



FÁBIO RAFAEL PEREIRA DOS SANTOS
Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

HOT-FORGING WAAM DE AÇO DE BAIXA LIGA

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
novembro, 2021



Hot-Forging WAAM de Aço de Baixa Liga

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

FÁBIO RAFAEL PEREIRA DOS SANTOS

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Orientador: João Pedro Oliveira
Professor Auxiliar, NOVA University, Lisboa

Coorientador: Telmo G. Santos
Professor Associado com Agregação, NOVA University, Lisboa

Júri:

Presidente: Doutora Carla Maria Moreira Machado
Professor Auxiliar, NOVA University, Lisboa

Vogais: Doutor Miguel Araújo Machado
Professor Auxiliar, NOVA University, Lisboa

Doutor João Pedro Oliveira
Professor Auxiliar, NOVA University, Lisboa

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
novembro, 2021

Hot-Forging WAAM de Aço de Baixa Liga

Copyright © 2021 Fábio Rafael Pereira dos Santos

Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus pais.

Agradecimentos

De geral forma todo este processo de aquisição de conhecimento não teria sido possível sem o total apoio de uma panóplia infindável de pessoas. A todas elas o meu agradecimento.

Gostaria de iniciar a expressão da minha gratidão ao meu orientador, Professor João Pedro Oliveira que sempre relevou deter uma capacidade de me ensinar algo a cada interação que tínhamos, permitindo-me realizar cirurgicamente cada tarefa no desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço ao Professor Telmo Santos por toda a orientação e aconselhamento nas alturas mais complexas desta etapa e ao doutorando Valdemar Duarte.

Gostaria também de agradecer ao NTI do DEMI, que com o apoio do Projeto Europeu Smart-WAAM - *Microstructural Engineering and Integrated Non-Destructive Testing*, financiado pelo European Institute of Innovation and Technology (EIT), providenciaram todas as condições para a realização deste trabalho.

Um especial agradecimento ao meu colega e amigo Leonardo Grilo por toda a ajuda e paciência na realização desta e de outras tarefas ao longo deste percurso. Um profundo agradecimento a todos os meus colegas e amigos (António, Gil, Miguel, Luís, João) que sempre de alguma forma acrescentaram algo de positivo a este percurso.

À minha noiva Alexandrina um enorme obrigada por todo o apoio, suporte, compreensão e companheirismo que demonstrou comigo ao longo dos últimos anos transformando-se no meu pilar fundamental.

A toda a minha família um eterno agradecimento pelo financiamento sobretudo emocional ao longo desta caminhada. Um especial obrigado aos meus pais, Carlos e Ana, à minha irmã Márcia e ao meu cunhado Rúben que sempre me suportaram e apoiaram em tudo. Aos meus sobrinhos um especial obrigado por me incitarem sempre a nunca desistir. Um especial obrigado também aos meus companheiros de ofício, em especial ao Emanuel por sempre apresentarem uma extraordinária flexibilidade e apoio para com os meus quiproquós.

Resumo

Os processos de fabrico aditivo têm um lugar cada vez mais importante na indústria atual uma vez que dão resposta às necessidades impostas pela mesma. Na área dos metais esta tecnologia tem por designação *Wire Arc Addictive Manufacturing* (WAAM), para processos com matéria prima na forma de fio e arco elétrico como fonte de energia, depositando seletivamente camadas para formar as geometrias desejadas. O *Hot-Forging WAAM* (HF-WAAM) é uma variante do processo WAAM que visa forjar a elevadas temperaturas o material dos componentes produzidos assim que este é depositado, melhorando as propriedades do mesmo. Tal acontece devido à ação de um martelo oscilante que induz, através de movimentos lineares verticais, deformação plástica.

O estudo efetuado nesta dissertação teve como objetivo verificar os efeitos que o HF-WAAM tem nas propriedades estruturais e mecânicas dos espécimes produzidos em aço de baixa liga, recorrendo a esta variante do WAAM.

Na sequência do mesmo estudo foram produzidos espécimes de diferentes dimensões e parâmetros, foram analisadas as alterações quer morfológicas quer estruturais que as variáveis em estudo induzem, tendo em vista a verificação da sua influência no comportamento mecânico do material.

Concluiu-se que existe uma melhoria evidente de propriedades estruturais dos espécimes produzidos por HF-WAAM face aos produzidos via WAAM convencional, observou-se a influencia dos parâmetros de processo nestas tecnologias de fabrico, assim como se verificou uma menor sensibilidade a erros de parametrização no processo HF-WAAM comparativamente ao WAAM.

Palavras-chave:

Fabrico Aditivo, WAAM, HF-WAAM, Aço de Baixa Liga, Ensaios de Tração

Abstract

The additive manufacturing processes have established its place in the current industry since it presents answers to said industry needs. In the metallic field this technology is called *Wire Arc Addictive Manufacturing* (WAAM), to processes that use raw material in the wire form and an electric arc as the heat source, being that this is transformed in ways that it could be deposited selectively in order to form the desired geometries. The *Hot-forging WAAM* (HF-WAAM) is a variant to the WAAM process that intends to forge the material at high temperatures as soon as the material is deposited, improving its properties. Just like what happens with an oscillating hammer, with linear vertical movement, causing plastic deformation.

The study had as the major focus to verify the effects of the HF-WAAM in the structural and mechanical properties of the specimens produced with this WAAM variant.

In the sequence of the same study, there were manufactured different size and parameters specimens and it was analyzed the alterations, thus being morphological and structural observed in the study variables, in order to verify its influence in the mechanic behavior of the material.

As the main inferences of this essay, it is pointed the improvement of the specimens' structural properties manufactured by HF-WAAM. It was also observed the influence of the process parameters in this manufacturing technologies, thus we can elicit the evident smaller sensibility to parameters changes in the HF-WAAM process.

Keywords:

Additive manufacturing, WAAM, HF-WAAM, Low Alloy Steel, Tensile Testing

Índice Geral

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	- MOTIVAÇÃO.....	1
1.2	- OBJETIVOS	2
1.3	- ESTRUTURA	2
2	ESTADO DE ARTE.....	3
2.1	FABRICO ADITIVO.....	3
2.2	FABRICO ADITIVO DE METAIS.....	4
2.3	WAAM	5
2.4	<i>HOT-FORGING</i> WAAM.....	7
2.5	CONTROLO DE QUALIDADE.....	11
2.5.1	<i>Ensaios de Tração Uniaxial</i>	11
2.5.2	<i>Microscopia</i>	12
2.5.3	<i>Difração de Raios X</i>	12
2.5.4	<i>Correntes induzidas e ultrassons</i>	13
2.6	DEFEITOS DO WAAM	13
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	17
3.1	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	18
3.2	CONSTRUÇÃO DE ESPÉCIMES.....	22
3.3	RESUMO DO PROCEDIMENTO	25
4	ANÁLISE DE RESULTADOS	27
4.1	ANÁLISE DE PARÂMETROS	28
4.2	MICROSCOPIA	44
4.3	ANÁLISE DE DUREZAS.....	47
4.4	ANÁLISE TERMOGRÁFICA	49
4.5	ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	50
5	CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS.....	55
5.1	CONCLUSÕES	55
5.2	FUTURO DESENVOLVIMENTO	57
6	BIBLIOGRAFIA.....	59

Índice de Figuras

FIGURA 2.1 - PROCESSO DE FABRICO ADITIVO E A SUA VASTA APLICABILIDADE [2].	3
FIGURA 2.2 - REPRESENTAÇÃO DO PROCESSO PBF. (ADAPTADO DE [4])	4
FIGURA 2.3 - REPRESENTAÇÃO DOS COMPONENTES DO PROCESSO WAAM. (ADAPTADO DE [6])	5
FIGURA 2.4 - ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO PAW. (ADAPTADO DE [7])	6
FIGURA 2.5 - REPRESENTAÇÃO DOS PROCESSOS: A) MIG/MAG B) TIG (ADAPTADO DE [7])	6
FIGURA 2.6-ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DA VARIANTE ROLLING. (ADAPTADO DE [11]).	8
FIGURA 2.7- REPRESENTAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DA VARIANTE HOT-FORGING. (ADAPTADO DE [11])	9
FIGURA 2.8 - PROVETE DE TRAÇÃO.	11
FIGURA 2.9 - GEOMETRIA DE UM PROVETE ADEQUADO PARA MEDIÇÕES DE EXTENSÃO.	12
FIGURA 2.10- PROCESSO DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X. (ADAPTADO DE [6])	13
FIGURA 2.11- REPRESENTAÇÃO DA POROSIDADE CARACTERÍSTICA DO PROCESSO WAAM. (ADAPTADO DE [5])	14
FIGURA 2.12 - REPRESENTAÇÃO DA AÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS NO WAAM:	14
FIGURA 2.13- RELAÇÃO ENTRE OS DEFEITOS DO WAAM E O TIPO DE MATERIAL. (ADAPTADO DE [10]).	15
FIGURA 3.1- MESA TRIAXIAL UTILIZADA NO WAAM.	17
FIGURA 3.2- SUBSTRATO UTILIZADO COM 100MM DE COMPRIMENTO.	19
FIGURA 3.3- SUBSTRATO UTILIZADO COM 200MM DE COMPRIMENTO.	19
FIGURA 3.4 - IMAGEM DO CORTE TRANSVERSAL REALIZADO NOS ESPÉCIMES.	20
FIGURA 3.5 - FRESA DE 40 MM.	21
FIGURA 3.6 - IMAGENS DA ANÁLISE DE ESPÉCIMES: A) TROÇO TRANSVERSAL B) IMERSÃO EM RESINA EPOXY.	21
FIGURA 3.7 - PROCESSAMENTO DE ESPÉCIMES: A) CHAPA FRESADA. B) RETIFICAÇÃO DA CHAPA.	22
FIGURA 3.8 – APARELHO DE ENSAIOS DE TRAÇÃO.	22
FIGURA 3.9 - DIMENSÕES PROJETADAS PARA OS ESPÉCIMES DE MENOR DIMENSÃO:	23
FIGURA 3.10- ILUSTRAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE DEPOSIÇÃO DE MATERIAL.	24
FIGURA 3.11 - DISPOSITIVO DE DEPOSIÇÃO UTILIZADO.	25
FIGURA 3.12- SEQUÊNCIA DE PROCESSOS PARA: A) DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS.	26
FIGURA 4.1 - RESULTADOS OBTIDOS NA PRODUÇÃO DO ESPÉCIME P1.1.	32
FIGURA 4.2 - RESULTADOS OBTIDOS NA PRODUÇÃO DO ESPÉCIME P1.2.	33
FIGURA 4.3 - RESULTADOS OBTIDOS NA PRODUÇÃO DO ESPÉCIME P1.3.	33
FIGURA 4.4 – CORTE TRANSVERSAL DOS ESPÉCIMES: A) P1.1 B) P1.2 C) P1.3.	34
FIGURA 4.5 - IMAGENS DAS PAREDES PRODUZIDAS: A) G1.1 B) 1.2.	34
FIGURA 4.6 - RESULTADOS OBTIDOS NA PRODUÇÃO DO ESPÉCIME P2.1.	39
FIGURA 4.7 - RESULTADOS OBTIDOS NA PRODUÇÃO DO ESPÉCIME P2.2.	40
FIGURA 4.8 - RESULTADOS OBTIDOS NA PRODUÇÃO DO ESPÉCIME P2.3.	41
FIGURA 4.9 – CORTE TRANSVERSAL DOS ESPÉCIMES: A) P2.1 B) P2.2 C) P2.3.	41

FIGURA 4.10 - FRESAGEM TRANSVERSAL DAS PAREDES: A) P1.1 B) P1.2.1 C) P2.1 D) P2.2.	42
FIGURA 4.11 - IMAGENS DAS PAREDES PRODUZIDAS: A) G2.1 B) 2.2	42
FIGURA 4.12 - RESULTADO DA FRESAGEM DA PAREDE G2.1. A) DETALHE DA POROSIDADE ENCONTRADA.	43
FIGURA 4.13 - RESULTADO DA FRESAGEM DA PAREDE G2.2.	43
FIGURA 4.14 - CORTE TRANSVERSAL DO ESPÉCIME: A) P1.1 B) P1.2 C) P1.3	44
FIGURA 4.15 - CORTE TRANSVERSAL DO ESPÉCIME: A) P2.1 B) P2.2 C) P2.3	45
FIGURA 4.16 - ZONAS A OBSERVAR EM PORMENOR: A) ZONA INTERMÉDIA B) RAIZ.	45
FIGURA 4.17 - PORMENOR DO GRÃO DO: A) ESPÉCIME P1.1 B) ESPÉCIME P1.2 C) ESPÉCIME P1.3	46
FIGURA 4.18 - RAIZ DOS ESPÉCIMES: A) P1.1 B) P1.2 C) P1.3 D) P2.1 E) P2.2 F) P2.3	47
FIGURA 4.19 - A) ILUSTRAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE INDENTAÇÃO. B) MÉDIAS DOS RESULTADOS DAS DUREZAS PARA CADA ESPÉCIME.	48
FIGURA 4.20 - LINHA DE DUREZAS DO ESPÉCIME: A) P1.1 B) P1.2 C) P1.3 D) P2.1 E) P2.2 F) P2.3	48
FIGURA 4.21 - ILUSTRAÇÃO DO MÉTODO DE CAPTAÇÃO DE DADOS TERMOGRÁFICOS.	49
FIGURA 4.22 - GRÁFICO DE TEMPERATURAS NO PONTO DE REFERÊNCIA PARA O ESPÉCIME: A) T2.1 B) T2.2.	49
FIGURA 4.23 - A) CORTES A EFETUAR EM G1.2 B) RECORTE DOS PROVETES.	50
FIGURA 4.24 - A) CORTES A EFETUAR EM G2.2 B) RECORTE DOS PROVETES.	51
FIGURA 4.25 - RESULTADO DOS ENSAIOS DOS PROVETES: A) HORIZONTAL 1. B) HORIZONTAL 2. C) HORIZONTAL 3. D) VERTICAL 1. E) VERTICAL 2. F) VERTICAL 3.	51
FIGURA 4.26 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO PARA: A) TROÇO DE FIO 1. B) TROÇO DE FIO 2.	52

Índice de Tabelas

TABELA 2.1- TÍPICAS LIGAS UTILIZADAS NO WAAM (ADAPTADO DE [8]).....	7
TABELA 2.2 - ENUMERAÇÃO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS DA TÉCNICA HOT-FORGING.....	9
TABELA 3.1- CONSTITUIÇÃO DO FIO DE ALIMENTAÇÃO ER90S-G, DA BOHLER, EM PERCENTAGEM DE PESO [WT%]. [16] .	18
TABELA 3.2 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO FIO DE ER90S-G, DA BOHLER.[16].....	18
TABELA 3.3 - CONSTITUIÇÃO DO GÁS DE PROTEÇÃO. [14].....	19
TABELA 4.1 - PARÂMETROS DE PROCESSO E RESPECTIVAS UNIDADES.	27
TABELA 4.2- PARÂMETROS FIXADOS PARA O ENSAIO C1.1.....	28
TABELA 4.3 - PARÂMETROS E IMAGENS DOS RESULTADOS DO ENSAIO C1.1.....	28
TABELA 4.4 - PARÂMETROS FIXADOS PARA O ENSAIO C1.2.....	29
TABELA 4.5 - PARÂMETROS E IMAGENS DOS RESULTADOS DO ENSAIO C1.2.....	29
TABELA 4.6 - PARÂMETROS FIXADOS PARA O ENSAIO C1.3.....	30
TABELA 4.7 - PARÂMETROS E IMAGENS DOS RESULTADOS DO ENSAIO C1.3.....	30
TABELA 4.8 - PARÂMETROS FIXADOS PARA O ENSAIO C1.4.....	31
TABELA 4.9 - PARÂMETROS E IMAGENS DOS RESULTADOS DO ENSAIO C1.4.....	31
TABELA 4.10 – PARÂMETROS DIMENSIONAIS DAS PAREDES PRODUZIDAS	32
TABELA 4.11 - PARÂMETROS DE PROCESSO UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DA PAREDE P1.1.....	32
TABELA 4.12 - PARÂMETROS DE PROCESSO UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DA PAREDE P1.2.....	32
TABELA 4.13 - PARÂMETROS DE PROCESSO UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DA PAREDE P1.3.....	33
TABELA 4.14 - CARACTERÍSTICAS TEMPORAIS E GEOMÉTRICAS DAS PAREDES G1.1 E G1.2.....	35
TABELA 4.15 – PARÂMETROS FIXADOS PARA O ENSAIO C2.1.	37
TABELA 4.16 - PARÂMETROS E IMAGENS DOS RESULTADOS DO ENSAIO C2.1.....	37
TABELA 4.17 - PARÂMETROS FIXADOS PARA O ENSAIO C2.2.....	38
TABELA 4.18 - PARÂMETROS E IMAGENS DOS RESULTADOS DO ENSAIO C2.2.....	38
TABELA 4.19 - PARÂMETROS FIXADOS PARA O ENSAIO C2.3.....	38
TABELA 4.20 - PARÂMETROS E IMAGENS DOS RESULTADOS DO ENSAIO C2.3.....	39
TABELA 4.21 - PARÂMETROS DE PROCESSO UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DA PAREDE P2.1.....	39
TABELA 4.22 - PARÂMETROS DE PROCESSO UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DA PAREDE P2.2.....	40
TABELA 4.23 - PARÂMETROS DE PROCESSO UTILIZADOS NA PRODUÇÃO DA PAREDE P2.3.....	40
TABELA 4.24 CARACTERÍSTICAS TEMPORAIS E GEOMÉTRICAS DAS PAREDES G2.1 E G2.2	43
TABELA 4.25 – RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DE TRAÇÃO UNIAxIAL.....	52

Lista de abreviaturas

AM	<i>Addictive Manufacturing</i> (Fabrico Aditivo)
CF	Comprimento de Fio
DAC	Distancia do Martelo ao Arco Elétrico
DR	<i>Deposition Rate</i> (Taxa de Deposição de Material)
DT	<i>Deposition Time</i> (Tempo de Produção)
EDM	<i>Electrical Discharge Machining</i>
ET	Entrega Térmica
f	Frequência de forjamento
F_f	Força de Forjamento
FS	<i>Forging Step</i> (Passo de Forjamento)
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
H	<i>High</i> (Altura da Parede)
HF	<i>Hot Forging</i> (Forjamento a Quente)
HV	<i>Hardness of Vickers</i> (Dureza de Vickers)
I	Corrente
L	<i>Lenght</i> (Comprimento da Camada Depositada)
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
N	Número de Camadas depositadas
QG	Caudal de Gás
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
TS	<i>Travel Speed</i> (Velocidade de Avanço da Tocha)
U	Tensão
W	<i>Width</i> (Largura da Camada Depositada)
WAAM	<i>Wire Arc Addictive Manufacturing</i>
WFS	<i>Wire Feed Speed</i> (Velocidade de Alimentação do Fio)
WT	<i>Waiting Time</i> (Tempo de Espera entre Camadas)

1 Introdução

1.1 – Motivação

O fabrico aditivo é um conjunto de processos de fabrico cada vez mais presentes na indústria atual, justificando-se como uma tecnologia de baixo custo quer de produção quer de instalação, face às alternativas que utilizam a remoção de material para produzir componentes que permitam responder a necessidades evidenciadas na produção de artigos cujas características se pretendem customizáveis e personalizáveis.

