



ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



Márcia Sofia Borges Teixeira

**Fabricação aditiva por arco e fio de componentes estruturais
à base de aço para os navios da Marinha Portuguesa**

**Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares
Navais, na especialidade de Engenharia Naval Ramo Mecânica**



Alfeite
2022



ESCOLA NAVAL

ta tante de bi faire



Márcia Sofia Borges Teixeira

Fabricação aditiva por arco e fio de componentes estruturais à base de aço para os navios da Marinha Portuguesa

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenharia Naval Ramo Mecânica

Orientação de: Doutor João Pedro de Sousa Oliveira

Coorientação de: Capitão-de-Fragata EN-MEC Paulo Alexandre Marques Pires da Silva

O Aluno Mestrando

O Orientador

Márcia Sofia Borges Teixeira

João Pedro de Sousa Oliveira

Alfeite
2022

“When everything seems to be going against you, remember that the airplane takes off against the wind, not with it”.

(Henry Ford)

Dedicatória

À minha mãe, que ao longo do meu percurso académico tinha sempre a palavra certa na hora certa.

Agradecimentos

Para um Aspirante a Oficial a Dissertação de Mestrado representa o culminar de cinco anos de trabalho e espírito de sacrifício, tendo nesta caminhada sido acompanhada por inúmeras pessoas que sempre manifestaram o seu apoio, sendo por isso imprescindível enaltecer os meus sinceros agradecimentos a todas elas.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao meu orientador, o Professor João Pedro Oliveira, não só por ter aceite o convite para embarcar nesta aventura, mas também por todo o apoio e incentivo incondicional que demonstrou ao longo dos últimos meses. Levámos, com certeza, esta Dissertação a um bom porto. Paralelamente gostaria de agradecer ao Engenheiro Pires da Silva, o meu coorientador, a constante disponibilidade, ajuda e recomendações técnicas, prontificando-se desde o início da jornada a auxiliar-me no que necessitasse. O meu muito obrigado por me ter guiado até às pessoas certas.

Aos alunos de doutoramento da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, em especial ao Igor. Igor, obrigado por todo o acompanhamento ao longo destes últimos meses, obrigado por toda a orientação e por teres abdicado do teu tempo e do teu trabalho em prol do meu, sem dúvida que esta Dissertação também é tua. Espero que a vida te sorria sempre, merece-lo.

Aos técnicos do Laboratório da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa, ao Sr. António Campos e ao Sr. Paulo Magalhães obrigado por me terem acompanhado e apoiado, mostrando sempre disponibilidade a auxiliar-me no que precisasse. Aos dois, o meu muito obrigado.

Aos meus pais, Ana e Francisco, e à minha irmã, Lara, que ao longo dos últimos anos fizeram tudo o que estava ao seu alcance para me proporcionar um futuro promissor, tendo sido o porto de abrigo que eu precisava, nunca me deixando desistir, mesmo quando eu achava que seria a solução mais fácil.

Ao Iven, que sempre me apoiou no meu percurso acadêmico e que, apesar de não ter estado tão presente no ano da Dissertação, tinha sempre um palavra de conforto e aconchego, nunca me deixando perder as estribeiras. Obrigado por estares comigo nas minhas vitórias e, acima de tudo, nas minhas derrotas. Agradeço também à tua família, principalmente ao Tó e à Nanda, obrigado por estarem sempre comigo, sei que estarão sempre.

Ao curso Capitão-de-mar-e-Guerra Fernando Amor Monteiro de Barros, não só por terem sido a minha família naval ao longo de cinco longos anos, mas também por todos os momentos de camaradagem e vitórias, tendo sempre presente no espírito o lema que nos representa “ Por obstáculos como nunca unidos como sempre”. Digam o que disserem, seremos sempre o melhor curso do Mundo.

Às melhores amigas do mundo, Eduarda, Marta e Joana. Obrigado por todo o apoio, paciência, conversas, sorrisos, mas também choros pois foram estes que nos fizeram crescer e ser quem somos hoje. Tenho a certeza de que sem vocês esta jornada não teria sido a mesma e só espero ter marcado a vossa vida como vocês marcaram a minha.

A todos vocês, o meu muito obrigado!

Resumo

O Fabrico Aditivo apresenta-se, desde o ano de 2012, como o principal plano estratégico e operacional da Marinha dos EUA para acompanhar a evolução e revolução da tecnologia mundial, através do aumento e do aprimoramento dos equipamentos. Sendo assim, e por forma a evoluir na produção e disponibilização de equipamentos necessários ao cumprimento das missões atribuídas à esquadra, considera-se fulcral a aderência da Marinha Portuguesa à tecnologia do Fabrico Aditivo. Foi em novembro de 2021, através de um despacho do Comando Naval, que a Marinha Portuguesa manifestou propensões na implementação do Fabrico Aditivo a bordo das Unidades Navais, tendo como principal propósito a mitigação das dificuldades sentidas por parte da cadeia de abastecimento.

A aplicabilidade da utilização de ligas de aço revestida com fluxo rutilico a bordo dos Navios da Classe *Viana do Castelo*, quando usado o WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing), foi verificada e caracterizada como concebível, não só por se ter verificado a possibilidade de construção e de redução da quantidade de gás de proteção empregue no processo, sem o comprometer, como também pela ausência de inclusões no material, devido à presença de óxido de titânio no fluxo. Através da análise das inúmeras condições de deposição em estudo obter-se-á a condição de parâmetros ideal recorrendo a um otimizador de resposta pelo método “*design of experiments*”, isto é, planeamento de experiências, que requer a seleção da maximização ou minimização das variáveis de resposta, isto é, energia do arco, ondulação, altura por camada, largura e penetração. A realização de ensaios mecânicos, nomeadamente os ensaios de tração, permitiu verificar a existência do fenómeno de anisotropia, onde os elevados valores de ductilidade e deformação se mostraram relevantes nos provetes horizontais. No que diz respeito à microestrutura, nomeadamente à avaliação da microdureza e dos constituintes presentes na parede de soldadura, verificou-se que esta apresentava níveis de microdureza relativamente baixos e grãos refinados de tamanho reduzido.

Palavras-chave: Marinha Portuguesa, Fabrico Aditivo, Otimizador, Ensaio Mecânicos, Microestrutura

Abstract

Since 2012, Additive Manufacturing has been the main strategic and operational plan of the US Navy, to keep up with the evolution and revolution of world technology, through the increase and improvement of equipment. Therefore, and in order to evolve in the production and availability of equipment necessary for the fulfilment of the missions assigned to the fleet, the Portuguese Navy's adherence to Additive Manufacturing technology is considered essential. It was in November 2021, through an order from the Naval Command, that the Portuguese Navy expressed its propensity to implement Additive Manufacturing on board Naval Units, with the main purpose of mitigating the difficulties experienced by the supply chain.

The applicability of the use of steel alloys coated with rutile flux on board *Viana do Castelo* Class Ships, when using WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing), was verified and characterized as conceivable, not only for having verified the possibility of building and reducing the amount of shielding gas employed in the process, without compromising it, but also for the absence of inclusions in the material, due to the presence of titanium oxide in the flux. Through the analysis of the numerous deposition conditions under study, the ideal parameter condition will be obtained using a response optimizer using the "design of experiments" method, that is, experiment planning, which requires the selection of the maximization or minimization of the response variables, ie, arc energy, ripple, thickness per layer, width, and penetration. The performance of mechanical tests, namely the tensile tests, made it possible to verify the existence of the anisotropy phenomenon, where the high values of ductility and deformation proved to be relevant in the horizontal specimens. Regarding the microstructure, namely the evaluation of the microhardness and the constituents present in the weld wall, it was found that it had relatively low levels of microhardness and refined grains of reduced size.

Keywords: Portuguese Navy, Additive Manufacturing, Optimizer, Mechanical Tests, Microstructure

Índice Geral

Dedicatória.....	v
Agradecimentos.....	vii
Resumo.....	x
Abstract	xii
Índice Geral	xiv
Índice de Figuras.....	xviii
Índice de Tabelas	xxii
Abreviaturas, siglas e acrónimos	xxii
Introdução	1
Motivação.....	1
Objetivos da Dissertação.....	3
Estrutura da Dissertação	4
1. Estado da Arte	6
1.1. Fabrico Aditivo (FA).....	6
1.1.1. Evolução Histórica e Aplicabilidade.....	6
1.1.2. Conceito de Fabrico Aditivo	8
1.1.3. Tecnologias do Fabrico Aditivo.....	9
1.1.3.1. <i>Binder Jetting (BJ)</i>	10
1.1.3.2. <i>Directed Energy Deposition (DED)</i>	11
1.1.3.3. <i>Vat Photopolymerisation (VATP)</i>	12
1.1.3.4. <i>Material Jetting (MJ)</i>	13
1.1.3.5. <i>Sheet Lamination (SL)</i>	14
1.1.3.6. <i>Material Extrusion (ME)</i>	15
1.1.3.7. <i>Powder Bed Fusion (PBF)</i>	16
1.2. <i>Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)</i>	17

1.2.1.	Contextualização Histórica.....	17
1.2.2.	Processos de soldadura utilizados na tecnologia WAAM	18
1.2.2.1.	<i>Gas Metal Arc Welding</i> (GMAW)	18
1.2.2.2.	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i> (GTAW)	20
1.2.2.3.	<i>Plasma Arc Welding</i> (PAW)	21
2.	Procedimento Experimental	22
2.1.	Equipamentos e Materiais.....	22
2.2.	Otimização de Parâmetros.....	24
2.2.1.	Restrições / Limitações do Processo	24
2.2.2.	Influência da Variação do Caudal e da Velocidade de Soldadura	27
2.2.2.1.	Avaliação da Porosidade.....	29
2.2.2.1.1.	Princípio de Arquimedes.....	29
2.2.2.1.2.	Volume de Vazios	32
2.2.2.2.	Microdurezas.....	33
2.2.2.3.	Análise Macro Geométrica	35
2.2.3.	Planeamento de Experiências.....	36
2.3.	Avaliação Microestrutural	41
2.4.	Avaliação das Propriedades Mecânicas	44
3.	Discussão de Resultados	49
3.1.	Restrições / Limitações do Processo.....	49
3.2.	Influência da Variação do Caudal do Gás de Proteção e da Velocidade de Soldadura	51
3.3.	Planeamento de Experiências	62
3.4.	Avaliação Microestrutural	74
3.5.	Avaliação das Propriedades Mecânicas	77
	Conclusão	85
	Trabalhos Futuros.....	89
	Referências Bibliográficas	90
	Apêndice A- Parâmetros, valores e classificação dos cordões e paredes de soldadura..	97

Apêndice B - Cordões e paredes de soldadura com $WFS = 3$ m/min.....	99
Apêndice C - Cordões e paredes de soldadura com $WFS = 4$ m/min.....	101
Apêndice D - Cordões e paredes de soldadura com $WFS = 5$ m/min.....	103
Apêndice E – Cordões e paredes de soldadura com diferentes valores de caudal de gás de proteção.....	105
Apêndice F – Paredes de soldadura tendo em conta o planeamento de experiências	107
Anexo A – Características de construção dos navios da Classe <i>Viana do Castelo</i> 109	
Anexo B – Data Sheet do fabricante	110

Índice de Figuras

Figura 1.1.1: Clip criado através da impressão 3D (Retirado de [2]).....	1
Figura 1.2: Aplicação da impressão 3D na Marinha Britânica e Francesa: (a) Lançamento do VANT bordo do HMS Mersey; (b) Fabrico de uma hélice (Retirado [4,5]).....	2
Figura 1.1.3: Questão central e questões derivadas da dissertação de mestrado.....	3
Figura 1.1: 1ª tecnologia de Fabrico Aditivo (Retirado [6]).....	7
Figura 1.2: Impressão 3D da haste de uma viseira (Retirado [8]).....	7
Figura 1.3: Impacto do Fabrico Aditivo nos setores (Retirado [9]).....	8
Figura 1.4: Processos do Fabrico Aditivo	9
Figura 1.5: Processo Binder Jetting (Retirado [18]).....	10
Figura 1.6: Processo Direct Energy Deposition (Retirado [18]).....	11
Figura 1.7: Tecnologia Stereolithography (SLA) (Retirado [18]).....	12
Figura 1.8: Processo Material Jetting (Retirado [18]).....	13
Figura 1.9: Técnicas do processo Sheet Lamination: (a) Técnica UAM; (b) Técnica LOM (Retirado [18]).....	14
Figura 1.10: Técnica FDM (Retirado [18]).....	15
Figura 1.11: Técnicas do processo Powder Bed Fusion: (a) Técnica SLS, DMLS e SLM; (b) Técnica EBM (Retirado [18]).....	17
Figura 1.12: Tecnologia WAAM (Retirado [37]).....	18
Figura 1.13: Processo GMAW (Retirado [41]).....	19
Figura 1.14: Processo FCAW (Retirado [44]).....	20
Figura 1.15: Processo GTAW (Retirado [44]).....	20
Figura 1.16: Processo PAW (Retirado [48]).....	21
Figura 2.1: Equipamentos utilizados.....	22
Figura 2.2: Bancada de ensaios.....	23
Figura 2.3: Deposição do material de adição na obtenção de paredes de soldadura.....	25
Figura 2.4: Deposição bidirecional do material de adição.....	26
Figura 2.5: Corte das paredes de soldadura.....	28
Figura 2.6: Representação do corte da extremidade e da amostra em estudo.....	28
Figura 2.7: Medição de densidades: (a) Estrutura; (b) Montagem da estrutura na balança.....	30

Figura 2.8: Medição da massa da amostra: (a) em ambiente seco; (b) em ambiente imerso.	31
Figura 2.9: Preparação para Microdurezas: (a) Material utilizado para preparação da resina; (b) Resinas preparadas.	33
Figura 2.10: Equipamento Buehler AutoMet 250.	34
Figura 2.11: Medição das durezas com o durómetro Mitutoyo.....	34
Figura 2.12: Indentações: Distância mínima entre indentações; (b) Indentações na parede.	35
Figura 2.13: Equipamento responsável pelo polimento das amostras.....	35
Figura 2.14: Macro Geometria: (a) Observação do cordão ao microscópio; (b) Geometria do cordão.	36
Figura 2.15: Amostras da parede e restante parede.	39
Figura 2.16: Digitalização das paredes.....	39
Figura 2.17: Ondulação: (a) Secção transversal com marca de escala; (b) Secção transversal com técnica perfilografia.....	40
Figura 2.18: Resina com amostra obtida através da condição otimizada.....	42
Figura 2.19: Microscópio Leica DMI 5000 M utilizado para observação da microestrutura.....	42
Figura 2.20: Microscópio Eletrónico de Varrimento.....	44
Figura 2.21: Maquinagem da parede.	44
Figura 2.22: Dimensões dos provetes de tração.	45
Figura 2.23: Obtenção dos provetes: (a) Maquinação da parede; (b) Parede finalizada.	45
Figura 2.24: Ensaio de tração com o AUTOGRAPH SHIMADZU.....	46
Figura 2.25: Proвете após ensaio de tração.	46
Figura 2.26: Gráfico da Tensão versus Deformação.	47
Figura 3.1: Aparência dos cordões obtidos com WFS = 3.....	49
Figura 3.2: Aparência dos cordões obtidos com WFS = 4.....	50
Figura 3.3: Aparência dos cordões obtidos com WFS = 5.....	50
Figura 3.4: Densidade das amostras quando há variação do caudal.....	52
Figura 3.5: Volume de vazios quando há variação do caudal.	53
Figura 3.6: Densidade das amostras quando há variação da velocidade de soldadura... 55	
Figura 3.7: Volume de vazios quando há variação da velocidade de soldadura.	55

Figura 3.8: Valores de Microdurezas para diferentes valores de caudal (Centro da Parede).	56
Figura 3.9: Valores de microdurezas para diferentes valores de caudal (Extremidade da Parede).	56
Figura 3.10: Microdurezas para diferentes valores de velocidade de soldadura (Centro da Parede).	57
Figura 3.11: Microdurezas para diferentes valores de velocidade de soldadura (Extremidade da Parede).	57
Figura 3.12: Altura do cordão para diferentes valores de caudal.	60
Figura 3.13: Largura do cordão para diferentes valores de caudal.....	60
Figura 3.14: Penetração do cordão para diferentes valores de caudal.....	61
Figura 3.15: Gráfico de tensão e corrente obtido no <i>Matlab</i>	63
Figura 3.16: Altura por camada das deposições do planeamento de experiências.....	67
Figura 3.17: Largura das deposições do planeamento de experiências.	68
Figura 3.18: Penetração das deposições do planeamento de experiências.	68
Figura 3.19: Perfis da parede: (a) Reconstrução Virtual; (b) Largura versus Altura.	69
Figura 3.20: Perfil da parede sem extremidades e com linhas médias.	69
Figura 3.21: Minimização e maximização das variáveis de entrada.	72
Figura 3.22: Obtenção da parede com parâmetros da condição otimizada.	73
Figura 3.23: Microestrutura em diferentes zonas da parede.....	75
Figura 3.24: Constituintes presentes em cada uma das zonas da parede.....	76
Figura 3.25: Valores de microdurezas da parede obtida através da condição otimizada.	78
Figura 3.26: Gráficos de tensão versus deformação para os 4 provetes.....	79
Figura 3.27: Superfície de fratura do provete vertical.....	81
Figura 3.28: Superfície de fratura do provete horizontal.....	82
Figura 3.29: Zonas distintas de fratura do provete vertical.	83
Figura 3.30: Zonas distintas de fratura do provete horizontal.	84

Índice de Tabelas

Tabela 2.1: Composição química do substrato.....	23
Tabela 2.2: Composição química do material de adição.....	24
Tabela 2.3: Parâmetros e respectivos valores do material de adição sugeridos pelo fabricante.....	25
Tabela 2.4: Classificação e aparência dos cordões.....	27
Tabela 2.5: Parâmetros e respectivos valores dos cordões e das paredes de soldadura...	28
Tabela 2.6: Fatores e níveis definidos para o planejamento de experiências.....	37
Tabela 2.7: Deposições obtidas recorrendo ao software <i>Minitab</i>	38
Tabela 3.1: Medição das massas em ambiente seco para variação do caudal.....	52
Tabela 3.2: Medição das massas em ambiente seco e cálculo da densidade e volume de vazios para diferentes valores de caudal.....	52
Tabela 3.3: Medição das massas em ambiente seco para variação da velocidade de soldadura.....	54
Tabela 3.4: Medição das massas em ambiente imerso e cálculo da densidade e do volume de vazios para variação da velocidade de soldadura.....	54
Tabela 3.5: Medição de altura para diferentes valores de caudal.....	58
Tabela 3.6: Medição de largura para diferentes valores de caudal.....	59
Tabela 3.7: Medição de penetração para diferentes valores de caudal.....	59
Tabela 3.8: Medição da altura por camada para as diferentes deposições.....	64
Tabela 3.9: Medição da largura para as diferentes deposições.....	65
Tabela 3.10: Medição da penetração para as diferentes deposições.....	66
Tabela 3.11: Valores de ondulação das deposições.....	70
Tabela 3.12: Valores referentes às variáveis de resposta.....	70
Tabela 3.13: Equações de regressão e respectivos valores de R ²	71
Tabela 3.14: Resultados obtidos dos ensaios de tração.....	79

Abreviaturas, siglas e acrónimos

ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene
AE	Arc Energy
AM	Additive Manufacturing
ASTM	American Society for Testing and Materials
BJ	Binder Jetting
CENIMAT	Centro de Investigação de Materiais
CNC	Computer Numerical Control
CTWD	Contact to Work Distance
DED	Directed Energy Deposition
DLF	Directed Light Fabrication
DMD	Direct Metal Deposition
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DoE	Design of Experiments
EBM	Electron Beam Melting
FA	Fabrico Aditivo
FCAW	Flux Core Arc Welding
FDM	Fused Deposition Modeling
FS	French Ship
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
HMS	Her Majesty's Ship
LENS	Laser Engineered Net Shaping
LOM	Laminated Object Manufacturing
MAG	Metal Active Gas
ME	Material Extrusion
MEV	Microscópio Eletrónico de Varrimento

MIG	Metal Inert Gas
MJ	Material Jetting
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NATO	North Atlantic Treaty Organization
PAW	Plasma Arc Welding
PBF	Powder Bed Fusion
SL	Sheet Lamination
SLA	Stereolithography
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
TS	Travel Speed
USS	United States Ship
UAM	Ultrasonic Additive Manufacturing
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VP	Vat Photopolymerization
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing
WFS	Wire Feed Speed

Introdução

Motivação

A autossustentabilidade é uma das ambições de qualquer Marinha, permitindo-lhes garantir a continuidade das missões sem depender da cadeia logística de abastecimento. Como se verificará de seguida, o Fabrico Aditivo (FA) tem ganho bastante prestígio entre as Marinhas dos Países da NATO, sendo de realçar a Marinha Americana, Francesa e Britânica.

Foi no decorrer do ano de 2014 que a Marinha Americana instalou a 1ª impressora 3D num navio de guerra, o navio de assalto anfíbio *USS ESSEX*, com o propósito de produzir não só material médico, como por exemplo seringas de plástico, como também tampas para os tanques de óleos. Além disto, é ainda de realçar que devido à impressora 3D presente no *USS Harry S. Truman* foi desenvolvido um *clip* (Figura 1.1.1) com o propósito de eliminar um problema que resultava na constante avaria dos rádios utilizados a bordo do navio. Cada *clip* produzido custou cerca de 6 dólares, tendo a Marinha Americana poupado 12000 dólares em apenas três meses [1,2].



Figura 1.1.1: Clip criado através da impressão 3D (Retirado de [2]).

Relativamente à Marinha Real Britânica, e com o objetivo de demonstrar o potencial uso de aeronaves não tripuladas no mar, a bordo do *HMS Mersey* lançou-se um VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) (Figura 1.2-a), construído a partir da tecnologia da impressão 3D [3,4].

Também a Marinha Francesa tem marcado posição na impressão 3D e exemplo disso foi o fabrico da primeira hélice, visível na Figura 1.2-b, por parte da empresa *Naval Group*, sendo posteriormente colocada num navio da Armada Francesa, o *FS Andromede*.

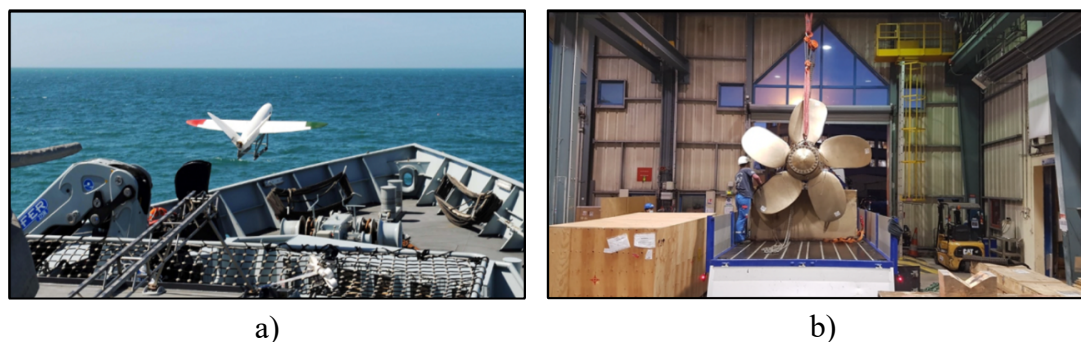


Figura 1.2: Aplicação da impressão 3D na Marinha Britânica e Francesa: (a) Lançamento do VANT bordo do HMS Mersey; (b) Fabrico de uma hélice (**Retirado [4,5]**).

A China, apesar de não estar inserida na aliança política e militar da qual grande parte dos países europeus fazem parte, a NATO, todos eles têm um ponto em comum: o FA. Desde 2001 que a China tem investido nesta tecnologia e, mais recentemente, no término do ano de 2014, deu-lhe uso devido ao *destroyer* Chinês *Harbin* que ao realizar manobras contra a pirataria no Golfo de Aden fraturou uma engrenagem que provocou uma redução acentuada da capacidade de manobra do navio. Algo que poderia tomar proporções descomunais solucionou-se através do FA, onde foi produzido a bordo do navio a peça para substituição imediata [1].

Posto isto, a implementação do FA na Marinha Portuguesa traria não só autonomia e eficácia, como também um crescimento sustentável e uma tentativa de colmatar a demora na reparação dos equipamentos, garantindo que a missão dos navios não é comprometida, seja por motivos de atrasos na distribuição dos materiais ou pela falta de verbas necessárias para a aquisição de sobressalentes fulcrais ao funcionamento dos equipamentos e, conseqüentemente, ao cumprimento da missão.

Objetivos da Dissertação

A presente Dissertação insere-se na área de Tecnologia Mecânica e tem como questão central e, conseqüentemente, objetivo principal, verificar a aplicabilidade da técnica de soldadura FCAW- rutilico em WAAM para aços de alta resistência, avaliando as suas principais vantagens. Dada a complexidade de resposta à questão central formularam-se 5 (cinco) questões derivadas que serão respondidas ao longo do capítulo 3 (Figura 1.1.3).

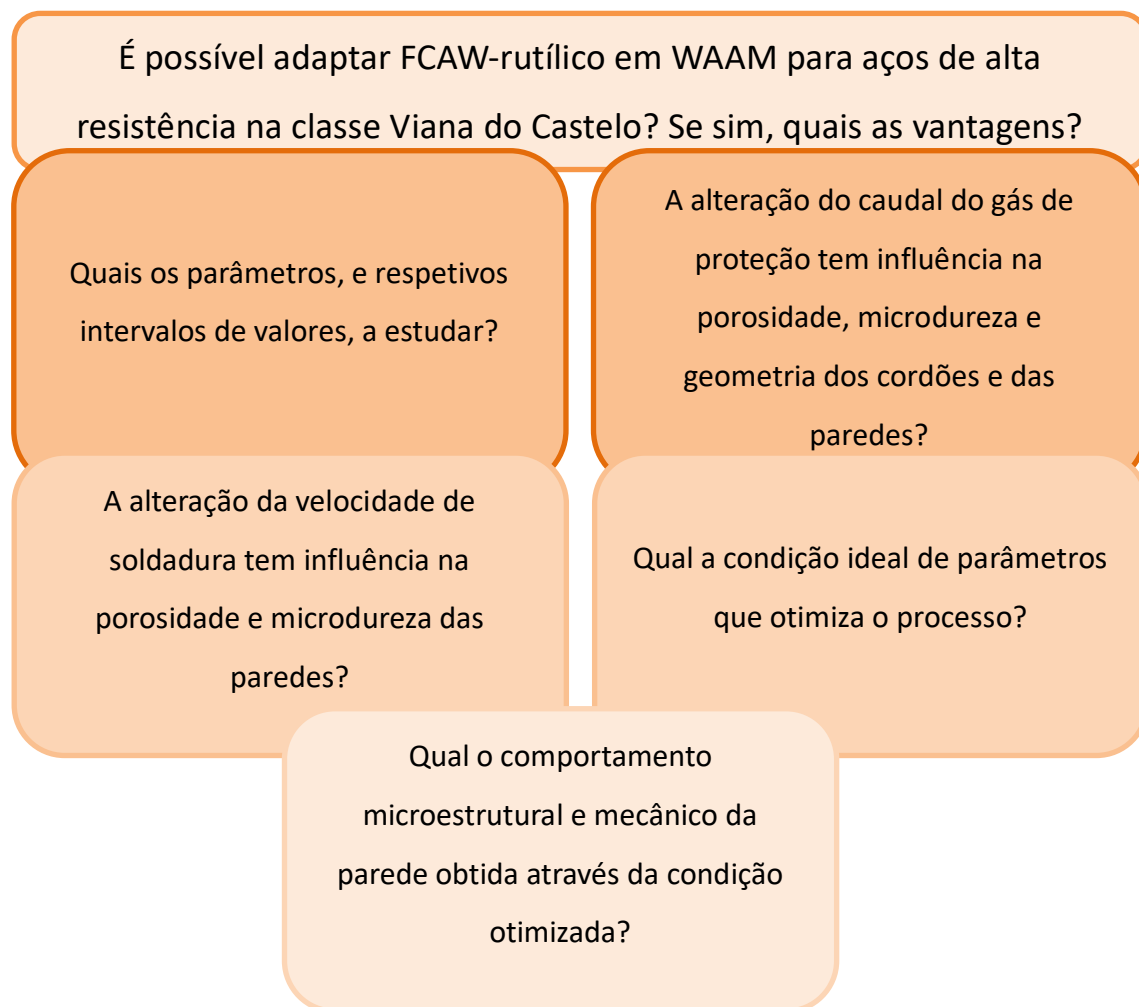


Figura 1.1.3: Questão central e questões derivadas da dissertação de mestrado.

Estrutura da Dissertação

A presente Dissertação, dividida em três capítulos, pretende demonstrar, de forma sucinta, todas as fases inerentes ao trabalho realizado.

Como primeira abordagem elaborou-se a introdução, a motivação da Dissertação, onde se mencionou não só o impacto que a impressão 3D tem tido nas inúmeras Marinhas, como também os benefícios que a tecnologia do FA traria para a Marinha Portuguesa, e ainda os objetivos da presente Dissertação, estando neste ponto detalhado não só a questão central, como também as questões derivadas.

O Capítulo 1, referente ao Estado da Arte, foca-se, principalmente, na evolução histórica, no conceito e nos inúmeros processos inerentes à tecnologia do FA. Além destes três pontos foi ainda definido não só a tecnologia que se utilizou na presente Dissertação, o WAAM, como também os processos intrínsecos ao mesmo.

O Capítulo 2 foi o ponto primordial da presente Dissertação, tendo sido neste que se enunciou os equipamentos e materiais utilizados, efetuou-se a otimização de parâmetros, verificando as restrições e limitações do processo, e realizou-se um estudo da influência da variação do caudal e da velocidade de soldadura, através da avaliação da porosidade, da análise das microdurezas e da macro geometria. Além disto, e tendo por base o planeamento de experiências e, conseqüentemente, a obtenção da condição de parâmetros otimizada, foram realizados ensaios de microestrutura e mecânicos, por forma a verificar a possível aplicabilidade do material de adição ao material de construção dos navios, isto é, ao aço NVD36.

No Capítulo 3 serão apresentados os resultados obtidos ao longo do capítulo anterior, analisando-os e discutindo-os com a literatura existente. A presente Dissertação termina, num primeiro momento, com as conclusões, onde serão dadas respostas às questões derivadas, seguidas das sugestões de possíveis trabalhos futuros.

Uma panóplia de apêndices e anexos corroboram e demonstram o trabalho desenvolvido ao longo da presente Dissertação. O Apêndice A consiste numa tabela onde se encontram retratadas todas as condições de deposição, bem como a classificação dos cordões de soldadura. Do Apêndice B ao Apêndice D encontram-se ilustradas as deposições efetuadas para os diversos valores de velocidade de alimentação do fio (*WFS*).

No Apêndice E estão presentes os vários cordões, e respectivas paredes, obtidas aquando da verificação do impacto da variação do caudal do gás de proteção. No último apêndice, Apêndice F, encontram-se ilustradas as paredes de soldadura obtidas aquando do planeamento de experiências. No que concerne aos Anexos o primeiro (Anexo A) diz respeito às características de construção dos navios da Classe *Viana do Castelo*, estando discriminado no Anexo B as propriedades e composição química do material de adição.

1. Estado da Arte

1.1. Fabrico Aditivo (FA)

1.1.1. Evolução Histórica e Aplicabilidade

O Fabrico Aditivo (FA) não é uma tecnologia recente, apontando-se o seu início para meados do ano de 1980. Contudo, foi no ano de 1983 que a empresa de Charles Hull¹ comercializou a tecnologia do FA (Figura 1.1), tendo sido a primeira empresa a proporcionar um avanço significativo na ciência relacionada com estes processos de fabrico [6]. No decorrer do restante século, e já no ano de 1989, foi a vez de Steven Crump² deixar a sua marca no mundo do FA, patenteando a tecnologia de Fused Deposition Modeling (FDM) que consistia na construção de objetos por camadas através da fundição de material polímero por um bico extrusor [7]. Em 1999 foi a vez de medicina se afirmar na tecnologia do FA, através da criação, e implementação, do 1º órgão humano, uma bexiga. Na indústria automobilística, e por forma a diminuir a emissão de combustíveis fósseis, foi em 2011 que a empresa de Jim Kor³ fabricou o 1º carro através desta tecnologia. Nos últimos anos, e dada a situação pandémica que o país atravessa desde 2019, o FA teve um crescimento acentuado e tal se deve, em grande parte, à impressão de materiais que escasseavam nas urgências, como por exemplo as hastes das viseiras (Figura 1.2), ventiladores pulmonares e válvulas para bombas de oxigénio, reforçando assim o apoio dado aos utentes.

¹ Vice-Presidente e Diretor de Tecnologia da Empresa 3D Systems, sendo esta responsável pela projeção, fabrico e venda de impressoras 3D

² Presidente do Conselho de Diretores da Empresa Stratasys que fabrica impressoras 3D

³ Presidente da empresa Kor Ecologic e líder do projeto do carro Urbee

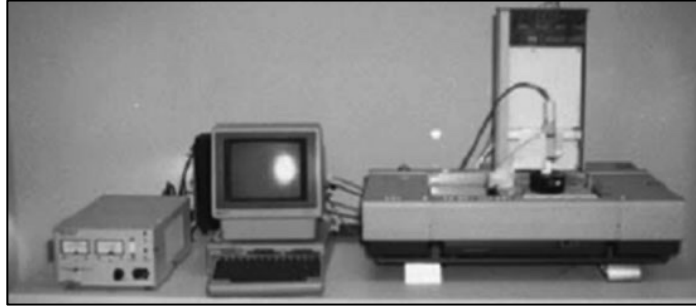


Figura 1.1: 1ª tecnologia de Fabrico Aditivo (Retirado [6]).

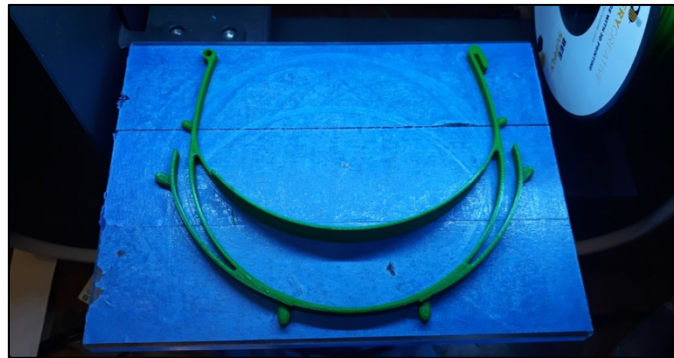


Figura 1.2: Impressão 3D da haste de uma viseira (Retirado [8]).

