



HUGO DOS SANTOS GRILO

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

MONITORIZAÇÃO DO FIO DE SOLDADURA E O SEU EFEITO NA QUALIDADE DE PEÇAS PRODUZIDAS POR WAAM

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa

Setembro 2022

MONITORIZAÇÃO DO FIO DE SOLDADURA E O SEU EFEITO NA QUALIDADE DE PEÇAS PRODUZIDAS POR WAAM

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre
em Engenharia Mecânica

HUGO DOS SANTOS GRILO
Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

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

Coorientador: Doutor João Pedro Oliveira,
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutor Telmo G. Santos,
Professor Catedrático, Universidade NOVA de Lisboa

Arguentes: Doutor Valdemar Duarte,
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Doutor Miguel Machado,
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa

Setembro, 2022

Monitorização do Fio de Soldadura e o seu Efeito na Qualidade de Peças Produzidas por WAAM

Copyright © Hugo Grilo, 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

É importante para mim deixar aqui um agradecimento a todos os que me ajudaram neste projeto de dissertação porque não teria sido capaz de executar este trabalho todo sozinho. Quero agradecer especialmente:

Ao Professor Miguel Machado pela disponibilidade diária, orientação, boa disposição e pelos conhecimentos que me transmitiu ao longo dos 6 meses de bolsa de investigação e 6 meses de desenvolvimento da minha tese. Conhecimentos esses que certamente irei levar para a minha carreira profissional.

Ao Professor João Oliveira também pela sua disponibilidade e sugestões. E também agradecer o entusiasmo, energia e boa disposição que sempre colocou nas suas aulas.

Ao Professor Telmo Santos pelas sugestões e disponibilidade em ajudar.

Ao Sr. Wagner, Sr. António Campos e ao Sr. Paulo Magalhães por todo o apoio e conhecimento que me transmitiram acerca da arte de bem trabalhar o metal. Obrigado por me terem emprestado brocas e machos com diâmetros que não conseguia encontrar no laboratório.

Ao Professor Valdemar Duarte, Eng.º Francisco Ferreira, Eng.º Pedro Ferreira, Eng.º Pedro Fonseca, Eng.º Igor Felice e Eng.º Werley Farias pela assistência no laboratório.

Ao Diogo Lopes por toda a ajuda crucial á execução do trabalho de bolsa em 2021 que serviu de base para esta dissertação. Agradeço por tudo o que me ensinou ao longo desses 6 meses, seja na parte de usar a impressora 3D, no uso de máquinas do laboratório e agradecer também o espírito de equipa e boa disposição mesmo em dias maus.

Ao meu caro colega e amigo Bernardo Varzielas que no momento de avaria da máquina de WAAM do DEMI, na altura em que ia realizar os meus ensaios, disponibilizou o seu tempo para me ajudar a realizar esses mesmos ensaios no braço robótico que faz parte da sua tese. Sem a sua ajuda nestes 3 dias, o meu trabalho provavelmente ficaria incompleto.

Aos meus colegas de curso, António Amaral, Daniel Damásio, Edgar Belo, Filipe Moreira, João Botelho, João Fernandes e Miguel Faria, que estiveram sempre presentes nos bons e maus dias, tornando espetacular esta caminhada de 5 anos. Amigos que, certamente, ficarão para a minha vida.

Aos meus pais e à minha namorada por todo o apoio que me deram ao longo de todo o curso, nos bons e maus momentos. O ano de 2021 foi difícil devido à pandemia, à carga de trabalho de 5 cadeiras em simultâneo com a bolsa de investigação. Sem o seu apoio, não teria conseguido gerir tudo com sucesso. Esse apoio continuou ainda mais forte em 2022, durante o

desenvolvimento da minha tese, que acaba por ser o seguimento do meu projeto de bolsa de investigação para licenciados.

Aos meus queridos avós. À minha Avó Lurdes por me ensinar desde cedo a importância da escola, ao meu Avô Toni por me dar o gosto pela Engenharia Mecânica, foi por causa dele que escolhi este curso, à minha Avó Fernanda por todos os almoços deliciosos que me davam energia para os estudos, e ao meu Avô Grilo por ter trabalhado a vida inteira para que o neto pudesse ter um carro e pudesse ser Engenheiro.

Agradecer à Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da Universidade Nova de Lisboa (UNL), em especial ao Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) por todo o conhecimento que levarei para a minha vida.

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) tem mudado o paradigma da indústria devido a vários fatores como a prototipagem rápida e o menor desperdício de material. Um exemplo é o *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM) que necessita de normas de qualidade para que seja cada vez mais integrado na indústria.

Este estudo teve como objetivo desenvolver métodos de monitorização *in-line* com recurso aos Ensaios Não Destrutivos (END), estudar a relação causa-efeito de defeitos característicos do WAAM e desenvolver uma máquina de limpeza de fio de soldadura.

Uma segunda versão do Engenho de Remoção de Óxidos e Impurezas (EROI V2) foi desenvolvida e cumpriu todos os requisitos. Efetuaram-se três ensaios: fio com redução de diâmetro, indentações e variação de diâmetro ao longo de 3,3 m. Obteve-se o sinal da sonda de CI e avaliou-se a qualidade das paredes com recurso a uma inspeção visual e raio-X.

O EROI V2 limpou o fio de soldadura eficazmente. Defeitos pontuais provocaram a paragem do processo. As sucessivas interrupções e recomeços aumentaram a ondulação lateral das paredes e são catalisadores ao aparecimento de porosidades. A variação de diâmetro de 3,3 m provocou uma ondulação das camadas mais elevadas devido ao fluxo de material de adição inconstante.

PALAVRAS-CHAVE

Fabrico Aditivo (FA)

Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)

Defeitos no Fio de Soldadura

Ensaios Não Destrutivos (END)

Correntes Induzidas (CI)

Monitorização *In-line*

Engenho de Remoção de Óxidos e Impurezas (EROI)

ABSTRACT

Additive Manufacturing (AM) has been changing the industry's paradigm due to various factors, for instance, fast prototyping and minimal material waste. An example of that is the Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) process which requires quality norms to be integrated into the industry more and more.

The goal of this work is to develop in-line monitoring methods using Non-Destructive Testing (NDT), to study the cause-effect relationship of defects that are usually found in WAAM and to develop a feed wire cleaning machine.

A second version of the Oxides and Impurities Removal Device (OIRD V2) was developed and met all the specifications. Three experiments were performed: feed wire point diameter reduction; indentations and a random continuous diameter variation with 3,3 meters. A signal from the EC probe was obtained and the walls' quality was evaluated through visual inspection and X-ray imaging.

The OIRD V2 effectively cleaned the feed wire. Punctual defects caused the interruption of the process. The succeeding start and stop situations increased the lateral waviness of the walls and can be a catalyst for porosity formation. The diameter variation of 3,3 m provoked a higher waviness of the deposited layers due to the inconsistent material flux.

KEY-WORDS

Additive Manufacturing (AM)
Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)
Feed Wire Defects
Non-Destructive Testing (NDT)
Eddy Currents
In-line Monitoring
Oxides and Impurities Removal Device (OIRD)

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	vii
RESUMO.....	ix
PALAVRAS-CHAVE	ix
ABSTRACT.....	xi
KEY-WORDS	xi
ÍNDICE.....	xiii
LISTA DE FIGURAS.....	xv
LISTA DE TABELAS.....	xix
NOMENCLATURA.....	xxi
1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – Motivação.....	1
1.2 – Objetivo.....	2
1.3 – Metodologia.....	2
1.4 – Estrutura da Dissertação.....	3
2 – REVISÃO DO ESTADO DA ARTE	5
2.1 – Fabrico Aditivo.....	5
2.1.1 - Fabrico aditivo de metais	8
2.2 – Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM).....	9
2.2.1 - Defeitos característicos do WAAM	10
2.2.2 - Microestrutura e variantes do WAAM.....	14
2.3 – Ensaio Não Destrutivo	16
2.3.1 - Ensaio Não Destrutivo no âmbito do WAAM e monitorização <i>in-line</i>	18
2.4 – Correntes Induzidas.....	20
2.4.1 - Correntes induzidas no âmbito do WAAM.....	25
2.5 – Síntese do Capítulo.....	29
3 – REQUISITOS, CONCEÇÃO E PRODUÇÃO do EROI V2	31
3.1 – Conceção e desenvolvimento do EROI V2.....	31
3.2 – Produção e testagem do EROI V2.....	35
3.3 – Síntese do Capítulo.....	38

4 – METODOLOGIA EXPERIMENTAL	39
4.1 – Produção de descontinuidades no fio de soldadura e respetiva caracterização.....	39
4.1.1 - Produção das descontinuidades no fio de soldadura	39
4.1.2 - Caracterização das descontinuidades no fio de soldadura	42
4.2 – Fabrico de paredes por WAAM	43
4.3 – Síntese do capítulo.....	44
5 – VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	47
5.1 – EROI V2.....	47
5.2 – Paredes produzidas por WAAM.....	49
5.2.1 - Fio de soldadura com descontinuidades pontuais (Ensaio 1 e 2).....	49
5.2.2 - Fio de soldadura com descontinuidade contínua (Ensaio 3).....	51
5.3 – Inspeção das paredes produzidas.....	53
5.3.1 - Ensaio 1 e 2	54
5.3.2 - Ensaio 3	57
5.4 – Síntese do Capítulo.....	58
6 – CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	61
6.1 – EROI V2 e o seu possível contributo para o aumento da qualidade de peças produzidas por WAAM.....	61
6.2 – Impacto de descontinuidades presentes no fio de soldadura na qualidade de peças produzidas por WAAM em aço inoxidável AISI 316L.....	62
6.3 – Propostas para desenvolvimentos futuros	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
ANEXOS	77
Anexo 1 – Características do EROI V2.....	77
Anexo 2 – Produção e caracterização das descontinuidades do fio de soldadura para os Ensaio 1 e 2.....	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Categorias dos processos de fabrico.	5
Figura 2.2 - Os 4 passos principais do FA com exemplo do processo WAAM.	7
Figura 2.3 - Categorias do FA de metais.	8
Figura 2.4 - Ilustração do processo WAAM na variante GTAW.	9
Figura 2.5 - Exemplo do FA por WAAM de pás de turbinas e da automatização do processo.	10
Figura 2.6 - Qualidade superficial de peças fabricadas por WAAM.....	11
Figura 2.7 - Fotografia tirada num microscópio eletrónico de varrimento (SEM) que revela a iniciação da fissura num poro (canto superior esquerdo).....	11
Figura 2.8 – Fissura presente na parte inferior de uma parede de WAAM (perto do substrato) composta por uma liga intermetálica Fe ₃ -Al	12
Figura 2.9 – Distorção numa peça fabricada por WAAM devido a tensões residuais.	13
Figura 2.10 – Utilização do método dos líquidos penetrantes que evidencia a falta de fusão entre camadas numa peça fabricada por WAAM.	14
Figura 2.11 – Variação da dureza ao longo da direção de fabrico numa parede produzida por WAAM.	15
Figura 2.12 – Diagrama de um sistema multissensorial para monitorização <i>in-line</i> no WAAM.	20
Figura 2.13 – Ensaio Não Destrutivo por Correntes Induzidas.	21
Figura 2.14 – Plano de impedância para materiais ferromagnéticos e não-ferromagnéticos.	21
Figura 2.15 - Variação das CI com a profundidade.	22
Figura 2.16 – Simulação numérica para correntes induzidas.	22
Figura 2.17 – Ilustração do efeito de bordo nas correntes induzidas.....	23
Figura 2.18 – Deflexão das correntes induzidas causada por descontinuidades com diferentes orientações.....	23
Figura 2.19 – Sonda absoluta.....	24
Figura 2.20 -Sonda diferencial.	24
Figura 2.21 – Sonda de reflexão.	25
Figura 2.22 – Protótipo da sonda <i>IOmic Probe</i>	26
Figura 2.23 – Variação das CI no espaço produzidas pela <i>IOmic Probe</i> (esquerda) e por uma sonda convencional axissimétrica (direita).	26
Figura 2.24 – Sonda <i>IOmic Probe</i> customizada para peças fabricadas por WAAM.	26
Figura 2.25 - Configurações das sondas.	27
Figura 2.26 – Sonda do Fio de soldadura e chassi das bobinas.	27
Figura 2.27 – Resultados obtidos na inspeção de uma parede WAAM com um furo passante com 1 mm de diâmetro a 2 mm de profundidade.	28

Figura 2.28 – Comparação entre os sinais da sonda do fio de soldadura de 1 mm do aço ER-70 a $f = 7,5$ kHz antes e após ser processado pelo EROI.....	28
Figura 2.29 – Implementação do EROI e da sonda de monitorização do fio de soldadura.....	29
Figura 2.30 – Corte de secção de um módulo do EROI.	29
Figura 3.1 – Ilustração do funcionamento da UL e identificação dos seus componentes.	32
Figura 3.2 - Esquematização da UM com alguns pontos de referência.....	33
Figura 3.3 – Renderização da UM e identificação dos seus componentes.....	33
Figura 3.4 - Identificação dos vários elementos constituintes do EROI V2.....	33
Figura 3.5 - Ilustração do funcionamento do EROI V2 com as 4 fases de limpeza.....	34
Figura 3.6 - Representação da implementação do EROI V2 na máquina de WAAM do DEMI da FCT-UNL.....	34
Figura 3.7 – Representação da adaptação de bancada denominada por EROI V2-B, onde existe a transferência do fio de soldadura de uma bobina para outra, sendo efetuada a limpeza e a inspeção por CI do fio de soldadura.	35
Figura 3.8 - Quadro elétrico do EROI V2.	36
Figura 3.9 - Implementação de 4 motores de passo para o ajuste da distância entre o fio de soldadura e a escova de aço rotativa de cada UL, permitindo a realização deste ajuste quando o operador não pode estar perto do EROI V2.....	36
Figura 3.10 - Apresentação de montagens modulares essenciais ao funcionamento do EROI-V2.....	37
Figura 3.11 - Apresentação do EROI V2-B finalizado.....	37
Figura 3.12 - Apresentação do EROI V2-B (alçado principal).	38
Figura 3.13 - Apresentação do EROI V2-B (planta).	38
Figura 4.1 – Esquema da possível localização de defeitos nas paredes E1, E2 e E3.	42
Figura 4.2 – Exemplo da caracterização de descontinuidades no fio de soldadura por inspeção visual e pelo método das CI para os Ensaios 1 e 2.	42
Figura 4.3 - Aparato experimental para caracterização das descontinuidades pelo método das CI.	43
Figura 4.4 - Fotografias do microscópio tiradas ao longo da variação de diâmetro de 3,33 m..	43
Figura 4.5 – Plataformas para a realização dos Ensaios 1, 2 e 3.	44
Figura 5.1 - Fio de soldadura de aço ER-70 antes e depois de ser processado pelo EROI V2. .	48
Figura 5.2 – Análise da secção do fio de soldadura limpo no EROI V2: a) antes da limpeza; b) depois da limpeza.	49
Figura 5.3 – Parede de referência fabricada por WAAM dos Ensaios 1 e 2 (Ref-E1-E2).	50
Figura 5.4 – Parede fabricada por WAAM no Ensaio 1 na célula robótica.	50
Figura 5.5 - Parede fabricada por WAAM no Ensaio 2 na célula robótica.	51
Figura 5.6 - Parede de referência fabricada por WAAM do Ensaio 3 (Ref-E3).....	52
Figura 5.7 - Parede fabricada por WAAM no Ensaio 3 na máquina de WAAM triaxial.....	52
Figura 5.8 - Evolução do fabrico da parede por WAAM durante e após a variação de diâmetro contínua.	53
Figura 5.9 - Inspeção visual após maquinação por fresagem da parede Ref-E1-E2.	54

