



RAQUEL FAUSTINO MADEIRA MENDES TELES
Licenciada em Ciências de Engenharia Mecânica

ESTUDO DO EFEITO DA OXIDAÇÃO DO FIO CONSUMÍVEL NO PROCESSO WAAM: MONITORIZAÇÃO E INSPEÇÃO COM CORRENTES INDUZIDAS

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia
Mecânica

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
setembro, 2023

ESTUDO DO EFEITO DA OXIDAÇÃO DO FIO CONSUMÍVEL NO PROCESSO WAAM: MONITORIZAÇÃO E INSPEÇÃO COM CORRENTES INDUZIDAS

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica

RAQUEL FAUSTINO MADEIRA MENDES TELES

Licenciada em Ciências de Engenharia Mecânica

Orientador: Miguel Araújo Machado
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Nuno Alberto Marques Mendes
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

Arguentes: Valdemar Rebelo Duarte
Professor Auxiliar Convidado, FCT-NOVA

Orientador: Miguel Araújo Machado,
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa

setembro, 2023

Estudo do Efeito da Oxidação do Fio Consumível no Processo WAAM: Monitorização e Inspeção com Correntes Induzidas

Copyright © Raquel Faustino Madeira Mendes Teles, 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.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer,

Ao Professor Miguel Machado, pela orientação e apoio ao longo desta dissertação. Obrigada por estar sempre disponível e a uma mensagem de distância, a sua disponibilidade para me guiar e esclarecer todas as dúvidas que iam surgindo foi ímpar.

Ao Sr. Campos e ao Sr. Paulo por toda a ajuda e orientação que me ofereceram ao longo deste trabalho quando eu estava perdida e incerta sobre como proceder. A vossa paciência e disposição para me ajudar nas minhas tarefas foram inestimáveis e tornaram possível o que parecia impossível. Se não tive nenhuma lesão grave durante o desenvolvimento desta dissertação, devo-o a vocês.

À minha família, em especial aos meus avós maternos, Maria Laurentina e José, bem como à minha tia Lisete. Vocês não proporcionaram meramente os recursos materiais e sustento necessários; deram-me o presente inestimável da vossa orientação, amor e exemplo. Foram os alicerces sob os quais me fui inventando, moldando-me na mulher que sou hoje. Carrego a vossa influência e valores em cada passo que dei e darei e por isso sou eternamente grata.

Ao Daniel Amendoeira pela ajuda prestada quando era necessário uma mão extra para o trabalho que esta dissertação exigia ou um ombro para aliviar preocupações. O teu amor e carinho nos dias menos positivos eram o meu conforto, por isto esta vitória também é tua.

Aos meus amigos do Sul pelos telefonemas e mensagens diários que transmitiam força apesar da distância, em especial ao Miguel Cary.

Aos meus queridos companheiros do grupo Alumina, formado por uma dezena de colegas deste curso: Daniel, Joana, Francisco, Tomás, Rafael, João, Diogo, Leonardo, Pedro e Miguel. A camaradagem que se manifestou nos momentos difíceis deste curso é algo verdadeiramente belo, e estas amizades serão guardadas para sempre. Carregamos connosco um baú de recordações que merecem ser contadas. Este é apenas o início desta jornada, e aguardo impientemente para nos ver a colher os frutos do nosso árduo trabalho.

Agradeço o apoio financeiro concedido pelo *European Institute of Innovation and Technology (EIT) RawMaterials*, através do projeto *Smart WAAM: Microstructural Engineering and Integrated Non-Destructive Testing*. O EIT, enquanto organismo da União Europeia, recebe financiamento através do programa *European Union's Horizon 2020 Research and Innovation*.

RESUMO

O Fabrico Aditivo (FA) é um paradigma revolucionário na Indústria 4.0, sendo o *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM) um exemplo proeminente. No entanto, a sua implementação bem-sucedida requer padrões de qualidade rigorosos, exigindo um conhecimento extenso dos seus parâmetros e a disponibilidade de Ensaios Não Destrutivos (END) fiáveis para garantir a qualidade das peças produzidas.

Este estudo visa compreender as consequências da utilização de fio consumível oxidado no processo WAAM e investigar a viabilidade da inspeção *inline* do fio consumível utilizando sondas customizadas de correntes induzidas (CI).

Com efeito, fios consumíveis de ER-70 foram processados com diferentes secções oxidadas, depositados e, posteriormente, submetem-se as três paredes WAAM resultantes a uma análise destrutiva. Simultaneamente, foram desenvolvidas sondas de CI customizadas para inspecionar o fio consumível no contexto *inline*, validando-as previamente através de uma inspeção *offline*.

Os resultados obtidos não permitem estabelecer uma correlação entre a qualidade das secções da parede WAAM e a utilização de fio oxidado, mas indicam que a repetibilidade do processo está comprometida, sendo crucial melhorar a sua estabilidade nos equipamentos disponíveis. Relativamente à inspeção *offline*, destaca-se a Sonda 2 pela elevada relação sinal/ruído. No entanto, os resultados das inspeções *inline* foram inconclusivos e indicam a necessidade de implementar um sistema de inspeção que permite a total tração do fio.

PALAVRAS-CHAVE

Fabrico Aditivo (FA)

Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)

Oxidação no Fio Consumível

Ensaios Não Destrutivos (END)

Correntes Induzidas (CI)

Monitorização *Inline*

ABSTRACT

Additive Manufacturing (AM) represents a novel approach within Industry 4.0, with Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) standing out as a noteworthy example. However, robust quality standards are pivotal to its effective application, entailing ample understanding of its parameters and access to dependable Non-Destructive Testing (NDT) to verify part quality.

The objective of this study is to comprehend the effects of using oxidized ER-70 filler wire in the WAAM process and to investigate the feasibility of in-line inspection of the filler wire using customized eddy current (EC) probes.

In practice, ER-70 consumable wires were processed with different oxidized sections, deposited and then the three resulting WAAM walls were subjected to destructive analysis. Concurrently, customized EC probes were created to inspect the consumable wire in an inline setting, validating them using a preliminary offline inspection.

The obtained results do not establish a correlation between the quality of the WAAM wall sections and the use of oxidized wire. However, they do indicate that the process's repeatability is compromised, and it is crucial to improve its stability in the available equipment. Regarding offline inspection, Probe 2 is notable for its high signal-to-noise ratio. However, the inline inspections did not provide conclusive results, suggesting the need for an inspection system that enables complete wire pulling.

KEYWORDS

Additive Manufacturing (AM)

Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)

Oxidation on the Consumable Wire

Non-Destructive Testing (NDT)

Eddy Currents (EC)

Inline monitoring

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	vii
RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
ÍNDICE DE TABELAS	xvii
NOMENCLATURA	xix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Metodologia	2
1.4 Estrutura da Tese	3
2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE	5
2.1 Fabrico Aditivo	5
2.1.1 Fabrico Aditivo de Metais	6
2.2 Wire and Arc Additive Manufacturing	8
2.2.1 Parametrização	8
2.2.2 Defeitos e Características Microestruturais	12
2.2.3 Variantes	15
2.3 Ensaios Não Destrutivos	16
2.3.1 END no Âmbito do WAAM e Monitorização <i>Inline</i>	18
2.3.2 Correntes Induzidas	19
2.3.3 Limitações e Desafios do Ensaio por CI para WAAM	22
2.3.4 Conceção de Sondas CI Customizadas para WAAM	23

3	CONCEÇÃO E COMPARAÇÃO DE SONDAS CI.....	27
3.1	Sondas de Inspeção do Fio Consumível	27
4	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	31
4.1	Processamento do Fio Consumível	31
4.2	Inspeção do Fio Consumível <i>Offline</i>	35
4.3	Fabrico das Paredes WAAM	36
4.4	Inspeção do Fio Consumível por CI <i>Inline</i>	37
4.5	Análise Destrutiva.....	38
5	VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	39
5.1	Inspeção do Fio Consumível <i>Offline</i>	39
5.2	Paredes Produzidas por WAAM.....	40
5.3	Inspeção do Fio Consumível <i>Inline</i>	43
5.3.1	Sonda 1	43
5.3.2	Sonda 2	45
5.4	Análise Destrutiva.....	47
5.4.1	Inspeção Visual	47
5.4.2	Análise Metalográfica	48
5.5	Sonda WFP	52
6	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	55
6.1	Inspeção do Fio Consumível <i>Offline</i>	55
6.2	Inspeção do Fio Consumível <i>Inline</i>	55
6.2.1	Sonda 1	55
6.2.2	Sonda 2	56
6.3	Paredes WAAM	57
6.4	Análise Destrutiva.....	58
6.5	Desenvolvimentos Futuros.....	59
	BIBLIOGRAFIA.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fabrico aditivo de metais e respetivas categorias. Adaptado de [6]	6
Figura 2.2 – Esquematização dos processos: a) DED; b) PBF [10]	7
Figura 2.3 – Parâmetros inerentes ao processo de WAAM	8
Figura 2.4 – Tipos de trajetórias da tocha: (a) Raster; (b) Zigzag; (c) Contorno; (d) Espiral; (e) Híbrida [15]	9
Figura 2.5 – Esquema representativo dos processos: (a) GMAW; (b) GTAW; (c) PAW [14]	10
Figura 2.6 – Porosidades detetadas numa peça de alumínio	12
Figura 2.7 – Delaminação numa peça obtida por WAAM [24]	13
Figura 2.8 – Defeitos geométricos das peças WAAM: (a) desnível da altura das camadas depositadas; (b) ondulação e rugosidade superficiais [32]	15
Figura 2.9 – Esquematização do princípio físico do ensaio por CI [47]	20
Figura 2.10 – Simulação numérica do ensaio por CI para: (a) $f = 250$ kHz; (b) $f = 2$ MHz [48]	21
Figura 2.11 – IOnic Probe: (a) Planar em PCB; [49] (b) Customizado para WAAM [20]	24
Figura 2.12 – Sonda WFP em PCB flexível: (a) configuração do PCB flexível; (b) Chassis autocompensante [52]	25
Figura 2.13 – Inspeção e limpeza do fio de soldadura: (a) Sonda de inspeção do fio consumível; [52] (b) EROI V2 [53]	25
Figura 3.1 – Modelo CAD da sonda 2 e respetivos componentes	28
Figura 4.1 – Fases da metodologia experimental	31
Figura 4.2 – Esquema das modalidades de ensaios: (a) Ensaio 1; (b) Ensaio 2; (c) Ensaio 3; (d) Ensaio Referência	32
Figura 4.3 – Demonstração do funcionamento do EROI V2 numa bobina de fio oxidado	33
Figura 4.4 – Representação esquemática dos segmentos de fio consumível para cada modalidade de ensaio	34
Figura 4.5 – Esquema da vista de corte da secção oxidada do fio consumível	34
Figura 4.6 – Set up para a inspeção por CI do fio consumível <i>offline</i>	35
Figura 4.7 – Esquema representativo do segmento de fio a inspecionar no ensaio por CI <i>offline</i>	36
Figura 4.8 – Set up para a inspeção inline do fio consumível	37
Figura 4.9 – Esquema simplificativo do aparato da inspeção <i>inline</i> do fio consumível	38

Figura 5.1 – Resultados obtidos para o ensaio da inspeção offline do fio consumível de ER-70 para as sondas 1 e 2 a $f = 7,5$ kHz	39
Figura 5.2 – Parede WAAM referente ao Ensaio de Referência	40
Figura 5.3 – Parede WAAM referente ao Ensaio 1	41
Figura 5.4 – Parede WAAM referente ao Ensaio 2	41
Figura 5.5 – Parede WAAM referente ao Ensaio 3	42
Figura 5.6 – Resultados obtidos para ensaio da inspeção <i>inline</i> do fio consumível de ER-70 para a sonda 1 a $f = 7,5$ kHz.....	44
Figura 5.7 – Resultados obtidos para ensaio da inspeção <i>inline</i> do fio consumível de ER-70 para a sonda 2 a $f = 7,5$ kHz.....	46
Figura 5.8 – Secções capturadas nas macrografias	48
Figura 5.9 – Macrografias referentes à parede WAAM do Ensaio Referência	49
Figura 5.10 – Macrografias referentes à parede WAAM do Ensaio 1.....	49
Figura 5.11 – Macrografias referentes à parede WAAM do Ensaio 2.....	50
Figura 5.12 – Macrografias referentes à parede WAAM do Ensaio 3.....	51
Figura 5.13 – Chassis e enrolamentos da sonda WFP [44].....	52
Figura 5.14 – <i>Set up</i> da inspeção da parede WAAM pela sonda WFP	53
Figura 5.15 – Resultado da inspeção por CI com a sonda WFP da parede referente ao Ensaio 3 para $f = 1,5$ kHz	53

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparação entre diferentes fontes de calor empregues no âmbito do DED. Adaptado de [5]	7
Tabela 2.2 – Influência dos parâmetros de soldadura o processo WAAM e na peça obtida.....	11
Tabela 2.3 – Revisão da literatura dos END convencionais	17
Tabela 3.1 – Parâmetros das sondas de inspeção do fio consumível	28
Tabela 3.2 – Frequência teórica ótima de inspeção para a sonda de inspeção do fio de aço ER-70.....	29
Tabela 4.1 – Parâmetros dimensionais das paredes WAAM para cada ensaio experimental ..	31
Tabela 4.2 – Parâmetros de soldadura indicados para os ensaios a realizar	36
Tabela 5.1 – Cortes longitudinais das paredes WAAM após fresagem	47
Tabela 5.2 – Comprimento do cordão obtido e respetivo comprimento de fio consumível utilizado	51

NOMENCLATURA

ASNDT	<i>American Society for Non Destructive Testing</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CI	Correntes Induzidas
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>
CNC	<i>Computer Numerical Controlled</i>
DED	<i>Directed Energy Deposition</i>
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
EMAT	<i>Eletromagnetic Acoustic Transducer</i>
END	Ensaio Não Destrutivo
EROI	Engenho de Remoção de Óxidos e Impurezas
FA	Fabrico Aditivo
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
FFF	<i>Fused Filament Fabrication</i>
GMAW	<i>Gas Metal Active Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Active Welding</i>
HF-WAAM	<i>Hot Forging WAAM</i>
HWAAM	<i>Hot Wire WAAM</i>
LP	Líquidos Penetrantes
LU	Laser Ultrassom
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MAT	<i>Medial Axis Transfer</i>
PAUT	<i>Phased Array Ultrasound Testing</i>
PAW	<i>Plasma Active Welding</i>
PBF	<i>Powder Bed Fusion</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>

PLA	<i>Polylactic Acid</i>
PM	Partículas Magnéticas
PoD	<i>Probability of Detection</i>
ROC	<i>Relative Operating Characteristic</i>
RX	Radiografia
SLA	Estereolitografia
STL	<i>Standard Triangle Language</i>
ToFD	<i>Time of Flight Diffraction</i>
TPU	Poliuretano Termoplástico
UC-WAAM	<i>Ultra Cold WAAM</i>
US	Ultrassom
WAAM	<i>Wire and Arc Additive Manufacturing</i>
WFP	<i>WAAM Flex Probe</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O Fabrico Aditivo (FA), popularmente conhecido como “Impressão 3D”, tem-se revelado uma tecnologia-chave para a implementação de medidas que se alinham com o conceito da Indústria 4.0 já que, entre muitas outras valências, permite uma fácil automação e produz peças e componentes personalizados de forma rápida e eficiente. O *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM) é um processo de FA que, devido às suas elevadas taxas de deposição, permite o fabrico de peças metálicas complexas e de grandes dimensões, com tempos de execução relativamente curtos.

Este processo demonstra uma complexidade intrínseca devido à diversidade e número extenso de parâmetros envolvidos. Portanto, a análise da influência da qualidade superficial do fio consumível na peça final é de significativa relevância, particularmente no que se refere à presença de óxidos no mencionado fio.

Ademais, a necessidade de implementar medidas de controlo de qualidade e normas para este processo, bem como a mitigação dos defeitos inerentes ao mesmo, são desafios que se apresentam no panorama atual do WAAM e que representam um entrave para a sua adoção no espetro industrial.

Apostar na adaptação de ensaios não destrutivos (END) a este processo, bem como na sua monitorização *inline*, poderá auxiliar na aquisição de dados passíveis de serem utilizados para que sejam emitidos certificados e normas que confirmem ao processo de WAAM uma qualidade e desempenho consistentes. O ensaio por correntes induzidas (CI) revela características prominentes não só no âmbito da inspeção de peças metálicas obtidas por WAAM *inline*, como na inspeção do fio consumível.

1.2 OBJETIVOS

Este estudo compreende dois objetivos específicos. Em primeiro lugar, no contexto do processo de manufatura, almeja-se obter um entendimento profundo das consequências inerentes ao uso de um fio consumível oxidado no que concerne à qualidade da peça final fabricada por WAAM.

Em segundo lugar, no domínio dos END, pretende-se investigar a viabilidade de realizar uma inspeção *inline* do fio consumível, fazendo uso de sondas de CI, como parte integrante do processo de fabrico.

1.3 METODOLOGIA

A fase inicial da metodologia envolveu o tratamento do fio consumível que foi intencionalmente oxidado ao ser deixado ao ar atmosférico. Esta etapa requereu o pré-estabelecimento dos parâmetros de soldadura, em particular as velocidades de avanço da tocha e de alimentação do fio, com o propósito de calcular o comprimento de fio necessário para cada ensaio, assim como a determinação das extensões das secções que permanecerão oxidadas e aquelas que serão não oxidadas, de acordo com as especificações de cada modalidade de ensaio. Subsequentemente, procedeu-se à remoção dos óxidos das secções designadas para permanecer não oxidadas com o Engenho de Remoção de Óxidos e Impurezas Versão 2 (EROI V2).

Para validar a eficácia das sondas de inspeção para potenciais aplicações *inline*, foi conduzida uma fase de inspeção *offline*. Foram empregues duas sondas de inspeção de fio consumível, uma previamente desenvolvida em estudos anteriores, a Sonda 1, e uma segunda concebida no âmbito deste trabalho, a Sonda 2, que apenas difere da primeira no seu *lift-off* menor. Como espécime de teste, uma secção de fio consumível com uma secção central oxidada foi selecionada. A inspeção foi realizada utilizando uma plataforma motorizada triaxial que permitiu o deslocamento controlado e preciso das sondas ao longo do fio a uma velocidade constante, assegurando uma inspeção controlada.

Após o processamento do fio consumível destinado às três modalidades de ensaios distintas, procedeu-se à deposição das paredes pelo processo WAAM. Paralelamente ao processo de deposição, no contexto do Ensaio 2, Sonda 1 foi posicionada na máquina de soldadura, permitindo a inspeção contínua do fio à medida que este foi alimentado para o banho de fusão durante o processo de deposição. Procede-se analogamente para a Sonda 2.

A etapa final deste estudo compreendeu uma análise destrutiva, destinada a adquirir informações relativas à qualidade interna das estruturas obtidas pelo processo WAAM. Foram capturadas macrografias do interior das paredes para estudar as características da porosidade. Os dados recolhidos durante a análise destrutiva foram analisados para estabelecer uma correlação entre o uso de fio consumível oxidado e os níveis de porosidade observados nas paredes WAAM. Através desta metodologia abrangente, o estudo visa fornecer informações sobre a influência do fio consumível oxidado na qualidade das estruturas WAAM.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos.

No Capítulo 1 é apresentada uma introdução abrangente ao estudo. Neste contexto, é discutida a motivação subjacente à realização desta investigação e são delineados os objetivos da pesquisa, destacando-se a problemática que o estudo visa abordar. Além disso, é descrita a metodologia empregue e expõe-se a estrutura adotada para a dissertação.

O Capítulo 2 corresponde à revisão do estado da arte, sendo subdividido em duas seções distintas: uma dedicada ao FA (§2.1) e outra aos END (§2.3). No que concerne ao FA, são apresentados os principais avanços tecnológicos, com foco detalhado no processo de WAAM (§2.2). São discutidos os parâmetros relevantes, bem como os defeitos e as características microestruturais típicas e suas variantes. No contexto dos END, após uma análise comparativa abrangente dos métodos tradicionais, destaca-se o método de CI como a abordagem preponderante para contornar as limitações e desafios inerentes à inspeção do WAAM. Além disso, são mencionados os avanços recentes realizados no sentido de aprimorar a aplicação do ensaio por CI para a inspeção do WAAM.

No Capítulo 3 são apresentados os diferentes tipos de sondas utilizadas, abordando a sua conceção e desenvolvimento, bem como as suas características de operação e a sua produção.

No Capítulo 4 é descrita toda a metodologia experimental inerente à obtenção de resultados desta dissertação, desde o processamento do fio consumível (§4.1) e produção das paredes WAAM (§4.3), bem como todos os aparatos experimentais utilizados para realizar inspeções do fio consumível em contexto *offline* (§4.2) e *inline* (§4.4). Por fim, descreve-se o procedimento experimental da análise destrutiva realizada para inspeção visual das paredes WAAM obtidas (§4.5).

No Capítulo 5 apresentam-se e discutem-se os resultados experimentais obtidos ao longo do estudo. Isso inclui uma análise da capacidade das sondas de inspeção do fio consumível em detetar seções oxidadas, tanto em configuração *offline* (§5.1) quanto *inline* (§5.3). Adicionalmente, são discutidas as características visuais das paredes WAAM produzidas (§5.2). No que diz respeito à análise destrutiva (§5.4), apresenta-se o interior das amostras após serem maquinadas por fresagem, permitindo uma inspeção visual concisa, e são disponibilizados os resultados das macrografias obtidas durante este procedimento.

No Capítulo 6 tecem-se conclusões sobre todos os resultados expostos no Capítulo 5, e propõe-se desenvolvimentos futuros no âmbito deste tema.

2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

2.1 FABRICO ADITIVO

A Indústria 4.0, que se caracteriza por um novo nível de organização e controlo sobre toda a cadeia de valor do ciclo de vida dos produtos, representa uma revolução do modo de operação do meio industrial como é conhecido. Tal é alcançado através da adoção de tecnologias digitais, automação e inteligência artificial por parte das empresas, com vista à otimização de processos, aumento da flexibilidade e eficiência da produção. Neste sentido, surge a necessidade de integrar tecnologias avançadas, bem como da formação de novos profissionais capacitados para a sua operação [1].

A *American Society for Testing and Materials* (ASTM) define o Fabrico Aditivo (FA) como o processo que visa à união de material para obtenção de peças, através de modelação digital 3D, recorrendo à deposição do mesmo em sucessivas camadas, opondo-se à metodologia do fabrico subtrativo [2].

O FA permite a produção de peças e componentes personalizados de forma rápida e eficiente, sem a necessidade de ferramentas de moldação, é facilmente automatizável, e garante ainda uma redução do desperdício quando comparado com outros processos de fabrico [3]. Todas estas características tornam o processo de produção mais flexível e adaptável a mudanças, garantindo justamente a competitividade pretendida por parte das empresas num mercado cada vez mais dinâmico. Assim, pode afirmar-se que o FA se revela uma tecnologia-chave no âmbito da Indústria 4.0.

O FA requer relativa capacidade computacional para a criação da peça a produzir. Após finalizada a conceção do modelo 3D, converte-se o ficheiro *Computer-Aided Design* (CAD) para um ficheiro *Standard Triangle Language* (STL). Em seguida, ocorre o processo de *slicing* no qual o *software* fatia o modelo em camadas para preparar os dados de impressão. Uma vez que a impressora 3D processa o ficheiro STL e cessa a sua produção, resta apenas limpar a peça, removendo os suportes físicos previamente gerados, e procede-se a eventuais operações de acabamento [4].

As setes categorias de FA definidas pela ISO/ASTM 52900 (2015) são: *Powder Bed Fusion* (PBF), *Directed Energy Deposition* (DED), *Material Jetting*, *Binder Jetting*, *Sheet Lamination*, *Vat Photopolymerization* e *Material Extrusion* [5].

