência inferior à do metal de base. Isto deve-se, essencialmente, à folga exagerada na preparação da junta, que deu origem a um cordão rugoso e irregular. A ruptura deu-se pelo cordão de soldadura no provete I2 e pelo cordão/ZTA no provete I3. É importante referir que, a amostra I e as seguintes, foram soldadas com um material de adição diferente das anteriores, como apresentado no subcapítulo 3.3.2.5.

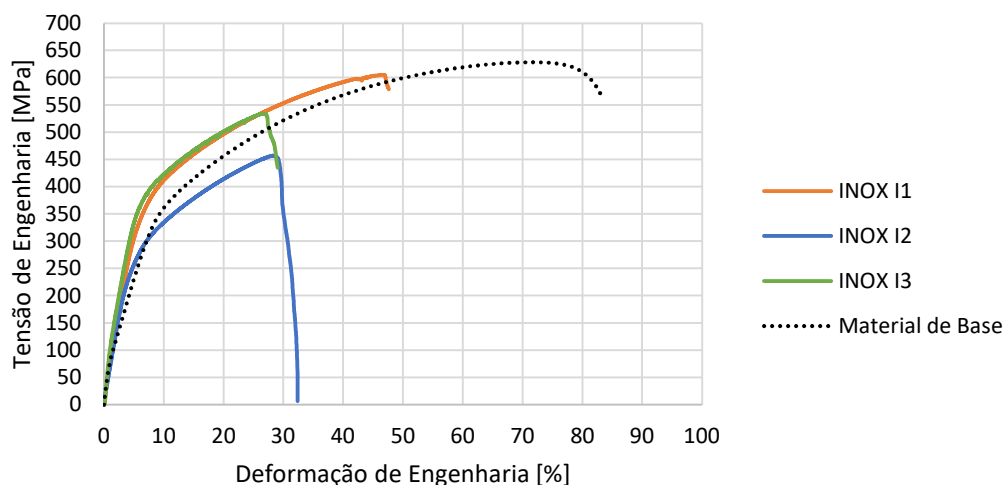


Figura 79 - Curvas de Tensão de Engenharia dos provetes I1, I2 e I3.

Através dos dados obtidos para os provetes da amostra I, verifica-se que apenas um dos três provetes apresenta valores de tensão de ruptura que semelhante à do metal de base. Como resultado, pode-se afirmar que a amostra I ainda não é um conjunto soldado válido.



Figura 80 - Provetes I1 e I2 após ensaio de tração.

4.3.10 Amostra J

Na figura 81 estão representadas as curvas tensão de engenharia obtidas para os provetes J1, J2, J3 e J4. Como se pode observar, todos os provetes testados, à exceção do provete J3, apresentaram um comportamento de resistência superior ao do metal de base. A tensão de ruptura obtida para os provetes J1, J2, J3 e J4 foi, respetivamente, 673 MPa, 664 MPa, 592MPa e 673MPa.

Nos provetes J1, J2 e J4, obtiveram-se valores de tensão de ruptura compreendidos entre o intervalo de valores previsto na norma e superiores aos do metal de base. Desta forma, pode concluir-se que a amostra J é um conjunto soldado válido.

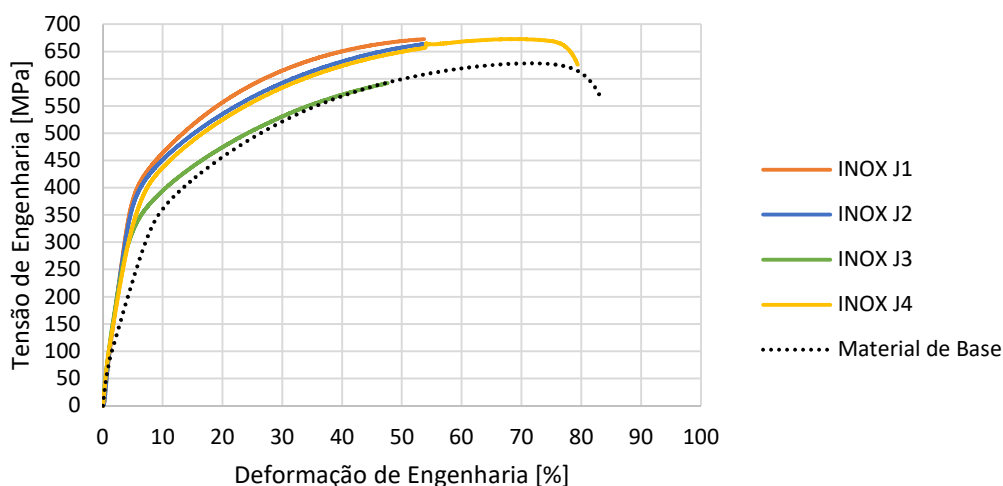


Figura 81 - Curvas de Tensão de Engenharia dos provetes J1, J2, J3 e J4.



Figura 82 - Provetes J4, após ensaio de tração.

4.3.11 Amostra K

A execução da soldadura da amostra K permitiu obter resultados que satisfazem os objetivos de obter um cordão com boa qualidade de soldadura. Na figura 83 são apresentadas as curvas de tensão de engenharia obtidas para os provetes K1, K2 e K3. A tensão de ruptura obtida para os provetes K1 e K2 foi de 692 MPa e de 683 MPa para o provete K3. Os provetes apresentam comportamentos de resistência muito semelhantes e superiores ao do metal de base. Posto isto, é possível afirmar que a amostra K é um conjunto soldado válido e, que, devido à igualdade de comportamento (sobreposição das curvas) pode ser considerado de muito bom.