O processo *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM) tem vindo a crescer como alternativa forte às soluções já implementadas, tais como o *Selective Laser Melting* (SLM) e o *Selective Laser Sintering* (SLS). Face aos dois processos anteriormente mencionados o WAAM apresenta custos relacionados com a produção e implementação menores, assim como maior rapidez na produção de componentes.

Devido às características dos componentes produzidos por WAAM revela-se necessária a melhoria de propriedades mecânicas dos mesmos para que este processo possa competir com os já existentes SLS/SLM. Tal é possível recorrendo ao *Hot-Forging WAAM* (HF-WAAM) que utiliza um martelo oscilatório de deslocamento vertical para deformar plasticamente o material depositado durante o processo WAAM, produzindo assim um forjamento a quente que melhora as propriedades do material.

1.2 – Objetivos

Na sequência deste estudo pretende-se fundamentalmente determinar quais os melhores parâmetros de processo para o aço de baixa liga em análise, de forma a permitir a produção de componentes estrutural e morfologicamente coesos recorrendo ao processo WAAM e ao HF-WAAM.

Após a otimização da parametrização para a produção de espécimes em aço de baixa liga AWS ER90S-G, pretende-se efetuar a caracterização estrutural e mecânica dos mesmos, de maneira a verificar que alterações são percutidas no material aquando da utilização do processo HF-WAAM.

Ao nível estrutural pretende-se analisar o tamanho e morfologia de grão, correlacionando-o com os parâmetros e processo utilizados.

No campo da análise das propriedades mecânicas características do material pretende-se observar propriedades como a dureza e resistência mecânica à tração, sendo que para este último a produção de provetes de tração será necessária.

Por fim fez-se uma análise termográfica ao processo de maneira a evidenciar alterações térmicas aquando do processo HF-WAAM face ao WAAM convencional, assim como se pretende a deteção de anomalias que possam ocorrer durante o processo de deposição de material.

1.3 – Estrutura

O presente documento está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1 – Breve introdução ao estudo efetuado, divulgação da fundamentação que levou ao desenvolvimento do mesmo.
- Capítulo 2 – Apresentação do estado de arte da tecnologia abordada, desde as tecnologias de soldadura até ao fabrico aditivo.
- Capítulo 3 – Exposição do desdobramento da componente prática do estudo desenvolvido.
- Capítulo 4 – Análise dos resultados obtidos, assim como associação dos mesmos às técnicas e parâmetros utilizados.
- Capítulo 5 – Capítulo último que visa retirar conclusões dos resultados obtidos, assim como prever futuro desenvolvimento.

2 Estado de Arte

2.1 Fabrico aditivo

O Fabrico Aditivo considera-se um processo de fabrico que consiste na fusão consecutiva e localizada de um material, de maneira a formar camadas, que no término do processo terão um sólido geométrico produzido.

Este processo teve o seu início na década de 80, onde se aplicou esta técnica com base numa vertente de solidificação de material em camadas. Na década seguinte surge a primeira máquina comercializável de FDM (*Fused Deposition Modeling*), que consiste no processo de fusão de um material constituinte e deposição do mesmo em camadas com vista a formar sólidos [1]. É esta vertente que hoje mais se aplica. Devido a sua utilidade rapidamente evoluiu de forma tal que hoje se encontra num patamar de acessibilidade e aplicabilidade bastante vastos, Fig. 2.1. Todo este processo é também associado à vulga expressão “Impressão 3D”, assim como ao conceito de prototipagem rápida [2].



Figura 2.1 - Processo de fabrico aditivo e a sua vasta aplicabilidade [2].

2.2 Fabrico aditivo de metais

Os processos de fusão e deposição de material por camadas têm também lugar nos materiais metálicos podendo partir-se de um material inicial na forma de pó ou na forma de fio de alimentação.

O primeiro é resultado de uma fusão seletiva de uma cama de pó (PBF – *Powder Bed Fusion*) com a composição pretendida para a peça a produzir, sendo que o processo se deve inteiramente à ação de um feixe laser com capacidade de fundir com exatidão geométrica o pó inicial, Fig. 2.2, terminando com o componente integralmente produzido, sendo, no entanto, necessário remover todo o desperdício de material não consumido. Na área dos metais aqui em estudo estes processos de fabrico aditivo recorrentes a materiais em pó denominam-se de SLS, *Selective Laser Sintering* ou numa outra variante SLM, *Selective Laser Melting*. [3].

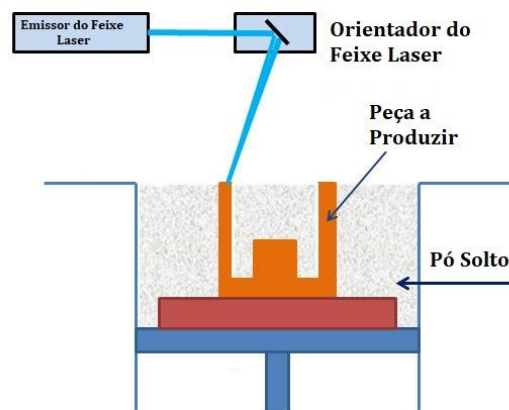


Figura 2.2 - Representação do processo PBF. (adaptado de [4])

A segunda vertente do fabrico aditivo nos metais consiste na fusão de um fio de alimentação, através de arco elétrico, processo denominado de WAAM, feixe laser ou ainda feixe de eletrões, depositando camada a camada o material na localização exata definida por um controlador de processo, no caso do arco elétrico, o da Fig. 2.3. Este controlador recorre a um mecanismo de movimentação, como braços robóticos ou mesas de movimento triaxial eletronicamente controladas, para garantir a exatidão do local onde o material fundido é depositado. É sobre esta vertente que incidirá o estudo subsequente. [5]

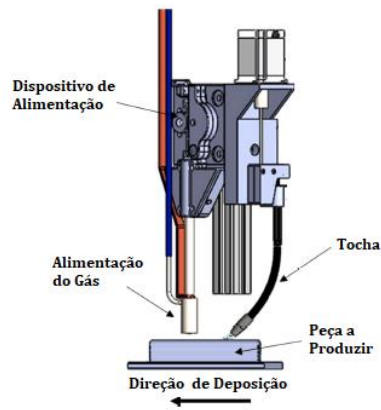


Figura 2.3 - Representação dos componentes do processo WAAM. (adaptado de [6])

2.3 WAAM

O *WAAM* é uma das tecnologias pertencentes ao fabrico aditivo, mais conhecido por *Addictive Manufacturing* (AM), que teve um crescimento significativo nos últimos anos. Entre os diferentes processos de fabrico aditivo, o WAAM destaca-se devido à sua capacidade de produzir grandes peças metálicas, com altas taxas de deposição, tempos de processamento mais curtos e custo inferior comparativamente a outras técnicas.[7]

O processo de fabrico consiste na utilização de um sistema de arco elétrico como fonte de calor e um arame sólido como matéria prima, sendo os seus componentes produzidos pela deposição seletiva de camadas subsequentes. O WAAM pode ainda ser subdividido tendo em conta o conceito utilizado, tal como, *Gas Metal Arc Welding (GMAW)*, *Plasma Arc Welding (PAW)* e *Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)*. [7]

Tanto o *PAW* como o *GTAW*, são processos que usam um elétrodo de tungsténio não consumível para estabelecer um arco elétrico com a peça sob um gás de proteção inerte, o que permite arcos elétricos estáveis. O *GTAW* foi dos primeiros processos baseados no arco elétrico a surgir, devido ao facto do seu arco ser muito estável, levando a que as peças obtidas por este método possuíssem uma elevada precisão.

Relativamente ao *PAW*, representado esquematicamente na Fig. 2.4, é um processo de alta densidade energética que utiliza um elétrodo não consumível de tungsténio, onde o arco é forçado a passar por um orifício colocado entre o cátodo e o ânodo que restringe o arco, resultando numa maior estabilidade do mesmo. Este processo destaca-se do TIG, pela sua densidade energética, pois pode ser até três vezes superior ao primeiro, o que resulta

numa menor distorção e cordões de soldadura mais estreitos. Contudo ambos podem necessitar de um material de adição.[5, 7]

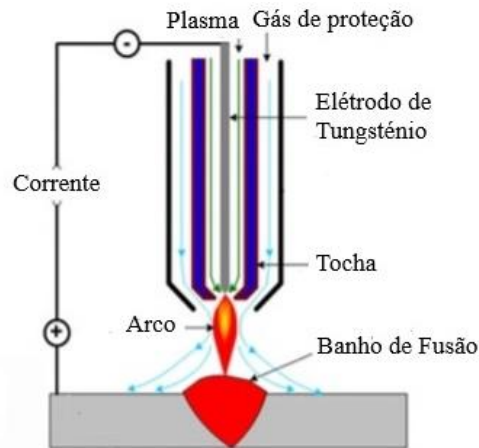


Figura 2.4 - Ilustração do processo PAW. (adaptado de [7])

O *GMAW* é um processo de soldadura, ilustrado na Fig. 2.5, também conhecido como MIG, quando é protegido por um gás inerte, ou MAG quando é utilizado gás ativo. Sendo um processo de soldadura e também o mais usado no WAAM, o arco elétrico é gerado através da interação entre um fio consumível e a peça. As suas taxas de deposição, por norma elevadas, variam dependendo do material depositado e dos parâmetros de processo, tornando-o, assim, ideal para a produção de peças em grande escala e curtos intervalos de tempo.[5,7]

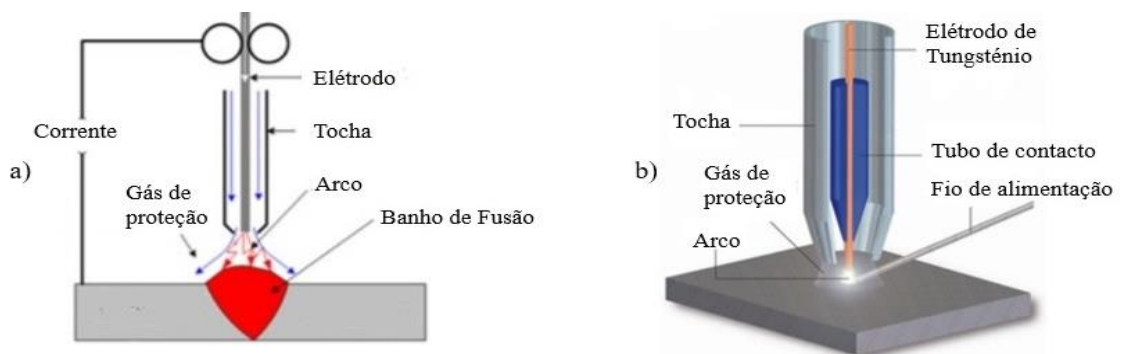


Figura 2.5 - Representação dos processos: a) MIG/MAG b) TIG (adaptado de [7])

Como referido anteriormente, o WAAM permite a construção de peças complexas, em grande escala e em intervalos de tempo relativamente curtos, contudo a soldadura por arco elétrico é um processo, em geral, exigente uma vez que devem ser controlados vários parâmetros para se conseguir uma peça final de boa qualidade.[5]

Os parâmetros mais importantes são: intensidade da corrente, I [A], tensão, V [V], caudal de gás de proteção, QG [l/min], *stick out*, [mm], velocidade de alimentação do fio, WFS [m/min] e ainda a velocidade de avanço, TS [mm/min]. Assim os parâmetros devem ser otimizados para os diferentes tipos de peças e materiais utilizados, logo, a seleção correta dos parâmetros afeta diretamente o modo de transferência, o qual é muito importante para determinar o comprimento do cordão, largura, penetração, taxa de deposição e rugosidade da superfície.[5]

O *WAAM* é utilizado não só em diversas indústrias, como também, utiliza diferentes ligas de metais. Na Tabela 2.1 está representada uma síntese correspondente aos diferentes tipos de ligas e aplicações.[8]

Tabela 2.1- Típicas ligas utilizadas no WAAM (adaptado de [8])

Aplicações	Ligas				
	Titânio	Alumínio	Aço	Níquel	Bimetal
Aeroespacial	x	x	-	x	x
Automóvel	-	x	x	-	x
Marítima	x	-	x	-	-
Resistência à corrosão	x	-	-	x	x
Altas temperaturas	x	-	-	x	x
Ferramentas e moldes	-	-	x	-	-

2.4 *Hot-Forging* WAAM

Esta variante do processo WAAM, como muitas outras nasce da necessidade de colmatar insuficiências desta técnica. Como mencionado anteriormente o processo WAAM, na variante mais básica, origina componentes com alguns defeitos críticos, nomeadamente as microporosidades, a anisotropia introduzida pela orientação do grão do material, assim como a elevada concentração de tensões residuais. Para colmatar alguns destes defeitos nasceram várias variantes do WAAM, como aquecimento do substrato de suporte ou o controlo térmico ativo da temperatura entre camadas [8]. Contudo estas variantes visam resolver problemas como o crescimento orientado do grão, que induz anisotropia, assim como promovem a relaxação de tensões no material prevenindo a fissuração. Persistem problemas como as microporosidades e o fraco acabamento superficial que ficam por resolver.

Desta feita nasce uma variante denominada de *Rolling*, que consiste num rolo que passa sobre cada camada depositada exercendo pressão no material, Fig. 2.6. As consequências da pressão aplicada revelam ser o colapso de poros, redução de tensões residuais assim como um melhor acabamento superficial da peça produzida [8]. A melhoria do acabamento superficial revela um grande avanço neste processo pois reduz a necessidade de posterior maquinação para aperfeiçoamento geométrico, assim como permite a aplicação direta na superfície pós produzidos de técnicas de análise associadas a ensaios não destrutivos como é o caso dos ultrassons e da análise por correntes induzidas. [5,9]

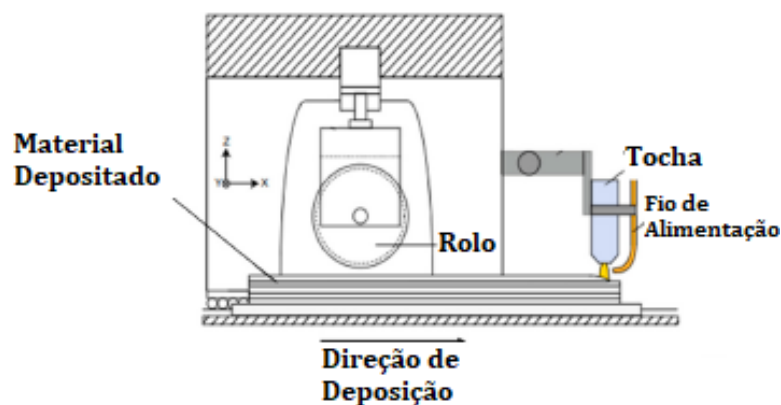


Figura 2.6-Esquema de funcionamento da variante Rolling. (adaptado de [10]).

Como evolução da variante *Rolling* explicitada, surge o *Hot-Rolling*, que permite ultrapassar algumas limitações da variante fria do *Rolling*, nomeadamente o tempo necessário para a aplicação desta técnica que implica a espera pelo arrefecimento entre camadas, até estas se encontrarem na casa das dezenas de graus Celcius. Na nova variante do *Rolling* a aplicação da pressão na passagem do rolo é escusa de esperas pois o rolo sobrepõe a camada depositada quando esta ainda se encontra quente, na casa dos 800 °C. Outro benefício da aplicação desta técnica é a necessidade de menores forças exercidas sobre o material depositado para promover os efeitos anteriormente mencionados, forças essas que serão cerca de 90 % inferiores às aplicadas na variante fria do *Rolling* [5].

Ainda assim não se verifica que o *Rolling* optimize eficazmente o processo WAAM, pois embora resolva e atenua muitos dos defeitos deste processo, introduz novos inconvenientes, como por exemplo a necessidade da estrutura de suporte dos rolos ter uma grande rigidez e estabilidade, impedindo deformações da mesma aquando da aplicação da pressão de trabalho. Nesta sequência surge então o *Hot-Forging*, que não é mais do que uma estrutura que segue a tocha de deposição de material, em que um martelo com comportamento oscilante provoca a deformação plástica do material depositado, Fig. 2.7,

com o mesmo ainda a temperaturas elevadas, exercendo os mesmos efeitos estruturais que o Rolling, nomeadamente o colapso de microporosidades, relaxamento de tensões residuais, assim como recristalização do material no sentido da redução da anisotropia.

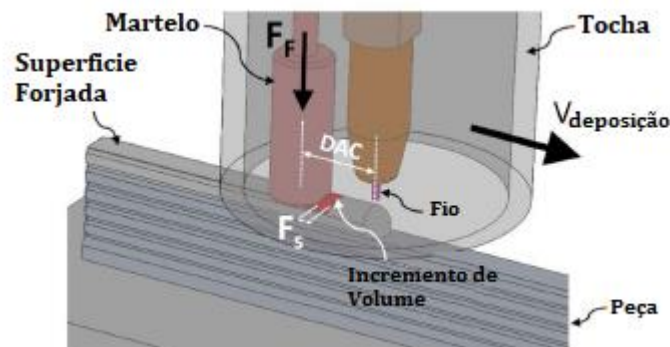


Figura 2.7- Representação do funcionamento da variante Hot-Forging.
(adaptado de [10])

Como é evidente ao observar a representação deste processo, o posicionamento e geometria do martelo vibrante terão mais do que uma alternativa, nomeadamente um martelo com geometria circular posicionado dentro ou fora da tocha, martelo de geometria em coroa circular, ou mesmo utilizar o cilindro exterior de proteção da tocha como martelo, sendo esta última a solução aqui associada.

Em termos mais específicos e concisos revela-se necessário parametrizar este processo para determinar a sua viabilidade de construção e aplicação. Assim definem-se como parâmetros adicionais do HF-WAAM relativamente ao WAAM visíveis na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Enumeração dos principais parâmetros da técnica Hot-Forging.

Parâmetros do Hot-Forging	Unidades
Força de forjamento (F_F)	Newton [N]
Frequência de forjamento (f)	Hertz [Hz]
Distância do eixo do martelo ao arco elétrico (DAC)	Milímetros [mm]
Passo de forjamento (F_S)	Milímetros/ciclo [mm/ciclo]

Uma importante ressalva é a dependência do passo de forjamento, FS , com a frequência de forjamento, f , e com a velocidade da tocha, TS , equação 2.1. Esta dependência é importante pois caso a relação não seja cumprida podem ficar áreas de material depositado sem o devido forjamento.

$$FS = \frac{60 \times TS \text{ [mm/min]}}{f \text{ [Hz]}} \quad \text{[mm/ciclo]} \quad (2.1)$$

Como experienciado por *Duarte Et al.* [5] utilizando cilindros pneumáticos para efetuar a atuação do martelo forjante, com forças de forjamento estáticas máximas de 55 N, as quais, nos resultados obtidos, foram suficientes para a redução significativa dos defeitos acima mencionados, com diminuição considerável da anisotropia e quase eliminação dos microporos.

De relevância é também a não danificação do martelo, ou contaminação do banho de fusão com partículas do mesmo, garantindo assim a viabilidade desta variante do processo WAAM.

Mais variáveis e possibilidades podem ser integradas e analisadas dentro do *Hot-Forging* WAAM, contudo não serão constituídas neste estudo.