2.1.1 FABRICO ADITIVO DE METAIS

O FA permite o processamento de diversos materiais, nomeadamente polímeros e cerâmicos. Especificando para os metais, existem apenas quatro categorias que permitem o seu processamento, tal como evidencia a Figura 2.1, sendo o PBF e o DED os processos mais relevantes a destacar.

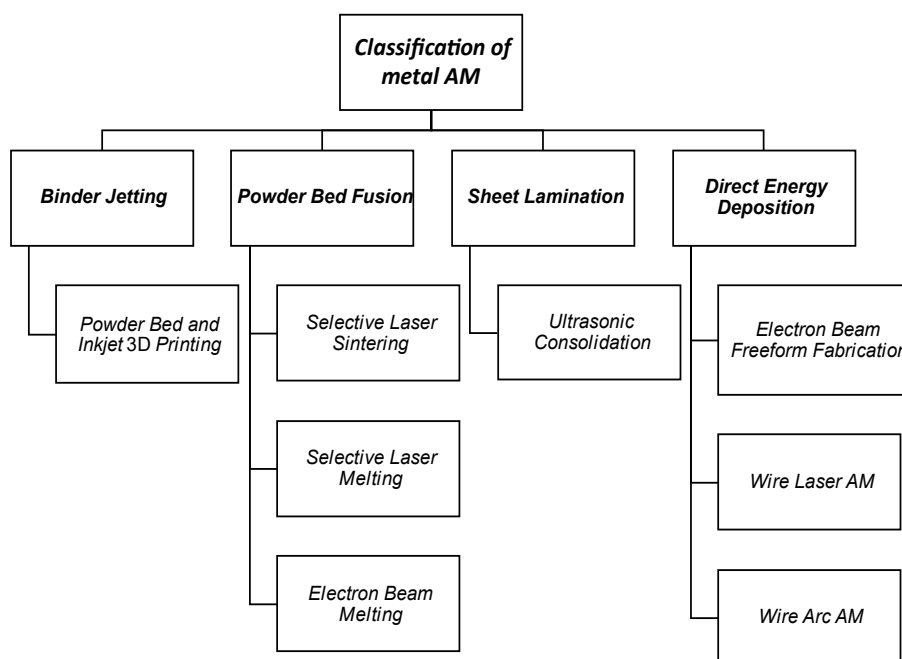


Figura 2.1 – Fabrico aditivo de metais e respetivas categorias. Adaptado de [6]

O PBF tem como princípio de operação a distribuição de uma camada de pó metálico ou polimérico sobre uma plataforma de construção onde se funde seletivamente o pó, usando um laser ou um feixe de eletrões. O pó fundido solidifica e une-se com as camadas previamente depositadas para formar a peça pretendida. Este processo é repetido camada a camada até que a peça esteja completa [7].

O processo de FA por DED envolve a utilização de uma fonte de calor focalizada (laser, feixe de eletrões ou um arco elétrico) que, em contacto com o material metálico (fio ou pó), funde o mesmo num banho de fusão. O processo itera-se em sucessivas camadas, começando no substrato [8].

Sendo estas duas técnicas fortemente solicitadas no que diz respeito ao processamento de materiais metálicos, é pertinente estabelecer algumas comparações acerca das suas valências. Relativamente à precisão e qualidade superficial das peças produzidas, o PBF entrega peças superiores nesse sentido quando contrapostas com as peças obtidas por DED. Para além deste aspeto, o PBF torna-se mais adequado para peças de pequenas dimensões, enquanto o DED consegue produzir peças de maior porte devido às suas maiores taxas de deposição. Ademais, a utilização de material em pó por parte do PBF acarreta um maior risco de porosidades na peça final, o que põe em causa a integridade estrutural das mesmas [9].

Em suma, a escolha entre PBF e DED depende das especificações da peça e das exigências do projeto. Na Figura 2.2 podem ver-se esquematizados estes dois processos.

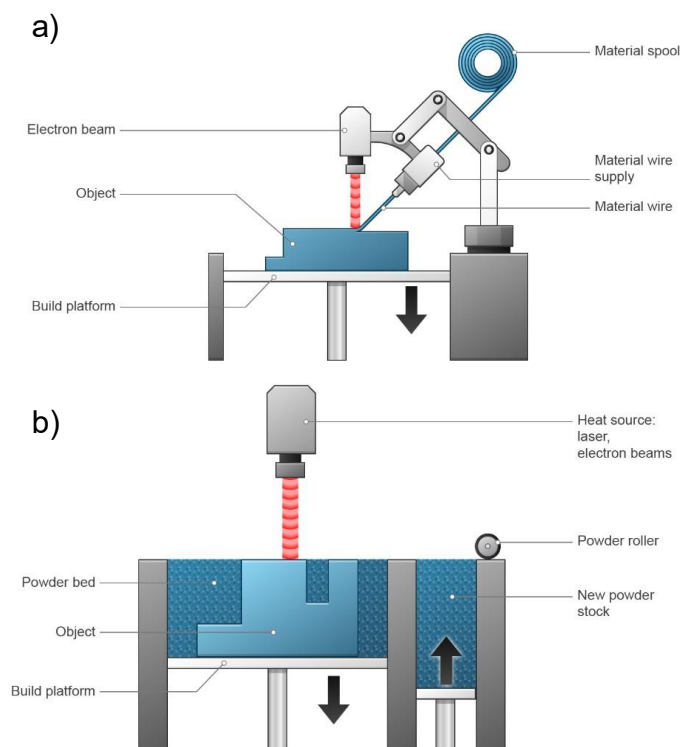


Figura 2.2 – Esquematização dos processos: a) DED; b) PBF [10]

No que diz respeito à categoria DED, infere-se que existem 3 formas de aplicar energia térmica: feixe de eletrões, feixe laser e arco elétrico. A Tabela 2.1 expõe uma comparação entre estes modos.

Tabela 2.1 – Comparação entre diferentes fontes de calor empregues no âmbito do DED. Adaptado de [5]

Parâmetro	Feixe de laser	Feixe de eletrões	Arco Elétrico
Fonte de Energia	Fotão	Eletrão	lão
Fonte de Calor	Onda eletromagnética	Energia cinética	Arco elétrico
Densidade de Energia	$10^2 - 10^6 \text{ W/mm}^2$	$10^5 - 10^9 \text{ W/mm}^2$	$10^6 - 10^8 \text{ W/mm}^2$
Eficiência	Inferior	Intermédia	Excelente
Taxa de Deposição	150 – 200 g/h	600 – 800 g/h	2 – 4 kg/h
Vácuo	Não requer	Requer	Não requer

Infere-se assim que ao empregar-se um arco elétrico como fonte de calor obtêm-se taxas de deposição de material e eficiências de processo superiores em contraste com os restantes modos. Acresce-se ainda o facto de que os equipamentos necessários para produzir peças recorrendo ao arco elétrico como fonte de calor são mais económicos [3,11].

2.2 WIRE AND ARC ADDITIVE MANUFACTURING

O *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM) é uma variante do DED onde se recorre à combinação de um arco elétrico como fonte de calor e um fio metálico como material de alimentação. O equipamento utilizado neste processo é similar aquele utilizado para processos de soldadura: uma fonte de energia, uma tocha e um sistema de alimentação do fio. O movimento relativo da tocha pode ser assegurado tanto por sistemas robóticos como por sistemas *computer numerical controlled* (CNC) [3].

2.2.1 PARAMETRIZAÇÃO

Existem diversos parâmetros que são necessários controlar no processo de WAAM, não só na perspetiva dos parâmetros de soldadura propriamente ditos, mas outros que antecedem este momento, tais como parâmetros referentes ao modelo CAD e ao trajeto a realizar pela tocha, que estão expostos na Figura 2.3.

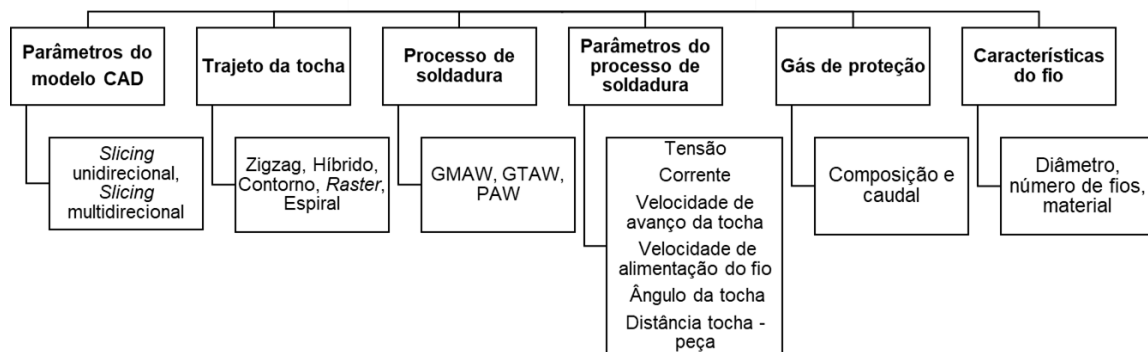


Figura 2.3 – Parâmetros inerentes ao processo de WAAM

Parâmetros do modelo CAD

O modo de *slicing* ditará o número de suportes que são necessários no fabrico de uma peça. Ao optar pelo *slicing* multidirecional em detrimento do *slicing* unidirecional, é possível reduzir consideravelmente o número de suportes físicos em peças de geometria complexa ou que apresentem partes da sua geometria suspensas ao utilizar um braço robótico multi-eixos. No entanto, sendo que o *slicing* multidirecional implica *set up* robóticos complexos, dá-se primazia ao *slicing* unidirecional devido à sua simplicidade [12].

Trajeto da tocha

O modo de deposição das camadas de material representa um fator crucial no que diz respeito à qualidade das peças resultantes. Um correto planeamento deste parâmetro pode reduzir distorções e tensões residuais, bem como a anisotropia, e reduzir as possibilidades de ocorrência de fusão incompleta. Expõe-se na Figura 2.4 dos diferentes tipos de trajeto.

De um modo sumário, os trajetos *raster* e *zigzag* no processo de WAAM conduzem a uma qualidade de deposição reduzida devido à frequente rotação e mudanças de direção da

tocha, levado a uma deflexão da parede e erros de discretização nas extremidades do contorno [12].

A trajetória de contorno é capaz de mitigar os inconvenientes da deformação e anisotropia já que existe uma mudança frequente da direção da trajetória ao longo dos contornos, sendo uma possível limitação deixar secções por preencher entre as camadas depositadas, resultando num preenchimento incompleto que põe em causa a qualidade da peça produzida [12].

Nesse contexto, D. Ding et al. propuseram uma metodologia alternativa com base no conceito de *Medial Axis Transformation* (MAT) da geometria que se pretende imprimir através da deposição de material em excesso fora da camada limite da peça, e começando a deposição do interior da camada para o exterior. Esta estratégia provou mitigar a possibilidade de falta de preenchimento entre camadas, revelando-se especialmente vantajoso para peças de espessuras reduzidas [13].

Relativamente à trajetória em espiral, esta revela-se pertinente para modelos geométricos complexos. Por fim, a trajetória híbrida combina as potencialidades das trajetórias zigzag e espiral [14].

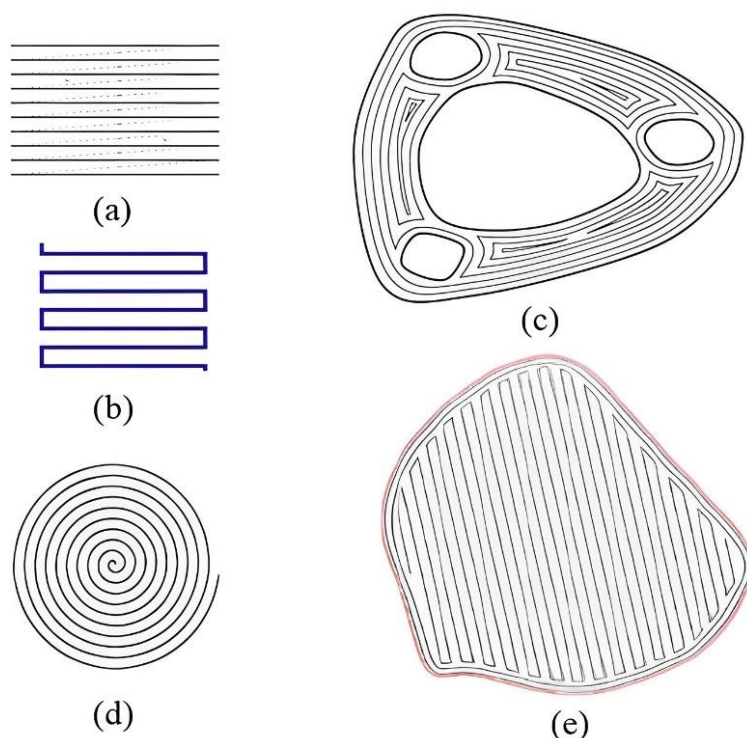


Figura 2.4 – Tipos de trajetórias da tocha: (a) Raster; (b) Zigzag; (c) Contorno; (d) Espiral; (e) Híbrida [15]

No que diz respeito à distância entre camadas, D. Ding et al. determinaram uma distância ótima entre camadas adjacentes de 0,738 vezes a largura do cordão, que poderia mitigar a possibilidade de falta de preenchimento, já que otimizar este aspeto permite atingir as tolerâncias pretendidas, maior precisão geométrica e uma rugosidade superficial reduzida [16].

Processo de Soldadura

O processo de WAAM pode ser categorizado de três maneiras distintas com base na forma como a energia térmica é aplicada: *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW), e *Plasma Arc Welding* (PAW). Estas técnicas de soldadura variam entre si em diversos aspetos, nomeadamente na taxa de deposição e o tempo associado ao processo, e encontram-se esquematizadas na Figura 2.5.

Relativamente ao GMAW, recorre-se a um elétrodo de arame contínuo e um gás que protege o banho de fusão. Apresenta taxas de deposição da ordem dos 3 kg/h aos 4 kg/h, apresentando uma elevada eficiência e, conseqüentemente, revela-se um processo menos moroso [12].

Existem ainda algumas variantes do processo de GMAW que surgem na tentativa de mitigar problemas inerentes a este processo, ou até mesmo aprimorá-lo:

1. *Cold Metal Transfer* (CMT), onde o processo de alimentação do fio não é contínuo, já que este se retrai no momento que adere ao banho de fusão. Assim, ao quebrar o arco, o calor introduzido no processo é interrompido, levando a um menor gradiente térmico [17];
2. *Tandem GMAW*, onde se utilizam dois fios metálicos, conduzindo a um aumento da taxa de deposição para 6 kg/h a 8 kg/h [12];
3. WAAM Híbrido, onde se combinam os sistemas robóticos de deposição de WAAM e maquinagem do cordão depositado *inline*, diminuindo a rugosidade superficial [12].

No que diz respeito às técnicas de soldadura de GTAW e PAW, estas usam um elétrodo não consumível de tungsténio para produzir o cordão de soldadura, necessitando de uma fonte de alimentação externa do fio metálico, cuja orientação afetará a qualidade da deposição, tornando estes processos mais complexos [18]. O GTAW apresenta uma taxa de deposição que varia entre 1 kg/h e 2 kg/h, tendo uma baixa eficiência associada. O PAW, cuja taxa de deposição característica ronda os 2kg/h a 4 kg/h, apresenta um elevada entrega térmica, resultando em cordões mais estreitos, causando menos distorções. No entanto, requer um investimento elevado [19].

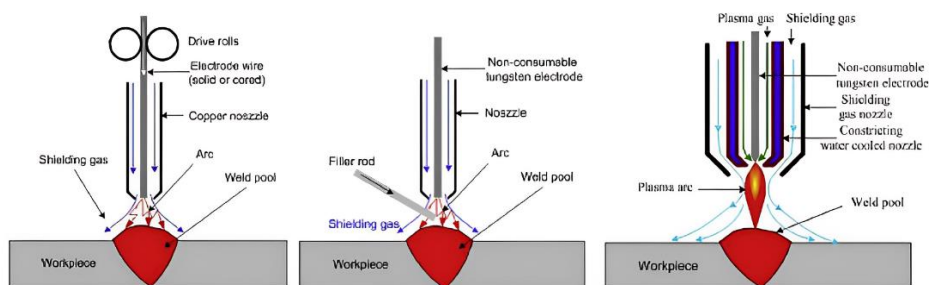


Figura 2.5 – Esquema representativo dos processos: (a) GMAW; (b) GTAW; (c) PAW [14]

Parâmetros do processo de soldadura

Todos estes parâmetros são cruciais de serem otimizados já que têm uma influência direta na qualidade da peça resultante do processo por determinarem o modo de transferência. Estes determinarão aspetos como a largura do cordão ou da camada, a penetração e rugosidade da superfície.

Pela Tabela 2.2 sintetiza-se os efeitos que as variações dos parâmetros de soldadura têm nas propriedades macroscópicas das peças obtidas.

Tabela 2.2 – Influência dos parâmetros de soldadura o processo WAAM e na peça obtida

Propriedades da peça	Largura do cordão		Penetração		Altura do cordão		Taxa de deposição	
Parâmetros	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Corrente	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Velocidade de alimentação do fio	↑	↓	↑	↓	↑	↓	↑	↓
Tensão elétrica	↑	↓	E.R	E.R	E.R	E.R	E.R	E.R
Velocidade de avanço da tocha	↓	↑	↓	↑	↓	↑	ER	E.R
Extensão do eletrodo	E.R	E.R	↓	↑	E.R	ER	ER	E.R
Diâmetro do fio	E.R	E.R	↓	↑	E.R	E.R	↓	↑
Gás de proteção	↑	↓	↑	↓	E.R	E.R	E.R	E.R

LEGENDA: ↑ – aumento; ↓ – diminuição; E.R – Efeito reduzido;

O processo WAAM apresenta elevadas espessuras de camada quando contrapostas com as espessuras conferidas por outras variantes de FA de metais (1000-2000 μm). No entanto, apresenta também uma reduzida qualidade superficial das camadas, verificando-se uma ondulação pronunciada na ordem dos 180-400 μm [20].

Em suma, infere-se que o processo de WAAM apresenta características promissoras sendo que apresenta um menor custo quando comparado com outros processos de FA, entrega taxas de deposição superiores e revela uma fácil integração na maquinaria existente.

No entanto, é de salientar que existem inconvenientes que devem ser mitigados, nomeadamente as tensões residuais e distorção que se verificam nas peças produzidas, a fraca precisão de tolerâncias, bem como a ondulação superficial, que resulta num baixo acabamento superficial, tópicos que serão abordados no segmento seguinte.

2.2.2 DEFEITOS E CARACTERÍSTICAS MICROESTRUTURAIS

O processo de WAAM resulta em peças que apresentam propriedades mecânicas moderadas quando contrapostas com métodos de fabrico convencionais, no entanto, fatores como parametrização inadequada, elevada entrega térmica ou instabilidade do banho de fusão podem conduzir ao aparecimento de defeitos [14].

Porosidades

As porosidades nos componentes produzidos por WAAM, que se caracterizam por pequenos vazios no material (Figura 2.6), podem reduzir a sua resistência à fadiga e corrosão, além de facilitarem a propagação de fissuras [21].

Esta pode ser induzida por contaminação da matéria-prima, neste caso, do fio metálico, ou de parametrização indevida do processo [22]. O primeiro caso deve-se à presença de gorduras ou outros compostos de hidrocarbonetos no fio metálico que são rapidamente absorvidos pelo banho de fusão e, após a sua solidificação, resultam em porosidades. Ryan et al. comprovaram que a pobre qualidade superficial do fio consumível se revelou propícia à formação de porosidades nas peças obtidas da liga de alumínio 2319 [23]. O segundo caso verifica-se quando existe falta de fusão ou salpicos durante a deposição, levando ao aparecimento de porosidades não esféricas [14].

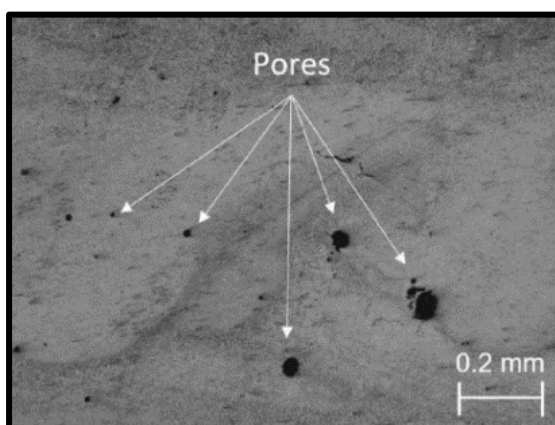


Figura 2.6 – Porosidades detetadas numa peça de alumínio

Fissuras e delaminação

A formação de fissuras e delaminação entre camadas, que se podem observar na Figura 2.7, tem um impacto negativo na qualidade e integridade das peças produzidas, comprometendo a sua resistência mecânica e fiabilidade, o que é indesejável. As fissuras podem ocorrer como resultado de entregas térmicas demasiado elevadas, porosidades na superfície ou tensões térmicas excessivas. A delaminação, que se caracteriza pela separação de duas camadas de material adjacentes, por outro lado, dá-se devido a baixa entrega térmica que impede a refusão entre camadas, incorreta parametrização do processo ou arrefecimento inadequado, conduzindo a elevadas tensões residuais presentes na peça [21].

É de salientar que problemas relacionados com fissuração e delaminação não conseguem ser mitigados com operações de pós-processamento, à oposição das porosidades, por exemplo, por isso deve apostar-se em operações de pré-processamento tais como o aquecimento prévio do substrato, que se revelam essenciais para reduzir o gradiente de temperatura [12].

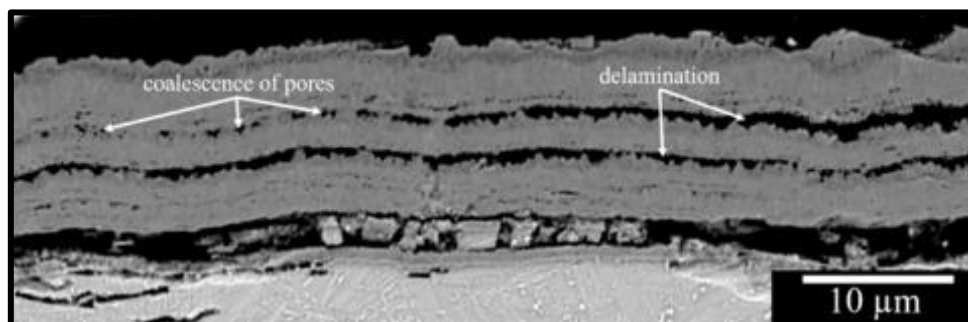


Figura 2.7 – Delaminação numa peça obtida por WAAM [24]

Tensões Residuais

O controlo das tensões residuais e consequentes distorções é um objetivo fundamental aquando da produção de peças em WAAM. O aquecimento e arrefecimento repetitivos, causados pela deposição das sucessivas camadas, provocam expansões e contrações do material, respetivamente, induzindo tensões no material. Quando as forças externas são removidas da peça, nomeadamente forças exercidas por fixações, as tensões residuais permanecem no material e podem conduzir a distorções macro ou microscópicas. No limite, pode mesmo conduzir à fratura prematura da peça produzida se as tensões residuais ultrapassarem a tensão de rotura do material [9].

As tensões residuais são passíveis de serem mitigadas em operações de pós processamento, no entanto, as distorções que ocorrem devido às mesmas comprometem o correto dimensionamento das peças produzidas [18].

De modo a minimizar as distorções é basilar controlar o crescimento das tensões residuais durante a deposição das camadas através de estratégias que incidem sobre as trajetórias e sequências de deposição, ou até mesmo estratégias de pré-aquecimento do substrato ou *interpass cooling* [18,21]. É de salientar que o *interpass cooling* permite também a alteração do ciclo térmico para um domínio desejado e viabiliza a obtenção de uma determinada microestrutura ou propriedades mecânicas.