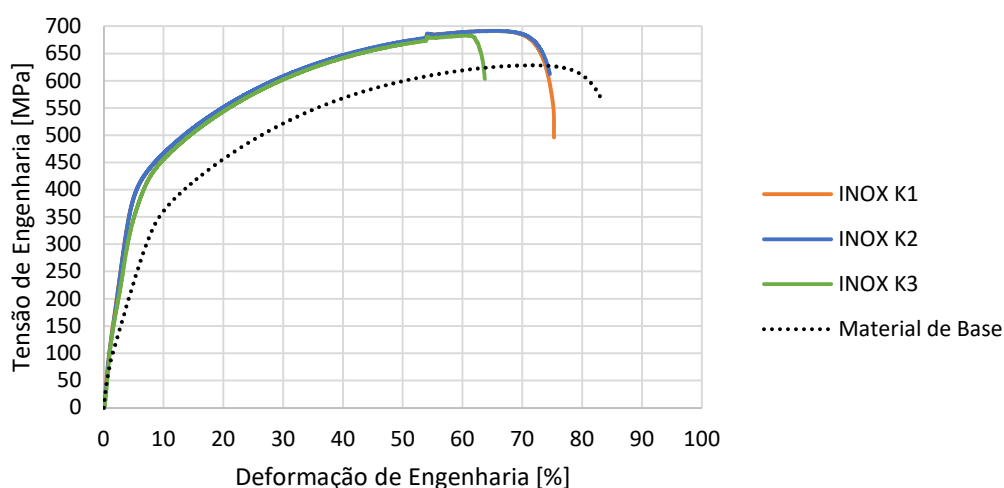


Figura 83 - Curvas de Tensão de Engenharia dos provetes K1 e K2.

A estrição ocorreu numa zona do metal de base como pode ser observado na figura 84.



Figura 84 - Provette K2, após ensaio de tração.

4.3.12 Comparação do comportamento de resistência dos provetes

Através da análise do gráfico apresentado na figura 85, constata-se que todos os provetes apresentam um comportamento mecânico semelhante ao do metal de base no domínio elástico, com o módulo de elasticidade (E) mais elevado, o que significa que para os mesmos valores de tensão, os provetes deformam-se menos do que o metal de base, ou seja, apresentam maior rigidez. A expressão do módulo de elasticidade é apresentada na equação 6.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (6)$$

Apesar do defeito de “túnel” identificado na amostra A, figura 38, causado pelo tipo de junta utilizada, com ângulo 0° , esta amostra apresenta um comportamento de resistência melhor do que a maioria das amostras soldadas com o mesmo MA (OK Autrod 308LSi), mas com preparação de junta em “V”.

As amostras B, C, D, E, G e H foram soldadas utilizando o mesmo material de adição com o mesmo tipo de junta em “V”, variando apenas o valor de α . Nas amostras B, C, D e E o valor de α utilizado foi de 60° . Os provetes C1 e D1, ainda que com ensaios incompletos, apresentaram melhores resultados do que os provetes da amostra B, criando boas expectativas acerca da sua resistência à tração. A melhoria do comportamento destes provetes em relação aos da amostra B, deve-se ao aumento da intensidade da corrente, combinado com o aumento da velocidade de soldadura que permitiu obter um cordão mais largo e com melhor penetração. Embora a amostra E apresente um cordão mais regular do que as amostras anteriores, esta amostra apresenta o pior comportamento de resistência das amostras soldadas com $\alpha=60^\circ$. Isto deve-se essencialmente ao valor elevado de v_a , que fez interromper o processo várias vezes, originando falta de penetração. Concluiu-se que se estava a usar valores de v_a no limite da máquina, para um valor de I_s que não se podia aumentar devido ao diâmetro do fio. Ainda assim, as amostras B, C, D e E apresentam um comportamento de resistência inferior ao do metal de base.

As amostras G e H, foram soldadas utilizando preparação de junta em “V”, mas com $\alpha=70^\circ$. Apesar do aspeto rugoso e irregular do cordão da amostra G, esta amostra apresenta penetração total, que reflete melhor comportamento de resistência em relação à amostra H que apresenta falta de penetração, e consequentemente, resistência à tração inferior. Não obstante, as duas amostras não são consideradas conjuntos soldados aceitáveis pois apresentam resistência à tração inferior à do metal de base.

A amostra F apresenta o pior comportamento de resistência à tração de todas as amostras estudadas. A principal causa destes resultados de menor resistência é a baixa I_s , combinada com a incorreta preparação da junta em “X” (assimetria dos chanfros).

As amostras I, J e K, foram soldadas utilizando o fio de $\varnothing 1.2$ mm OK Autrod 347Si, com preparação de junta em “V”, $\alpha=70^\circ$ e variando apenas o valor da folga (f). A amostra I, apresenta o pior comportamento de resistência das três amostras, devido ao valor exagerado de folga que originou um cordão de soldadura irregular, combinado com a intensidade de corrente inferior em relação às outras amostras. As amostras J e K, demonstram comportamento de resistência semelhantes. Embora a amostra K apresente um cordão mais rugoso devido à maior velocidade de soldadura é considerada a melhor soldadura, pois apresenta comportamento igual nos ensaios de tração. Ambas as amostras, apresentam resistência à tração superior à do metal base, daí a rotura ter ocorrido fora da zona do cordão de soldadura.