Com referido anteriormente, o crescimento desta tecnologia tem-se expandido nos últimos anos e tal se deve, maioritariamente, à necessidade de acompanhar a evolução das grandes indústrias, como por exemplo a aeroespacial. O FA evidencia-se nesta indústria não só pela reparação de componentes integrados nas aeronaves comerciais e militares, mas também pela criação de peças complexas garantindo, contudo, o baixo peso que é requisito nesta indústria [9].

Além da indústria aeroespacial é também de realçar a indústria médica que, através desta tecnologia, e por forma a obter uma redução do tempo de cirurgia, do tempo de espera do utente e uma melhoria no resultado médico, faz uso do FA em inúmeras áreas, entre as quais ortopedia e neurocirurgia. Também na indústria naval, e em particular na Marinha Portuguesa, se recorre a esta tecnologia, como é o caso do fabrico das tampas de baterias dos submarinos e dos componentes de sistemas de simulação de detonadores dos destacamentos de mergulhadores.

Posto isto, e reiterando o que já fora referido, é possível afirmar que é devido à tecnologia do FA que houve não só uma redução do custo de produção, como também do tempo de produção originando, conseqüentemente, uma distribuição mais célere dos materiais/produtos [10].

Na Figura 1.3 é possível corroborar o que fora dito anteriormente, verificando o impacto que o Fabrico Aditivo tem tido em inúmeros setores.

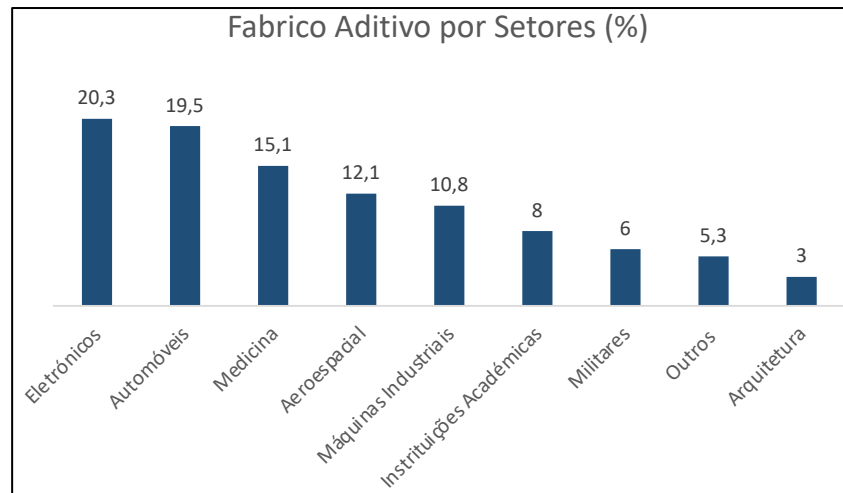


Figura 1.3: Impacto do Fabrico Aditivo nos setores (Retirado [9]).

1.1.2. Conceito de Fabrico Aditivo

Segundo *Gibson et al* [6] o FA é um termo que veio comutar o termo “prototipagem rápida” que, por sua vez, é denominado “impressão 3D”. O termo arcaico era utilizado por inúmeras indústrias para descrever um processo que criava celeremente um modelo básico do qual derivaria o produto final. Contudo, vários foram os utilizadores que defendiam que o termo “prototipagem rápida” era desadequado e em grande parte se deveu à aproximação do modelo produzido ao modelo final. Já para *Berman* [11] a impressão 3D é um processo de FA onde os objetos são construídos camada após camada, através de uma série de secções transversais. *Carreira* [12] afirma que o FA é um vocábulo utilizado para agrupar processos de fabrico distintos onde, através das inúmeras técnicas utilizadas, se produz peças a partir de uma panóplia de materiais, entre os quais polímeros, cerâmicos, madeiras ou metais.

Ao invés da tecnologia de Fabrico Subtrativa, que resulta da remoção de material do objetivo final através de processos como o torneamento e a fresagem, o FA fabrica peças através da adição sucessiva de camadas. *Volpato* [13] define o FA como um processo de fabricação através da adição sucessiva de material, camada após camada, através de uma representação computacional 3D. Este processo permite fabricar inúmeros objetos a partir de diversos materiais, tendo em conta os diferentes princípios existentes.

Por forma a globalizar a definição de FA a ASTM (*American Society for Testing and Materials*), através da norma ASTM F2792-12, caracteriza-o como a agregação de materiais, geralmente camada por camada, tendo por base um modelo computacional em 3D.

1.1.3. Tecnologias do Fabrico Aditivo

O termo “Impressão 3D” está associado a todos os processos inerentes ao FA, contudo, são várias as técnicas existentes, dependendo do método de fabrico utilizado. No decorrer do ano de 2010 a ASTM redigiu um conjunto de normas que especifica os processos de FA em 7 (sete) categorias, dependendo do material a utilizar (metais, cerâmicos ou polímeros) (Figura 1.4) [9,15].

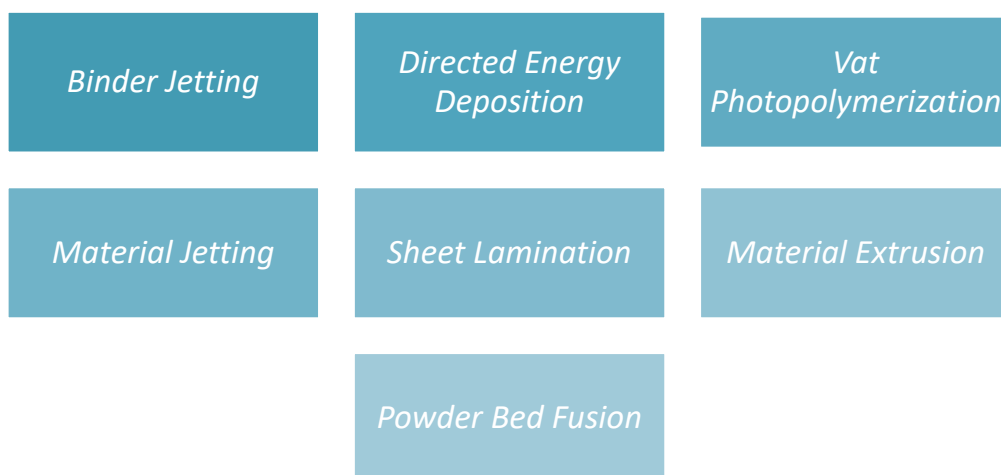


Figura 1.4: Processos do Fabrico Aditivo.

1.1.3.1. *Binder Jetting (BJ)*

O processo *Binder Jetting* (Figura 1.5) foi inicialmente desenvolvido pelo MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) sendo, posteriormente, patenteado no ano de 1993 por *Emanuel Sachs*⁴[6]. Esta tecnologia utiliza dois materiais distintos: um material à base de pó e um agente adesivo líquido, responsável por garantir a união das camadas de pó. Neste processo, o pó é distribuído por toda a superfície através de uma lâmina sendo, posteriormente, aplicado o agente adesivo, por meio da cabeça de impressão, que terá como finalidade agregar todo o material [9,16]. À medida que as camadas vão sendo obtidas a plataforma vai descendo e todo processo anteriormente enunciado será reiterado, até se finalizar a impressão total de objeto. Em comparação com os processos anteriormente referidos, o *Binder Jetting* destaca-se dos demais não só por ser um processo mais célere que os restantes, mas também por fabricar objetos de formatos complexos, através de uma variedade de materiais, entre os quais polímeros, cerâmicos e metais. Contudo, e como principal desvantagem, verifica-se que este processo pode requerer um pós-processamento adicional, o que se traduzirá numa extensão do tempo de produção total do objeto [17].

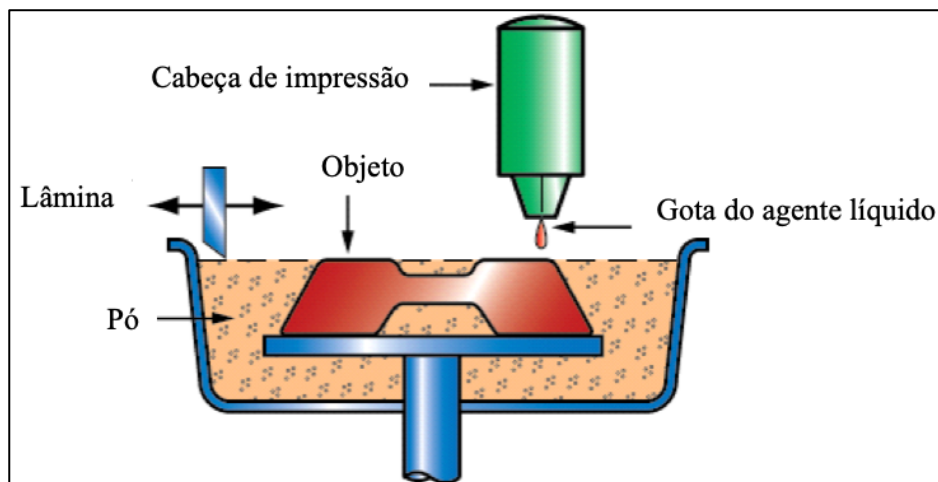


Figura 1.5: Processo Binder Jetting (Retirado [18]).

⁴ Pioneiro da impressão 3D, Cofundador da empresa Desktop Metal e professor de Engenharia Mecânica no MIT

1.1.3.2. *Directed Energy Deposition (DED)*

O processo *Directed Energy Deposition* (Figura 1.6) utilizado, abundantemente, na indústria aeroespacial para a criação de componentes utilizados em aeronaves militares e satélites, é um processo de FA que cria objetos através da adição de material camada por camada [19]. Através de um bocal que está montado num braço de múltiplos eixos verificar-se-á a deposição do material sobre a superfície especificada ocorrendo, simultaneamente, a fusão do mesmo, através de um feixe de laser ou de eletrões [16]. O material que é depositado pode-se apresentar sob a forma de fio, apesar de ser menos exato dada a sua natureza de pré-formação, ou sob a forma de pó [20].

Este processo é em tudo semelhante ao processo de *Material Extrusion*, que será abordado posteriormente, com a particularidade que no processo DED o bocal move-se em várias direções, ao contrário do *Material Extrusion* que é fixo. Inseridos neste processo encontram-se diversas tecnologias, entre as quais: *Laser Engineered Net Shaping* (LENS), *Directed Light Fabrication* (DLF), *Direct Metal Deposition* (DMD), entre outros. Este processo, relativamente aos demais, tem a particularidade de produzir peças de alta qualidade devido à possibilidade de controlar a estrutura do grão a altos graus, contudo, e como desvantagem, é de realçar a necessidade de realizar um pós-processamento, como por exemplo a remoção do material depositado em excesso [6,15].

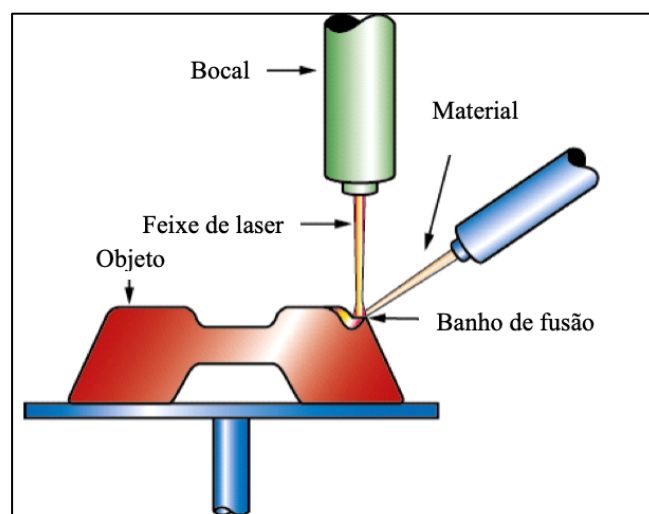


Figura 1.6: Processo Direct Energy Deposition (Retirado [18]).

1.1.3.3. Vat Photopolymerisation (VATP)

O processo *Vat Photopolymerisation* é o processo do FA mais antigo e é frequentemente utilizado na indústria aeroespacial, para a produção de objetos funcionais de maneira rápida e económica, e na indústria automobilística, na criação de protótipos auxiliares para a realização de testes funcionais [21,22]. Este processo caracteriza-se pela cura ou endurecimento da resina foto-polímera líquida, através de uma luz ultravioleta, sendo esta direcionada para a resina através de um espelho, efetuando assim a cura da mesma. Neste processo, e à medida que as camadas vão sendo curadas, a plataforma onde está inserido o objeto irá descer e, conseqüentemente, continuar-se-á a curar camadas por cima das anteriores. O VATP ostenta não só um elevado nível de precisão, como de acabamento, revelando-se um processo célere, contudo, e como principal desvantagem, é de salientar o elevado custo associado a este processo [9,15].

Inserido no processo VATP encontra-se a primeira tecnologia de impressão 3D, patenteada em 1986, a tecnologia *Stereolithography* (SLA) (Figura 1.7). Esta tecnologia possui um bom nível de precisão e acabamento, contudo, e em algumas circunstâncias, requer estruturas de suporte e pós-processamento, como é o caso da lavagem adicional para a remoção do excesso de material, por forma a garantir a robustez suficiente da peça para uso estrutural [15].

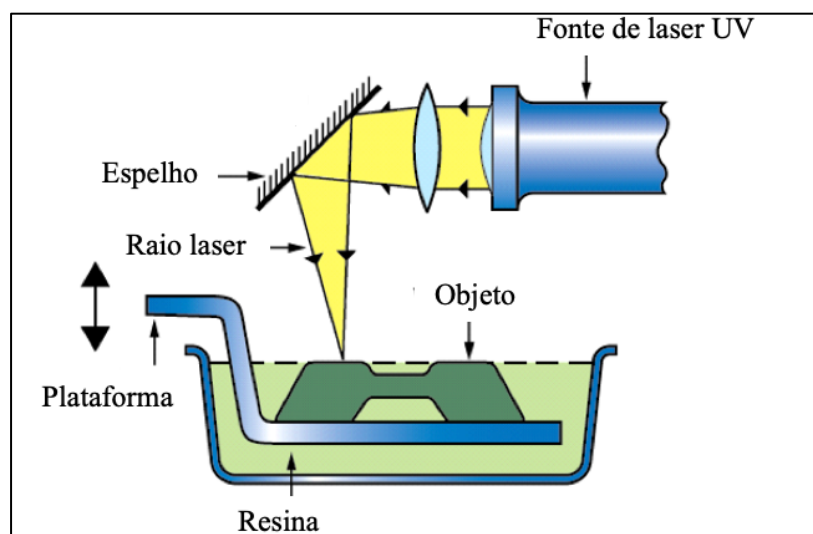


Figura 1.7: Tecnologia Stereolithography (SLA) (Retirado [18]).

1.1.3.4. *Material Jetting (MJ)*

O processo *Material Jetting* (Figura 1.8) assemelha-se às impressoras 2D pois consiste na deposição de gotas de material, camada por camada, até que o objeto seja finalizado. Neste processo o bocal, que se move horizontalmente por toda a plataforma, injeta inúmeras gotículas de material neste base. Posteriormente, e dada a fonte de luz ultravioleta que se encontra acoplada ao bocal, esta cura o material que fora depositado, criando assim a primeira camada. Com uma camada já rematada a plataforma descende e há uma reiteração de todo o processo, até a peça final estar finalizada. Ao invés de outros processos inerentes ao FA, o MJ possui vários bocais, geralmente um associado à construção da peça e um segundo associado ao suporte [23].

Em comparação com os restantes processos o MJ garante uma alta precisão aquando da deposição de gotas, reduzindo assim o desperdício. Uma das desvantagens deste processo é a limitação de materiais a processar, recorrendo somente a cerâmicos e polímeros, contudo, ambos os materiais são os adequados para este processo dada a sua natureza viscosa e capacidade para formar gotas [15]. Devido à utilização de uma luz ultravioleta para curar a resina este processo assemelha-se bastante ao SLA, tendo como diferença a quantidade de gotas depositadas, uma vez que o MJ deposita centenas de gotículas apenas de uma vez, ao contrário do SLA que tem a resina armazenada num tanque e será seletivamente curada pelo laser [24,25].

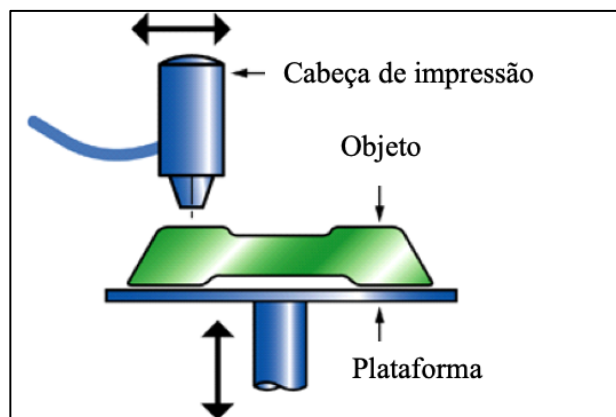


Figura 1.8: Processo Material Jetting (Retirado [18]).

1.1.3.5. *Sheet Lamination (SL)*

O processo *Sheet Lamination* consiste na obtenção de um objeto 3D através da ligação de chapas, ou folhas de material, tendo inerente duas técnicas distintas: *Ultrasonic Additive Manufacturing* (UAM), visível na Figura 1.9-a, e *Laminated Object Manufacturing* (LOM), presente na Figura 1.9-b [26]. A técnica UAM, através das vibrações ultrassónicas do sonotrodo, provoca a união das folhas ou fitas metálicas, contudo, e devido à necessidade de remover o material indesejado, recorre-se a operações de corte de forma periódica, geralmente fresagem, controlada por *Computer Numerical Control* (CNC). Uma das vantagens evidentes desta técnica é a baixa temperatura que se requer para ligar os materiais, uma vez que na UAM as folhas são ligadas por difusão, e não por fusão do material base [15].

A técnica LOM utiliza uma abordagem semelhante à UAM, com a particularidade que ao invés da soldadura para a ligação das folhas utiliza um adesivo vulnerável à temperatura [15,22]. Nesta técnica subsistem 2 (dois) rolos: um primeiro, denominado rolo de material, que fornece o material, e um segundo que se encontra aquecido e que passará sob a plataforma para garantir a ligação das folhas. Posto isto, ocorrerá o corte através de um laser ou de uma ferramenta de recorte. À medida que as folhas são coladas, a plataforma desce por forma a dar espaço às futuras folhas. Como desvantagem, e tendo em conta que os acabamentos variam consoante o material utilizado, é de realçar a necessidade de realizar um pós-processamento [15,27].

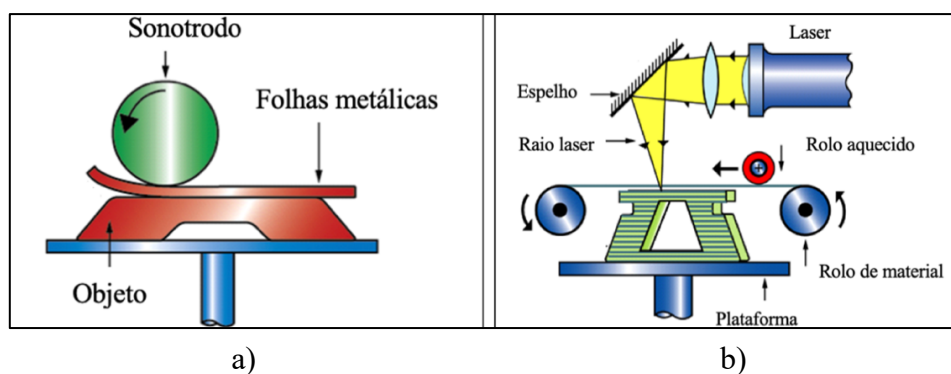


Figura 1.9: Técnicas do processo Sheet Lamination: (a) Técnica UAM; (b) Técnica LOM (**Retirado [18]**).

1.1.3.6. *Material Extrusion (ME)*

O processo *Material Extrusion* é uma das técnicas inerentes ao FA mais populares não só pelo baixo custo, mas também pela acessibilidade ao consumidor [28]. Neste processo o material ao transpor o bocal sofre um aquecimento sendo, posteriormente, depositado na plataforma, dando assim origem aos objetos tridimensionais. À medida que o material vai sendo depositado a plataforma desce, dando origem às camadas seguintes [29].

Uma das técnicas inerentes ao *Material Extrusion* é a *Fused Deposition Modeling* (FDM) (Figura 1.10), que se apresenta como uma das técnicas de impressão 3D mais utilizadas. Nesta técnica o filamento de material termoplástico passa pelo bocal, sofrendo um aquecimento instantâneo, sendo depositado na plataforma. O bocal tem a particularidade de se movimentar horizontalmente, enquanto a plataforma se move verticalmente por forma a permitir a deposição de material, camada por camada. Relativamente aos processos abordados anteriormente este destaca-se dos demais não só pelo custo reduzido, mas também pela diversidade de materiais que está apto a imprimir. Contudo, apresenta desvantagens, tais como a precisão e, conseqüentemente, a necessidade de pós-processamento [15,29,30].

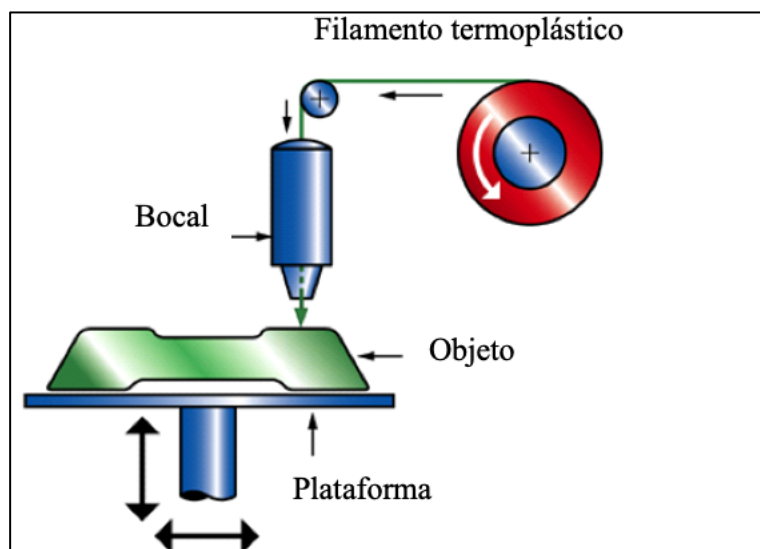


Figura 1.10: Técnica FDM (Retirado [18]).

1.1.3.7. ***Powder Bed Fusion (PBF)***

O processo Powder Bed Fusion caracteriza-se pela fusão de partículas de pó através de uma fonte de calor, seja esta um feixe de laser ou de elétrons. Este processo tem inerentes diversas técnicas, entre as quais *Selective Laser Sintering* (SLS), *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) e *Selective Laser Melting* (SLM), visíveis na Figura 1.11-a, e ainda a técnica *Electron Beam Melting* (EBM), presente na Figura 1.11-b [31].

A primeira técnica do *Powder Bed Fusion* a ser comercializada foi a SLS, sendo esta caracterizada por ter três componentes fulcrais: uma fonte de calor que será a responsável pela fusão do material, um mecanismo que permita a adição de novas camadas (plataforma) e um dispositivo que permita o controlo da fonte de calor. Sendo assim, esta técnica consiste na aplicação de uma camada de pó que será nivelada recorrendo a uma lâmina onde, posteriormente, e através de um laser que é refletido no espelho, fundirá toda a camada de pó [15].

A técnica DMLS é semelhante à SLS, com a particularidade que utiliza pós metálicos, ao invés de plásticos [9,15]. A técnica SLM, em comparação com a técnica SLS, não só é mais expedita, como também funde as partículas de pó, ao invés da sinterização característica das técnicas anteriores.

Por fim, a técnica EBM é em tudo semelhante à SLM, com a particularidade que a fonte de energia é um feixe de elétrons, ao contrário da SLM que é um feixe laser. Esta técnica ocorre num ambiente inerte, por forma a evitar a oxidação do objeto por parte de impurezas presentes na atmosfera. Nesta técnica, e assim que os elétrons atingem as partículas de pó, a energia cinética converte-se instantaneamente em energia térmica, promovendo o aumento da temperatura do material até que a fusão do mesmo ocorra [20,32,33].

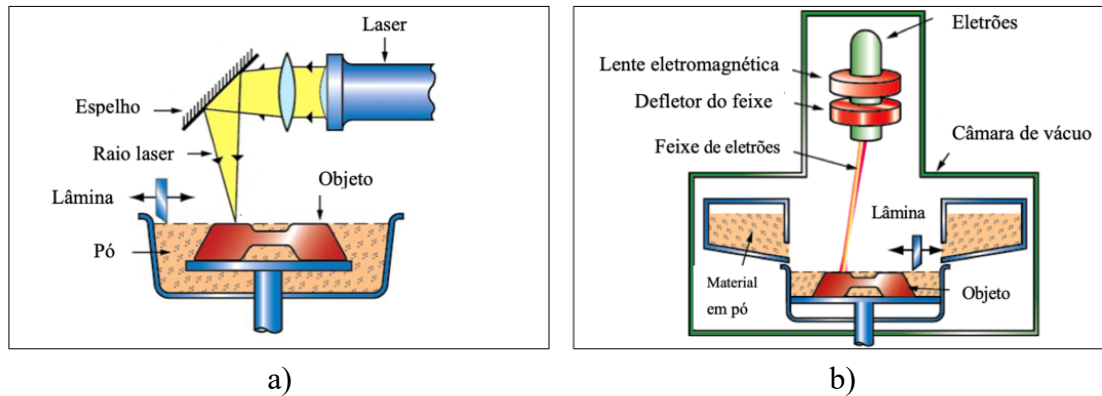


Figura 1.11: Técnicas do processo Powder Bed Fusion: (a) Técnica SLS, DMLS e SLM; (b) Técnica EBM (Retirado [18]).

1.2. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)

1.2.1. Contextualização Histórica

A tecnologia *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM) remete-nos à década de 1990, contudo, foi no ano de 1925 que Ralph Baker patenteou pela primeira vez uma das tecnologias que viria a revolucionar as indústrias automobilísticas, nucleares e aeroespaciais, não só pela possibilidade de criar equipamentos volumosos e apresentar uma elevada taxa de deposição, como também pelo reduzido custo associado a esta tecnologia [34,35]. A invenção de Baker caracterizava-se por ter 2 (dois) componentes essenciais: uma fonte de calor (com base no arco elétrico) e um material (fio) que, através da deposição do material de adição, resultava na obtenção de artigos decorativos [36].

Inerente a um dos processos abordados anteriormente, o *DED*, o WAAM (Figura 1.12) traduz-se na combinação de uma tocha, que permite a deposição do fio de alimentação, e que sofrerá fusão por parte de um arco elétrico, sendo este utilizado como fonte de calor. Esta tecnologia requer um gás de proteção por forma a evitar a oxidação do material à medida que for solidificando, camada por camada [37,38]. Esta tecnologia, em relação às demais, destaca-se por se apresentar uma ótima solução para a obtenção de peças com um tamanho considerável, considerando as elevadas taxas de deposição e os baixos defeitos que lhes são característicos, como por exemplo a porosidade e os respingos.

Contudo, e como principal desvantagem, é de realçar os custos associados à produção e ao pós-processamento, sendo este último fulcral para atender aos padrões de qualidade exigidos para as peças.

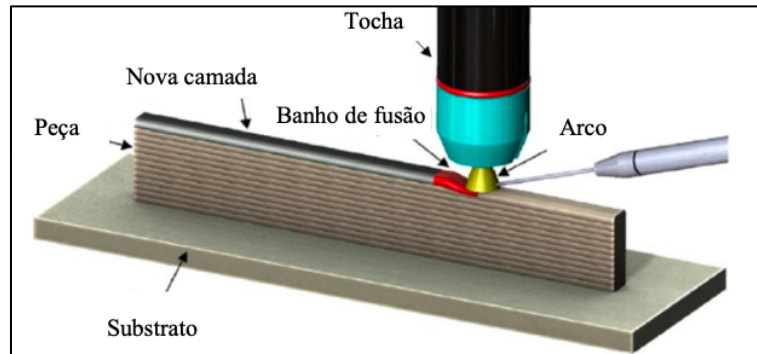


Figura 1.12: Tecnologia WAAM (Retirado [37]).

1.2.2. Processos de soldadura utilizados na tecnologia WAAM

Dependendo da fonte de calor empregue são 3 (três) os processo intrínsecos à tecnologia WAAM: *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), mais correntemente denominado Soldadura MIG (*Metal Inert Gas*) /MAG (*Metal Active Gas*), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW), trivialmente conhecida por Soldadura TIG e, por fim, a *Plasma Arc Welding* (PAW), comumente designada por Soldadura a Plasma [37].

1.2.2.1. *Gas Metal Arc Welding* (GMAW)

O processo *Gas Metal Arc Welding* (Figura 1.13) é um dos processos mais recorrentes da tecnologia WAAM, caracterizando-se pela formação de um arco elétrico entre o eléctrodo de arame consumível e o substrato. Por forma a preservar não só o banho de fusão, mas também o material adjacente, todo o procedimento é efetuado sobre proteção de um gás inerte, geralmente Árgon ou Hélio, se se tratar de um procedimento MIG, ou então de um gás ativo, comumente utilizando misturas de Árgon com Dióxido de Carbono ou Oxigénio, se por sua vez se se tratar de um procedimento MAG [37,39].

Este processo, comparativamente aos demais, apresenta como principais vantagens não só as elevadas taxas de deposição, apresentando-se assim como um dos candidatos prediletos para a produção de peças de elevado tamanho, como também a versatilidade, uma vez que pode ser utilizado com um leque vasto de metais e ligas. Contudo, apresenta desvantagens tais como o dispendioso custo inerente ao processo, não só pelo custo do equipamento, mas também pelo custo associado aos gases de proteção, e ainda a baixa qualidade geométrica da peça, requerendo um pós processamento [37,40].

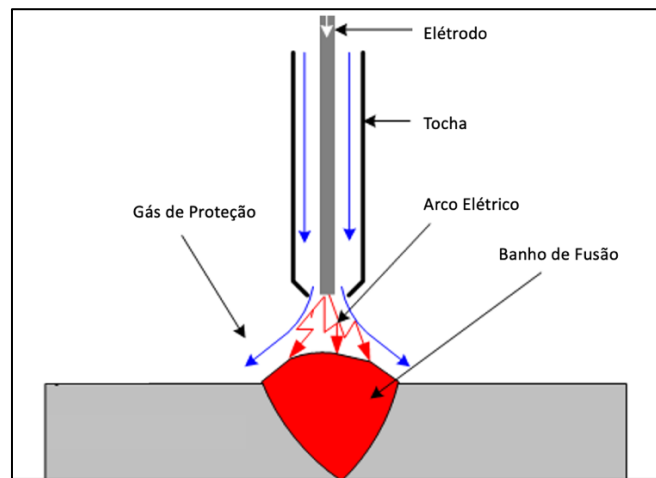


Figura 1.13: Processo GMAW (Retirado [41]).

Nos últimos anos a indústria naval tem recorrido a uma das variações do processo GMAW, o *Flux Core Arc Welding* (FCAW) (Figura 1.14). Este processo assemelha-se ao processo referido anteriormente, com a particularidade que este recorre a um material de adição com geometria tubular onde no seu interior se encontra um fluxo ou uma mistura de pós metálicos, sendo os fluxos mais utilizados o Básico, devido não só às propriedades mecânicas que apresenta, como também à elevada resistência a trincas, e o Rutílico, devido à possibilidade de se soldar em inúmeras posições.

Este processo apresenta como principais vantagens a possibilidade de soldar em todas as posições, como já fora referido, a elevada penetração e a reduzida presença de defeitos. Contudo, e como principais desvantagens, é de realçar a libertação de fumos prejudiciais à saúde e a necessidade de remover a escória *à priori* da deposição da camada seguinte [42,43].

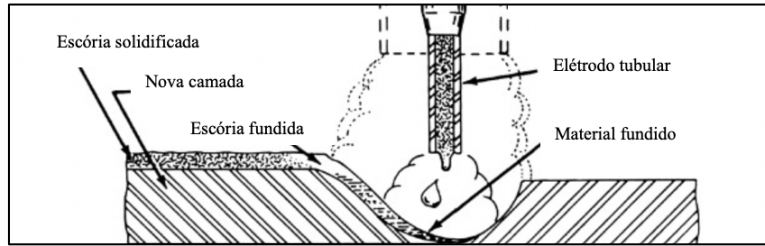


Figura 1.14: Processo FCAW (Retirado [44]).

1.2.2.2. *Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)*

O processo *Gas Tungsten Arc Welding* (Figura 1.15) assemelha-se ao processo descrito anteriormente, com a particularidade que ao invés do eletrodo de arame consumível neste o eletrodo é de tungstênio não consumível. No GTAW, e apresentando-se como principais desvantagens, é de realçar não só o elevado custo dos gases de proteção, aumentado assim o gasto inerente a este processo, como também a demora do processo, uma vez que há uma redução da produtividade. No que concerne a vantagens é de referir a possibilidade de soldar em qualquer direção, não se restringindo apenas a uma [45,46].

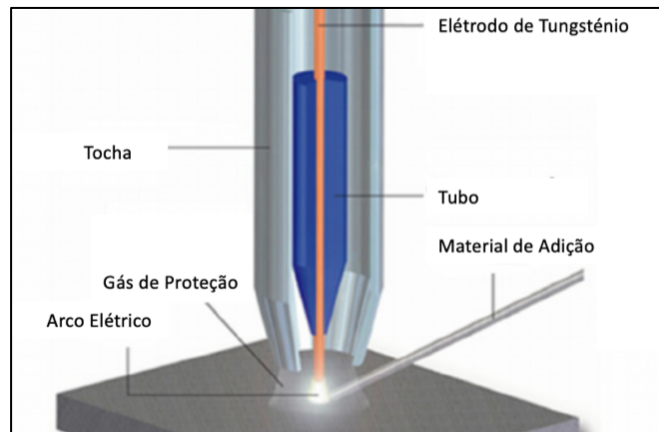


Figura 1.15: Processo GTAW (Retirado [44]).