Anisotropia

O gradiente térmico próprio do processo WAAM influencia fortemente o crescimento do grão, sendo este tendencialmente perpendicular às linhas isotérmicas, dando lugar a grãos grandes e colunares que seguem essa tendência do escoamento do calor [25].

Esta orientação preferencial dos grãos, bem como o seu tamanho e geometria, conferem ao material depositado características anisotrópicas. A anisotropia provoca uma dependência direcional das propriedades mecânicas do material [26].

Aspetos como elevadas entregas térmicas e reduzidas taxas de arrefecimento promovem a nucleação de grãos colunares de grandes dimensões, resultando em anisotropia [6]. Aspetos como a orientação de alimentação do fio também desempenham um papel notório neste fenómeno.

Mitigar a anisotropia passa por otimizar parâmetros de soldadura e apostar em medidas de pós-processamento, como tratamentos térmicos. É também possível reduzir o seu efeito através de uma abordagem química. Rodrigues et al. confirmaram que a adição de inoculantes de SiC no banho de fusão de um aço HSLA contribuíram para o aumento das propriedades mecânicas do material, nomeadamente da tensão de rotura e da dureza, devendo-se ao refinamento do grão [27].

É de salientar que a existência de anisotropia numa peça acresce a dificuldade de maquinagem e pós-processamento, já que as diferentes características mecânicas em diferentes direções requerem um ajuste dos parâmetros de corte e das técnicas empregues [28].

Aspetos da geometria

A rugosidade e ondulação superficiais, tanto na lateral das paredes bem como no topo das camadas depositadas, aliadas ao desnível da altura da parede são defeitos geométricos do WAAM que comprometem a qualidade superficial das paredes obtidas. Para além de tornarem as peças resultantes inadequadas para a generalidade das aplicações industriais, comprometem a aplicação de inúmeros ensaios não destrutivos (END) que impliquem contacto com a peça a inspecionar [29].

Ademais, a ondulação e rugosidade superficiais pronunciadas nas peças, ilustradas na Figura 2.8, conduzem a um aumento da concentração de tensões, diminuindo a sua resistência mecânica perante aplicações que impliquem esforços cíclicos. Paralelamente, a presença destes aspetos geométricos reduz a precisão dimensional da peça produzida, levando a um maior desperdício de material [28].

Xiong et al. averiguaram o efeito de determinados parâmetros do processo na rugosidade lateral das paredes produzidas, concluindo que a redução da temperatura entre camadas promove a qualidade superficial da soldadura, bem como a combinação de velocidades de alimentação do fio e de avanço da tocha reduzidas [27].

Zhang et al. propuseram um método para mitigar o inconveniente da superfície não uniforme provocada pelo estabelecimento e cessamento do arco elétrico, que requeria o ajuste dos parâmetros de soldadura no início e no fim do trajeto de deposição. No entanto, este método revela-se moroso e empírico [30].

Ding et al. apresentaram um algoritmo que envolve a decomposição da geometria 2D em polígonos convexos e, com recurso aos trajetos de contorno e zigzag, produzir um contorno fechado para cada polígono, resultando numa diminuição das passagens da tocha, e consequente diminuição da ondulação superficial. No entanto, este método ignorou o impacto das tensões residuais e distorções provenientes da aplicação de um trajeto contínuo de deposição [31].



Figura 2.8 – Defeitos geométricos das peças WAAM: (a) desnível da altura das camadas depositadas; (b) ondulação e rugosidade superficiais [32]

2.2.3 VARIANTES

Uma vez expostos os defeitos e características microestruturais inerentes às peças produzidas por WAAM, expõe-se as variantes que foram desenvolvidas no sentido de mitigar estes inconvenientes, que assentam em abordagens térmicas, através do arrefecimento/aquecimento ativo, e mecânicas, por meio da deformação plástica. A abordagem química através de inoculantes já foi mencionada.

No que diz respeito à abordagem mecânica, destacam-se as variantes de *Hot Forging* WAAM (HF-WAAM) e *Interpass Rolling*. Relativamente ao HF-WAAM, utiliza uma tocha customizada munida de um martelo no seu interior que faz o forjamento a quente *in situ* [33]. No que diz respeito ao *Interpass Rolling*, o princípio é semelhante, mas faz-se uso de um rolo que se movimenta ao longo do comprimento da camada depositada.

As duas variantes permitem o aumento da resistência mecânica, redução de tensões residuais e consequente distorção, e homogeneização da microestrutura, reduzindo o tamanho de grão. Para além disso, verificou-se que são capazes de colapsar porosidades, bem como reduzir a rugosidade superficial das paredes depositadas [34,35]. Adicionalmente, como ao recorrer a estas variantes resulta uma superfície da camada depositada menos ondulada, viabiliza-se o emprego de ensaios não destrutivos (END) que necessitam de contacto com a peça a inspecionar, nomeadamente o ensaio por ultrassons (US) e por correntes induzidas (CI).

Sendo que a gestão da elevada entrega térmica é um dos principais desafios do processo WAAM pois induz elevadas tensões residuais e distorção, surgem variantes que assentam na abordagem térmica para mitigar este problema. Destacam-se a variante do *Ultra Cold* WAAM (UC-WAAM), que estabelece o arco elétrico entre o fio consumível e um eletrodo não consumível de tungstênio, excluindo o substrato da equação como no WAAM convencional, e a variante do *Hot Wire* WAAM (HWAAM), que requer o aquecimento prévio do fio consumível [12,36]

Todas as variantes mencionadas surgem com o objetivo de mitigar os diversos problemas inerentes às peças de WAAM para que a sua aplicabilidade seja cada vez mais vasta e amplamente aceite em todo o espectro industrial.

No entanto, falta ainda garantir a fiabilidade das peças produzidas por WAAM recorrendo a END e monitorização do processo *inline*, contudo, devido aos fatores suprarreferidos, nomeadamente a rugosidade superficial das peças, os END convencionais revelam-se insuficientes. Nesse sentido, é necessário aprofundar de que maneira é possível adaptar os mesmos para que sejam passíveis de ser empregues nestas peças.

2.3 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

De acordo com a *The American Society for Non Destructive Testing* (ASNDT), um END é o processo de inspecionar, testar e avaliar materiais, componentes ou conjuntos em busca de descontinuidades ou diferenças nas suas características sem comprometer a integridade física, química ou mecânica, bem como a aplicabilidade da peça a ser avaliada [37].

Os END podem ser aplicados em fases distintas da vida de uma peça: antes do seu processamento na examinação da matéria-prima, durante o fabrico, ou seja, na avaliação da qualidade do processo *inline*, na examinação da peça finalizada e, por fim, na examinação da peça quando esta já se encontra em serviço, como forma de manutenção preventiva. Podem também ser empregues no âmbito da caracterização de materiais e metrologia.

Inúmeros avanços foram feitos no sentido de desenvolver e inovar os ensaios existentes, e o futuro dos END passa por reduzir o limiar de detetabilidade, aumentar a fiabilidade (*Probability of Detection* (PoD) e *Relative Operating Characteristic* (ROC)), reduzir os tempos e custos das inspeções, apostando em avaliações *inline* economicamente viáveis, e aprimorar estes ensaios para novos tipos de materiais e processos de fabrico.

Os END podem ser divididos conforme o fenómeno físico que os rege, nomeadamente ultrassom, eletromagnetismo, termografia, radiografia, capilaridade e ondas mecânicas [35]. Na Tabela 2.3 apresenta-se uma revisão da literatura dos principais END, listando o seu princípio de operação, vantagens e limitações, bem como algumas variantes de determinados END.

Tabela 2.3 – Revisão da literatura dos END convencionais

END	Princípio de operação	Vantagens	Limitações	Variantes	Inline
Correntes Induzidas (CI)	Um campo magnético é criado nas proximidades da peça a inspecionar através de uma bobina. As correntes induzidas geradas na peça são perturbadas pela existência de defeitos. Estes são detetados através das variações na impedância da bobina, que é equivalente à alternância das correntes induzidas [38]	Rápido, versátil, sensível a micro-defeitos; deteta defeitos superficiais e sub-superficiais não requer contacto com a peça a examinar [39]	Profundidade de penetração reduzida, efeito de <i>lift-off</i> e dependente da qualidade superficial da peça a inspecionar [39]	-	✓
Ultrassons (US)	Ondas acústicas criadas por um transdutor, que se encontra em contacto com a peça, propagam-se através da mesma. Na interface dos defeitos estas ondas são refletidas, sendo o sinal detetado e avaliado [38]	Vasta gama de materiais pode ser avaliada; apenas necessita de acesso a uma das faces; sensível e preciso [38]	Difícil de aplicar em materiais com grande atenuação US; requer bons acabamentos superficiais e geometrias pouco complexas; requer contacto com a peça [40]	Creeping; ToFD; PAUT; EMAT; Guided Waves; Laser US US por Imersão	X
Radiografia (RX)	Ao penetrar a peça a inspecionar com radiação eletromagnética, verifica-se uma absorção diferenciada quando esta radiação encontra defeitos ou variações de espessura/densidade. A película fotossensível capta a radiação que atravessa a peça, apresentando tonalidades diferentes para taxas de radiação transmitida diferentes [41]	Permite uma inspeção volumétrica; insensível à rugosidade superficial da peça; não requer contacto [42]	A orientação de defeitos planares é crítica; riscos para a saúde humana [42]	Neutron imaging X-ray backscatter Computed tomography [41]	X
Líquidos Penetrantes (LP)	O líquido penetrante é aplicado na superfície da peça a inspecionar, penetrando os defeitos. Ao remover o excesso de líquido e aplicando o revelador, os defeitos tornam-se visíveis [38]	Portabilidade e fácil utilização; custo reduzido; versátil [42]	Apenas deteta defeitos superficiais; requer preparação da superfície [42]	-	X
Partículas Magnéticas (PM)	Consiste em expor a peça a examinar a um campo magnético. Eventuais defeitos provocam campos de fuga nas suas imediações, sendo evidenciados através da disposição das partículas magnéticas [40]	Custo reduzido; fácil interpretação e utilização [42]	Apenas aplicável a materiais ferromagnéticos; Requer contacto com a peça; não aplicável a geometrias complexas [42]	-	X
Termografia	Baseia-se na deteção e localização de variações da temperatura superficial da peça a inspecionar. Uma câmara infravermelha associada a um software de processamento de imagem produz uma imagem 2D da zona inspecionada [40]	Extrema sensibilidade; não requer contacto; permite inspeções rápidas [39]	Possibilidade de penetração reduzida; equipamento dispendioso [39]	Termografia Laser; Vibro Termografia; Termografia por CI	✓

2.3.1 END NO ÂMBITO DO WAAM E MONITORIZAÇÃO *INLINE*

Existem duas lacunas na produção por WAAM que podem ser colmatadas através da monitorização *inline* e da conceção de END adaptados a este processo, nomeadamente o controlo de qualidade e a falta de normalização. Ao garantir qualidade consistente e reprodutibilidade das peças WAAM, aliado à criação de normas para este processo, torna-se possível a implementação do WAAM no espectro industrial através do aumento da fiabilidade e precisão do processo [43].

Para além disso, no sentido da Indústria 4.0, revela-se cada vez mais importante a implementação de END *inline*, viabilizando assim a identificação e correção de potenciais problemas de qualidade prematuramente, melhorando a eficiência do processo. Acresce-se ainda que a informação proveniente desta análise permite a otimização da parametrização do processo, conduzindo a uma maior consistência das peças finais [41].

Todavia, as peças WAAM apresentam desafios aos END convencionais devido à sua elevada rugosidade e ondulação superficial, e geometrias complexas [44]. Mais ainda, no âmbito da inspeção *inline*, é necessário contornar o inconveniente das elevadas temperaturas inerentes ao processo e garantir a viabilidade do ensaio escolhido nestas condições de trabalho [45].

O ensaio por US, apesar das suas vantagens, apresenta duas características que podem tornar a sua aplicação para a inspeção *inline* do processo de WAAM desafiante: para além de ser sensível à rugosidade superficial da peça a inspecionar por necessitar de contacto entre o transdutor e a peça, não pode ser empregue para processos que apresentem temperaturas superiores a 330 °C [46]. No entanto, o trabalho de Lopez et al. mostra resultados positivos do ensaio por US no processo *inline* limitado a 100 °C, onde se efetuava a mistura de líquido acoplante no material depositado para viabilizar a inspeção, sem quaisquer implicações mecânicas, químicas ou metalúrgicas para a peça produzida [45]. Ademais, técnicas avançadas de ultrassons como os transdutores acústicos eletromagnéticos (EMAT) e ultrassons por laser (LU) podem ser viáveis para uma monitorização *inline*.

Os ensaios de LP e PM apresentam também um entrave à sua aplicação *inline* já que a sua utilização requer o uso de partículas e reagentes na superfície da peça.

A termografia, por outro lado, é um método sem contacto que é capaz de monitorizar a temperatura do fio consumível e do banho de fusão *inline*, o que pode indicar a presença de defeitos internos. Contudo, é sensível às condições de trabalho e requer processamento de dados adicionais para identificar potenciais defeitos. Note-se que este é um ensaio que necessita de um END complementar para produzir resultados significativos e permitir a implementação industrial, já que se revela insuficiente para deteção de defeitos internos ou microdefeitos pois podem não gerar mudanças térmicas suficientes na superfície para serem identificados facilmente pela termografia, por exemplo [47].

Relativamente à inspeção por RX, a principal vantagem é a capacidade que detém de levar a cabo inspeções volumétricas. No entanto, apresenta uma fraca sensibilidade para defeitos que sejam muito menores do que a dimensão da peça a inspecionar, e para defeitos planares ou que sejam perpendiculares à direção de incidência da radiação. Num contexto *inline* mostra-se inaplicável já que não produz dados digitais aquando da penetração da radiação na peça. Acresce-se ainda o facto de se tratar de um ensaio que mostra implicações negativas para a saúde humana [41], para além de se revelar um processo demorado [42].

O ensaio por CI consegue detetar todo o tipo de defeitos, exceto volumétricos. Apesar de ter uma profundidade de penetração de cerca de 1-2 mm, tal não se revela um impedimento para a inspeção do processo em questão já que o WAAM apresenta uma espessura de camada característica das mesmas dimensões [20,41]. Para além disso, é bastante sensível a micro defeitos. Contudo, há desafios que têm de ser ultrapassados para que a sua aplicação *inline* no processo de WAAM seja possível, nomeadamente reduzir o ruído proveniente do *skin effect* e do *lift-off* nos resultados obtidos, e a solução passa pela conceção de sondas customizadas [44].

Nesse sentido, e dando continuidade ao trabalho levado a cabo em anos anteriores no Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) no âmbito dos END e monitorização do processo WAAM, foca-se as atenções nas potencialidades que o ensaio por CI oferece, dedicando o próximo capítulo ao mesmo.

2.3.2 CORRENTES INDUZIDAS

O ensaio de CI permite testar materiais ferro magnéticos e não ferromagnéticos, desde que estes sejam condutores de eletricidade. Quando uma corrente elétrica alternada percorre uma bobina helicoidal cilíndrica gera-se um campo magnético primário. Este por sua vez, quando se encontra na vizinhança da peça condutora a inspecionar, induz nesta uma corrente elétrica. Pelo princípio da indução eletromagnética, depreende-se que esta corrente criará um campo magnético secundário, que irá interagir contrariando o campo magnético primário, induzindo uma corrente na bobina que constitui a sonda.

Uma descontinuidade ou eventuais variações das propriedades do material podem ser detetadas devido à distorção do campo magnético secundário, que alterará a impedância da bobina e, usando sensores que monitorizam continuamente a impedância, qualquer irregularidade que afete as correntes induzidas poderá ser detetada. A representação do princípio físico deste teste é ilustrada na Figura 2.9.

A densidade de corrente, I_x [$A.m^{-2}$], não é constante ao longo de toda a espessura de um material condutor, concentrando-se principalmente nas imediações da sua superfície e anulando-se para uma determinada profundidade. Refere-se a este fenómeno como *skin effect*.

A Equação 2.1 permite determinar a densidade de corrente para uma determinada profundidade através da densidade de corrente à superfície, $I_0 [A.m^{-2}]$, da profundidade de penetração, $\delta [m]$, da frequência de excitação, $f [s^{-1}]$, da permeabilidade magnética, $\mu [H.m^{-1}]$ e da condutividade elétrica, $\sigma [\%IACS]$.

$$I_\delta = I_0 \cdot e^{-\delta(\pi f \mu \sigma)^{-1/2}} \quad (2.1)$$

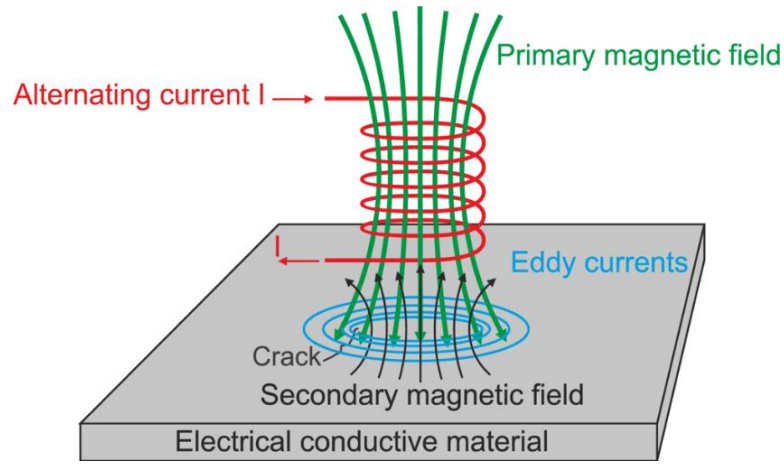


Figura 2.9 – Esquematização do princípio físico do ensaio por CI [47]

De modo a compreender quão profundas as correntes induzidas podem penetrar na peça e, assim, inspecioná-la, estabeleceu-se que a profundidade de penetração seria a profundidade correspondente a uma redução até 37% do valor da densidade de corrente à superfície, tal como se demonstra na Equação 2.2.

$$\frac{I_\delta}{I_0} = e^{-1} \approx 37\% \Leftrightarrow \delta(\pi f \mu \sigma)^{-1/2} = 1 \quad (2.2)$$

Assim, resulta a Equação 2.3 que evidencia que, conhecendo a permeabilidade magnética e a condutividade elétrica de um determinado material a inspecionar, podemos manipular a profundidade de penetração através do ajuste da frequência de excitação.

$$\delta_{(f,\mu,\sigma)} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.3)$$

A Figura 2.10 evidencia através de simulação numérica o impacto da variação da frequência de excitação na capacidade que as correntes induzidas demonstram em penetrar a peça, revelando que uma diminuição da frequência leva ao aumento da profundidade de penetração.

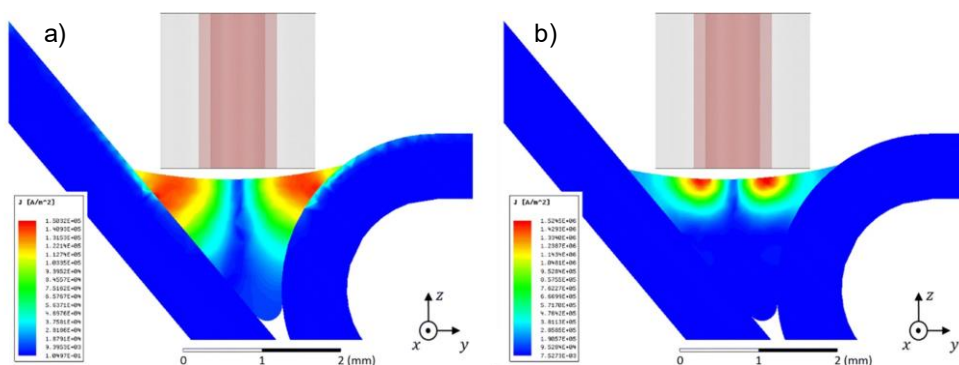


Figura 2.10 – Simulação numérica do ensaio por CI para: (a) $f = 250$ kHz; (b) $f = 2$ MHz [48]

Classificação e caracterização de sondas CI

No que diz respeito ao modo de operação das sondas CI, pode fazer-se a seguinte distinção:

Absoluto – utilizam uma única bobina que é simultaneamente o elemento de excitação e de receção. Nesta configuração, analisa-se a variação de impedância total da bobina. Uma vez que as sondas absolutas são sensíveis a parâmetros como a condutividade, a permeabilidade, *lift-off* e à temperatura, devem ser tomadas medidas para minimizar estas variáveis quando não são importantes para a inspeção a ser realizada. É comum que as sondas absolutas disponíveis comercialmente tenham uma bobina de referência fixa que se encontra no ar e compensa as variações da temperatura ambiente [42,48];

Diferencial – é feita a comparação da variação da impedância de duas bobinas, estando uma delas colocada num material padrão, ou próxima à primeira, mas com enrolamento em sentido oposto. Apresentam uma extrema sensibilidade a defeitos, mas relativa insensibilidade a variações graduais das propriedades do material [49]. Os sinais de oscilação das sondas conseguem ser minimizados através deste modo de operação [42,48];

Reflexão – têm duas bobinas semelhantes a uma sonda diferencial, no entanto, uma bobina é utilizada para excitar as correntes induzidas e a outra é utilizada para detetar alterações no material de teste. A vantagem das sondas de reflexão é que o condutor e as bobinas de captação podem ser otimizadas separadamente para o seu propósito pretendido;

Híbrido – referem-se à combinação de dois ou mais tipos de sondas num único instrumento. A combinação de uma sonda diferencial e uma sonda absoluta é um exemplo deste modo de operação. A sonda diferencial é utilizada para medir alterações na condutividade elétrica do material a ser inspecionado, enquanto a sonda absoluta fornece uma medida da condutividade absoluta [48].

Para além do modo de operação, as sondas de CI podem também ser classificadas de acordo com a sua configuração, que diz respeito a aspetos geométricos das bobinas, nomeadamente o formato, número de enrolamentos e modo de acomodação à peça a inspecionar [48].

2.3.3 LIMITAÇÕES E DESAFIOS DO ENSAIO POR CI PARA WAAM

Todos os END detêm as suas limitações, e o ensaio por CI não é exceção. As limitações inerentes a este ensaio passam por aspetos como:

Lift-off

O *lift-off* define-se como a distância da sonda à superfície da peça a inspecionar e é um parâmetro fundamental do ensaio por CI já que influencia a profundidade de penetração das CI, estando diretamente relacionado com a precisão do ensaio [49]. A elevada rugosidade superficial das peças WAAM, de 180 a 500 μm , provoca flutuações do *lift-off* ao longo da camada, comprometendo a viabilidade dos resultados deste ensaio.

Efeito de Bordo

Por não haver uma superfície plana e, portanto, com largura constante, o efeito de bordo característico das CI revela-se adverso na interpretação e precisão dos resultados, já que a distorção de sinal proveniente deste efeito é semelhante ao que ocorre quando as correntes encontram um defeito. Se do processo WAAM resultassem peças sem ondulações e rugosidade excessiva, o efeito de bordo seria consistente e, portanto, previsível. Adicionalmente, o efeito de bordo pode ser ampliado para geometrias complexas.

Skin Effect

O ensaio por CI permite apenas a deteção de defeitos superficiais e sub-superficiais devido ao *skin effect*, sendo que as sondas comerciais se revelam insuficientes para a deteção de defeitos ao longo da espessura crítica de uma camada depositada, que está compreendida entre 1 a 2 mm [20].

Microestrutura

A microestrutura complexa, que se deve ao gradiente de temperatura próprio do processo, pode dificultar, ou até comprometer, a interpretação dos resultados do ensaio por CI já que causa variações na condutividade elétrica do material.