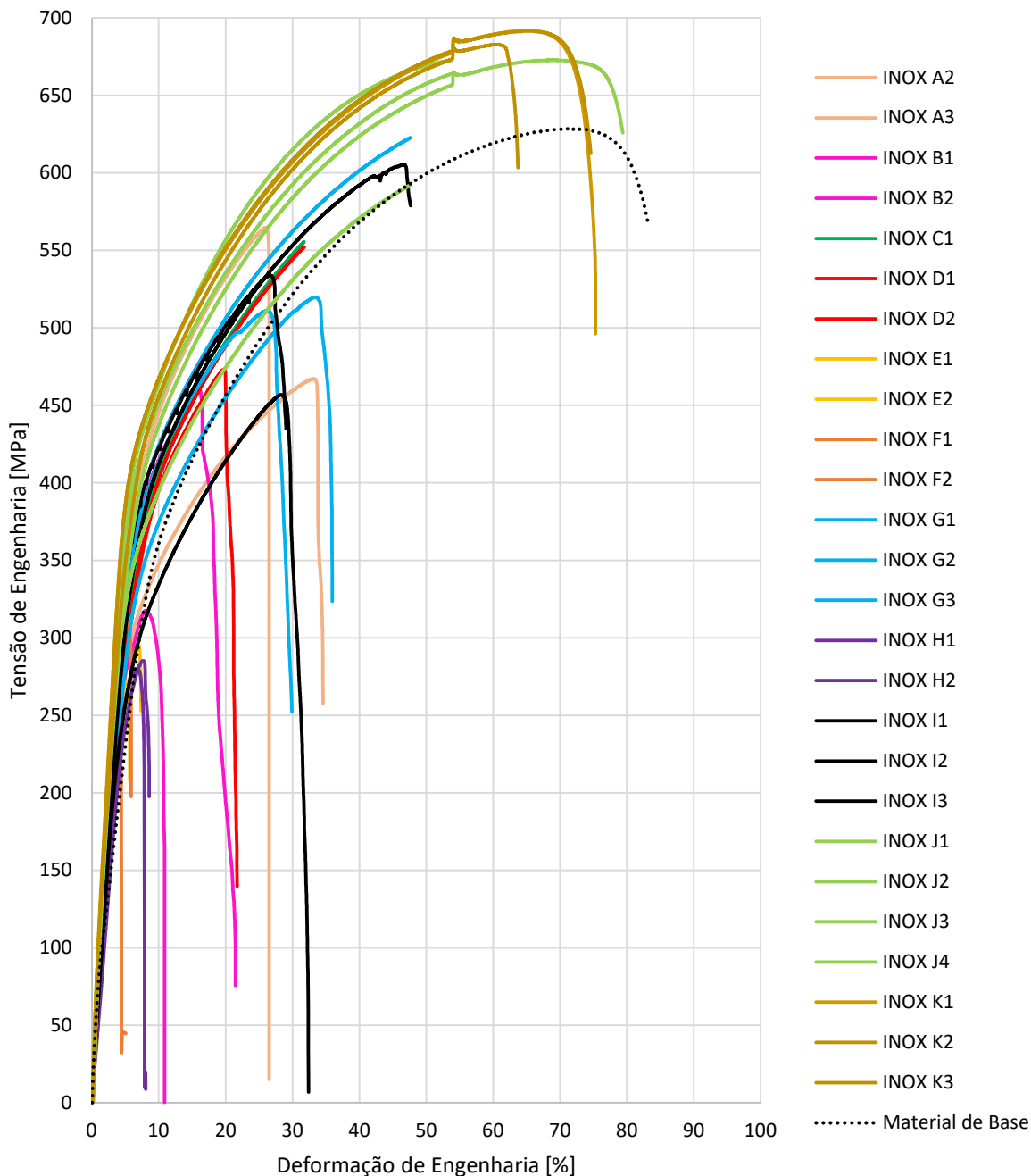


Figura 85 - Curvas de Tensão de Engenharia obtidas para todos os provetes.

Na figura 86 é apresentado um gráfico de barras com as tensões máximas obtidas para cada provete. Através da análise deste gráfico é possível concluir que todas as amostras soldadas com o MA OK Autrod 308LSi com Ø0,8 mm, apresentam tensões máximas inferiores à tensão de rotura do metal de base. A origem da resistência ser mais baixa nestas amostras, deve-se ao facto de as folgas utilizadas na preparação de junta, serem demasiado elevadas para o diâmetro

do arame. A folga exagerada conciliada com a intensidade de corrente baixa, provocou falta de penetração na maioria das amostras, comprometendo assim a resistência à tração das mesmas. Isto implica que estas amostras não cumprem os requisitos para serem consideradas conjuntos soldados válidos. Os melhores resultados foram obtidos nas amostras soldadas com o metal de adição OK Autrod 347Si com Ø1,2 mm. Esta melhoria de comportamento de resistência está relacionada com o aumento do diâmetro do fio, que por sua vez, resulta num aumento da intensidade da corrente de soldadura I_s , permitindo obter cordões de penetração total e com bom aspeto na raiz, alcançando boa qualidade de soldadura.