1.2.2.3. Plasma Arc Welding (PAW)

O processo *Plasma Arc Welding* (Figura 1.16) caracteriza-se pela formação de um arco entre o eléctrodo de tungsténio e o bocal de cobre, permitindo a ionização do gás que flui através do bocal e que formará o arco de plasma entre o eléctrodo e a peça de trabalho. O fluxo de gás de plasma, não sendo suficiente para proteger a peça, requer um gás de proteção secundário, geralmente Árgon, Hélio, ou uma mistura de ambos, por forma a fornecer o efeito de proteção pretendido. Este processo apresenta como principais desvantagens o custo e a complexidade associado ao processo, contudo, e em comparação com os processos descritos anteriormente, este apresenta como principais vantagens a elevada penetração, devido à elevada temperatura e à elevada concentração do plasma, a contaminação mínima do eléctrodo, uma vez que este se encontra no interior do bocal, e ainda a possibilidade de soldar em direcções distintas [46,47].

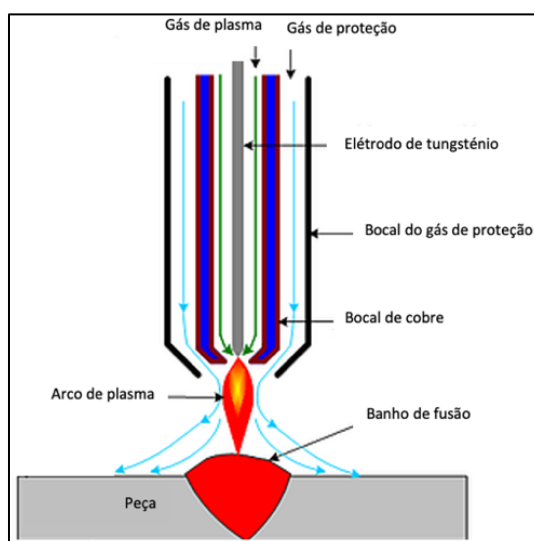


Figura 1.16: Processo PAW (Retirado [48]).

Em suma, a tecnologia WAAM tem intrínsecos 3 (três) distintos processos, sendo estes o GTAW, o PAW e o GMAW, centrando-se a presente Dissertação numa das suas variações de processo, o FCAW. Tem sido notório o prestígio que o WAAM tem ganho no universo da soldadura, não só pela possibilidade de produzir peças de elevadas dimensões, como é o caso do fabrico de hélices ou de ganchos para guindaste, mas também pelas elevadas taxas de deposição que lhe é característica.

2. Procedimento Experimental

O presente capítulo, o procedimento experimental, revelou-se o ponto primordial da presente Dissertação sendo por isso, ao longo do mesmo, abordado não só todos os equipamentos, materiais utilizados e parâmetros definidos, como também se fará referência aos diversos testes e ensaios realizados ao longo do mesmo. Como ponto de partida é de realçar a identificação dos diversos equipamentos e materiais, seguido da definição dos limites do processo, verificando assim quais os parâmetros, e respetivos valores, que apresentam melhor aspeto de cordão e parede de soldadura.

2.1. Equipamentos e Materiais

À priori de iniciar o procedimento experimental houve necessidade de verificar e aprimorar os equipamentos e materiais, estando as suas características e ilustrações especificadas na Figura 2.1.



Figura 2.1: Equipamentos utilizados.

Além de definir e verificar os equipamentos e materiais que serão utilizados ao longo de todo o procedimento experimental, é de igual modo relevante conhecer não só a composição química do substrato (Tabela 2.1), como também entender a escolha no que concerne ao material de adição. Sendo assim, e presente no Anexo A estão algumas das características de construção dos navios da Classe *Viana do Castelo*, sendo possível verificar o material de construção dos mesmos, isto é, o aço de alta resistência NVD36. Sendo assim, e considerando que este aço é bastante utilizado na indústria naval, a escolha do material de adição recaiu num material de adição com fluxo rutílico, do fabricante Filarc, não só para garantir uma maior proteção do banho de fusão, como também para aumentar o conhecimento em torno deste material, dada a sua escassa utilização no FA.

Tabela 2.1: Composição química do substrato.

Material	Percentagem (%)
C	0,25
Si	0,28
Mn	1,02
P	0,04
S	0,05
Cu	0,2

Após definir todos os equipamentos e materiais que seriam utilizados nos ensaios futuros, procedeu-se à preparação da bancada de ensaios (Figura 2.2), sendo possível verificar o substrato, preso por 2 (dois) grampos, e a tocha, contendo o material de adição no seu interior.

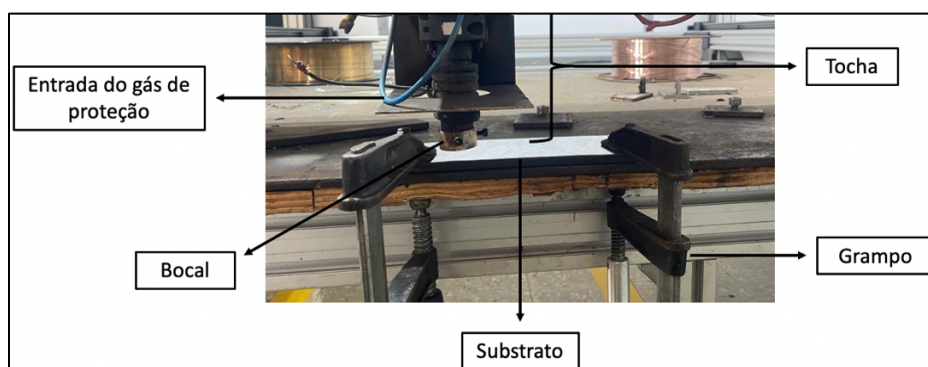


Figura 2.2: Bancada de ensaios.

2.2. Otimização de Parâmetros

2.2.1. Restrições / Limitações do Processo

Como especificado anteriormente, após a verificação e preparação dos equipamentos e materiais a utilizar procedeu-se à otimização de parâmetros por forma a verificar que valores resultavam num melhor aspeto de cordão, e respetiva parede. Sendo assim, e presente no *Data Sheet* do fabricante (Anexo B), encontra-se discriminada não só a composição química do material de adição, sendo este uma liga de aço revestida com fluxo rutilico (Tabela 2.2), como também os diversos parâmetros e respetivos valores máximos e mínimos sugeridos pelo fabricante, referentes ao material de adição (Tabela 2.3). Posto isto, e por forma a dar-se início à deposição do material de adição e, conseqüentemente, à obtenção dos cordões e das paredes do soldadura, definiu-se os parâmetros que iam ser alvo de estudo, dividindo-se os mesmos em parâmetros constantes e parâmetros não constantes.

Como parâmetros constantes é de realçar o *Shielding Gas Flow*, que é o caudal do gás de proteção, utilizando um caudal de 18l/min, e o *Contact to Work Distance (CTWD)*, que é a distância do bico de soldadura ao substrato, definindo-se um valor de 10 mm. Por outro lado, e como parâmetros não constantes é de frisar o *Wire Feed Speed (WFS)*, que é a velocidade de alimentação do fio, o *Travel Speed (TS)*, que é a velocidade de soldadura e, por fim, o *Arc Voltage*, que é a tensão do arco.

Tabela 2.2: Composição química do material de adição.

Material	Percentagem em peso (%)	
	Mínimo	Máximo
C	0.04	0.08
Si	0.30	0.60
Mn	1.00	1.40
P		0.025
S		0.030
Cr		0.20
Ni		0.50
Mo		0.2
V		0.08
Nb		0.05

Tabela 2.3: Parâmetros e respectivos valores do material de adição sugeridos pelo fabricante.

Diâmetro [mm]	Tensão [V]		WFS [m/min]	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
1,2	23	35	5,8	20,7

Após definir os parâmetros em estudo estipulou-se os valores de cada um, tendo cada parâmetro um certo intervalo, com uma panóplia de valores. Num primeiro momento, e verificando os valores de tensão presentes na Tabela 2.3, obtiveram-se cordões, e respectivas paredes (Figura 2.3), com valores de tensão compreendidos entre os 21 e 29V. Relativamente ao *WFS*, e consultando a Tabela 2.3, verifica-se que o fabricante define como valor mínimo 5,8m/min, contudo, e por forma a verificar o comportamento do material de adição a este parâmetro, efetuou-se a deposição do material de adição com um valor mínimo de velocidade de alimentação do fio de 3m/min, optando-se por aumentar este valor de velocidade de alimentação do fio até se obter uma avaliação visual da qualidade geométrica dos cordões de soldadura negativa. No que concerne à velocidade de soldadura, e observando o Anexo B, é possível verificar que o fabricante não faz referência a valores de *TS*, tendo a escolha de valores referente a este parâmetro sido obtida através da deposição, num primeiro momento, do material de adição com um valor de *TS* de 330 mm/min. Assim sendo, optou-se por aumentar este valor até se obter uma avaliação visual da qualidade dos cordões de soldadura negativa, contudo, efetuaram-se deposições até valores de *TS* de 850 mm/min, o que já se apresentava um valor demasiado elevado, uma vez que valores exagerados de *TS* podem originar distúrbios do banho de fusão e instabilidade operacional da máquina.



Figura 2.3: Deposição do material de adição na obtenção de paredes de soldadura.

Na obtenção das paredes de soldadura, e por forma a garantir não só uma melhor distribuição do material de adição, como também propriedades mecânicas e físicas de elevada qualidade, foi efetuada a deposição do material de adição recorrendo ao método “vai e vem”, isto é, a tocha percorre todo o substrato depositando material e, quando termina a deposição, reverte o sentido e deposita material no sentido contrário ao anteriormente depositado (Figura 2.4). As paredes de soldadura foram obtidas com um intervalo de deposições de 90 segundos, permitindo assim o arrefecimento do material já depositado. Num primeiro momento obteve-se cerca de 55 (cinquenta e cinco) cordões e 19 (dezanove) paredes de soldadura, com comprimento variável entre 50 e 110 *mm* e número de camadas variável entre 8 e 20.


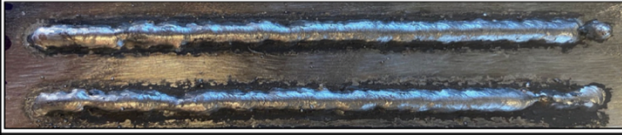
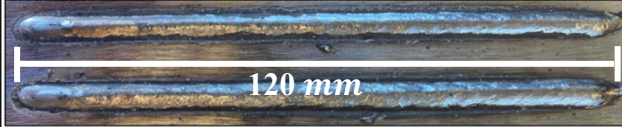


Figura 2.4: Deposição bidirecional do material de adição.

Uma das características inerentes a este processo é a presença de escória e, conseqüentemente, a sua remoção. Contudo, e uma vez que a presente Dissertação se centra na verificação da aplicabilidade deste material na indústria naval, não é exequível retirar a escória por cada vez que se efetua uma camada de deposição de material. Assim sendo, optou-se por não remover a escória, verificando assim se a presença da mesma prejudicava a microestrutura.

No Apêndice A é possível verificar todos as condições de deposição, estando discriminados os parâmetros, e respetivos valores, utilizados na obtenção dos inúmeros cordões e paredes de soldadura. No Apêndice B, no Apêndice C e no Apêndice D encontram-se os diversos cordões, e respetivas paredes de soldadura, para os diferentes valores de *WFS*. Após a obtenção dos inúmeros cordões de soldadura efetuou-se a avaliação visual da qualidade geométrica dos mesmos, estando presente na Tabela 2.4 a sua aparência e respetiva classificação, sendo a cor vermelha referente a um cordão com mau aspeto, a cor amarela relativa a um cordão de aspeto intermédio e a cor verde relativa a um cordão com bom aspeto.

Tabela 2.4: Classificação e aparência dos cordões.

Classificação	Aparência
	
	
	

2.2.2. Influência da Variação do Caudal e da Velocidade de Soldadura

Como referido anteriormente, o caudal de gás de proteção empregue na obtenção dos cordões e das paredes de soldadura foi de $18l/min$, contudo, e por forma a verificar o impacto da redução do caudal nas paredes de soldadura optou-se por variar o valor inicial ($18l/min$) para 5 (cinco) valores diferentes, sendo estes 0, 3, 5, 10 e $15l/min$ repetindo ainda o caudal de $18l/min$. Com estes valores obtiveram-se 7 (sete) paredes e 6 (seis) cordões com os seguintes valores de parâmetros: $WFS = 4 m/min$, $TS = 450 mm/min$ e $U = 21V$. Encontrando o caudal do gás de proteção que melhor se adequa ao processo, será feita, nos mesmos moldes, uma avaliação da velocidade de soldadura, mantendo os valores de WFS e U ($WFS = 4 m/min$ e $U = 21V$) alterando, contudo, o valor de TS para 5 (cinco) valores distintos, sendo estes 475, 500, 525, 550 e $650mm/min$. É importante referir que na escolha destes 5 (cinco) valores foi considerada a faixa operacional do processo, obtida anteriormente.

Na tabela que segue é possível verificar, de forma sucinta, os diversos parâmetros, e respetivos valores, dos cordões e das paredes de soldadura obtidos.

Tabela 2.5: Parâmetros e respectivos valores dos cordões e das paredes de soldadura.

WFS [m/min]	U [V]	TS [mm/min]	Q [l/min]
4	21	450	0/ 3/ 5/ 10/ 15/ 18
4	21	475/ 500/ 525/ 550/ 650	Caudal que melhor se adequa

Após a obtenção das paredes de soldadura com variação quer do caudal do gás de proteção, quer da velocidade de soldadura, proceder-se-á à avaliação não só do nível de porosidade, como também da microdureza. Assim sendo, recorreu-se a uma serra de fita metálica (modelo IMET GBS 218 *eco autocut*) (Figura 2.5), por forma a efetuar o corte das paredes, obtendo assim as secções transversais das mesmas. Tendo em conta que as extremidades das paredes são mais suscetíveis a efeitos negativos, em função da concentração térmica e do tempo de resposta necessário para que os parâmetros do processo atinjam patamares uniformes, como é possível verificar na Figura 2.6, optou-se por eliminá-las, sendo as amostras em estudo de zonas onde se considerou que o material depositado estaria mais uniforme, a cerca de 25 a 30 mm das extremidades.



Figura 2.5: Corte das paredes de soldadura.

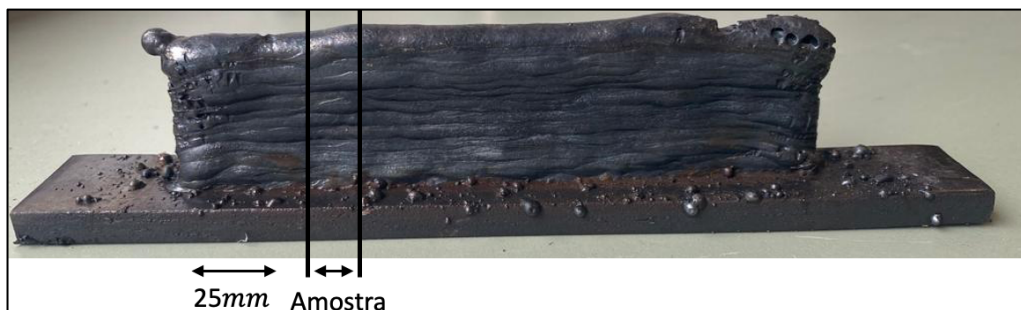


Figura 2.6: Representação do corte da extremidade e da amostra em estudo.

2.2.2.1. Avaliação da Porosidade

Os poros presentes na paredes de soldadura atuam como concentradores de tensões, prejudicando a resistência mecânica e comprometendo, conseqüentemente, a qualidade das paredes de soldadura..

A avaliação da porosidade foi realizada recorrendo ao Princípio de Arquimedes que se fundamenta na medição da massa da amostra em ambiente seco e imersa num líquido de densidade conhecida, neste caso utilizou-se a acetona ($0,7962g/dm^3$). As medições foram realizadas utilizando uma balança de precisão, com peso máximo de $210g$ e resolução de $0,0001g$, às amostras cortadas anteriormente, ao líquido de imersão, a acetona, e a 2 (duas) paredes fabricadas em aço HSLA ER-90S, tendo estas sido utilizadas por forma a efetuar uma comparação entre o material de adição da presente Dissertação e a liga das 2 (duas) novas paredes. As 2 (duas) novas paredes foram obtidas com parâmetros de $WFS = 3m/min$, $U = 18V$, $TS = 340mm/min$ e $Q = 15L/min$, tendo numa primeira sido aplicado o tradicional processo WAAM e na segunda o método do *Hot Forging*.

O *Hot Forging* caracteriza-se pela utilização de um martelo junto da tocha de deposição, sendo este acionado quando está a ocorrer deposição do material. O martelo tende a colapsar e diminuir os poros presentes na microestrutura pelo que, em caso de níveis de porosidade parecidos ao níveis obtidos através do método do *Hot Forging*, estamos perante uma boa parede [49]. Considera-se imprescindível referir que os resultados obtidos são referentes a 3 (três) amostras de um mesmo cordão (A, B e C), presentes no Apêndice E. Além disto, é de salientar que os resultados são em função do percentual de vazios, e não da quantidade de poros existentes nas amostras.

2.2.2.1.1. Princípio de Arquimedes

Como referido anteriormente, o Princípio de Arquimedes baseia-se na medição da massa de uma amostra em 2 (dois) ambientes distintos: seco e imerso.

Sendo assim, e por forma a aplicar o presente princípio, recorreu-se a uma estrutura (Figura 2.7) desenhada no *software SolidWorks* que fora, posteriormente, impressa em plástico ABS numa impressora 3D *Ultimaker*.

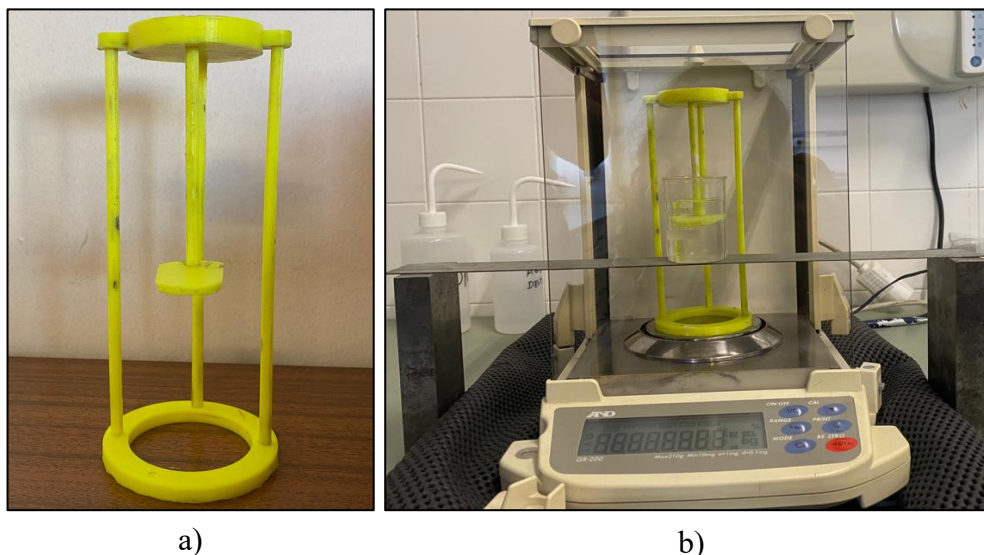


Figura 2.7: Medição de densidades: (a) Estrutura; (b) Montagem da estrutura na balança.

Posto isto, e após a medição das massas das diversas amostras, quer em ambiente seco, quer imersas em acetona, procedeu-se ao cálculo do desvio padrão, recorrendo à equação (2.1), da incerteza associada à medição das inúmeras massas, utilizando a equação (2.2), finalizando-se com a obtenção dos valores das densidades referentes às amostras, com recurso à equação (2.3).

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2.1)$$

- x_i : valor referente a cada uma das amostras
- i : índice das amostras ($i= 1, 2, 3, \dots, N$)
- \bar{x} : valor médio das amostras
- n : quantidade de amostras

$$u = \frac{s}{\sqrt{3}} \quad (2.2)$$

$$\rho_{amostra} = \frac{\rho_{acetona} \times m_{ambiente\ seco}}{m_{ambiente\ seco} - m_{imerso}} \quad (2.3)$$

Como é possível verificar pela equação (2.3), as densidades das amostras são obtidas através do rácio da densidade do líquido utilizado, a acetona, no valor de $0,7962\text{ g/dm}^3$, e da massa das amostras em ambiente seco e imersas em acetona (Figura 2.8).

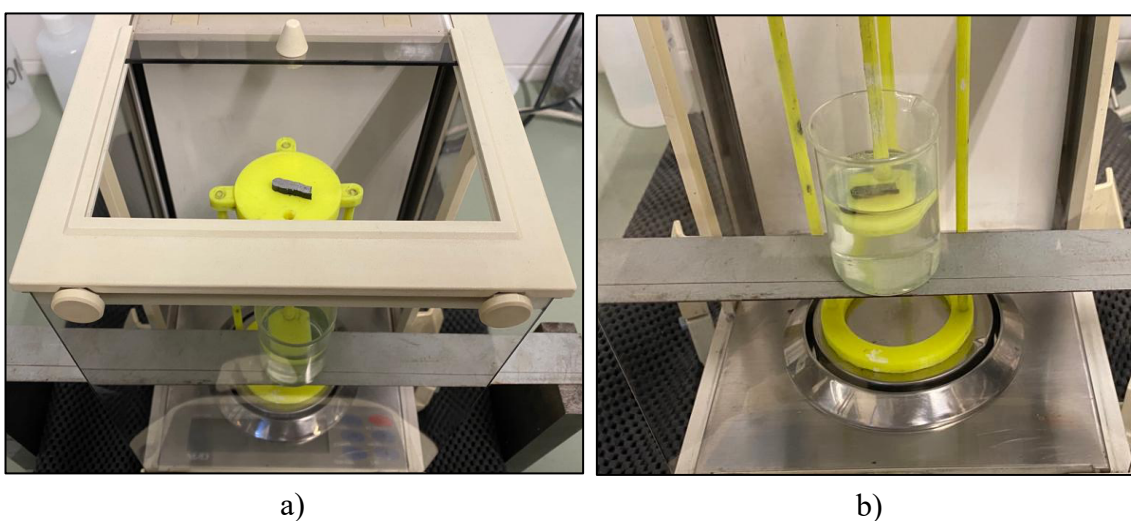


Figura 2.8: Medição da massa da amostra: (a) em ambiente seco; (b) em ambiente imerso.

De seguida, e após o cálculo da densidade de todas as amostras em estudo, procedeu-se ao cálculo das incertezas associadas às mesmas, recorrendo à equação (2.4). Observando a equação (2.4) é possível verificar a presença de parcelas com derivadas, sendo as mesmas definidas pelas equações (2.5) e (2.6).

$$u_{\rho} = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho_{amostra}}{\partial m_{imerso}}\right)^2 \times u_{imerso}^2 + \left(\frac{\partial \rho_{amostra}}{\partial m_{seco}}\right)^2 \times u_{seco}^2} \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial \rho_{amostra}}{\partial m_{seco}} = \frac{\rho_{acetona} \times S_{imerso}}{(S_{seco} - S_{imerso})^2} \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial \rho_{amostra}}{\partial m_{imerso}} = \frac{\rho_{acetona} \times S_{seco}}{(S_{seco} - S_{imerso})^2} \quad (2.6)$$

2.2.2.1.2. Volume de Vazios

Por forma a obter o nível de porosidade, em percentagem, das amostras anteriormente referenciadas, recorreu-se ao cálculo do volume de vazios, referindo-se este somente aos poros interiores, uma vez que os poros exteriores são preenchidos pela acetona.

Para o cálculo do volume de vazios recorreu-se à equação (2.7) que relaciona a densidade do substrato e a densidade da amostra, tendo sido esta última calculada com recurso à equação (2.3).

$$V_{vazios} = \frac{\rho_{substrato} - \rho_{amostra}}{\rho_{substrato}} \times 100\% \quad (2.7)$$

Após calcular o volume de vazios referente a todas as amostras em estudo, proceder-se-á ao cálculo da incerteza associada, com recurso à equação (2.8). Observando a equação seguinte é possível verificar a existência de uma parcela com derivada, sendo esta definida pela equação (2.9).

$$u_{Volume} = \sqrt{\left(\frac{\partial V_{vazios}}{\partial \rho_{substrato}}\right)^2} \times u_{\rho}^2 \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial V_{vazios}}{\partial \rho_{substrato}} = \frac{-1}{\rho_{substrato}} \quad (2.9)$$

2.2.2.2. Microdurezas

A dureza é a capacidade que um certo material apresenta à deformação plástica por parte de um carregamento externo. Análogo ao que fora referido anteriormente, o ensaio de durezas *Vickers* tem como principal objetivo determinar a resistência de um material à deformação do indentador, sendo este ensaio pormenorizado mais adiante [50].

De acordo com a literatura [51], e como já se verificou anteriormente, a variação do caudal do gás de proteção influencia diretamente a oxidação do cordão, isto é, quanto menor for o valor do caudal do gás de proteção, maior será a oxidação sofrida pelos cordões de soldadura. Sendo assim, e considerando um baixo valor do caudal de gás de proteção, seria de esperar um aumento dos valores de durezas, tendo em conta a dureza associada aos óxidos. Relativamente à velocidade de soldadura, e com base na literatura existente, não se regista qualquer relação entre o *TS* e os valores de dureza, tendo os ensaios de dureza sido realizados com o intuito de verificar a existência de alguns efeitos significativos, atendendo ao escasso conhecimento no que diz respeito ao material de adição empregue.

À priori de se iniciar o ensaio de durezas *Vickers* foi preparada uma mistura de 7 (sete) medidas de endurecedor Epoxy Hardener 20-8132-032 e 7 (sete) medidas de resina Epoxy Resin 20-3430-064, estando presente na Figura 2.9-a todos os materiais utilizados. Após a obtenção de uma mistura esbranquiçada verteu-se a mesma para 7 (sete) moldes, onde já estariam as respetivas paredes, visível na Figura 2.9-b.

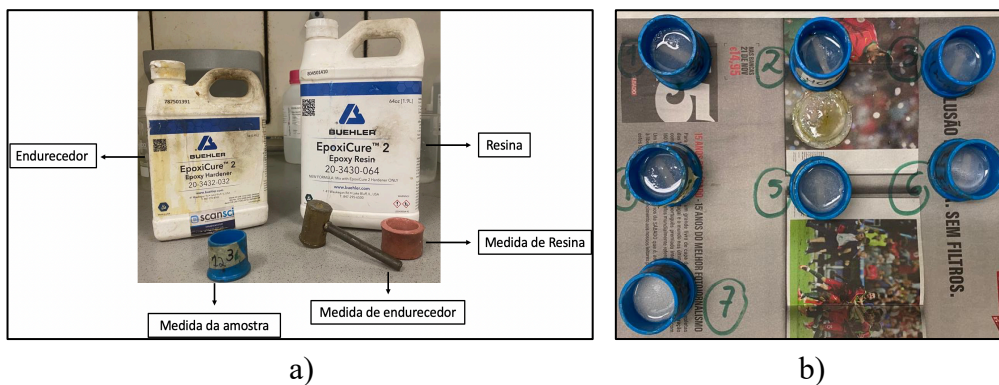


Figura 2.9: Preparação para Microdurezas: (a) Material utilizado para preparação da resina; (b) Resinas preparadas.

Posteriormente, e após a desenformação das amostras, procedeu-se ao polimento das mesmas, recorrendo ao equipamento *Buehler AutoMet 250* (Figura 2.10), uma vez que este permite o polimento de 6 (seis) amostras em simultâneo. O polimento inicia-se na lixa com maior rugosidade, a P80, de seguida utilizou-se a P240 e assim, sucessivamente, até se atingir a lixa mais fina, a P2500.



Figura 2.10: Equipamento Buehler AutoMet 250.

Com as 7 (sete) amostras polidas procedeu-se aos ensaios de dureza, utilizando um durómetro *Mitutoyo Micro Hardness Test Machine* (Figura 2.11). Este durómetro é constituído por um indentador de diamante piramidal que, ao aplicar uma carga de 0,5g durante 10s, origina pequenas indentações que mantêm entre si uma distância mínima de $2,5d$, sendo o d a maior distância de diagonal da indentação (Figura 2.12-a), de acordo com a norma ASTM E384-11 [52]. Foram realizadas indentações em 2 (dois) locais distintos, isto é, num primeiro momento foram efetuadas no centro da parede e, num segundo momento, numa das suas extremidades (Figura 2.12-b).

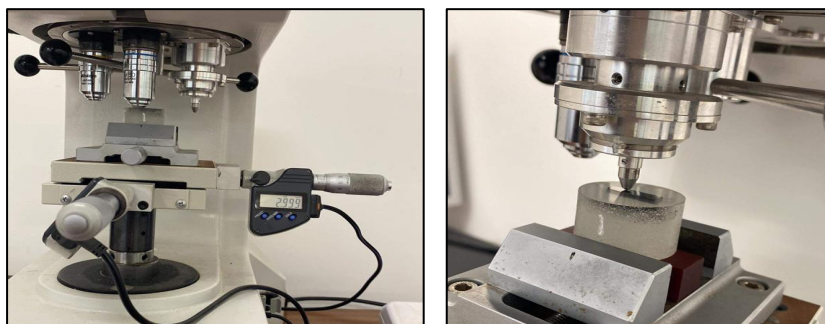


Figura 2.11: Medição das durezas com o durómetro Mitutoyo.

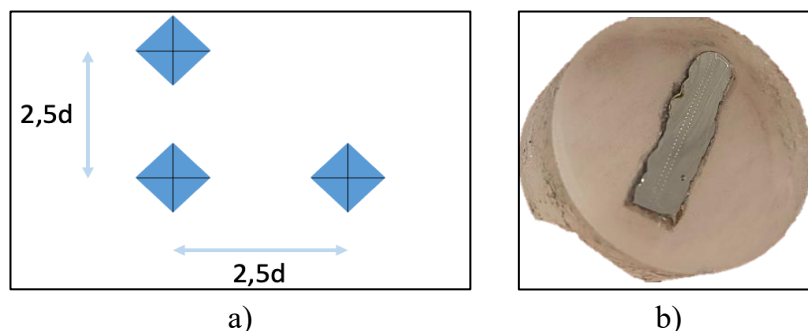


Figura 2.12: Indentações: Distância mínima entre indentações; (b) Indentações na parede.

2.2.2.3. Análise Macro Geométrica

De acordo com a literatura [53,54] a variação do caudal do gás de proteção pode afetar diretamente não só o teor de poros presente nos cordões e nas paredes de soldadura, com já se verificou no ponto referente à avaliação da porosidade, como também a quantidade de calor imposta no banho de fusão provocando, diretamente, uma alteração da geometria dos cordões, ou seja, quanto maior for o caudal do gás de proteção maior será a largura e penetração do cordão, contudo, a altura será menor. Por forma a corroborar o que fora dito anteriormente, relativamente à geometria, procedeu-se, *à priori*, ao polimento das amostras no equipamento *Phoenix Alpha* (Figura 2.13), utilizando, somente 2 (duas) lixas, nomeadamente a P80 e a P240. Após terminado o polimento, isto é, quando se verifica um efeito espelhado nas amostras, observou-se as mesmas no microscópio *Olympus CX40* (Figura 2.14-a), seguindo, posteriormente, para o *software ImageJ* por forma a efetuar a medição dos parâmetros geométricos.



Figura 2.13: Equipamento responsável pelo polimento das amostras.

Na Figura 2.14 é possível verificar não só o equipamento utilizado para a observação dos cordões de soldadura, como também o próprio cordão com os parâmetros mencionados anteriormente, estando a altura representada pela letra (A), a largura pela letra (B) e a penetração pela letra (C).

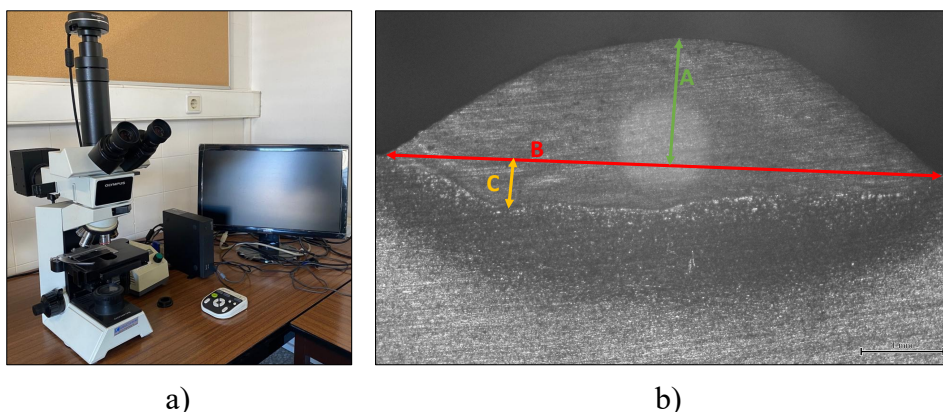


Figura 2.14: Macro Geometria: (a) Observação do cordão ao microscópio; (b) Geometria do cordão.

2.2.3. Planeamento de Experiências

Tendo em conta um elevado número quer de parâmetros, quer de combinação de valores, e por forma a minimizar não só o tempo envolvido no processo, mas também o custo associado a este, o planeamento de experiências (DoE) tem tido um amplo crescimento, dada a possibilidade de minimizar os testes a realizar. O DoE caracteriza-se por ser uma ferramenta estatística, com uma abordagem sistemática, que realiza as experiências por forma a alcançar a condição que otimizará o processo [55,56]. Para realizar e analisar os resultados obtidos do planeamento de experiências recorreu-se ao *software Minitab*, sendo este responsável pela criação do DoE, como se verificará mais adiante.

Para Montgomery [57,58] o planeamento de experiências é composto por 7 (sete) etapas, sendo estes o reconhecimento e explicação do problema, o objetivo do planeamento de experiências, a seleção da variável de resposta, a seleção dos fatores, bem como os seus níveis, o planeamento de experiências e por fim a listagem das interações.

O problema da presente Dissertação centra-se na utilização de um novo material, um arame tubular com fluxo, que não tem tido uma utilização considerável no FA, pelo que se tenciona encontrar os parâmetros, e respetivos valores, ideais à sua utilização, concluindo ainda as vantagens que esta utilização acarreta.

Relativamente ao objetivo, e tendo por base o intervalo de valores para os parâmetros anteriormente definidos, tentar-se-á prever o comportamento dos principais parâmetros geométricos, isto é, altura por camada (h), largura (w), penetração (p) e ondulação (W_a) e de 1 (um) parâmetro não geométrico, a energia do arco (AE). Os 5 (cinco) parâmetros anteriormente mencionados correspondem as variáveis de resposta do planeamento de experiências. No que diz respeito à seleção e níveis dos fatores foram 3 (três) os fatores em estudo, sendo estes a tensão [V], a velocidade de soldadura [TS] e, por último, a velocidade de alimentação do fio [WFS], optando-se, segundo *Verônica et al* [55] por escolher 2 (dois) níveis, o inferior e o superior, como é possível verificar na Tabela 2.6. Em relação ao planeamento de experiências, e como referido anteriormente, escolheu-se os fatores, os seus níveis e ainda o intervalo de valores de cada um dos destes, sendo possível verificar o mesmo na Tabela 2.6. As escolhas dos valores referentes aos 3 (três) fatores foram efetuadas tendo por base os testes realizados ao longo da presente Dissertação, sendo os valores escolhidos os considerados aptos.