Temperatura

Os desafios que a temperatura impõe ao ensaio por CI no contexto *inline* apresenta várias implicações. Por um lado, obriga as sondas a aptar sistemas de refrigeração, o que conduz a um aumento do *lift-off* para que seja possível a sua implementação. Paralelamente, as variações de temperatura no material podem afetar a condutividade elétrica do mesmo, comprometendo a fiabilidade dos resultados. O calor gerado pelo processo pode ainda causar uma expansão térmica no material, o que, mais uma vez, afeta diretamente o *lift-off*, o que não é desejável [20].

2.3.4 CONCEÇÃO DE SONDAS CI CUSTOMIZADAS PARA WAAM

Uma vez expostos os desafios e limitações que a inspeção *inline* do processo WAAM através do ensaio por CI apresenta, evidencia-se neste capítulo avanços feitos no sentido de mitigá-los, que passa essencialmente pela conceção de sondas customizadas.

A Figura 2.11 a) apresenta o IOnic Probe, que foi inicialmente concebido para detetar imperfeições ao longo de juntas resultantes de soldadura por fricção. Esta sonda consiste em duas bobinas de receção planares semiesféricas simétricas, que estão configuradas num modo de operação diferencial, com uma pequena separação entre estas onde se encontra a bobina de excitação. A sua operação diferencial visa a diminuir o ruído dos resultados proveniente de pequenas variações da condutividade da junta soldada, ao contrário do que sucede com sondas convencionais. Para além disso, o IOnic Probe demonstrou ser apto para a deteção de defeitos em diversas orientações e reduzir o efeito do *lift-off*. Adicionalmente, esta sonda permite a sua implementação por *printed circuit board* (PCB), tornando-se assim facilmente replicável e de baixo custo [49,50].

No entanto, perante os desafios que o WAAM apresenta, o IOnic Probe revelava-se insuficiente já que a curvatura das camadas depositadas face à geometria plana resultava num grande ruído proveniente do efeito de *lift-off*. Ademais, a rugosidade superficial das peças pode causar uma variação angular de *lift-off*, já que o substrato rígido de PCB pode criar um ângulo oblíquo entre a superfície e a sonda, levando a uma distância desigual entre as duas metades da bobina sensível da superfície. Nesse sentido, aplicou-se o mesmo princípio de operação das bobinas e desenvolveu-se uma sonda que se adapta à curvatura das camadas depositadas, ilustrada na Figura 2.11 b) [20].

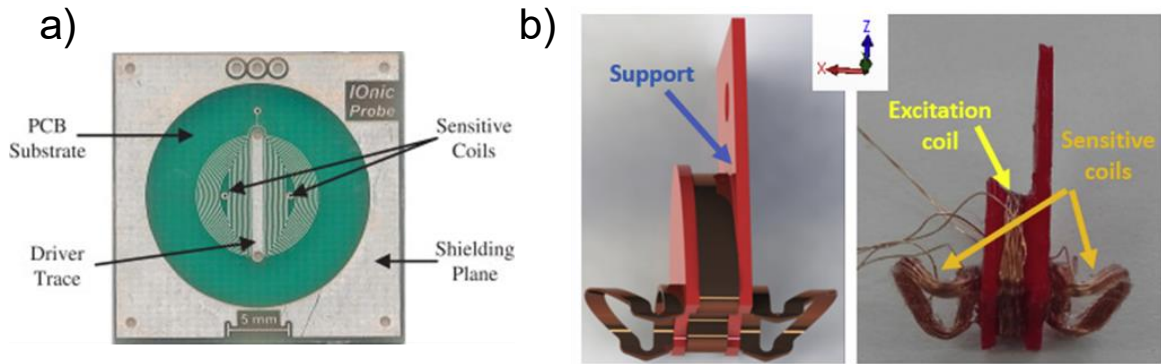


Figura 2.11 – IOnic Probe: (a) Planar em PCB; [49] (b) Customizado para WAAM [20]

O IOnic Probe adaptado à curvatura das camadas depositadas por WAAM mostrou resultados positivos, sendo capaz de detetar defeitos com 3 mm de diâmetro até 5 mm de profundidade sem *lift-off*. Ao aplicar um *lift-off* de 5 mm num novo ensaio, de modo a estudar a viabilidade de aplicação desta sonda em contexto *inline*, foi possível detetar um defeito de 3 mm a 2 mm de profundidade, revelando assim o seu potencial para a inspeção *inline* do processo WAAM [20].

Apesar das sondas customizadas manualmente concebidas mostrarem resultados promissores na deteção de defeitos, é de notar que a falta de repetibilidade e reprodutibilidade, aliadas à falta de precisão no processo de enrolamento, comprometem a precisão e sensibilidade das mesmas. Um modo de contornar os inconvenientes referidos é recorrer à tecnologia PCB, nomeadamente *multiple layer* PCB já que permite o aumento do número de enrolamentos nas bobinas sem ter de aumentar a área da sonda [44,51].

Nesse sentido, produziu-se uma sonda recorrendo à tecnologia *multiple layer* PCB usando um substrato flexível que permitisse a adaptação da mesma à curvatura característica das camadas depositadas, estando inserido num chassis flexível de poliuretano termoplástico (TPU). Para além disso, foi concebido um sistema autocompensante por meio de molas para garantir um contacto constante ao longo das camadas onduladas, reduzindo assim o *lift-off*. Pode ver-se o protótipo da sonda PCB e do respetivo chassis autocompensante na Figura 2.12 b) [44,52].

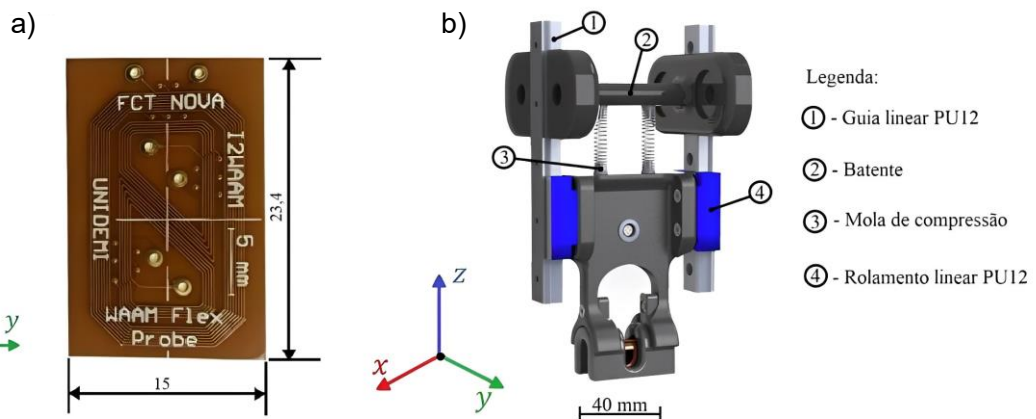


Figura 2.12 – Sonda WFP em PCB flexível: (a) configuração do PCB flexível; (b) Chassis autocompensante [52]

Foi também concebida uma sonda que inspeciona o fio consumível que permite a passagem do fio no seu interior, representada na **Figura 2.13 a)**. Esta revelou-se capaz de detetar três tipos de discontinuidades em seis fios de materiais diferentes, com diâmetros de 1 mm e 1,2 mm, sem que o *lift-off* provocasse ruído no sinal. No entanto, a presença de óxidos no fio de aço ER-70 comprometeu os resultados devido ao ruído excessivo, sendo necessário então proceder à limpeza do mesmo [52].

Assim surge o Engenho de Remoção de Óxidos e Impurezas (EROI) que, através do contacto físico entre as lâminas e a superfície do fio consumível, procede à limpeza superficial do mesmo [52]. Numa segunda iteração, aprimorou-se o método de aplicação de energia atrito cinético no fio, substituindo as lâminas existentes no EROI por escovas de palha de aço, dando lugar ao EROI V2, ilustrado na **Figura 2.13 b)** [53].

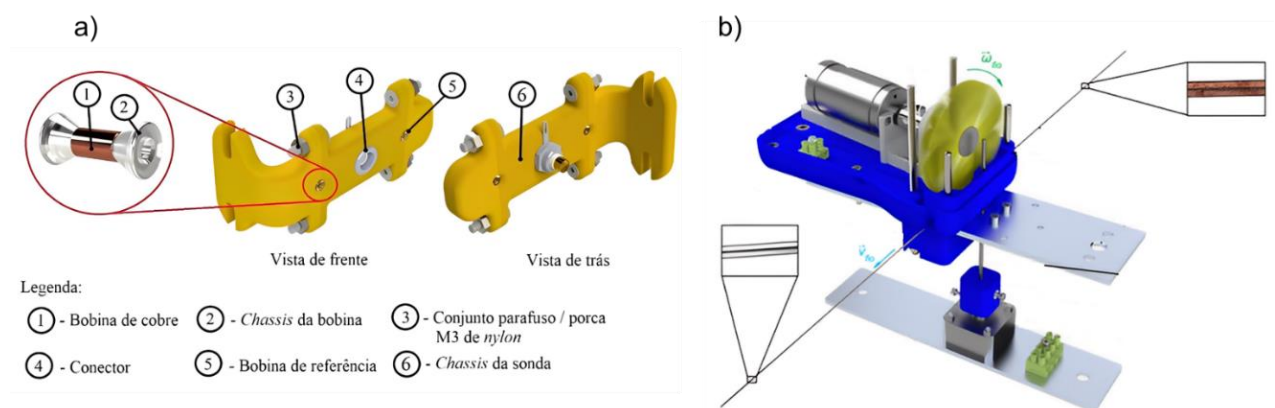


Figura 2.13 – Inspeção e limpeza do fio de soldadura: (a) Sonda de inspeção do fio consumível; [52] (b) EROI V2 [53]

3 CONCEÇÃO E COMPARAÇÃO DE SONDAS CI

Neste capítulo, apresenta-se uma análise e caracterização detalhada de uma sonda previamente desenvolvida e validada em estudos anteriores, a qual fez parte da metodologia experimental empregue nesta dissertação. Adicionalmente, expõe-se o processo de conceção, desenvolvimento e fabrico de uma segunda iteração da sonda supramencionada.

3.1 SONDAS DE INSPEÇÃO DO FIO CONSUMÍVEL

Para efetuar a inspeção do fio consumível, tanto no contexto *inline* como *offline*, recorre-se a duas sondas que apenas diferem no *lift-off* que apresentam: a sonda 1, já existente [52], e sonda 2, desenvolvida no âmbito desta dissertação.

A consideração de dois valores de *lift-off* diferentes neste estudo decorre da necessidade de otimizar a inspeção por CI num contexto *inline*, em que a utilização de *lift-off* mais elevados é geralmente preferível para evitar potenciais interferências no processo. No entanto, é igualmente importante avaliar se a utilização de *lift-off* elevados não comprometerá a qualidade da aquisição de sinais por parte das sondas, surgindo a necessidade de desenvolver a sonda 2. Por conseguinte, este estudo analisa a inspeção de fios utilizando ambas as sondas 1 e 2, a fim de efetuar uma análise abrangente dos efeitos do *lift-off* nas medições.

Relativamente ao modo de operação, as sondas 1 e 2 atuam no modo absoluto compensado, de modo a maximizar a relação sinal/ruído, e por isso são compostas por duas bobinas. Por uma das bobinas passará o fio consumível a inspecionar e, pela outra, coloca-se um fio consumível de referência do mesmo material e sem quaisquer sinais de oxidação ou presença de defeitos.

No que diz respeito aos parâmetros da sonda 1, representada na Figura 3.1, esta contém um *lift-off* de 0,25 mm e 50 espiras. Os enrolamentos foram viabilizados com um fio de cobre de 0,1 mm de diâmetro. Com base em trabalhos anteriores, infere-se que este número de enrolamentos do filamento de cobre permite um sinal com um ruído reduzido e tão satisfatório quanto a sonda com 75 espiras, logo, optou-se por manter este parâmetro inalterado aquando da conceção da nova sonda, mudando apenas o *lift-off* da mesma sendo este de 0,15 mm. Na Tabela 3.1 pode ver-se um esquema sumário dos parâmetros das sondas.

Tabela 3.1 – Parâmetros das sondas de inspeção do fio consumível

Sonda	Modelo CAD	Enrolamentos	Lift-off
1		50	0,25 mm
2		50	0,15 mm

Quanto à produção das sondas, os *chassis* destas foram obtidos por *Fused Deposition Modeling* (FDM) em *Polylactic Acid* (PLA), onde se insere um componente cilíndrico, o *chassis* da bobina, obtido por Estereolitografia (SLA), que atua como suporte para o filamento de cobre que será enrolado em torno do mesmo e por onde o fio consumível a inspecionar é guiado. Sendo esta uma sonda que atua em modo absoluto compensado, pode contar-se também com a bobina de referência integrada no *chassis* da sonda.

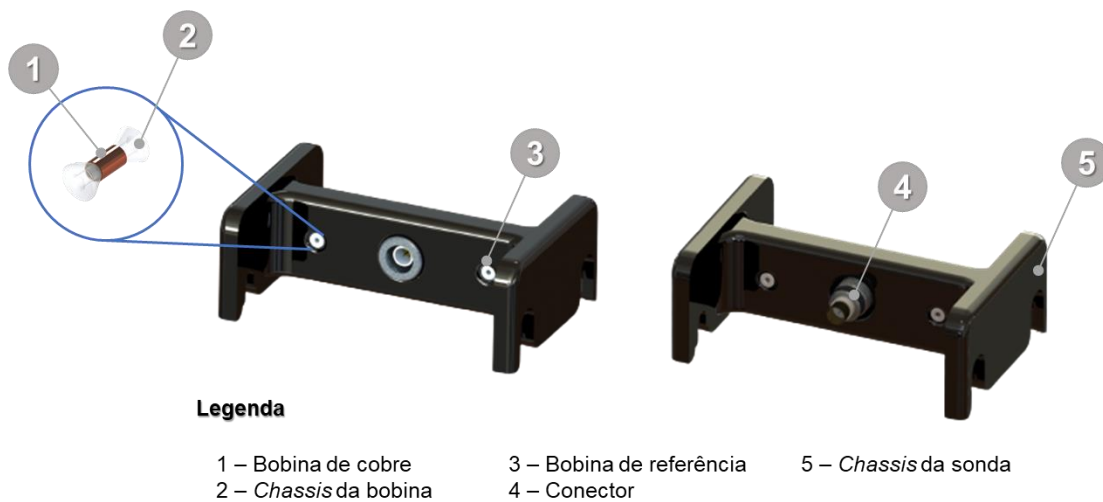


Figura 3.1 – Modelo CAD da sonda 2 e respetivos componentes

A sonda 2 manteve um aspeto semelhante ao da sonda existente já que a aplicação seria idêntica. Os fios de cobre que constituem as bobinas foram soldados a um conector LEMO de quatro pinos que permite a ligação a um leitor de impedância.

De acordo com a Equação 2.3, para o aço ER-70, pode determinar-se a frequência teórica ótima a empregar de acordo com a profundidade de inspeção que se pretende utilizar para o fio consumível de 1 mm de diâmetro. Na Tabela 3.2 pode ver-se os valores tidos em conta que resultam numa frequência ideal de 750 kHz.

Tabela 3.2 – Frequência teórica ótima de inspeção para a sonda de inspeção do fio de aço ER-70

Diâmetro do fio [mm]	Profundida desejada de inspeção [mm]	Permeabilidade Magnética μ [H/m]	Condutividade Elétrica σ [S/m]	Frequência [kHz]
1	0,5	$1,260 \times 10^{-4}$	$1,351 \times 10^6$	7,5

4 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O objetivo deste capítulo será descrever a abordagem metodológica empregue para obter resultados ao utilizar sondas na inspeção do fio consumível utilizado no processo WAAM, tanto no contexto *offline* como *inline*, bem como expor os preparativos necessários antes da realização dos ensaios experimentais. Simultaneamente, pretende-se com estes ensaios estabelecer uma relação entre a qualidade das paredes de WAAM e a qualidade superficial do fio consumível utilizado. Pode ver-se uma síntese do processo na Figura 4.1.

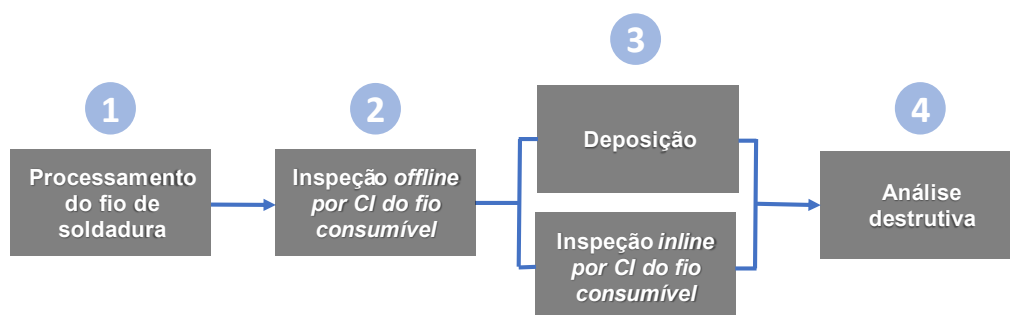


Figura 4.1 – Fases da metodologia experimental

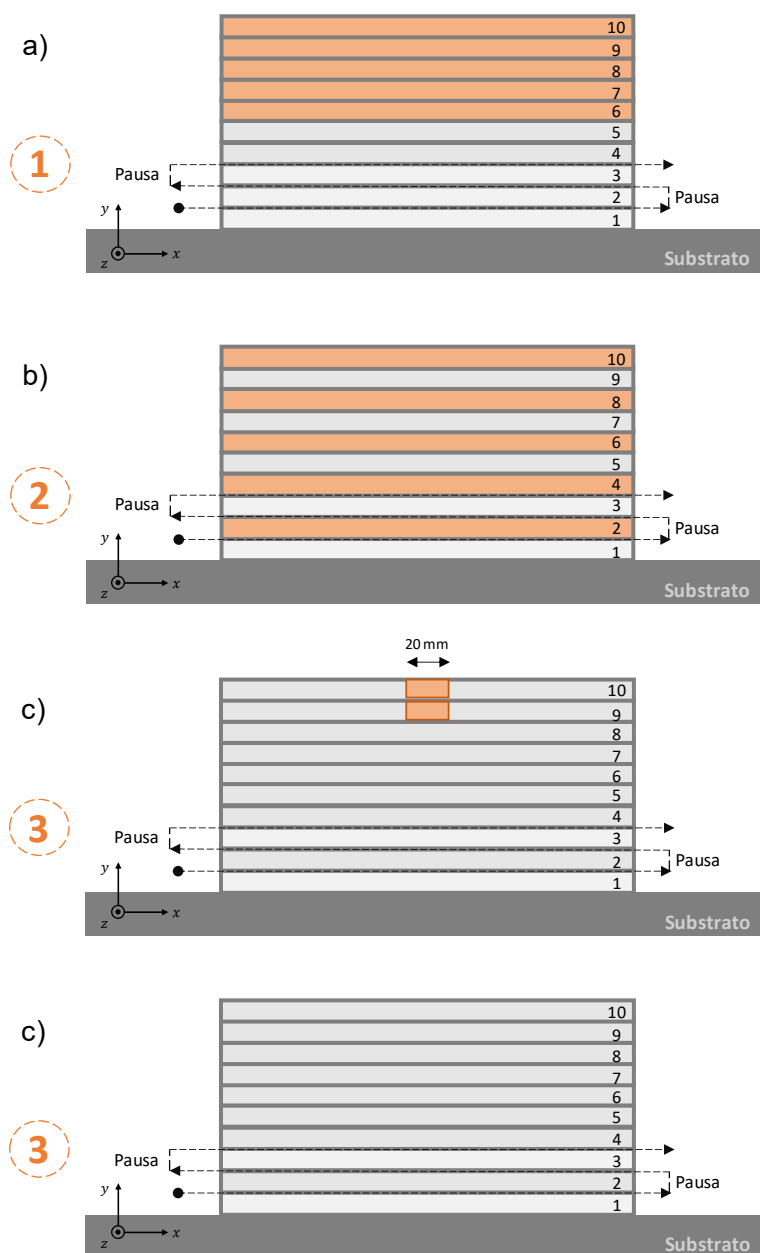
4.1 PROCESSAMENTO DO FIO CONSUMÍVEL

De modo a inferir acerca do impacto da qualidade superficial do fio consumível na peça final obtida por WAAM, estipularam-se três modalidades de ensaios, cujos parâmetros dimensionais das paredes de WAAM referentes a cada modalidade se encontram explícitos na Tabela 4.1. Adicionalmente, será fabricada uma parede de referência utilizando exclusivamente fio consumível não oxidado.

Tabela 4.1 – Parâmetros dimensionais das paredes WAAM para cada ensaio experimental

	ENSAIO 1	ENSAIO 2	ENSAIO 3
Comprimento da camada	92 mm	92 mm	92 mm
Número de camadas	10	10	10
Estratégia de deposição do fio oxidado	Metade do fio não oxidado seguido de metade do fio oxidado	Camadas alternadas de fio não oxidado e oxidado	Secções centrais de fio oxidado de 20 mm nas duas camadas do topo

Nos segmentos seguintes delinea-se a metodologia para a produção das secções oxidadas e não oxidadas ao longo do fio consumível. É necessário pré-estabelecer os parâmetros de soldadura referentes às velocidades de avanço da tocha e de alimentação do fio de modo a possibilitar o cálculo do comprimento de fio necessário para cada ensaio, bem como o comprimento das secções que estarão oxidadas. Para o efeito, considera-se uma velocidade de avanço da tocha, v_t [mm/s], de 6 mm/s e uma velocidade de alimentação do fio, v_f [m/min], de 3 m/min.



32

Assumindo que tanto o movimento da tocha como do fio consumível é uniforme, a Equação 3.1 permite determinar o tempo necessário para a deposição de uma camada, t [s], de um determinado comprimento, c [m], se se souber a velocidade constante que se emprega, v [m/s].

$$v = \frac{c}{t} \quad (3.1)$$

Começa-se por estimar o tempo necessário para a deposição de uma camada através da Equação 3.2, já que se sabe o seu comprimento, c_c [m], bem como a velocidade de avanço da tocha, v_t [mm/s].

$$v_t = \frac{c_c}{t} \leftrightarrow t = \frac{0,093}{0,006} \leftrightarrow t = 15,35 \text{ s} \quad (3.2)$$

Deste modo é possível obter uma aproximação do comprimento de fio necessário para a deposição de uma só camada de 92 mm, c_f [m], que se relaciona com o tempo de deposição de uma camada e com a velocidade de alimentação do fio, v_f [m/s], pela Equação 3.3.

$$v_f = \frac{c_f}{t} \leftrightarrow c_f = 15,35 \times \frac{3}{60} \leftrightarrow c_f = 0,775 \text{ m} \cong 0,78 \text{ m} \quad (3.3)$$

O comprimento do fio consumível necessário para cada ensaio, $c_{f_{total}}$ [m], vem dado pela Equação 3.4 onde se multiplica o comprimento de fio necessário para a deposição de uma camada pelo número total de camadas a realizar em cada ensaio.

$$c_{f_{total}} = 0,78 \times 10 = 7,8 \text{ m} \quad (3.4)$$

O EROI V2, como mencionado anteriormente, emprega o atrito cinético proveniente de escovas de palha de aço rotativas distribuídas por quatro unidades de limpeza (superior, inferior e duas laterais) para proceder à remoção de óxidos e impurezas que se encontrem na superfície do fio consumível que é guiado através dessas mesmas unidades. A Figura 4.3 representa o mencionado.