Uma desvantagem desta técnica é a alteração da geometria da peça aquando do forjamento, sendo difícil prever a geometria final da mesma até que modelos empíricos sejam constituídos.

A aplicabilidade desta variante a modelos que revelem pormenores frágeis pode ser também um risco. A influência deste processo que induz muitas vibrações e impactos nos componentes no âmbito da resistência à fadiga necessita também de conhecimento aprofundado, podendo reduzir ou não a vida útil dos componentes produzidos. [5]

No que toca ao estado atual deste processo tecnológico encontram-se resultados apenas para materiais como o Aço, nomeadamente o AISI 316L, no entanto noutras ligas e noutros metais não são conhecidos resultados. [5] No *Rolling*, processo originário do *Hot-Forging*, já são conhecidos resultados positivos numa gama mais alargada de ligas e materiais, nomeadamente nas ligas de Alumínio, Titânio e mesmo em superligas de Níquel. [9,10,11]

2.5 Controlo de qualidade

O *WAAM* apresenta pela sua natureza a necessidade de verificação da qualidade dos componentes produzidos. Mesmo com a monitorização efetuada no decorrer do processo é necessário que após a produção de cada peça sejam analisadas as suas propriedades através de inspeção visual.

Uma análise mais pormenorizada pode ser executada recorrendo a ensaios destrutivos, como por exemplo ensaios de tração uniaxial, desmantelamento do componente efetuando cortes na peça para a observação da sua microestrutura e verificação ou não de defeitos internos. Contudo de superior interesse é a análise e estudo de defeitos nas peças produzidas recorrendo a ensaios não destrutivos, END, que permitem a manutenção da integridade da peça no final da análise às mesmas. As mais simples verificações às peças produzidas são a inspeção visual e a utilização de líquidos penetrantes.

2.5.1 Ensaios de Tração Uniaxial

Como referido anteriormente, os ensaios de tração uniaxial são um tipo de análise às propriedades mecânicas dos materiais, que no final levam à inutilização da peça produzida. Dentro deste tipo de testes existem normas que devem ser cumpridas nomeadamente no que refere à geometria do provete submetido ao ensaio, no entanto para efeitos comparativos podem ser utilizados provetes com dimensões mais proveitosas, no entanto sem valor quantitativo para a comunidade científica, Fig. 2.8.

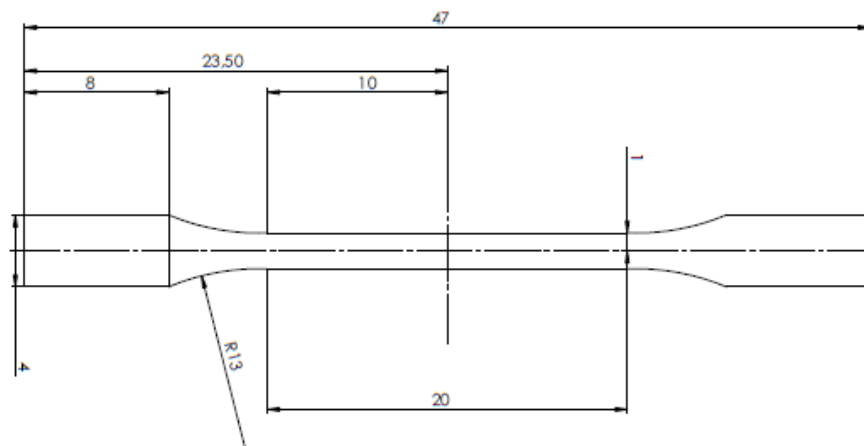


Figura 2.8 - Provette de tração.

Pode-se estabelecer também uma geometria proveitosa do provete para obtenção de resultados mais precisos na determinação da extensão do provete durante a tração, Fig. 2.9.

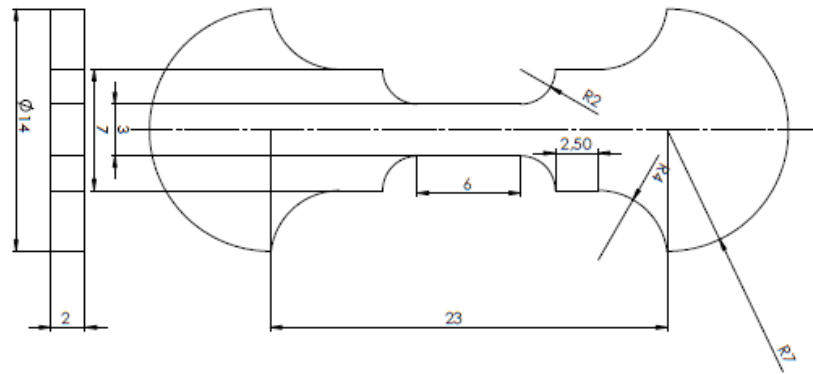


Figura 2.9 - Geometria de um provete adequado para medições de extensão.

2.5.2 Microscopia

A microscopia no âmbito da análise de amostras e componentes obtidos via WAAM revela-se importante pois permite obter informação precisa acerca da constituição estrutural de determinada amostra. Revela-se uma importante etapa na análise de qualidade de componentes produzidos por WAAM. Esta análise permite também a deteção de orientações granulares, tamanho de grão e outros fenómenos microestruturais que possam ocorrer.[6]

Contudo, este processo de análise é moroso e implica a destruição de um componente para uma análise aprofundada em que seja necessário seccionar o mesmo.

2.5.3 Difração de Raios X

A difração de Raios X, Fig. 2.10, tem uma importância elevada na análise microestrutural dos componentes produzidos por WAAM. Como em outros materiais, obtidos pelos mais variados processos de fabrico, a análise do espectro obtido pela difração de raios X permite saber a localização da maior ou menor concentração de certas substâncias na microestrutura do material em estudo [6]. Assim pode-se saber se o material foi obtido com as propriedades pretendidas inicialmente ou não.

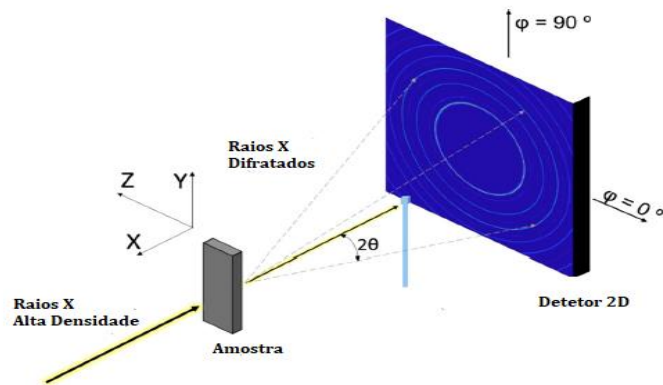


Figura 2.10- Processo de difração de Raios X. (adaptado de [6])

2.5.4 Correntes induzidas e ultrassons

As correntes induzidas revelam ser um processo de análise à qualidade de um componente sem necessidade de sacrifício do mesmo pois permitem, através da indução de correntes na peça em teste, obter a localização de defeitos e imperfeições. Contudo é um processo que apresenta algumas desvantagens tais como a impossibilidade de inspecionar peças com geometrias complexas ou a incapacidade de detetar defeitos em profundidade devido ao efeito pele [11].

A inspeção de componentes utilizando os ultrassons tem um importante papel na deteção de defeitos e imperfeições em volume, o que colmata a insuficiência dos processos de inspeção de componentes concorrentes a este.

2.6 Defeitos do WAAM

O WAAM acarreta vários tipos de limitações enquanto processo. Limitações essas que podem estar associadas ao tipo de peças produzidas ou mesmo limitações relativas à qualidade das mesmas.

Quanto a defeitos, nas peças produzidas por *WAAM*, existem vários tipos, contudo todos eles se encontram associados a fatores como temperatura e condições em que ocorre a fusão do material. Um defeito bastante comum neste processo é a existência de porosidades

nas camadas depositadas, Fig. 2.11, que provocam descontinuidades no material, que por sua vez podem originar falha por concentração de tensões. [12]

Como solução para este tipo de defeitos encontra-se o processo de *Hot-Forging*, que implica o forjamento contínuo do material depositado, provocando assim o colapso de poros originados durante o processo. [5]

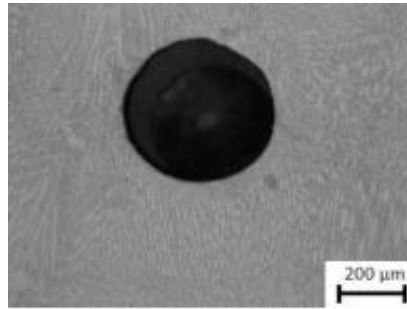


Figura 2.11- Representação da porosidade característica do processo WAAM. (adaptado de [5])

As elevadas tensões residuais revelam-se outro considerável inconveniente no processo WAAM, pois a verificação destas implica limitações de utilização dos componentes fabricados, uma vez que aplicação de peças com elevadas tensões residuais pode levar à falha por fadiga prematuramente, Fig. 2.12. [13][14]

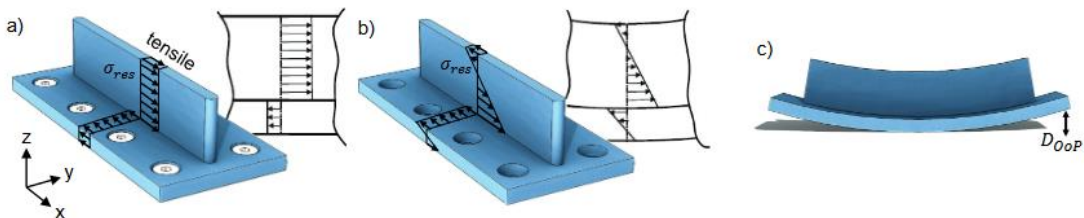


Figura 2.12 - Representação da ação das tensões residuais no WAAM: a) com o substrato fixo; b) com o substrato livre; c) distorção resultante da libertação do substrato. (adaptado de [14])

Uma solução para este tipo de imperfeições são os tratamentos térmicos, que visam relaxar tensões ao mesmo tempo que induzem recristalização do material. Contudo a aplicação de tratamentos térmicos pode levar à coalescência das porosidades e microporosidades acima mencionadas. [5]

Analisando microestruturalmente o resultado do processo *WAAM*, os componentes por este produzidos revelam anisotropia, devida ao crescimento orientado do grão da estrutura, criando elevada resistência do material numa determinada direção mais do que

noutras. [5] Uma solução para a minimização desta problemática é aplicação do *Hot-Forging*, que utilizando o forjamento a quente promove, entre outras consequências já faladas, a recristalização da microestrutura do material associada à redução do tamanho de grão. [5]

Ainda de mencionar são fenómenos como a fissuração após a deposição do material, resultante da conjugação das várias imperfeições do processo, da mesma forma a oxidação superficial originada pela temperatura recorrente do processo, como também fenómenos como a de laminação são suscetíveis de ocorrer.[13]

Em termos de limitações do processo WAAM em si, encontram-se o limitado leque de materiais utilizáveis neste processo, pois é necessário que o material da peça a produzir possua capacidade de ser trefilado para a produção do fio de alimentação assim como a necessidade de uma posterior maquinação das peças produzidas para retificar geometricamente os componentes e remover oxidações e contaminações superficiais.

Em suma o processo WAAM encontra-se expressivamente em evolução tendo o tipo de material e as respetivas características relação direta com a qualidade final de componente produzido, conduzindo a tecnologia atual a uma redução da influência negativa que determinadas características dos materiais podem revelar, Fig. 2.13 [13].

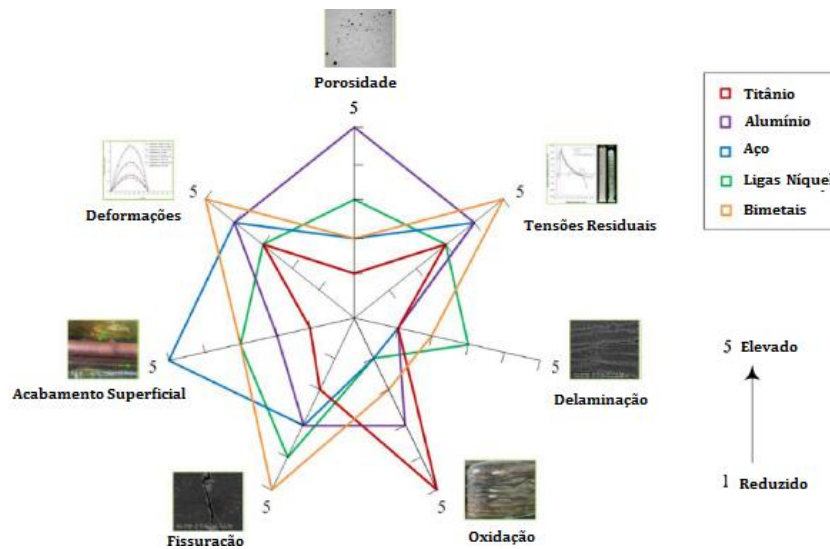


Figura 2.13- Relação entre os defeitos do WAAM e o tipo de material. (adaptado de [13]).

3 Procedimento Experimental

O ensaio proposto caracteriza-se pela deposição de camadas sucessivas de metal recorrendo ao dispositivo de construção de componentes via HF-WAAM. Tal dispositivo recorre a uma mesa de movimentação triaxial, com um volume de trabalho de $2760 \times 1960 \times 2000 \text{ mm}^3$, sendo eletronicamente controlada por computador, que tem como objetivo movimentar de forma precisa o acoplamento da tocha e martelo, Fig. 3.1.[5]

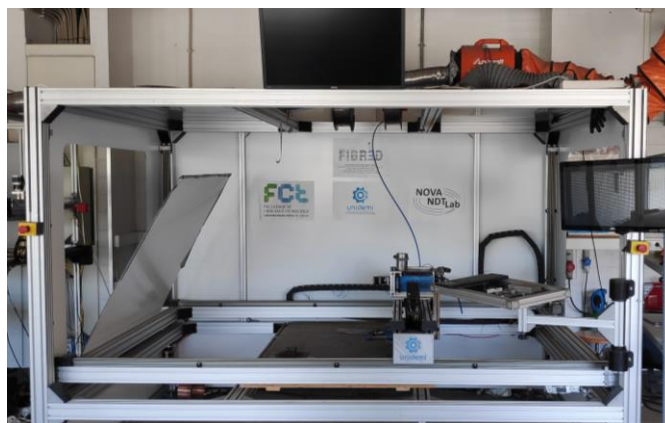


Figura 3.1- Mesa Triaxial Utilizada no WAAM.

Duarte et al elaborou tal dispositivo para o núcleo de tecnologia industrial, permitindo o forjamento a quente das camadas de material ao mesmo tempo que estas são depositadas.[5]

Pretende-se numa posterior fase comparar as propriedades mecânicas dos espécimes produzidos via HF-WAAM com outros mesmos espécimes produzidos por WAAM, tomados como espécimes de controlo, com vista a idealizar as alterações produzidas pelo forjamento a quente.

O dispositivo utilizado na produção de espécimes via HF-WAAM e WAAM foi o mesmo para ambos os processos, uma vez que o equipamento permite a habilitação e inibição da funcionalidade Hot-Forging, permanecendo o martelo de forjamento acoplado à tocha, no entanto imobilizado eletronicamente pela interface do dispositivo.

3.1 Materiais e Equipamentos Utilizados

Na sequência da realização do procedimento experimental, nomeadamente a construção de espécimes para análise e estudo foi utilizado o aço de baixa liga com a referência ER90S-G de acordo com a norma AWS A5.28, com diâmetro de 1 mm, cuja composição e propriedades mecânicas são expressas nas tabelas 3.1 e 3.2, respetivamente.

Tabela 3.1- Constituição do fio de alimentação ER90S-G, da Bohler, em percentagem de peso [wt%]. [16]

<i>Elemento</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>Si</i>	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>
% Peso	2.6	1.0	0.6	0.08	0.95	Bal.

Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas do fio de ER90S-G, da Bohler.[16]

<i>Liga</i>	<i>Tensão de Cedência (MPa)</i>	<i>Tensão de Ruptura (MPa)</i>	<i>Elongação (L₀=5D₀) (%)</i>
ER90S-G	440	580	23

No âmbito da necessidade do processo WAAM incluir uma camada sacrificial para a deposição das primeiras camadas de material foram selecionados troços de barra de Aço Carbono, o qual se denominará de substrato. Na produção de espécimes mais pequenos e cordões de soldadura para o estudo de parâmetros foram utilizados substratos de menores

dimensões, Fig. 3.2, sendo que para os maiores espécimes os substratos apresentaram as dimensões presentes na Fig. 3.3.

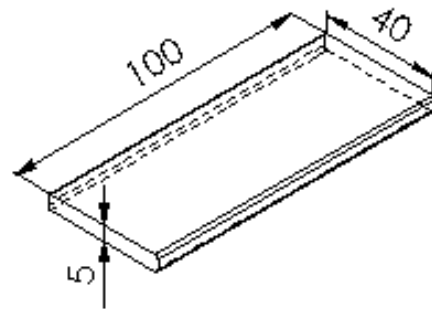


Figura 3.2- Substrato utilizado com 100 mm de comprimento.

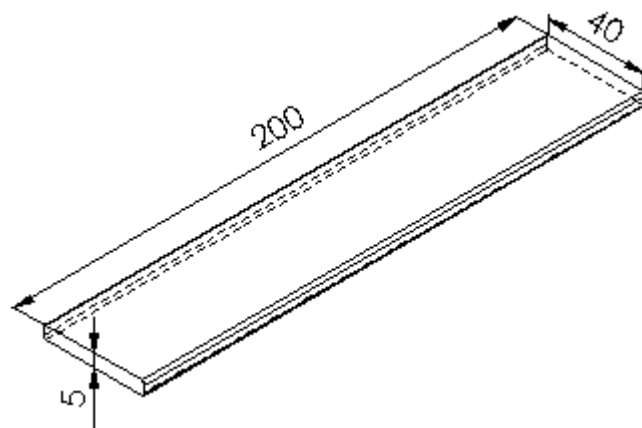


Figura 3.3- Substrato utilizado com 200 mm de comprimento.

Para a proteção do banho de fusão foi utilizado um gás de proteção com denominação comercial de *Árgon Puro*, cuja sua constituição se encontra na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Constituição do gás de proteção. [15]

<i>Elemento</i>	<i>Ar</i>	<i>H₂O</i>	<i>O₂</i>	<i>CnHm</i>
	99.999%	<3 ppm	<2 ppm	<0.5 ppm

Foi utilizado um equipamento de soldadura *KEMPPPI*, modelos *Pro MIG 501* e *Pro MIG 3200*, correspondentes ao controlador de processo e fonte elétrica de alimentação, respetivamente.

Para o fornecimento do fio de alimentação foram utilizados motores de passo controlados pelo software que gere o processo WAAM.

Relativamente ao acionamento do martelo oscilatório responsável pela deformação plástica, o mesmo fica a cargo de dois cilindros pneumáticos da *Festo* de referência *ADN-12-10-I-P-A* com um êmbolo de 12 mm de diâmetro, sendo que a pressão de alimentação de ar comprimido foi estabelecida em 4.5 bar. Desta forma a força máxima exercida pelo martelo oscilante promovida pelos cilindros equilibradamente colocados é de cerca de 100 N.