Por último, e recorrendo, de um modo geral, ao *software Minitab* e, mais pormenorizadamente, ao *Box-Behnken*, foram obtidas 15 (quinze) deposições, estando as mesmas presentes na Tabela 2.7. O *Box-Behnken* é uma das inúmeras ferramentas do *Minitab* que se caracteriza pela obtenção do planeamento de experiências de uma forma aleatória, através dos extremos e dos pontos médios dos 3 (três) fatores presentes na Tabela 2.6.

Tabela 2.6: Fatores e níveis definidos para o planeamento de experiências.

Fatores	Níveis	
	Inferior	Superior
U [V]	21	23
TS [mm/min]	400	525
WFS [m/min]	4	5

Tabela 2.7: Deposições obtidas recorrendo ao software *Minitab*.

Deposição	U [V]	TS [mm/min]	WFS [m/min]
6	21	462,5	5
8	23	462,5	5
14	22	462,5	4,5
4	22	525	5
11	23	400	4,5
15	22	462,5	4,5
10	21	525	4,5
5	21	462,5	4
7	23	462,5	4
12	23	525	4,5
9	21	400	4,5
3	22	525	4
1	22	400	4
2	22	400	5
13	22	462,5	4,5

Com o planeamento de experiências já finalizado deu-se então início à obtenção das 15 (quinze) paredes de soldadura, presentes no Apêndice E, tendo as mesmas um comprimento de 130 mm e 10 (dez) camadas.

A obtenção dos valores referentes às variáveis de resposta iniciou-se pelo cálculo da energia do arco, através da aquisição dos dados referentes à tensão e à corrente, recorrendo a um sistema de aquisição em *LabVIEW*. A aquisição da energia do arco iniciou-se aquando da deposição da 4ª camada, durante 10 segundos, adquirindo cerca de 10000 pontos. Os gráficos referentes às tensões e às correntes de cada uma das deposições, bem como os valores das energias do arco, serão obtidos recorrendo a um código computacional em linguagem *Matlab*.

À semelhança do que já fora feito no capítulo 2.2.2, referente ao corte das paredes, repetiu-se todo o processo por forma a obter 3 (três) amostras da parede, sendo 1 (uma) do meio da parede e 2 (duas) a 30 mm das extremidades, obtendo assim valores representativos de toda a parede de soldadura.



Figura 2.15: Amostras da parede e restante parede.

Após cortar todas as paredes obtiveram-se 45 (quarenta e cinco) amostras que foram posteriormente polidas no equipamento *Phoenix Alpha*, o mesmo utilizado no subcapítulo 2.2.2.3 (Figura 2.13). De seguida, observaram-se as inúmeras amostras ao microscópio seguindo, posteriormente, para o *software ImageJ*, por forma a efetuar a medição dos parâmetros mencionados anteriormente, isto é, altura por camada, largura e penetração.

Por forma a estudar a ondulação das 15 (quinze) paredes de soldadura iniciou-se o processo pela digitalização das mesmas (Figura 2.16), recorrendo a um *scanner*.

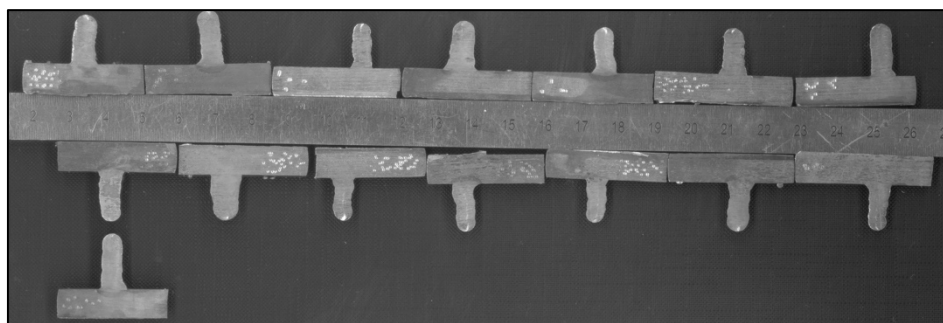


Figura 2.16: Digitalização das paredes.

De seguida, e através de um programa desenvolvido em linguagem *Matlab*, selecionou-se a parede que seria alvo de estudo e procedeu-se à calibração, tendo em conta uma escala de dimensão conhecida (Figura 2.17-a). Posteriormente, e através da técnica de perfilografia, será iluminada a região que se pretende observar, ou seja, a área referente à deposição do material (Figura 2.17-b).

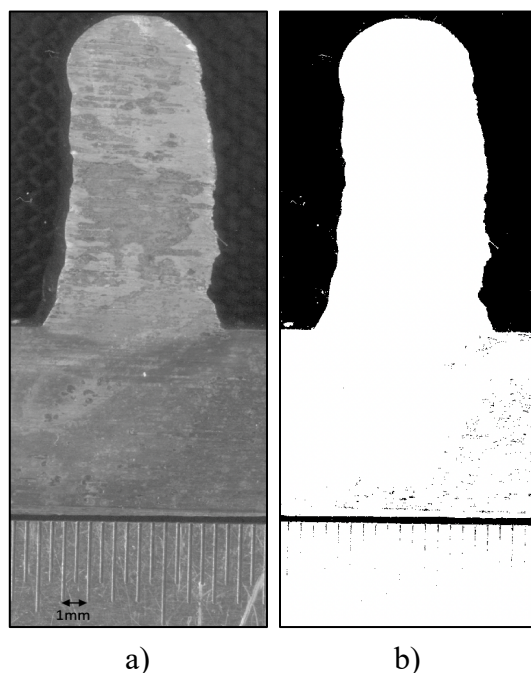


Figura 2.17: Ondulação: (a) Secção transversal com marca de escala; (b) Secção transversal com técnica perfilografia.

Seguidamente, procedeu-se à análise da Figura 2.17-b por forma a obter não só o perfil virtual da parede, como também o gráfico relativo à largura e altura da parede. Assim sendo, e tendo então os perfis das paredes, exportou-se esta análise para o *Excel* passando, de seguida, para um programa desenvolvido em linguagem *Matlab* por forma a obter os valores referentes à ondulação, tendo em consideração a linha média relativa ao contorno superior e ao contorno inferior.

Com a obtenção dos valores referentes às variáveis de resposta para as 15 (quinze) deposições procedeu-se à introdução dos valores no *software Minitab*, por forma a obter, num primeiro momento, as equações de regressão de superfície de resposta das variáveis de resposta em função das variáveis de entrada e, conseqüentemente, o valor referente ao coeficiente do R^2 , permitindo assim verificar o quão ajustada está a equação. Posteriormente, obteve-se a condição otimizada, representativa do conjunto de parâmetros de deposição ideais para o processo com o material em estudo, através do otimizador de resposta, onde se maximizaram os parâmetros altura por camada, largura e penetração e minimizou-se a ondulação e a energia do arco.

No âmbito da presente Dissertação, e presumindo que se está a soldar uma das anteparas do navio, o ideal seria uma soldadura com um volume elevado, ou seja, maximizar a altura por camada e a largura. De igual modo, é também relevante assegurar a estabilidade da solda, algo que pode ser garantido através da maximização da penetração. Por outro lado, e de modo a desperdiçar a menor quantidade de material possível, é de optar pela minimização da ondulação, uma vez que quanto maior for esta variável, maior é quantidade de material desperdiçado. Além de se garantir o mínimo desperdício possível é de igual modo imprescindível garantir o mínimo de colapsos tendo, por isto, optado pela minimização da energia do arco.

Após a obtenção da condição otimizada efetuou-se a deposição do material de adição por forma a proceder à análise microestrutural e mecânica da parede obtida através da condição otimizada.

2.3. Avaliação Microestrutural

O presente subcapítulo, avaliação microestrutural, tem como principal propósito avaliar não só os diferentes constituintes e o refinamento do grão ao longo da parede obtida através da condição otimizada, como também analisar a fratura dos provetes de tração, obtidas aquando da realização dos ensaios de tração. Contudo, e *à priori* de realizar a análise microestrutural, procedeu-se, num primeiro momento, ao corte da amostra da parede que seria analisada na vertente das microdurezas. Reiterando o que fora efetuado no subcapítulo 2.2.2.1, procedeu-se à preparação da resina, à sua desenformação (Figura 2.18), ao lixamento até a granulometria P2500, ao polimento, através da pasta abrasiva de diamante de 1 μm e, finalmente, ao ataque com uma solução de 5 % de Nital, por forma a revelar os constituintes e as fases presentes na microestrutura da parede.

Após o término do polimento efetuou-se, primeiramente, a medição das microdurezas e, seguidamente, à avaliação da microestrutura da parede, recorrendo a um microscópio Leica DMI 5000 M (Figura 2.19).

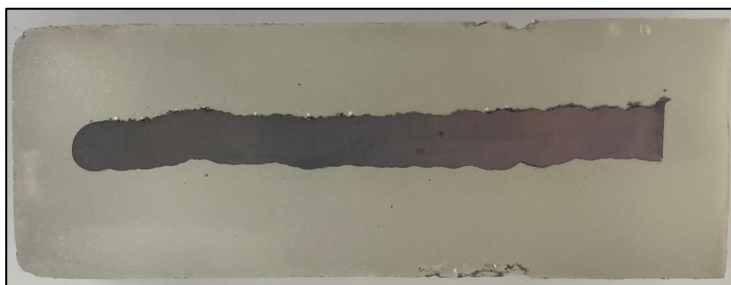


Figura 2.18: Resina com amostra obtida através da condição otimizada.

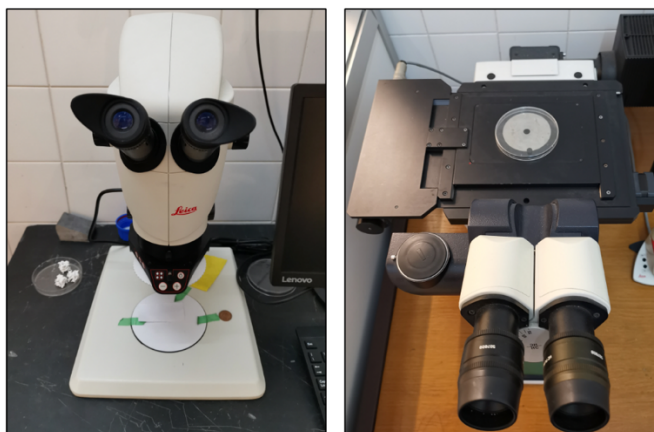


Figura 2.19: Microscópio Leica DMI 5000 M utilizado para observação da microestrutura.

No capítulo referente às discussões de resultados não só serão apresentadas todas as imagens da microestrutura da parede, obtidas através do microscópio Leica, como também será feita a análise das mesmas, relacionando os constituintes visualizados e o refinamento do grão com a dureza e a taxa de arrefecimento. Contudo, e *à priori* de efetuar a análise, é imprescindível compreender não só o aspeto de cada um dos possíveis constituintes da microestrutura, como também a dureza associada a cada um destes. Considerando os possíveis constituintes, todos eles apresentam diferenças, seja de dureza, de tamanho e forma de grão ou a cor que apresentam na microestrutura.

Tanto a ferrite como a martensite apresentam grão de cor branca, sendo a diferença destas o tamanho do grão, uma vez que a ferrite tem grão de tamanho reduzido, enquanto a martensite apresenta grão de tamanho superior ao da ferrite, sob a forma de agulha. Por outro lado, e relativamente à austenite, esta apresenta grão de cor preta e tamanho de grão bastante elevado, ao contrário dos constituintes referidos anteriormente.

No que concerne à transformação da martensite esta é obtida através do arrefecimento célere da austenite, provocando não só distorções na estrutura cristalina da mesma, como também impedimento do movimento das discordâncias. Relativamente à austenite, esta inicia o seu processo de transformação em martensite, quando se verifica uma velocidade de arrefecimento extremamente elevada, contudo, caso não se atinga a temperatura final do processo a austenite permanece instável, sendo a austenite não transformada em martensite intitulada de austenite residual. No que diz respeito à dureza, esta tem uma relação de proporcionalidade direta com a dificuldade de movimento de deslocações, contudo, tem de igual modo uma relação com a percentagem de carbono nas ligas à base de ferro. Os átomos de carbono, e considerando a estrutura cristalina da martensite, vão ocupar os espaços vazios (interstícios) que outrora estavam vazios resultando, conseqüentemente, num impedimento de movimento das discordâncias, o que provocará um aumento dos valores de dureza [59,60].

De igual modo inserido no subcapítulo referente à avaliação microestrutural, como já fora referido, a análise das fraturas obtidas em virtude dos ensaios de tração, que serão realizados *à posteriori*, será efetuada recorrendo a um microscópio eletrónico de varrimento (MEV) (Figura 2.20) que, através da passagem de um feixe de eletrões no material, dar-nos-á a imagem correspondente à superfície da amostra, neste caso, à superfície de fratura.



Figura 2.20: Microscópio Eletrónico de Varrimento.

2.4. Avaliação das Propriedades Mecânicas

O presente capítulo, avaliação das propriedades mecânicas, tem como finalidade analisar não só a microdureza, que foi realizada no subcapítulo anterior, como também analisar as propriedades obtidas através dos ensaios de tração. Por forma a obter os provetes para os ensaios de tração procedeu-se à maquinagem da parede (Figura 2.21) recorrendo à fresadora *Enrique Holke*, tendo esta como função retirar o excesso de material, obtendo os acabamentos desejados. À *posteriori*, recorreu-se ao *software SolidWorks* por forma a esboçar os provetes para o ensaio de tração, encontrando-se na Figura 2.22 as dimensões dos provetes.



Figura 2.21: Maquinagem da parede.

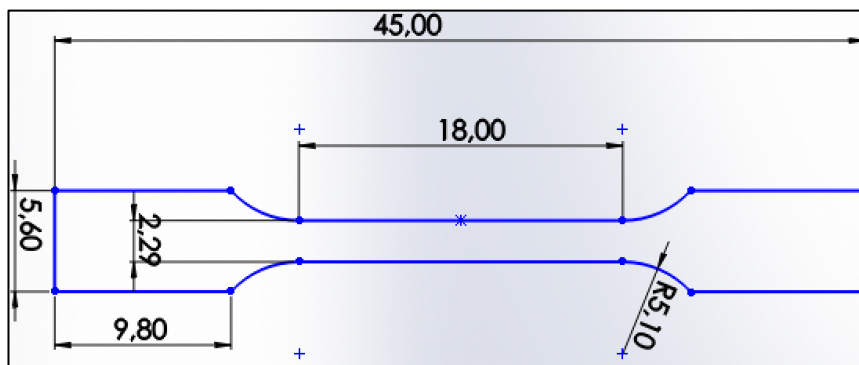


Figura 2.22: Dimensões dos provetes de tração.

Sendo assim, e fazendo uso da ferramenta *SolidCAM*, obteve-se o código G que permite a maquinação da parede, por parte do Centro de Maquinagem - HAAS Super Mini Mill 2. Na figura que se segue é possível verificar o centro de maquinagem a realizar a operação de maquinação da parede (Figura 2.23-a) e a parede já finalizada, com os respectivos provetes de tração (Figura 2.23-b).

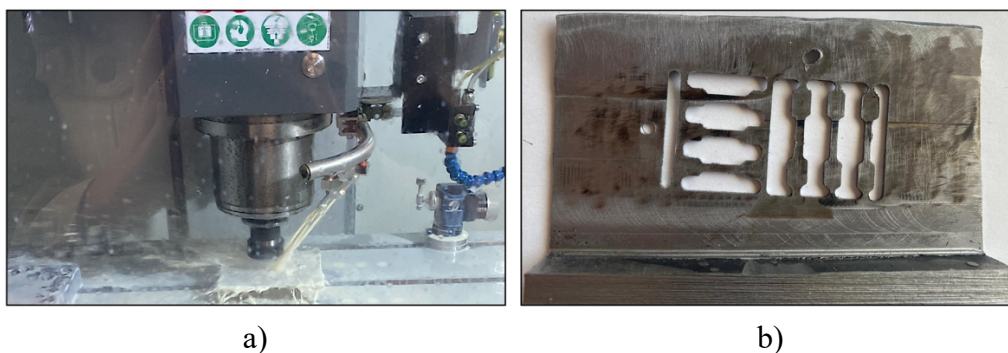


Figura 2.23: Obtenção dos provetes: (a) Maquinação da parede; (b) Parede finalizada.

Aquando do processo de corte dos provetes de tração ocorreu um erro, resultando no descarte de 2 (dois) provetes, um de direção horizontal (direção longitudinal de deposição) e o segundo referente à direção vertical (direção transversal de crescimento).

O ensaio de tração consiste na aplicação de uma força de tração num corpo de prova (proвете), resultando no alongamento do mesmo até ocorrer a fraturação. Este ensaio tem como propósito avaliar e verificar não só as propriedades mecânicas, como também o comportamento do material sob determinadas condições.

Os ensaios de tração foram realizados no Centro de Investigação de Materiais (CENIMAT) utilizando um *AUTOGRAPH SHIMADZU*, estando presente na figura que se segue não só o equipamento utilizado, como também o provete em ensaio.

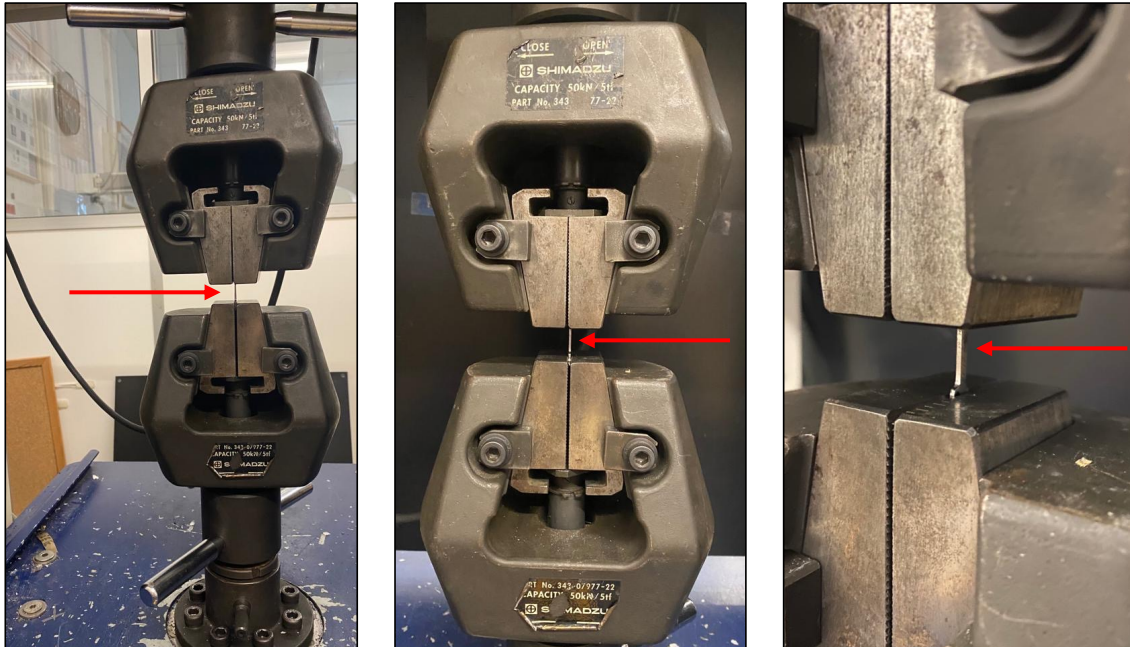


Figura 2.24: Ensaio de tração com o AUTOGRAPH SHIMADZU.

Após realizar os 4 (quatro) ensaios de tração, 2 (dois) verticais e 2 (dois) horizontais (Figura 2.25) obter-se-á os gráficos da tensão (σ) em função da deformação (ϵ), tendo em conta os respetivos ficheiros *txt*.



Figura 2.25: Provete após ensaio de tração.

Como já fora referido, os ensaios de tração têm como finalidade não só obter a relação entre a tensão de tração e a deformação, em forma de gráfico, como também a ductilidade do material.

Sendo assim, considera-se imprescindível compreender não só as diferentes fases do gráfico tensão *versus* deformação, como também de que maneira é possível identificar a ductilidade [61].

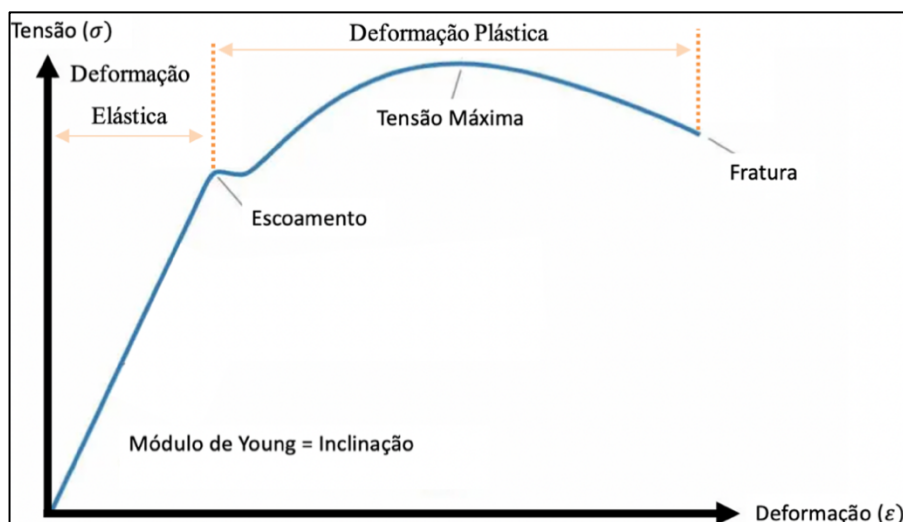


Figura 2.26: Gráfico da Tensão versus Deformação.

O Módulo de *Young* é a razão entre a tensão aplicada e a deformação elástica resultante, traduzindo-se na rigidez do material. Além disto, o seu valor é obtido através do cálculo da inclinação da reta. O limite de escoamento é a tensão máxima que pode ser aplicada ao provete sem este sofrer uma deformação perdurável, ou seja, se a tensão aplicada for superior ao limite de escoamento o provete fica permanentemente deformado. Relativamente à tensão máxima está é a máxima tensão aplicada ao provete durante o ensaio de tração. Por fim, e no que diz respeito à tensão de fratura, é a tensão em que ocorre a fratura do provete de tração.

No que concerne à deformação esta pode ser calculada recorrendo à equação (2.10), sendo esta caracterizada pelo rácio entre a variação de comprimento do provete (ΔL) e o comprimento útil original (L_o) [63].

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} \quad (2.10)$$

A ductilidade representa a quantidade de energia absorvida pelo material ao longo do ensaio de tração, até ao momento de fratura, podendo ser verificada através da área presente abaixo da curva do gráfico. Quanto maior for a área referente à energia absorvida, maior será a ductilidade do material.

Na equação (2.11) está pormenorizado o cálculo da tensão, sendo esta obtida através do rácio da força de tração aplicada no provete, em kN , e da área da seção transversal do provete antes da aplicação da força de tração, em mm .

$$\sigma = \frac{F}{A_o} \quad (2.11)$$

Alguns trabalhos [63,64] afirmam que nos provetes de direção vertical, em comparação com os provetes horizontais, se verifica menores valores de resistência à tração, contudo, maiores valores de deformação. A principal justificação para a presente situação prende-se com a presença de martensite na zona de análise, contudo, e tendo em conta esta Dissertação, a zona de análise foi a região central, onde a quantidade de martensite é bastante reduzida, como será possível verificar através da discussão de resultados do subcapítulo 3.4. Além disto, verifica-se uma disparidade de valores referente aos parâmetros da resistência mecânica e da deformação, tendo em consideração se o provete é relativo à direção horizontal ou vertical. Esta discrepância de valores pode ser justificada através do fenómeno da anisotropia, que se caracteriza pela variação das propriedades dos materiais, de acordo com a direção onde são medidos, sendo esta uma característica inerente à produção de peças através das técnicas de fabrico. A diferença de valores nas direções horizontais e verticais pode ser justificada tendo em conta não só uma possível presença de defeitos entre camadas, como também a deficiente ligação das mesmas.

3. Discussão de Resultados

No presente capítulo, referente às Discussões de Resultados, não só se apresentará os resultados obtidos dos inúmeros testes e ensaios efetuados ao longo do procedimento experimental, na tentativa de verificar a aplicabilidade do material de adição com fluxo rutílico, como também a discussão dos resultados obtidos, verificando assim a possibilidade de empregar este material nos navios da Classe *Viana do Castelo*.

3.1. Restrições / Limitações do Processo

Como referido no subcapítulo 2.2.1, a escolha quer dos parâmetros, quer dos valores do processo teve como ponto de partida o *Data Sheet* do fabricante, contudo, e após a deposição do material de adição observou-se os cordões e optou-se por alterar alguns dos parâmetros inicialmente utilizados, nomeadamente a tensão e a velocidade de alimentação do fio, estando as condições finais presentes na tabela que se encontra no Apêndice A. Assim sendo, e por forma a facilitar a análise do Apêndice A, referente à classificação da aparência dos diversos cordões de soldadura, elaborou-se 3 (três) gráficos para diferentes valores de *WFS*.

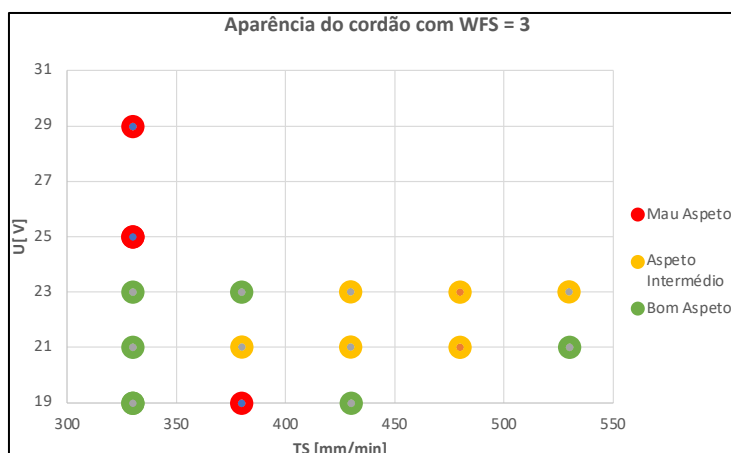


Figura 3.1: Aparência dos cordões obtidos com $WFS = 3$.

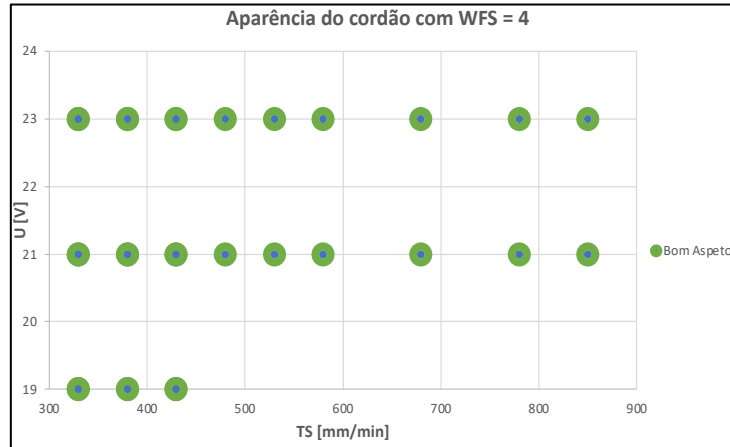


Figura 3.2: Aparência dos cordões obtidos com WFS = 4.

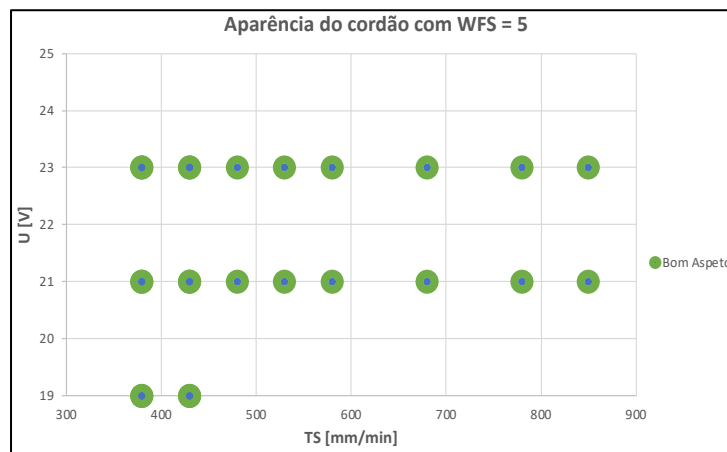


Figura 3.3: Aparência dos cordões obtidos com WFS = 5.

Analisando as figuras anteriores é possível verificar que somente nas condições $WFS = 3 \text{ m/min}$ e $WFS = 6 \text{ m/min}$ se obteve cordões com aspeto mau e aspeto intermédio, resultando assim no descarte das 10 (dez) condições que tinham estes valores para WFS , uma vez que nesta situação as condições que resultaram num bom aspeto de cordão são bastantes reduzidas, o que originaria uma limitação do processo. Observando o Anexo B, mais pormenorizadamente a tabela referente aos valores dos vários parâmetros de soldadura, é possível concluir que o valor máximo de WFS utilizado ficou bastante aquém do valor sugerido pelo fabricante, podendo tal ser justificado tendo em consideração a roldana utilizada neste processo, isto é, a roldana montada no equipamento WAAM é lisa, contudo, para o processo FCAW, o ideal seria uma roldana recartilhada, por forma a prender o material de adição.

Observando os restantes 44 (quarenta e quatro) cordões e analisando, detalhadamente, o TS , é possível verificar que todas elas resultaram num bom aspeto de cordão, pelo que se priorizou a produtividade, excluindo assim as condições que apresentam um baixo valor de velocidade de soldadura, isto é, TS de 330, 380 e 430 mm/min . Além disto, e como verificado no subcapítulo referente aos Objetivos da Dissertação, um dos objetivos seria verificar a influência do caudal do gás de proteção nos cordões, e respetivas paredes de soldadura, pelo que se decidiu descartar todas as condições que tinham um elevado valor de velocidade de soldadura, ou seja, TS de 780 e 850 mm/min , uma vez que quanto maior for o valor da velocidade de soldadura maior é a dificuldade sentida pelo gás de proteção para proteger o cordão havendo, conseqüentemente, uma maior probabilidade do mesmo sofrer oxidação por parte das partículas da atmosfera. No que concerne ao parâmetro da tensão, e observando a tabela presente no Apêndice A, optou-se por descartar os valores de tensão que apresentavam um mau aspeto de cordão, sendo estes 19, 25 e 29 V , tendo os últimos 2 (dois) valores resultado na soldadura do bico.

Assim sendo, e com base no que foi referido e verificado anteriormente, é possível admitir a aplicabilidade e adaptação do processo WAAM na técnica de deposição FCAW, sendo a sua faixa operacional a seguinte: $WFS = [4 - 5] m/min$, $TS = [480 - 680] mm/min$ e $U = [21 - 23] V$.

3.2. Influência da Variação do Caudal do Gás de Proteção e da Velocidade de Soldadura

Como referido no ponto anterior, um dos principais objetivos da presente Dissertação é verificar a influência do caudal do gás de proteção nas paredes de soldadura, averiguando assim a possibilidade de diminuir o valor do mesmo e, conseqüentemente, tornar o processo mais barato. As tabelas que se seguem apresentam os valores de massa medidos nos 2 (dois) ambientes distintos, bem como a densidade calculada e os respetivos valores de desvio padrão e incerteza associados.

Além disto, e por forma a facilitar a análise dos resultados presentes nas tabelas, representou-se os mesmos em 2 (dois) gráficos, estando presente nos mesmos os valores de densidade das amostras, o volume de vazios e a incerteza associada a cada um destes.

Tabela 3.1: Medição das massas em ambiente seco para variação do caudal.

Amostra	Medição a Seco [mg]			Média	Desvio Padrão	Incerteza
	1	2	3			
18 l/min	3019,1	3019,6	3019,8	3,020	0,00036	0,0002
15 l/min	4123,9	4124,2	4123,7	4,124	0,00025	0,0001
10 l/min	3536,6	3536,9	3536,0	3,537	0,00046	0,0003
5 l/min	4784,5	4784,5	4784,8	4,785	0,00017	0,0001
3 l/min	1131,9	1131,5	1131,5	1,132	0,00023	0,0001
0 l/min	3160,0	3160,3	3159,8	3,160	0,00025	0,0001
HF - WAAM ER90 HSLA Steel	2850,2	2850,6	2850,3	2,850	0,00021	0,0001
WAAM ER90 HSLA Steel	6743,8	6743,7	6743,9	6,744	0,00010	0,0001
Substrato	4099,2	4101,0	4099,2	4,100	0,00104	0,0006

Tabela 3.2: Medição das massas em ambiente seco e cálculo da densidade e volume de vazios para diferentes valores de caudal.