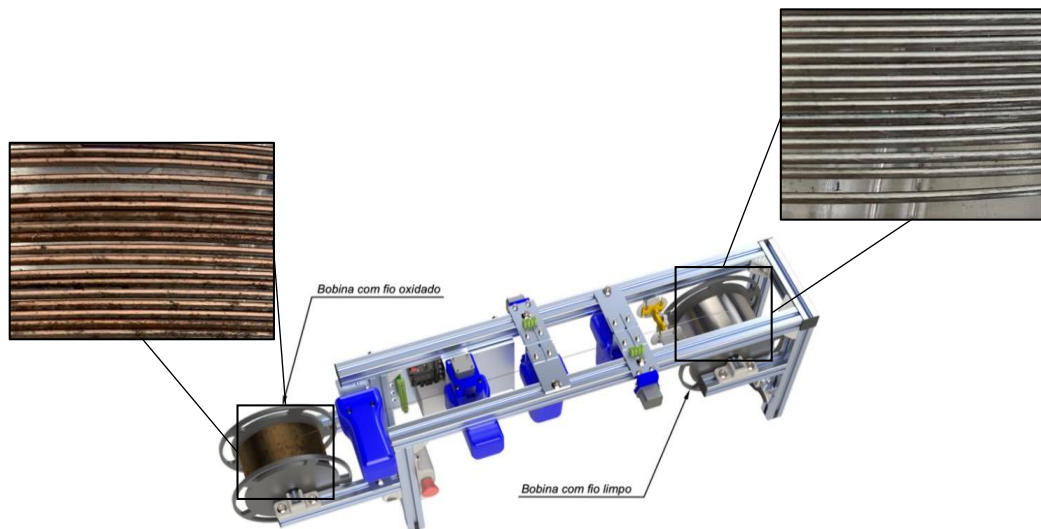


Figura 4.3 – Demonstração do funcionamento do EROI V2 numa bobina de fio oxidado

A produção de paredes de 92 mm é fundamentada na necessidade de controlar o número de secções do fio consumível dentro da mangueira da máquina de soldadura no âmbito da inspeção *inline*. Assim, adota-se um comprimento específico de fio para cada secção (0,78 m) que seja um múltiplo do comprimento total da mangueira (3,9 m).

Deste modo, começa-se por retirar o revestimento de cobre do fio consumível com o EROI V2 para que possa oxidar, durante uma semana, exposto ao ar atmosférico. Quando este se encontra totalmente oxidado, novamente com o auxílio do EROI V2, retiram-se os óxidos de segmentos bem definidos, tal como ilustra a Figura 4.4, onde o segmento cinza indica o fio consumível não oxidado, e o segmento laranja o oposto.

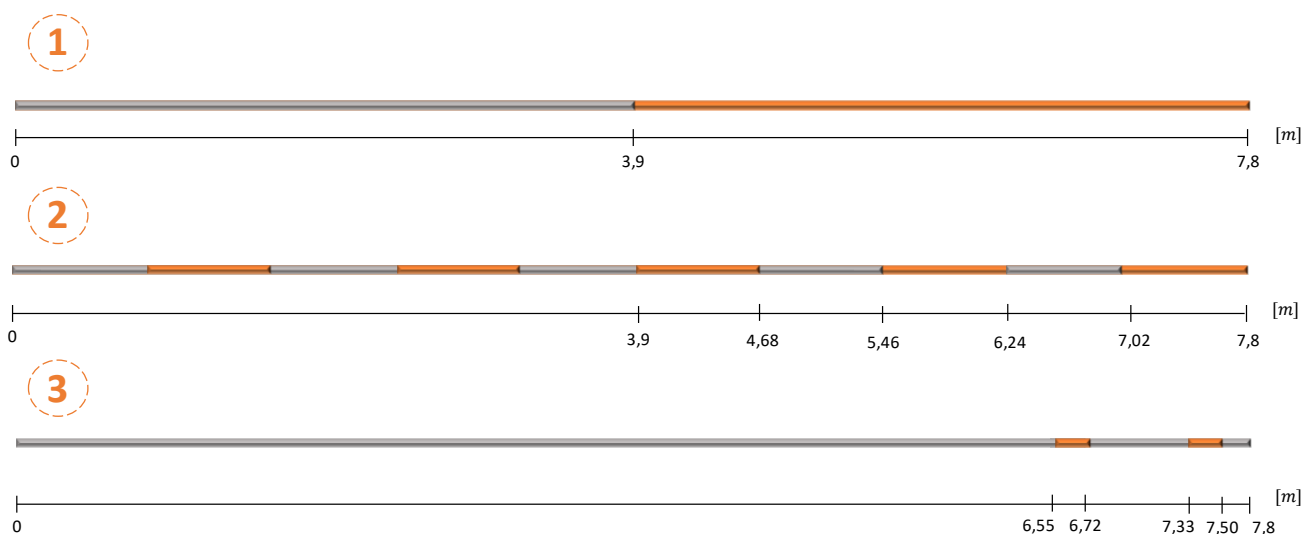


Figura 4.4 – Representação esquemática dos segmentos de fio consumível para cada modalidade de ensaio

É de salientar que devido à impossibilidade de depositar fio totalmente oxidado, já que a camada de óxidos presentes no fio consumível aumentam a resistência elétrica do material e, por consequência, é inexecutável estabelecer o arco elétrico necessário à deposição do material. Para contornar este inconveniente, foi necessário remover a camada de óxidos lateral das secções oxidadas manualmente com uma lixa P80, como representa a Figura 4.5. Assim, possibilita-se o contacto do fio não oxidado com o bocal da tocha de modo a estabelecer o arco elétrico.

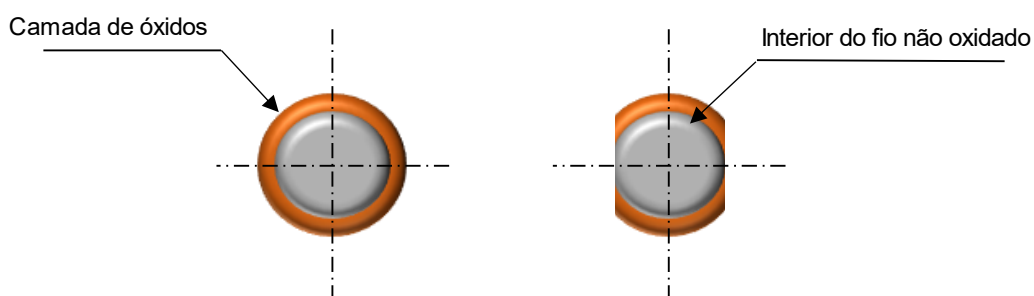


Figura 4.5 – Esquema da vista de corte da secção oxidada do fio consumível

4.2 INSPEÇÃO DO FIO CONSUMÍVEL *OFFLINE*

De modo a inferir acerca do desempenho das sondas 1 e 2 na inspeção do fio consumível, bem como concluir se a frequência teórica é adequada, estabelece-se o aparato ilustrado na Figura 4.6.

A sonda foi fixada a uma mesa triaxial através de uma guia linear que permite um movimento livre na direção vertical, o que viabiliza a translação da sonda a uma velocidade linear constante ao longo do fio consumível.

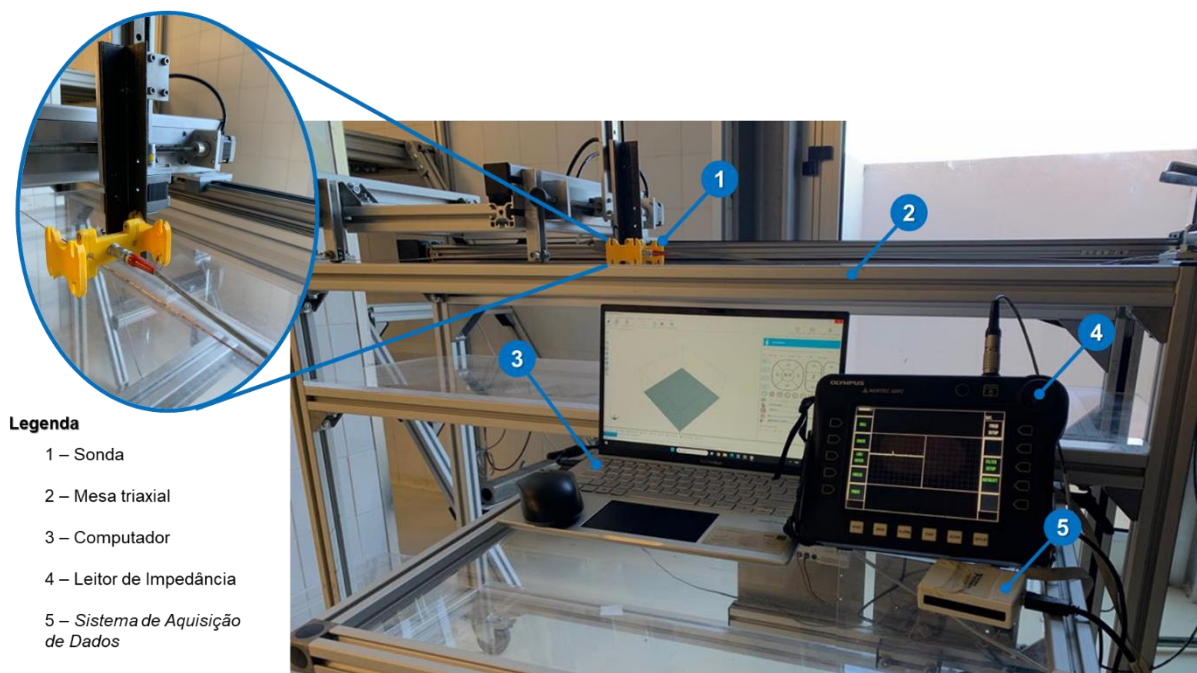


Figura 4.6 – Set up para a inspeção por CI do fio consumível *offline*

O primeiro passo no processo de aquisição de dados é a criação de um código G, que define o movimento da sonda em relação à mesa triaxial. Este código G é então enviado para o *software Repetier Host*, que o envia para os motores de passo da mesa triaxial através de uma ligação USB.

Neste momento, um sistema de aquisição de dados (DAQ) desenvolvido pela *National Instruments* é ativado por um sinal de ativação (*trigger*). O DAQ está preparado para registar todos os dados recolhidos durante o processo de ensaio. Em simultâneo, o leitor de impedâncias Nortec 500C, da *Olympus*, gera um sinal elétrico na sonda utilizada. Quaisquer variações na impedância causadas pela presença de óxidos são detetadas pelo leitor à medida que a sonda se desloca ao longo do fio a inspecionar.

Estas variações de impedância são depois transmitidas ao sistema DAQ, que as recolhe e envia para o computador através de uma ligação USB. Por fim, os dados obtidos são submetidos a um processo de análise e interpretação através do programa *LabVIEW*, permitindo a interpretação necessária e a obtenção dos resultados do estudo.

O segmento de fio consumível a inspecionar encontra-se representado na Figura 4.7, apresentando uma secção central oxidada de 150 mm. O fio foi processado de forma análoga aos fios de soldadura apresentados no capítulo 4.1.



Figura 4.7 – Esquema representativo do segmento de fio a inspecionar no ensaio por CI *offline*

4.3 FABRICO DAS PAREDES WAAM

Uma vez levado a cabo o processamento do fio consumível para cada um dos ensaios mencionados, procede-se ao fabrico das paredes de WAAM para posterior análise. As deposições foram levadas a cabo por uma máquina de soldadura Bester 215MP através de uma mesa triaxial de WAAM. As camadas foram sucessivamente depositadas num substrato de aço de dimensões 200 x 30 x 8 mm. Os parâmetros de soldadura utilizados encontram-se expressos na Tabela 4.2. Os diferentes ensaios foram conduzidos utilizando uma máquina de soldadura integrada numa plataforma automatizada, responsável pelo controlo do movimento da tocha e pela gestão dos parâmetros do processo previamente definidos pelo operador.

Tabela 4.2 – Parâmetros de soldadura indicados para os ensaios a realizar

Parâmetro	ENSAIO 1, 2 e 3
Trajeto da tocha	Zigzag
Tempo de espera entre camadas depositadas	Até a camada atingir 150 °C
Processo de soldadura	GMAW
Material	ER-70
Diâmetro do fio	1 mm
v_t [mm/s]	6
v_f [m/min]	3
Corrente [A]	82
Tensão [V]	19
Gás de proteção	Árgon (80%) e CO_2 (20%)
Caudal [L/min]	20
Distância entre a tocha e o substrato	8 mm

4.4 INSPEÇÃO DO FIO CONSUMÍVEL POR CI *INLINE*

Paralelamente à produção das paredes WAAM, foi acoplada à entrada de alimentação do fio para a mangueira da máquina de soldadura as sondas de inspeção do fio consumível, sonda 1 e sonda 2, de modo a inferir se estas detetam eficazmente o sinal proveniente das secções de fio oxidadas referentes ao Ensaio 2. O *set up* encontra-se ilustrado na Figura 4.8.



Figura 4.8 – *Set up* para a inspeção inline do fio consumível

A aquisição de dados dá-se de forma análoga à metodologia de aquisição expressa no capítulo 4.2, com a exceção de que neste aparato experimental o código G não só define o movimento da tocha em relação à mesa, mas também é responsável por estabelecer o arco elétrico. Assim que o arco é estabelecido e a deposição começa, o fio consumível é tracionado e guiado para alimentar o banho de fusão, e esse movimento tornará possível a inspeção descontínua do fio por parte da sonda, camada a camada. Assim, é o fio que se movimenta face à sonda, que se encontra estática.

Neste contexto, considerando o comprimento da mangueira da máquina de soldar de 3,90 m e a dimensão de 780 mm de cada troço de fio consumível utilizado para formar uma camada, pode inferir-se que, a partir do momento em que o fio consumível entra na mangueira e é tracionado até à tocha de soldadura, foram analisados cinco troços de fio correspondentes às cinco primeiras camadas da parede WAAM. Assim, devido a este *offset*, durante a deposição da primeira camada da parede, a secção de fio a ser efetivamente analisada está associada à sexta camada. A Figura 4.9 surge para simplificar o aparato descrito.

Assim, a inspeção *inline* do fio consumível no Ensaio 2 leva a dois modos de análise distintos. O primeiro é uma inspeção contínua dos cinco segmentos iniciais do fio, desde a entrada da mangueira da máquina de soldar até à tocha. Esta inspeção é realizada sem qualquer deposição a ocorrer em simultâneo. O segundo método consiste em cinco inspeções intermitentes dos cinco segmentos de fio restantes. A inspeção é realizada em simultâneo com a deposição.

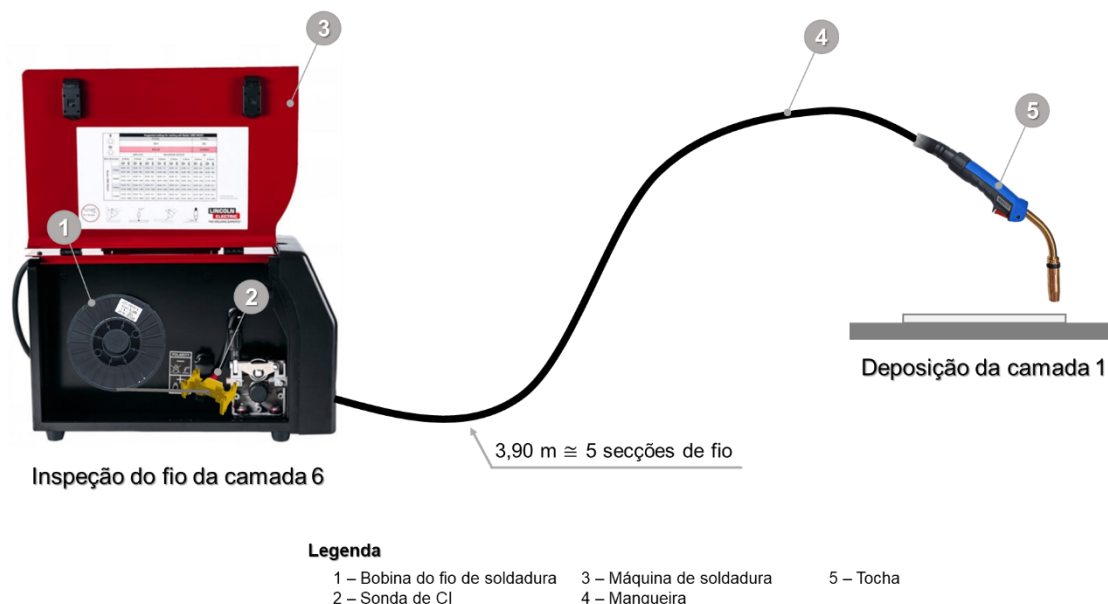


Figura 4.9 – Esquema simplificado do aparato da inspeção *inline* do fio consumível

4.5 ANÁLISE DESTRUTIVA

Neste estudo, foram efetuadas análises destrutivas com o objetivo de estabelecer uma correlação entre a qualidade interna da parede fabricada por WAAM e a qualidade da superfície do fio consumível utilizado na sua produção.

Procede-se a maquinar longitudinalmente com a fresa manual as paredes WAAM, de modo a revelar todo o seu interior, tendo-se maquinado até restarem 3 mm de espessura.

Para além da inspeção visual do interior das paredes fabricadas, levou-se a cabo uma análise metalográfica da secção longitudinal integral das paredes. Este método implicou etapas que envolvem o corte das extremidades da parede, seguido de imersão num molde de resina, posterior polimento e, finalmente, a aplicação de um ataque químico (Nital 3%) para revelar as interfaces de interesse, nomeadamente as interfaces entre as camadas depositadas. A visualização das macrografias foi levada a cabo pelo microscópio ótico. Através deste procedimento, será possível identificar potenciais imperfeições, como poros e vazios, que podem estar relacionados com a utilização de fio consumível oxidado.

5 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

5.1 INSPEÇÃO DO FIO CONSUMÍVEL *OFFLINE*

Na Figura 5.1 estão representados os dois ensaios sobrepostos referentes à inspeção de um segmento de 650 mm do fio consumível do aço ER-70 que possui uma secção central de 150 mm oxidada, entre a posição 250 mm e 400 mm. Os ensaios foram realizados a 750 kHz com o mesmo ganho de 75 dB.

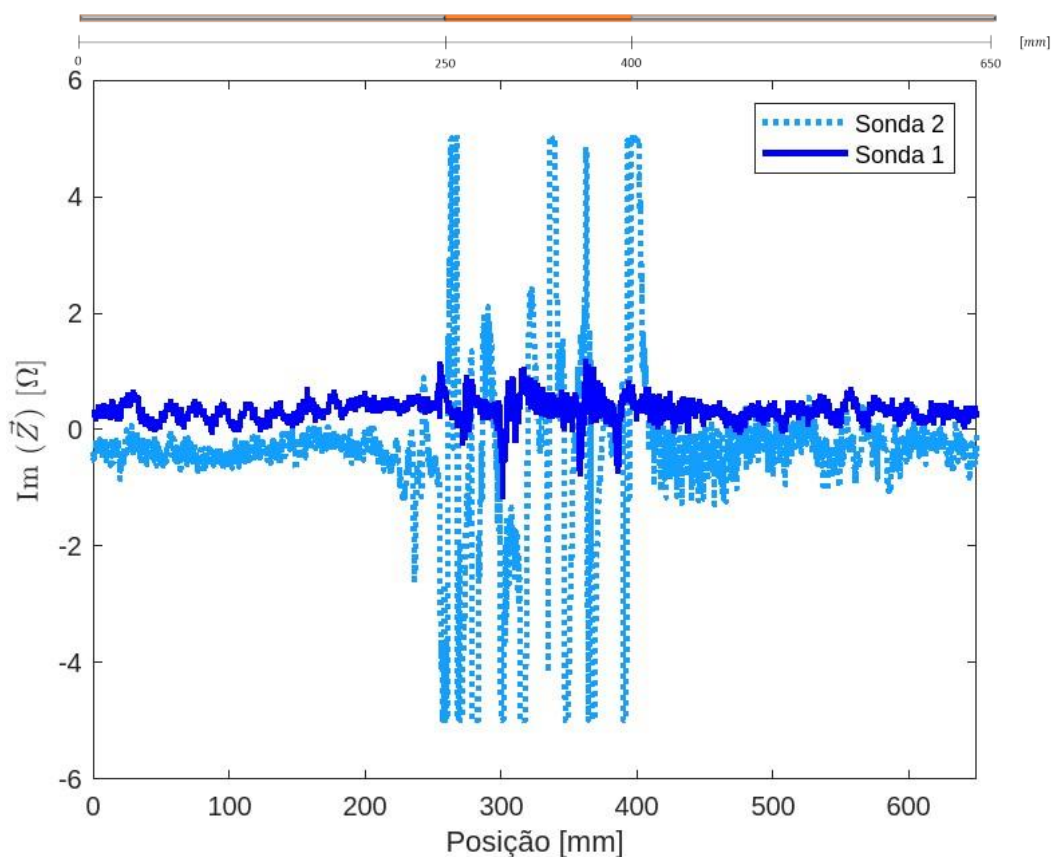


Figura 5.1 – Resultados obtidos para o ensaio da inspeção offline do fio consumível de ER-70 para as sondas 1 e 2 a $f = 7,5$ kHz

Relativamente à sonda 2, pode concluir-se que a variação da impedância correspondente ao segmento central de fio oxidado é notável e tem uma relação sinal/ruído significativamente elevada, o que confirma a eficácia desta sonda. No entanto, a sonda 1 apresenta uma deteção menos precisa do mesmo segmento. Esta limitação pode ser atribuída à disparidade dos valores de *lift-off* entre as duas sondas, sendo que a sonda 1 apresenta um valor superior ao da sonda 2. É de salientar que as flutuações que se verificam no sinal correspondente à secção oxidada se devem ao facto de que a oxidação presente no fio não é uniforme.

5.2 PAREDES PRODUZIDAS POR WAAM

Esta secção apresenta as paredes produzidas de acordo com os ensaios descritos no capítulo 4.1, com o objetivo de determinar o impacto da qualidade da superfície do fio consumível na qualidade das superfícies das paredes WAAM.

A Figura 5.2 revela a parede resultante do ensaio referência, que foi produzida com fio consumível desprovido de óxidos e de revestimento de cobre. O processo deu-se sem extinções do arco elétrico, o que contribui para a estabilidade do processo e resulta numa parede sem ondulações laterais ou superficiais.



Figura 5.2 – Parede WAAM referente ao Ensaio de Referência

Ensaio 1

Na Figura 5.3 apresenta-se a parede referente ao Ensaio 1, onde existem 5 camadas produzidas com fio limpo seguidas de 5 camadas produzidas com fio oxidado. Pode observar-se a presença de ondulações pronunciadas, tanto lateralmente como na superfície da parede impressa. Estas ondulações podem ser atribuídas a diversas causas, tais como variações na taxa de deposição do material, desalinhamentos nas camadas ou instabilidades no processo de fusão do metal.

Todas estas causas estão intimamente relacionadas com a dificuldade em formar e manter o arco elétrico devido à utilização de fio oxidado, o que, por sua vez, tem impacto na deposição de material. A oxidação da superfície do fio pode dificultar a condução elétrica e a transferência adequada do metal de adição, resultando numa deposição irregular. Além disso, a presença de

óxidos no banho de fusão pode afetar a fluidez do metal, contribuindo para uma deposição menos controlada. Assim, a interação destes fatores, surge como uma possível explicação para as ondulações observadas.



Figura 5.3 – Parede WAAM referente ao Ensaio 1

Ensaio 2

Relativamente à parede resultante do Ensaio 2, onde as camadas foram produzidas alternando a utilização de fio consumível não oxidado e de fio consumível oxidado, ao contrário do cenário anterior, esta parede apresentou uma quantidade substancialmente reduzida de ondulação e uma boa adesão ao material base, corroborado pela Figura 5.4.