Para recolher dados relativos aos ciclos térmicos durante a produção de espécimes utilizou-se a câmara termográfica da *Fluke* com referência *TI400*.

A restante maquinaria utilizada no procedimento em estudo incluiu a serra elétrica de fita, cujo modelo é *GBS-218 Eco Autocut*, para o corte dos substratos sacrificiais e dos espécimes no sentido de fazer estudo a secção transversal dos mesmos, Fig. 3.4.

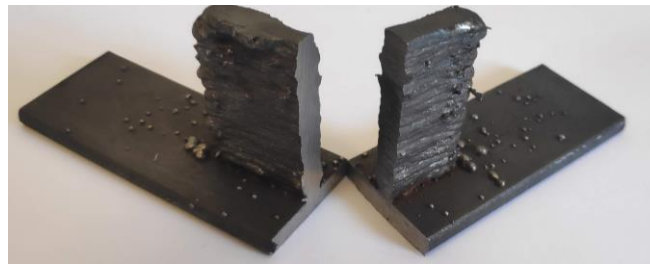


Figura 3.4 - Imagem do corte transversal realizado nos espécimes.

Após a verificação da morfologia transversal dos espécimes revelou-se necessário observar macroscopicamente a secção longitudinal dos mesmos para avaliar a qualidade das amostras produzidas, assim utilizou-se uma fresadora horizontal da *Henrique Holke* no seu modelo *F-1010*, utilizando como ferramenta uma fresa de 5 gumes com 40 mm de diâmetro, Fig. 3.5. A velocidade de rotação estabelecida foi de 780 rpm com avanço manual e uma profundidade de corte de 0.5 mm.



Figura 3.5 - Fresa de 40 mm.

No seguimento da análise transversal dos espécimes revelou-se necessário extrair dos mesmos um troço de pequenas dimensões, Fig. 3.6 a), para uma posterior análise microscópica, após a integração numa solução de resina *epoxy*, Fig. 3.6 b), utilizando o equipamento de observação da *Leica* de referência *DMI 5000 M*.

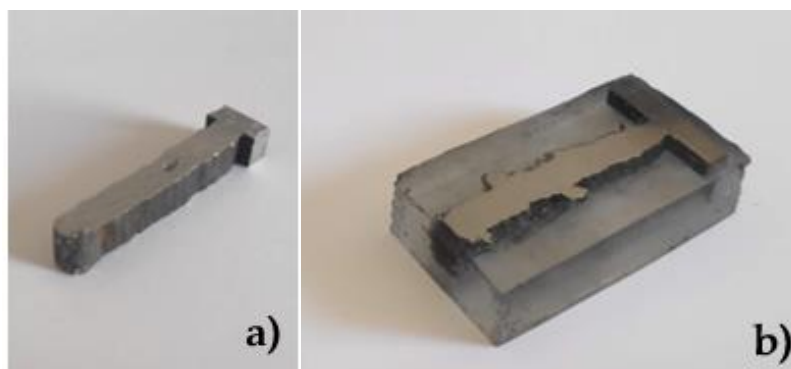


Figura 3.6 - Imagens da análise de espécimes: a) Troço transversal b) Imersão em resina epoxy.

Para a observação microscópica foi ainda necessária a preparação metalográfica das amostras, utilizando a sequência de lixas P80-P240-P320-P400-P600-P1200-P2500 terminando com o polimento espelhado da face a analisar da amostra recorrendo a pasta abrasiva com base diamantada de 1 μm , culminando a preparação da amostra com o contraste químico recorrendo a uma solução de Nital (2% de concentração). Tanto o processo de lixar como polir foram auxiliados pela polidora PHOENIX ALPHA, no seu modelo Grinder/Polisher.

Numa fase mais final do procedimento realizado, em que, após a produção, corte e fresagem dos espécimes de maiores dimensões, Fig. 3.7 a), foi necessário retificar dimensionalmente as chapas de material obtidas, para que estas pudessem ser talhadas em

pequenos provetes através do processo de eletroerosão (*EDM*). Para tal utilizou-se a retificadora da *Sunlike* no modelo *SSG-2550AH*, Fig. 3.7 b).

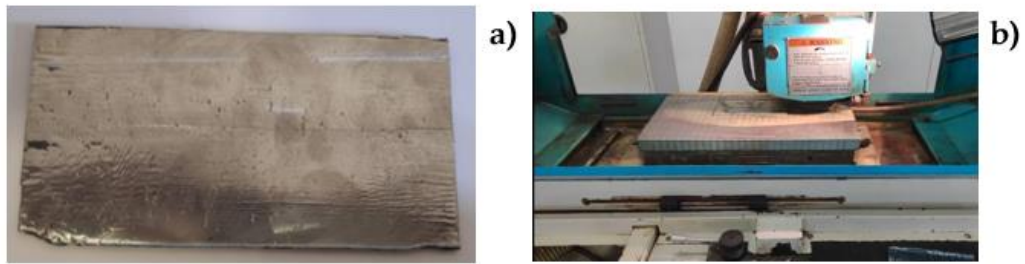


Figura 3.7 - Processamento de espécimes: a) Chapa fresada. b) Retificação da chapa.

Após o corte por *EDM* levaram-se a cabo os ensaios de tração uniaxial através da máquina de tração *Autograph Shimadzu*, Fig. 3.8.



Figura 3.8 – Aparelho de ensaios de tração.

De salientar é ainda a realização de ensaios de dureza efetuados com o equipamento da *Mitutoyo*, que tem de nominação comercial *HM-112 Micro-Vickers Hardness Testing Machine*, segundo a norma *ISSO 6507-1:2018*. [16]

3.2 Construção de espécimes

Definiram-se duas geometrias de espécimes, de pequenas dimensões, Fig. 3.9 a), e espécimes de grandes dimensões, Fig. 3.9 b). Numa fase mais inicial do processo foram produzidos apenas alguns cordões de soldadura para estudo da parametrização a utilizar.

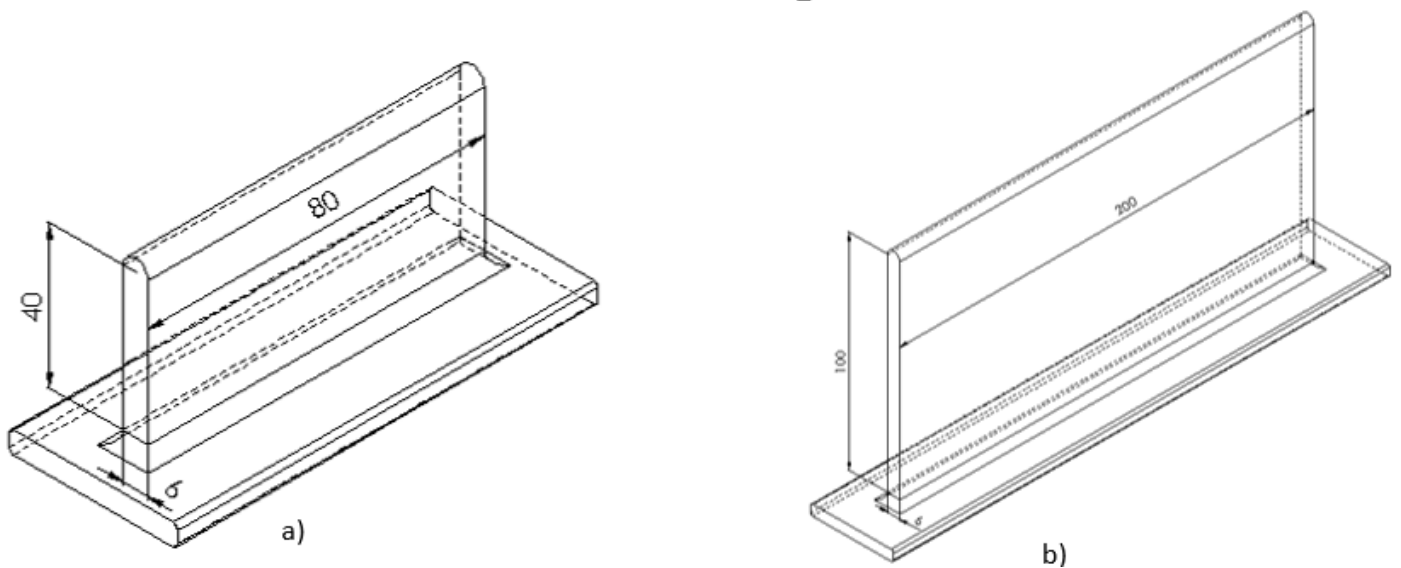


Figura 3.9 - Dimensões projetadas para os espécimes de menor dimensão:
a) Parede de 80 mm. b) Parede de 200 mm.

A produção de dois espécimes revela-se necessária pois o objetivo final deste estudo tem como base a obtenção de provetes de tração. Estes necessitam de ser obtidos a partir de espécimes esbeltos em formato retangular, como evidenciado nas figuras acima. Tais espécimes serão chamados de paredes, de nomenclatura Px.x para paredes de pequenas dimensões e Gx.x para paredes de grandes dimensões. Para cordões produzidos utilizar-se-á a nomenclatura Cx.x para a identificação dos mesmos. Como para as paredes de menor dimensão seria impossível extrair provetes adequados para ensaios de tração, tanto na geometria necessária, como no número de provetes extraídos, sendo que em número inferior promoveriam o erro e a fiabilidade dos resultados obtidos para as propriedades mecânicas dos mesmos, optando-se assim por produzir paredes de maiores dimensões que verificam tais requisitos.

Para o cálculo de grandezas importantes como a Entrega Térmica, ET [J], e o comprimento de fio necessário a cada camada (CF), foram utilizadas as equações 3.1 e 3.2 respetivamente.

$$ET = \frac{I \times U}{TS} \times \mu \quad (\text{J/mm}) \quad (3.1)$$

Onde I é a corrente medida pelo aparelho de soldadura [A], U [V] a tensão do arco elétrico e TS [mm/min] a velocidade da tocha. O parâmetro μ é correspondente à eficiência

de entrega de energia no arco elétrico, sendo estabelecido tal parâmetro como 0.8 para o processo MIG utilizado. [17]

$$CF = \frac{L \times WFS}{TS} \times 1000 \quad (\text{mm}) \quad (3.2)$$

Onde L [mm] é o comprimento da camada depositada, WFS [m/min] a velocidade de alimentação do fio e TS [mm/min] a velocidade da tocha.

De importância é ainda a taxa de deposição de material, DR [cm³/h], que aquando da determinação da parametrização ideal será determinada para posterior referência. A expressão 3.3 permite o cálculo de tal parâmetro.

$$DR = \frac{L \times W \times H}{DT} \quad (\text{cm}^3/\text{h}) \quad (3.3)$$

Da equação acima L [mm] representa o comprimento do cordão depositado, W [mm] a largura média do mesmo, H [mm] a altura média de cada camada e DT [h] o tempo médio decorrido na deposição de cada camada.

A estratégia de deposição será feita recorrendo á deposição seletiva de camadas, segundo uma trajetória retilínea, com um *stick out* na ordem dos 8 mm, alterando em cada camada a direção de deposição, estabelecendo assim a estratégia de deposição em zig-zag, Fig. 3.10.

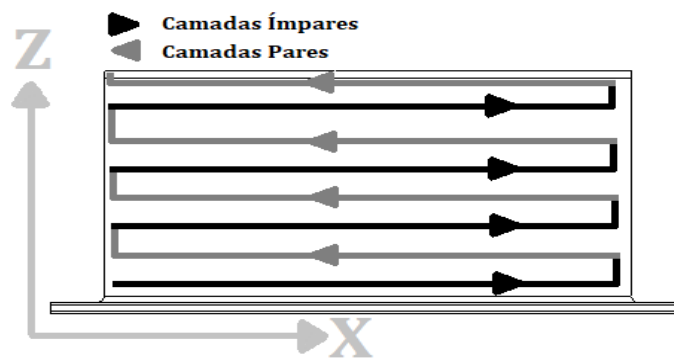


Figura 3.10- Ilustração da estratégia de deposição de material.

O dispositivo de deposição de material será o da Fig. 3.11, onde o bocal de geometria circular terá também a função de martelo forjante, tendo como controlador o software desenvolvido em estudos anteriores, associado a subcontroladores dos vários parâmetros regulando todo o processo em simultâneo.

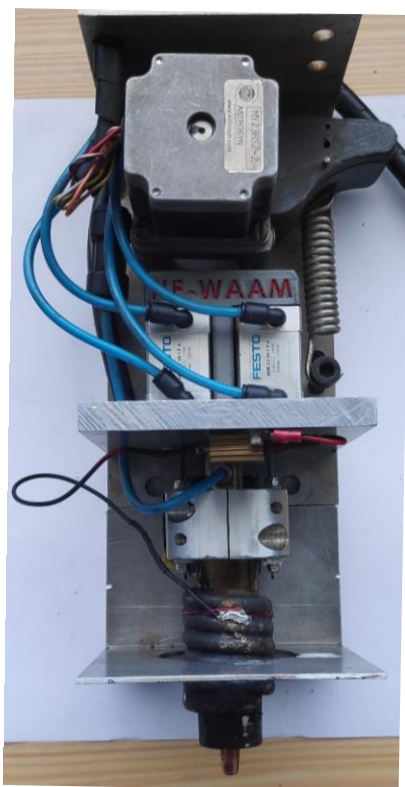


Figura 3.11 - Dispositivo de deposição utilizado.

Para possibilitar a deposição de camadas sucessivas, sem acumulação excessiva de temperatura no material, é necessário aguardar um intervalo de tempo entre camadas para que o material já depositado possa escoar parte do calor resultante do processo de fusão de material. Tal compasso de espera, WT, pode ser estabelecido no intervalo de um a dois minutos. [5]

De forma a prevenir empenos quer no substrato sacrificial quer na construção da parede recorreu-se à boa prática de fixar o substrato à mesa de soldadura através de grampos de fixação.

3.3 Resumo do procedimento

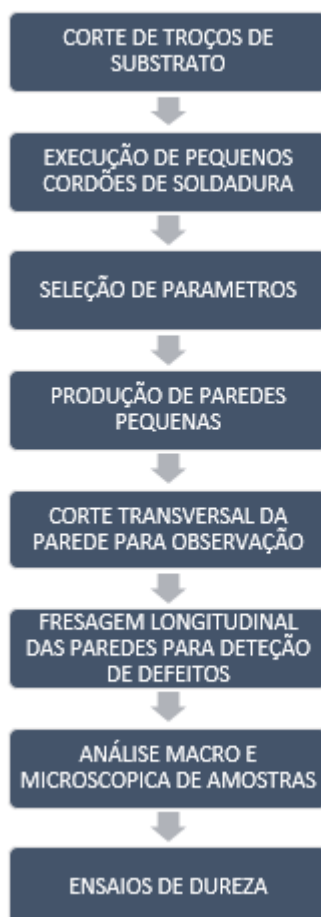
Em suma explicitando a sequência de tarefas executadas, assume-se a divisão do procedimento em duas fases distintas. A primeira fase é a produção de paredes mais pequenas, Fig. 3.12 a), de maneira a encontrar a melhor parametrização para o processo, evitando assim desperdício de material ao produzir imediatamente paredes de grandes dimensões. É também importante referir a necessidade de verificar a aplicabilidade da

mesma parametrização no WAAM e no HF-WAAM, uma vez que não existem referências que apontem para o sucesso da utilização dos mesmos parâmetros de processo em ambas as variantes.

Numa segunda fase, Fig. 3.12 b), e assumindo que a parametrização para as paredes mais pequenas se aplica também em paredes de maiores dimensões, extraindo-se assim provetes de tração de locais estratégicos para posterior análise.

No final do processo pretende-se comparar as propriedades das amostras retiradas de cada parede produzida, sendo de especial interesse a comparação entre provetes recortados de paredes com parâmetros semelhantes produzidas via WAAM e via HF-WAAM, assim como avaliar a influência da orientação de cada provete na sua resistência mecânica.

a) PRODUÇÃO DE ESPÉCIMES



b) RECORTE DE PROVETES

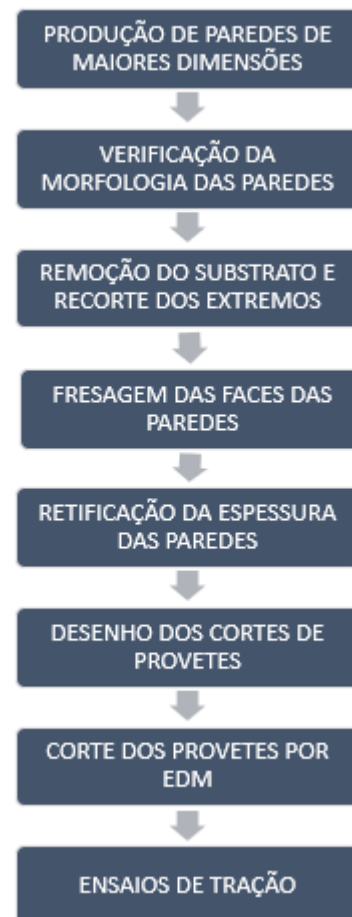


Figura 3.12- Sequência de processos para: a) determinação de parâmetros.
b) processamento e extração de provetes

4 Análise de Resultados

Iniciou-se o trabalho experimental pela preparação de todo o *set-up* necessário, nomeadamente verificação das condições do aparelho WAAM, corte dos substratos necessários, familiarização com o software e hardware e cuidados a ter durante o processo. Após esta etapa foram então realizados cordões de soldadura onde se variaram vários parâmetros de processo, com vista a seleccionar os mesmos para posterior realização da parede de menores dimensões.

Para cada tipo de parametrização foram depositados dois cordões de soldadura sobrepostos, os quais tiveram como principais parâmetros de processo os presentes na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Parâmetros de processo e respetivas unidades.

Designação	Acrónimo	Unidades
Velocidade de deposição	<i>TS</i>	mm/min
Velocidade de alimentação do fio	<i>WFS</i>	m/min
Tensão	<i>U</i>	V
Caudal de gás de proteção	<i>QG</i>	l/min
Tempo entre camadas	<i>WT</i>	s
Passo de forjamento	<i>FS</i>	mm/ciclo
Frequência de forjamento	<i>f</i>	Hz


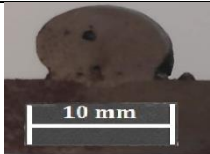

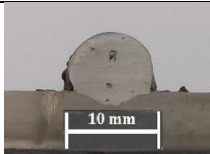

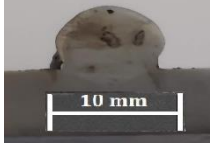
4.1 Análise de Parâmetros

Os primeiros resultados obtidos visam verificar a alteração morfológica nos cordões de soldadura segundo a alteração da velocidade de alimentação do fio, WFS, denominando-se assim este primeiro ensaio de C1.1. Assim fixaram-se os restantes parâmetros, Tabela 4.2, variando apenas o WFS, Tabela 4.3. Ainda após a produção dos espécimes estes foram posteriormente cortados transversalmente e avaliada a taxa de diluição do material depositado no substrato de sacrifício.

Tabela 4.2- Parâmetros fixados para o ensaio C1.1.

WT [s]	U [V]	QG [l/min]	TS [mm/min]
60	20	15	100

Tabela 4.3 - Parâmetros e imagens dos resultados do ensaio C1.1.