Amostra	Medição Imerso [mg]			Média	Desvio Padrão	Incerteza	Densidade da Amostra	Incerteza da Densidade	Volume de Vazios	Incerteza do Volume de Vazios
	1	2	3							
18 l/min	2705,0	2705,4	2705,0	2,705	0,00023	0,00013	7,648	0,006	0,66%	0,07%
15 l/min	3693,6	3694,2	3693,3	3,694	0,00046	0,00026	7,632	0,005	0,86%	0,07%
10 l/min	3167,7	3167,4	3167,5	3,168	0,00015	0,00009	7,631	0,005	0,87%	0,07%
5 l/min	4285,1	4284,0	4283,6	4,284	0,00078	0,00045	7,613	0,007	1,10%	0,09%
3 l/min	1008,8	1008,4	1008,5	1,009	0,00021	0,00012	7,321	0,010	4,90%	0,13%
0 l/min	2822,6	2823,6	2823,4	2,823	0,00053	0,00031	7,470	0,007	2,97%	0,10%
HF - WAAM ER90 HSLA Steel	2552,2	2552,0	2552,9	2,552	0,00047	0,00027	7,616	0,007	1,07%	0,10%
WAAM ER90 HSLA Steel	6038,1	6038,1	6038,6	6,038	0,00029	0,00017	7,610	0,002	1,14%	0,02%

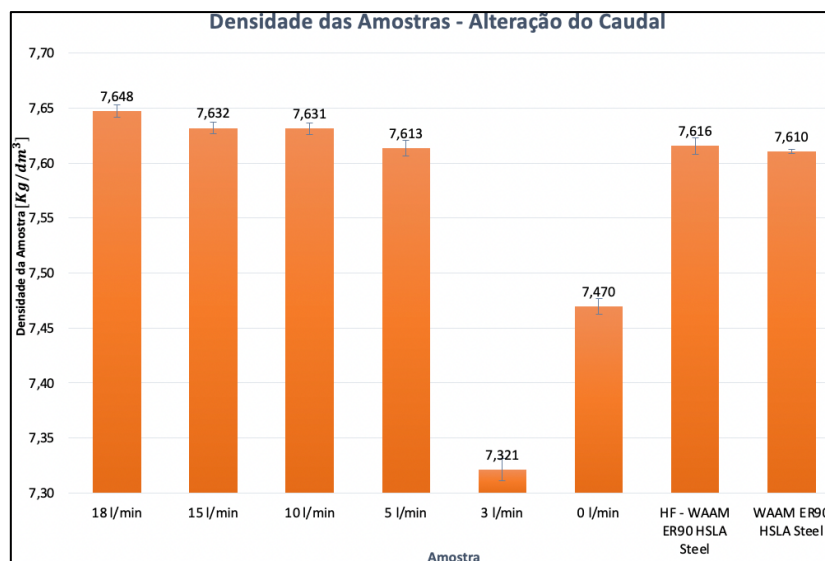


Figura 3.4: Densidade das amostras quando há variação do caudal.

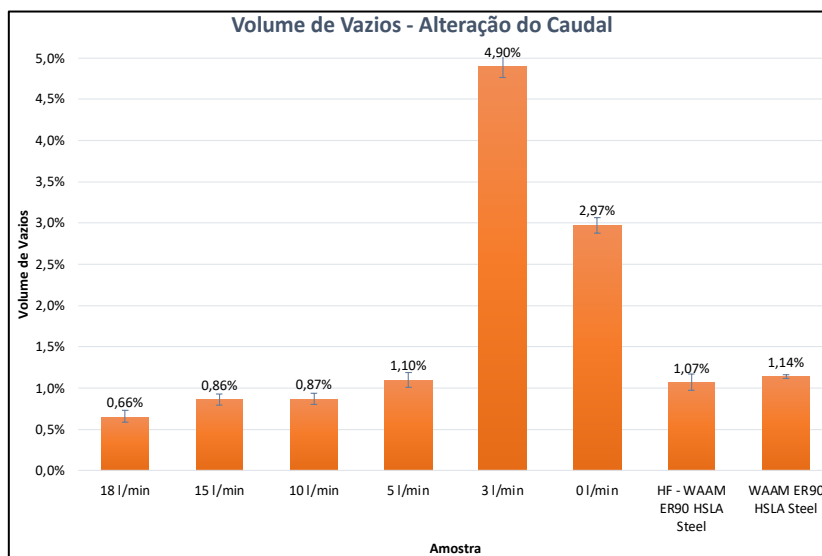


Figura 3.5: Volume de vazios quando há variação do caudal.

Analisando a Figura 3.4, e tendo em conta o princípio associado à densidade da amostra, isto é, considerando que temos amostras de igual volume, mas com valores de massas diferentes, é correto afirmar que a amostra que tiver maior valor de massa associada tem, conseqüentemente, menor número de espaços vazios e de poros logo uma menor falta de fusão, sendo por isso considerado ideal amostras com elevado valor de densidade associada. Assim sendo, descartaram-se, *à priori*, os caudais de 0 e de 3 l/min. Tendo em conta a teoria associada ao volume de vazios é possível afirmar que quanto maior for o valor de vazios maior será o valor associado às porosidades e à falta de fusão. É importante reiterar que o volume de vazios somente diz respeito aos defeitos interiores, uma vez que os vazios exteriores são preenchidos pela acetona. Analisando somente os valores de caudal de 5, 10, 15 e de 18 l/min é possível verificar que à medida que este valor aumenta há uma melhoria considerável das condições para obtenção das paredes, quando comparadas com as paredes de ER-90S obtidas com um valor de caudal de 15 l/min. Observando o gráfico presente na Figura 3.5 é possível verificar que o valor referente ao volume de vazios quando o caudal do gás de proteção é de 5 l/min é bastante próximo dos valores de referência, isto é, das paredes obtidas com ER-90S e fabricadas pelo processo WAAM e HF - WAAM.

Este resultado revela-se bastante promissor, uma vez que permite uma redução considerável do caudal, cerca de 72% quando comparado com o caudal de 18 l/min, beneficiando assim os aspetos de produtividade sem comprometer os níveis de porosidade.

Paralelamente, e tendo em conta o objetivo referente à verificação da influência da variação da velocidade de soldadura nas paredes de soldadura, efetuou-se, similarmemente ao que fora feito anteriormente, a medição das massas e o cálculo das densidades e do volume de vazios, estando na Tabela 3.3 e na Tabela 3.4 os valores respetivos. À semelhança do que fora feito anteriormente, e por forma a facilitar a análise dos resultados presentes nas tabelas, representou-se os mesmos em 2 (dois) gráficos.

Tabela 3.3: Medição das massas em ambiente seco para variação da velocidade de soldadura.

Amostra	Medição a Seco [mg]			Média	Desvio Padrão	Incerteza
	1	2	3			
Ts=475	4873,6	4873,5	4873,8	4,874	0,00015	0,00009
Ts=500	2289,0	2289,2	2289,4	2,289	0,00020	0,00012
Ts=525	3032,9	3033,3	3033,1	3,033	0,00020	0,00012
Ts=550	3672,6	3673,7	3673,0	3,673	0,00056	0,00032
Ts=650	1743,0	1742,6	1742,7	1,743	0,00021	0,00012

Tabela 3.4: Medição das massas em ambiente imerso e cálculo da densidade e do volume de vazios para variação da velocidade de soldadura.

Amostra	Medição Imerso [mg]			Média	Desvio Padrão	Incerteza	Densidade da Amostra	Incerteza da Densidade	Volume de Vazios	Incerteza do Volume de Vazios
	1	2	3							
Ts=475	4366,3	4365,1	4366,6	4,366	0,00079	0,00046	7,644	0,007	0,70%	0,09%
Ts=500	2047,9	2048,7	2048,7	2,048	0,00046	0,00027	7,570	0,009	1,66%	0,12%
Ts=525	2715,7	2715,6	2714,6	2,715	0,00061	0,00035	7,599	0,009	1,29%	0,11%
Ts=550	3248,9	3249,2	3248,7	3,249	0,00025	0,00015	6,895	0,005	10,44%	0,07%
Ts=650	1541,1	1542,0	1541,7	1,542	0,00046	0,00026	6,898	0,010	10,40%	0,13%

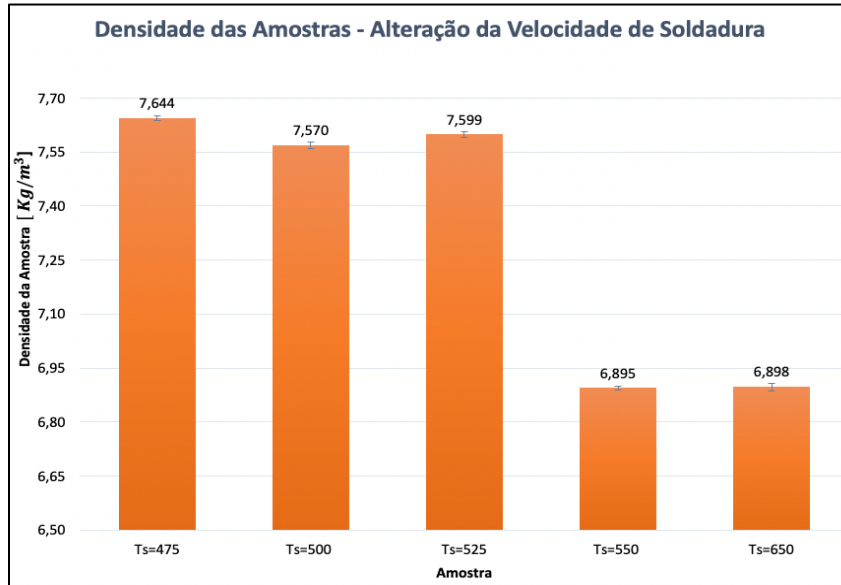


Figura 3.6: Densidade das amostras quando há variação da velocidade de soldadura.

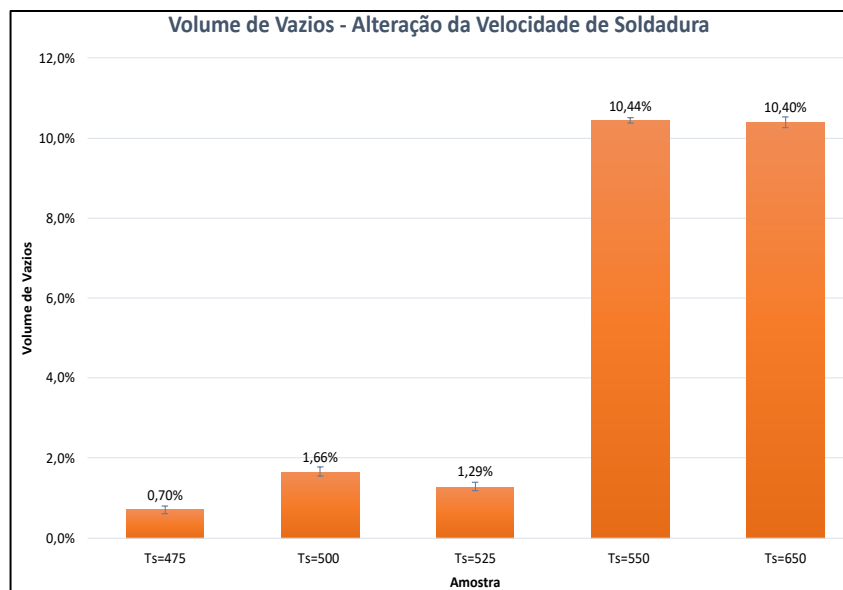


Figura 3.7: Volume de vazios quando há variação da velocidade de soldadura.

Analisando ambos os gráficos e tendo em conta a teoria anteriormente fundamentada, relativamente ao princípio associado à densidade, descarta-se a velocidade de soldadura de 550 e 650 mm/min , uma vez que ambos os valores apresentam um baixo valor de densidade, contudo, um elevado valor de volume de vazios, o que compromete a estrutura final das peças fabricadas por este processo.

Como verificado no subcapítulo 2.2.2.2, e considerando uma situação ideal, a variação do caudal do gás de proteção pode influenciar diretamente o valor das microdurezas, devido à oxidação do cordão, isto é, quanto menor fosse o caudal do gás de proteção, maior seria o valor referente à dureza do material. Contudo, tal situação não se verificou nos resultados obtidos uma vez que o material de adição tem fluxo, o que promove o aumento da proteção do banho de fusão. Nas figuras que se seguem é possível verificar os valores de microdurezas dos 4 (quatro) valores de caudal do gás de proteção, no centro e na extremidade da parede.

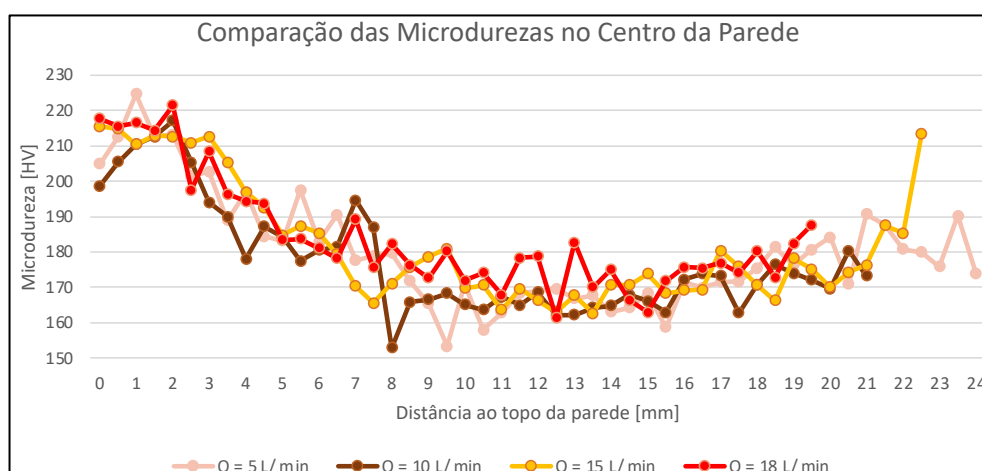


Figura 3.8: Valores de Microdurezas para diferentes valores de caudal (Centro da Parede).

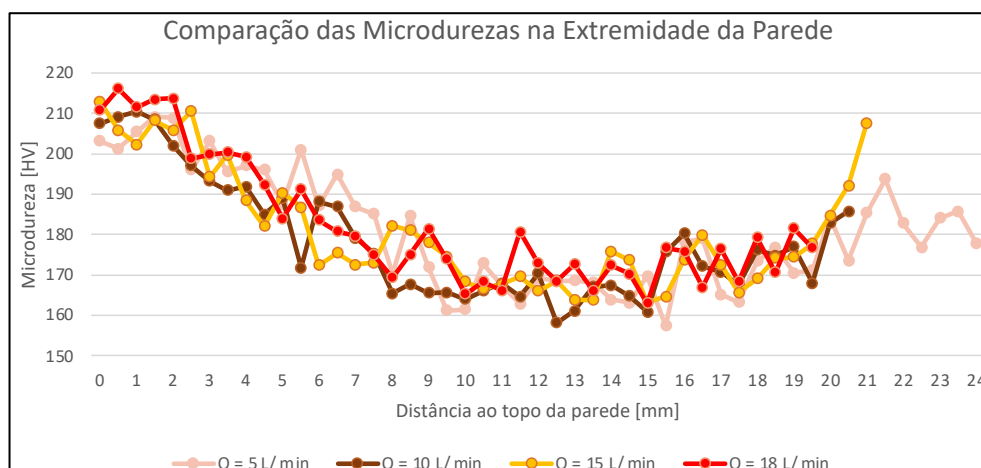


Figura 3.9: Valores de microdurezas para diferentes valores de caudal (Extremidade da Parede).

Analisando os gráficos presentes na Figura 3.8 e na Figura 3.9, e tendo presente o que fora anteriormente mencionado, é possível verificar que não subiste qualquer relação entre o caudal do gás de proteção e os valores de microdurezas, tal como seria expectável, uma vez que o processo tem um fluxo rutilico que oferece a proteção necessária.

Relativamente à velocidade de soldadura, e como referido no subcapítulo 2.2.2.2, não se tem conhecimento sobre uma possível relação entre os valores de TS e os valores de microdurezas, tendo os ensaios de microdureza sido realizados com o intuito de verificar a possível existência de efeitos consideráveis. Nas figuras que se seguem é possível verificar os valores de microdurezas dos 3 (três) valores de velocidade de soldadura, no centro e na extremidade da parede.

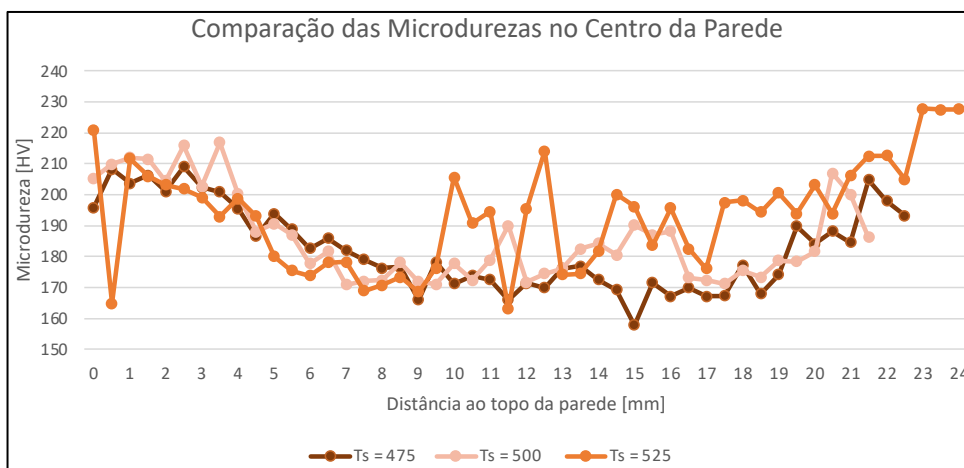


Figura 3.10: Microdurezas para diferentes valores de velocidade de soldadura (Centro da Parede).

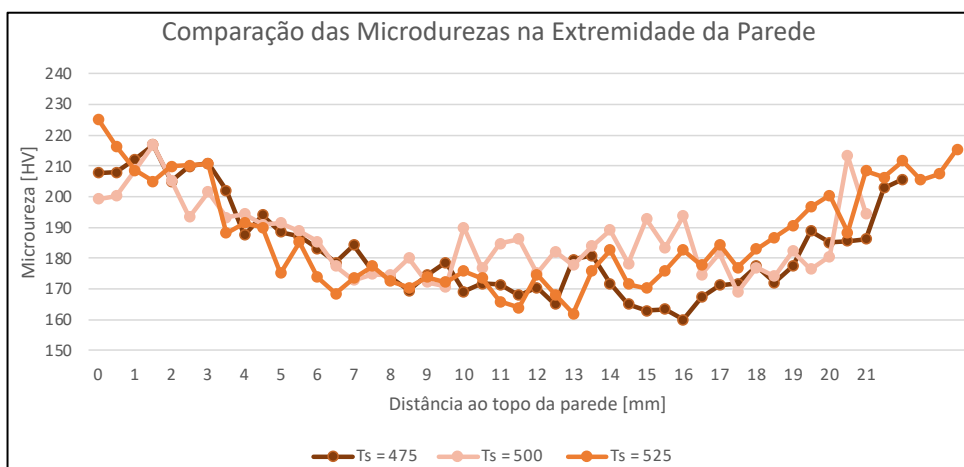


Figura 3.11: Microdurezas para diferentes valores de velocidade de soldadura (Extremidade da Parede).

Analisando os gráficos presentes na Figura 3.10 e na Figura 3.11 é possível observar que, à semelhança da situação verificada anteriormente, em relação à variação do caudal, não se verifica qualquer relação entre a velocidade de soldadura e os valores de microdureza, como era de esperar.

Como referido no subcapítulo referente à Análise Macro Geométrica, a variação do caudal do gás de proteção influencia a quantidade de calor imposto no banho de fusão uma vez que ao aumentar o caudal haverá, consequentemente, maior quantidade de CO_2 pelo que o banho de fusão ficará com mais energia. Sendo assim, e à medida que se aumenta o valor referente ao caudal do gás de proteção, espera-se não só um menor valor de altura, uma vez que quanto maior for a quantidade de calor imposta maior será a quantidade de material de adição que resvala, como também maiores valores de largura e penetração. Nas tabelas que se seguem encontram-se apresentados os valores referentes à altura, largura e penetração das 3 (três) amostras por cordão (A, B e C). À semelhança do que já fora feito, e por forma a facilitar a análise dos resultados presentes nas tabelas, representar-se-á cada um dos parâmetros geométricos (altura, largura e penetração) num gráfico, estando presente nos mesmos a incerteza associada a cada um destes

Tabela 3.5: Medição de altura para diferentes valores de caudal.

		Altura [mm]					
	Amostras	Medição1	Medição2	Medição3	Média	Desvio Padrão	Incerteza
	3L/min- A	1,737	1,754	1,740	1,744	0,009	0,00520
	3L/min- B	1,736	1,740	1,757	1,745	0,011	0,00635
	3L/min- C	1,480	1,477	1,484	1,48	0,003	0,00173
	Média 3L/min	1,651	1,657	1,660	1,656	0,005	0,00273
	5L/min- A	1,447	1,431	1,431	1,436	0,01	0,00577
	5L/min- B	1,661	1,648	1,647	1,652	0,008	0,00462
	5L/min- C	1,507	1,480	1,495	1,494	0,014	0,00808
	Média 5L/min	1,538	1,520	1,524	1,527	0,010	0,00561
	10L/min- A	1,325	1,325	1,330	1,327	0,003	0,00173
	10L/min- B	1,579	1,571	1,591	1,581	0,01	0,00577
	10L/min- C	1,582	1,595	1,587	1,588	0,007	0,00404
	Média 10L/min	1,495	1,497	1,503	1,500	0,004	0,00222
	15L/min- A	1,377	1,39	1,394	1,387	0,009	0,00520
	15L/min- B	1,334	1,313	1,333	1,327	0,012	0,00693
	15L/min- C	1,523	1,514	1,519	1,519	0,004	0,00231
	Média 15L/min	1,411	1,406	1,415	1,411	0,005	0,00280
	18L/min- A	1,226	1,232	1,234	1,230	0,004	0,00231
	18L/min- B	1,425	1,452	1,438	1,438	0,014	0,00808
	18L/min- C	1,427	1,435	1,452	1,438	0,013	0,00751
	Média 18L/min	1,359	1,373	1,375	1,369	0,008	0,00486

Tabela 3.6: Medição de largura para diferentes valores de caudal.

		Largura [mm]					
	Amostras	Medição1	Medição2	Medição3	Média	Desvio Padrão	Incerteza
	3L/min- A	5,183	5,212	5,238	5,211	0,028	0,01617
	3L/min- B	6	6,004	5,987	5,997	0,009	0,00520
	3L/min- C	4,939	4,981	5,011	4,977	0,036	0,02078
Média 3L/min		5,374	5,399	5,412	5,395	0,019	0,01115
	5L/min- A	6,225	6,251	6,294	6,256	0,035	0,02021
	5L/min- B	6,376	6,397	6,418	6,397	0,021	0,01212
	5L/min- C	6,547	6,534	6,526	6,536	0,011	0,00635
Média 5L/min		6,383	6,394	6,413	6,396	0,015	0,00875
	10L/min- A	6,578	6,607	6,578	6,588	0,017	0,00981
	10L/min- B	6,482	6,478	6,505	6,488	0,015	0,00866
	10L/min- C	6,584	6,583	6,571	6,579	0,007	0,00404
Média 10L/min		6,548	6,556	6,551	6,552	0,0040	0,00232
	15L/min- A	5,942	5,933	5,971	5,949	0,020	0,01155
	15L/min- B	6,482	6,501	6,529	6,504	0,024	0,01386
	15L/min- C	6,47	6,449	6,475	6,465	0,0014	0,00081
Média 15L/min		6,298	6,294	6,325	6,306	0,017	0,00967
	18L/min- A	7,221	7,172	7,2	7,198	0,024	0,01386
	18L/min- B	7,784	7,777	7,784	7,782	0,004	0,00231
	18L/min- C	7,251	7,276	7,25	7,259	0,015	0,00866
Média 18L/min		7,419	7,527	7,411	7,413	0,064	0,03723

Tabela 3.7: Medição de penetração para diferentes valores de caudal.

		Penetração [mm]					
	Amostras	Medição1	Medição2	Medição3	Média	Desvio Padrão	Incerteza
	3L/min- A	0,579	0,592	0,579	0,583	0,007	0,00404
	3L/min- B	0,417	0,434	0,438	0,43	0,011	0,00635
	3L/min- C	0,618	0,643	0,639	0,634	0,014	0,00808
Média 3L/min		0,538	0,556	0,552	0,549	0,010	0,00553
	5L/min- A	0,545	0,553	0,528	0,542	0,013	0,00751
	5L/min- B	0,591	0,6	0,596	0,596	0,004	0,00231
	5L/min- C	0,587	0,582	0,577	0,582	0,005	0,00289
Média 5L/min		0,574	0,578	0,567	0,573	0,006	0,00332
	10L/min- A	0,596	0,592	0,596	0,595	0,002	0,00115
	10L/min- B	0,677	0,674	0,641	0,664	0,02	0,01155
	10L/min- C	0,62	0,628	0,615	0,621	0,007	0,00404
Média 10L/min		0,631	0,631	0,617	0,627	0,008	0,00461
	15L/min- A	0,629	0,646	0,633	0,636	0,009	0,00520
	15L/min- B	0,671	0,657	0,675	0,667	0,01	0,00577
	15L/min- C	0,688	0,685	0,69	0,688	0,003	0,00173
Média 15L/min		0,663	0,663	0,666	0,664	0,002	0,00111
	18L/min- A	0,801	0,807	0,814	0,807	0,007	0,00404
	18L/min- B	0,519	0,507	0,498	0,508	0,011	0,00635
	18L/min- C	0,76	0,743	0,751	0,751	0,008	0,00462
Média 18L/min		0,693	0,686	0,688	0,689	0,004	0,00230

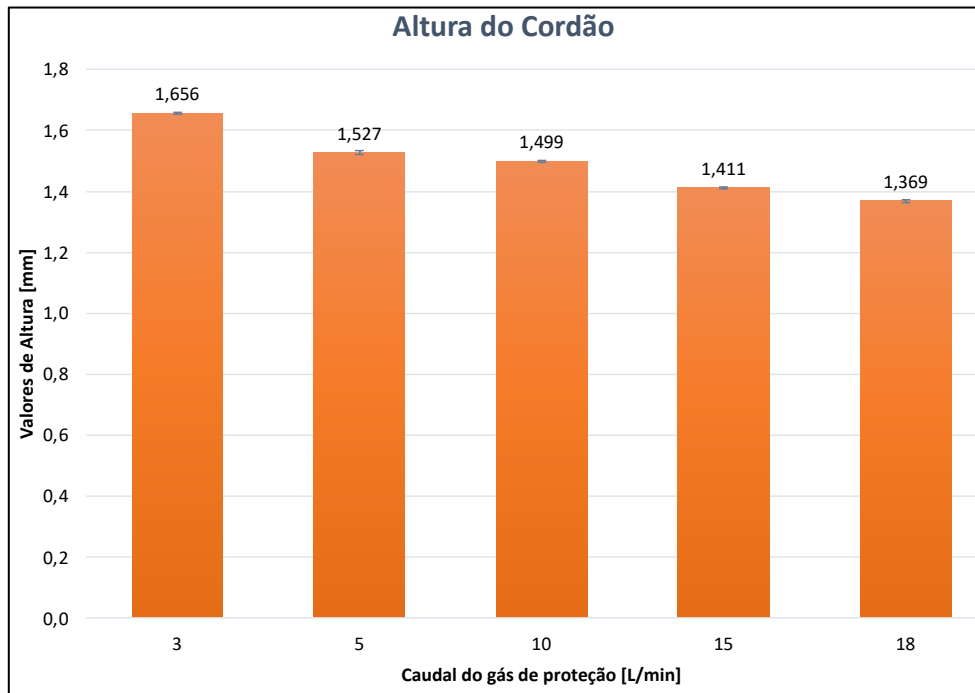


Figura 3.12: Altura do cordão para diferentes valores de caudal.

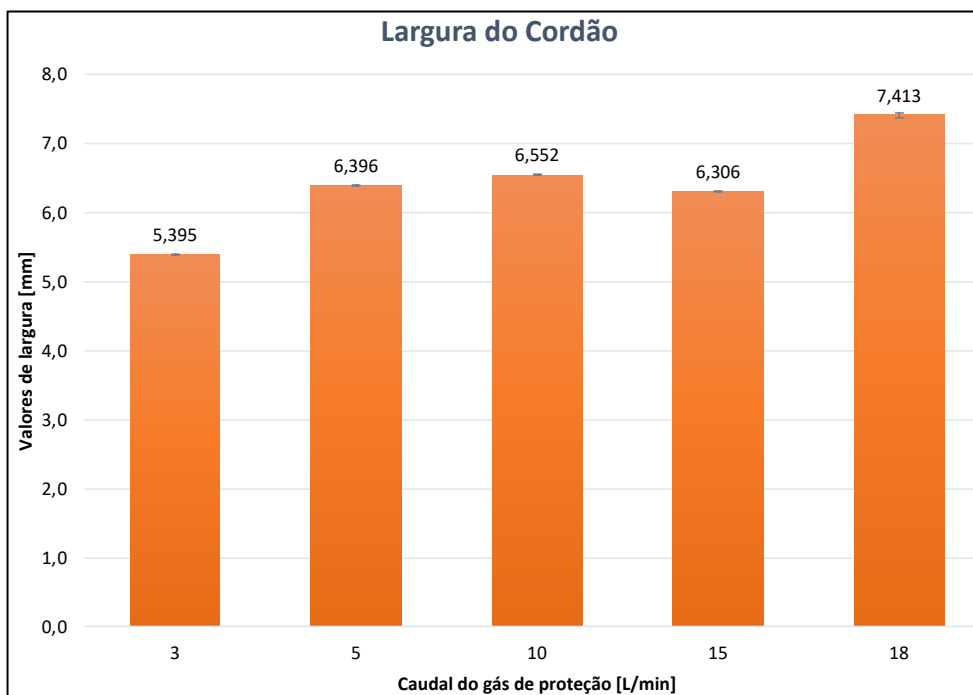


Figura 3.13: Largura do cordão para diferentes valores de caudal.

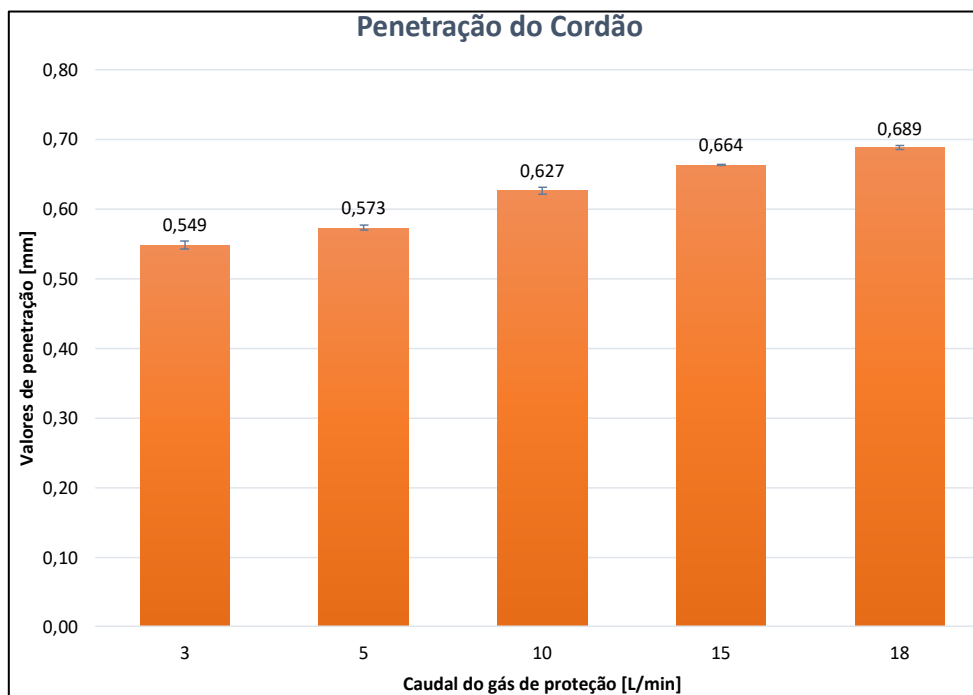


Figura 3.14: Penetração do cordão para diferentes valores de caudal.

Observando os 3 (três) gráficos presentes nas figuras anteriores, e tendo em conta a relação entre o caudal do gás de proteção e os 3 (três) parâmetros geométricos, é possível verificar que 2 (dois) dos gráficos cumprem na íntegra a teoria, isto é, nos gráficos da altura e da penetração é possível verificar que quanto maior for o caudal do gás de proteção menor será o valor de altura e, por outro lado, maior será o valor de penetração. Relativamente ao gráfico referente à largura é possível verificar que somente a barra referente ao caudal de 15 l/min não está de acordo com a teoria citada, podendo tal ser justificado tendo em conta possíveis erros que tenham ocorrido quer durante o processo de deposição, quer na medição dos valores de largura no *software ImageJ*. Contudo, e em linhas gerais, observa-se um aumento da largura à medida que se aumenta o caudal do gás de proteção.

3.3. Planeamento de Experiências

Como referido no subcapítulo referente aos Objetivos da Dissertação, um dos principais objetivos é a obtenção da condição ideal de parâmetros que otimizará o processo de deposição, através da avaliação dos parâmetros não geométricos, isto é, energia do arco, e dos parâmetros geométricos, ou seja, altura por camada, largura, penetração e ondulação.

A priori de analisar os resultados obtidos, referente aos parâmetros geométricos e não geométricos, é primordial clarificar a escolha dos valores dos níveis dos fatores, isto é, os valores referentes aos parâmetros de U , TS e WFS . Todavia, é de realçar que a escolha dos mesmos foi realizada com base em todos os ensaios e testes efetuados anteriormente, como se verificará de seguida. A escolha dos valores dos níveis referentes ao parâmetro WFS foi realizada com base nas restrições/ limitações do processo, onde se verificou que os únicos valores de WFS que resultavam em aspetos de cordão mau e intermédio, e que resultou no descarte imediato, era quando $WFS = 3 \text{ m/min}$ e $WFS = 6 \text{ m/min}$, restando assim $WFS = 4 \text{ m/min}$ e $WFS = 5 \text{ m/min}$.

Relativamente aos valores dos níveis referentes ao parâmetro TS e tendo em conta, num primeiro momento, o que foi referido nas restrições/ limitações do processo, os valores de TS que não foram descartados foram os seguintes: 480, 500, 530, 580 e 680 mm/min . Num segundo momento, e após realizar a medição das densidade e o cálculo do volume de vazios descartou-se os seguintes valores de TS : 550 e 650 mm/min , restando assim os valores de 475, 500 e 525 mm/min . Sendo assim, e como valor mínimo de velocidade de soldadura, definiu-se o valor de 400 mm/min , uma vez que este foi descartado somente tendo em conta a produtividade, e não as más condições de soldadura. No que concerne ao valor máximo de velocidade de soldadura para o planeamento de experiências escolheu-se o valor de 525 mm/min . No que diz respeito aos valores referente ao parâmetro U e considerando, mais uma vez, as restrições/ limitações do processo, verificou-se que os únicos valores de U que não resultavam num aspeto de cordão mau eram os valores de 21 e 23 V sendo, por este motivo, estes os valores dos níveis referentes ao parâmetro da tensão.

Relativamente ao caudal do gás de proteção, e face aos ensaios anteriormente efetuados, as paredes do planeamento de experiências foram obtidas utilizando um caudal de 5 l/min , tendo em consideração à aproximação dos valores de densidade e de volume de vazios das paredes obtidas com ER-90S. A possibilidade de reduzir significativamente o valor do caudal do gás de proteção permite que o processo se torne bastante mais económico.