Estas observações podem ser atribuídas a várias causas. A alternância entre fio não oxidado e oxidado pode ter contribuído para uma maior estabilidade na formação do arco elétrico durante o processo de soldadura, resultando numa deposição mais uniforme do material. O fio consumível não oxidado pode ter ajudado a ultrapassar as barreiras criadas pelos óxidos presentes no fio oxidado, permitindo uma melhor condução elétrica e uma transferência de metal de soldadura mais consistente. Além disso, a alternância pode ter proporcionado uma distribuição mais equitativa do calor e da fluidez no banho de fusão, resultando numa deposição controlada. Portanto, a intercalação estratégica de fio não oxidado entre camadas de fio oxidado surge como uma possível explicação para a redução das ondulações e a ausência de porosidades observadas nesta parede WAAM.

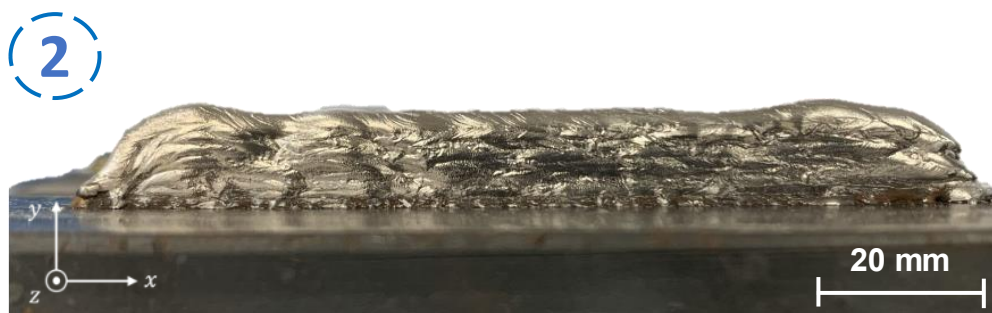


Figura 5.4 – Parede WAAM referente ao Ensaio 2

Ensaio 3

Várias hipóteses podem ser propostas para explicar as ondulações observadas na parede produzida por WAAM durante o Ensaio 3 (Figura 5.5). A principal e mais crucial diz respeito às repetidas paragens na deposição que ocorreram como resultado da extinção do arco elétrico. Embora o ensaio 3 tenha sido realizado sobretudo com fio não oxidado, com apenas uma secção central de 20 mm nas duas camadas superiores, por ser o último ensaio realizado, existe a suspeita de que as poeiras das secções oxidadas, provenientes dos ensaios anteriores, possam ter ficado retidas no *chassis* da bobina da sonda de CI que guia o fio consumível. Assim, uma vez que grandes quantidades de fio oxidado já passaram pela sonda nos ensaios 1 e 2, é possível que o fio do ensaio 3 estivesse contaminado quando passou pela sonda no momento da inspeção. Importa clarificar que a sonda 1 foi mantida em posição de inspeção *inline* durante a totalidade dos ensaios, embora tenha adquirido dados somente para o Ensaio 2.

Outra possível explicação reside na remoção do revestimento de cobre do fio consumível utilizado, o que pode dificultar o estabelecimento do arco elétrico. Além disso, a utilização do EROI não garante a completa remoção dos óxidos presentes no fio consumível, levantando questões sobre a eficácia da limpeza das seções do fio que deveriam estar desprovidas de óxidos. No entanto, é de notar que estas últimas duas hipóteses também seriam válidas para os ensaios 1 e 2, que apresentam uma qualidade superficial superior, apesar de serem produzidos com uma quantidade significativamente superior de fio oxidado.

Portanto, a qualidade deficiente da superfície da parede do Ensaio 3 pode ser atribuída à falta de repetibilidade do processo WAAM. A repetibilidade de um processo de fabrico refere-se à capacidade desse processo produzir resultados consistentes e próximos uns dos outros quando repetido várias vezes sob as mesmas condições. Neste sentido, pode-se concluir que o processo de WAAM utilizando os equipamentos disponíveis não pode ser considerado um processo de fabrico de alta repetibilidade. Isto é evidenciado pelo facto de, por exemplo, a parede de referência e a parede do Ensaio 3 apresentarem uma diferença mínima na quantidade de fio oxidado utilizado, diferença essa que só existe nas duas últimas camadas. No entanto, apesar da semelhança na quantidade de material não oxidado usado, estas duas paredes resultam em acabamentos superficiais drasticamente diferentes.



Figura 5.5 – Parede WAAM referente ao Ensaio 3

5.3 INSPEÇÃO DO FIO CONSUMÍVEL *INLINE*

5.3.1 SONDA 1

A Figura 5.6 apresenta um diagrama que compila os resultados da inspeção CI do fio consumível *inline* levados a cabo pela Sonda 1. O gráfico inferior ilustra os resultados da inspeção dos segmentos de fio que se alinham com as cinco camadas iniciais da parede WAAM. Esta avaliação foi conduzida enquanto o fio consumível era continuamente tracionado desde a entrada da mangueira da máquina de soldadura até à tocha. É importante notar que, durante este intervalo, a inspeção e a deposição do fio não ocorreram em simultâneo. Foi utilizado um ganho de 70 dB.

O gráfico superior apresenta os resultados da análise das restantes cinco camadas. Estas foram avaliadas individualmente e em simultâneo com a deposição. Durante a deposição da primeira camada, o fio que dará origem à sexta camada é examinado. Isto deve-se ao facto da mangueira que conduz o fio desde a bobina, localizada dentro do equipamento de soldadura (onde se encontra a sonda) para o banho de fusão ter um comprimento que corresponde a cinco segmentos bem definidos de fio consumível, que darão origem a 5 camadas.

No que diz respeito ao sinal obtido na inspeção das cinco primeiras camadas, é difícil detetar nitidamente as secções oxidadas. Para além da pobre relação sinal/ruído, foram identificados picos no sinal em praticamente todas as secções, à exceção da camada 4.

No que diz respeito ao sinal obtido na inspeção das restantes camadas, observou-se que o nível de ruído se manteve aproximadamente inalterado tanto nas camadas oxidadas como nas não oxidadas, sendo este significativo. Este facto impossibilitou novamente a diferenciação entre as camadas feitas com fio oxidado e com fio limpo com base nestes resultados. De forma análoga ao gráfico anterior, foram identificados picos no sinal, com maior concentração nas camadas 6 e 7.

Na camada 9, observou-se que o sinal estabilizou após o pico. Tal deveu-se à extinção do arco elétrico e, consequentemente, à interrupção do movimento do fio através da sonda.

Durante a deposição da décima camada, o arco elétrico extinguiu-se no início da operação. Após uma segunda tentativa, a deposição foi concluída com sucesso; no entanto, o arco elétrico permaneceu instável, levando a uma redução significativa do fluxo de material depositado. Esta ocorrência teve um papel crucial no ruído reduzido do sinal obtido durante a inspeção da décima camada.

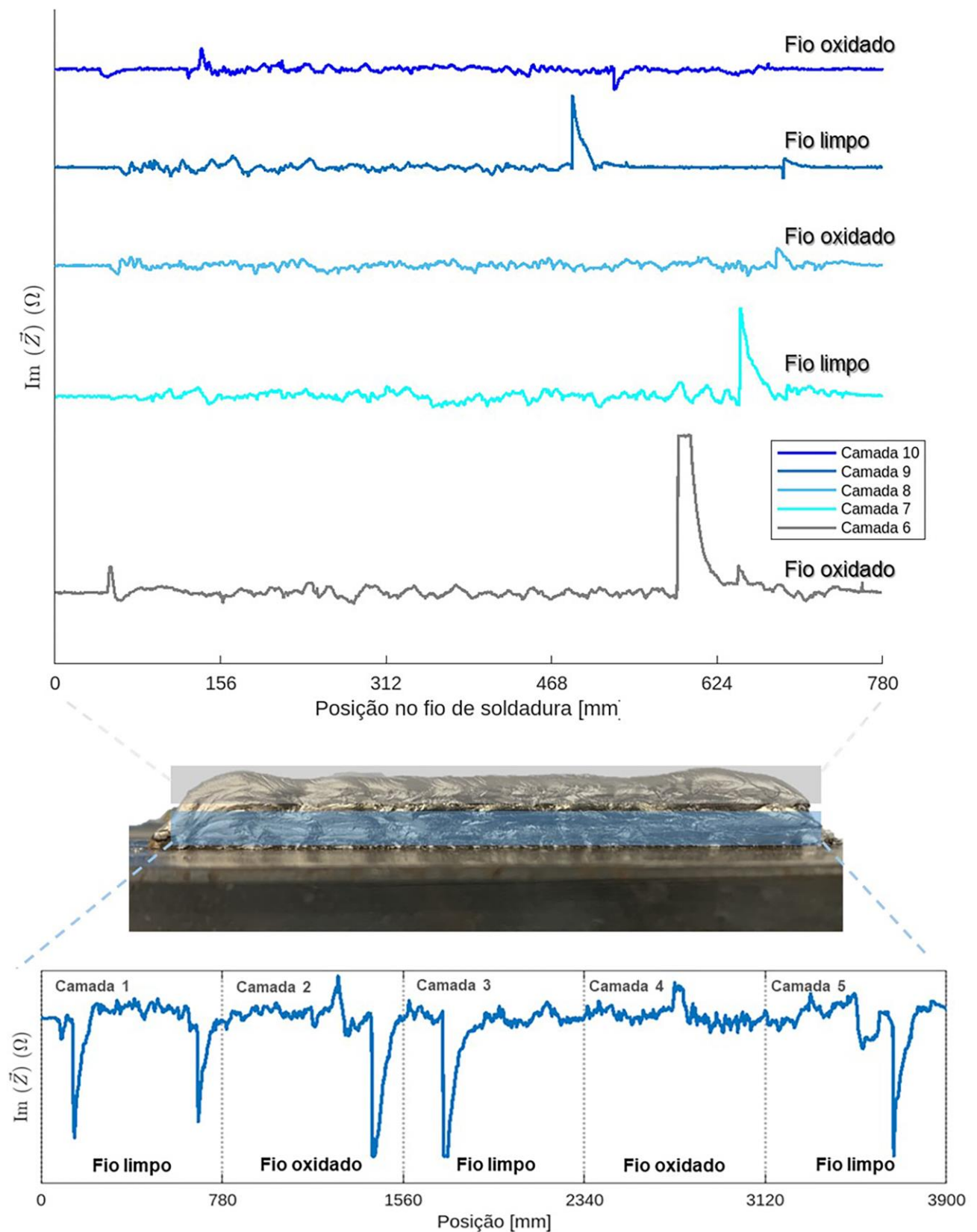


Figura 5.6 – Resultados obtidos para ensaio da inspeção *inline* do fio consumível de ER-70 para a sonda 1 a $f = 7,5$ kHz

A razão subjacente à existência de picos no sinal pode ser atribuída à interação entre a rotação da bobina, provocada pela tração exercida pelo sistema de alimentação da máquina de soldar, resultando num impedimento ao deslocamento linear contínuo do fio através da sonda de CI. Este fenómeno resulta numa lacuna no percurso do fio, combinada com o substancial *lift-off* presente na sonda, que provoca oscilações no posicionamento do fio e resulta em variações constantes da distância entre o fio e a sonda ao longo da inspeção, inviabilizando a aquisição de um sinal com ruído reduzido.

Ademais, é necessário esclarecer a diferença no número superior de ocorrências de picos entre o fio inspecionado continuamente para as primeiras cinco camadas e o fio inspecionado individualmente para as cinco camadas subsequentes. Durante o primeiro cenário, é o sistema de tração da máquina de soldar que traciona o fio a uma velocidade pré-definida pela máquina de soldadura. Em contraste, durante o segundo cenário, o fio é puxado a uma velocidade menor, a velocidade de alimentação do fio, à medida que é introduzido no banho de fusão. Visto que o fio utilizado nos ensaios realizados foi enrolado manualmente na bobina inserida no equipamento de soldadura devido à utilização do EROI e ao processamento que foi necessário efetuar, o seu desenrolamento é mais irregular e descontrolado em comparação a uma bobina enrolada industrialmente. Consequentemente, esta ocorrência agrava-se se a velocidade de tração do fio aumenta, justificando assim o maior número de picos na inspeção do fio das primeiras cinco camadas.

Em contrapartida, uma hipótese que surge para explicar o ruído existente em todo o sinal obtido é que, durante o ensaio, verificou-se que, com a continuação da utilização da sonda, o orifício através do qual o fio consumível é guiado começou a ser preenchido com partículas de óxidos. Isto pode resultar numa redução da sensibilidade de deteção da sonda, particularmente ao inspecionar secções de fio não oxidado.

5.3.2 SONDA 2

A Figura 5.7 apresenta os resultados da sonda 2 nos moldes análogos apresentados para a sonda 1, utilizando um ganho de 70 dB. Na inspeção das cinco primeiras camadas, observamos um nível significativo de ruído no sinal, impossibilitando a identificação das secções oxidadas e não oxidadas. Na inspeção das cinco camadas subsequentes (gráfico superior), novamente o ruído no sinal impede qualquer distinção entre secções oxidadas e não oxidadas.

Ao contrário da sonda 1, não foram encontrados picos atribuíveis a oscilações do fio no interior do *chassis* da bobina da sonda, já que o *lift-off* inferior da sonda 2 constringe esse movimento; no entanto, a rotação da bobina continua a ser um fator passível de destabilizar os dados já que, mesmo havendo uma margem menor para que a posição do fio oscile face ao *chassis* da bobina.

Todavia, no caso da sonda 2, devido ao seu menor *lift-off*, existe a possibilidade de que essa proximidade possa resultar numa ação abrasiva capaz de remover óxidos presentes no fio. Portanto, além da potencial acumulação de óxidos na entrada do *chassis*, também se observa a perda de parte dos óxidos originalmente presentes no fio consumível, impossibilitando novamente a sua detecção.

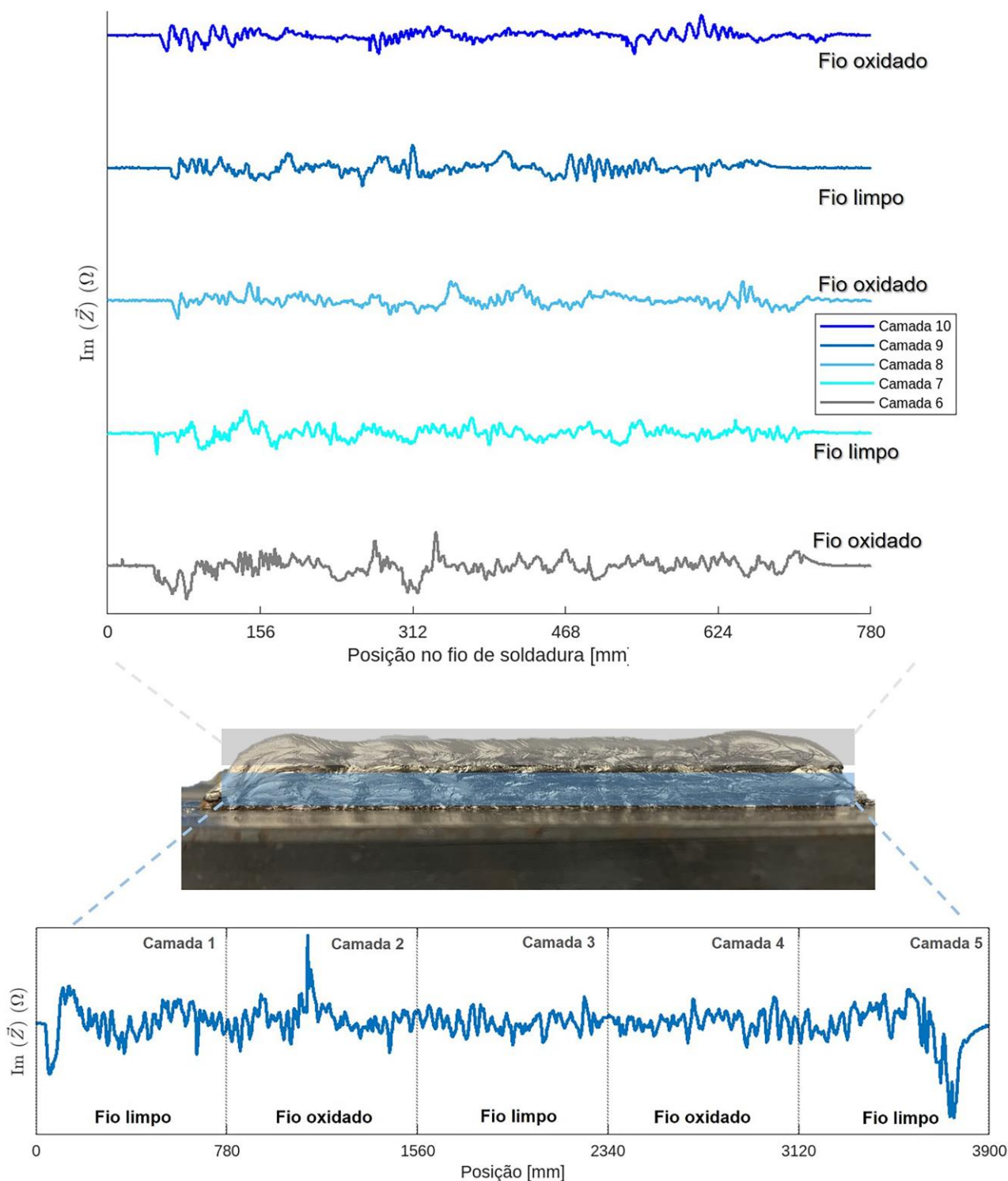


Figura 5.7 – Resultados obtidos para ensaio da inspeção *inline* do fio consumível de ER-70 para a sonda 2 a $f = 7,5$ kHz

Ao contrário do ensaio anterior, apesar de todos os parâmetros e condições serem idênticas, o ensaio que resultou nesta inspeção não sofreu qualquer paragem por extinção do arco elétrico, o que resulta em maiores oscilações no sinal face aos resultados da sonda 1, já que neste caso o movimento do fio face à sonda nunca esteve comprometido.

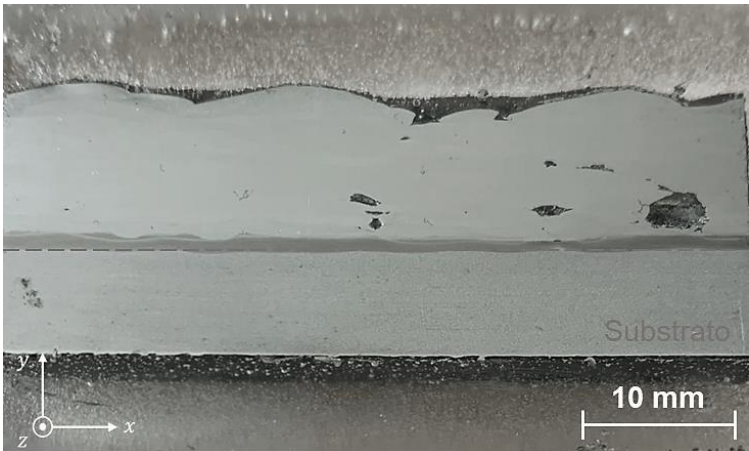
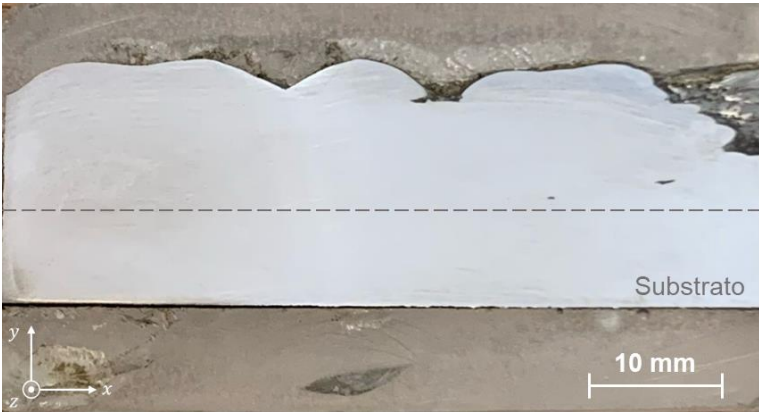
5.4 ANÁLISE DESTRUTIVA

Independentemente do aspeto exterior das paredes, é fundamental avaliar a sua integridade interna na tentativa de se estabelecer uma relação entre a utilização de fio consumível oxidado e as implicações que tal acarreta para a qualidade interna das mesmas.

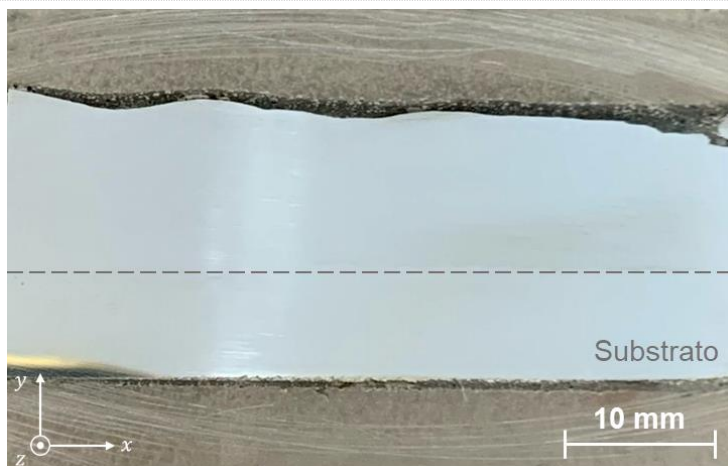
5.4.1 INSPEÇÃO VISUAL

A Tabela 5.1 condensa as figuras das secções longitudinais das paredes após o processo de fresagem, deixando apenas uma espessura de 3 mm. São apresentadas observações sobre as suas características internas.

Tabela 5.1 – Cortes longitudinais das paredes WAAM após fresagem

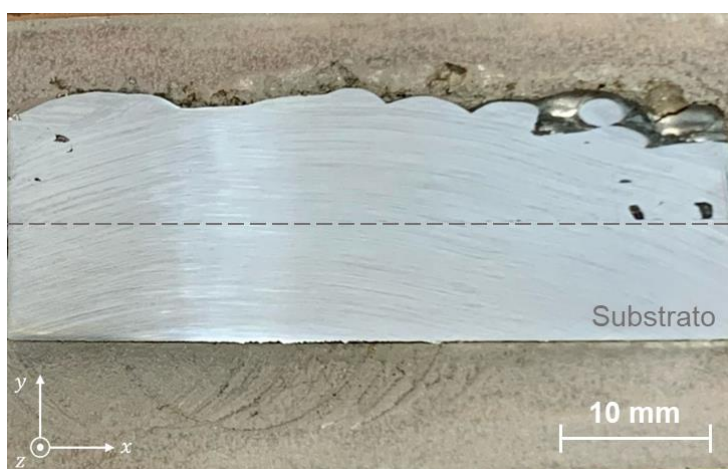
ENSAIO	PAREDE	OBSERVAÇÕES
REF		Identificam-se inúmeros vazios tanto na proximidade da interface com o material base, como na interface de camadas, concentrando-se principalmente na metade direita da amostra. A maior descontinuidade apresenta cerca de 4 mm de comprimento;
1		Apenas são observáveis dois vazios perto da interface com o substrato e aproximadamente na interface entre a primeira e a segunda camada;

2



Sendo esta parede resultado de uma deposição de material contínua e uniforme, consequência de um arco elétrico estável, não apresenta quaisquer discontinuidades observáveis a olho nu;

3



Apresenta alguns vazios identificáveis a olho nu, sendo que os de maior dimensão se concentram na interface com o substrato, resultado de uma fusão ineficiente do material de adição ao material base. São visíveis marcas curvilíneas da fresa.

5.4.2 ANÁLISE METALGRÁFICA

Para a análise metalográfica, procedeu-se à captura de macrografias nas secções estipuladas na Figura 5.8 em todas as paredes produzidas.