Figura 5.10 - Raio-X efetuado à parede Ref-E1-E2.	54
Figura 5.11 - Inspeção visual após maquinação por fresagem da parede E1. Identifica-se um vazio, denominado por R-E1-D1.	55
Figura 5.12 – Raio-X efetuado à parede E1, onde se identificam duas descontinuidades, uma já identificada na inspeção visual (R-E1-D1), e outra no presente raio-X (R-E1-D2), e ainda, porosidade elevada na última camada.	55
Figura 5.13 - Inspeção visual após maquinação por fresagem da parede E2.	56
Figura 5.14 – Raio-X efetuado à parede E2, onde se identifica um elevado número de poros na última camada.	56
Figura 5.15 - Inspeção visual após maquinação por fresagem da parede Ref-E3.	57
Figura 5.16 – Raio-X efetuado à parede Ref-E3.	57
Figura 5.17 - Inspeção visual após maquinação por fresagem da parede E3.	58
Figura 5.18 – Raio-X efetuado à parede E3.....	58
Figura 6.1 – Ilustração do escorregamento de fio de soldadura no mecanismo de tração da máquina de soldadura.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais Métodos de END e as suas capacidades e limitações.	17
Tabela 3.1 – Lista de componentes eletrônicos adquiridos para o EROI V2.	35
Tabela 4.1 – Ensaios a serem efetuados e suas características.	40
Tabela 4.2 - Parâmetros do processo de WAAM pré-estabelecidos para os Ensaios 1, 2 e 3.	40
Tabela 4.3 – Parâmetros selecionados do processo de WAAM para os Ensaios 1, 2 e 3.	44

NOMENCLATURA

CAD	<i>Computer Assisted Design</i>
CAM	<i>Computer Assisted Manufacturing</i>
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
CI	Correntes Induzidas
CNC	<i>Computer Numerical Control</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DED	<i>Directed Energy Deposition</i>
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
EC	<i>Eddy Currents</i>
END	Ensaio Não Destrutivo
EROI	Engenho de Remoção de Óxidos e Impurezas
EROI V2	Engenho de Remoção de Óxidos e Impurezas Versão 2
FA	Fabrico Aditivo
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MEV	Microscópio Eletrónico de Varrimento
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
NDT	<i>Non-Destructive Testing</i>
NTI	Núcleo de Tecnologia Industrial
OIRD	<i>Oxides and Impurities Removal Device</i>
OIRD V2	<i>Oxides and Impurities Removal Device Version 2</i>
PBF	<i>Powder Bed Fusion</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
SEM	<i>Scanning Electron Microscopy</i>
SPBD	Sistemas para Processamento de <i>Big Data</i>
UNL	Universidade Nova de Lisboa
UM	Unidade Motriz
UL	Unidade de Limpeza
US	Ultrassons
WAAM	<i>Wire and Arc Additive Manufacturing</i>
ZTA	Zona Termicamente Afetada

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Motivação

O Fabrico Aditivo (FA) ou Manufatura Aditiva (MA), também conhecida pelo termo “Impressão 3D” tem vindo a mudar o paradigma da indústria porque, de entre várias razões, consiste na automação, tornou-se bastante acessível e permite o fabrico de componentes com geometria complexa, que podem substituir um conjunto de peças numa montagem. Um desses processos denomina-se por *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM) e permite a produção de grandes componentes metálicos com microestruturas diferentes do usual. Existem vários tipos de defeitos inerentes a este processo que podem depender dos parâmetros do processo ou da própria matéria prima.

Os Ensaio Não Destrutivos (END) são uma ferramenta importante na monitorização pós-fabrico e na monitorização *in-line* de processos de fabrico com o objetivo de detetar discontinuidades no material. A sua integração, em conjunto com a inteligência artificial e sistemas para processamento de *Big Data* (SPBD), pode auxiliar na emissão de normas e certificados e acelerar a adoção do processo por parte da indústria. Uma das variantes de END mais promissoras é o método das Correntes Induzidas (CI) que pode monitorizar a matéria-prima do processo, a peça enquanto o processo decorre e/ou a peça depois de produzida.

Com recurso às CI, o estudo da correlação entre discontinuidades na matéria-prima e discontinuidades presentes em peças fabricadas pode contribuir para uma melhor tomada de

decisões por parte da inteligência artificial que pode vir a controlar o processo no futuro. Para além disso, existem certos tipos de descontinuidades na matéria-prima que podem comprometer a qualidade da peça fabricada e por isso, é necessário a implementação de sistemas que garantam a sua qualidade.

1.2 – Objetivo

O objetivo deste trabalho é estudar a correlação de descontinuidades presentes no fio de soldadura, que é a matéria-prima do processo WAAM, com descontinuidades que possam surgir nas peças fabricadas. Para isso será necessário avaliar a peça macro e microscopicamente e analisar os sinais emitidos pelas sondas de CI que monitorizam o processo.

Para além disso, um fio de soldadura oxidado e/ou com impurezas pode comprometer a sua inspeção por CI. Mais ainda, pode também levar ao aparecimento de defeitos nas peças fabricadas, pelo que, será necessário a conceção, o desenvolvimento e a produção de uma segunda versão do Engenho de Remoção de Óxidos e Impurezas (EROI V2).

1.3 – Metodologia

Iniciar-se-á todo o trabalho pela conceção e desenvolvimento do EROI V2. Começou-se pela identificação dos principais requisitos que a máquina terá de cumprir, tendo em conta também os problemas que a sua primeira versão enfrentou. De seguida foi desenvolvido o seu design concepcionalmente para depois ser efetuada a modelação tridimensional. Por fim, o EROI V2 será construído e testado. Para tal, alguns componentes eletrónicos foram escolhidos de acordo com as necessidades do projeto, alguns componentes metálicos foram fabricados por processos convencionais e outros componentes poliméricos foram fabricados com recurso ao FA de polímeros, mais concretamente, o *Fused Filament Fabrication* (FFF), permitindo produzir protótipos funcionais de forma rápida. A sua testagem envolverá a comparação entre o fio de soldadura antes e depois de limpo.

Um dos aspetos a melhorar no EROI passa também pelo redesenho da sua Unidade Motriz (UM) que auxilia a tração do fio de soldadura. Isto porque será necessário aumentar a sua rigidez, substituindo alguns componentes poliméricos por peças metálicas e de geometria mais simples.

Outra parte do trabalho a ser desenvolvido consiste no desenvolvimento de uma metodologia para se estudar os efeitos de descontinuidades no fio de soldadura que alimenta o processo de WAAM na qualidade dos componentes produzidos. Para tal, ter-se-á de desenvolver uma estratégia no que toca ao posicionamento das descontinuidades do fio de soldadura e escolher uma forma de avaliar a qualidade das peças produzidas. Com essa

finalidade, foram fabricadas paredes compostas por várias camadas em que as mesmas serão, posteriormente, maquinadas de modo a ser possível inspecionar visualmente o seu interior e, de seguida, será efetuado um raio-X para inspecionar o resto da espessura que não foi maquinada.

Para além disso, todas as discontinuidades efetuadas no fio de soldadura foram caracterizadas no microscópio e por uma sonda de CI para depois ser possível identificar com maior facilidade a relação causa-efeito.

Os diversos ensaios foram realizados com recurso a uma máquina de soldadura que funciona inserida numa plataforma automatizada que controla o movimento da tocha e os parâmetros do processo pré-estabelecidos pelo utilizador. Foram usadas duas plataformas: um braço robótico e a máquina triaxial de WAAM da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL).

Toda a atividade laboratorial e toda a produção e testagem do EROI V2 e dos seus componentes foi realizada nos laboratórios do Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) na FCT-UNL.

1.4 – Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos.

No Capítulo 1 é apresentada uma breve introdução e visão geral de temas que serão abordados nesta dissertação, a motivação para a realização deste trabalho e os seus objetivos. É também discutida a metodologia experimental a ser seguida para cumprir os objetivos.

No Capítulo 2 são aprofundados temas essenciais nos quais este estudo incide, sendo revisto o estado da arte que está dividido em diferentes subcapítulos. Começou-se por abordar os principais desenvolvimentos do FA, aquilo em que consiste e as suas diversas categorias (§2.1). Depois, dirige-se o foco para o WAAM, explicando o processo, identificando os seus principais parâmetros, os principais defeitos nas peças produzidas, tendo em conta a relação causa-efeito. Do mesmo modo, são apresentadas as suas variantes e últimos avanços tecnológicos. É abordada a importância da monitorização *in-line* de processos como este, explorando, de forma comparativa, as várias formas de o mesmo ser feito (§2.2). Para isso, será necessário rever os principais métodos de END, as vantagens e desvantagens de cada um e como isso se irá refletir no caso de ser aplicado no WAAM (§2.3). Sendo a CI um dos métodos mais adequados para a monitorização do WAAM, será explicado no que consiste este método de END e como o mesmo tem sido aplicado na monitorização do WAAM em diversos estudos já realizados no DEMI da FCT-UNL (§2.4).

O Capítulo 3 relata de forma sucinta e ilustrativa o processo de conceção do EROI V2, definindo os seus requisitos, identificando as suas principais características e componentes,

explica o seu funcionamento e como pode ser aplicado no contexto do WAAM ou de um simples processo de soldadura (§3.1). No fim deste capítulo, a sua construção é apresentada e descritos alguns testes efetuados à máquina (§3.2).

No Capítulo 4 é apresentada a metodologia experimental para se estudar a relação causa-efeito de descontinuidades no fio de soldadura que alimenta o processo de WAAM. Para isso, é descrito o modo como foram produzidas as descontinuidades no fio de soldadura (§4.1) e como foram fabricadas as paredes de WAAM com o mesmo fio de soldadura (§4.2).

No Capítulo 5 é analisada a eficácia do EROI V2 na limpeza de fio de soldadura (§5.1) e são observados os resultados experimentais, sendo os mesmos discutidos. Depois da validação do EROI V2, procede-se para a apresentação das paredes metálicas produzidas por WAAM (§5.2) e, de seguida, são expostos os resultados da inspeção efetuada às paredes no sentido de se detetar descontinuidades que estejam relacionadas com os defeitos produzidos no fio de soldadura. É efetuada uma maquinação por fresagem às paredes fabricadas de modo a reduzir a sua espessura e ser feita uma inspeção visual do seu interior, para depois, ser efetuado um raio-X (§5.3).

O Capítulo 6 apresenta as conclusões relacionadas com o EROI V2 (§6.1) e com o impacto que descontinuidades no fio de soldadura tenham na qualidade de peça fabricadas por WAAM (§6.2). Por fim, fazem-se sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros (§6.3).

Por último, nos Anexos, estão presentes mais informações e características acerca do EROI V2 e uma série de resultados laboratoriais relevantes para a leitura deste documento, nomeadamente o sinal da sonda de CI característico de cada descontinuidade produzida no fio de soldadura.

2 – REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

2.1 – Fabrico Aditivo

Os processos de fabrico permitem a transformação de matéria-prima em produtos e já existem desde a pré-história [1]. Entre 1,6 a 2,4 milhões de anos atrás, um dos primeiros hominídeos, o *Homo habilis* (homem habilidoso), já fabricava utensílios [2]. Atualmente, existem mais do que 300 processos de fabrico e estes podem ser agrupados em 4 grandes categorias como ilustra a Figura 2.1 [1].

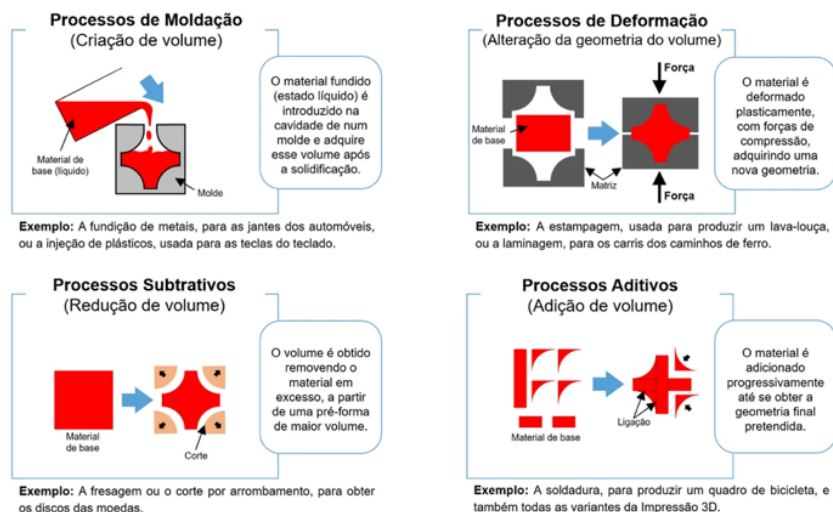


Figura 2.1 - Categorias dos processos de fabrico [1].

O Fabrico Aditivo (FA) ou Manufatura Aditiva (MA) tem vindo a revolucionar a indústria e mudou a maneira de pensar e de fazer Engenharia. Peças com complexidade geométrica que outrora eram difíceis ou praticamente impossíveis de se produzir por processos tecnológicos convencionais, agora são produzíveis através do FA [3]. Este consiste numa combinação de um sistema de movimento, uma fonte de calor e um material de adição, conseguindo reduzir os custos por peça porque minimiza o desperdício de material, quando comparado com o Fabrico Subtrativo [4]. Montagens complexas que contêm diversos componentes envolvem muitos passos na montagem, grandes cadeias de cotas e por isso, aplica-se um toleranciamento apertado. As mesmas são agora reduzidas a menos componentes, tendo como exemplo os injetores dos propulsores da NASA. Este é um dos componentes mais complexos da câmara de combustão de um propulsor e demoraria mais de um ano para ser produzido. Com esta nova abordagem, é possível produzir o mesmo em menos de quatro meses com uma redução de 70% no custo, onde agora será apenas necessário o fabrico de 2 peças em vez de 163, que depois teriam que ser todas montadas [5,6].