Após serem definidos os valores dos níveis inferiores e superiores referentes aos 3 (três) fatores procedeu-se à obtenção dos valores da primeira variável de resposta em estudo, a energia do arco. Como referido no capítulo anterior, os valores desta variável foram obtidos não só recorrendo a um sistema de aquisição em *LabVIEW*, como também a um código computacional em linguagem *Matlab*. Assim sendo, e presente na figura que se segue, encontra-se um gráfico de tensão e corrente referente a uma das 15 (quinze) deposições.

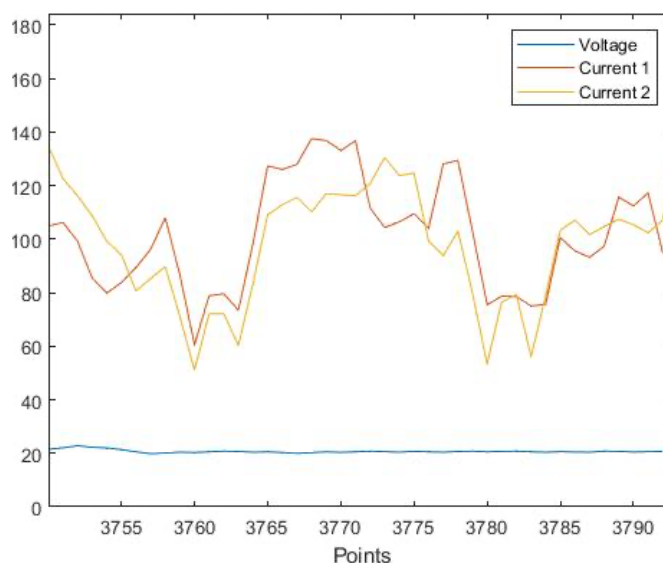


Figura 3.15: Gráfico de tensão e corrente obtido no *Matlab*.

Observando o gráfico presente na Figura 3.15 é possível verificar que este contém 1 (uma) linha referente à tensão, que foi obtida tendo em conta a diferença de potenciais entre a tocha e a mesa de trabalho, e 2 (duas) referentes à corrente, em jeito de redundância. Na obtenção dos gráficos todos estes foram sujeitos a um filtro por forma a diminuir o ruído presente nos gráficos provenientes no *LabVIEW*, através da média móvel.

Posteriormente, efetuou-se a medição dos parâmetros geométricos, isto é, altura por camada, largura e penetração, estando os valores dos mesmos nas tabelas que se seguem. Além disto, e por forma a facilitar a análise dos resultados presentes nas tabelas anteriores, representou-se os mesmos em gráficos, tendo cada um destes presente a incerteza associada a cada um dos diversos valores.

Tabela 3.8: Medição da altura por camada para as diferentes deposições.

Deposições		Altura por Camada					
		Medição1	Medição2	Medição3	Média	Desvio Padrão	Incerteza
Deposição 9	Deposição 9- Extremidade 1	1,369	1,358	1,359	1,36	0,06	0,04
	Deposição 9- Meio	1,443	1,447	1,445	1,45	0,02	0,01
	Deposição 9- Extremidade 2	1,387	1,391	1,394	1,39	0,03	0,02
Média Deposição 9		1,400	1,399	1,399	1,40	0,04	0,02
Deposição 3	Deposição 3- Extremidade 1	1,192	1,195	1,196	1,19	0,02	0,01
	Deposição 3- Meio	1,136	1,133	1,136	1,14	0,02	0,01
	Deposição 3- Extremidade 2	1,121	1,119	1,114	1,12	0,04	0,02
Média Deposição 3		1,150	1,149	1,149	1,15	0,04	0,02
Deposição 10	Deposição 10- Extremidade 1	1,198	1,197	1,197	1,20	0,00	0,00
	Deposição 10- Meio	1,138	1,134	1,135	1,14	0,02	0,01
	Deposição 10- Extremidade 2	1,095	1,087	1,094	1,09	0,05	0,03
Média Deposição 10		1,144	1,139	1,142	1,14	0,05	0,03
Deposição 7	Deposição 7- Extremidade 1	1,113	1,116	1,115	1,11	0,02	0,01
	Deposição 7- Meio	1,123	1,125	1,125	1,12	0,01	0,01
	Deposição 7- Extremidade 2	1,228	1,228	1,225	1,23	0,02	0,01
Média Deposição 7		1,155	1,157	1,155	1,16	0,06	0,04
Deposição 6	Deposição 6- Extremidade 1	1,281	1,283	1,281	1,28	0,01	0,01
	Deposição 6- Meio	1,126	1,129	1,127	1,13	0,01	0,01
	Deposição 6- Extremidade 2	1,326	1,316	1,327	1,32	0,06	0,04
Média Deposição 6		1,244	1,243	1,245	1,24	0,10	0,06
Deposição 14	Deposição 14- Extremidade 1	1,280	1,273	1,279	1,28	0,04	0,02
	Deposição 14- Meio	1,367	1,380	1,370	1,37	0,07	0,04
	Deposição 14- Extremidade 2	1,288	1,285	1,285	1,29	0,02	0,01
Média Deposição 14		1,312	1,312	1,311	1,31	0,05	0,03
Deposição 13	Deposição 13- Extremidade 1	1,257	1,257	1,258	1,26	0,01	0,00
	Deposição 13- Meio	1,229	1,231	1,225	1,23	0,03	0,02
	Deposição 13- Extremidade 2	1,263	1,265	1,265	1,26	0,02	0,01
Média Deposição 13		1,249	1,251	1,249	1,25	0,02	0,01

Deposição 5	Deposição 5- Extremidade 1	1,137	1,135	1,142	1,14	0,04	0,02
	Deposição 5- Meio	1,132	1,134	1,131	1,13	0,02	0,01
	Deposição 5- Extremidade 2	1,232	1,229	1,230	1,23	0,02	0,01
Média Deposição 5		1,167	1,166	1,168	1,17	0,06	0,03
Deposição 14	Deposição 14- Extremidade 1	1,557	1,556	1,565	1,56	0,05	0,03
	Deposição 14- Meio	1,495	1,496	1,498	1,50	0,01	0,01
	Deposição 14- Extremidade 2	1,442	1,442	1,442	1,44	0,00	0,00
Média Deposição 14		1,498	1,498	1,502	1,50	0,06	0,03
Deposição 2	Deposição 2- Extremidade 1	1,243	1,233	1,243	1,24	0,05	0,03
	Deposição 2- Meio	1,154	1,159	1,159	1,16	0,03	0,02
Média Deposição 2		1,298	1,297	1,301	1,30	0,06	0,03
Deposição 11	Deposição 11- Extremidade 1	1,259	1,264	1,267	1,26	0,04	0,02
	Deposição 11- Meio	1,285	1,293	1,29	1,29	0,04	0,02
	Deposição 11- Extremidade 2	1,181	1,185	1,186	1,18	0,03	0,02
Média Deposição 11		1,242	1,247	1,248	1,25	0,05	0,03
Deposição 1	Deposição 1-Extremidade 1	1,302	1,302	1,299	1,30	0,02	0,01
	Deposição 1- Meio	1,326	1,318	1,323	1,32	0,04	0,02
	Deposição 1- Extremidade 2	1,305	1,309	1,306	1,31	0,02	0,01
Média Deposição 1		1,311	1,310	1,310	1,31	0,01	0,01
Deposição 8	Deposição 8- Extremidade 1	1,25	1,25	1,24	1,25	0,03	0,01
	Deposição 8- Meio	1,20	1,19	1,20	1,20	0,02	0,01
	Deposição 8- Extremidade 2	1,31	1,30	1,31	1,31	0,03	0,02
Média Deposição 8		1,250	1,249	1,250	1,25	0,06	0,03
Deposição 12	Deposição 12- Extremidade 1	1,183	1,195	1,19	1,19	0,06	0,04
	Deposição 12- Meio	1,184	1,193	1,188	1,19	0,05	0,03
Média Deposição 12		1,206	1,212	1,209	1,21	0,00	0,00
Deposição 4	Deposição 4- Extremidade 1	1,26	1,263	1,26	1,26	0,02	0,01
	Deposição 4- Meio	1,032	1,030	1,031	1,03	0,01	0,01
	Deposição 4- Extremidade 2	0,999	0,996	1,001	1,00	0,03	0,02
Média Deposição 4		1,097	1,096	1,097	1,10	0,02	0,02

Tabela 3.9: Medição da largura para as diferentes deposições.

Deposições		Largura							
		Medição1	Medição2	Medição3	Medição4	Medição5	Média	Desvio Padrão	Incerteza
Deposição 9	Deposição 9- Extremidade 1	5,325	5,526	5,65	5,625	5,825	5,590	0,18	0,08
	Deposição 9- Meio	5,605	5,408	5,581	5,605	5,778	5,595	0,13	0,06
	Deposição 9- Extremidade 2	5,475	5,6	5,251	5,526	5,5	5,470	0,13	0,06
Média Deposição 9		5,468	5,511	5,494	5,585	5,701	5,552	0,07	0,04
Deposição 3	Deposição 3- Extremidade 1	4,932	4,668	4,765	4,67	4,811	4,769	0,19	0,13
	Deposição 3- Meio	4,325	4,303	4,527	4,904	4,825	4,577	0,28	0,12
	Deposição 3- Extremidade 2	4,368	4,519	4,695	4,87	5,197	4,730	0,32	0,14
Média Deposição 3		4,542	4,497	4,662	4,815	4,944	4,692	0,10	0,05
Deposição 10	Deposição 10- Extremidade 1	4,594	4,494	4,419	4,394	4,494	4,479	0,08	0,03
	Deposição 10- Meio	4,507	4,485	5,23	4,523	4,57	4,663	0,42	0,19
	Deposição 10- Extremidade 2	3,833	3,783	3,866	4,067	5,138	4,137	0,57	0,25
Média Deposição 10		4,311	4,254	4,505	4,328	4,734	4,426	0,27	0,2
Deposição 7	Deposição 7- Extremidade 1	5,133	5,35	5,267	5,5	5,233	5,297	0,15	0,08
	Deposição 7- Meio	4,768	5,096	4,891	5,094	5,144	4,999	0,16	0,07
	Deposição 7- Extremidade 2	4,569	4,921	4,921	5,122	5,096	4,926	0,22	0,10
Média Deposição 7		4,823	5,122	5,026	5,239	5,158	5,074	0,20	0,09
Deposição 6	Deposição 6- Extremidade 1	5,303	5,652	5,154	5,827	6,299	5,647	0,45	0,20
	Deposição 6- Meio	5,41	5,386	5,928	5,36	5,873	5,591	0,31	0,18
	Deposição 6- Extremidade 2	6,174	6,199	6,189	6,229	6,175	6,193	0,02	0,01
Média Deposição 6		5,629	5,746	5,757	5,805	6,116	5,811	0,33	0,2
Deposição 14	Deposição 14- Extremidade 1	5,104	5,304	5,104	5,303	5,477	5,258	0,16	0,07
	Deposição 14- Meio	5,701	5,677	5,926	5,652	5,428	5,677	0,18	0,08
	Deposição 14- Extremidade 2	5,319	5,218	5,369	5,698	5,369	5,395	0,18	0,08
Média Deposição 14		5,375	5,400	5,466	5,551	5,425	5,443	0,21	0,10
Deposição 13	Deposição 13- Extremidade 1	5,104	5,253	5,278	5,278	5,877	5,358	0,30	0,13
	Deposição 13- Meio	5,247	5,398	5,272	5,423	5,623	5,393	0,15	0,07
	Deposição 13- Extremidade 2	5,152	5,552	5,55	5,45	5,7	5,481	0,20	0,09
Média Deposição 13		5,168	5,401	5,367	5,384	5,733	5,410	0,06	0,03

Deposição 5	Deposição 5- Extremidade 1	5,021	4,742	4,775	4,643	4,609	4,758	0,16	0,07
	Deposição 5- Meio	4,502	4,776	4,601	4,8	4,725	4,681	0,13	0,06
	Deposição 5- Extremidade 2	4,632	4,407	4,506	4,432	4,556	4,507	0,09	0,04
Média Deposição 5		4,718	4,642	4,627	4,625	4,630	4,648	0,13	0,06
Deposição 14	Deposição 14- Extremidade 1	5,151	5,426	5,276	5,401	5,425	5,336	0,12	0,05
	Deposição 14- Meio	4,95	5,4	5,151	5,025	5,5	5,205	0,24	0,11
	Deposição 14- Extremidade 2	5,38	5,38	5,331	5,23	5,354	5,335	0,06	0,03
Média Deposição 14		5,160	5,402	5,253	5,219	5,426	5,292	0,08	0,03
Deposição 2	Deposição 2- Extremidade 1	6,25	6,175	6,125	6,125	6,45	6,225	0,14	0,06
	Deposição 2- Meio	5,375	6,125	6,25	6,85	7,075	6,335	0,67	0,30
Média Deposição 2		5,595	5,901	5,876	6,065	6,317	5,951	0,08	0,03
Deposição 11	Deposição 11- Extremidade 1	5,655	5,63	5,704	6,173	7,136	6,060	0,64	0,29
	Deposição 11- Meio	5,653	5,802	5,95	5,975	6,769	6,030	0,43	0,19
	Deposição 11- Extremidade 2	5,631	5,706	6,074	6,148	6,714	6,055	0,43	0,19
Média Deposição 11		5,646	5,713	5,909	6,099	6,873	6,048	0,02	0,01
Deposição 1	Deposição 1-Extremidade 1	5,251	5,375	5,325	5,35	5,825	5,425	0,23	0,10
	Deposição 1- Meio	5,228	5,303	5,527	5,129	5,477	5,333	0,17	0,07
	Deposição 1- Extremidade 2	5,001	5,076	5,35	5,225	6,2	5,370	0,48	0,22
Média Deposição 1		5,160	5,251	5,401	5,235	5,834	5,376	0,05	0,02
Deposição 8	Deposição 8- Extremidade 1	5,303	5,752	6,025	5,826	6,149	5,811	0,33	0,15
	Deposição 8- Meio	5,501	5,602	5,65	5,8	5,875	5,686	0,15	0,07
	Deposição 8- Extremidade 2	5,411	5,828	6,026	5,877	5,729	5,774	0,23	0,10
Média Deposição 8		5,405	5,727	5,900	5,834	5,918	5,757	0,06	0,03
Deposição 12	Deposição 12- Extremidade 1	4,716	5,037	5,309	5,235	5,16	5,091	0,23	0,10
	Deposição 12- Meio	4,894	4,992	4,943	5,017	5,608	5,091	0,29	0,13
Média Deposição 12		5,005	5,252	5,384	5,362	5,562	5,313	0,38	0,17
Deposição 4	Deposição 4- Extremidade 1	4,907	5,251	5,4	4,857	5,103	5,104	0,23	0,10
	Deposição 4- Meio	4,154	4,194	3,933	4,274	4,515	4,214	0,21	0,09
	Deposição 4- Extremidade 2	4,629	4,976	5,108	5,405	5,77	5,178	0,43	0,19

Tabela 3.10: Medição da penetração para as diferentes deposições.

Deposições		Penetração					
		Medição1	Medição2	Medição3	Média	Desvio Padrão	Incerteza
Deposição 9	Deposição 9- Extremidade 1	0,759	0,742	0,709	0,74	0,03	0,01
	Deposição 9- Meio	0,664	0,679	0,679	0,67	0,01	0,005
	Deposição 9- Extremidade 2	0,744	0,787	0,764	0,77	0,02	0,01
Média Deposição 9		0,722	0,736	0,717	0,73	0,05	0,03
Deposição 3	Deposição 3- Extremidade 1	0,879	0,833	0,787	0,83	0,05	0,03
	Deposição 3- Meio	0,68	0,686	0,685	0,68	0,02	0,01
	Deposição 3- Extremidade 2	0,79	0,824	0,807	0,81	0,02	0,01
Média Deposição 3		0,783	0,781	0,760	0,77	0,08	0,05
Deposição 10	Deposição 10- Extremidade 1	0,74	0,772	0,807	0,77	0,03	0,02
	Deposição 10- Meio	0,961	0,912	0,879	0,92	0,04	0,02
	Deposição 10- Extremidade 2	0,825	0,774	0,827	0,81	0,03	0,02
Média Deposição 10		0,842	0,819	0,838	0,83	0,08	0,04
Deposição 7	Deposição 7- Extremidade 1	0,77	0,804	0,787	0,79	0,02	0,01
	Deposição 7- Meio	0,763	0,726	0,691	0,73	0,04	0,02
	Deposição 7- Extremidade 2	0,956	0,872	0,906	0,91	0,04	0,02
Média Deposição 7		0,830	0,801	0,795	0,81	0,09	0,05
Deposição 6	Deposição 6- Extremidade 1	1,006	1,006	0,994	1,00	0,01	0,004
	Deposição 6- Meio	0,82	0,845	0,82	0,83	0,01	0,01
	Deposição 6- Extremidade 2	0,949	0,913	0,949	0,94	0,02	0,01
Média Deposição 6		0,925	0,921	0,921	0,92	0,09	0,05
Deposição 14	Deposição 14- Extremidade 1	0,773	0,798	0,785	0,79	0,01	0,007
	Deposição 14- Meio	0,848	0,88	0,88	0,87	0,02	0,01
	Deposição 14- Extremidade 2	0,88	0,913	0,929	0,91	0,03	0,01
Média Deposição 14		0,834	0,864	0,865	0,85	0,06	0,04
Deposição 13	Deposição 13- Extremidade 1	0,757	0,79	0,773	0,77	0,02	0,01
	Deposição 13- Meio	0,88	0,83	0,88	0,86	0,03	0,02
	Deposição 13- Extremidade 2	0,933	0,933	0,9	0,92	0,02	0,01
Média Deposição 13		0,857	0,851	0,851	0,85	0,07	0,04

Deposição 5	Deposição 5- Extremidade 1	0,683	0,7	0,683	0,69	0,01	0,006
	Deposição 5- Meio	0,805	0,77	0,804	0,79	0,02	0,01
	Deposição 5- Extremidade 2	0,777	0,674	0,78	0,74	0,08	0,05
Média Deposição 5		0,755	0,715	0,756	0,74	0,05	0,03
Deposição 14	Deposição 14- Extremidade 1	0,827	0,878	0,844	0,85	0,03	0,02
	Deposição 14- Meio	0,819	0,853	0,851	0,84	0,02	0,01
	Deposição 14- Extremidade 2	0,906	0,922	0,956	0,93	0,03	0,01
Média Deposição 14		0,851	0,884	0,884	0,87	0,05	0,03
Deposição 2	Deposição 2- Extremidade 1	0,881	0,862	0,825	0,86	0,03	0,02
	Deposição 2- Meio	0,926	0,926	0,959	0,94	0,02	0,01
Média Deposição 2		0,886	0,891	0,889	0,89	0,06	0,03
Deposição 11	Deposição 11- Extremidade 1	0,873	0,856	0,889	0,87	0,02	0,01
	Deposição 11- Meio	1,001	0,934	0,967	0,97	0,03	0,02
	Deposição 11- Extremidade 2	0,882	0,919	0,9	0,90	0,02	0,01
Média Deposição 11		0,919	0,903	0,919	0,91	0,05	0,03
Deposição 1	Deposição 1-Extremidade 1	0,727	0,712	0,777	0,74	0,03	0,02
	Deposição 1- Meio	0,734	0,687	0,702	0,71	0,02	0,01
	Deposição 1- Extremidade 2	0,763	0,78	0,813	0,79	0,03	0,01
Média Deposição 1		0,741	0,726	0,764	0,74	0,04	0,02
Deposição 8	Deposição 8- Extremidade 1	0,983	0,967	0,967	0,97	0,01	0,01
	Deposição 8- Meio	1,032	1,016	1,001	1,02	0,02	0,01
	Deposição 8- Extremidade 2	0,845	0,845	0,845	0,85	0,00	0
Média Deposição 8		0,953	0,943	0,938	0,94	0,09	0,05
Deposição 12	Deposição 12- Extremidade 1	0,821	0,837	0,837	0,83	0,01	0,01
	Deposição 12- Meio	0,766	0,75	0,732	0,75	0,02	0,01
Média Deposição 12		0,847	0,843	0,836	0,84	0,06	0,03
Deposição 4	Deposição 4- Extremidade 1	0,883	0,867	0,867	0,87	0,01	0,01
	Deposição 4- Meio	0,775	0,801	0,774	0,78	0,02	0,01
	Deposição 4- Extremidade 2	0,809	0,809	0,822	0,81	0,01	0,004
Média Deposição 4		0,822	0,826	0,821	0,82	0,05	0,03

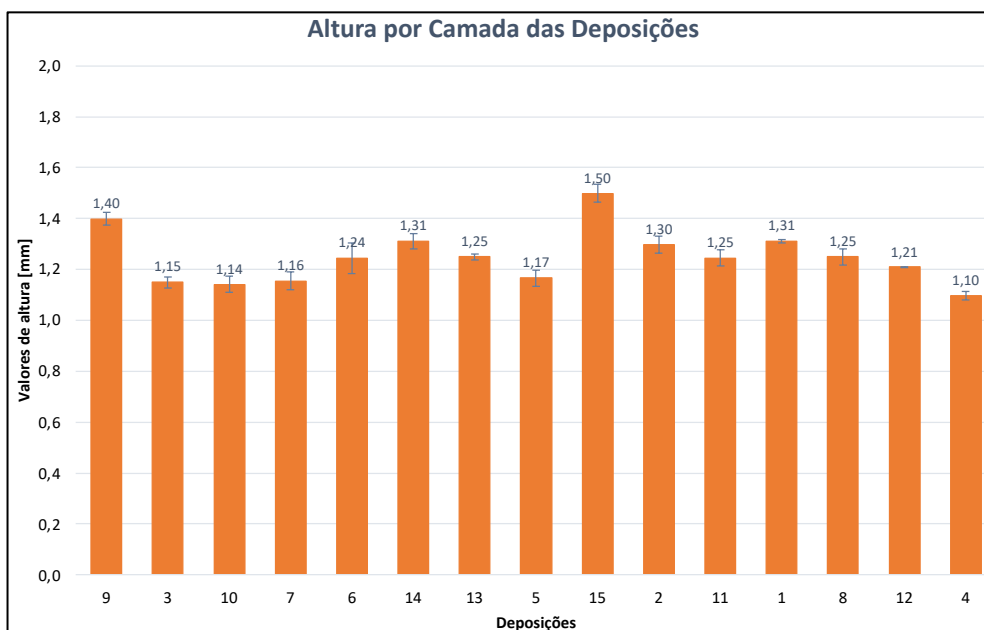


Figura 3.16: Altura por camada das deposições do planeamento de experiências.

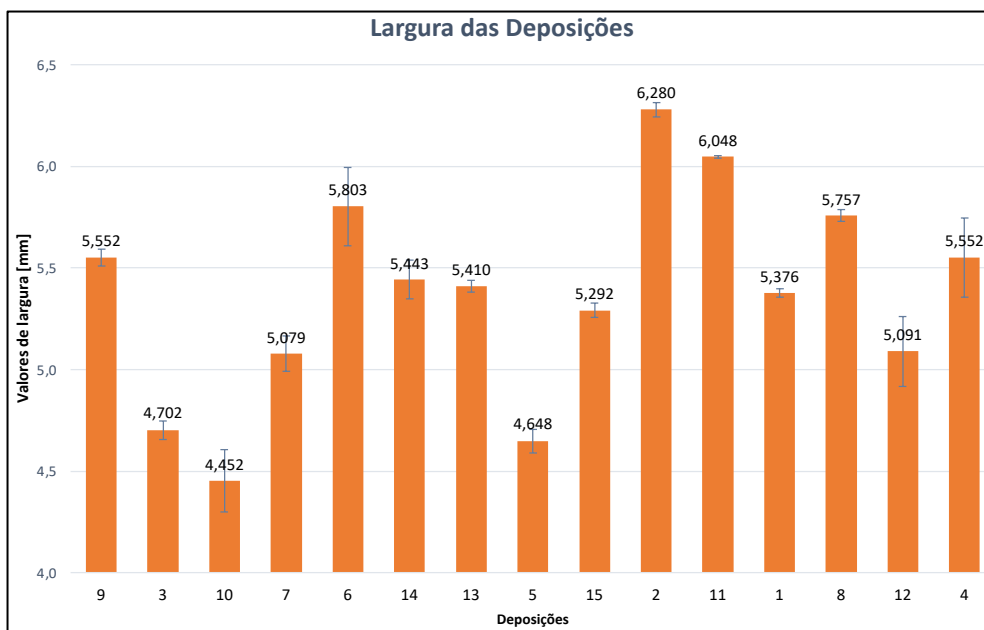


Figura 3.17: Largura das deposições do planeamento de experiências.

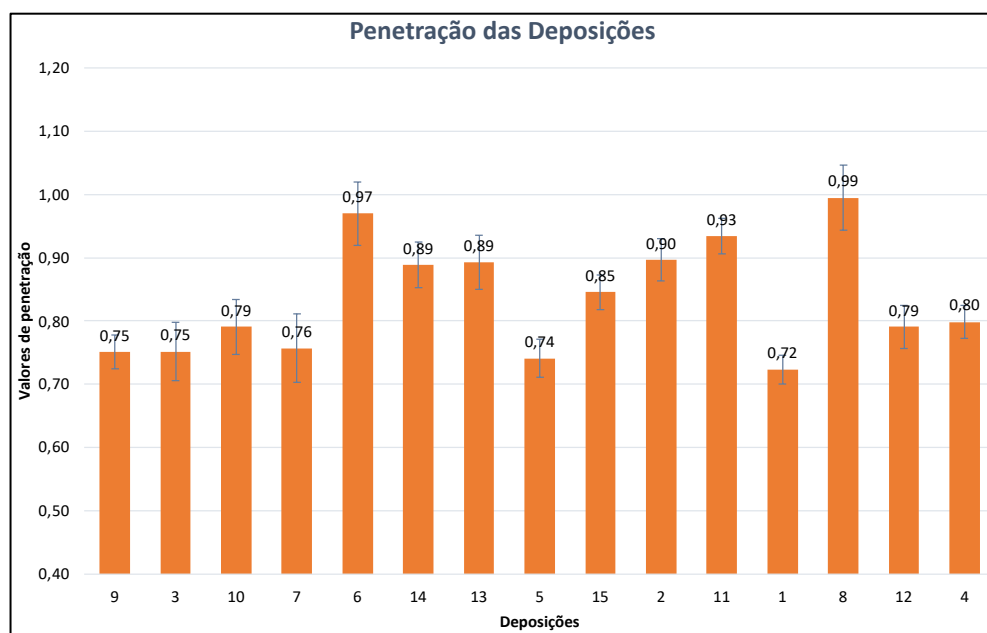


Figura 3.18: Penetração das deposições do planeamento de experiências.

A última variável de resposta a ser analisada foi a ondulação. Após a reiteração do processo de seleção da parede, calibração e aplicação da técnica de perfilografia obteve-se não só o perfil virtual, como também o gráfico relativo à largura e altura da parede, como é possível observar na figura que se segue.

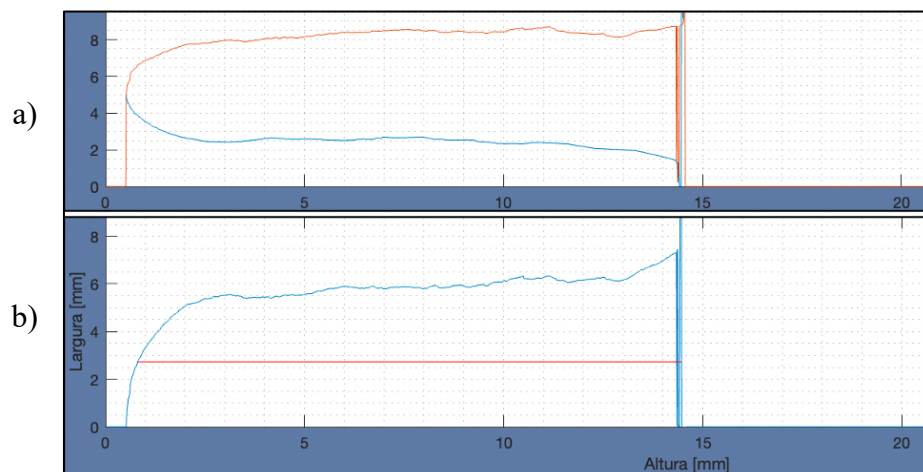


Figura 3.19: Perfis da parede: (a) Reconstrução Virtual; (b) Largura versus Altura.

Após a obtenção dos perfis da parede exportou-se esta análise para o *Excel* onde, num primeiro momento, se excluiu as extremidades da parede traçando, de seguida, 2 (duas) linhas médias, 1 (uma) referente ao contorno superior e a segunda referente ao contorno inferior, como é possível verificar na Figura 3.20

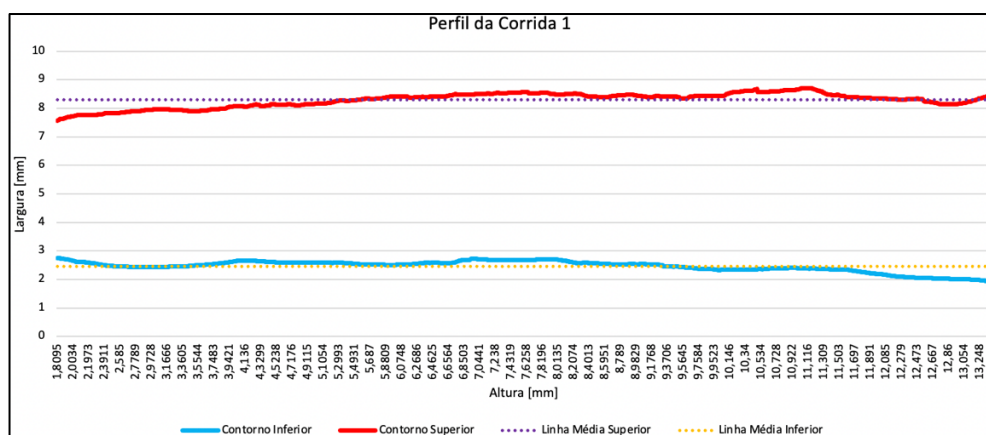


Figura 3.20: Perfil da parede sem extremidades e com linhas médias.

Posteriormente, e através do programa desenvolvido em linguagem *Matlab*, obteve-se os valores referentes à ondulação superior e inferior de cada uma das 15 (quinze) deposições, estando os mesmos presentes na tabela que se segue.

Tabela 3.11: Valores de ondulação das deposições.

	Superior	Inferior		Superior	Inferior
Deposição	Ondulação [mm]	Ondulação [mm]	Deposição	Ondulação [mm]	Ondulação [mm]
9	0,0878	0,1285	15	0,1748	0,0969
3	0,1865	0,1865	2	0,1308	0,1035
10	0,1047	0,1705	11	0,1220	0,0980
7	0,0676	0,1428	1	0,1427	0,0995
6	0,1352	0,1396	8	0,1512	0,1051
14	0,0960	0,0810	12	0,1449	0,1637
13	0,1049	0,0843	4	0,2205	0,1431
5	0,1010	0,1399			

Com a finalização da análise das 5 (cinco) variáveis de respostas procedeu-se à introdução dos respetivos valores no *software Minitab*, visíveis na Tabela 3.12.

Tabela 3.12: Valores referentes às variáveis de resposta.

Corrida	H [mm]	W [mm]	P [mm]	AE [J/mm]	Wa [mm]
9	1,40	5,552	0,75	322,643	0,1082
3	1,15	4,702	0,75	254,006	0,1865
10	1,14	4,452	0,79	237,927	0,1376
7	1,16	5,079	0,76	310,416	0,1052
6	1,24	5,803	0,97	323,611	0,1374
14	1,31	5,443	0,89	296,195	0,0885
13	1,25	5,410	0,89	321,585	0,0946
5	1,17	4,648	0,74	284,129	0,1205
15	1,50	5,292	0,85	314,807	0,1359
2	1,20	6,280	0,90	404,637	0,1171
11	1,25	6,048	0,93	379,051	0,1100
1	1,31	5,376	0,72	313,103	0,1211
8	1,25	5,757	0,99	333,877	0,1282
12	1,19	5,091	0,79	290,449	0,1543
4	1,01	5,552	0,80	284,837	0,1818

Posteriormente, e através do *Minitab*, obteve-se as equações de regressão de superfície de resposta das variáveis de resposta, isto é, energia do arco, altura por camada, largura, penetração e ondulação, em função das variáveis de entrada, ou seja, velocidade de soldadura, tensão e velocidade de alimentação do fio, visíveis na Tabela 3.13.

Assim sendo, e tendo, *à priori*, os 3 (três) valores referentes às variáveis de entrada (*WFS*, *TS* e *U*), as equações de regressão permitem estimar os valores das 5 (cinco) variáveis de resposta.

Tabela 3.13: Equações de regressão e respectivos valores de R^2 .

Equações de Regressão	R^2
$H = -19,8 + 4,04 \cdot WFS - 0,0017 \cdot TS + 1,18 \cdot T - 0,452 \cdot WFS^2 - 0,000019 \cdot TS^2 - 0,0354 \cdot T^2 + 0,000800 \cdot TS \cdot T$	70,02%
$W = 0,35 + 0,897 \cdot WFS - 0,006918 \cdot TS + 0,1900 \cdot T$	92,27%
$P = -13,47 + 0,653 \cdot WFS + 0,03587 \cdot TS + 0,360 \cdot T - 0,000017 \cdot TS^2 - 0,001040 \cdot WFS \cdot TS - 0,000720 \cdot TS \cdot T$	89,50%
$AE = -1124 + 279,9 \cdot WFS + 1,481 \cdot TS + 22,69 \cdot T - 0,486 \cdot WFS \cdot TS$	94,71%
$Wa = 2,933 - 0,733 \cdot WFS - 0,00558 \cdot TS + 0,0824 \cdot WFS^2 + 0,000006 \cdot TS^2$	79,12%

Como é possível verificar na Tabela 3.13, além das equações de regressão obteve-se de igual modo os coeficientes do R^2 , sendo estes uma medida estatística do quão próximos os dados estão da linha de regressão, permitindo assim verificar o quão ajustada está a respetiva equação. Sendo assim, e analisando a tabela anterior, de forma geral, é possível afirmar que todos os ajustes foram bem aproximados, até a variável que apresenta menor valor de coeficiente do R^2 , como é o caso da altura.