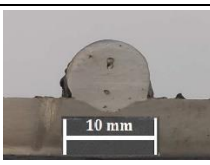

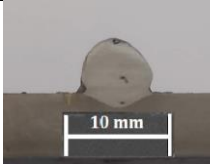


CF [mm]	ET [J/mm]	WFS [m/min]	Diluição [%]	Cordão de Material Depositado	Corte Transversal
2400	1260	3	11,5		
3200	1549	4	20,4		
4000	1838	5	32,3		

O cordão morfológicamente mais apelativo foi o correspondente ao WFS de 4 m/min. Assim no ensaio seguinte, C1.2, estabeleceu-se a velocidade de alimentação do fio, WFS, Tabela 4.4, e observou-se a variação da morfologia dos cordões com a variação da velocidade da tocha, TS, Tabela 4.5.

Tabela 4.4 - Parâmetros fixados para o ensaio C1.2.

WT [s]	U [V]	QG [l/min]	WFS [m/min]
60	20	15	4

Tabela 4.5 - Parâmetros e imagens dos resultados do ensaio C1.2.

CF [mm]	ET [J/mm]	TS [mm/min]	Diluição [%]	Cordão de Material Depositado	Corte Transversal
3200	1549	100	20,4		
1600	775	200	25,7		
1067	516	300	32,3		

Analisando a anterior tabela observa-se que o cordão com a melhor morfologia será o correspondente a um TS de 100 mm/min.

Assim segundo a ordem de trabalhos estabelecida no capítulo anterior iniciou-se a produção de paredes com os parâmetros selecionados. Contudo logo nas camadas iniciais, a temperatura verificada no espécime revelou-se de tal ordem que o material permanecia em regime viscoplástico apresentando assim aglomerados de material que impediam a continuidade da construção do espécime. Conseqüentemente, foi necessário determinar melhores parâmetros de processo. Recorreu-se a literatura existente para materiais semelhantes para aproximar os parâmetros de partida e assim aperfeiçoar e adaptar os mesmos ao material em estudo [5].


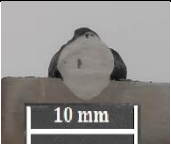



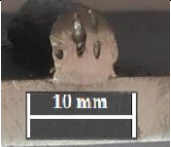
Iniciou-se a produção de uma nova amostra de vários cordões, C1.3, onde se verificou um aumento considerável da velocidade de deposição face às amostras anteriores. Assim nesta amostra fez-se variar a velocidade de deposição do fio, WFS [m/min], e mantiveram-se

os restantes parâmetros, Tabela 4.6. Os resultados morfológicos dos cordões de soldadura encontram-se na Tabela 4.7.

Tabela 4.6 - Parâmetros fixados para o ensaio C1.3.

WT [s]	U [V]	QG [l/min]	WFS [m/min]
60	20	15	4

Tabela 4.7 - Parâmetros e imagens dos resultados do ensaio C1.3.

CF [mm]	ET [J/mm]	TS [mm/min]	Diluição [%]	Cordão de Material Depositado	Corte Transversal
1067	516	300	32,3		
889	431	360	15,82		
800	388	400	13,58		

Analisando os espécimes acima é visível a necessidade de ajuste do caudal de gás de proteção, sobretudo por insuficiência de proteção do banho de fusão nas extremidades dos cordões. Contudo é possível observar que o cordão morfológicamente mais adaptado à construção de paredes é o correspondente ao TS de 360 mm/min, pois apresenta a espessura necessária para albergar cordões de sobreposição, contrariamente ao cordão com velocidade da tocha de 300 mm/min, que apresenta uma espessura reduzida. Quanto ao último cordão da tabela anterior concluiu-se que devido a sua menor diluição poderia apresentar maior probabilidade de promover a extinção do arco elétrico durante a deposição de material, assim como uma inferior coesão entre as camadas sucessivas de material.




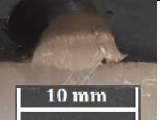
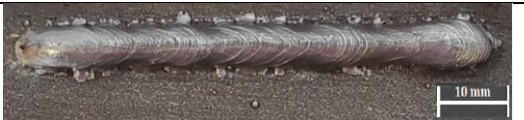
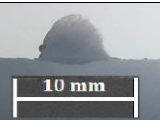
Na seguinte amostra, C1.4, selecionou-se a velocidade da tocha, TS, ideal como sendo 360 mm/min. Assim este e os restantes parâmetros à exceção do caudal de gás de proteção, foram fixados, Tabela 4.8. Na Tabela 4.9 são apresentados os resultados obtidos para o teste

em que se pretendeu observar com mais clareza a influência do caudal de gás de proteção em cordões de soldadura.

Tabela 4.8 - Parâmetros fixados para o ensaio C1.4.

WT [s]	U [V]	TS [mm/min]	WFS [m/min]
60	20	360	4

Tabela 4.9 - Parâmetros e imagens dos resultados do ensaio C1.4.

CF [mm]	ET [J/mm]	QG [l/min]	Diluição [%]	Cordão de Material Depositado	Corte Transversal
889	430	8	9,34		
889	430	15	12,81		
889	430	20	17,82		

Analisando os resultados da anterior tabela determina-se como a melhor parametrização relativa ao gás de proteção a correspondente ao caudal de 20 l/min. Tendo neste momento a parametrização encontrada, prossegue-se na sequência de tarefas anteriormente estabelecida no sentido de produzir paredes de menores dimensões utilizando a parametrização escolhida.

Produziram-se três paredes de pequenas dimensões, uma delas produzida apenas por WAAM, o espécime P1.1, e outras duas produzidas via HF-WAAM com diferentes frequências de forjamento, f , nomeadamente uma de frequência 5 Hz, denominada de P1.2, e outra de frequência 7 Hz, denominada de P1.3.

Para a melhor caracterização geométrica das paredes produzidas foram adotados novos parâmetros de caracterização, Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Parâmetros dimensionais das Paredes produzidas

Designação	Representação	Unidades
Comprimento nominal da Parede	L	mm
Altura nominal da Parede	H	mm
Número de Camadas Depositadas	N	-

Na seguinte tabela, Tabela 4.11, apresentam-se os parâmetros utilizados para a produção do espécime P1.1. Os resultados são expostos na Fig.4.1.

Tabela 4.11 - Parâmetros de processo utilizados na produção da parede P1.1.

CF [mm]	ET [J/mm]	WT [s]	QG [l/min]	U [V]	TS [mm/min]	WFS [m/min]	L [mm]	H [mm]	N
889	430	60	20	20	360	4	80	40	30



Figura 4.1 - Resultados obtidos na produção do espécime P1.1.

Como é visível morfologicamente, a parametrização aparentou ser adequada, prosseguindo-se para a produção da mesma tipologia de parede utilizando o processo HF-WAAM. Primariamente produziu-se o espécime P1.2, Fig. 4.2, onde se utilizou a frequência de forjamento de 5 Hz, Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Parâmetros de processo utilizados na produção da parede P1.2.

CF [mm]	ET [J/mm]	WT [s]	QG [l/min]	U [V]	TS [mm/min]	WFS [m/min]	L [mm]	H [mm]	N	f [Hz]	FS [mm/ciclo]
889	430	60	20	20	360	4	80	40	39	5	1,2

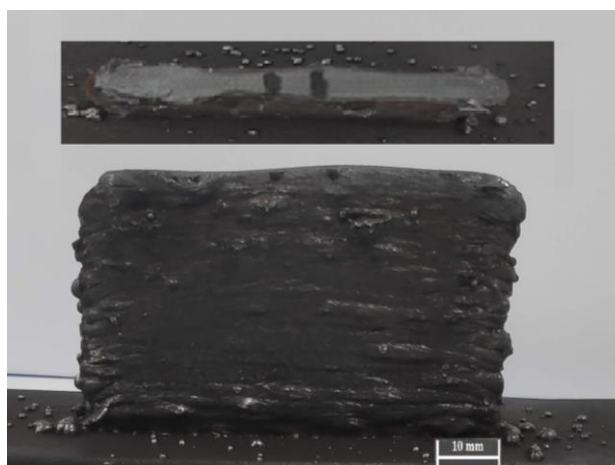


Figura 4.2 - Resultados obtidos na produção do espécime P1.2.

Com vista a estudar a influência da frequência de forjamento na morfologia das paredes produzidas foi realizado um novo ensaio, P1.3, onde se variou a frequência de forjamento (f) para 7 Hz, sendo que os restantes parâmetros se mantiveram, Tabela 4.13. Os resultados obtidos encontram-se expostos na Fig.4.3.

Tabela 4.13 - Parâmetros de processo utilizados na produção da parede P1.3.

CF [mm]	ET [J/mm]	WT [s]	QG [l/min]	U [V]	TS [mm/min]	WFS [m/min]	L [mm]	H [mm]	N	f [Hz]	FS [mm/ciclo]
889	430	60	20	20	360	4	80	40	45	7	0,86

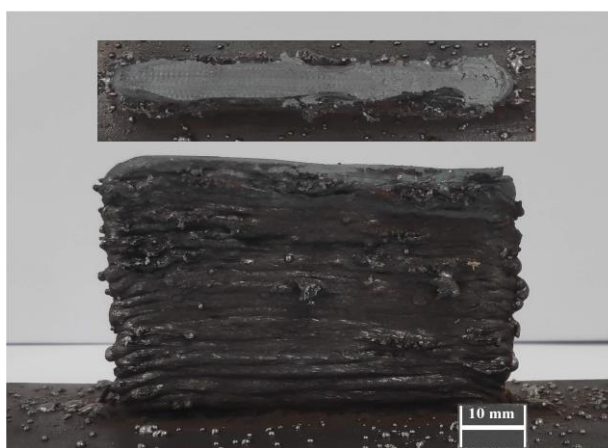


Figura 4.3 - Resultados obtidos na produção do espécime P1.3.

Analisando os resultados obtidos para o espécime P1.3 é evidente a alteração da morfologia da parede relativamente ao espécime P1.2, apresentando o espécime com maior frequência de forjamento uma rude morfologia, com maior rugosidade superficial, menor

rigor geométrico e ainda uma grande instabilidade durante a deposição de material uma vez que o mesmo permanece muito mais tempo em regime viscoplástico quando comparado com o espécime P1.2.

Foram então cortados troços transversais de cada uma das paredes produzidas. Tais troços foram embebidos em solução de resina *epoxy*, lixados e polidos mediante os processos detalhados no capítulo anterior. Os resultados obtidos de tais processos encontram-se expostos nas imagens da Figura 4.4.

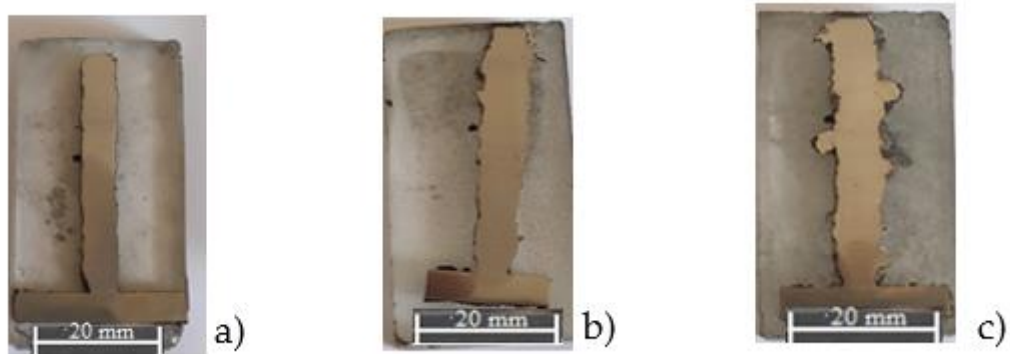


Figura 4.4 – Corte transversal dos espécimes: a) P1.1 b) P1.2 c) P1.3.

Não sendo visíveis defeitos prosseguiu-se para a produção de duas paredes de maiores dimensões, G1.1 e G1.2, selecionando-se a mesma parametrização do espécime P1.1 e 1.3, respetivamente. A escolha deste último deve-se ao seu menor passo de forjamento, FS [mm/ciclo], prevendo-se melhores propriedades mecânicas comparativamente ao espécime P1.2.

Os espécimes produzidos correspondentes as paredes de grandes dimensões, G1.1 e G1.2, encontram-se expostos nas Figuras 4.5 a) e b), respetivamente.

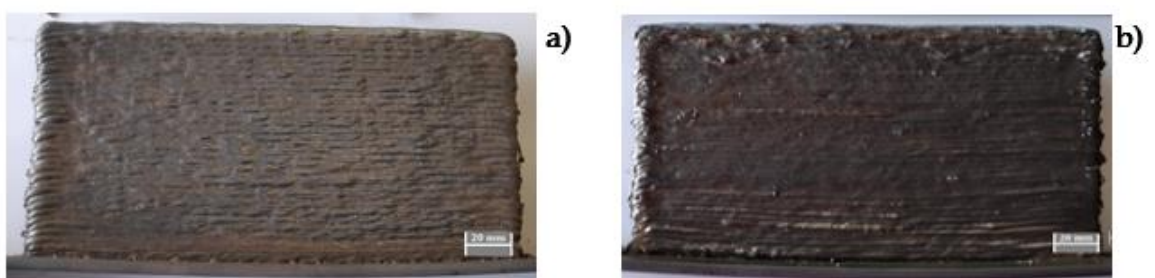


Figura 4.5 - Imagens das paredes produzidas: a) G1.1 b) 1.2.

Analisando em pormenor as imagens da Fig. 4.5 é evidente a presença de maior rugosidade superficial na parede G1.2, produzida via HF-WAAM. Em ambos os espécimes é

visível a distorção provocada no substrato sacrificial que se prevê originada por tensões residuais originadas no processo de deposição de material.[18]

O tempo de produção de cada parede devido ao número de camadas necessárias para obter as dimensões desejadas verificou-se bastante longo, dificultando o processo. De tal forma que previu necessária a alteração do tempo de espera entre camadas, WT [s], devido à esperada acumulação de temperatura em excesso durante o processo de deposição de material, sendo por isso necessário aguardar mais tempo pelo arrefecimento de cada camada.

Os dados relativos a cada parede encontram-se na Tabela 4.14

Tabela 4.14 - Características temporais e geométricas das paredes G1.1 e G1.2.

	WT [s]	L [mm]	H [mm]	N	Tempo de Produção [min]
G1.1	90	200	100	48	135
G1.2	90	200	100	62	150

Procedeu-se à fresagem das paredes G1.1 e G1.2. Este processo de remoção de material revelou-se desafiante na medida em que o material constituinte dos espécimes apresenta elevada resistência ao arranque de aparas, o que induz bastante temperatura e desgaste na ferramenta utilizada, sendo necessário substituir as pastilhas de corte no final da fresagem de cada parede. [19]

No final da fresagem os resultados obtidos foram esclarecedores no que toca aos benefícios do processo HF-WAAM, Fig. 4.6 e Fig. 4.7.

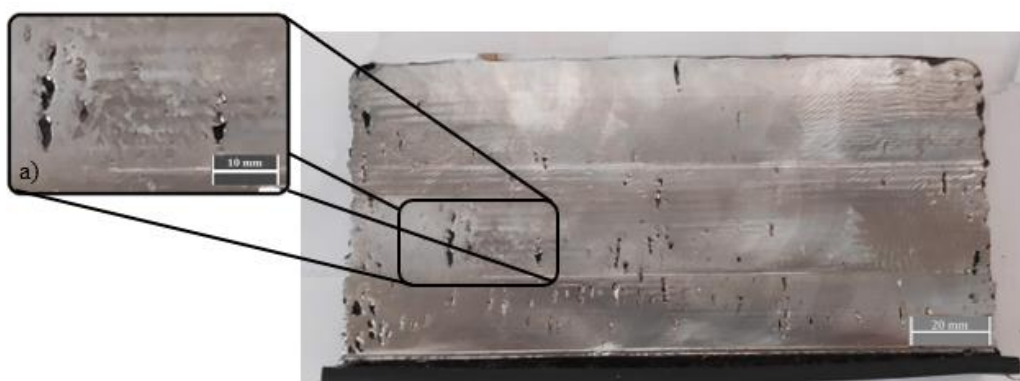


Figura 4.6 – Resulta da fresagem da Parede G1.1. a) Detalhe da porosidade encontrada.

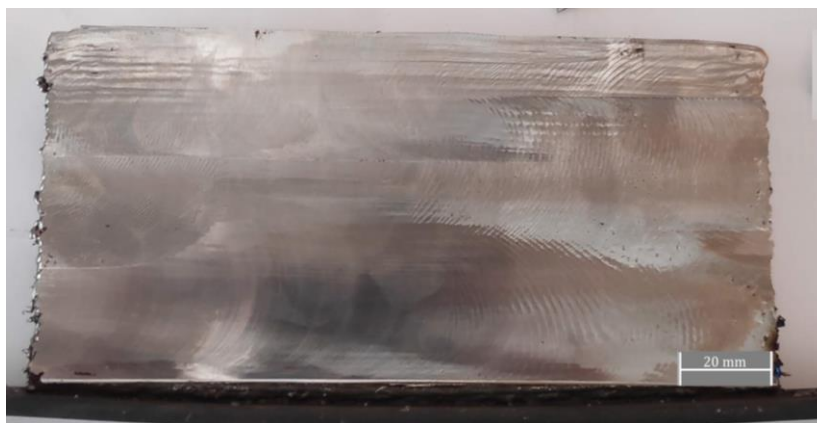


Figura 4.7 - Resultado da fresagem da Parede G1.2.

Observando a amostra obtida é evidente a melhoria da morfologia interna da parede produzida por HF-WAAM face à parede produzida apenas via WAAM. Esta última apesar de externamente não apresentar nenhum defeito visível da mesma forma que o corte transversal realizado para a mesma parametrização não apresentou nenhum defeito, apresenta poros de grandes dimensões que se encontram dispersos por toda a área transversal.

Xiong et al [20] determinou que problemas relacionados com a criação e extinção do arco elétrico podiam provocar alterações no banho de fusão o que por sua vez possa explicar defeitos como porosidades nas extremidades das paredes onde se inicia e termina a deposição de cada camada. Contudo as porosidades nos troços intermédios do espécime apontam para outros parâmetros menos adequados, tais como tempo de espera entre camadas, WT [s], insuficiente da mesma forma que possivelmente uma entrega térmica, ET [J/mm], demasiado elevada, não oferecendo consistência suficiente às camadas subjacentes para acomodar devidamente o material a ser depositado promovendo assim a formação de poros.

Assim observa-se que é necessária a análise da secção transversal para a determinação visual da qualidade morfológica das paredes produzidas, permitindo averiguar se a parametrização é ou não adequada.

Para futura análise de propriedades mecânicas, nomeadamente o corte de provetes de tração e ensaio dos mesmos apenas se irá utilizar espécimes extraídos da parede G1.2 devido à evidencia clara de fracas propriedades mecânicas do provete G1.1 promovidas pelos macro poros observados, Fig.4.6 a).

Uma vez que os parâmetros utilizados se revelaram ineficientes na produção de paredes de grandes dimensões utilizando o processo WAAM foi necessária uma nova

procura por parametrização. Nesta nova fase procedeu-se à fresagem das paredes de pequenas dimensões para a verificação da existência ou não de poros orientados longitudinalmente.