Esta é uma das razões pelas quais o FA, que muitas vezes é denominado pelo termo “Impressão 3D”, é um tópico que tem ganho muita popularidade. Estes processos, para além de versáteis e economicamente eficientes [7], permitem o fabrico de peças complexas, camada a camada de forma incremental, com microestruturas que não se encontram em processos de fabrico convencionais [3]. A partir da necessidade de adaptar o FA às várias situações diferentes e materiais de engenharia, têm sido feitos avanços tecnológicos, levando ao aparecimento de diversas variantes [3]. Estas variantes podem ser agrupadas em 7 grandes categorias do FA de acordo com a norma ISO 17296 [1]:

- **Material extrusion:** processo que deposita material camada a camada ao extrudi-lo através do orifício do bico de impressão que percorre um caminho pré-definido correspondente à secção transversal da peça [8,9]. Hoje em dia, é a categoria mais popular [1];
- **Vat photopolymerization:** processo que utiliza um fotopolímero líquido contido numa cuba (*vat*) que é depois processado seletivamente por uma fonte de energia (radiação ultravioleta) que cura regiões específicas da secção transversal da peça [1,8];
- **Material jetting:** processo que consiste na expelição de gotículas de material que são expostas à luz ultravioleta, promovendo a polimerização desse mesmo material [8];
- **Binder jetting:** através da deposição camada a camada de pó metálico, cerâmico ou polimérico, este processo consiste na aglomeração dos grãos através de líquido aglomerante que une tanto os grãos de pó da camada a ser processada como os da camada previamente processada [1,8];
- **Powder bed fusion:** processo que consiste na deposição camada a camada de pó metálico cuja fusão é feita com uma fonte de energia (laser, feixe de elétrons) focada no local que se pretende solidificar e que percorre toda a área da secção da peça que se está a fabricar [8];

- **Directed energy deposition:** mais indicado para grandes estruturas [1], este processo permite o fabrico de peças através da fusão do material (pó ou fio de soldadura) no instante em que é depositado, camada a camada, com a atuação de uma fonte de energia (arco elétrico, laser, feixe de eletrões) focada numa área que também funde parte da camada subjacente [8];
- **Sheet lamination:** cada lâmina de material representa uma camada da secção transversal da peça a ser fabricada em que as mesmas são unidas e nas quais, em cada camada, é cortado o contorno da peça [8].

Atualmente, é possível comprar uma impressora 3D de polímeros por cerca de 300 €, o que permite a um indivíduo conceber e fabricar as suas próprias peças sem sair de casa. Do ponto de vista industrial, o FA apresenta vantagens na produção de [1]:

- Protótipos funcionais;
- Ferramentas para outros processos;
- Peças finais personalizadas;
- Peças finais com elevada complexidade geométrica.

E pode ainda ter interesse em [1]:

- Operações intermédias ou complementares em peças iniciadas por outros processos;
- Operações de reparação;
- Situações de emergência.

Trata-se de um processo bastante automatizável, que integra *design* (CAD) e controlo numérico (CAM e CNC). Existem 4 passos fundamentais no decorrer do FA de uma peça, tal como está descrito na Figura 2.2:

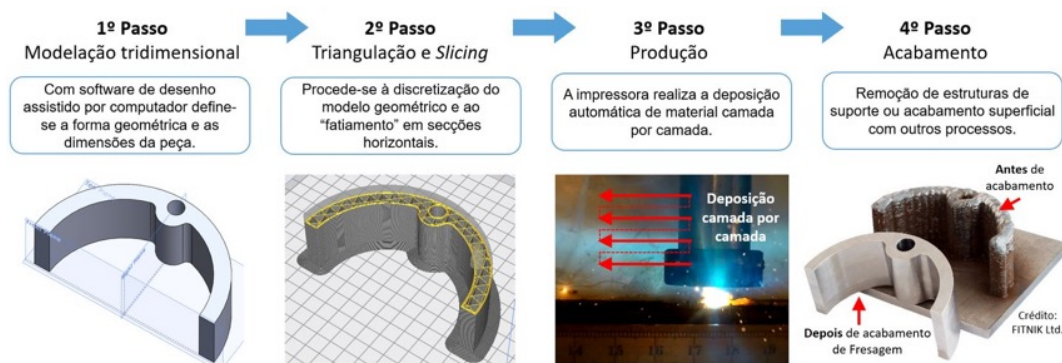


Figura 2.2 - Os 4 passos principais do FA com exemplo do processo WAAM [1].

Advindo do crescimento do FA, resultam obstáculos que precisam de ser ultrapassados. De entre vários desafios como: o aumento da taxa de deposição, o aumento da qualidade (rugosidade superficial e precisão geométrica) e a deteção de defeitos, existe ainda a falta de normas para controlo da qualidade e emissão de certificados [1].

2.1.1 - Fabrico aditivo de metais

Apesar de o FA também abranger materiais poliméricos [9], cerâmicos [10] e compósitos [11], o foco incide nos materiais metálicos visto que, o tema abordado nesta dissertação recai nesse grupo de materiais. Das várias categorias do FA, apenas algumas se aplicam aos metais, tal como se pode observar na Figura 2.3.

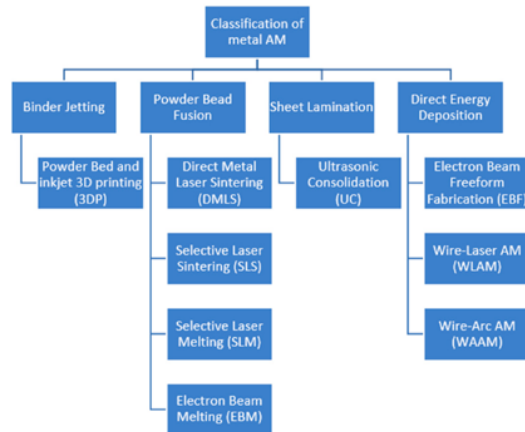


Figura 2.3 - Categorias do FA de metais [12].

Atualmente, os processos de FA baseados na fusão de materiais são mais focados em sistemas de sinterização de pó metálico com laser ou com feixe de eletrões como fontes de calor, isto é, sistemas *Powder Bed Fusion* (PBF). Dentro desta categoria encontra-se o *Selective Laser Melting* (SLM). Apesar da grande precisão dimensional e geométrica alcançada com estas técnicas, a taxa de deposição é reduzida e, visto que a matéria-prima é pó metálico, as peças fabricadas têm uma probabilidade maior de conter porosidade. Por outro lado, processos inseridos na categoria *Directed Energy Deposition* (DED), como o *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM), que usa o arco elétrico como fonte de calor e fio de soldadura como matéria-prima, permite o fabrico de peças estruturais de grandes dimensões. Ainda que, a precisão das peças produzidas por WAAM seja menor, a taxa de deposição é significativamente superior comparativamente a processos PBF [3].

O FA de metais normalmente envolve entregas térmicas e tensões residuais elevadas que podem provocar o empeno das peças devido a elevados gradientes de temperatura (distorção). Outros fatores a ter em consideração são: resolução máxima, qualidade superficial reduzida, propriedades mecânicas e materiais não uniformes (anisotropia) [13,14]. Para além disso, o acabamento superficial das peças varia consoante o processo de FA, pelo que, a fase de acabamento com recurso ao fabrico subtrativo, como ilustra a Figura 2.2, é necessária para melhorar esse aspeto, podendo aumentar a resistência à fadiga [15]. A maquinação das peças pode também ser necessária em faces funcionais para cumprir tolerâncias apertadas e ainda para a remoção de apoios [13,14].

2.2 – Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)

De acordo com a norma ASTM F2792-12a, o WAAM é inserido na categoria DED e é definido como a combinação de um arco elétrico, usado como fonte de calor, e de um fio de soldadura empregue como matéria-prima do processo [3]. Este assenta nos conceitos fundamentais de processos de soldadura como: *gas metal arc welding* (GMAW) [16], *plasma arc welding* (PAW) [17] e *gas tungsten arc welding* (GTAW) [3,16]. Tal como está representado na Figura 2.4, o seu funcionamento consiste na deposição de material camada a camada e no instante em que é depositado, é fundido pela energia transmitida pelo arco elétrico que se estabelece entre o eléctrodo e o substrato.

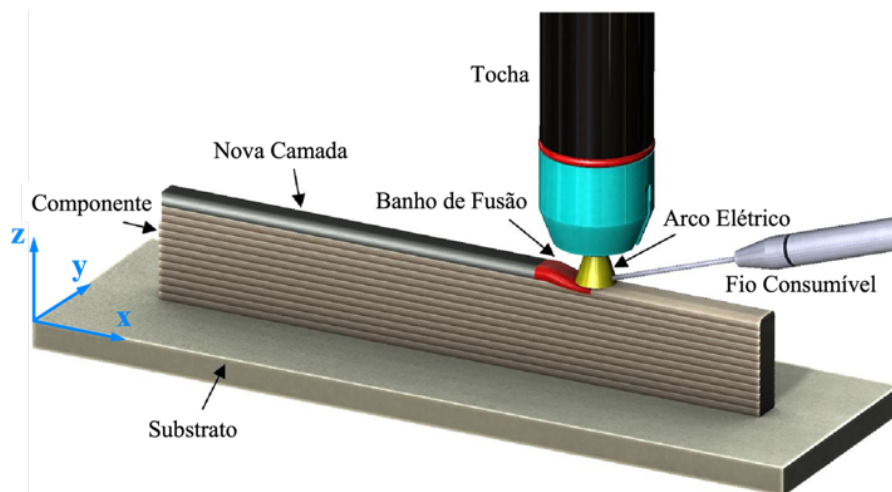


Figura 2.4 - Ilustração do processo WAAM na variante GTAW com sistema de coordenadas. Adaptado de [19].

O GMAW (nomenclatura americana), ou *metal inert gas* (MIG) / *metal active gas* (MAG) (nomenclatura europeia), é o processo mais utilizado no WAAM pois o fio de soldadura é o próprio eléctrodo e a sua coaxialidade com a tocha resulta num percurso mais simples da ferramenta [3,4]. Os principais parâmetros deste processo são [3,18]:

- Intensidade de corrente [A];
- Tensão [V];
- Temperatura entre camadas [T°];
- Mistura do gás de proteção (Ar, He, CO₂, O₂, N₂, H₂) [21];
- Caudal do gás de proteção [l/min];
- Distância entre o eléctrodo consumível e a peça [mm];
- Velocidade de alimentação do eléctrodo consumível [m/min];
- Velocidade de avanço da tocha [mm/s];
- Tipo de arco elétrico (pulsado ou contínuo);
- Ângulo da tocha [°];
- Diâmetro do fio de soldadura [mm].

Os ajustes destes parâmetros permitem o controlo de propriedades micro e macroscópicas das peças fabricadas, por exemplo:

- Valores elevados da velocidade de avanço da tocha conduzem a uma maior ondulação;
- O aumento da velocidade do fio de soldadura leva ao aumento da altura da camada [22];
- O aumento da velocidade de avanço da tocha diminui a largura da camada [22];
- O aumento a velocidade de avanço da tocha em conjunto com a diminuição da intensidade de corrente conduz ao aumento da rugosidade [22].

Esta técnica permite o rápido fabrico de grandes componentes metálicos devido às suas elevadas taxas de deposição (15 a 160 g/min) [3,4,20]. O custo reduzido do equipamento (relativamente a outros equipamentos de FA) aliado ao reduzido desperdício de material, torna-o numa alternativa mais sustentável a nível económico e ambiental [4,7]. Para além disso, o WAAM é um processo altamente automatizável como se pode observar pela Figura 2.5.



Figura 2.5 - Exemplo do FA por WAAM de pás de turbinas e da automatização do processo [24].

2.2.1 - Defeitos característicos do WAAM

As peças fabricadas por WAAM podem conter um conjunto de defeitos característicos deste processo que são:

Qualidade superficial:

Como está representado na Figura 2.6 a) e b), a típica ondulação presente principalmente nos aços é problemática para o cumprimento dos requisitos dimensionais e tem de ser removida se a peça estiver sujeita a cargas cíclicas. Para além da ondulação, a elevada rugosidade também é um defeito característico deste processo, tal como está representado na Figura 2.6 b). Convém que a mesma seja controlada pois promove a nucleação de fissuras superficiais, reduzindo a resistência à fadiga da peça [7].

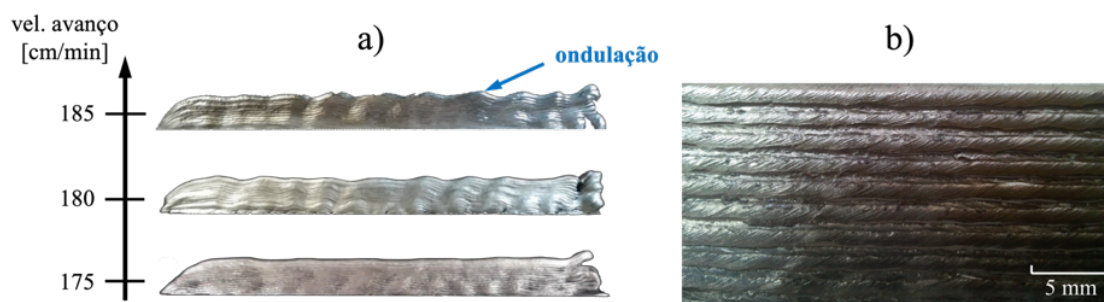


Figura 2.6 - Qualidade superficial de peças fabricadas por WAAM:
a) ondulação em função da velocidade de avanço. Adaptado de [25]; b) ondulação lateral e rugosidade [26].

Por isso, pode-se proceder ao pós-processamento dessas superfícies através da fresagem, em que velocidades de corte elevadas e avanços por dente reduzidos conduzem à redução da rugosidade superficial do componente [7,27]. Os próprios parâmetros do processo de WAAM têm influência no processo de corte por arranque de apra, podendo aumentar a maquinabilidade das peças fabricadas [27]. Xiong et al. demonstraram que uma velocidade de alimentação do fio de soldadura reduzida combinada com uma velocidade de avanço da tocha reduzida pode melhorar a qualidade superficial [26].