O coeficiente do R^2 referente à altura pode ser fundamentado tendo em conta o efeito da escória, isto é, numa situação em que se verifica uma maior presença de calor é de esperar que o material de adição escorra para as laterais, diminuindo o valor de altura esperado, contudo, e numa situação contrária, isto é, onde se verifica uma menor presença de calor, seria de esperar um aumento da altura, porém, e dada a existência da escória, este não permite uma ampla variabilidade da altura, devido à criação de uma barreira. No que diz respeito à variável da penetração é possível verificar que é a variável de resposta que mais depende das variáveis de entrada, não só em aspetos lineares e quadráticas, mas também a nível de interações entre variáveis.

Como já fora mencionado anteriormente, e tendo em conta o objetivo primordial da presente Dissertação, isto é, verificar a possibilidade de utilizar material de adição com fluxo rutilico nos aços de alta resistência, a condição de parâmetros otimizada deverá ser obtida tendo em consideração as necessidades e características dos navios, ou seja, garantir que não ocorrem colapsos e enfraquecimentos das infraestruturas, assegurar uma rápida deposição de material e ainda minimizar o desperdício de material, por forma a minorar os custos de operação. Na figura que se segue é possível verificar as variáveis de entrada maximizadas, representadas na seta a verde, e as variáveis de entrada minimizadas, representadas na seta a vermelho.



Figura 3.21: Minimização e maximização das variáveis de entrada.

Como é possível observar na Figura 3.21, as variáveis de entrada que foram maximizadas foram as variáveis referentes à altura, largura e penetração. Em contrapartida, as variáveis minimizadas foram a ondulação e a energia do arco.

A maximização da altura e da largura pode ser fundamentada tendo em conta a intenção de, num curto intervalo de tempo, depositar a maior quantidade de material possível, garantindo que a deposição apresenta um elevado volume de material.

No que diz respeito à maximização da penetração, esta pode ser justificada tendo em consideração a pretensão de não só garantir uma maior agregação entre o material depositado e o material base, como também assegurar um aumento da resistência e da estabilidade da soldadura. A minimização da variável da ondulação pode ser explicada tendo como ponto de partida o objetivo de obter uma parede o mais uniforme possível, ou seja, quanto maior for o valor da ondulação, maior será a quantidade de material a retirar e, conseqüentemente, maior será o desperdício de dinheiro. Paralelamente, a minimização da energia do arco deveu-se à necessidade de garantir que não ocorrem não só colapsos do material depositado, devido à elevada presença de calor, como também sobreaquecimento do material de adição. Assim sendo, e após colocar no *Minitab* as respetivas variáveis maximizadas e minimizadas, este forneceu a condição de parâmetros otimizada, sendo esta a seguinte: $WFS = 4,7 \text{ m/min}$, $TS = 447 \text{ mm/min}$ e $U = 22 \text{ V}$. De seguida, efetuou-se a deposição do material de adição por forma a obter a parede de soldadura com a condição otimizada, tendo a parede obtida um comprimento de 180 mm e 50 camadas (Figura 3.22).



Figura 3.22: Obtenção da parede com parâmetros da condição otimizada.

3.4. Avaliação Microestrutural

Como referido no subcapítulo 2.3, a avaliação microestrutural tinha como finalidade avaliar não só o refinamento do grão, correlacionando-o com a taxa de arrefecimento, como também os distintos constituintes presentes na microestrutura.

Na figura que se segue é possível verificar a totalidade da parede de soldadura e as 3 (três) zonas distintas da parede, isto é, topo, centro e meio, com as respetivas microestruturas. Assim sendo, e observando a Figura 3.23, é possível verificar não só o refinamento do grão, como também a passagem de grãos colunares e grandes, isto é, grãos alongados na mesma direção, evidentes no topo da parede, para grãos que crescem de forma uniforme, os grãos pequenos e refinados, evidentes na região central da parede.

Como fora referido anteriormente, e apresentando-se como uma das principais causas para a alteração do tamanho do grão, a taxa de arrefecimento influencia o tamanho do grão. Assim sendo, e considerando que o topo da parede apresenta uma elevada taxa de arrefecimento haverá um súbito arrefecimento, devido ao contacto com a atmosfera, pelo que o tempo disponível à recristalização, ou seja, refinamento da microestrutura, será menor pelo que os grãos tendem a manter-se de elevado tamanho. Além disto, é ainda importante referir que a base da parede, em comparação com o topo, terá uma menor taxa de arrefecimento, visto que o calor tem tendência a fluir para o substrato, aquecendo-o e provocando uma diferença de temperatura menor, ou seja, menor taxa de arrefecimento. Observando a base da parede de soldadura é possível verificar uma elevada presença de carbonetos, podendo ser justificado pela grande percentagem de carbono que compõe o substrato, cerca de 0,25%, quando em comparação com o material de adição, que apenas tem 0,08%.

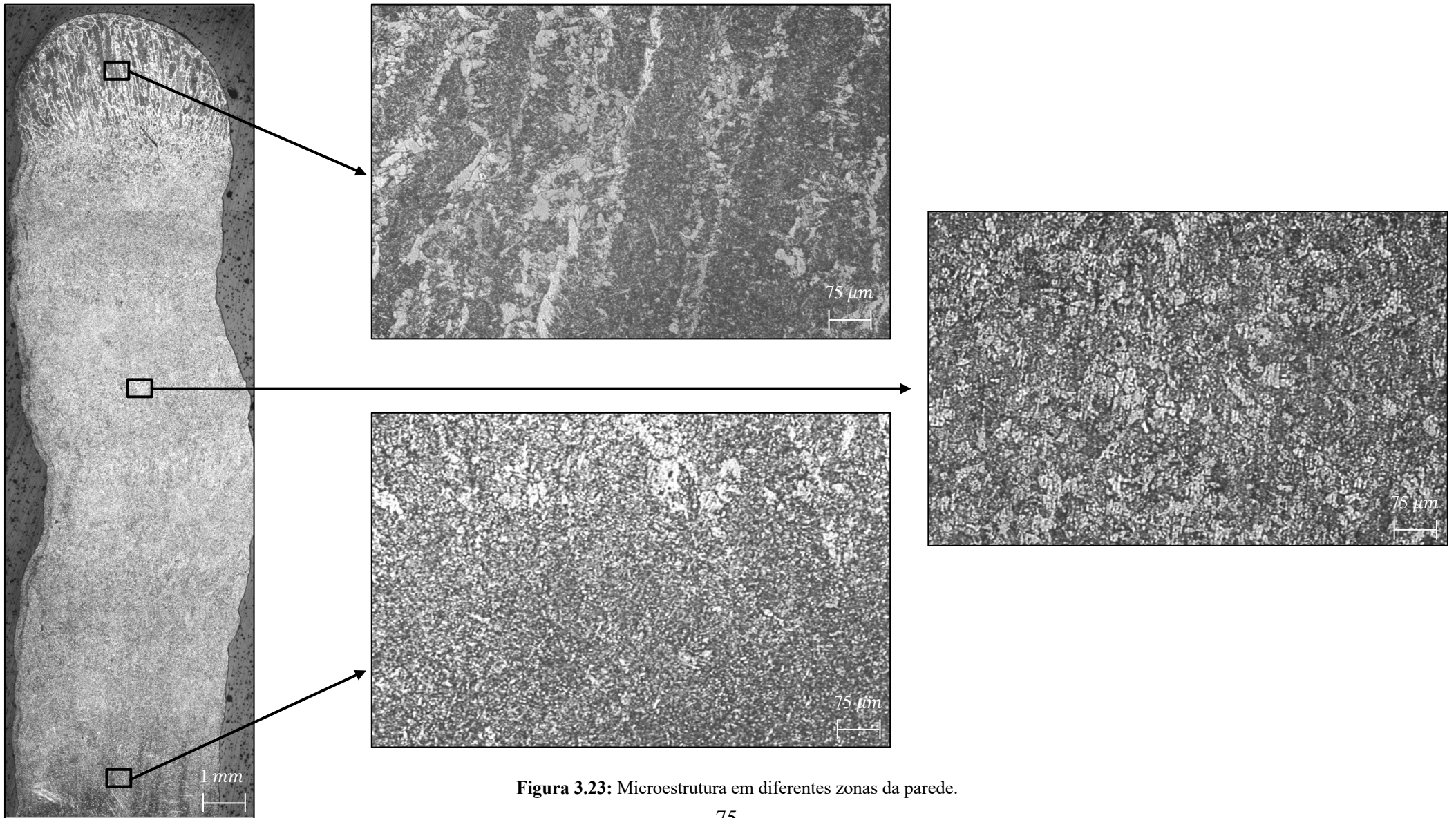


Figura 3.23: Microestrutura em diferentes zonas da parede.

Na figura que se segue será possível verificar os constituintes presentes na microestrutura da parede de soldadura.

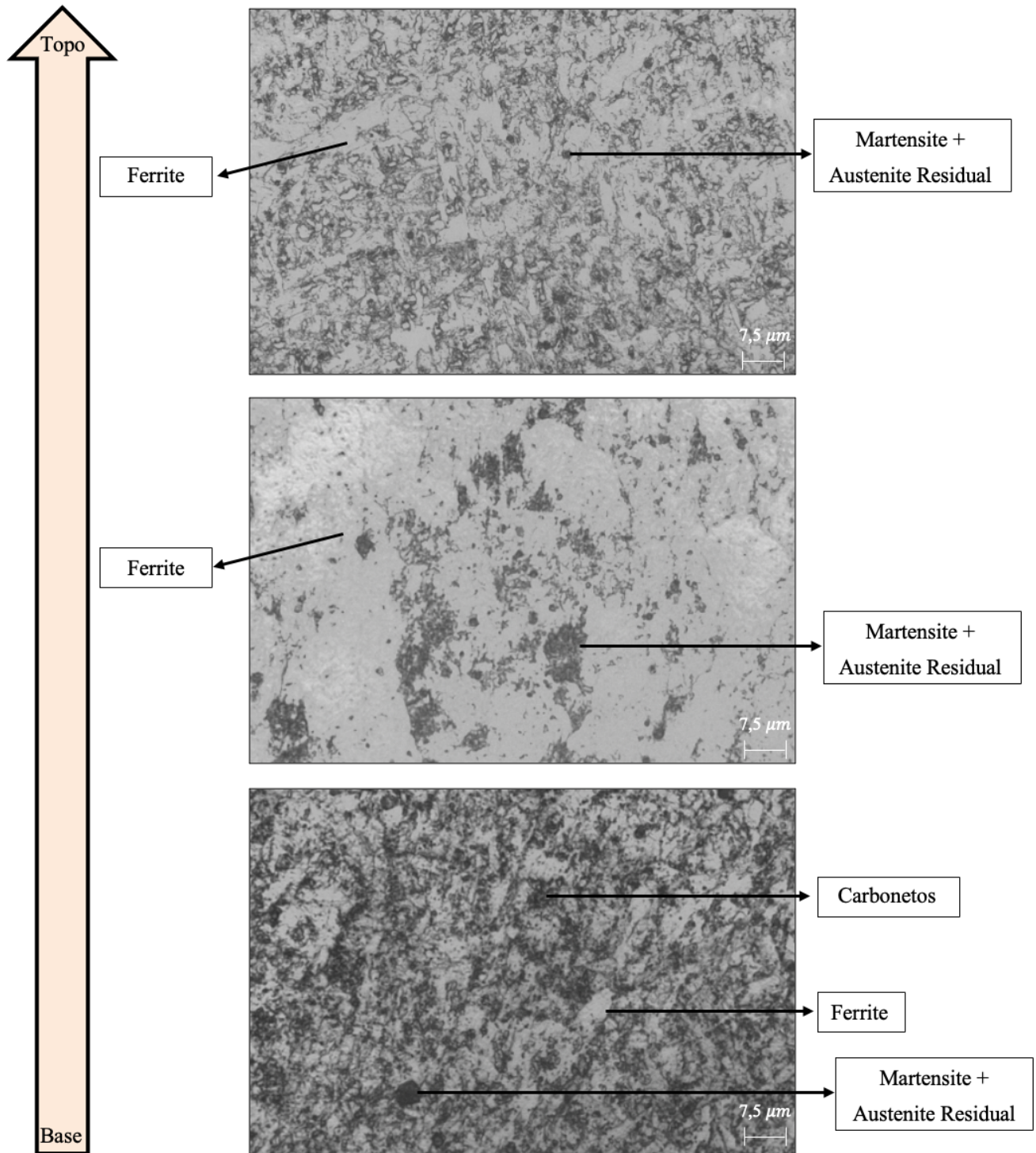


Figura 3.24: Constituintes presentes em cada uma das zonas da parede.

Observando a Figura 3.24 é possível verificar a existência dos principais constituintes presentes na microestrutura, sendo estes a ferrite, a martensite, a austenite residual e os carbonetos. Assim sendo, é possível verificar que na base da parede existe uma elevada quantidade de carbonetos, evidenciados pelas manchas de cor preta, contudo, é possível concluir que existe uma discrepância no que concerne à quantidade deste constituinte em toda a microestrutura da seção transversal, podendo tal ser justificado tendo em consideração o elevado teor de carbonos que compõe o substrato. Relativamente à presença de ferrite na microestrutura é possível observar que é no centro da parede que esta é mais predominante, apresentando-se como uma possível justificação não só a recristalização a que é sujeita, devido à temperatura elevada a que se encontra a camada $n + 1$, como também ao lento arrefecimento, proporcionado pela presença de escória que atua como uma manta térmica, permitindo assim a transformação de austenite maioritariamente em ferrite. No que diz respeito à presença de martensite na microestrutura é possível verificar que é no topo e na base da parede que esta é mais predominante, podendo ser justificado tendo em conta as elevadas taxas de arrefecimento a que os extremos da parede estão sujeitos, seja pelo contacto com o substrato, que se encontra a uma temperatura inferior à temperatura de deposição do material, ou pelo arrefecimento devido ao contacto com a atmosfera.

3.5. Avaliação das Propriedades Mecânicas

Como referido no subcapítulo 2.4 a avaliação das propriedades mecânicas foi realizada com o propósito de analisar não só a dureza, como a resistência à tração da parede obtida através da condição otimizada. Sendo assim, e observando a Figura 3.25, é possível verificar os valores de microdurezas ao longo de toda a parede de soldadura.

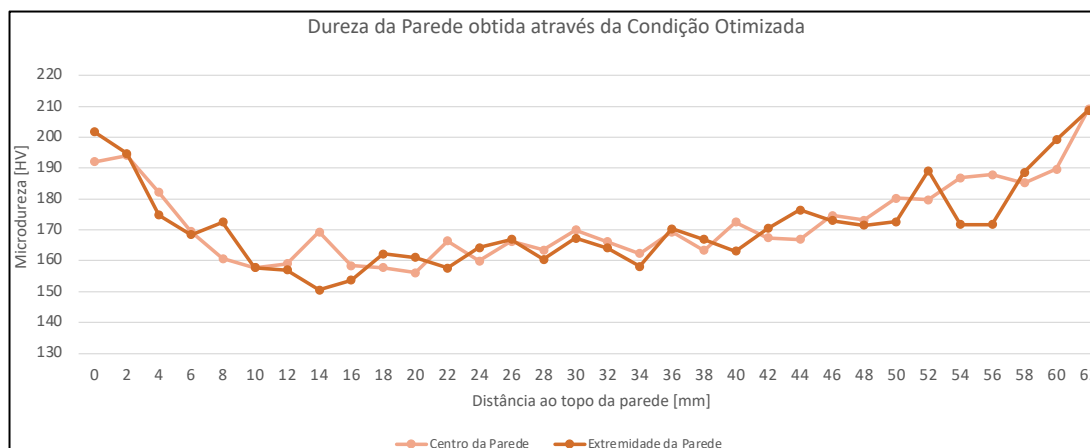


Figura 3.25: Valores de microdurezas da parede obtida através da condição otimizada.

Observando a figura anterior é possível verificar a existência de uma discrepância de valores de microdurezas ao longo da parede de soldadura, sendo a microdureza mais elevada na primeira e na última camada. Reiterando o que fora referido no ponto anterior, as camadas extremas estão sujeitas a elevadas taxas de arrefecimento, seja pelo contacto com o substrato, como é o caso da primeira camada, ou pelo contacto com a atmosfera, como acontece na última camada. Correlacionando o que fora mencionado não só no subcapítulo 3.4, como também no presente subcapítulo, é possível verificar que os elevados valores de microdurezas, presente nos extremos da parede, dizem respeito à martensite, como era de esperar, tendo em consideração a microestrutura analisada no ponto anterior. Por outro lado, e considerando os valores de microdurezas do meio da parede, é possível verificar que são inferiores, em comparação com os valores dos extremos, estando estes associados ao constituinte ferrite, como era de esperar, tendo em conta o que fora referido anteriormente.

Permutando para os ensaios de tração, e observando a Figura 3.26, será possível verificar os 4 (quatro) gráficos de tensão *versus* deformação, referente a cada um dos provetes. Assim sendo, e por forma a facilitar a análise do gráfico, procedeu-se à introdução dos parâmetros de tensão limite de escoamento, tensão máxima, tensão de fratura e deformação numa tabela, estando na Tabela 3.14 os respetivos valores.

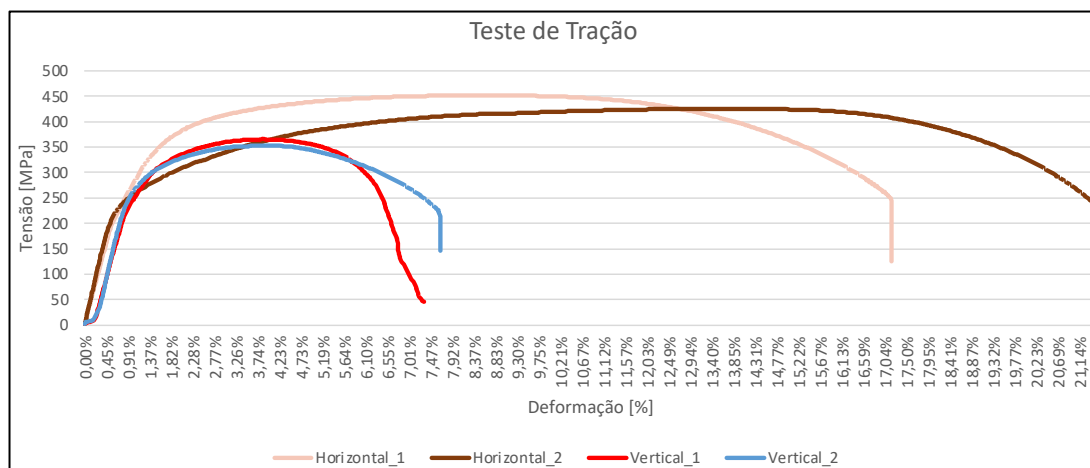


Figura 3.26: Gráficos de tensão versus deformação para os 4 provetes.

Tabela 3.14: Resultados obtidos dos ensaios de tração.

	Horizontal_1	Horizontal_2	Vertical_1	Vertical_2
Tensão Limite de Escoamento [MPa]	198,7	150,5	228,9	223
Tensão Máxima [MPa]	451,9	425,8	365,5	353,4
Tensão de Fratura [MPa]	249,4	235,6	169,6	220,4
Deformação [%]	18,2	21,5	6,6	8

Considerando a diferença de valores entre a tensão máxima e a deformação, de acordo com a direção dos provetes, é o parâmetro da deformação que se apresenta como o mais relevante, como é possível verificar pela discrepância de valores entre os 4 (quatro) ensaios (Tabela 3.14). A disparidade característica da deformação pode ser justificada tendo em conta a uniformidade de grãos em toda a parede, ou seja, é exequível afirmar que na direção de deposição, isto é, na direção horizontal, haja uma maior uniformidade de grãos, quando comparado com a direção vertical. Assim sendo, e considerando a uniformidade dos grãos na direção horizontal, é de expectar que a deformação seja maior na horizontal, uma vez que a força a aplicar para deformar o provete é uniforme.

Por outro lado, e considerando a assimetria dos grãos na direção vertical, é de esperar que a deformação na vertical seja menor, uma vez que a força necessária a aplicar ao provete para o deformar tem que ser coerente com a deposição dos grãos ao longo da direção vertical.

Como referido anteriormente, quando comparados os parâmetros da tensão máxima com a deformação é o último que se apresenta com maior relevância, podendo tal ser justificando tendo em consideração a proximidade dos valores da tensão máxima, apresentando uma diferença de 28%, pelo que é possível afirmar que o fenómeno da anisotropia não influencia de um grande modo o parâmetro referente à tensão máxima. A principal justificação para a existência deste fenómeno baseia-se no crescimento dos grãos na direção do fluxo, ou seja, na direção vertical, pelo que não se verifica um igual crescimento de grão na direção horizontal.

No que concerne ao parâmetro referente à fratura, nomeadamente aos tipos de fratura, este será abordado mais adiante, aquando da análise das observações das superfícies de fratura no MEV, contudo, e tendo em conta não só o gráfico da Figura 3.26, como também o que fora referido anteriormente, nomeadamente referente à ductilidade, é possível afirmar que os provetes de direção horizontal são mais dúcteis, quando comparado com os provetes de direção vertical. Posto isto, e observando as figuras que se seguem (Figura 3.27 e Figura 3.28) será possível verificar a superfície de fratura de 2 (dois) dos 4 (quatro) provetes, um referente à direção vertical e outro referente à direção horizontal.

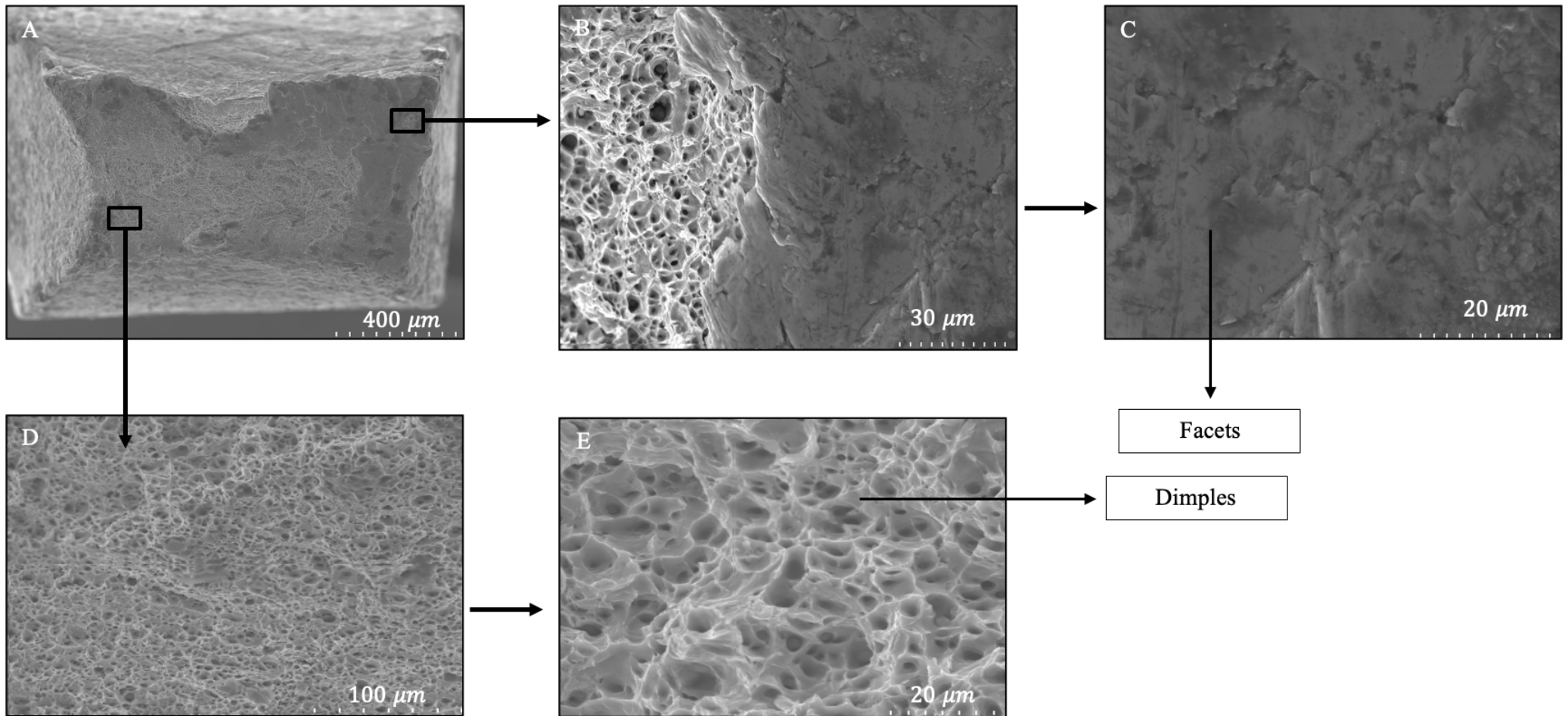


Figura 3.27: Superfície de fratura do provete vertical.

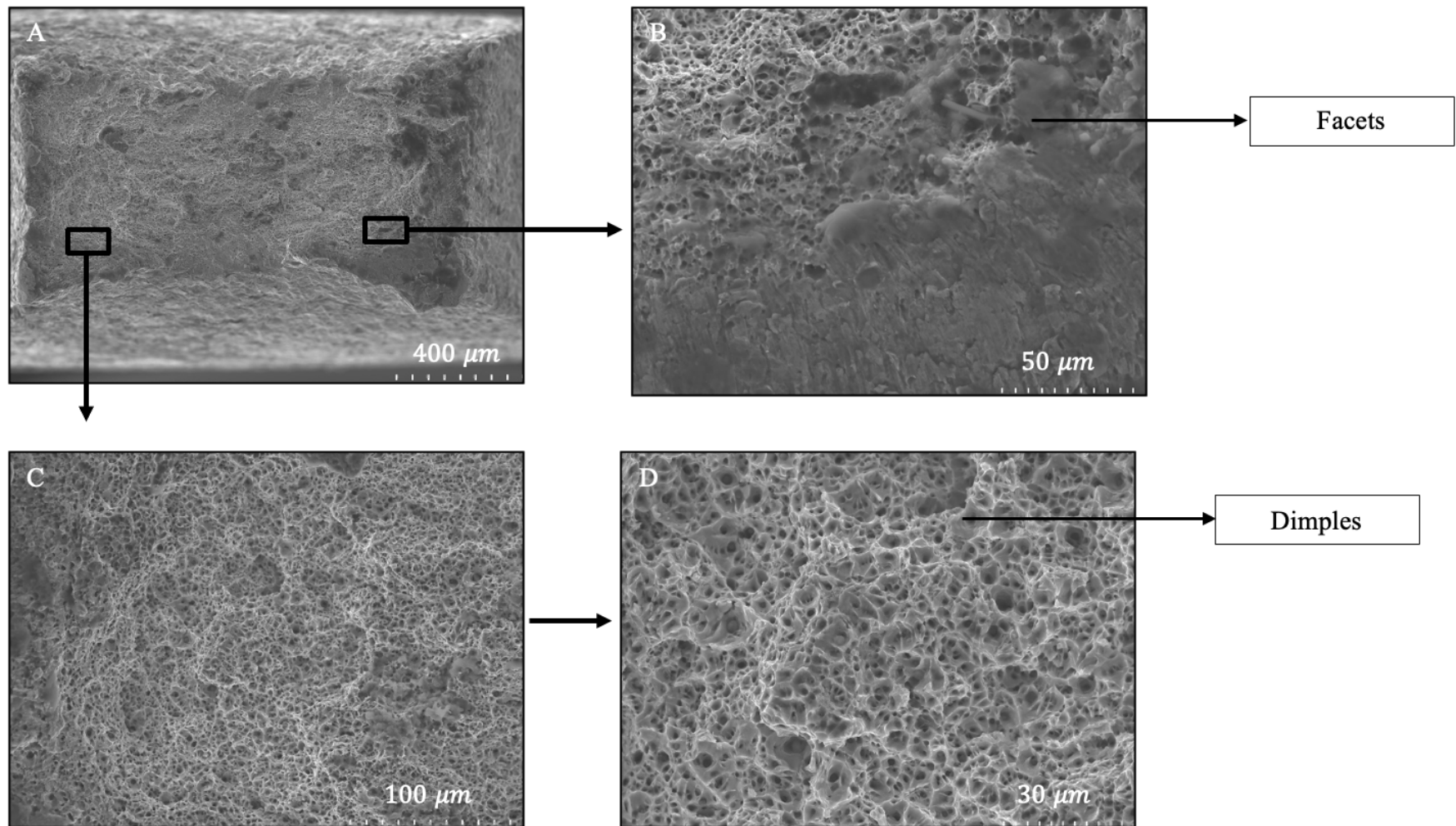


Figura 3.28: Superfície de fratura do provete horizontal.

Como fora referido no subcapítulo 2.3, recorreu-se ao MEV com o intuito de analisar o tipo de fratura dos provetes de tração, podendo este ser frágil, característico de uma deformação plástica muito pequena antes de ocorrer a fratura, ou dúctil, se ocorrer uma grande deformação plástica, *à priori* da fratura. Posto isto, e observando a Figura 3.27-A e, mais pormenorizadamente, a Figura 3.29, é possível verificar a existência de 2 (duas) zonas distintas, uma central, referente à fratura dúctil, e uma localizada na zona mais à direita da superfície, característica da fratura frágil. Em seguimento do que fora referido anteriormente, e observando a Figura 3.27-B, é possível verificar a fronteira entre a fratura dúctil, representada pelos *dimples* (estrutura de taça e cone), e a fratura frágil, representada pelos *facets* (planos de clivagem).

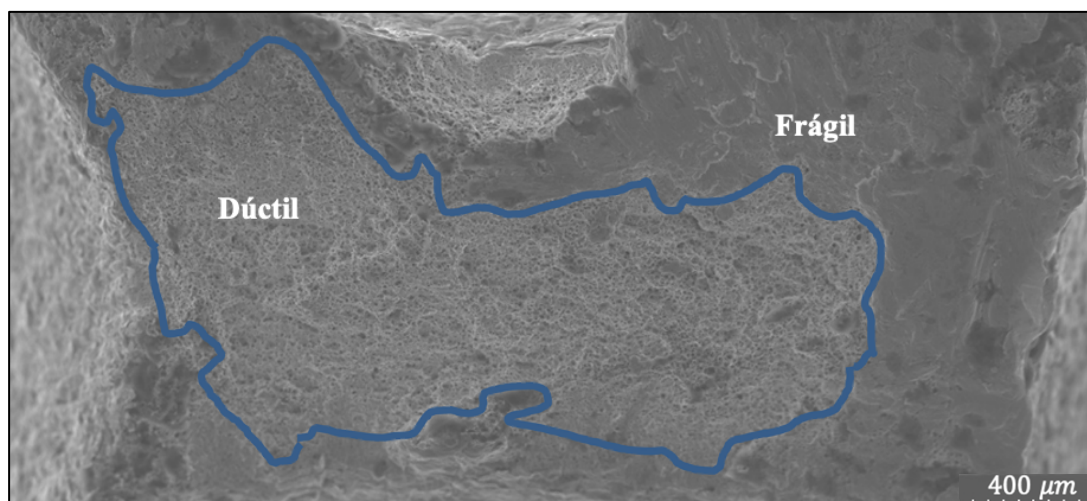


Figura 3.29: Zonas distintas de fratura do provete vertical.

No que diz respeito à Figura 3.28-A e, mais detalhadamente, à Figura 3.30, é possível observar a presença de 2 (duas) zonas distintas, referentes ao tipo de fratura. Observando a Figura 3.28-B, que resulta da ampliação da Figura 3.28-A, é possível verificar, à semelhança do que já se tinha verificado no provete vertical, a fronteira dos 2 (dois) tipos de fratura.

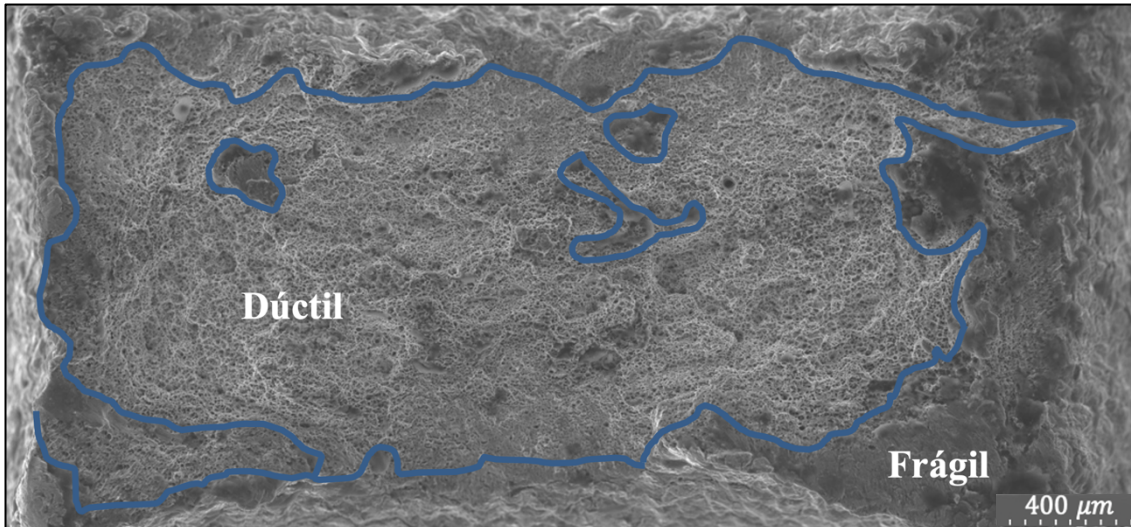


Figura 3.30: Zonas distintas de fratura do provete horizontal.

Em suma, e tendo em conta a presença de *dimples*, característicos da fratura dúctil, ou de *facets*, característicos da fratura frágil, em ambas as direções, é possível verificar que nos provetes de direção horizontal há maior presença de *dimples*, ou seja, fratura dúctil, o que seria de esperar tendo em conta o gráfico presente na Figura 3.26.

Conclusão

A tecnologia do FA tem vindo a ser aprimorada com o intuito de colmatar a pegada logística que se faz sentir nos teatros de operações. A inclusão desta tecnologia nas áreas de operações revela-se bastante promissora, não só para mitigar a distribuição dos materiais, em vista a substituir os que se encontram obsoletos, como também para colmatar o tempo decorrido entre a falha e o restauro. Assim sendo, o FA pretende dimensionar e operacionalizar a capacidade de fabricação, operacionalizando as Forças Armadas.