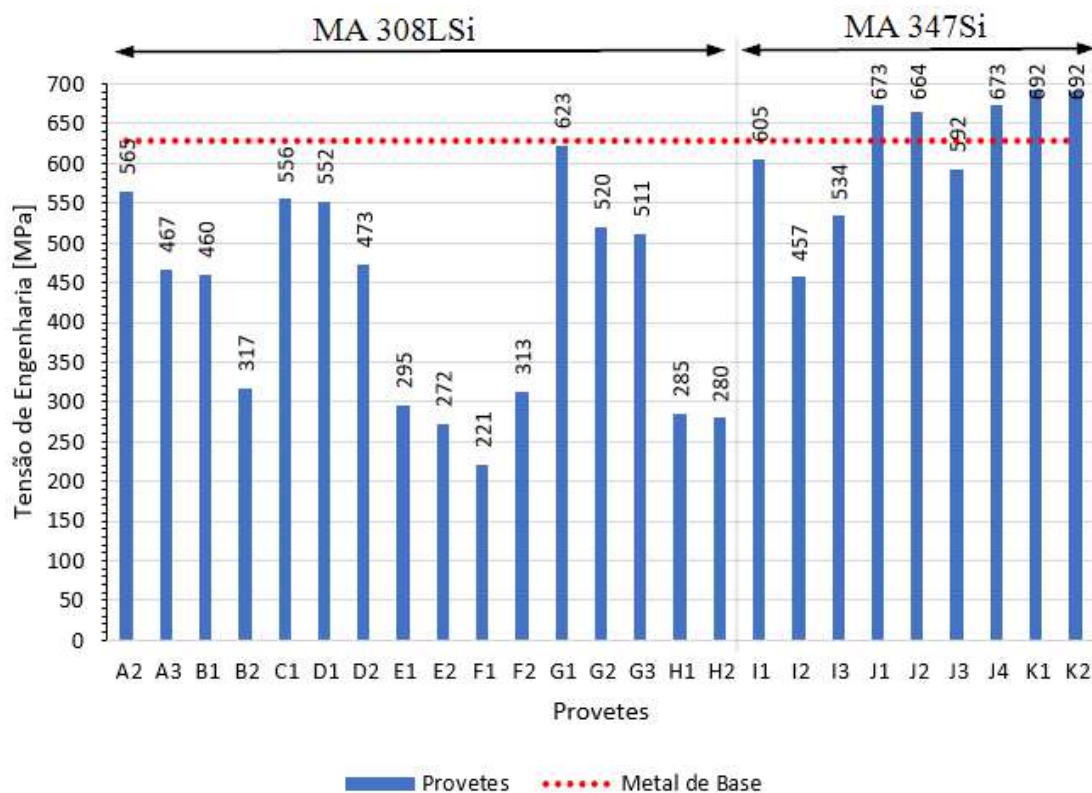


Figura 86 - Gráfico de barras dos valores de tensão de engenharia obtidos para todos os provetes.

Na figura 87 é apresentado o gráfico de barras, das tensões de rotura médias e o respetivo desvio padrão, das amostras A, G, J e K. A escolha destas amostras, deve-se ao facto de as mesmas apresentarem os resultados mais significativos de todas as amostras soldadas com os diferentes metais de adição. Através da análise deste gráfico é notória a evolução dos resultados obtidos desde a amostra A até a amostra K. O comportamento mecânico das amostras melhorou significativamente, tal como se pode observar pelo aumento dos valores de tensão de rotura

média obtidos. As amostras A e G, soldadas com o metal de adição OK Autrod 308LSi, apresentam valores de tensão de rotura inferiores às do metal de base, com valores de desvio padrão elevados. O valor do desvio padrão obtido para a amostra J é um pouco mais elevado devido ao provete J3 que apresentou um comportamento mecânico inferior aos outros provetes testados. No entanto, considera-se que na amostra J se obteve boa qualidade de soldadura. A reprodutibilidade do comportamento dos provetes da amostra K, bem como o baixo valor de desvio padrão obtido, permitem afirmar que os provetes desta amostra apresentam um comportamento mecânico muito semelhante e que, portanto, se atingiu boa qualidade de soldadura. Os valores de tensão de rotura média e desvio padrão das amostras A, G, J e K são apresentados na tabela 14.

Tabela 14 - Tensão de rotura média e desvio padrão das amostras A, G, J e K.

Amostras	Tensão de Rotura Média [MPa]	Desvio Padrão
A	516	69,0
G	551	62,1
J	650	39,0
K	689	5,0

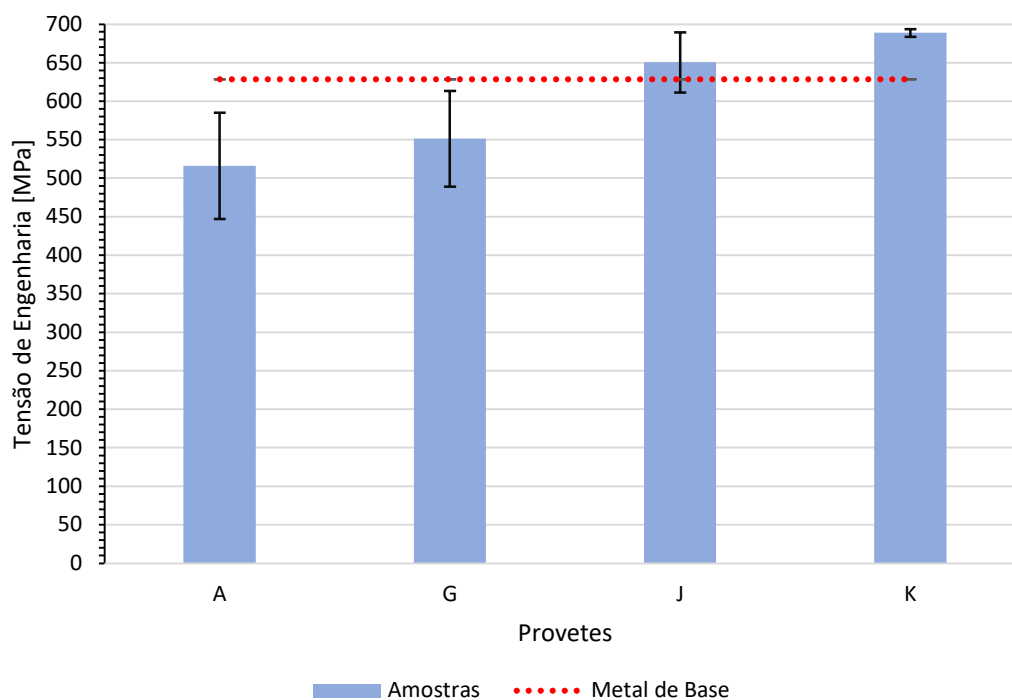


Figura 87- Gráfico de barras das tensões de rotura médias das amostras A, G, J e K com respetivo desvio padrão.