Porosidade:

Presente principalmente em ligas de alumínio [28], no WAAM pode reduzir a ductilidade e a resistência à fadiga da peça, respetivamente, em 60 % e 33 % comparativamente a peças sem porosidade [29]. Advindo da contaminação do fio de soldadura ou da incorreta aplicação do gás de proteção, a porosidade pode ocorrer em ligas de titânio nas quais a dimensão dos poros pode aumentar com o aumento da carga cíclica, promovendo a concentração de tensões, levando à falha catastrófica do componente [30,31]. A Figura 2.7 apresenta uma imagem microscópica da morfologia da fratura num dos componentes compostos por Ti-6Al-4V fabricados por WAAM onde se pode observar que as fissuras se iniciaram no poro [31].

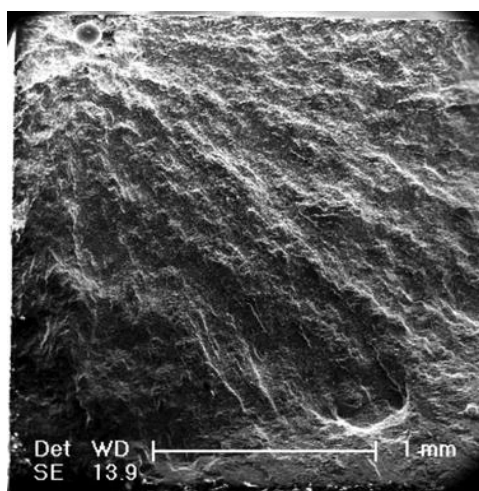


Figura 2.7 - Fotografia tirada num microscópio eletrónico de varrimento (SEM) que revela a iniciação da fissura num poro (canto superior esquerdo) [31].

A causa dominante para a existência de porosidade, tanto no WAAM como em processos de soldadura, é a existência de gás que, durante a solidificação, não escapa para a atmosfera, ficando aprisionado no material sólido e dando assim origem aos poros com forma esférica [32]. Existem vários estudos que concluem que a contaminação do fio de soldadura é uma das principais causas da ocorrência deste fenómeno, visto que o hidrogénio está presente nas substâncias contaminantes [29–32]. Ryan et al. estudaram o impacto da qualidade superficial do fio de soldadura na presença de porosidade em peças fabricadas por WAAM. Verificou-se que uma rugosidade elevada do fio de soldadura resulta numa intensificação da porosidade, sugerindo que riscos e indentações no fio são locais de acumulação de contaminantes que contêm hidrogénio e que podem instabilizar o arco elétrico. A sua instabilização pode levar à inclusão do gás de proteção no banho de fusão [32]. Um fio de soldadura com a superfície oxidada resulta no aumento da porosidade e a escolha de um modo de transferência adequado pode diminuí-la [33].

Fissuração:

Consiste numa descontinuidade no material, é um defeito comum em peças bimetálicas fabricadas por WAAM devido aos diferentes coeficientes de dilatação térmica de ambos os metais [34]. Este processo de FA envolve vários ciclos térmicos (aquecimento/arrefecimento) devido à deposição das sucessivas camadas de material, onde o elevado gradiente térmico pode levar à acumulação de tensões no material que são aliviadas com a formação de fissuras [35]. Shen et al. mostraram que, para uma temperatura entre camadas reduzida, fissuras longitudinais formaram-se na zona inferior da parede de WAAM composta por uma liga intermetálica Fe₃Al, perto do substrato, como está ilustrado na Figura 2.8 [36].

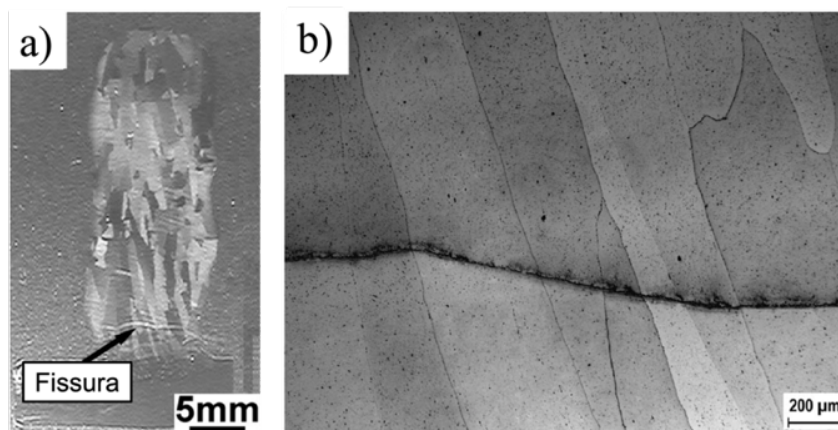


Figura 2.8 – Fissura presente na parte inferior de uma parede de WAAM (perto do substrato) composta por uma liga intermetálica Fe₃-Al:
a) vista da secção da parede; b) fotografia microscópica tirada num MEV da mesma fissura. Adaptado de [36]

A fissuração na solidificação geralmente é intergranular e ocorre na última fase da solidificação na qual a reduzida fração de líquido está posicionada entre as dendrites, causando a separação de grãos sólidos que, na presença de tensões residuais, leva à fissuração a quente (*hot cracking*) [37]. Por isso, é importante reduzir tensões residuais nas peças fabricadas por

WAAM porque também pode provocar outro defeito, a distorção, apresentado já de seguida. Mais ainda, o refinamento do grão aumenta a resistência da soldadura à fissuração [37], e o pré-aquecimento do substrato pode ajudar a mitigar as tensões residuais e por conseguinte, a fissuração [3].

Distorção:

A distorção é um defeito macroscópico que consiste na deformação curvilínea da peça podendo percorre-la na sua totalidade, o que resulta no não cumprimento de toleranciamento geométrico, tal como está representado na Figura 2.9. A elevada taxa de deposição e elevada entrega térmica de processos de FA cujo material base é um fio de soldadura geralmente resulta em elevadas tensões residuais e, conseqüentemente, na distorção das peças fabricadas [13]. Park et al. mostraram que as propriedades do material como a densidade, o calor específico e a condutividade térmica afetam a distorção angular presente em peças produzidas por WAAM para qualquer valor de entrega térmica [38]. Por sua vez, a entrega térmica, Q [kJ/mm], depende da diferença de potencial, V [V], da intensidade de corrente, I [A], e da velocidade de avanço da tocha, v [mm/s], e é dada pela Equação 2.1.

$$Q = \frac{U \times I}{v} \quad (2.1)$$



Figura 2.9 – Distorção numa peça fabricada por WAAM devido a tensões residuais. Adaptado de [39].

Na literatura estão presentes estudos acerca de métodos de elementos finitos que permitem a simulação da distorção de peças produzidas por WAAM. Estas simulações têm presentes tanto as propriedades do material como os parâmetros do processo e são uma ferramenta para aproximar os parâmetros do processo á solução ideal antes de se proceder para o fabrico da peça [40].

Ley et al. determinou que, no processo MIG/MAG, um reduzido fluxo de gás de proteção contendo hélio resulta numa menor distorção da soldadura [41]. Um aumento do número de grãos no material e da espessura da parede permite que a peça suporte tensões residuais, resultando numa distorção menos acentuada [42].

Delaminação:

Tal como a distorção e a fissuração, a delaminação advém de tensões residuais que se acumulam na peça devido ao gradiente térmico e aos ciclos térmicos sucessivos que ocorrem durante o processo de WAAM. Esta consiste na separação de duas camadas sucessivas devido à falta de fusão entre ambas e pode resultar de temperaturas de deposição inapropriadas. Peças compostas por materiais bimetálicos também são mais suscetíveis de sofrer delaminação [43,44]. A Figura 2.10 demonstra o uso de líquidos penetrantes para a deteção de falta de fusão entre camadas.



Figura 2.10 – Utilização do método dos líquidos penetrantes que evidencia a falta de fusão entre camadas numa peça fabricada por WAAM [45].

A fim de se evitar a ocorrência tanto da delaminação, como da fissuração, deve-se pré-aquecer o substrato antes do início da deposição e/ou diminuir a taxa de arrefecimento durante a deposição [43].

2.2.2 - Microestrutura e variantes do WAAM

De um modo geral, qualquer material disponível na forma de arame para soldadura pode ser usado no WAAM, tornando-se isto numa vantagem porque lhe confere uma grande variedade de materiais, sendo que, os mais usados são: aço, alumínio, titânio e ligas de níquel [3]. Mais ainda, o WAAM permite o fabrico de peças compostas por materiais bimetálicos [46], e peças compostas por dois ou mais materiais distintos (peça multimaterial) que seriam desafiadoras de se produzir por processos convencionais de fundição [47].

O uso de tecnologias de FA para o fabrico de componentes leva a um historial complexo do ciclo térmico, resultando em alterações na microestrutura do componente [48]. Uma camada depositada irá refundir parte da camada inferior e ainda terá uma zona termicamente afetada (ZTA). Por vezes, tratamentos térmicos convencionais não têm os efeitos esperados em peças fabricadas por FA porque existem microestruturas diferentes ao longo da peça.

A entrega térmica do processo tem impacto no gradiente térmico, na nucleação e no crescimento do grão. Para além disso, com o crescimento da parede ao longo do processo de fabrico, o fluxo de calor para o substrato diminui, provocando uma prolongação do processo de solidificação [49], o que leva ao aumento do tamanho do grão (coalescência) ao longo da altura da peça (direção de fabrico) e, conseqüentemente, resulta numa diminuição da dureza no mesmo sentido, como demonstra a Figura 2.11. Note-se que para uma entrega térmica maior, o gradiente de dureza ao longo da direção de fabrico da peça é maior [50]. O pré-aquecimento do substrato é um método para uniformizar o gradiente de temperatura ao longo do fabrico da peça [3]. Outro aspeto a ter em consideração é a formação de grãos colunares em peças fabricadas por WAAM. Cada camada depositada terá, na sua zona inferior, a nucleação de grãos colunares devido ao gradiente térmico cuja direção determina a direção do crescimento dos grãos colunares que se pode prolongar por várias camadas depositadas [51]. Elevadas entregas térmicas e reduzidas taxas de arrefecimento promovem a nucleação de grãos colunares de grandes dimensões, resultando em anisotropia [3].

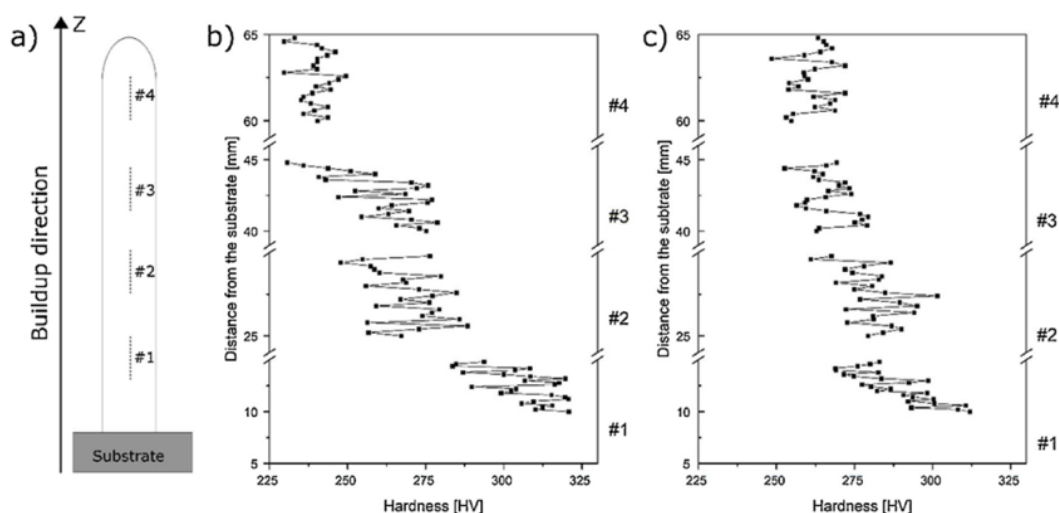


Figura 2.11 – Variação da dureza ao longo da direção de fabrico de uma parede produzida por WAAM:
 a) representação esquemática das indentações efetuadas para medição da dureza;
 b) entrega térmica elevada; c) entrega térmica reduzida [50].

Existem variantes do processo WAAM que aplicam deformação plástica durante o processo de fabrico em cada camada, levando ao refinamento homogéneo do grão através da recristalização dinâmica (nucleação de novos grãos com ação de temperaturas e cargas elevadas), melhorando as propriedades mecânicas, agora mais próximas da isotropia. Exemplos são: o *Interpass Rolled WAAM* [52] e o *Hot Forging WAAM* [53]. Estas técnicas podem reduzir tensões residuais e a distorção das peças após o seu fabrico [54], diminuir a porosidade através do colapso dos poros [55] e permitem o controlo da geometria das paredes fabricadas [56].

Também foram desenvolvidas outras variantes que não usam deformação plástica, tais como:

- *Hot-wire* WAAM (HWAAM), consiste no uso de outra fonte de calor que aquece o fio de soldadura, assistindo na sua fusão e é uma alternativa eficiente ao refinamento do grão em ligas de titânio [3,57];
- *Micro WAAM* (μ -WAAM), surge da necessidade de aumentar a precisão dimensional e geométrica de maneira a competir com tecnologias PBF e, simultaneamente, aumentar a taxa de deposição no fabrico deste tipo de componentes [58].
- *Ultracold*-WAAM (UC-WAAM), neste caso, o arco elétrico é estabelecido entre o fio de soldadura e um eléctrodo não consumível de tungsténio, o que resulta numa diminuição da temperatura do processo porque a corrente elétrica não percorre a peça a ser fabricada. Esta situação pode ter um impacto significativo em materiais cujas propriedades sejam mais sensíveis aos ciclos térmicos. Também permite o fabrico de peças ocas [59].

Mais ainda, há variantes de soldadura também desenvolvidas e aplicadas no WAAM:

- *Cold Metal Transfer* (CMT), uma variante do MIG/MAG que consiste num processo avançado de transferência de material para o banho de fusão e permite uma deposição do material fundido mais controlada e uma redução da entrega térmica [3,33];
- *Tandem* GMAW, onde dois fios consumíveis alimentam a tocha para serem depositados no banho de fusão [3,23];

Existem vários tratamentos térmicos exequíveis em peças fabricadas por WAAM que poderão, não só aliviar tensões residuais, assim como, promover o refinamento do grão, que diminui a anisotropia, e melhora as propriedades mecânicas da peça [3]. Tratamentos mecânicos como a granalhagem encruam a superfície da peça, evitando a propagação de microfissuras porque são induzidas tensões de compressão na superfície da peça.