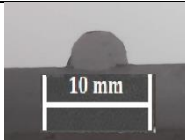

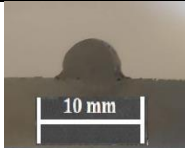
Tendo sido relacionados os defeitos na parede G1.1 com a excessiva entrega térmica durante o processo, nos novos parâmetros, ir-se-á reduzir a entrega térmica a par do aumento do tempo de espera entre camadas. Este último passará a ser de 120 segundos.

Para a otimização dos parâmetros ir-se-á também aumentar a velocidade de deposição de material, TS [mm/min], e verificar a influencia deste aumento em cordões de soldadura. Os parâmetros utilizados no ensaio C2.1 encontram-se expostos na Tabela 4.15 e os resultados obtidos na Tabela 4.16.

Tabela 4.15 – Parâmetros fixados para o ensaio C2.1.

WT [s]	U [V]	QG [l/min]	WFS [m/min]
120	20	20	4

Tabela 4.16 - Parâmetros e imagens dos resultados do ensaio C2.1.


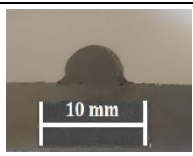

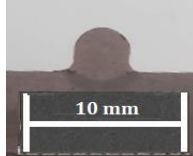
CF [mm]	ET [J/mm]	TS [mm/min]	Diluição [%]	Cordão de Material Depositado	Corte Transversal
762	369	420	28,5		
640	310	500	18,8		

Como análise aos resultados anteriores é visível a redução da área de secção dos cordões face aos resultados previamente obtidos. Estes resultados demonstram que a redução da entrega térmica deu origem aos efeitos desejados. Ainda assim com vista a reduzir a entrega térmica um pouco mais realizou-se um outro ensaio em que se fixou a velocidade da tocha, [TS], em 500 mm/min, fazendo-se variar ligeiramente a tensão do arco elétrico, U [V]. A parametrização utilizada no ensaio C2.2 encontra-se na Tabela 4.17, assim como os resultados na Tabela 4.18.

Tabela 4.17 - Parâmetros fixados para o ensaio C2.2.

WT [s]	TS [mm/min]	QG [l/min]	WFS [m/min]
120	500	20	4

Tabela 4.18 - Parâmetros e imagens dos resultados do ensaio C2.2

CF [mm]	ET [J/mm]	U [V]	Diluição [%]	Cordão de Material Depositado	Corte Transversal
640	310	20	18,8		
640	279	18	15,8		

Como previsto a parametrização em que se fez o anterior espécime revelou uma redução da entrega térmica com a redução da tensão do arco elétrico não tendo uma influência significativa na morfologia do cordão face ao ensaio C2.1

Antes de passar para a etapa correspondente à produção de paredes de menores dimensões deliberou-se a realização de um terceiro ensaio com a parametrização selecionada utilizando um cordão de controlo comparativamente a um mesmo cordão realizado por HF-WAAM, observando assim aspetos como a diluição do mesmo face ao cordão produzido por WAAM. Os parâmetros utilizados para o cordão C2.3, produzido via HF-WAAM, encontram-se na Tabela 4.19, assim como os resultados comparativos na Tabela 4.20.

Tabela 4.19 - Parâmetros fixados para o ensaio C2.3

CF [mm]	ET [J/mm]	WT [s]	QG [l/min]	U [V]	TS [mm/min]	WFS [m/min]	L [mm]	f [Hz]	FS [mm/ciclo]
1600	278	120	20	18	500	4	200	7	1,19

Tabela 4.20 - Parâmetros e imagens dos resultados do ensaio C2.3.

CF [mm]	ET [J/mm]	U [V]	Diluição [%]	Hot Forged	Cordão de Material Depositado	Corte Transversal
640	278	18	15,8	Não		
640	278	18	24	Sim		

É visível nos resultados anteriores o efeito benéfico do HF-WAAM face ao WAAM, na medida em que a taxa de diluição aumentou bastante quando utilizado o processo com o martelo forjante.

Prossegue-se assim para a produção de paredes de menores dimensões. A parametrização utilizada na produção do espécime P2.1 encontra-se exposta na Tabela 4.21, assim como o resultado da mesma na Fig.4.8.

Tabela 4.21 - Parâmetros de processo utilizados na produção da parede P2.1.

CF [mm]	ET [J/mm]	WT [s]	QG [l/min]	U [V]	TS [mm/min]	WFS [m/min]	L [mm]	H [mm]	N
640	278	120	20	18	500	4	80	40	28



Figura 4.6 - Resultados obtidos na produção do espécime P2.1.

Na seguinte fase produzir-se-á uma parede de dimensões pequenas de igual parametrização à do espécime P2.1, mas utilizando o processo HF-WAAM. Assim tal espécime, P2.2, Fig. 4.9, utilizará a parametrização presente na Tabela 4.22.

Tabela 4.22 - Parâmetros de processo utilizados na produção da parede P2.2.

CF [mm]	ET [J/mm]	WT [s]	QG [l/min]	U [V]	TS [mm/min]	WFS [m/min]	L [mm]	H [mm]	N	f [Hz]	FS [mm/ciclo]
640	278	120	20	18	500	4	80	40	30	5	1,73

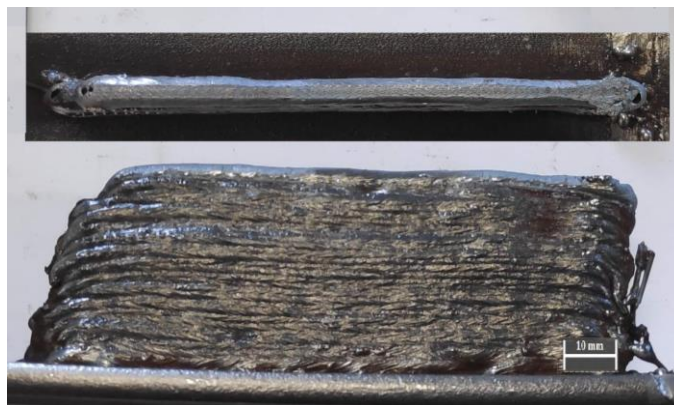


Figura 4.7 - Resultados obtidos na produção do espécime P2.2.

Com vista a verificar as melhorias na parametrização utilizada, nomeadamente pelo aumento da frequência de forjamento, f , para 7 Hz. Assim produziu-se o espécime P2.3, onde na Tabela 4.23, se apresenta a parametrização utilizada.

Na Fig. 4.8 apresentam-se os resultados obtidos na sequência da produção do espécime.

Tabela 4.23 - Parâmetros de processo utilizados na produção da parede P2.3.

CF [mm]	ET [J/mm]	WT [s]	QG [l/min]	U [V]	TS [mm/min]	WFS [m/min]	L [mm]	H [mm]	N	f [Hz]	FS [mm/ciclo]
640	278	120	20	18	500	4	80	40	34	7	1,2



Figura 4.8 - Resultados obtidos na produção do espécime P2.3.

Analisando os espécimes acima produzidos, cortando a sua secção transversal, Fig. 4.9, é observável uma boa morfologia para todos, não apresentando assim nenhum deles porosidades.

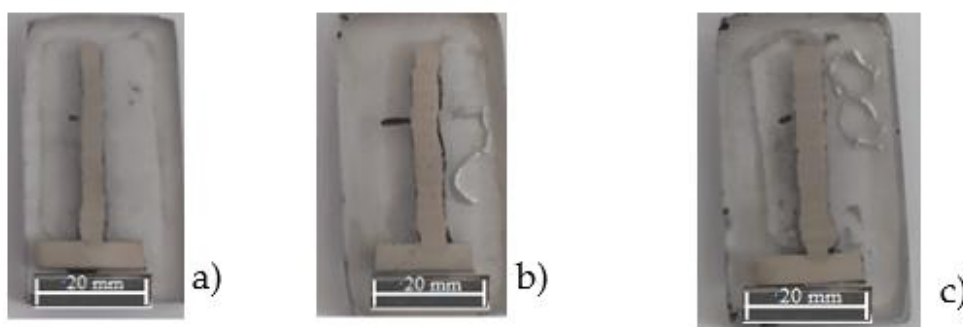


Figura 4.9 – Corte transversal dos espécimes: a) P2.1 b) P2.2 c) P2.3.

No seguimento do estudo efetuado vão ser fresadas as paredes de pequenas dimensões, de maneira a verificar a existência de porosidades longitudinais, para que se possam obter morfologias aceitáveis aquando da produção das paredes de grandes dimensões. Na fase anterior deste estudo em que foram produzidos os espécimes P1.1, P1.2 e P1.3 apenas se observou a secção transversal dos mesmos, não sendo estas paredes fresadas e partindo-se logo para a produção de paredes de grandes dimensões, o que levou à produção de paredes de grandes dimensões com propriedades e morfologias desadequadas, nomeadamente a o espécime G1.1.

Assim nesta fase de fresagem de paredes mais pequenas procedeu-se à observação da secção transversal das mesmas assim como à comparação morfológica dos espécimes

produzidos por WAAM P1.1 e P2.1, Fig. 4.10, de maneira a verificar a otimização de parâmetros

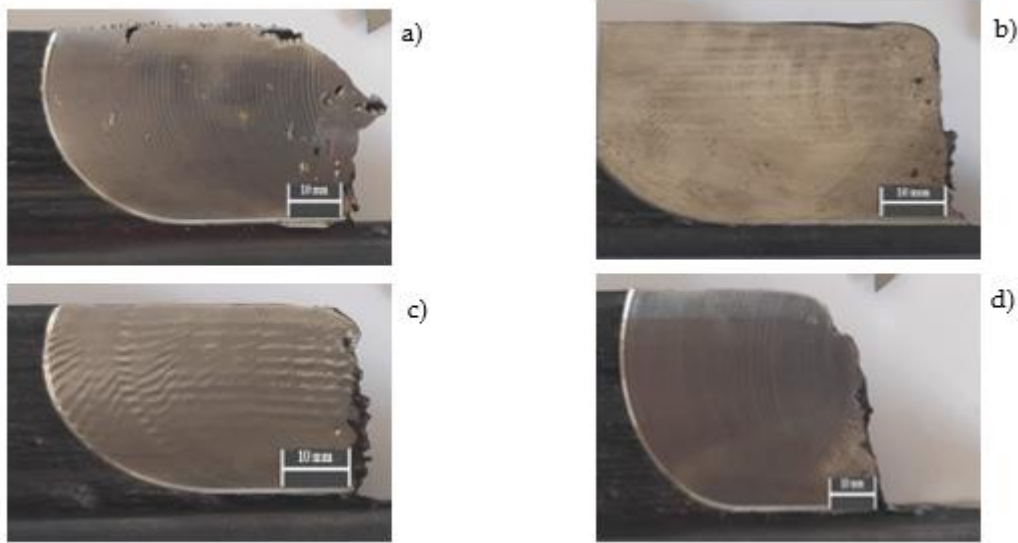


Figura 4.10 - Fresagem transversal das paredes: a) P1.1 b) P1.2.1 c) P2.1 d) P2.2.

Observa-se a otimização dos parâmetros de processo comparando os espécimes P1.1 e P2.1, reduzindo assim as macro porosidades quer em número quer em dimensão, aprovando assim os parâmetros para a produção de paredes de grandes dimensões.

Em relação aos espécimes produzidos via HF-WAAM, Fig. 4.10 c) e d), observa-se que o espécime com maior frequência de forjamento revela melhores propriedades morfológicas, selecionando os parâmetros do espécime P2.3 para a produção de paredes de grandes dimensões.

Produziu-se assim a parede G2.1, Fig.4.11 a), cuja parametrização é a mesma do espécime P1.1, e a parede G2.3, Fig. 4.11 b), cujos parâmetros são os mesmos do espécime P2.3. As propriedades geométricas e temporais destes novos espécimes encontram-se na Tabela 4.24.

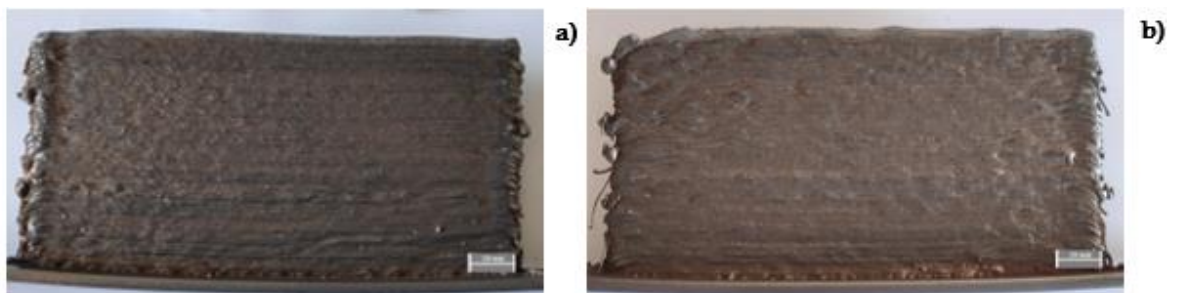


Figura 4.11 - Imagens das paredes produzidas: a) G2.1 b) 2.2

Tabela 4.24 Características temporais e geométricas das paredes G2.1 e G2.2.

	WT [s]	L [mm]	H [mm]	N	Tempo de Produção [min]
G2.1	120	200	100	62	155
G2.2	120	200	100	76	190

Passando agora à fresagem e corte das paredes P2.1, Fig. 4.12, e P2.2, Fig. 4.13, observam-se as principais características morfológicas das paredes produzidas.

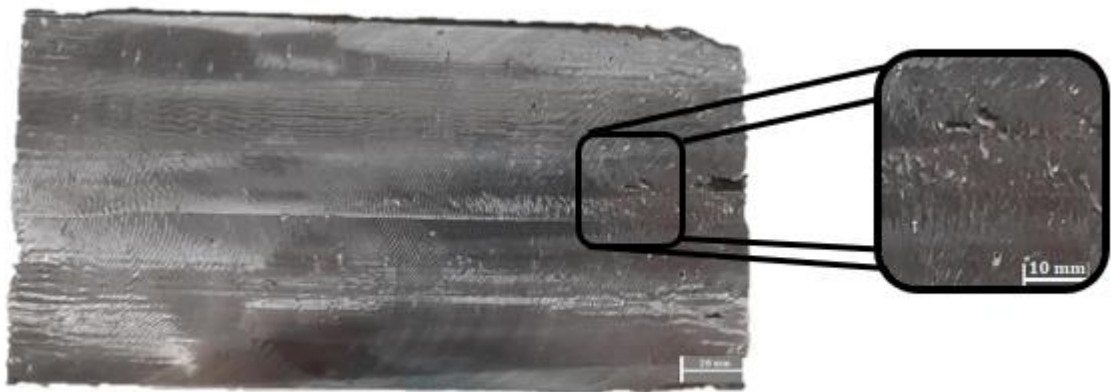


Figura 4.12 - Resultado da fresagem da Parede G2.1. a) Detalhe da porosidade encontrada.

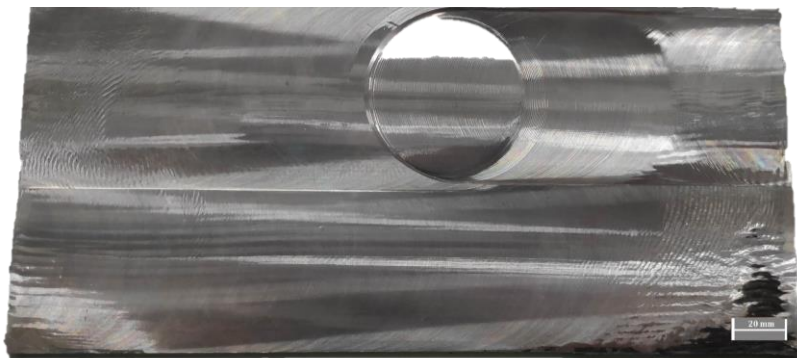


Figura 4.13 - Resultado da fresagem da Parede G2.2.

Observando as imagens das paredes fresadas observa-se o facto da parametrização do espécime P2.1 ter resultado numa parede com morfologia bastante interessante, mas quando aplicada numa parede de maiores dimensões, G2.1, deu origem a poros, de dimensões consideráveis. Além desta primeira análise pode-se retirar que a nova parametrização produziu a parede via HF-WAAM com sucesso, não apresentando defeitos em nenhum tipo de paredes.

Ainda assim pode-se observar que a dimensão dos defeitos diminui em G2.1 comparativamente a G1.1, contudo devido ao facto da nova parametrização produzir

cordões de menor espessura, origina paredes também elas com menor dimensão, dificultando a fresagem e a margem de retificação das mesmas.

4.2 Microscopia

A análise microscópica revela-se extremamente importante na determinação da qualidade de um espécime na medida em que pode detetar defeitos de dimensões reduzidas como fraturas e microporosidades assim como permite observar a dimensão do grão do material.

Na Fig. 4.14 a), b) e c) observa-se a imagem macroscópica do espécime P1.1, P1.2 e P1.3 respetivamente.

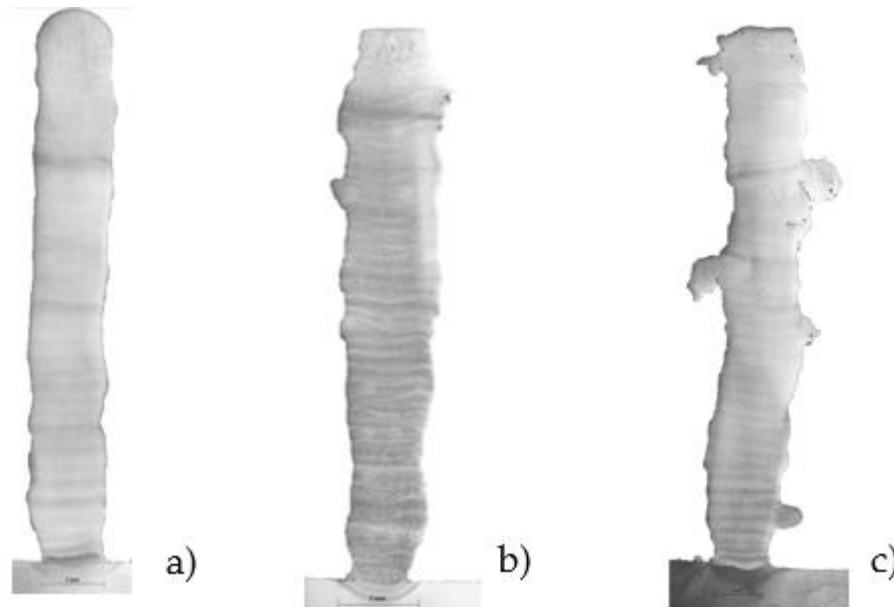


Figura 4.14 - Corte Transversal do espécime: a) P1.1 b) P1.2 c) P1.3

Analisando a anterior figura evidencia-se a melhor morfologia para o espécime P1.1 correspondente ao processo WAAM, já os espécimes P1.2 e P1.3 produzidos via HF-WAAM tendem a piorar a morfologia com o aumento da frequência de forjamento.

Seguidamente observaram-se as macro imagens dos espécimes P2.1, P2.2 e P2.3, na Fig. 4.15 a), b) e c), respetivamente.