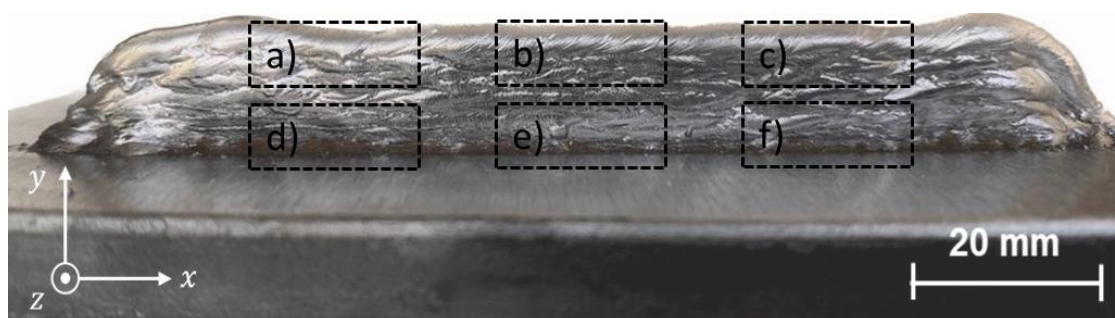


Figura 5.8 – Secções capturadas nas macrografias

Tal como indicava a análise visual, a parede de referência revela a presença de alguns vazios visíveis, principalmente na superfície de contacto com o substrato, como corrobora a Figura 5.9. No entanto, não foi identificada nenhuma porosidade significativa. É também possível observar a presença de grãos colunares na camada superior, uma característica própria do processo WAAM, resultante da direção do fluxo de calor.

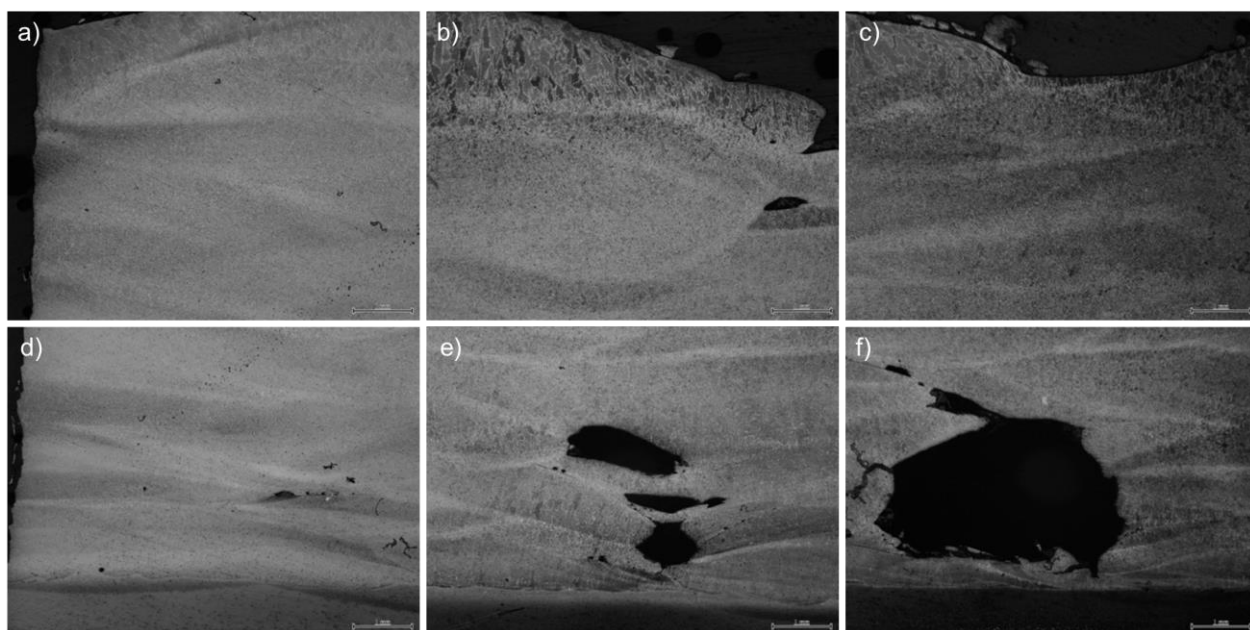


Figura 5.9 – Macrografias referentes à parede WAAM do Ensaio Referência

Na parede resultante do Ensaio 1, onde as primeiras cinco camadas foram produzidas com fio consumível não oxidado, e as cinco camadas subsequentes foram produzidas com fio oxidado, seria de esperar que as macrografias, apresentadas na Figura 5.10, expusessem que as porosidades se concentram essencialmente na metade superior da parede, o que não se verifica. No entanto, é evidente que face à parede de referência se verificam mais porosidades.

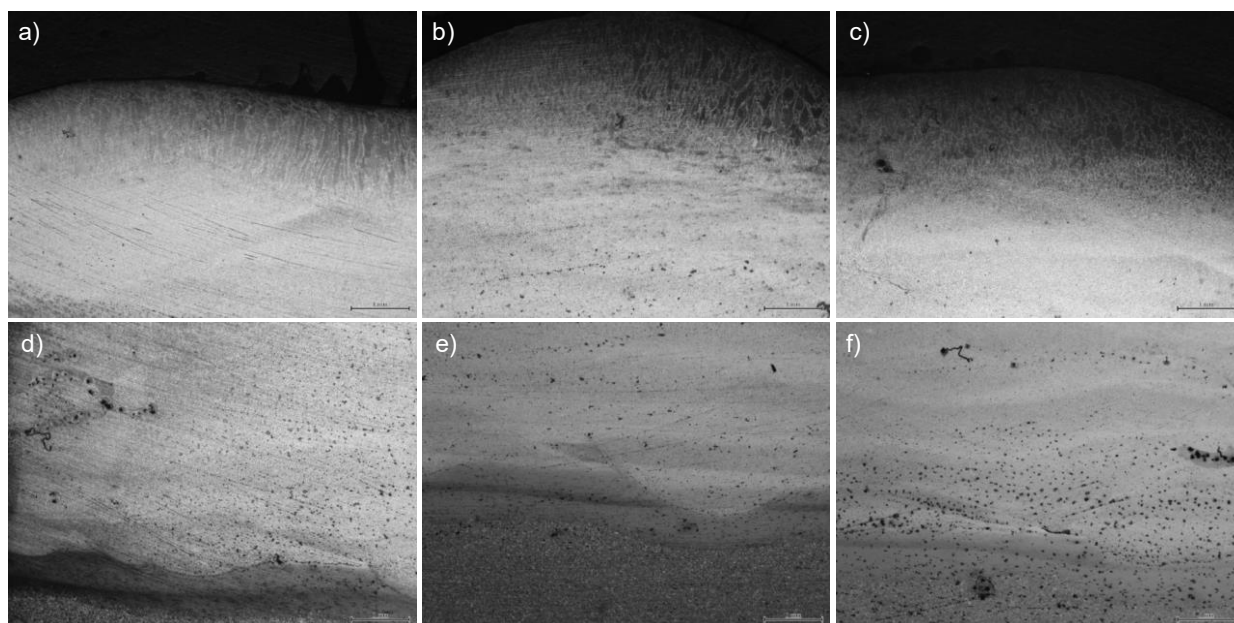


Figura 5.10 – Macrografias referentes à parede WAAM do Ensaio 1

Relativamente às macrografias da parede do Ensaio 2, expostas na Figura 5.11, onde se depositavam alternadamente camadas de fio não oxidado e oxidado, são visíveis porosidades, no entanto, menos expressivas quando contrapostas com as porosidades observáveis na Figura 5.10 referente à parede do Ensaio 1.

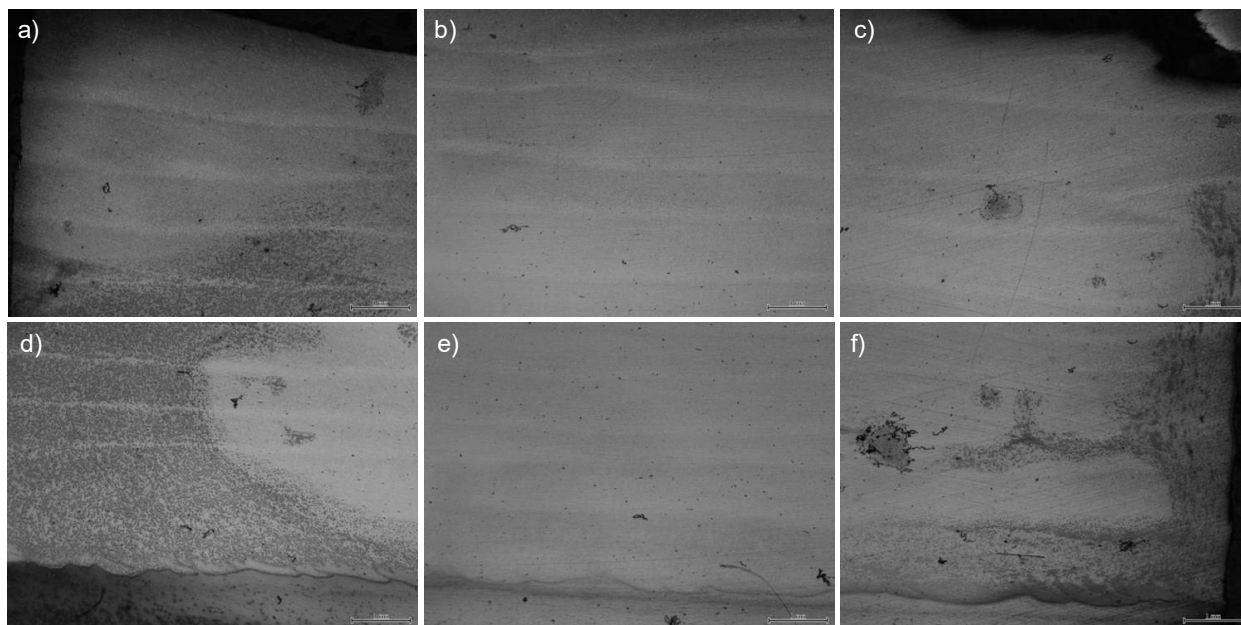


Figura 5.11 – Macrografias referentes à parede WAAM do Ensaio 2

Na Figura 5.12 expõe-se as macrografias da parede do Ensaio 3, evidenciando que as porosidades se concentram na secção central da parede, sendo consideravelmente menos frequentes nas laterais. É importante referir que o Ensaio 3 compreende, em teoria, uma secção central de 20 mm de fio oxidado nas camadas 9 e 10. No entanto, a existência destes troços oxidados só poderia explicar o aparecimento de porosidades na região central superior da parede, mas não na base.

Mediante o exposto, não é possível estabelecer uma correspondência direta entre as estratégias de deposição realizadas e a macrografia resultante do material. Pensa-se que os cálculos efetuados para planejar a estratégia de deposição das zonas oxidadas e não oxidadas sejam essencialmente teóricos. Questões como a baixa condutividade elétrica do material devido ao seu estado oxidado podem influenciar a precisão destes cálculos. Mesmo quando são definidos parâmetros como a velocidade de alimentação do fio consumível e a velocidade de avanço da tocha, e são feitos cálculos para relacionar as secções do fio consumível com as camadas efetivamente depositadas, isto só pode ser válido em condições ideais, quando o fio não está oxidado e o fluxo de material depositado é aproximadamente uniforme.

Portanto, a presença de porosidades em áreas da parede desprovidas de fio oxidado pode ser atribuída a flutuações na velocidade de deposição do material de adição ao longo do processo graças à condição exterior do mesmo. Estas flutuações podem resultar em disparidades na fusão do material, culminando na formação destas porosidades.

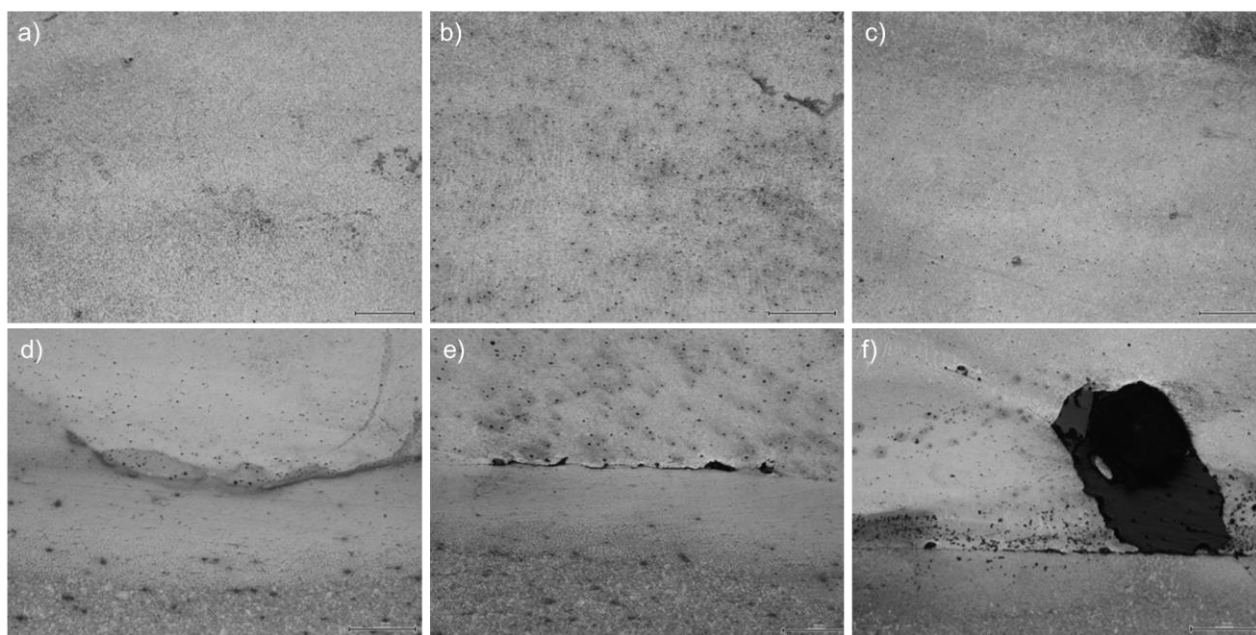


Figura 5.12 – Macrografias referentes à parede WAAM do Ensaio 3

Para inferir acerca da questão da repetibilidade do processo, foram depositados 6 cordões com fio oxidado, com o código G concebido para depositar ao longo de 92 mm de comprimento, à semelhança dos ensaios levados a cabo. Como resultado, foram necessários comprimentos de fio menores do que aqueles estimados nos cálculos do capítulo 4.1. Verificou-se que, para o mesmo código, destinado a produzir um cordão de 92 mm, foram gerados dois cordões de 89 mm, incorrendo em consumos divergentes de fio consumível: 500 mm e 730 mm. Para além disso, os cordões obtidos não apresentam consistência no seu comprimento. A Tabela 5.2 ilustra o mencionado.

Tabela 5.2 – Comprimento do cordão obtido e respetivo comprimento de fio consumível utilizado

Comprimento do cordão obtido [mm]	Fio consumível consumido [mm]
82	500
84	580
85	620
88	600
89	580
89	730

Assim torna-se claro que a repetibilidade do processo está comprometida. Isto é evidenciado pela falta de consistência no comprimento do cordão de soldadura obtido e na respetiva quantidade de fio consumível consumido, para um mesmo código G.

A inconsistência nos comprimentos dos cordões de soldadura pode ser atribuída à demora no estabelecimento do arco elétrico. Já a inconsistência nos comprimentos de fio utilizado pode dever-se a diferentes níveis de oxidação que o fio poderia apresentar.

5.5 SONDA WFP

Um dos objetivos deste estudo seria inspecionar a parede WAAM resultante do Ensaio 3 com a sonda WAAM *Flex Probe* (WFP), desenvolvida em trabalhos anteriores [51]. A razão subjacente à inspeção específica desta parede reside na singularidade de esta ser a única que possui uma variação de composição dentro da mesma camada.

A sonda WFP foi fabricada por *Fused Filament Fabrication* (FFF) em PLA, sendo projetada para se ajustar à curvatura típica da camada superior da parede WAAM, tal como ilustra a Figura 5.13. A adaptação dos enrolamentos ao *chassis* curvado da sonda foi realizada manualmente por meio de fio de cobre de 0,1 mm de diâmetro. A sonda dispõe de 48 enrolamentos para a bobina de excitação e 30 enrolamentos para cada uma das bobinas de detecção, conforme corroborado por simulações numéricas para garantir o melhor desempenho. O valor do *lift-off* adotado foi de 0,5 mm, correspondente à espessura do suporte da bobina. Apresenta também um sistema autocompensante que procura maximizar a proximidade à parede a inspecionar. A sonda opera no modo de reflexão diferencial e estabelece-se conexão das bobinas e de um conector LEMO de quatro pinos, permitindo assim a sua ligação a um leitor de impedância [44,51].

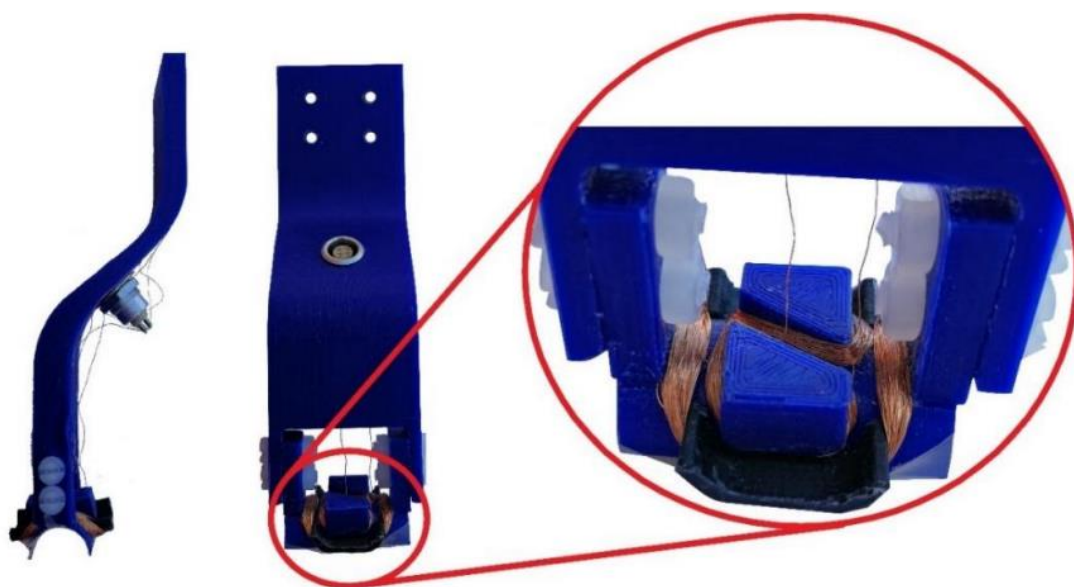


Figura 5.13 – Chassis e enrolamentos da sonda WFP [44]

O procedimento experimental empregue neste estudo foi similar à configuração detalhada anteriormente no capítulo 4.2. Nesse contexto, a sonda foi montada na cantoneira, que se desloca ao longo da mesa triaxial mediante a utilização de guias lineares, que asseguraram o movimento controlado da sonda. O aparato é exposto na Figura 5.14. A frequência utilizada na inspeção tem por base resultados de trabalhos anteriores.

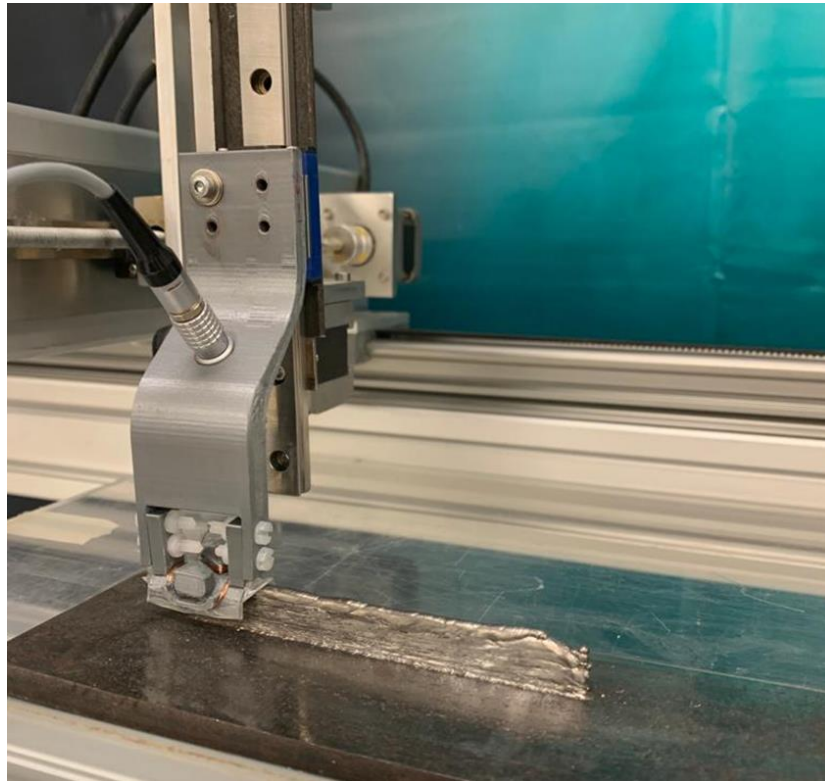


Figura 5.14 – Set up da inspeção da parede WAAM pela sonda WFP

Na Figura 5.15 podemos ver o resultado proveniente da inspeção da parede do Ensaio 3, obtido com um ganho de 75 dB.

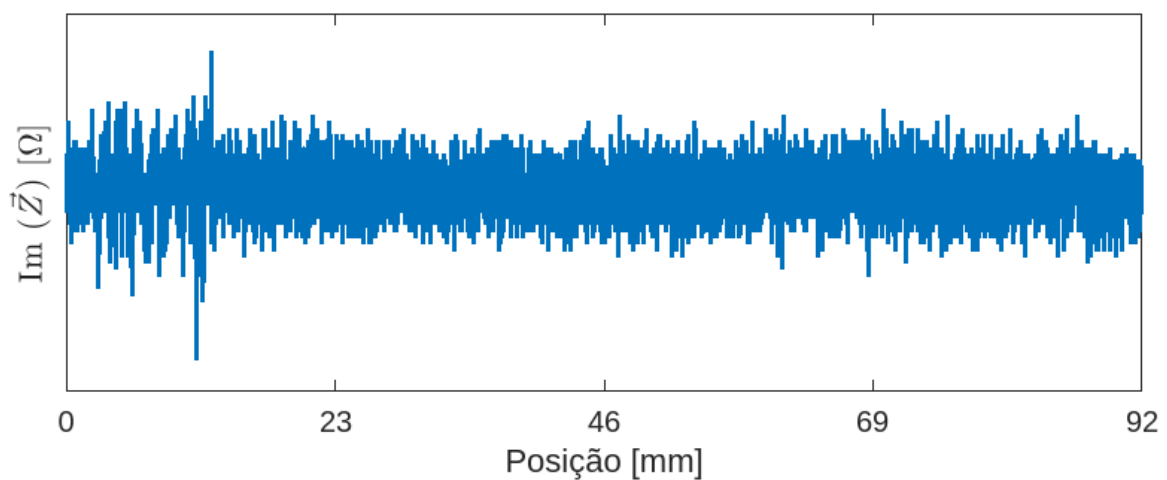


Figura 5.15 – Resultado da inspeção por CI com a sonda WFP da parede referente ao Ensaio 3 para $f = 1,5 \text{ kHz}$

Podem ser formuladas três hipóteses para explicar o nível considerável de ruído observado. Em primeiro lugar, mesmo com a sonda WFP equipada com um sistema autocompensante, pode não ser possível contornar eficazmente as irregularidades da superfície da parede WAAM, que no caso presente eram bastante expressivas. Além disso, é de salientar que a sonda funciona em modo diferencial, no qual as variações das propriedades do material não têm um impacto direto nas medições. Por conseguinte, mesmo que a questão da ondulação da parede fosse atenuada, continuaria a haver incerteza quanto à capacidade de detetar a secção central oxidada. Por último, é de considerar que, devido a desalinhamentos na deposição, a secção de fio oxidado prevista para estar no centro da parede do WAAM pode ter sido depositada numa posição adiantada ou atrasada em relação ao ponto desejado.