5 Conclusões

No presente trabalho foram analisadas soldaduras em chapas de aço inoxidável AISI 316 com 6 mm de espessura, com configuração de junta topo-a-topo. O trabalho consecutivo de aprendizagem satisfaz os objetivos inicialmente propostos.

As soldaduras obtidas através do processo MIG utilizando o material de adição OK Autrod 308LSi apresentaram na sua maioria aspeto visual rugoso e irregular. Verificou-se ainda a presença de salpicos em todas as amostras soldadas com este fio, o que pode significar que os valores de tensão eram demasiado baixos, uma vez que a intensidade de corrente de todas as amostras esteve compreendida entre os valores previstos pelo fabricante.

Os reagentes utilizados permitiam revelar bem a microestrutura com presença de ferrite. Uma vez que a zona fundida e a ZTA foram reveladas com os mesmos reagentes, pode-se concluir que a zona termicamente afetada não tem presente ferrite, o que está de acordo com o material ser (apenas) austenítico. Durante a análise metalográfica conclui-se que todas as amostras estudadas apresentam na zona de metal fundido uma microestrutura predominantemente de matriz austenítica com presença de ferrite δ com morfologia dendrítica. Não foi detetada a presença de fase σ , que é um bom indicador, uma vez que esta aumenta a probabilidade de aparecimento de fissuras e diminui a resistência à corrosão do aço inoxidável. Este resultado está em conformidade com a previsão efetuada com o auxílio do diagrama de Schaeffler com zonas de risco de Bystran.

As amostras soldadas com o fio OK Autrod 308LSi não são consideradas conjuntos soldados válidos, uma vez que apresentaram uma resistência à tração inferior à do metal de base, não cumprindo os requisitos estipulados pela norma EN 15614-1 e pela própria definição de soldadura pelo IIW. A dificuldade ficou a dever-se ao diâmetro do fio, que não permitia aumentar a I_s .

Tendo em conta a folga utilizada na definição da junta de soldadura e os parâmetros utilizados, o aumento do diâmetro do fio mostrou ser um fator preponderante na melhoria do comportamento de resistência à tração, uma vez que permitiu obter cordões de soldadura com penetração total e boa qualidade de soldadura. Das amostras soldadas com o fio OK Autrod 347Si, a amostra J e a amostra K são consideradas conjuntos soldados válidos, pois mostraram resistência à tração igual ou superior à do metal de base. A amostra I, devido à folga exagerada,

apresentou resultados de resistência à tração inferiores. A preparação das juntas deve ser cuidada em todos os seus parâmetros, de modo a evitar o aparecimento de eventuais descontinuidades e defeitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