Apresentando-se como o objetivo primordial da presente Dissertação, a possível aplicabilidade do material de adição com fluxo rutílico nos aços de alta resistência foi analisada ao longo da mesma, através da realização de inúmeros ensaios e testes. Na vertente operacional, e a bordo dos navios da Classe *Viana do Castelo*, considera-se exequível a inserção da tecnologia do FA, empregando como material de adição a liga de aço revestida com fluxo rutílico. A evolução desta Dissertação adveio de uma questão central e, conseqüentemente, de 5 (cinco) questões derivadas, que serão respondidas atendendo aos resultados obtidos.

QD1: Quais os parâmetros, e respetivos intervalos de valores, a estudar?

No que concerne aos parâmetros empregues é de referir o caudal do gás de proteção, a distância do bico de soldadura ao substrato, a velocidade de alimentação do fio, a velocidade de soldadura e, por fim, a tensão do arco. Os valores referentes aos parâmetros constantes foram definidos tendo em consideração os valores que os estudantes de doutoramento estavam a empregar nas suas teses, nomeadamente os $18l/min$, como caudal do gás de proteção, e os 10 mm , como distância do bico de soldadura ao substrato. No que diz respeito aos valores relativos aos parâmetros não constantes, nomeadamente aos valores da tensão, velocidade de alimentação e velocidade de soldadura foram definidos tendo como ponto de partida não só o *Data Sheet* do fabricante, como também a avaliação visual da qualidade geométrica dos cordões.

Assim sendo, os intervalos de valores considerados aptos foram os seguintes: WFS [4 – 5] m/min , TS [480 – 680] mm/min e $U = [21 – 23]$ V .

QD2: A alteração do caudal do gás de proteção tem influência na porosidade, microdureza e geometria dos cordões e das paredes?

Por forma a avaliar a influência do caudal do gás de proteção quer ao nível das porosidades, microdurezas e geometria definiu-se 6 (seis) valores distintos de caudal, sendo estes 0, 3, 5, 10, 15 e 18 l/min . Partindo da análise de porosidades, e tendo em consideração que quanto menor for o valor de densidade associado, maior é o número de espaços vazios e de poros, verificou-se que os menores valores do caudal do gás de proteção, isto é, 0 e 3 l/min , apresentam baixos valores de volume de vazios e de poros, como seria de esperar. Assim sendo, é exequível afirmar que a alteração do caudal do gás de proteção influencia a porosidade das paredes de soldadura. A literatura afirma que quanto menor for o valor do caudal do gás de proteção, maior serão os valores de microdurezas, tendo em consideração a dureza associada aos óxidos. Contudo, e sabendo que o material de adição em estudo é revestido com fluxo rutilico e que tem, à semelhança do gás de proteção, possibilidade de proteger o material, a teoria anteriormente citada não se aplica à presente Dissertação, como foi possível observar nos gráficos. Relativamente à geometria dos cordões, à medida que se aumenta o valor do caudal do gás de proteção há, conseqüentemente, maior quantidade de calor no banho de fusão, pelo que quanto maior for o caudal do gás de proteção, maior será o valor referente à largura e penetração, contudo, menor será o valor da altura. Os gráficos referentes a estes parâmetros estão de acordo com a teoria, sendo de mencionar apenas o gráfico da largura, quando o caudal é 15 l/min , que apresenta um valor ligeiramente inferior ao que seria de esperar.

QD3: A alteração da velocidade de soldadura tem influência na porosidade e microdureza das paredes?

Com o intuito de avaliar a influência da velocidade de soldadura quer ao nível das porosidades, quer ao nível das microdurezas, definiu-se 5 (cinco) valores de velocidade de soldadura díspares, sendo estes 475, 500, 525, 550 e 650 mm/min .

Tendo em conta o que fora referido anteriormente, no que diz respeito à análise das porosidades, verificou-se que maiores valores de velocidade de soldadura, isto é, 550 e 650mm/min, apresentam elevados valores de volume de vazios e de poros, como seria de esperar, uma vez que quanto maior o valor da velocidade de soldadura, maior é a dificuldade sentida pelo gás de proteção para proteger o cordão. No que diz respeito à avaliação das microdurezas, não se verificou qualquer relação entre a velocidade de soldaduras e os valores de microdurezas, como já se tinha verificado na literatura.

QD4: Qual a condição ideal de parâmetros que otimiza o processo?

A obtenção da condição de parâmetros ideal teve como ponto de partida a escolha dos valores referentes aos parâmetros U , TS e WFS , tendo o intervalo de valores de cada um deles sido definido não só com base nos testes e ensaios anteriormente efetuados, como também nas conclusões retiradas de cada um destes. Assim sendo, o intervalo de valores dos parâmetros acima mencionados foram os seguintes: WFS [4 – 5]m/min, : TS [400 – 525]mm/min e $Arc Voltage$ [21 – 23]V. À priori de obter a condição de parâmetros otimizada o *Minitab* requeria a seleção da maximização e da minimização das (cinco) variáveis de resposta, tendo em consideração as necessidades e características dos navios. Assim sendo, a condição ideal de parâmetros obtida foi a seguinte: $WFS = 4,7$ m/min, $TS = 447$ mm/min e $U = 22V$.

QD5: Qual o comportamento microestrutural e mecânico da parede obtida através da condição otimizada?

No que concerne ao comportamento microestrutural verificou-se passagem de grãos colunares para grãos refinados, apresentando-se como uma possível justificação a taxa de arrefecimento. Assim sendo, e considerando que o topo da parede apresenta uma elevada taxa de arrefecimento, haverá um súbito arrefecimento, devido ao contacto com a atmosfera, sendo o tempo disponível à recristalização menor pelo que os grãos tendem a manter-se de elevado tamanho. No que diz respeito à base da parede verificou-se uma elevada presença de carbonetos, tendo esta sido justificada tendo por base a elevada percentagem de carbono que compõe o substrato, quando em comparação com o material de adição.

Na região central da parede verificou-se a presença de ferrite, podendo tal ser justificado tendo em conta o lento arrefecimento, permitindo assim a transformação da austenite em ferrite. No que concerne à martensite verificou-se uma elevada presença deste constituinte nos extremos da parede, podendo tal presença ser fundamentada tendo em conta as elevadas taxas de arrefecimento que se fazem sentir nas extremidades da parede.

Em relação ao comportamento mecânico verificou-se a presença do fenómeno da anisotropia, através da observação da disparidade de valores na direção vertical e na direção horizontal. Dos parâmetros inerentes ao ensaio de tração, é o da deformação que se apresenta mais relevante, podendo a discrepância de valores ser justificada tendo em conta que na direção horizontal há uma maior uniformidade de grãos e, conseqüentemente, uma força para deformar o provete mais uniforme, quando comparada com a direção vertical. Através da observação das superfícies de fratura no MEV verificou-se que nos provetes de direção horizontal há maior presença de *dimples*, característicos da fratura dúctil, algo que já se tinha verificado aquando da análise do gráfico da tensão *versus* deformação.

QC: É possível adaptar o FCAW-rutílico em WAAM para aços de alta resistência? Se sim, quais as vantagens?

As respostas às questões derivadas permitiram abordar a questão central de modo assertivo. A aplicabilidade de empregar a liga de aço revestida com fluxo rutílico a bordo da Classe *Viana do Castelo* foi analisada, ao longo da presente Dissertação, e, através de inúmeros ensaios e testes, dado o aval para a utilização do FCAW-rutílico. Uma das principais vantagens na aplicação desta tecnologia na Marinha Portuguesa centra-se na possibilidade de reduzir o caudal do gás de proteção em cerca de 72%, tornando o processo bastante mais económico. Além disto, esta tecnologia apresenta-se como uma alternativa aos inúmeros processos utilizados na construção dos materiais para os navios, aumentando assim a diversidade de processos disponíveis. As 2 (duas) últimas vantagens a enumerar são relativas à microestrutura e às propriedades mecânicas.

Relativamente à microestrutura verificou-se que esta é bastante refinada, o que promove o aumento da resistência mecânica devido ao contorno do grão que atua como uma barreira ao movimento das discordâncias. No que diz respeito às propriedades mecânicas verificou-se a existência de elevados valores de resistência à tração, o que se apresenta como uma vantagem bastante significativa, tendo em conta os possíveis esforços a que o material pode vir a estar sujeito.

Trabalhos Futuros

Sendo o Fabrico Aditivo por WAAM uma área com grande margem de evolução, são vários os trabalhos futuros que podem proporcionar o crescimento desta tecnologia, entre os quais:

- ⇒ Realização do tratamento térmico de normalização por forma a avaliar o efeito do ciclo térmico nas propriedades mecânicas;
- ⇒ Análise do comportamento à fadiga de peças fabricadas por *FCAW-rutílico em WAAM*;
- ⇒ Avaliar a resistência à corrosão de peças fabricadas por *FCAW-rutílico em WAAM*, considerando que as peças fabricadas são para fins navais;
- ⇒ Análise de uma nova variante de WAAM, o Hot - Forging.

Referências Bibliográficas

- [1] Gonzáles, D.S. (2018). *Additive Manufacturing Feasibility Study & Technology Demonstration*. European Defence Agency.
https://eda.europa.eu/docs/default-source/projects/eda-am-study-and-strategic-report_v6.pdf
- [2] O'Neal, B. (2016). *3D printing Sails Along Smoothly on the USS.Harry S. Truman*.
<https://3dprint.com/136997/uss-harry-s-truman-3d-lab/>
- [3] Burgess, A. (2015). *3D-printed plane takes flight from British Royal Navy ship*.
<https://www.themanufacturer.com/articles/3d-printed-plane-takes-flight-from-british-royal-navy-ship/>
- [4] Sertoglu, K. (2021). *Naval group has 3D printed a one - tonne ship propeller for the french navy*.
<https://3dprintingindustry.com/news/naval-group-has-3d-printed-a-one-tonne-ship-propeller-for-the-french-navy-182400/>
- [5] Goulding, C. (2021). *Combining Forces In 3D Printing: The US And UK Navies*.
<https://www.fabbaloo.com/news/combining-forces-in-3d-printing-the-us-and-uk-navies>
- [6] Gibson, I., Rosen, D., & Strucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies* (2ª Edição).
http://eprints.ukh.ac.id/id/eprint/183/1/2015_Book_AdditiveManufacturingTechnolog.pdf
- [7] Jiménez, M., Romero, L., Domínguez, I.A., Espinosa, M del M., & Domínguez, M. (2019). *Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects*.
<https://doi.org/10.1155/2019/9656938>
- [8] Centro de Ciência Viva, F. (2020). *Projeto 3D Mask Portugal*. Aveiro
<https://www.ua.pt/pt/fabrica/3dmask>

- [9] Singh, R., Gupta, A., Tripathi, O., Srivastava, S., Singh, B., Awasthi, A., Rajput, S.K., Sonia, P., Singhal, P., & Saxena, K.K. (2020). Powder bed fusion process in additive manufacturing: na overview. In *Materials Today: Proceedings*, 26(2), 3058-3070.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.635>
- [10] Tack, P., Victor, J., Gemmel, P., & Annemans, L (2016). *3D-printing techniques in a medical setting: a systematic literature review*.
<https://doi.org/10.1186/s12938-016-0236-4>
- [11] Berman, B. (2012). 3D - printing: The new industrial revolution. In *Business Horizons*, 55(2), 155-162.
<https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>
- [12] Carreira, J. (2017). *Design e otimização de peças estruturais metálicas para processos de fabricação aditiva*. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/11876/1/DM_JoseCarreira_2017_MEM.pdf
- [13] Volpato, N. (2017). *Manufatura Aditiva- Tecnologias e aplicações da impressão 3D*
- [14] Kolaveric, B. (2001). *Digital Fabrication: Manufacturing Architecture in the Information Age*. University of Pennsylvania, USA.
<http://papers.cumincad.org/data/works/att/81b8.content.pdf>
- [15] *The 7 Categories of Additive Manufacturing*. Loughborough University. (2021).
<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>
- [16] Mostafaei, A., Elliott, A.M., Barnes, J.E., Li, F., Tan, W., Crammer, C.L., Nandwana, P., & Chmielus, M. (2021). Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges. In *Progress in Materials Science*.
<https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100707>
- [17] Trenfield, S.J., Madla, C.M., Basit, A.W., & Gaisford, S. (2018). Binder Jet Printing in Pharmaceutical Manufacturing. In *3D Printing of Pharmaceuticals*.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-90755-0_3
- [18] Wahlström, T., & Sahlström, J. (2016). *Additive Manufacturing in Production- For the Automotive Industry*. Lund University Libraries.
<http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/8868478>

- [19] Heigel, J.C., Michaleris, P., & Reutzel, E.W. (2015). Thermo-mechanical model development and validation of directed energy deposition additive manufacturing of Ti-6Al-4V. In *Additive Manufacturing*, 5, 9-19.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.10.003>
- [20] *Estudo e diagnóstico das oportunidades da manufatura aditiva metálica para o setor aeroespacial na região SUDOESTE*.
<https://www.addispace.eu/gestor/recursos/uploads/imagenes/noticias/09>
- [21] Santos, J. (2018). *Cost Estimation Model for the Directed Energy Deposition Process Adopting an Activity - Based Approach*. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/14021/1/DM_JoaoSantos_2018_MEM.pdf
- [22] Pagac, M., Hajnys, J., Ma, Q.P., Jancar, L., Jansa, J., Stefek, P., & Mesicek, J. (2021). *A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing*.
<https://doi.org/10.3390/polym13040598>
- [23] Kauppila, I. (2022). *What Is Material Jetting? – 3D Printing Basics*.
<https://all3dp.com/2/what-is-material-jetting-3d-printing-simply-explained/>
- [24] *3D printing additive*. (2018).
<https://make.3dexperience.3ds.com/processes/material-jetting>
- [25] Varotsis, A.B. (2016). *Introduction to material jetting 3D printing*.
<https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-material-jetting-3d-printing/>
- [26] Yan, C., Hao, L., Yang, L., Hussein, Y., Young, P.G., Li, Z., & Li, Y. (2021). Introduction. In *Triply Periodic Minimal Surface Lattices Additively Manufactured by Selective Laser Melting*, 1-25.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824438-8.00001-7>
- [27] Laminated Object Manufacturing. In *Manufacturing Guide*.
<https://www.manufacturingguide.com/en/laminated-object-manufacturing-lom>
- [28] Peng, F., Vogt, B.D., & Cakmak, M. (2018). Complex flow and temperature history during melt extrusion in material extrusion additive manufacturing. In *Additive Manufacturing*, 22, 197-206.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.05.015>

- [29] Zhang, X., & Liou, F. (2021). Introduction to additive manufacturing. In *Additive Manufacturing*, 1–31.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818411-0.00009-4>
- [30] Walker, J.L., & Santoro, M. (2017). Processing and production of bioresorbable polymer scaffolds for tissue engineering. In *Bioresorbable Polymers Biomedical Applications*, 181–203.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100262-9.00009-4>
- [31] Velu, R., Jayashankar, D.K., & Subburaj, K. (2021). Additive processing of biopolymers for medical applications. In *Additive Manufacturing*, 635-659.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818411-0.00019-7>
- [32] Frazier, W.E. (2014). Metal Additive Manufacturing. In *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23, 1917-1928.
<https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>
- [33] Bhavar, V., Kattire, P., Patil, V., Khot, S., Singh, R., & Gujar, K. (2014). *A review on powder bed fusion technology of metal additive manufacturing*.
https://www.researchgate.net/publication/285982651_A_review_on_powder_bed_fusion_technology_of_metal_additive_manufacturing
- [34] Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Xu, J., & Norrish, J. (2018). A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. In *Journal of Manufacturing Processes*, 35, 127-139.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>
- [35] Chaturvedi, M., Scutelnicu, E., Rusu, C.C., Mistodie, L.R., Mihailescu, D., & Subbiah, A.V. (2021). Wire Arc Additive Manufacturing: Review on Recent Findings and Challenges in Industrial Applications and Materials Characterization. In *Metals*.
<https://doi.org/10.3390/met11060939>
- [36] Baker, R. (1925). *Method of making decorative articles*.
<https://patentimages.storage.googleapis.com/83/25/a2/c6e506fcb62cf6/US1533300.pdf>
- [37] Rodrigues, T.A., Duarte, V., Miranda, R.M., Santos, T.G., & Oliveira, J.P. (2019). Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). In *Materials*.
<https://doi.org/10.3390/ma12071121>

- [38] Mourão, J. (2020). *Inovação tecnológica do processo WAAM com vibração mecânica do banho de fusão*. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Nova de Lisboa.
https://run.unl.pt/bitstream/10362/120677/1/Mourao_2020.pdf
- [39] Liu, H., & Hu, Y. (2022). Welding. In *Encyclopedia of Materials Metals and Alloy*, 3, 39–65.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819726-4.00143-5>
- [40] What is Mig (GMAW) Welding?. (2019). Universal Technical Institute.
<https://www.uti.edu/blog/welding/gmaw-mig-welding>
- [41] Dinbandhu., Prajapati, V., Vora, J.J., & Abhishek, K. (2021). Advances in gas metal arc welding process: modifications in short-circuiting transfer mode. In *Advanced Welding and Deforming*, 67–104.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822049-8.00003-7>
- [42] Lucas, W., & Westgate, S. (2003). Welding and Soldering. In *Electrical Engineer's Reference Book*.
<https://doi.org/10.1016/B978-075064637-6/50010-1>
- [43] *What is Flux - Cored Arc Welding (FCAW aka dual shield welding)?*. (2022)
<https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/flux-cored-arc-welding-fcaw>
- [44] Antonini, J.M. (2014). Health Effects Associated with Welding. In *Comprehensive Materials Processing*, 8, 49–70.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00807-4>
- [45] Smith, P. (2007). Fabrication, Assembly, and Erection. In *The Fundamentals of Piping Design*, 171–189.
<https://doi.org/10.1016/B978-1-933762-04-3.50015-1>
- [46] Mallick, P. (2021). Joining for lightweight vehicles. In *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*, 321–371.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818712-8.00008-2>

- [47] Muncaster, P.W. (1991). Advantages and applications. In *A Practical Guide to TIG Weld*, 10–14.
<https://doi.org/10.1533/9781845698720.15>
- [48] Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. (2015). *Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests*, 465-481.
<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>
- [49] Duarte, V.R., Rodrigues, T.A., Schell, N., Miranda, R.M., Oliveira, J.P., & Santos, T.G. (2020). Hot forging wire and arc additive manufacturing (HF-WAAM). In *Additive Manufacturing*.
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101193>
- [50] Nunes, I.P. *Ensaio de Dureza Vickers*.
- [51] Naidu, D.S., Ozcelik, S., & Moore, K.L. (2003). Gas Metal Arc Welding: Modeling. In *Modeling, Sensing and Control Gas Metal Arc Welding*.
<https://doi.org/10.1016/B978-008044066-8/50004-5>
- [52] ASTM (2012). *Standard Method of Knoop and Vickers hardness of materials*.
- [53] Vyskoč, M., Dománková, M., Sahul, M., & Vyskočová, M. (2020). *The Effect of the Shielding Gas Flow Rate on the Geometry, Porosity, Microstructure and Mechanical Properties of Laser Weld Joints*.
<https://doi.org/10.2478/rput-2020-0021>
- [54] Vyskoč, M., Sahul, M., Dománková, M., Jurči, P., Sahul, M., Vyskočová, M., & Martinkovič, M. (2020). The Effect of Process Parameters on the Microstructure and Mechanical Properties of AW5083 Aluminum Laser Weld Joints. In *Metals*.
<https://doi.org/10.3390/met10111443>
- [55] Calado, V., & Montgomery, D. (2003). *Planejamento de Experimentos usando o Statistica*.
- [56] Jankovic, A., Chaudhary, G., & Goia, F. (2021). Designing the design of experiments (DOE) – An investigation on the influence of different factorial designs on the characterization of complex systems. In *Energy and Buildings*.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111298>
- [57] Montgomery, D. (2012). *Design and Analysis of Experiments*.
http://www.ru.ac.bd/stat/wp-content/uploads/sites/25/2019/03/502_06_Montgomery-Design-and-analysis-of-experiments-2012.pdf

- [58] Felice, I. (2020). *Avaliação Geométrica , Térmica e de Porosidade de Pré-formas em Manufatura Aditiva por Deposição a Arco com Resfriamento Ativo por Quase-Imersão*. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia.
- [59] Lippold, J. (2015). *Welding Metallurgy and Weldability*.
- [60] Silva, A.C. (2008). *Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns*.
- [61] Saba, N., Jawaid, M., & Sultan, M.T.H. (2019). An overview of mechanical and physical testing of composite materials. In *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00001-1>
- [62] Vaidya, A., & Pathak, K. (2019). Mechanical stability of dental materials. In *Applications of Nanocomposite Materials in Dentistry*.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813742-0.00017-1>
- [63] Suryakumar, S., Karunakaran, K., Chandrasekhar, U., & Somashekara, M. (2013). *A study of the mechanical properties of objects built through weld-deposition*. Institute of Mechanical Engineering.
<https://doi.org/10.1177/0954405413482122>
- [64] Ghaffari, M., Nemani, A.V., Rafieazad, M., & Nasiri, A. (2019). *Effect of Solidification Defects and HAZ Softening on the Anisotropic Mechanical Properties of a Wire Arc Additive- Manufactured Low- Carbon Low- Alloy Steel Part*.
<https://doi.org/10.1007/s11837-019-03773-5>
- [65] Quintino, L., & Santos, J.F. (1998). *Processos de Soldadura*.

Apêndice A- Parâmetros, valores e classificação dos cordões e paredes de soldadura

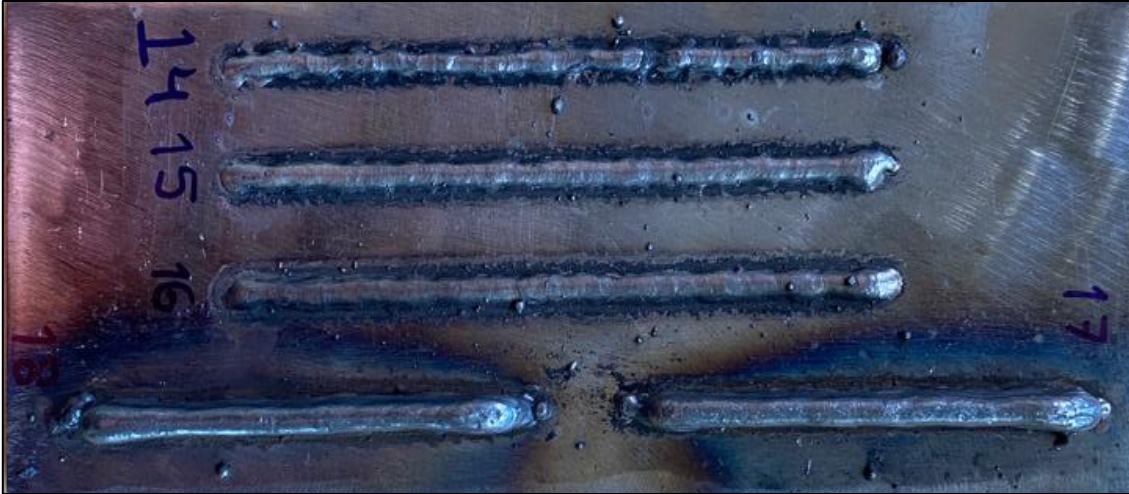
Número	WFS [m/min]	TS [mm/min]	Arc Voltage [U]	Número do Substrato	Classificação	Tipo
1	3	330	23	1º Substrato		Cordão
2	3	330	29			
3	3	330	19			
6	3	330	25	2º Substrato		Cordão
7	3	330	21			
9	3	380	19	3º Substrato		Cordão
10	3	380	21			
11	3	380	23			
12	3	380	21			Parede
13	3	380	23			
14	3	430	19	4º Substrato		Cordão
15	3	430	21			
16	3	430	23			
17	3	430	21			Parede
18	3	430	23			
19	4	330	19	5º Substrato		Cordão
20	4	330	21			
21	4	330	23			
22	4	330	19			Parede
23	4	330	21			
24	4	330	23			
25	4	380	19	6º Substrato		Cordão
26	4	380	21			
27	4	380	23			
28	4	380	19			Parede
29	4	380	21			
30	4	380	23			
31	4	430	19	7º Substrato		Cordão
32	4	430	21			
33	4	430	23			
34	4	430	19			Parede
35	4	430	21			
36	4	430	23			

Apêndice A – Parâmetros, valores e classificação dos cordões e paredes de soldadura

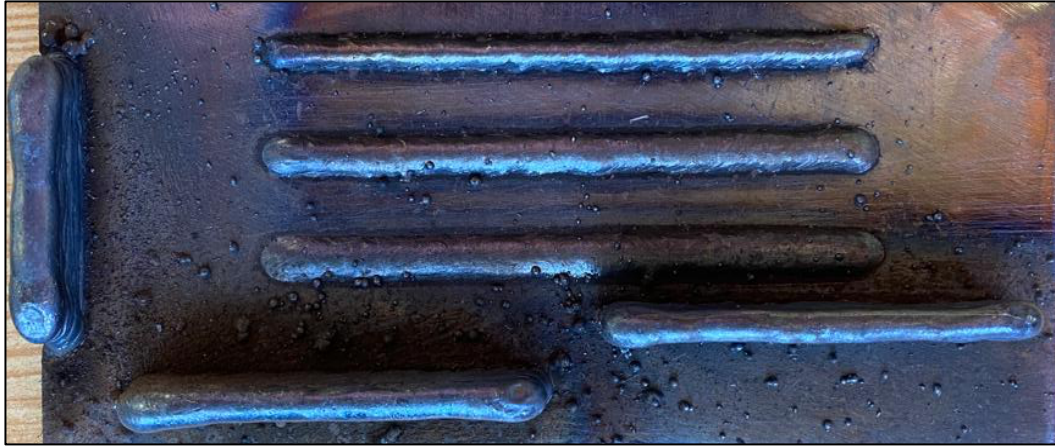
37	5	380	19	8º Substrato		Cordão
38	5	380	21			
39	5	380	23			Parede
40	5	380	19			
41	5	380	21			
42	5	380	23			
43	5	430	19	9º Substrato		Cordão
44	5	430	21			
45	5	430	23			Parede
46	5	430	19			
47	5	430	21			
48	5	430	23			
49	3	480	21	10º Substrato		Cordão
50	3	480	23			
51	4	480	21			
52	4	480	23			
53	5	480	21			
54	5	480	23			
55	3	530	21	11º Substrato		Cordão
56	3	530	23			
57	4	530	21			
58	4	530	23			
59	5	530	21			
60	5	530	23			
61	4	580	21	12º Substrato		Cordão
62	4	580	23			
63	5	580	21			
64	5	580	23			
65	4	680	21	13º Substrato		Cordão
66	4	680	23			
67	5	680	21			
68	5	680	23			
69	4	780	21			
70	4	780	23			
71	5	780	21	14º Substrato		Cordão
72	5	780	23			
73	4	850	21			
74	4	850	23			
75	5	850	21			
76	5	850	23			
77	6	500	21	15º Substrato		Cordão

Apêndice B - Cordões e paredes de soldadura com $WFS = 3 \text{ m/min}$





Apêndice C - Cordões e paredes de soldadura com $WFS = 4 \text{ m/min}$





Apêndice D - Cordões e paredes de soldadura com $WFS = 5 \text{ m/min}$

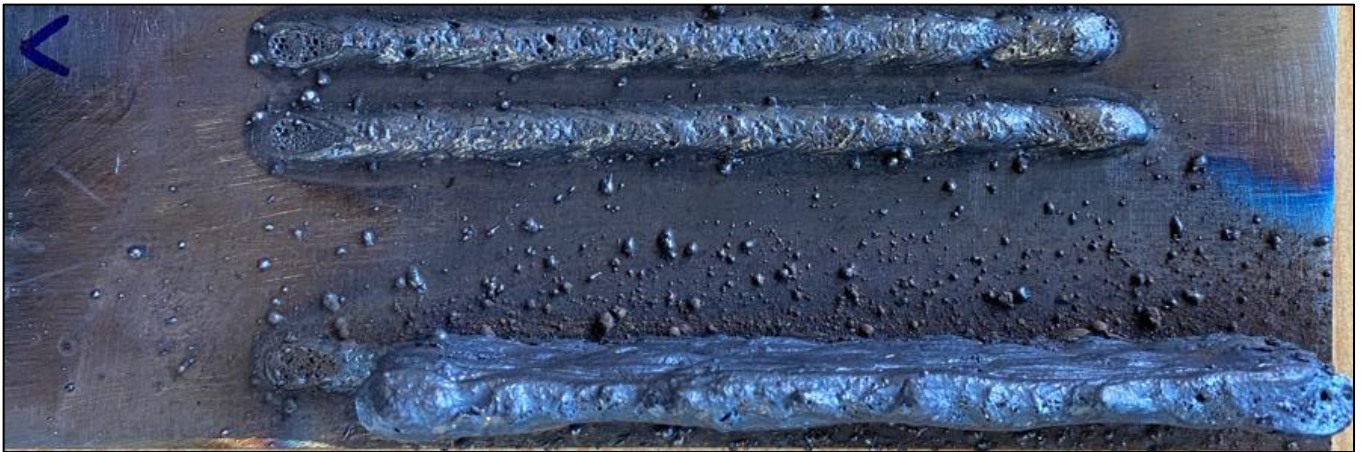




Apêndice E – Cordões e paredes de soldadura com diferentes valores de caudal de gás de proteção



Apêndice E. Cordões e paredes de soldadura com diferentes valores de caudal de gás de proteção



Apêndice F – Paredes de soldadura tendo em conta o planeamento de experiências





Anexo A – Características de construção dos navios da Classe *Viana do Castelo*

$B_{moulded}$	=	12.950	m.
B_{wc}	=	12.200	m
D	=	9.600	m
$D_{BORDO LIVRE}$	=	6.900	m
$T_{SCANTLING}$	=	4.250	m
$T_{PROJECTO}$	=	3.690	m
P	=	2x3900	kW
V_0	=	21	kn
$C_B_{SCANTLING}$	=	0.531	
$C_B_{PROJECTO}$	=	0.468	
$t_{LASTRO A VANTE}$	=	3.45	
$t_{LASTRO A RE}$	=	3.45	
$DESLOCAMENTO_{scantling}$	=	2175	T
$DESLOCAMENTO_{projecto}$	=	1747	T
AÇO RESISTÊNCIA STANDARD : NV-NS			
R_{eH}	=	235.000	N/mm^2
f_1	=	1.000	
AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA : NV-D36 (PAVIMENTO 01, A RÉ DA BALIZA 51,6)			
R_{eH}	=	355.000	N/mm^2
f_1	=	1.390	
CLASSIFICAÇÃO: DNV + 1A1 NAV.			
FIRE, EVAC, RAD			

Anexo B – Data Sheet do fabricante

FILARC Product Data Sheet

FILARC PZ6113

T 'Tubular cored electrode arc welding'

Prepared by Daniel Amahatsion	Qualified by P-O Oskarsson	Approved by Neil Farrow	Reg no EN008689	Cancelling EN008468	Reg date 2019-06-25	Page 1 (2)
----------------------------------	-------------------------------	----------------------------	--------------------	------------------------	------------------------	---------------

REASON FOR ISSUE

RINA approval grade changed (PN - M21)

GENERAL

A multi-purpose all positional rutile cored wire for use with C1 or M21 shielding gas.

Shielding Gas: M21, C1 (EN ISO 14175)

Alloy Type: CMn

Polarity: DC+

Fill Type: Rutile

CLASSIFICATIONS Weld Metal

SFA/AWS A5.36	E71T1-C1A0-CS2-H4
SFA/AWS A5.36	E71T1-M21A0-CS2-H8
EN ISO 17632-A	T 42 3 P C1 1 H5
EN ISO 17632-A	T 46 4 P M21 1 H10

APPROVALS

ABS	4YSA H10 (M21)	3YSA H5 (C1)
BV	SA3M, SA3YM H10 (C1)	SA3M, SA3YM H5 (M21)
BV	SA3M, SA3YM H10 (M21)	SA3M, SA3YM H5 (C1)
CE	EN 13479	
CRS	3Y H5S (C1 & M21)	
DB	42.105.07	
DNV-GL	IV YMS H10 (M21)	III YMS H5 (C1)
LR	3YS H10 (M21)	3YS H5 (C1)
NAKS/HAKC	1.2MM	
PRS	4YS H10 (M21)	3YS H5 (C1)
RINA	3YS H5 (M21)	2YS H5 (C1) PV
RINA	4YS H10 (M21)	2YS H5 (C1) PN
RS	3Y H5 (M21)	3Y H5 (C1)
VdTÜV	04902	

CHEMICAL COMPOSITION

All Weld Metal (%)

	M21 shielding gas		C1 shielding gas	
	Min	Max	Min	Max
C	0.04	0.08	0.04	0.08
Si	0.30	0.60	0.30	0.60
Mn	1.00	1.40	1.00	1.40
P		0.025		0.025
S		0.030		0.030
Cr		0.20		0.20
Ni		0.50		0.50
Mo		0.2		0.2
V		0.08		0.08
Nb		0.05		0.05
Cu		0.3		0.3

FILARC Product Data Sheet

FILARC PZ6113

T 'Tubular cored electrode arc welding'

Prepared by Daniel Amahatsion	Qualified by P-O Oskarsson	Approved by Neil Farrow	Reg no EN008689	Cancelling EN008468	Reg date 2019-06-25	Page 2 (2)
----------------------------------	-------------------------------	----------------------------	--------------------	------------------------	------------------------	---------------

MECHANICAL PROPERTIES OF WELD METAL

Properties	All Weld Metal					
	C1 Shielding gas			M21 Shielding gas		
	As welded			As welded		
	Min	Max	Typ	Min	Max	Typ
Rp0.2 (MPa)	420		495	460		535
Rm (MPa)	510	610	585	540	640	601
A5 (%)	22		25	22		25
Charpy V at -30°C (J)	47		65			
Charpy V at -40°C (J)				47		70

Comments:

The diffusible hydrogen values are determined in accordance with the method given in ISO 3690.
Welding parameters for hydrogen determination: Wire diameter 1.2mm, current 250 amps, voltage 29v, stickout 15mm, DC electrode positive

ECONOMICS & CURRENT DATA

Dimension (mm)	Current (A)		W	η	H	Feed		U		
	Min	Max				Min	Max	Min	Max	
\emptyset			Nom	Nom	Min	Max	Min	Max	Min	Max
1.0	100	300	20	88	1.2	6.2	4.5	23	22	35
1.2	150	350	20	85	2.1	7.5	5.8	20.7	23	35
1.4	150	350	20	85	1.8	6.3	3.3	11.6	22	34

W = Gas consumption (l / min)

η = Recovery, g weld metal / 100g wire (%)

H = Deposit rate (kg weld metal / hour arc time)

Feed = Feeding rate (m/min)

U = Arc voltage (V)