2.3 – Ensaio Não Destrutivos

De acordo com *American Society for Non-destructive Testing* (ASNT), um Ensaio Não Destrutivo (END) é definido como: “O processo de inspecionar, testar ou avaliar materiais, componentes ou montagens na busca por descontinuidades ou diferenças em características sem comprometer a funcionalidade da peça ou do sistema inspecionado” (tradução livre retirada de [60]). Uma descontinuidade será um defeito se, e só se, colocar em causa o bom funcionamento do componente. A mesma é caracterizada pela sua morfologia, localização e dimensão e é em função destas três características que é tomada a decisão de aceitar ou rejeitar a peça inspecionada.

Atualmente, os END são usados antes, durante e depois do fabrico de componentes. Também são usados em montagens de várias peças e quando as mesmas estão em

funcionamento, de maneira a garantir a integridade e fiabilidade do produto, controlar o processo de fabrico, reduzir custos de produção e manter um nível da qualidade uniforme. A Tabela 2.1 lista os nomes dos principais métodos de END e as capacidades e limitações de cada um [45,60–64]:

Tabela 2.1 – Principais Métodos de END e as suas capacidades e limitações.

Método de END	Vantagens e Capacidades	Desvantagens e Limitações
Inspeção Visual	Descontinuidades superficiais macroscópicas Fácil de aplicar	Pequenas descontinuidades são difíceis de detetar Não deteta descontinuidades subsuperficiais Necessita de pré-processamento da superfície a analisar
Líquidos Penetrantes	Descontinuidades superficiais Fácil de aplicar Geometrias complexas Aplicável a diversos materiais Económico	Não deteta descontinuidades subsuperficiais e internas Peças com elevada rugosidade superficial Necessita de pré-processamento da superfície a analisar Não é automatizável
Partículas Magnéticas	Descontinuidades superficiais e subsuperficiais. Fácil de aplicar Económico	Apenas funciona em materiais ferromagnéticos (exemplo: ligas de aço, níquel e cobalto) Necessita de pré-processamento da superfície a analisar Não é automatizável
Radiologia	Descontinuidades superficiais, subsuperficiais e internas; Acessível a várias superfícies; Não necessita de contacto com a superfície	Fissuras cujo plano não é paralelo à direção de propagação da radiação Pode ser perigoso para a saúde Necessidade de acesso a ambos os lados Não adequado para automatização Técnica dispendiosa e morosa
Ultrassons	Descontinuidades subsuperficiais e internas Pode ser usado na maioria dos materiais Acesso apenas a uma superfície	Pode necessitar de líquido acoplante Diversas técnicas não são aplicáveis a elevadas temperaturas
Termografia	Descontinuidades superficiais, subsuperficiais e internas Monitorização <i>in-line</i> Acesso apenas a uma superfície Pode estar afastado da peça a inspecionar Inspeção de áreas maiores	Equipamento dispendioso Requer o aquecimento do componente Pode ser necessário o pré-processamento da superfície a inspecionar
Correntes Induzidas	Descontinuidades superficiais e subsuperficiais Elevada sensibilidade Não requer contacto com a peça (mas tem de estar muito próximo) Inspeção a velocidades elevadas Automatizável	Por vezes difícil de interpretar Apenas para materiais condutores Sensível ao posicionamento da sonda Não deteta descontinuidades internas Superfícies rugosas podem inviabilizar o usos desta técnica

2.3.1 - Ensaios Não Destrutivos no âmbito do WAAM e monitorização *in-line*

A combinação do processo WAAM com um processo de fabrico subtrativo integrado é uma solução viável para produzir peças de maneira eficiente [3], como por exemplo, o projeto *Large Additive/Subtractive Integrated Modular Machine* (LASIMM) [65]. Uma máquina deste tipo, não só permitiria obter uma peça com a fase de acabamento praticamente concluída, como também seria possível remover material com defeitos durante o processo aditivo e reprocessar essa mesma zona, evitando o desperdício de peças já fabricadas [4,66]. Para atingir essa finalidade, é importante integrar END e sistemas sensoriais no equipamento para avaliar as peças enquanto estão a ser fabricadas (monitorização *in-line*) [3].

Um dos principais desafios atuais no WAAM é a falta de métodos e normas de certificação que garantam que as peças fabricadas estejam aptas a desempenhar a função para a qual são projetadas. A integração de END com o FA enfrenta diversos desafios como a complexidade das peças fabricadas, elevada porosidade (e ondulação no WAAM) e defeitos internos. No caso da monitorização *in-line*, alguns métodos de END não podem ser utilizados devidos às elevadas temperaturas do material depositado [45].

No âmbito do WAAM, a inspeção visual, o método dos líquidos penetrantes e das partículas magnéticas, apesar de poderem auxiliar na validação de outros métodos END como em [45], não são métodos que possam ser usados na perspetiva da monitorização *in-line* porque não são automatizáveis, requerem tempo para serem efetuados e não podem ser aplicados durante o processo de fabrico. Para além disso, a elevada rugosidade e ondulação das peças fabricadas por WAAM pode dificultar a deteção de descontinuidades superficiais quando se recorre a estes métodos.

Lopez et al demonstraram que os raio-X e os ultrassons são técnicas que podem ser aplicadas numa inspeção pós-fabrico (*off-line*) [45]. As descontinuidades foram facilmente detetadas pelo raio-X ainda que, sejam necessárias várias radiografias de diferentes ângulos para se identificar todas as descontinuidades. O END por ultrassons é uma técnica fiável para a deteção de descontinuidades em peças fabricadas por WAAM, porém, apesar de permitir a localização das descontinuidades, não revela o seu tipo. A falta de fusão entre camadas, se atingir elevadas proporções, pode bloquear por completo a passagem do som, refletindo-o, e desta forma, não permitindo a inspeção em toda a profundidade da peça. Por conseguinte, estes dois métodos em conjunto com a inspeção visual e líquidos penetrantes são técnicas que se complementam [45]. Todavia, nenhum método radiológico é aplicável à monitorização *in-line*, nem técnicas convencionais de ultrassons porque é necessário líquido acoplante e contacto da sonda com a peça. Técnicas avançadas de ultrassons como os transdutores acústicos eletromagnéticos (EMAT) e ultrassons por laser (LU) podem ser viáveis para uma monitorização *in-line* [45,67,68].

A termografia tem a vantagem de poder monitorizar o processo de fabrico *in-line* a uma certa distância [45]. Dongqing et al. usaram uma câmara de infravermelhos para capturar a temperatura superficial da superfície da peça à medida que várias camadas iam sendo depositadas. Concluíram que esta variante dos END é adequada para processos de FA baseados em MIG/MAG e que o intervalo de arrefecimento entre cada camada depositada leva à melhoria da qualidade das paredes fabricadas [69]. Já foi referido que, no decorrer do processo de WAAM, a variação da temperatura tem um papel importante na microestrutura do material e, conseqüentemente, nas propriedades mecânicas da peça. Logo, o seu controlo *in-line* poderá contribuir para o controlo da microestrutura final do material depositado. Ainda assim, a termografia pode conduzir a interpretações erradas porque podem ocorrer variações de emissividade, visto que, durante o processo é inviável pintar a parede com uma tinta negra [62].

O método das CI permite efetuar inspeções a velocidades elevadas, não comprometendo assim a elevada taxa de deposição do WAAM e, tal como a termografia, não existe a necessidade de contacto entre a peça a ser inspecionada e a sonda. Não obstante, enfrenta algumas dificuldades como a elevada rugosidade e ondulação da superfície das peças que causa flutuações no *lift-off* e não deteta defeitos internos devido ao efeito de pele. Bento et al concluíram que esta variante de END é uma solução promissora para uma monitorização *in-line* do processo WAAM [66].

Existem mais métodos de monitorização *in-line* no processo de WAAM que foram estudados nos últimos anos. Ramalho et al. demonstraram que a análise no domínio do tempo e da frequência do espectro acústico emitido no decorrer do processo de WAAM pode identificar a presença de contaminantes na peça a fabricar e que, em trabalhos futuros, se irá integrar com a inteligência artificial, a fim de se detetar os defeitos [70]. A espectroscopia de emissão ótica do arco elétrico no WAAM foi estudada em [71] e permitiu detetar a presença de contaminantes na peça durante o seu fabrico que causaram a formação de poros. Outro método consiste em sistemas óticos de monitorização *in-line*. Xiong et al. demonstraram que, através da combinação de um sistema de câmaras CCD com filtros, inteligência artificial e um sistema de controlo em anel fechado, é possível controlar a largura da camada depositada durante o processo [72]. A monitorização dos próprios parâmetros do processo podem auxiliar na deteção de anomalias. Por exemplo, um sensor de oxigénio permitirá perceber se o gás de proteção está a ser corretamente aplicado em qualquer instante do processo de fabrico. Um sistema multissensorial que meça a tensão, intensidade de corrente, velocidade de avanço da tocha, entre outros, permite perceber se estes parâmetros estão nos valores pretendidos, contribuindo para a melhoria da qualidade do FA por WAAM [39]. A posição do próprio fio de soldadura à saída da tocha pode afetar a estabilidade do arco e o modo de transferência, promovendo o aparecimento de defeitos. A monitorização da posição do fio pode evitar esta situação [73].

A integração conjunta destes métodos de monitorização *in-line* do processo WAAM, aliada à inteligência artificial e a sistemas para processamento de *Big Data* (SPBD), pode conduzir à consistência da qualidade dos componentes fabricados, resultando numa maior adoção do

WAAM pela indústria e no estabelecimento de normas e certificados que este processo de FA tanto necessita. Na Figura 2.12, pode-se observar um diagrama de um sistema que integra múltiplos sistemas sensoriais para uma monitorização *in-line* mais robusta e completa.

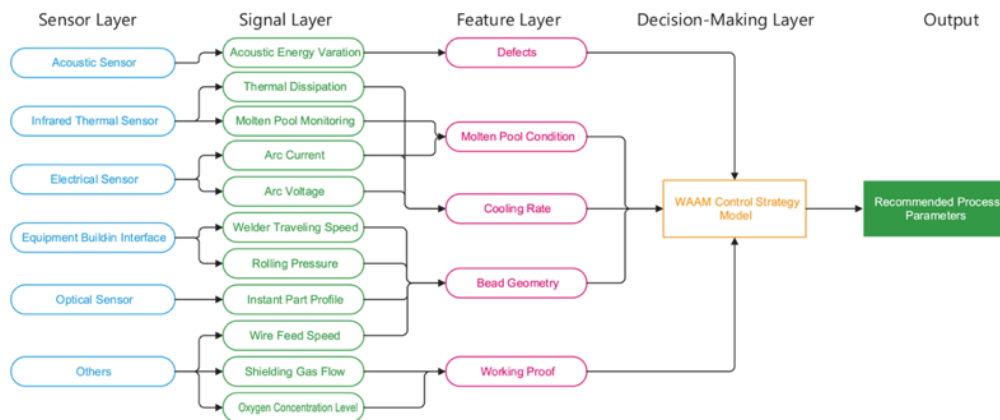


Figura 2.12 – Diagrama de um sistema multissensorial para monitorização *in-line* no WAAM [39].

Ainda assim, existem poucos estudos na literatura que relacionem a condição do fio de soldadura e a sua monitorização *in-line* com a qualidade das peças fabricadas por WAAM. De todos os métodos de monitorização e variantes de END aqui apresentadas, as CI são a variante mais adequada no âmbito da monitorização *in-line*, visto que, é uma variante bastante automatizável, permite rápidas velocidades de inspeção, é sensível à presença de descontinuidades, não requer contacto com o componente e as sondas são bastante customizáveis, adaptando-se facilmente às várias situações de inspeção. Portanto, o Subcapítulo 2.4 é dedicado a esta variante de END.

2.4 – Correntes Induzidas

As correntes induzidas (CI) são um método de END que se insere no grupo de inspeção por eletromagnetismo. Permite a deteção de descontinuidades superficiais e subsuperficiais e permite a caracterização de materiais condutores elétricos. Consiste na excitação de uma bobina com uma corrente alternada numa frequência definida (tipicamente 10 Hz a 10 MHz), gerando um campo magnético primário alternado (H_p). A bobina, quando próxima da peça a ser inspecionada, induz uma corrente elétrica na peça condutora que, por sua vez, cria um campo magnético secundário (H_s) que contraria o campo magnético primário e provoca uma variação de impedância, tal como está representado na Figura 2.13 a) [60,64]. Como se observa na Figura 2.13 b), na presença de uma descontinuidade, as correntes induzidas são obrigadas a contorná-la, resultando numa alteração do campo magnético secundário, que por sua vez, resulta numa alteração da corrente induzida na bobina, refletindo-se este fenómeno numa variação de impedância [64], como ilustra a Figura 2.14.

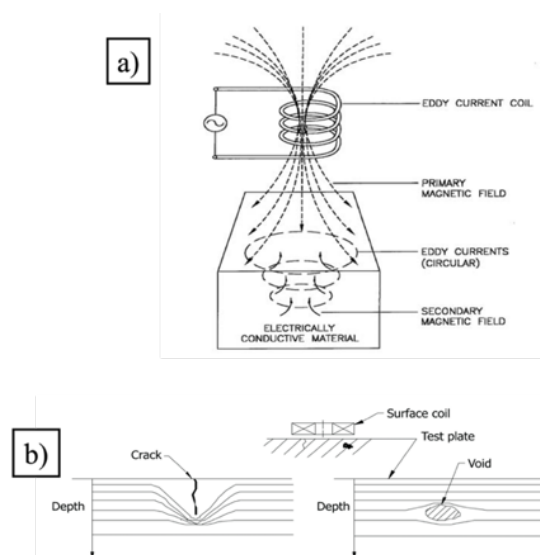


Figura 2.13 – Ensaio Não Destrutivo por Correntes Induzidas:
 a) princípio de funcionamento das correntes induzidas;
 b) efeito de uma fissura e de um vazio nas correntes induzidas [74].

Variações de material, geometria, revestimento, microestrutura, permeabilidade magnética e condutividade elétrica também irão provocar uma variação de impedância que pode ser lida no equipamento, como apresenta a Figura 2.15. Como é referido na Tabela 2.1, este é um processo bastante automatizável [63,64].

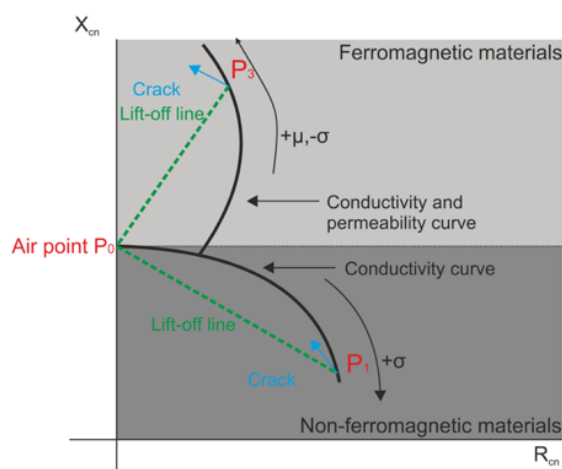


Figura 2.14 – Plano de impedância para materiais ferromagnéticos e não-ferromagnéticos [76].