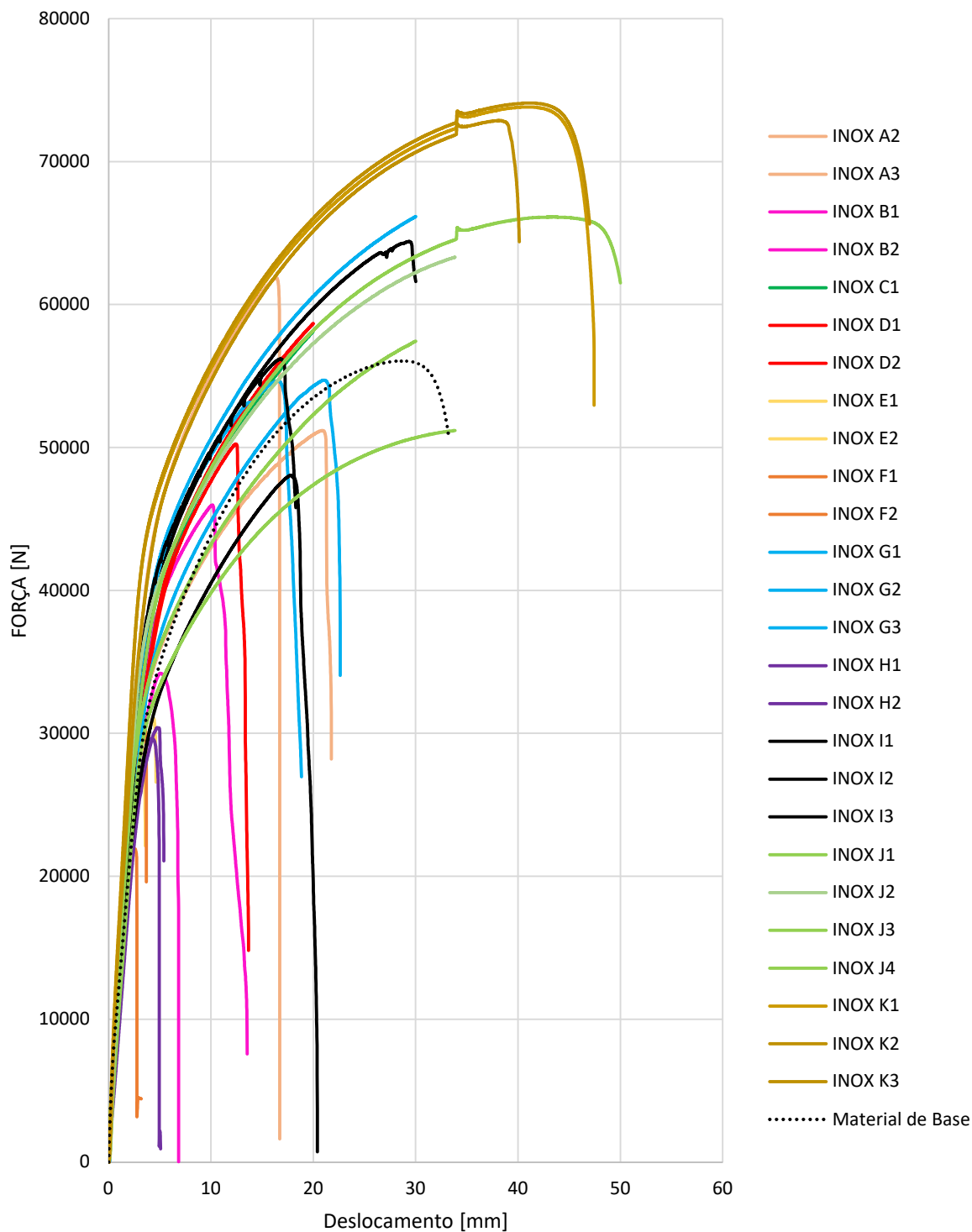
- [1] A. Trindade, «Tecnologia Mecânica II - Soldadura - Sebenta de apoio à disciplina de Tecnologia Mecânica II do 3º ano da Licenciatura em Engenharia Mecânica, ESTGV, 2016, Viseu.»
- [2] H. B. Cary e S. C. Helzer, *Modern Welding Technology*, Sixth Edition. Pearson Prentice Hall, 2005.
- [3] P. J. Modenesi, P. Marques, e D. B. Santos, «Introdução à Metalurgia da Soldagem». UFMG, 2012.
- [4] F. J. G. Silva, *Tecnologia da Soldadura - Uma Abordagem Técnico-didática*. Publindústria, Edições Técnicas, Lda., 2014.
- [5] J. F. S. Duarte, «Análise comparativa de soldaduras obtidas em estado sólido e por fusão», Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2015.
- [6] KOBE STEEL, LTD., «Essential Factors in Gas Shielded Metal Arc Welding». 2015.
- [7] P. J. Modenesi, «Soldagem I - Introdução à Física do Arco Elétrico». Universidade Federal de Minas Gerais, janeiro de 2001.
- [8] M. J. de M. Mendes, «Optimização e estudo dos parâmetros de soldadura MAG Robotizada de uma estrutura tubular de aço S235 com o fio consumível G3Si1», Faculdade de Engenharia do Porto, 2009.
- [9] P. J. Modenesi, «Statiscal Modelling of the Narrow Gap Gas Metal Arc Welding Process», Cranfield Institute of Technology, 1990.
- [10] K. Weman e G. Lindén, *MIG Welding Guide*, Woodhead Publishing Limited. 2006.
- [11] P. J. Modenesi, «Soldagem I - Introdução aos Processos de Soldagem». Universidade Federal de Minas Gerais, novembro de 2000.
- [12] «An Introduction to MIG Welding». Acedido: 18 de abril de 2021. [Em linha]. Disponível em: www.weldability.com
- [13] P. J. Modenesi, «Transferência de Metal». Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.
- [14] American Welding Society AWS, *Welding Handbook - Welding Processes*, 8.ª ed., vol. 2. 1997.
- [15] ASM International, *ASM Handbook - Welding Brazing and Soldering*, vol. 6.
- [16] M. J. de Carvalho, «Orientações Práticas de Soldagem em Aço Inox - ACESITA». janeiro de 1999.
- [17] J. Li, H. Li, H. Wei, e Y. Gao, «Effect of torch position and angle on welding quality and welding process stability in Pulse on Pulse MIG welding-brazing of aluminium alloy to stainless steel», set. 2015, doi: 10.1007/s00170-015-7734-6.
- [18] L. Jeffus, *Welding - Principles and Applications*, 7.ª ed. Delmar Cengage Learning, 2011.
- [19] A. A. de Resende e A. Scotti, «Influência dos Níveis das Correntes, Ângulos de Inclinação da Tocha e Distância entre a Tocha e a Peça sobre a Geometria do Cordão de Solda Usando “Plasma-MIG” com arcos Concêntricos», 2015.
- [20] S. da H. Coito, «Definição de parâmetros a usar num processo de soldadura para melhoria da qualidade do produto», Universidade do Minho, 2016.
- [21] A. J. R. Loureiro, «Aquecimento prévio de soldaduras», set. 2019, [Em linha]. Disponível em: https://doi.org/10.30779/cmm_metalica_55_02
- [22] BS EN 1011-1:2009, «Welding - Recommendations for welding of metallic materials - Part 2 Arc Welding of ferritic steels».