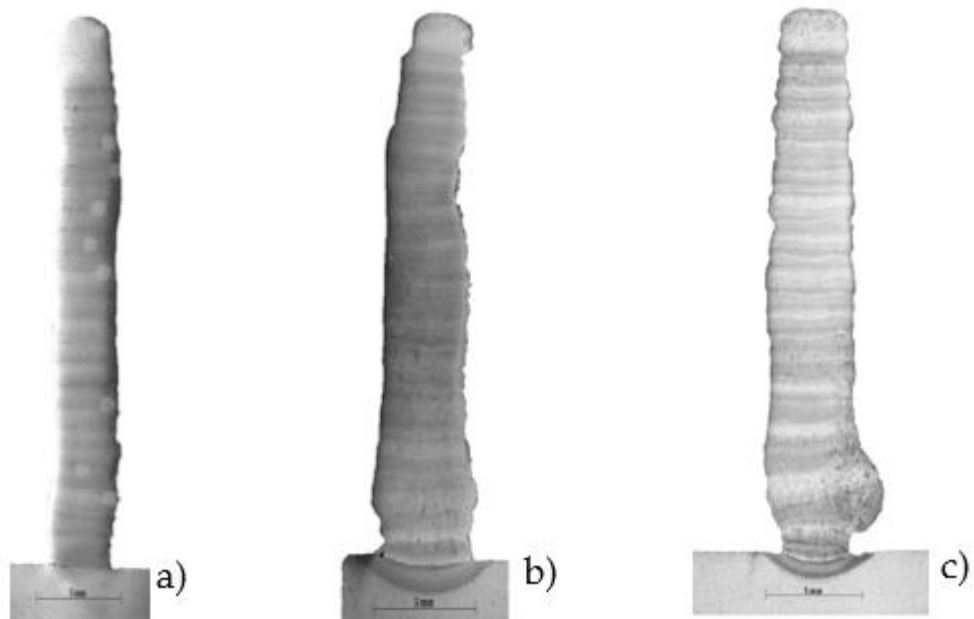


Figura 4.15 - Corte Transversal do espécime: a) P2.1 b) P2.2 c) P2.3

Em análise à anterior figura verifica-se mais uma vez a melhor morfologia da parede produzida por WAAM, seguindo a parede P2.3 e por último a parede P2.2. Destas é possível ainda observar a maior penetração e diluição das primeiras camadas de material no substrato sacrificial nos espécimes produzidos por HF-WAAM.

De seguida vão-se observar qualitativamente várias secções em pormenor de cada espécime, nomeadamente secções extraídas de uma zona intermédia de corte transversal, a sensivelmente 15 mm do topo da parede, Fig. 4.16 a). A mesma análise será feita, mas para zonas da raiz de cada espécime, rondando as primeiras camadas depositadas, Fig. 4.16 b).

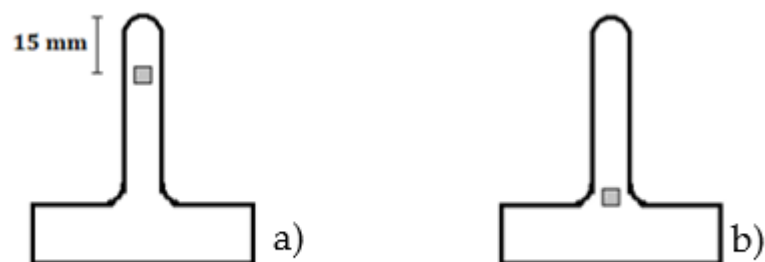


Figura 4.16 - Zonas a observar em pormenor: a) Zona Intermédia b) Raiz.

Na Fig. 4.17 são apresentados os recortes em pormenor correspondentes as zonas assinaladas na Fig. 4.16 a).

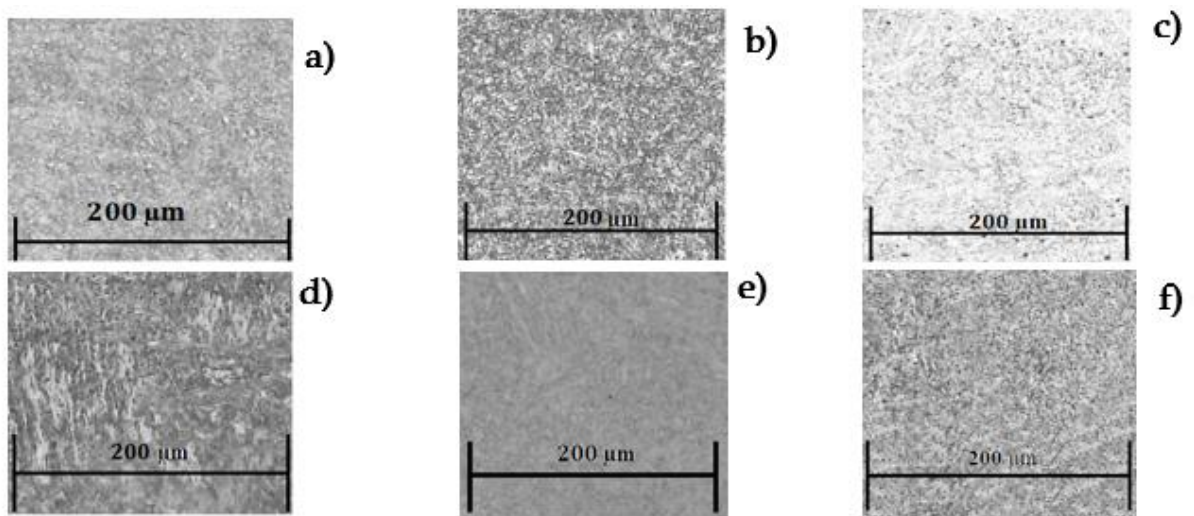


Figura 4.17 - Pormenor do grão do: a) Espécime P1.1 b) Espécime P1.2 c) Espécime P1.3
d) Espécime P2.1 e) Espécime P2.2 f) Espécime P2.3

Analisando a Fig. 4.17 são evidentes os efeitos do processo HF-WAAM, nomeadamente comparando as imagens da Fig. 4.17 a) e c) já que esta última apresenta um tamanho de grão 41 % inferior face ao da amostra correspondente ao espécime produzido via WAAM, P1.1. Tal evidência torna-se mais contrastada quando comparando da mesma forma os espécimes P2.1 e P2.3, correspondentes às imagens da Fig. 4.17 d) e f), em que a redução de tamanho de grão média numa amostra revelou ser na ordem dos 53 %.

Comparativamente aos parâmetros utilizados nos espécimes P1.3 e P2.3 observa-se que o último apresenta uma anisotropia inferior assim como tamanho de grão também ele mais reduzido, o que assenta na base da melhoria e otimização de parâmetros efetuada no espécime P2.1.

Efetuuou-se também uma análise às primeiras camadas das paredes produzidas, Fig. 4.18, de maneira a melhor observar a coesão ao substrato, o tamanho da zona termicamente afetada e eventuais defeitos que nesta zona possam surgir.

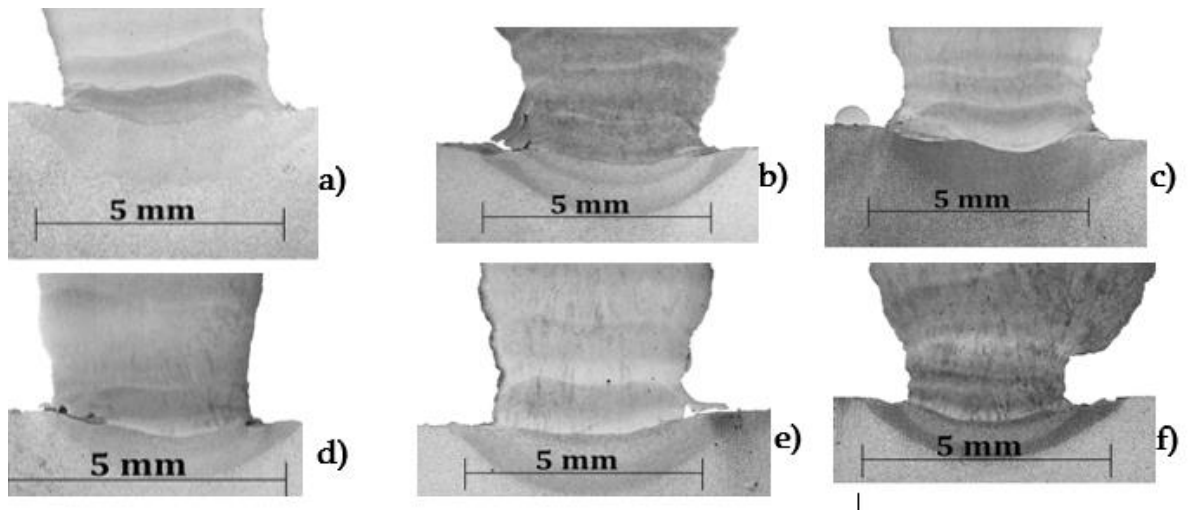
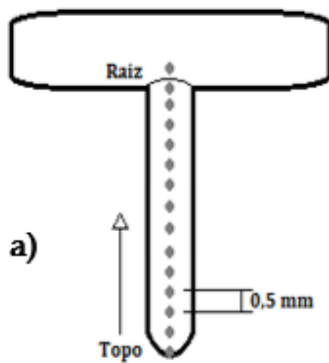


Figura 4.18 – Raiz dos espécimes: a) P1.1 b) P1.2 c) P1.3 d) P2.1 e) P2.2 f) P2.3

Analisando a Fig. 4.18 a maior largura da zona termicamente afetada dos espécimes P1.1, P1.2 e P1.3 face aos restantes é evidente. Tal é explicável pelo facto da parametrização utilizada possuir maior entrega térmica face à parametrização dos restantes espécimes. Também é possível observar a largura inferior da parede P2.3 na zona da raiz face às restantes paredes, justificando-se com possível defeito associado á sua produção. Contudo é mais evidente a anisotropia nos espécimes P2.1, P2.2 e P2.3 relativamente aos seus homólogos P1.1, P1.2 e P1.3 respetivamente. Por último observam-se fissuras na zona de coesão entre as paredes e o substrato nos espécimes de inferior frequência de forjamento, P1.2 e P2.2, assim como nos espécimes produzidos via HF-WAAM, P2.1 e P2.2.

4.3 Análise de Durezas

Nesta etapa vão-se obter os valores de dureza de Vickers para cada um dos espécimes, submetendo cada um a uma sequência de indentações formando uma linha de dureza. A distância entre indentações utilizada foi de 0.5 mm desde o topo até a transição da parede para o material do substrato. Na Figura 4.19 a) observa-se uma ilustração do processo de indentações. Na Fig. 4.20 observam-se os gráficos de dureza obtidos.



b)

Espécime	Dureza Média (Hardness of Vickers)
P1.1	288,37
P1.2	298,04
P1.3	306,67
P2.1	300,73
P2.2	306,47
P2.3	313,70

Figura 4.19 - a) Ilustração da estratégia de indentação. b) Médias dos resultados das durezas para cada espécime.

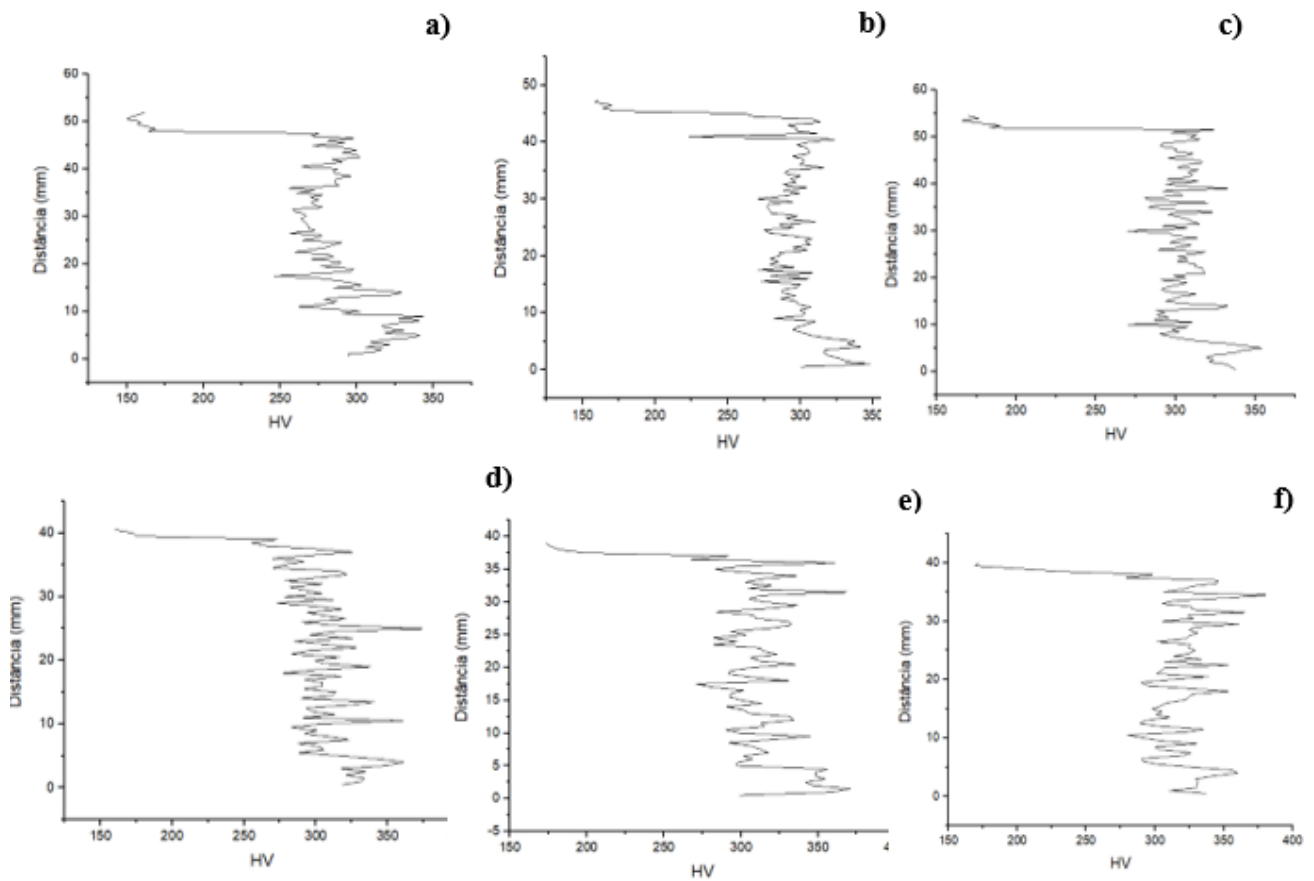


Figura 4.20 – Linha de durezas do espécime: a) P1.1 b) P1.2 c) P1.3 d) P2.1 e) P2.2 f) P2.3

A partir dos gráficos de durezas verifica-se que com a otimização dos parâmetros de P1.1 para P2.1 a dureza do material aumentou o que implica uma melhoria nas propriedades mecânicas do mesmo. É também possível observar um aumento na dureza do material quando passando dos espécimes produzidos via WAAM para os espécimes produzidos via HF-WAAM, nomeadamente aumentando em média cerca de 6 % no espécime P1.3 face ao espécime P1.1 e 4 % no espécime P2.3 face ao espécime P2.1.

4.4 Análise Termográfica

Foram realizados posteriormente mais dois espécimes, o espécime T2.1 e o espécime T2.2, produzidos mediante os parâmetros utilizados para P2.1 e P2.3 respetivamente. O número de camadas, N, depositadas foi alterado para 16 nos novos espécimes. Na análise termográfica foi utilizado um ponto de referência situado no topo da 5ª camada, Fig. 4.21, adquirindo-se dados de temperatura para esse ponto ao longo da produção de todo o espécime, Fig.4.22 a) e b).

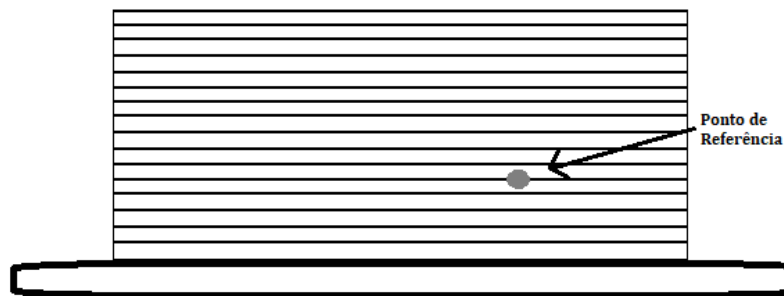


Figura 4.21 - Ilustração do método de captação de dados termográficos.

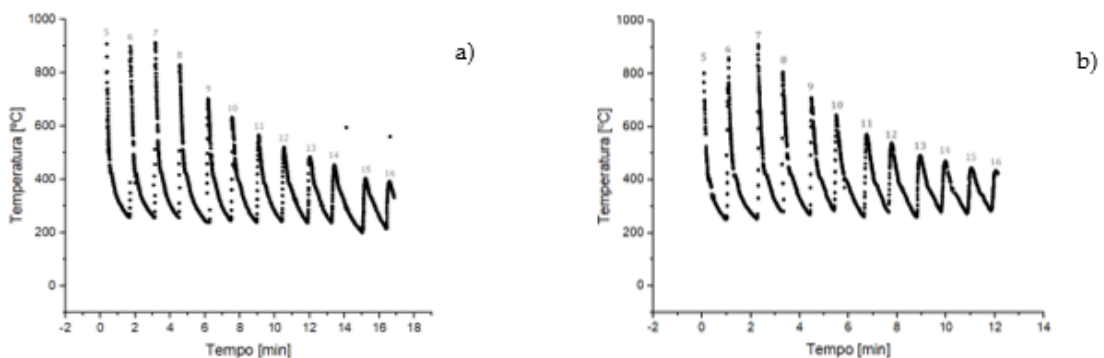


Figura 4.22 - Gráfico de temperaturas no ponto de referência para o espécime: a) T2.1 b) T2.2.

A análise efetuada acima iniciou-se pela medição da temperatura no ponto de referência a partir da 5ª camada até à última. É evidente em ambos os espécimes o reaquecimento de material verificado na 6ª e 7ª camadas, mantendo a temperatura nos trâmites máximos captados durante a deposição de tais camadas. A temperatura máxima referenciada em ambos os gráficos não sofreu notáveis alterações, no entanto no espécime T1.1 verificam-se tais temperaturas durante as 5ª, 6ª e 7ª camadas, diminuindo a temperatura máxima de cada camada a partir da 7ª camada. Já no espécime T2.2 verifica-se o pico de temperatura na 7ª camada, prevendo-se tal por efeito da acumulação de temperatura resultante das sucessivas refusões de material.

4.5 Ensaios de Tração

Os ensaios de tração realizados tiveram lugar após o recorte por Eletroerosão, vulgo EDM (Electrical Discharge Machining) de provetes estrategicamente projetados em cada parede. As paredes alvo deste processo foram a parede G2.2 e a parede G1.1, sendo que devido às fracas propriedades mecânicas evidenciadas pela existência de macro poros nas paredes G1.1 e G2.1, optou-se por não extrair provetes de tração destes espécimes e assim manter como elemento comparativo de controlo o fio de alimentação utilizado no processo.

Desta forma observa-se na Fig. 4.23 a) a subdivisão em dois troços do espécime G1.2 e a respetiva idealização dos recortes a efetuar, Fig. 4.23 b). A mesma observação faz-se na Fig. 4.24 para o espécime G2.2.