A densidade das CI não é uniforme ao longo da profundidade da peça. São mais densas à superfície e a sua intensidade diminui exponencialmente com a profundidade. Este fenómeno é conhecido como efeito de pele (*skin effect*) [74]. A Equação 2.2 permite calcular a densidade de corrente a determinada profundidade de penetração, I_δ [$A \cdot m^{-2}$], em função dos seguintes parâmetros: profundidade de penetração, δ [m], frequência de excitação, f [s^{-1}], permeabilidade magnética, μ [$H \cdot m^{-1}$], condutividade elétrica, σ [%IACS], e densidade de corrente à superfície, I_0 [$A \cdot m^{-2}$].

$$I_\delta = I_0 \cdot e^{-x\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (2.2)$$

É definido que a profundidade de penetração, δ [m], corresponde ao valor de profundidade para o qual a intensidade de corrente vale 37% da intensidade de corrente à superfície, ou seja, pela Equação 2.3 tem-se que:

$$\frac{I_{\delta}}{I_0} = e^{-1} \approx 37\% \quad (2.3)$$

Substituindo o resultado da Equação 2.3 na Equação 2.2, resulta a Equação 2.4 que permite calcular a profundidade de penetração das CI:

$$\delta_{(f,\mu,\sigma)} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.4)$$

Pela Equação 2.4 é possível observar que a profundidade de penetração depende, não só, de propriedades do material, mas também, da frequência de excitação que se pode controlar. A Figura 2.16 a) apresenta um gráfico com a variação da profundidade de penetração em função da frequência de excitação para diferentes permeabilidades magnéticas, onde é possível observar que o efeito de pele diminui, não só com a diminuição da frequência de excitação, como também com o aumento da permeabilidade magnética do material. A Figura 2.16 b) ilustra a distribuição das CI em profundidade. A Figura 2.17 apresenta duas simulações numéricas de CI com duas frequências de excitação distintas nas quais se pode observar uma diferença significativa na profundidade de penetração.

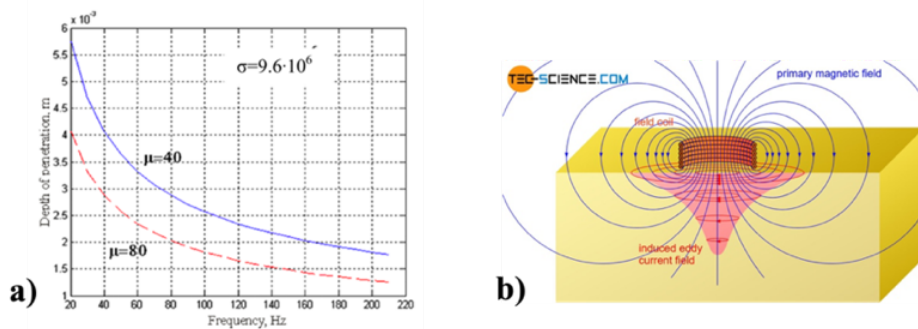


Figura 2.15 - Variação das CI com a profundidade:

- a) variação da profundidade de penetração em função da frequência de excitação para diferentes permeabilidades magnéticas [77];
- b) distribuição das correntes induzidas em profundidade [78].

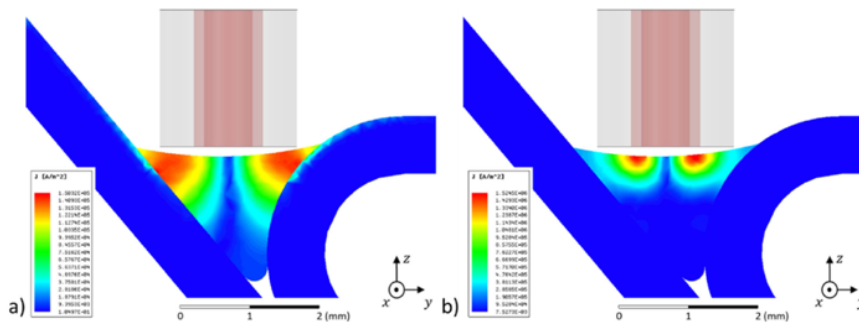


Figura 2.16 – Simulação numérica para correntes induzidas: a) 250 kHz; b) 2 MHz [61].

As CI, tal como qualquer outro método de END, tem algumas limitações, nomeadamente:

- **Efeito de bordo (*edge effect*):** é um fenómeno que ocorre quando a sonda se encontra próxima dos bordos da peça inspecionada. Como se pode observar na Figura 2.18, as CI não podem escapar da peça para o ar, levando à distorção das mesmas, o que resulta numa variação da impedância. A distância a que o efeito de bordo está presente é aproximadamente o triplo do diâmetro da sonda de inspeção, no caso de ter um formato em espiral [76]. Este fenómeno pode induzir o operador em erro, pensando tratar-se de uma descontinuidade.

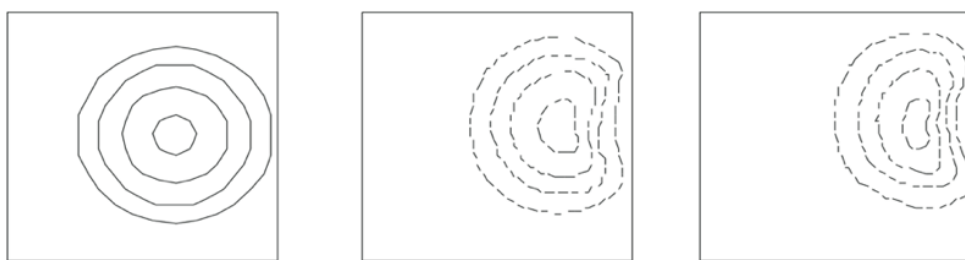


Figura 2.17 – Ilustração do efeito de bordo nas correntes induzidas [74].

- **Lift-off:** é a distância entre a sonda e o componente inspecionado, a sua variação provoca variações na impedância elétrica da bobina que podem ser superiores às que advém de descontinuidades no componente. Este fenómeno também é indesejável porque aumenta o ruído no sinal. Pode ser causado por variações na espessura do revestimento, superfícies irregulares ou movimento irregular da sonda provocado pelo operador [76].
- **Posição da descontinuidade:** No caso da descontinuidade ter a mesma direção que as CI, tal como se observa na Figura 2.19, a deflexão das CI é muito reduzida, podendo esta descontinuidade passar despercebida durante a inspeção [79].

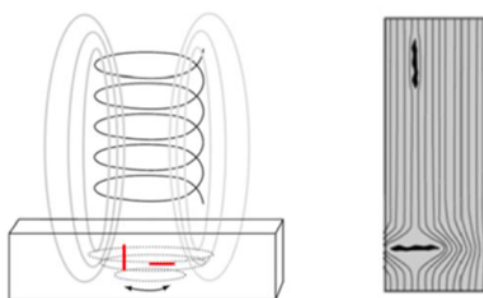


Figura 2.18 – Deflexão das correntes induzidas causada por descontinuidades com diferentes orientações [79].

Existe uma grande variedade de tamanhos e de formatos de sondas de CI que podem ser classificadas consoante a sua configuração e modos de operação. A configuração da sonda consiste na geometria da bobina, número de espiras e adaptação à peça inspecionada. O modo de operação consiste na maneira como as bobinas estão enroladas e qual a sua disposição espacial, podendo ter quatro classificações [79,80]:

- **Sondas Absolutas:** normalmente operam com apenas uma bobina que gera as CI (bobina de excitação) e que simultaneamente é recetora, analisando-se a variação de impedância total da bobina, tal como ilustra a Figura 2.20 a) e c). Este modo de operação confere às sondas uma maior versatilidade, podendo ser usadas na deteção de descontinuidades, medições de condutividade, de *lift-off* e de espessura. Como apresenta a Figura 2.20 b), estas sondas poderão estar equipadas com uma bobina no ar, afastada da peça testada, de maneira a diminuir a sensibilidade da sonda a variações de temperatura. A esta sonda dá-se o nome de sonda de ponte absoluta [79,80].

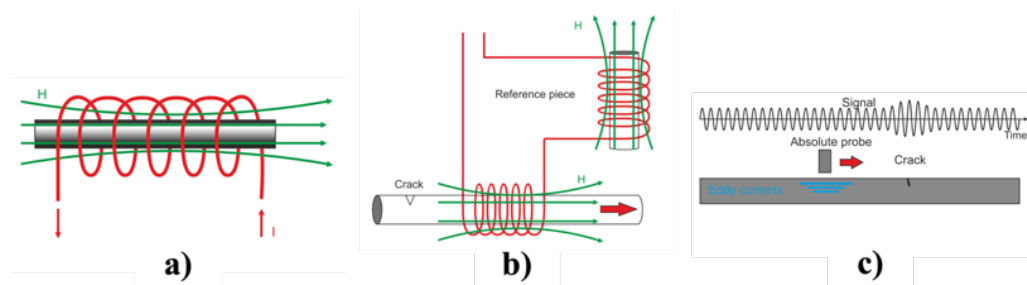


Figura 2.19 – Sonda absoluta:

a) sonda absoluta; b) sonda de ponte absoluta; c) sinal típico de sondas absolutas. Adaptado de [76].

- **Sondas Diferenciais:** têm duas bobinas ativas sobre o material, enroladas em direções opostas, que comparam duas zonas adjacentes da peça inspecionada. A diferença de impedâncias entre as duas bobinas indicará a presença de uma descontinuidade, resultando num aumento da sensibilidade à presença das mesmas. No entanto, alterações graduais de propriedades que provoquem alterações de impedância não serão perceptíveis. [76,79,80]. A Figura 2.21 a) e b) apresenta dois exemplos de configurações de sondas diferenciais e a Figura 2.21 c) ilustra o sinal proveniente da sonda.

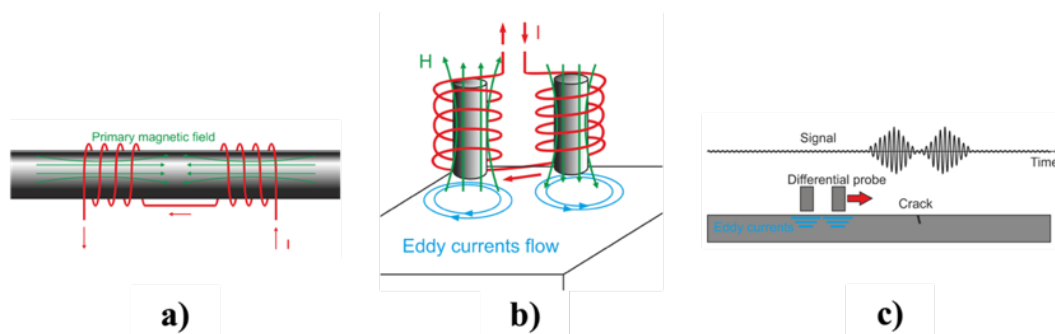


Figura 2.20 -Sonda diferencial:

a) sonda diferencial do tipo helicoidal; b) sonda diferencial do tipo panqueca;
c) exemplo de sinal absoluto de sondas diferenciais. Adaptado de [76].

- **Sondas de Reflexão:** são também constituídas por duas bobinas, mas uma induz corrente na peça testada (bobina de excitação) e a outra deteta alterações na circulação das CI, funcionando como sensor (bobina sensível). A bobina de excitação pode ser configurada de modo a produzir um campo magnético intenso e a bobina sensível de modo a ter maior sensibilidade [79,80]. A Figura 2.22 ilustra este modo de operação.

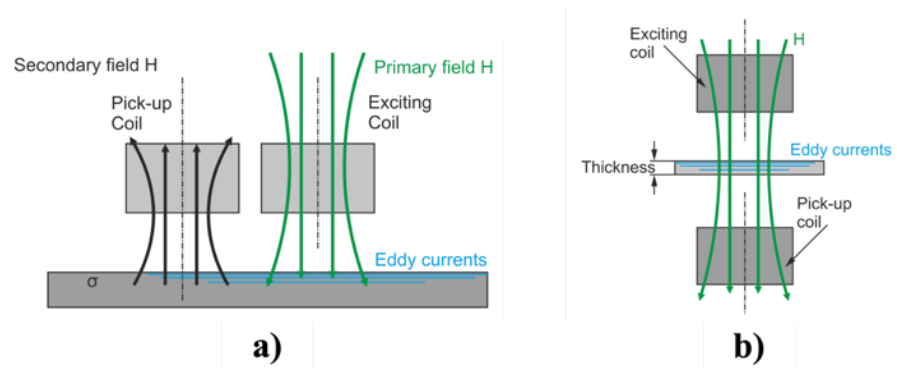


Figura 2.21 – Sonda de reflexão:
 a) bobinas na mesma superfície; b) bobinas em superfícies opostas [76].

- **Sondas Híbridas:** são sondas que combinam vários modos de operação. A título de exemplo, uma sonda de reflexão diferencial terá uma bobina de excitação e duas ou mais bobinas sensíveis a operarem em modo diferencial. Este tipo de sondas são bastante sensíveis a fissuras superficiais [79,80].

2.4.1 - Correntes induzidas no âmbito do WAAM

De um modo geral, para ser possível efetuar uma monitorização *in-line* de componentes no WAAM, camada-a-camada, é necessário que os seguintes critérios sejam cumpridos [66]:

- Mitigar o efeito de pele de modo a ser possível uma profundidade de penetração das CI para além de 2 mm, visto que a altura das camadas depositadas podem ultrapassar esse valor [4];
- Superar o efeito de *lift-off* causado pela rugosidade e ondulação típica de peças fabricadas por WAAM;
- Inspeccionar sem efetuar contacto entre a camada depositada e a sonda devido às temperaturas elevadas envolvidas no WAAM.

As sondas de CI planas podem ser produzidas através da tecnologia PCB (*Printed Circuit Board*) e apresentam algumas vantagens, nomeadamente: maior sensibilidade a discontinuidades devido à redução do efeito de *lift-off*, são mais fáceis de produzir graças à tecnologia PCB, permite a inspeção de superfícies de geometria complexa se o circuito for impresso num substrato flexível [79].