- [23] D. Venkatratnam e V. V. S. K. Rao, «Application of Response Surface Method in studying the properties of MIG welded dissimilar joints of AISI 202 and AISI 316 steels», *J. Xian Univ. Archit. Technol.*
- [24] I. Felizardo, «Apostila - Tecnologia da Soldagem». CEFET - Minas Gerais, fevereiro de 2016.
- [25] M. R. Gomez, *Soldadura de los Aceros - Aplicaciones*, 4ª Edição. 2003.
- [26] P. J. Modenesi, «Descontinuidades e Inspeção em Juntas Soldas - Soldagem I». 2001.
- [27] P. Proença, «Fenómenos de fissuração nos aços - Parte 1». Instituto de Soldadura e Qualidade.
- [28] L. H. da Silva, «Defeitos de soldagem em materiais metálicos», Faculdade de Tecnologia de Sorocaba, 2018.
- [29] J. A. Vieira Pereira, «Estudo e Aplicação de Ensaios Não Destrutivos», FEUP, 2013.
- [30] P. E. Mix, *Introduction to Nondestructive Testing - A training Guide*, 2ª. 2005.
- [31] C. Hellier, *Handbook of Nondestructive Evaluation*. 2003.
- [32] Joana de Sousa Coutinho, «Ensaios Mecânicos - Materiais de Construção I». 2005. [Em linha]. Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~jcouti/9-05%20dobragem.pdf>
- [33] ESAB Portugal, «Uma Introdução à Inspeção de Soldadura». [Em linha]. Disponível em: <https://pt.esab.net/pt/pt/education/blog/an-introduction-to-welding-inspection.cfm>
- [34] ESAB, «Introduction to destructive weld testing». [Em linha]. Disponível em: <https://www.esabna.com/us/en/education/blog/destructive-testing-of-welds.cfm#:~:text=This%20type%20of%20testing%20involves,extent%20of%20any%20welding%20discontinuities.>
- [35] B. D. Pereira, «Inspeção de Juntas Soldadas», FEUP, 2020.
- [36] William F. Smith, *Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*, 3ª Edição.
- [37] TÜV Rheinland, «Testes de Impacto Charpy». <https://www.tuv.com/portugal/pt/servi%C3%A7os-de-teste-de-impacto-charpy.html>
- [38] D. Wen, P. Long, J. Li, L. Huang, e Z. Zheng, «Effect of post-heat treatment on the mechanical and corrosion behaviour of SS316L fabricated by wire arc additive manufacturing», doi: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.109131>.
- [39] X. Chen, J. Li, X. Cheng, H. Wang, e Z. Huang, «Effect of heat treatment on microstructure, mechanical and corrosion properties of austenitic stainless steel 316L using arc additive manufacturing», 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.10.002>.
- [40] L. B. O. de Souza, «Correlação entre Processos de Fabricação Convencional e por Manufatura Aditiva com as Propriedades do Aço Inoxidável 316L», Universidade Federal de Uberlândia, 2022.
- [41] W. Cardoso, T. A. P. Machado, R. C. Baptista, A. G. de S. Galdino, F. A. de M. Pinto, e T. de S. Luz, «Influência do Aporte de Calor na Microestrutura da Zona Fundida do Aço Inoxidável Austenítico AISI 301», *Rev. IfesCiência*, nov. 2021, doi: 10.36524/ric.v7il.1202.
- [42] EN ISO 10088-3, «Stainless Steels - Part 3: Technical delivery conditions for semi-finished products, bars, rods and sections for general purposes.» 1995.
- [43] Z. Mansjur, H. M. Sumual, e I. P. Tamba, «The effect of groove welding on mechanical properties and microstructure resistance steel plate by submerged arc welding», 2019.
- [44] EN ISO 15614-1:2005, International Organization for Standardization, «Especificação e Qualificação de Procedimentos de Soldadura para Materiais Metálicos. Prova de Procedimentos de Soldadura.» 2005.
- [45] DIN EN 10028-7, International Organization for Standardization, «Flat Products made of Steels for pressure purposes. Part 7: Stainless Steels». 2008.

ANEXO 1

Amostra	Provete	Dimensão "A" (mm)	Dimensão "B" (mm)	Dimensão "C" (mm)	Dimensão "D" (mm)
Amostra "A"	A1	18,70	18,88	18,74	-
	A2	19,38	18,89	18,76	-
	A3	15,38	15,28	14,28	-
Amostra "B"	B1	17,11	17,11	17,13	4,4
	B2	18,45	18,58	18,54	4,7
Amostra "C"	C1	17,91	17,99	18,07	0,7
Amostra "D"	D1	18,23	18,40	18,19	1,2
	D2	18,18	18,26	18,29	1,2
Amostra "E"	E1	18,06	18,04	18,00	0,4
	E2	18,21	18,30	18,32	0,3
	E3	18,29	18,33	18,30	2,9
Amostra "F"	F1	17,06	17,11	16,96	1,6 1,4
	F2	17,05	17,00	16,99	1,9 1,1
	F3	17,99	18,03	18,04	1,5 1,6
Amostra "G"	G1	18,24	18,22	18,19	3,7
	G2	18,02	18,15	18,11	2,6
	G3	18,33	18,31	18,35	2,6
Amostra "H"	H1	18,26	18,30	18,31	1,6
	H2	18,19	18,20	18,13	1,2
	H3	18,36	18,37	18,40	1,5
Amostra "I"	I1	18,22	18,37	18,37	3,7
	I2	18,08	18,08	18,01	3,9
	I3	18,02	18,05	18,02	2,6
Amostra "J"	J1	13,21	13,03	13,05	3,7
	J2	16,84	16,46	16,33	3,6
	J3	16,75	16,66	16,58	3,0
	J4	16,86	16,97	17,06	4,27
Amostra "K"	K1	18,56	18,63	18,68	2,62
	K2	18,60	18,71	18,70	2,25

ANEXO 2



ANEXO 3

FIOS DE AÇO INOXIDÁVEL

FIOS MIG/MAG (GMAW)



OK Autrod 308LSi

A continuous solid corrosion resisting chromium-nickel wire for welding of austenitic chromium nickel alloys of 18% Cr - 8% Ni-type. OK Autrod 308LSi has a good general corrosion resistance. The alloy has a low carbon content which makes this alloy particularly recommended where there is a risk of intergranular corrosion. The higher silicon content improves the welding properties, such as wetting. The alloy is widely used in the chemical and food processing industries as well as for pipes, tubes and boilers.

Especificações

Classificações	EN ISO 14343-A : G 19 9 L Si SFA/AWS A5.9 : ER308LSi Werkstoffnummer : ~1.4316
Aprovações	BV : 308L SA BT (M12) CE : EN 13479 CWB : ER308LSi DB : 43.039.01 DNV-GL : VL 308 L (M13) NAKS/HAKC : 0.8-1.2 mm VdTÜV : 04267

As aprovações são baseadas na localização da fábrica. Entre em contato com a ESAB para obter mais informações.