Apesar das várias conjecturas formuladas, concede-se maior relevância da saturação do sinal adquirido em virtude das oscilações presentes na superfície da parede. O processo WAAM já suscita uma série de desafios para as técnicas de END convencionais, e ao gerar peças cuja consistência e reprodutibilidade não são garantidas, apenas se adicionam obstáculos à realização eficaz da inspeção desse processo. Nesse contexto, torna-se imperativo otimizar e tornar coeso o processo de WAAM com o intuito de viabilizar análises abrangentes tanto do processo em si como dos produtos finais resultantes.

6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 INSPEÇÃO DO FIO CONSUMÍVEL *OFFLINE*

No âmbito deste trabalho, duas sondas de inspeção do fio consumível operam no modo de compensação absoluta, e ambas apresentam enrolamentos manuais. A sonda 1 foi desenvolvida em estudos anteriores, enquanto a segunda sonda, com um *lift-off* menor, foi desenvolvida no âmbito deste projeto.

Antes de utilizar as sondas para inspeção *inline*, foi imperativo que fossem testadas num contexto *offline* para garantir que funcionavam adequadamente e que a frequência teórica calculada era apropriada. Assim, foi realizada uma inspeção numa mesa triaxial utilizando um fio consumível de 650 mm, com uma secção central oxidada de 150 mm.

As inspeções apresentaram resultados positivos. A sonda 2, que apresentava um *lift-off* menor, produziu uma relação sinal/ruído com uma amplitude elevada. Quanto à sonda 1, embora a relação sinal/ruído fosse menos expressiva, foi possível detetar o sinal da secção oxidada. Isto confirmou que as condições necessárias para a realização das inspeções em tempo real estavam reunidas.

6.2 INSPEÇÃO DO FIO CONSUMÍVEL *INLINE*

A inspeção *inline* do fio consumível foi realizada durante a condução do Ensaio 2. Para permitir uma análise minuciosa, foram conduzidos dois ensaios independentes, com o intuito de viabilizar a utilização separada de cada sonda de inspeção.

6.2.1 SONDA 1

Os resultados da inspeção das primeiras cinco camadas indicaram dificuldades na identificação dos segmentos oxidados devido à pobre relação sinal/ruído. Analogamente, o sinal proveniente das restantes camadas apresentou uma variação insignificante entre as secções de fio oxidado e não oxidado, o que impossibilita a diferenciação com base nestes resultados. Nalgumas camadas é possível ver uma estabilização do sinal devido à instabilidade do arco

elétrico, que provoca um fluxo de material menor para o banho de fusão e, por isso, o fio não é solicitado e tracionado pelo interior da sonda.

Existem diversos picos nos gráficos obtidos e a sua origem está associada à interação entre a rotação da bobina, provocada pela tração por parte do sistema de alimentação da máquina de soldar, e o deslocamento linear do fio através da sonda. A falta de controle no desenrolamento do fio, particularmente devido ao enrolamento manual da bobina, foi identificado como a causa para o aparecimento dos picos no sinal. Adicionalmente, é importante destacar que o desenrolamento descontrolado da bobina não resulta apenas em perturbações abruptas no sinal; também induz oscilações significativas na posição do fio que passa no interior da sonda, o que, por conseguinte, compromete substancialmente a viabilidade da realização de uma inspeção fidedigna.

Uma explicação adicional para o insucesso da detecção das secções de fio oxidado é que a sensibilidade de detecção pode ter sido comprometida devido ao acúmulo de partículas de óxido dentro do orifício que guia o fio consumível na sonda, particularmente ao examinar segmentos de fio não oxidado.

6.2.2 SONDA 2

Durante a inspeção das cinco primeiras camadas, foi evidenciado um nível substancial de ruído no sinal, o que inviabilizou a distinção entre seções oxidadas e não oxidadas. Este padrão persistiu na inspeção das cinco camadas subsequentes. É relevante destacar que, em contraste com os resultados da sonda 1, não foram identificados picos atribuíveis a oscilações do fio no interior do chassis da bobina da sonda 2, devido ao seu menor *lift-off*, o que limitou o referido movimento. Não obstante, é essencial observar que a rotação da bobina persiste como uma variável suscetível de perturbar os dados.

No que diz respeito à sonda 1, supõe-se que a acumulação de partículas de óxidos poderia afetar negativamente a sensibilidade de detecção da sonda. Por outro lado, no caso da sonda 2, devido ao seu menor *lift-off*, existe a possibilidade de que essa proximidade possa resultar numa ação abrasiva capaz de remover óxidos presentes no fio. Portanto, além da potencial acumulação de óxidos na entrada do *chassis*, também se observa a perda de parte dos óxidos originalmente presentes no fio consumível, impossibilitando novamente a sua detecção.

Contrariamente ao ensaio com a sonda 1, o ensaio presente, com parâmetros e condições idênticas, não apresentou interrupções devido à extinção do arco elétrico. Isso resultou em oscilações mais acentuadas no sinal, em comparação com os resultados da sonda 1, devido à contínua movimentação do fio em relação à sonda durante toda a inspeção. No entanto, essa observação também destacou a falta de repetibilidade e consistência do processo com os equipamentos utilizados.

6.3 PAREDES WAAM

Foram realizados três ensaios com diferentes processamentos do fio consumível que originou cada parede WAAM de 10 camadas e 92 mm de comprimento: o primeiro ensaio composto por cinco camadas iniciais de fio não oxidado, seguidas por cinco camadas de fio oxidado; o segundo ensaio onde se alternam entre camadas de fio não oxidado e oxidado; e, por fim, o terceiro ensaio onde existe uma secção central de 20 mm de fio oxidado nas duas últimas camadas superficiais da parede. Foi também depositada uma parede de referência produzida unicamente com fio não oxidado.

Neste contexto, a análise das paredes produzidas como parte dos ensaios delineados no capítulo 4.1 teve como objetivo avaliar o impacto da qualidade da superfície do fio consumível na qualidade das superfícies das paredes produzidas por WAAM.

No que diz respeito ao ensaio referência, o processo decorreu sem interrupções do arco elétrico, o que contribuiu para a estabilidade do processo e resultou numa parede isenta de ondulações laterais ou superficiais.

Já na parede referente ao Ensaio 1 é notória a presença de ondulações superficiais pronunciadas. Estas ondulações podem ser atribuídas a várias causas, tais como variações na taxa de deposição do material, desalinhamentos entre camadas ou instabilidades no processo de fusão do metal, que estão intrinsecamente ligadas à dificuldade de manter o arco elétrico devido aos óxidos presentes no fio consumível.

Por outro lado, a parede resultante do Ensaio 2, apresentou uma quantidade significativamente reduzida de ondulação lateral e superficial. Estas observações podem ser atribuídas à alternância estratégica entre fio não oxidado e oxidado, contribuindo para uma formação mais estável do arco elétrico e uma deposição mais uniforme de material. Além disso, a alternância facilitou uma distribuição equitativa de calor e fluidez no banho de fusão, resultando em uma deposição controlada.

No entanto, a parede produzida durante o Ensaio 3, mesmo tendo sido predominantemente produzida com fio não oxidado, apresentou ondulações pronunciadas. Uma vez que uma grande quantidade de fio oxidado passou pela sonda de inspeção nos ensaios 1 e 2, suspeita-se que possa ter ocorrido contaminação do fio consumível do Ensaio 3, já que a sonda 1 foi mantida no interior da máquina de soldadura em posição de inspeção durante a totalidade dos ensaios, embora tenha adquirido dados somente para o Ensaio 2.

Outras hipóteses como a remoção do revestimento de cobre do fio consumível previamente à sua oxidação ou a ineficácia do EROI são colocadas, mas é de notar que estas também seriam válidas para os restantes ensaios que apresentam uma qualidade superficial superior, apesar de utilizarem quantidades substancialmente superiores de fio oxidado.

Portanto, a qualidade insatisfatória da superfície da parede no Ensaio 3 pode ser atribuída à falta de repetibilidade do processo WAAM. Portanto, pode-se concluir que o processo de WAAM utilizando os equipamentos disponíveis no DEMI não atinge os padrões desejados de repetibilidade.

6.4 ANÁLISE DESTRUTIVA

Na análise das macrografias das paredes resultantes dos ensaios realizados, observa-se relativamente à parede de referência a presença de vazios, especialmente na área em contato com o substrato, embora não tenha sido identificada porosidade significativa.

Contudo, a previsão de uma concentração de porosidade na metade superior da parede no Ensaio 1 não se verificou; no entanto, observou-se uma maior presença de porosidades em comparação com a parede de referência. No Ensaio 2, no qual camadas alternadas de fio não oxidado e oxidado foram depositadas, também foram observadas porosidades, mas em menor quantidade em comparação com o Ensaio 1. O Ensaio 3, que incluiu uma seção central de 20 mm de fio oxidado nas camadas 9 e 10, apresentou uma concentração de porosidades na seção central da parede, com menos ocorrências nas laterais. No entanto, a presença de troços oxidados no topo da parede não explicaria a formação de porosidades na base.

Assim, não é possível estabelecer uma relação direta entre as estratégias de deposição planeadas e a macrografia resultante. Isso sugere que os cálculos teóricos para a estratégia de deposição das zonas oxidadas e não oxidadas podem ser imprecisos devido a fatores como a baixa condutividade elétrica do material oxidado, que conduz a um arco instável e, por consequência, provoca grandes variações no fluxo de material depositado.

Portanto, a presença de porosidades em áreas desprovidas de fio oxidado pode ser atribuída a flutuações na velocidade de deposição do material de adição ao longo do processo, influenciadas pelas condições variáveis. Essas flutuações podem levar a disparidades na fusão do material, resultando na formação de porosidades.

Numa iteração em que foram realizados seis cordões de soldadura com o intuito de inferir acerca da falta de repetibilidade do equipamento utilizado, a análise subsequente evidenciou inúmeras inconsistências. Estas inconsistências manifestaram-se na forma de comprimentos dos cordões mais curtos do que o previsto e um consumo de fio consumível que divergiu das estimativas teóricas. Esta falta de consistência pode ser justificada por dois fatores: em primeiro lugar, um atraso no estabelecimento do arco elétrico durante o processo de soldadura e, em segundo lugar, variações nos níveis de oxidação do fio consumível utilizado.

Em suma, os resultados obtidos nesta análise indicam claramente que a consistência do processo de fabrico por WAAM está comprometida. Esta inconsistência afeta negativamente a qualidade e a fiabilidade dos cordões produzidos no âmbito deste processo. Assim sendo, é crucial sublinhar a necessidade urgente de melhorar a estabilidade do processo WAAM nos equipamentos que se dispõe, de forma a atingir padrões mais elevados de consistência e desempenho.

6.5 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

No decurso desta dissertação, tornou-se evidente a existência de desafios relacionados com a repetibilidade do processo de WAAM quando utilizados os equipamentos disponíveis no DEMI. Portanto, torna-se imperativo abordar esta questão com vista a otimizar o processo e melhorar a sua confiabilidade. Uma sugestão pertinente consiste em fazer uma avaliação para identificar as possibilidades de melhorar o *design* da máquina WAAM, a fim de reforçar a estabilidade e a coerência do procedimento. Esta análise pode incluir a introdução de modificações estruturais no equipamento ou a incorporação de novos componentes no sistema para aumentar a funcionalidade do equipamento.

No contexto da inspeção *inline* do fio consumível, é crucial abordar as oscilações do fio consumível causadas pelo desenrolamento da bobina na máquina de soldadura. Uma série de soluções para abordar a necessidade de estabilizar o movimento do fio consumível podem ser consideradas, entre elas o desenvolvimento de um mecanismo de tração do fio consumível, incorporando-o antes da sonda de CI para minimizar as oscilações do fio e assegurar uma distância de inspeção consistente da sonda ao fio. Por outro lado, seria de interesse explorar a possibilidade de conceber um *chassis* específico para a sonda que pudesse ser integrado na mangueira da máquina de soldadura. Nesse contexto, poderia ser necessário efetuar a remoção de algumas camadas da mangueira para estabelecer um contato direto entre a sonda e o fio consumível.

BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Vaidya, P. Ambad, S. Bhosle, Industry 4.0 – A Glimpse, *Procedia Manuf.* 20 (2018) 233–238. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034>.
- [2] ISO/ASTM, ISO/ASTM 52900(en) Additive manufacturing — General principles — Terminology, <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:dis:ed-2:v1:en>. (n.d.).
- [3] S.W. Williams, F. Martina, A.C. Addison, J. Ding, G. Pardal, P. Colegrove, *Wire + Arc Additive Manufacturing, Mater. Sci. Technol.* 32 (2016) 641–647. <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>.
- [4] T. G. Santos, Impressão 3D: realidade e mitos, <https://observador.pt/opiniao/impressao-3d-realidade-e-mitos/>. (n.d.).
- [5] W. Jin, C. Zhang, S. Jin, Y. Tian, D. Wellmann, W. Liu, Wire arc additive manufacturing of stainless steels: A review, *Appl. Sci.* 10 (2020). <https://doi.org/10.3390/app10051563>.
- [6] J.Z. Li, M.R. Alkahari, N.A.B. Rosli, R. Hasan, M.N. Sudin, F.R. Ramli, Review of Wire Arc Additive Manufacturing for 3D Metal Printing, *Int. J. Autom. Technol.* 13 (2019) 346–353. <https://doi.org/10.20965/ijat.2019.p0346>.
- [7] S. Sun, M. Brandt, M. Easton, Powder bed fusion processes, in: *Laser Addit. Manuf.*, Elsevier, 2017: pp. 55–77. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00002-6>.
- [8] B. Dutta, Directed Energy Deposition (DED) Technology, in: *Encycl. Mater. Met. Alloy.*, Elsevier, 2022: pp. 66–84. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819726-4.00035-1>.
- [9] T.A. Rodrigues, V. Duarte, R.M. Miranda, T.G. Santos, J.P. Oliveira, Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM), *Materials (Basel)*. 12 (2019) 1121. <https://doi.org/10.3390/ma12071121>.
- [10] Dassault Systèmes, Introduction to 3D Printing - additive process, <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/powder-bed-fusion>. (n.d.).
- [11] F. Martina, J. Mehnen, S.W. Williams, P. Colegrove, F. Wang, Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V, *J. Mater. Process. Technol.* 212 (2012) 1377–1386. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.02.002>.

- [12] B. Tomar, S. Shiva, T. Nath, A review on wire arc additive manufacturing: Processing parameters, defects, quality improvement and recent advances, *Mater. Today Commun.* 31 (2022) 103739. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103739>.
- [13] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures, *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 34 (2015) 8–19. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.01.003>.
- [14] D. Jafari, T.H.J. Vaneker, I. Gibson, Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts, *Mater. Des.* 202 (2021) 109471. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109471>.
- [15] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, S. van Duin, Advanced Design for Additive Manufacturing: 3D Slicing and 2D Path Planning, in: *New Trends 3D Print.*, InTech, 2016. <https://doi.org/10.5772/63042>.
- [16] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM), *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 31 (2015) 101–110. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2014.08.008>.
- [17] S. Selvi, A. Vishvakshan, E. Rajasekar, Cold metal transfer (CMT) technology - An overview, *Def. Technol.* 14 (2018) 28–44. <https://doi.org/10.1016/j.dt.2017.08.002>.
- [18] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 81 (2015) 465–481. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>.
- [19] D.G. Ahn, Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art, *Int. J. Precis. Eng. Manuf. - Green Technol.* 8 (2021) 703–742. <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00302-7>.
- [20] J.B. Bento, A. Lopez, I. Pires, L. Quintino, T.G. Santos, Non-destructive testing for wire + arc additive manufacturing of aluminium parts, *Addit. Manuf.* 29 (2019) 100782. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100782>.
- [21] D. Svetlizky, M. Das, B. Zheng, A.L. Vyatskikh, S. Bose, A. Bandyopadhyay, J.M. Schoenung, E.J. Lavernia, N. Eliaz, Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications, *Mater. Today.* 49 (2021) 271–295. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.020>.
- [22] X. Chen, F. Kong, Y. Fu, X. Zhao, R. Li, G. Wang, H. Zhang, A review on wire-arc additive manufacturing: typical defects, detection approaches, and multisensor data fusion-based model, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 117 (2021) 707–727. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07807-8>.
- [23] E.M. Ryan, T.J. Sabin, J.F. Watts, M.J. Whiting, The influence of build parameters and wire batch on porosity of wire and arc additive manufactured aluminium alloy 2319, *J.*

- Mater. Process. Technol. 262 (2018) 577–584.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.07.030>.
- [24] A. Casadebaigt, J. Hugues, D. Monceau, High temperature oxidation and embrittlement at 500–600 °C of Ti-6Al-4V alloy fabricated by Laser and Electron Beam Melting, *Corros. Sci.* 175 (2020) 108875. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108875>.
- [25] Valdemar Rebelo Duarte, Developments in Directed Energy Deposition Additive Manufacturing: In-situ Hot Forging and Indirect Cooling, NOVA SST, 2022.
- [26] G. Marinelli, F. Martina, S. Ganguly, S. Williams, Development of Wire + Arc Additive Manufacturing for the production of large-scale unalloyed tungsten components, n.d.
- [27] T.A. Rodrigues, V.R. Duarte, D. Tomás, J.A. Avila, J.D. Escobar, E. Rossinyol, N. Schell, T.G. Santos, J.P. Oliveira, In-situ strengthening of a high strength low alloy steel during Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM), *Addit. Manuf.* 34 (2020) 101200. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101200>.
- [28] J.G. Lopes, C.M. Machado, V.R. Duarte, T.A. Rodrigues, T.G. Santos, J.P. Oliveira, Effect of milling parameters on HSLA steel parts produced by Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM), *J. Manuf. Process.* 59 (2020) 739–749. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.10.007>.
- [29] J. Xiong, Y. Li, R. Li, Z. Yin, Influences of process parameters on surface roughness of multi-layer single-pass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing, *J. Mater. Process. Technol.* 252 (2018) 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.09.020>.
- [30] Y. Zhang, Y. Chen, P. Li, A.T. Male, Weld deposition-based rapid prototyping: a preliminary study, *J. Mater. Process. Technol.* 135 (2003) 347–357. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00867-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00867-1).
- [31] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 73 (2014) 173–183. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5808-5>.
- [32] Y. Yehorov, L.J. da Silva, A. Scotti, Balancing WAAM Production Costs and Wall Surface Quality through Parameter Selection: A Case Study of an Al-Mg5 Alloy Multilayer-Non-Oscillated Single Pass Wall, *J. Manuf. Mater. Process.* 3 (2019) 32. <https://doi.org/10.3390/jmmp3020032>.
- [33] V.R. Duarte, T.A. Rodrigues, N. Schell, R.M. Miranda, J.P. Oliveira, T.G. Santos, Hot forging wire and arc additive manufacturing (HF-WAAM), *Addit. Manuf.* 35 (2020) 101193. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101193>.
- [34] P.A. Colegrove, F. Martina, M.J. Roy, B.A. Szost, S. Terzi, S.W. Williams, P.J. Withers, D. Jarvis, High Pressure Interpass Rolling of Wire + Arc Additively Manufactured Titanium

- Components, Adv. Mater. Res. 996 (2014) 694–700. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.996.694>.
- [35] P.A. Colegrove, J. Donoghue, F. Martina, J. Gu, P. Prangnell, J. Hönnige, Application of bulk deformation methods for microstructural and material property improvement and residual stress and distortion control in additively manufactured components, *Scr. Mater.* 135 (2017) 111–118. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.10.031>.
- [36] T.A. Rodrigues, V.R. Duarte, R.M. Miranda, T.G. Santos, J.P. Oliveira, Ultracold-Wire and arc additive manufacturing (UC-WAAM), *J. Mater. Process. Technol.* 296 (2021) 117196. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117196>.
- [37] ASNT, Introduction to Nondestructive Testing, <https://asnt.org/en/major-site-sections/about/introduction-to-nondestructive-testing.aspx>. (n.d.).
- [38] M. Shaloo, M. Schnall, T. Klein, N. Huber, B. Reitering, A Review of Non-Destructive Testing (NDT) Techniques for Defect Detection: Application to Fusion Welding and Future Wire Arc Additive Manufacturing Processes, *Materials* (Basel). 15 (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15103697>.
- [39] A. Lopez, R. Bacelar, I. Pires, T. G. Santos, Mapping of non-destructive techniques for inspection of wire and arc additive manufacturing, in: *Conf. Proc. 7th Int. Conf. Mech. Mater. Des.*, 2017.
- [40] D. Chauveau, Review of NDT and process monitoring techniques usable to produce high-quality parts by welding or additive manufacturing, *Weld. World.* 62 (2018) 1097–1118. <https://doi.org/10.1007/s40194-018-0609-3>.
- [41] A. Lopez, R. Bacelar, I. Pires, T.G. Santos, J.P. Sousa, L. Quintino, Non-destructive testing application of radiography and ultrasound for wire and arc additive manufacturing, *Addit. Manuf.* 21 (2018) 298–306. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.020>.
- [42] Charles Hellier, *Handbook of Nondestructive Evaluation*, McGraw-Hill, 2003.
- [43] M.A. Machado, K.-N. Antin, L.S. Rosado, P. Vilaça, T.G. Santos, High-speed inspection of delamination defects in unidirectional CFRP by non-contact eddy current testing, *Compos. Part B Eng.* 224 (2021) 109167. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109167>.
- [44] D.S.M. Serrati, M.A. Machado, J.P. Oliveira, T.G. Santos, Non-Destructive Testing Inspection for Metal Components Produced Using Wire and Arc Additive Manufacturing, *Metals* (Basel). 13 (2023). <https://doi.org/10.3390/met13040648>.
- [45] A.B. Lopez, J.P. Sousa, J.P.M. Pragana, I.M.F. Bragança, T.G. Santos, C.M.A. Silva, In Situ Ultrasonic Testing for Wire Arc Additive Manufacturing Applications, *Machines*. 10

- (2022) 1069. <https://doi.org/10.3390/machines10111069>.
- [46] Ricardo Bacelar, Evaluation of WAAM Parts by NDT, IST Lisboa, 2017.
 - [47] J. García-Martín, J. Gómez-Gil, E. Vázquez-Sánchez, Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing, *Sensors*. 11 (2011) 2525–2565. <https://doi.org/10.3390/s110302525>.
 - [48] Iowa State University, Eddy Current Testing, <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/EddyCurrent/ProbesCoilDesign/ProbesModeOp.Xhtml>. (n.d.).
 - [49] L.S. Rosado, T.G. Santos, P.M. Ramos, P. Vilaça, M. Piedade, A differential planar eddy currents probe: Fundamentals, modeling and experimental evaluation, *NDT E Int.* 51 (2012) 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2012.06.010>.
 - [50] L.S. Rosado, T.G. Santos, M. Piedade, P.M. Ramos, P. Vilaça, Advanced technique for non-destructive testing of friction stir welding of metals, *Measurement*. 43 (2010) 1021–1030. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2010.02.006>.
 - [51] A. Ferreira, Conceção, Simulação e Validação Experimental de Sondas de Correntes Induzidas para WAAM, NOVA - SST, 2020.
 - [52] D. Lopes, Monitorização e Ensaaios Não Destrutivos para Peças Metálicas Produzidas por WAAM, NOVA SST, 2021.
 - [53] H. Grilo, Monitorização do Fio consumível e o seu Efeito na Qualidade de Peças Produzidas por WAAM, NOVA SST, 2022.