Santos et al. desenvolveram uma nova sonda plana, designada por *IONic Probe*, apresentada na Figura 2.23, que induz correntes a uma maior profundidade e é produzível num substrato flexível. Ademais, esta sonda induz correntes no material em várias direções, permitindo a deteção de discontinuidades independentemente da sua orientação, tal como está representado na Figura 2.24 [81].

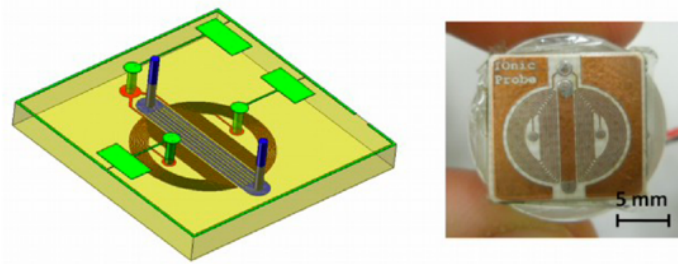


Figura 2.22 – Protótipo da sonda *IOnic Probe* [81].

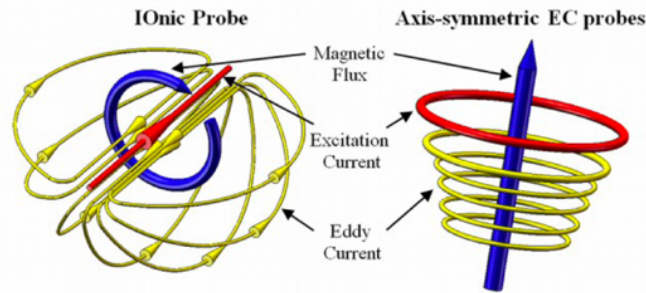


Figura 2.23 – Variação das CI no espaço produzidas pela *IOnic Probe* (esquerda) e por uma sonda convencional axissimétrica (direita) [81].

Contudo, cada camada depositada contém uma curvatura significativa, deixando de haver paralelismo entre a sonda e a superfície da peça e, conseqüentemente, a *IOnic Probe* perde a vantagem de ser insensível a flutuações do *lift-off*. Com o sentido de fazer face a este problema, Bento et al. desenvolveram uma adaptação da *IOnic Probe* para peças fabricadas em alumínio por WAAM apresentada na Figura 2.25. Os resultados experimentais obtidos foram muito próximos dos resultados das simulações efetuadas. As sondas foram capazes de detetar defeitos com 3 mm de diâmetro a 5 mm de profundidade em barras de alumínio e um rasgo com uma largura de 350 μm a 2 mm de profundidade numa parede fabricada por WAAM, ambos sem *lift-off*. Apesar da relação sinal/ruído aumentar, também foi possível a deteção de um defeito a 2 mm de profundidade numa barra de alumínio com um *lift-off* de 5 mm, o que permite a proteção da sonda do calor gerado no WAAM. Estes resultados mostram que as sondas customizadas de CI são uma solução promissora para a monitorização *in-line* no WAAM [66].

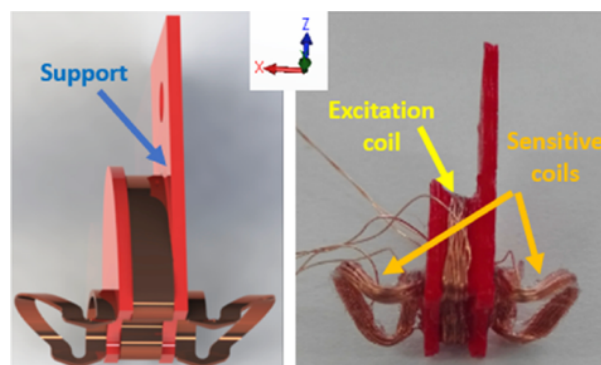


Figura 2.24 – Sonda *IOnic Probe* customizada para peças fabricadas por WAAM [66].

Num segundo estudo, foram desenvolvidas duas novas iterações de sondas de CI para efetuarem a inspeção de paredes produzidas por WAAM. A Figura 2.26 apresenta o *layout* das duas sondas: a *WAAM Flex Probe* (WFP) e a *IONic Flex Probe* (IFP). Ambas as sondas tiram partido da tecnologia PCB flexível e operam em modo diferencial, com uma bobina de excitação e duas bobinas sensíveis [82].

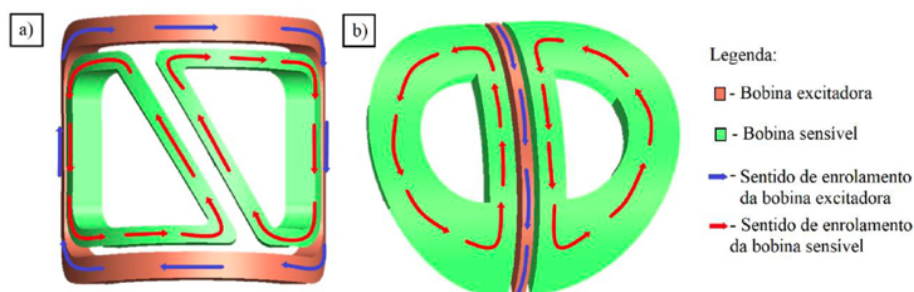


Figura 2.25 - Configurações das sondas: a) WFP; b) IFP [82].

Uma terceira sonda foi desenvolvida para efetuar a inspeção do fio de soldadura que alimenta a máquina de WAAM. Esta consiste num filamento de cobre com forma de bobina cilíndrica cuja configuração permite a passagem do fio de soldadura no seu interior. Esta sonda induz correntes na periferia do fio com a finalidade de detetar descontinuidades e oxidação. A sonda opera em modo absoluto compensante, contendo duas bobinas, em que a primeira é responsável por inspecionar o fio de soldadura e a segunda contém um fio de controlo sem defeitos, tal como se pode observar pela Figura 2.27. Assim, a relação sinal/ruído é maximizada porque é obtido através de uma comparação [82]. Este modo de operação também tem a vantagem de conferir à sonda insensibilidade a variações de temperatura [76].

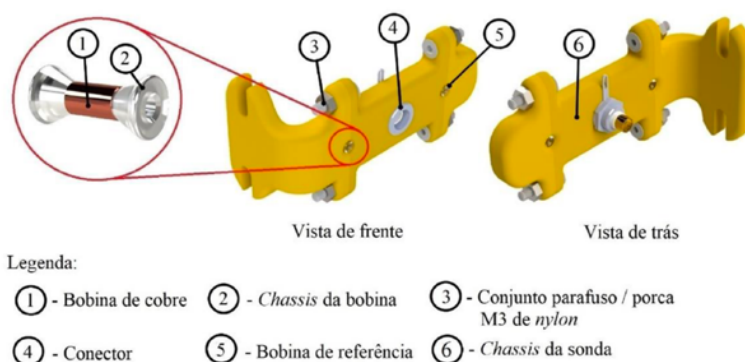


Figura 2.26 – Sonda do Fio de soldadura e chassi das bobinas [82].

Numa primeira fase de testes, foram inspecionadas barras de alumínio, onde ambas as sondas apresentaram uma elevada relação sinal/ruído, sendo este valor mais elevado na sonda WFP. Na segunda fase, foram inspecionadas paredes de alumínio produzidas por WAAM, com contacto entre as sondas e a superfície, em que a sonda WFP detetou as descontinuidades com sucesso, apresentando uma relação sinal/ruído, aproximadamente, três vezes superior à sonda IFP. Na Figura 2.28, observa-se o sinal emitido por ambas as sondas quando foi efetuada a

inspeção de uma parede com um furo passante de 1 mm de diâmetro a 2 mm de profundidade. O ruído presente no sinal da sonda IFP deve-se ao uso de uma frequência mais elevada que reduz a profundidade de penetração das CI, enaltecendo a influência da ondulação das paredes produzidas por WAAM no sinal [82].

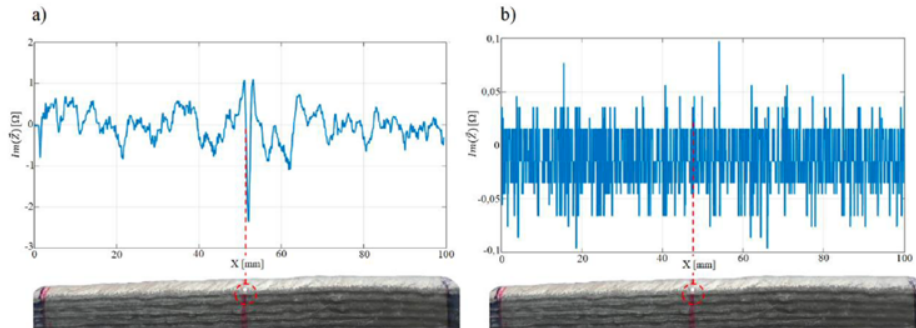


Figura 2.27 – Resultados obtidos na inspeção de uma parede WAAM com um furo passante com 1 mm de diâmetro a 2 mm de profundidade:
 a) sonda WFP com $f = 1,5$ KHz; b) sonda IFP com $f = 230$ KHz [82].

A sonda do fio de soldadura permitiu a detecção de discontinuidades em fios com diâmetros diferentes (1 mm e 1,2 mm), onde o aumento do *lift-off* não comprometeu a amplitude do sinal. Foi possível detetar três tipos de defeitos no fio (diminuição de diâmetro, indentação e rasgo tangencial) em seis fios de materiais diferentes. Todavia, o fio de aço ER-70 tinha a sua superfície oxidada, comprometendo a sua inspeção devido ao aumento do ruído no sinal. A Figura 2.29 apresenta o sinal da sonda com o fio cuja superfície está oxidada, em comparação com a superfície limpa, enaltecendo a importância de se ter um fio de soldadura limpo. A limpeza do fio foi efetuada através do Engenho de Remoção de Óxidos e Impurezas (EROI) já desenvolvido, apresentado na Figura 2.30, cujo funcionamento se baseia na aplicação de atrito cinético entre 16 lâminas e a superfície do fio, como está ilustrado na Figura 2.31 [82].

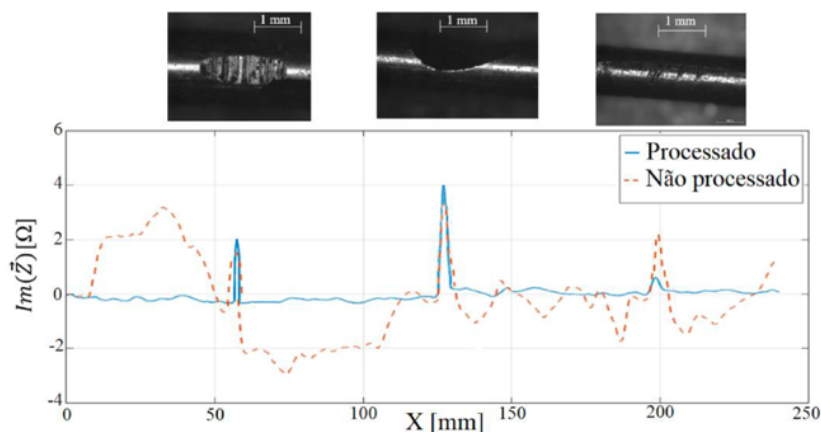


Figura 2.28 – Comparação entre os sinais da sonda do fio de soldadura de 1 mm do aço ER-70 a $f = 7,5$ kHz antes e após ser processado pelo EROI [82].

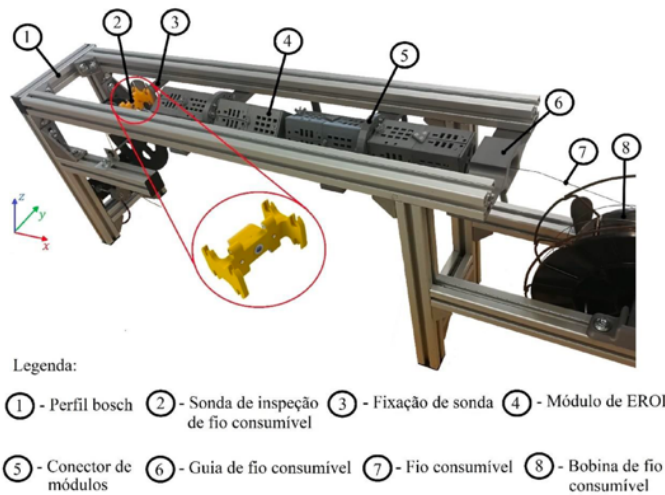


Figura 2.29 – Implementação do EROI e da sonda de monitorização do fio de soldadura [82].

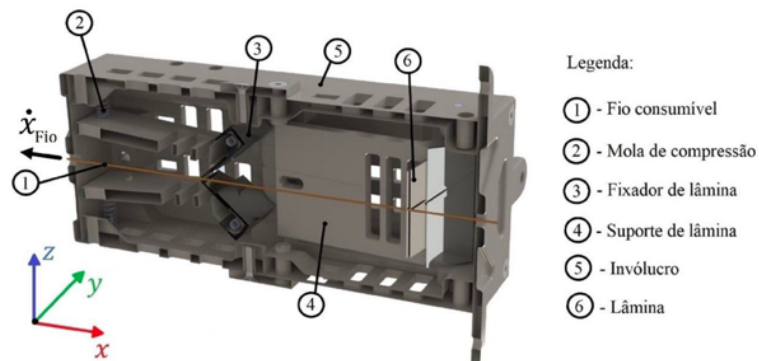


Figura 2.30 – Corte de secção de um módulo do EROI [82].

2.5 – Síntese do Capítulo

Neste capítulo, foi visto que o FA pode reduzir os custos de fabrico quando comparado com processos de Fabrico Subtrativo, podendo ser mais vantajoso em certas ocasiões, como por exemplo, a produção de protótipos, ferramentas, peças finais personalizadas e peças com elevada complexidade geométrica.

De entre os vários processos de FA, surge o WAAM que, quando comparado com outros processos de FA, apresenta taxas de deposição mais elevadas, menor custo de equipamento e menor desperdício de material. No entanto, as peças produzidas por WAAM podem conter certos tipos de defeitos como: a reduzida qualidade superficial, a porosidade que pode resultar de um fio de soldadura oxidado ou com impurezas, a fissuração, distorção e delaminação que surgem devido a tensões residuais presentes na peça fabricada.

De seguida, abordou-se a monitorização *in-line* do WAAM, onde, de entre vários métodos de END, e por exclusão de partes, apenas a termografia e as CI têm maior possibilidade de

aplicação. Estes dois métodos, aliados a outros documentados na literatura, podem contribuir para a industrialização do WAAM. A CI é o método mais promissor no âmbito da monitorização *in-line* do WAAM, ainda assim, existem obstáculos a serem ultrapassados como: o efeito de pele, a variação de *lift-off* e a realização da inspeção sem estabelecer contacto entre a sonda e a peça. Enaltece-se ainda que, uma sonda de CI do fio de soldadura necessita que o mesmo esteja limpo para que a relação sinal/ruído seja suficientemente elevada de modo que os defeitos no fio de soldadura possam ser detetados.