Tipo de liga	Austenitic (with approx. 8 % ferrite) 19% Cr - 9% Ni - Low C - High Si
--------------	--

Propriedades mecânicas típicas			
Condição	Limite de Elasticidade	Resistência: Tração	Alongamento
Como Soldado	420 MPa (61 ksi)	570 MPa (83 ksi)	36 %
Como Soldado	370 MPa (54 ksi)	490 MPa (71 ksi)	
Tested at 350°C.			
Como Soldado	420 MPa (61 ksi)	570 MPa (83 ksi)	36 %

Como Soldado	370 MPa (54 ksi)	490 MPa (71 ksi)	
--------------	-----------------------	-----------------------	--

Propriedades do Teste Charpy com Entalhe em V		
Condição	Temperatura de Teste	Valor de Impacto
Como Soldado	20 °C (68 °F)	105 J (78 ft-lb)
Como Soldado	-60 °C (-76 °F)	70 J (52 ft-lb)
Como Soldado	-196 °C (-321 °F)	40 J (30 ft-lb)

Análise de Metal de Soldadura												
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	Cu	N	FN WRC-92	
Composição Química do Consumível (%)												
0.03	0.7	1.8	0.020	0.009	19.5	10.0	0.03	0.01	0.1	0.04	6	
Composição Química (%)												
0.03	0.7	1.8	0.020	0.009	19.5	10.0	0.03	0.01	0.1	0.04	6	

Valores de depósito				
Diâmetro	Amps	Taxa de Deposição	Velocidade de alimentação do fio	Volts
0.8 mm (0.030 in.)	55-160 A	1.0-4.1 kg/h (2.2-9.0 lbs/h)	4.0-17.0 m/min (157-669 in./min)	15-24 V
0.9 mm (0.035 in.)	65-220 A	1.1-5.4 kg/h (2.4-11. lbs/h)	3.5-18.0 m/min (138-709 in./min)	15-28 V
1.0 mm (0.040 in.)	80-240 A	1.5-6.0 kg/h (3.3-13. lbs/h)	4.0-16.0 m/min (157-630 in./min)	15-28 V
1.2 mm (0.047 in.)	100-300 A	1.6-7.5 kg/h (3.5-16. lbs/h)	3.0-14.0 m/min (118-551 in./min)	15-29 V
1.6 mm (1/16 in.)	230-375 A	5.2-8.6 kg/h (11.5-19. lbs/h)	5.5-9.0 m/min (217-354 in./min)	23-29 V

Parâmetros de soldadura
Diâmetro do fio
0.6 mm (0.025 in.)
1.14 mm (0.045 in.)

ANEXO 4

FIOS DE AÇO INOXIDÁVEL

FIOS MIG/MAG (GMAW)



OK Autrod 347Si

A continuous solid corrosion resisting chromium-nickel wire for welding of austenitic chromium nickel alloys of 18% Cr - 8% Ni-type. OK Autrod 347Si has a good general corrosion resistance. The alloy is stabilized with Niobium to improve the resistance against intergranular corrosion of the weld metal. The higher silicon content improves the welding properties, such as wetting. Due to the niobium content this alloy is recommended for use at higher temperatures.

Especificações

Classificações	EN ISO 14343-A : G 19 9 Nb Si SFA/AWS A5.9 : ER347Si Werkstoffnummer : ~1.4551
Aprovações	CE : EN 13479 DB : 43.039.13 NAKS/HAKC : 1.0-1.6 mm VdTÜV : 09734

As aprovações são baseadas na localização da fábrica. Entre em contato com a ESAB para obter mais informações.

Tipo de liga	Austenitic (with approx. 8 % ferrite) 19% Cr - 9% Ni - Nb
--------------	---

Propriedades mecânicas típicas				
Condição	Limite de Elasticidade	Resistência	Tração	Alongamento
EN 98Ar/2O2				
Como Soldado	340 MPa (49 ksi)	460 MPa (67 ksi)		26 %
Como Soldado	440 MPa (64 ksi)	640 MPa (93 ksi)		37 %
EN 98Ar/2O2 Tested at 400°C.				
Como Soldado	340 MPa (49 ksi)	460 MPa (67 ksi)		26 %
Como Soldado	440 MPa (64 ksi)	640 MPa (93 ksi)		37 %

Propriedades do Teste Charpy com Entalhe em V		
Condição	Temperatura de Teste	Valor de Impacto
EN 98Ar/202		
Como Soldado	20 °C (68 °F)	100 J (74 ft-lb)
Como Soldado	-60 °C (-76 °F)	70 J (52 ft-lb)

Análise de Metal de Soldadura									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	Cu
Composição Química do Consumível (%)									
0.04	0.7	1.7	0.005	0.010	19	9.8	0.1	0.6	0.1
Composição Química (%)									
0.04	0.7	1.7	0.005	0.010	19	9.8	0.1	0.6	0.1

Valores de depósito				
Diâmetro	Amps	Taxa de Deposição	Velocidade de alimentação do fio	Volts
0.8 mm (0.030 in.)	55-160 A	1.0-4.1 kg/h (2.2-9.0 lbs/h)	4.0-17.0 m/min (157-669 in./min)	15-24 V
1.0 mm (0.040 in.)	80-240 A	1.5-6.0 kg/h (3.3-13. lbs/h)	3.5-18.0 m/min (138-709 in./min)	15-28 V
1.2 mm (0.047 in.)	100-300 A	1.6-7.5 kg/h (3.5-16. lbs/h)	3.0-14.0 m/min (118-551 in./min)	15-29 V
1.6 mm (1/16 in.)	230-375 A	5.2-8.6 kg/h (11.5-19. lbs/h)	5.5-9.0 m/min (217-354 in./min)	23-31 V