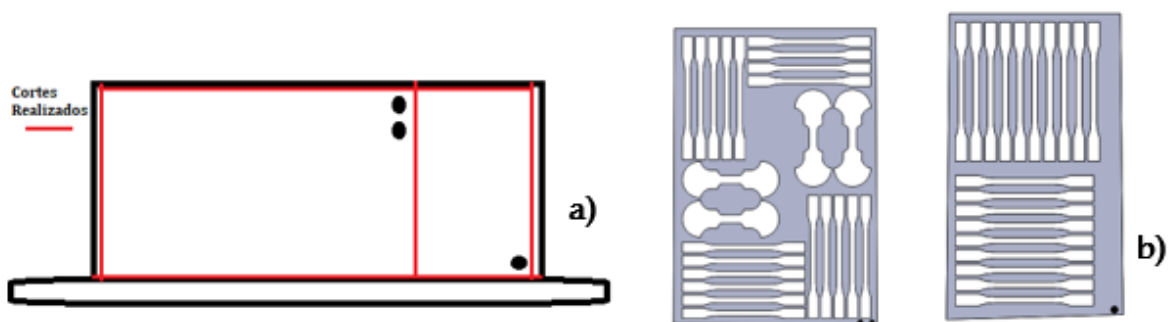


Figura 4.23 - a) Cortes a efetuar em G1.2 b) Recorte dos provetes.

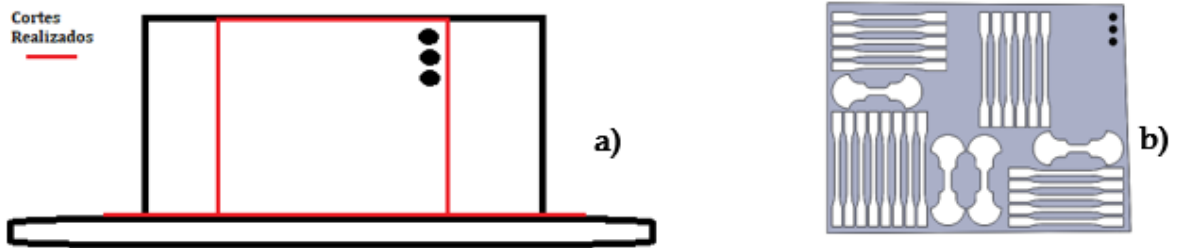


Figura 4.24 - a) Cortes a efetuar em G2.2 b) Recorte dos provetes.

Seguidamente ao recorte de provetes os mesmos foram submetidos aos ensaios de tração e extensão, contudo apenas os provetes do espécime G2.2 foram submetidos a ensaio devido à dificuldade e complexidade do processo de retalho dos provetes das respetivas paredes, ponderando-se suficientemente esclarecedores os resultados das restantes averiguações para evidenciar as propriedades mecânicas de cada parametrização. Assim efetuaram-se ensaios de tração em 3 provetes horizontais e 3 provetes verticais, ficando ainda como futuro desenvolvimento o ensaio e estudo dos provetes destinados a ensaios de extensão. Os resultados encontram-se visíveis na Fig. 4.25.

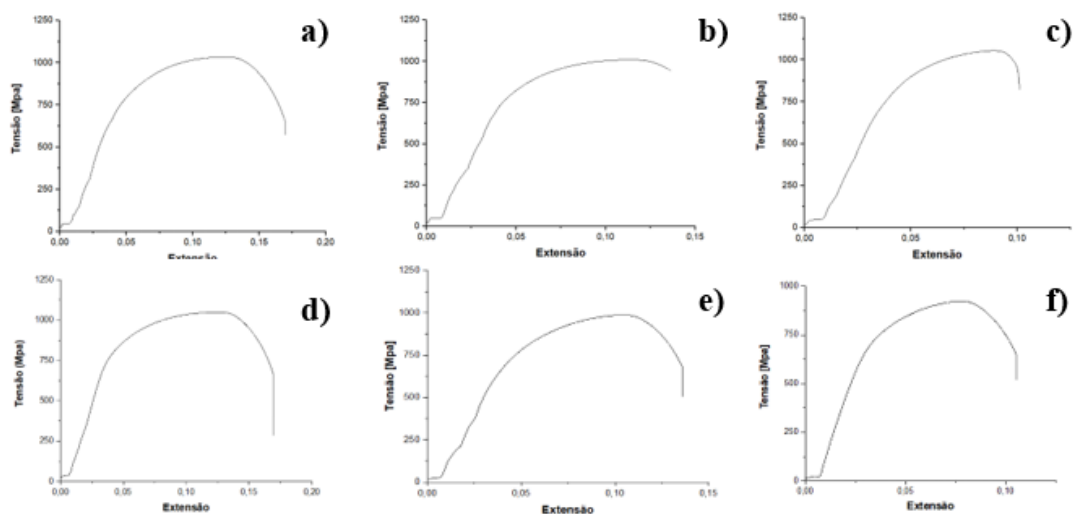


Figura 4.25 - Resultado dos ensaios dos provetes: a) Horizontal 1. b) Horizontal 2. c) Horizontal 3. d) Vertical 1. e) Vertical 2. f) Vertical 3.

Para efeitos de referência ensaiaram-se ainda dois troços de fio de alimentação do material em análise dos quais resultaram os gráficos das imagens Fig. 4.26.

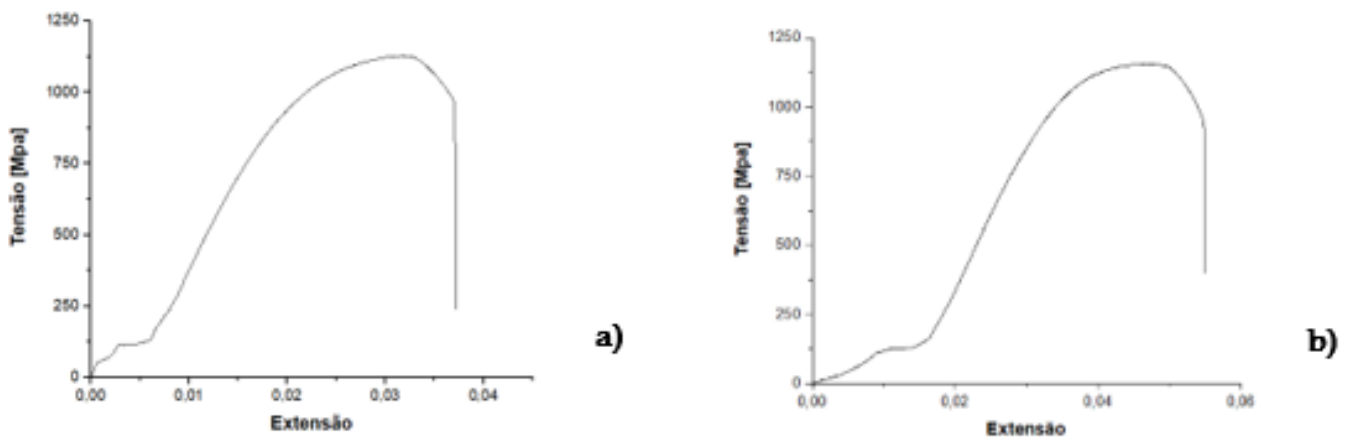


Figura 4.26 - Resultados dos ensaios de tração para: a) Troço de fio 1. b) Troço de fio 2.

Agrupando os resultados obtidos no âmbito da quantificação de esforços máximos, é possível observar na tabela 4.25 as tensões máximas de cada ensaio, quer de rotura quer de cedência, tendo-se utilizado o critério de proporcionalidade de 0.2 % onde a interceção da reta correspondente ao offset de 0.2% de extensão com a curva obtida determina o ponto onde o ensaio transitou de condições elásticas para condições de domínio plástico.

Tabela 4.25 – Resultados obtidos nos ensaios de tração uniaxial.

	Tensão de Cedência [MPa]	Tensão de Rotura [MPa]
Horizontal 1	956	1049
Horizontal 2	910	988
Horizontal 3	840	922
Vertical 1	920	1035
Vertical 2	956	1010
Vertical 3	880	1054
Fio 1	180	1130
Fio 2	160	1156

Analisando os anteriores resultados verificam-se melhores propriedades mecânicas para os provetes com orientação vertical comparativamente aos provetes com orientação horizontal. Verifica-se também o reduzido domínio elástico dos ensaios realizados nos fios

de alimentação, demonstrando, no entanto, uma elevada tensão de rotura, que, contudo, vai de encontro à ficha técnica do material.

Comparando as tensões de cedência médias de cada tipo de provetes, horizontais e verticais, 902 e 919 MPa, respetivamente, verificando-se uma reduzida diferença, inferior a 2 %, nos valores de resistência mecânica.

No âmbito das tensões de rotura, a mesma situação verifica-se, situando-se as médias de cada tipo de provetes nos 986 e 1033 MPa, respetivamente para os provetes horizontais e verticais. Neste último caso a diferença da média de valores obtidos é na ordem dos 5 %, não se verificando assim valores de resistência mecânica muito díspares para cada tipo de provete.

5 Conclusões e Futuros Desenvolvidimentos

5.1 Conclusões

Como análise geral ao trabalho efetuado verifica-se um desenvolvimento importante para a tecnologia mecânica no âmbito da utilização do processo HF-WAAM, para a produção de componentes. As características de cordão de soldadura obtidas revelaram-se assim bastante adequadas para produção de componentes soldados, da mesma forma que a intuitividade de programação e familiarização com o dispositivo de produção WAAM e HF-WAAM fazem deste um excelente desenvolvimento tecnológico concorrencial aos processos de fabrico atualmente existentes na indústria.

Verificou-se que, face às previsões efetuadas, assentes quer na teoria quer na literatura existente, a redução de defeitos induzida pelo processo HF-WAAM se fez evidente, reduzindo na quase totalidade as macro porosidades visíveis a olho nu após a fresagem dos espécimes, sendo este o maior objetivo do trabalho experimental efetuado.

No que toca à parametrização escolhida, esta revelou uma enorme importância para a produção de paredes nas melhores condições possíveis. Evidenciando-se a melhoria das propriedades mecânicas com a otimização dos parâmetros de processo nos ensaios de dureza em que para um mesmo espécime produzido via HF-WAAM com a mesma frequência de forjamento o espécime com os parâmetros mais otimizados apresentou durezas superiores.

No âmbito dos ensaios de tração foi possível observar valores bastante interessantes do ponto de vista de engenharia e produção, mantendo os padrões de resistência mecânica elevados quer no regime plástico quer no regime elástico de solicitação do material. É também observável a reduzida existência de anisotropia no material dos provetes, visto que os resultados dos ensaios foram bastante semelhantes e coerentes tanto para os provetes orientados nas secções horizontais como para os mesmos orientados segundo direcções verticais.

Abordando a microestrutura dos espécimes produzidos é necessário ter em conta a impossibilidade de obtenção de melhores imagens microscópicas devido às distorções verificadas em algumas amostras, contudo evidenciou-se a redução do tamanho de grão aquando da utilização do processo HF-WAAM face ao processo WAAM para a mesma parametrização, sendo mais evidente este resultado e a redução da anisotropia para a segunda série de espécimes produzidos, P2.1 e P2.3.

Quanto à captação de dados termográficos revela-se um estudo interessante dos ciclos térmicos verificados durante os processos WAAM e HF-WAAM, na medida em que só assim foi perceptível que durante a deposição sucessiva de camadas uma mesma zona de material depositado entra na conhecida faixa crítica de transformações no estado sólido dos aços que se verifica entre os 500 °C e os 800 °C, abrindo portas a alterações microestruturais capazes de influenciar as propriedades mecânicas do material.[21]

Ainda de importante referência é a incapacidade da câmara termográfica de captar as temperaturas mais elevadas a que o material funde devido à sua faixa limitada de leitura de temperaturas que se situa nos 1200 °C, não havendo, contudo, leituras acima dos 900 °C apontando-se tal fenómeno como fruto da alteração da emissividade do material.

Utilizando as ilações retiradas da termografia pode-se associar a existência de poros de grandes dimensões nas paredes G1.1 e G2.1, alguns de geometria retangular com dimensões nominais de 4,3 × 1,5 mm, devido à referida acumulação de energia durante pelo menos três camadas subsequentes, o que pode incitar a refusão de muito material em profundidade, podendo assim o gás de protecção necessário promover instabilidade no banho de fusão ficando aprisionado neste durante o arrefecimento, provocando os macroporos visíveis após a fresagem dos espécimes em causa. [22,23]

Importante ressalva é a variação da parametrização óptima com as dimensões da parede a produzir, sendo que inicialmente a parametrização não se revelou adequada para a parede P1.1, apresentando esta macroporos visíveis. Estes quando em paredes maiores como a parede G1.1 revelaram ser em maior número e de maiores dimensões. Assim otimizaram-se

os parâmetros de processo culminando na parede P2.1 que já não verificava tais macro poros. Contudo quando replicando P2.1 numa parede de maiores dimensões, G2.1, esta maior continuava a apresentar macro poros, resultantes da ainda excessiva acumulação de energia, sendo que reduzir a entrega térmica inviabilizaria a produção de componentes via WAAM devido à reduzida espessura dos mesmos.

5.2 Futuro Desenvolvimento

Como futuro trabalho e desenvolvimento vislumbra-se a realização de ensaios nos restantes provetes projetados em cada espécime, assim como verificar o comportamento do material aquando dos ensaios pensados para os provetes de extensão.

A realização do anterior trabalho experimental utilizando um método de refrigeração do material depositado que permita um melhor arrefecimento do mesmo abordando-se esta técnica como uma possível melhoria ao fabrico aditivo nos anteriores moldes. Tal pode ser assemelhado pela introdução de um dispositivo que permita convecção forçada de ar pelas faces do componente a ser produzido ou uma base refrigerada que permita o escoamento de calor por condução.

A realização de simulação numérica pode ser uma mais valia na avaliação do escoamento de calor necessário sendo que pode ser um futuro desenvolvimento deste procedimento para a implementação de melhores condições de arrefecimento durante o processo WAAM.

A extensão da aplicação deste processo de fabrico a outros materiais e ligas revela-se também muito interessante no âmbito de análise, assim como instaurar um processo híbrido com o HF-WAAM e a introdução de inoculantes, processo em grande expansão.

6 Bibliografia

- [1] T. Wohlers and T. Gornet, "History of Additive Manufacturing 2014," *Wohlers Rep. 2014 - 3D Print. Addit. Manuf. State Ind.*, pp. 1–34, 2014.
- [2] A. Gebhardt, J.-S. Hötter, A. Gebhardt, and J.-S. Hötter, "Basics, Definitions, and Application Levels," *Addit. Manuf.*, pp. 1–19, 2016, doi: 10.3139/9781569905838.001.
- [3] D. Dev Singh, T. Mahender, and A. Raji Reddy, "Powder bed fusion process: A brief review," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, pp. 2–7, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.415.
- [4] J. Bamberg, "Powder Bed Fusion." https://www.researchgate.net/profile/Joachim_Bamberg/publication/271850494/figure/fig1/AS:669385769361413@1536605412462/Schematic-representation-of-the-powder-bed-fusion-process.jpg (accessed Jan. 14, 2021).
- [5] V. R. Duarte, T. A. Rodrigues, N. Schell, R. M. Miranda, J. P. Oliveira, and T. G. Santos, "Hot forging wire and arc additive manufacturing (HF-WAAM)," *Addit. Manuf.*, vol. 35, no. April, p. 101193, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101193.
- [6] T. A. Rodrigues *et al.*, "In-situ strengthening of a high strength low alloy steel during Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)," *Addit. Manuf.*, vol. 34, no. April, p. 101200, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101200.

- [7] F. Montevercchi, G. Venturini, N. Grossi, A. Scippa, and G. Campatelli, "Idle time selection for wire-arc additive manufacturing: A finite element-based technique," *Addit. Manuf.*, vol. 21, no. January, pp. 479–486, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.01.007.
- [8] T. A. Rodrigues, V. Duarte, R. M. Miranda, T. G. Santos, and J. P. Oliveira, "Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM)," *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 7, 2019, doi: 10.3390/ma12071121.
- [9] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, "Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 81, no. 1–4, pp. 465–481, 2015, doi: 10.1007/s00170-015-7077-3.
- [10] C. Xia, Z. Pan, J. Polden, H. Li, Y. Xu, and S. Chen, "A review on wire arc additive manufacturing: Monitoring, control and a framework of automated system," *J. Manuf. Syst.*, vol. 57, no. August, pp. 31–45, 2020, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.08.008.
- [11] J. B. Bento, A. Lopez, I. Pires, L. Quintino, and T. G. Santos, "Non-destructive testing for wire + arc additive manufacturing of aluminium parts," *Addit. Manuf.*, vol. 29, no. December 2018, p. 100782, 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.100782.
- [12] J. Gu, M. Gao, S. Yang, J. Bai, Y. Zhai, and J. Ding, "Microstructure, defects, and mechanical properties of wire + arc additively manufactured Al," *Mater. Des.*, vol. 186, p. 108357, 2020, doi: 10.1016/j.matdes.2019.108357.
- [13] B. Wu *et al.*, "A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement," *J. Manuf. Process.*, vol. 35, no. August, pp. 127–139, 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.08.001.
- [14] J. R. Hönnige, S. Williams, M. J. Roy, P. Colegrove, and S. Ganguly, "Residual Stress Characterization and Control in the Additive Manufacture of Large Scale Metal Structures," *Residual Stress. 2016*, vol. 2, pp. 455–460, 2017, doi: 10.21741/9781945291173-77.
- [15] A. Liquide, "Alphagaz 1." <https://mygas.airliquide.be/catalog-gas-products/alphagaz--1-argon/alphagaz--1-argon-cilinder-smartop->

150/p0021150s2a001 (accessed Jun. 30, 2021).

- [16] International Standard ISO, "Metallic materials - Vickers hardness test - Part 1: Test method (ISO 6507-1:2018)," *Int. Stand.*, pp. 1–49, 2018.
- [17] P. Doutora, R. Maria, and M. Miranda, "Valdemar Rebelo Duarte Additive manufacturing of a high resistance steel by MIG/MAG," 2016.
- [18] C. Shen *et al.*, "Neutron diffraction residual stress determinations in Fe3Al based iron aluminide components fabricated using wire-arc additive manufacturing (WAAM)," *Addit. Manuf.*, vol. 29, no. July, p. 100774, 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.06.025.
- [19] J. G. Lopes, C. M. Machado, V. R. Duarte, T. A. Rodrigues, T. G. Santos, and J. P. Oliveira, "Effect of milling parameters on HSLA steel parts produced by Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)," *J. Manuf. Process.*, vol. 59, no. July, pp. 739–749, 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.10.007.
- [20] J. Xiong, Z. Yin, and W. Zhang, "Forming appearance control of arc striking and extinguishing area in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 87, no. 1–4, pp. 579–586, 2016, doi: 10.1007/s00170-016-8543-2.
- [21] T. DebRoy *et al.*, "Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 92, pp. 112–224, 2018, doi: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.
- [22] J. P. Oliveira, T. G. Santos, and R. M. Miranda, "Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: From theory to practice," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 107, no. August 2019, p. 100590, 2020, doi: 10.1016/j.pmatsci.2019.100590.
- [23] S. Singh, S. kumar Sharma, and D. W. Rathod, "A review on process planning strategies and challenges of WAAM," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.632.