3 - REQUISITOS, CONCEÇÃO E PRODUÇÃO DO EROI V2

No âmbito desta dissertação, foi desenvolvido uma segunda versão do Engenho de Remoção de Óxidos e Impurezas (EROI V2) com a finalidade de remover quaisquer contaminantes presentes no fio de soldadura que alimenta a máquina de WAAM da FCT-UNL. Como já foi abordado, óxidos, impurezas como a gordura, ou má qualidade superficial do fio de soldadura podem comprometer a qualidade de peças fabricadas por WAAM e daí surge a necessidade de implementação do EROI neste processo de FA. Neste capítulo será apresentada a conceção do EROI V2, o seu desenvolvimento e por fim, a sua produção.

3.1 - Conceção e desenvolvimento do EROI V2

A primeira versão do EROI, previamente desenvolvida, tinha um funcionamento que assentava no atrito gerado pelo encosto de 16 lâminas em torno do fio de soldadura que removiam óxidos e impurezas presentes na superfície do mesmo. No entanto, este sistema, puramente mecânico, aplicava um elevado atrito no fio de soldadura.

Com o objetivo de diminuir a resistência ao movimento do fio de soldadura, concebeu-se um sistema que se baseia na aplicação de roletes de escova de aço rotativos que, ao encostarem na superfície do fio, efetuam a sua limpeza devido ao atrito cinético gerado. Determinou-se que 4 escovas igualmente espaçadas em torno do fio seria o ideal, estando-se assim na segurança,

pois uma só escova é capaz de cobrir cerca de 120°. Cada escova de aço rotativa faz parte de uma Unidade de Limpeza (UL). Cada UL terá de cobrir no mínimo 90° da superfície do fio e terá de permitir o ajuste da distância entre o fio de soldadura e a escova de aço rotativa. Toda a modelação tridimensional para o projeto do EROI V2 e as várias renderizações apresentadas neste capítulo foram realizadas através do *software SolidWorks*. A Figura 3.1 identifica os vários componentes de cada UL e ilustra o seu funcionamento. O ângulo α [°], vale 7°, e permite um desgaste mais uniforme da escova de aço. A carcaça superior protege o operador da máquina caso haja a projeção de uma peça da UL e não permite a saída das impurezas para o exterior, acabando as mesmas armazenadas no depósito.

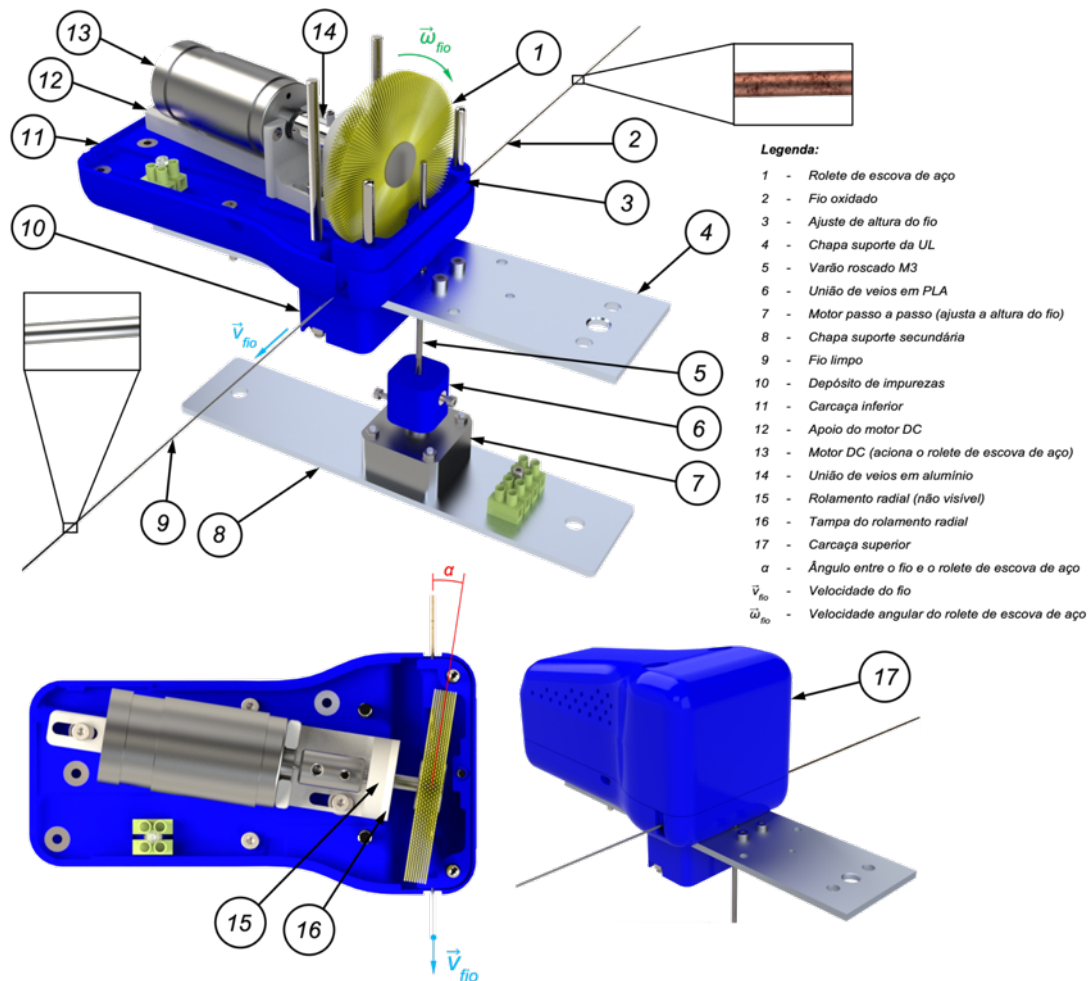


Figura 3.1 – Ilustração do funcionamento da UL e identificação dos seus componentes.

O EROI V2 é composto por 4 UL's, uma sonda de CI desenvolvida em [82], uma roldana e uma Unidade Motriz (UM). A UM é responsável por auxiliar o motor principal da máquina de WAAM na tração do fio. Como se pode observar pela Figura 3.2, a UM é composta maioritariamente por componentes de alumínio para lhe conferir rigidez e o seu *design* é modular, ou seja, a UM pode ser removida na sua totalidade do chassis do EROI V2 sem que qualquer outro componente tenha de ser desmontado, permitindo o seu uso imediato noutra aplicação em que seja necessário tracionar fio de soldadura. O seu funcionamento é esquematizado na Figura 3.3 onde também são identificados os seus componentes.

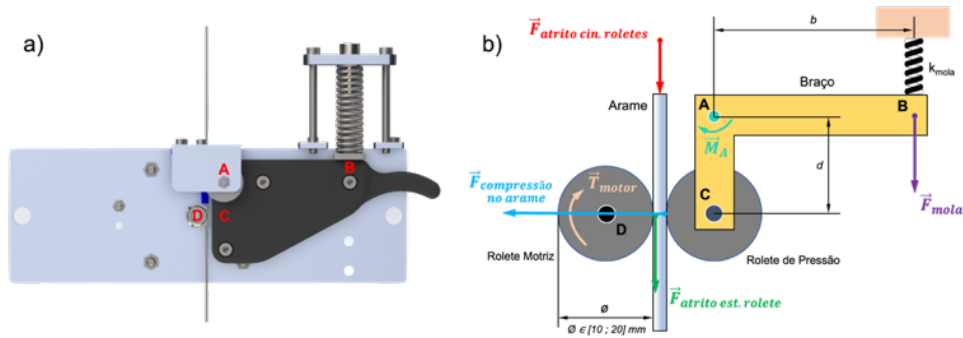


Figura 3.2 - Esquemática da UM com alguns pontos de referência: a) alçado principal da montagem; b) ilustração do seu funcionamento.

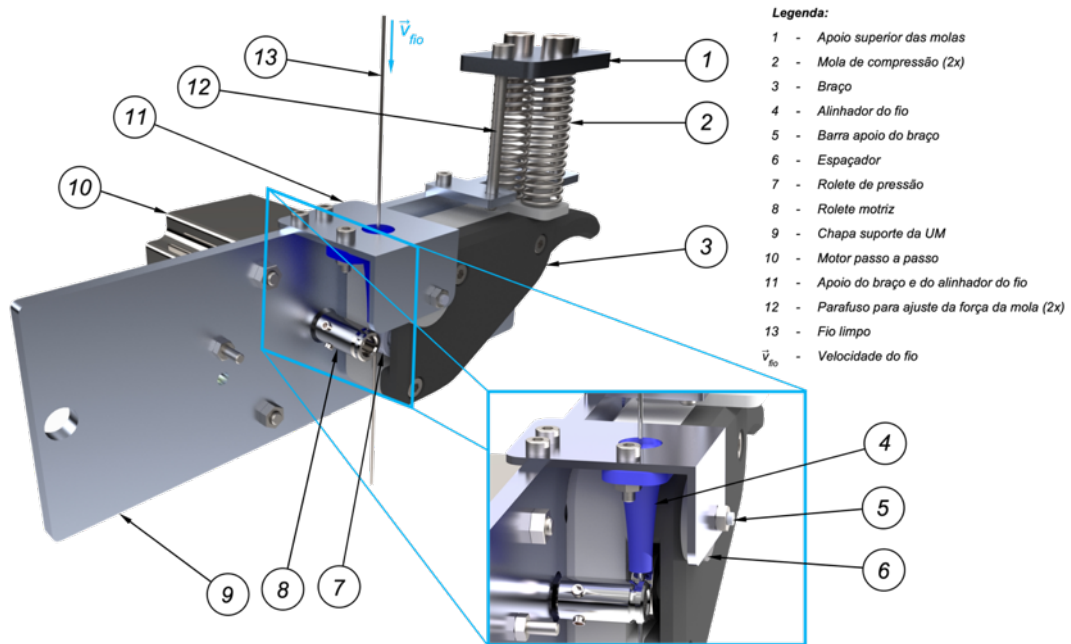


Figura 3.3 – Renderização da UM e identificação dos seus componentes.

A Figura 3.4 apresenta os vários componentes do EROI V2 e a Figura 3.5 ilustra o seu funcionamento. Existe um botão *STOP* capaz de parar imediatamente as escovas de aço.

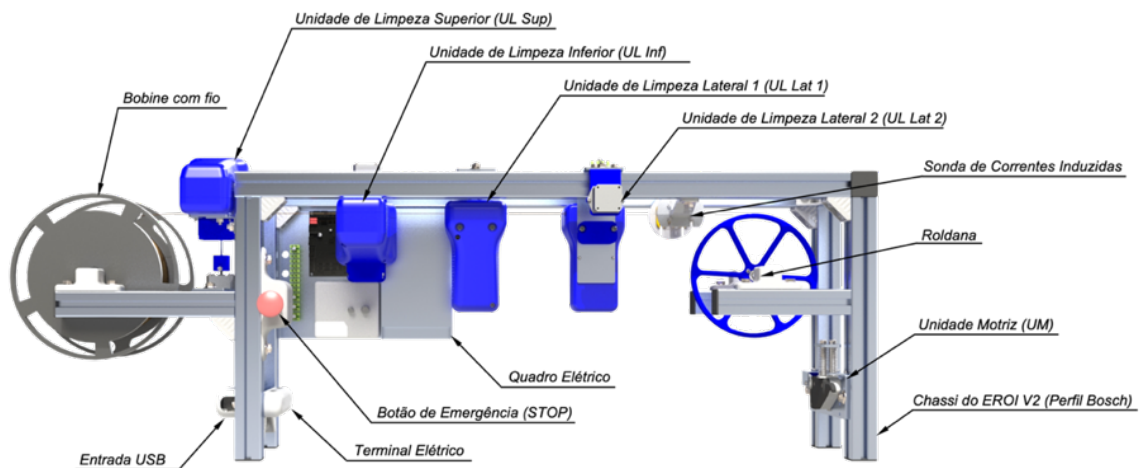


Figura 3.4 - Identificação dos vários elementos constituintes do EROI V2.

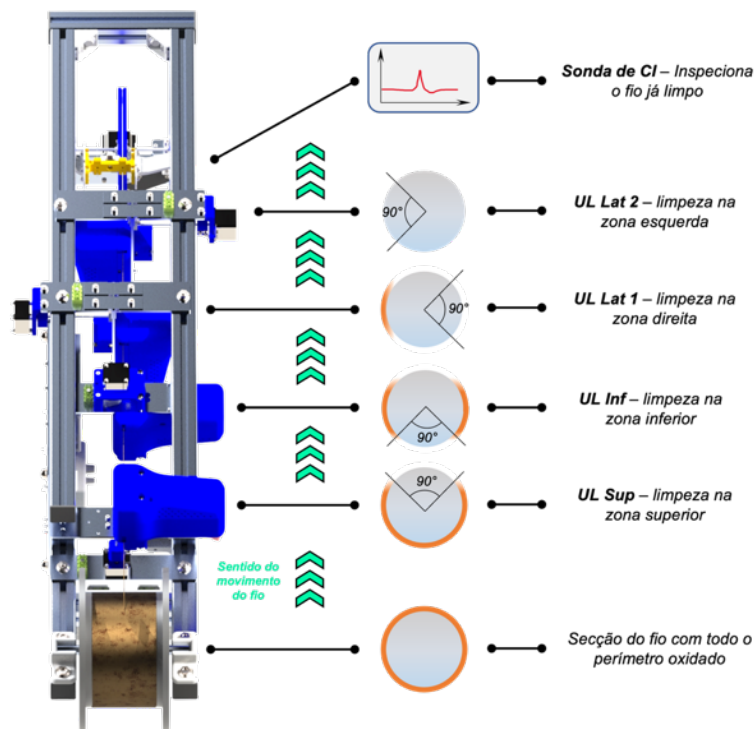


Figura 3.5 - Ilustração do funcionamento do EROI V2 com as 4 fases de limpeza.

O posicionamento dos vários elementos foi feito tendo em conta a implementação do EROI V2 na máquina de WAAM do DEMI da FCT-UNL e daí ser necessário uma roldana para auxiliar a mudança de direção do fio. A Figura 3.6 representa a implementação do EROI V2 na máquina de WAAM. O circuito elétrico e a modelação tridimensional com as dimensões relevantes deste sistema são apresentados no Anexo 1.

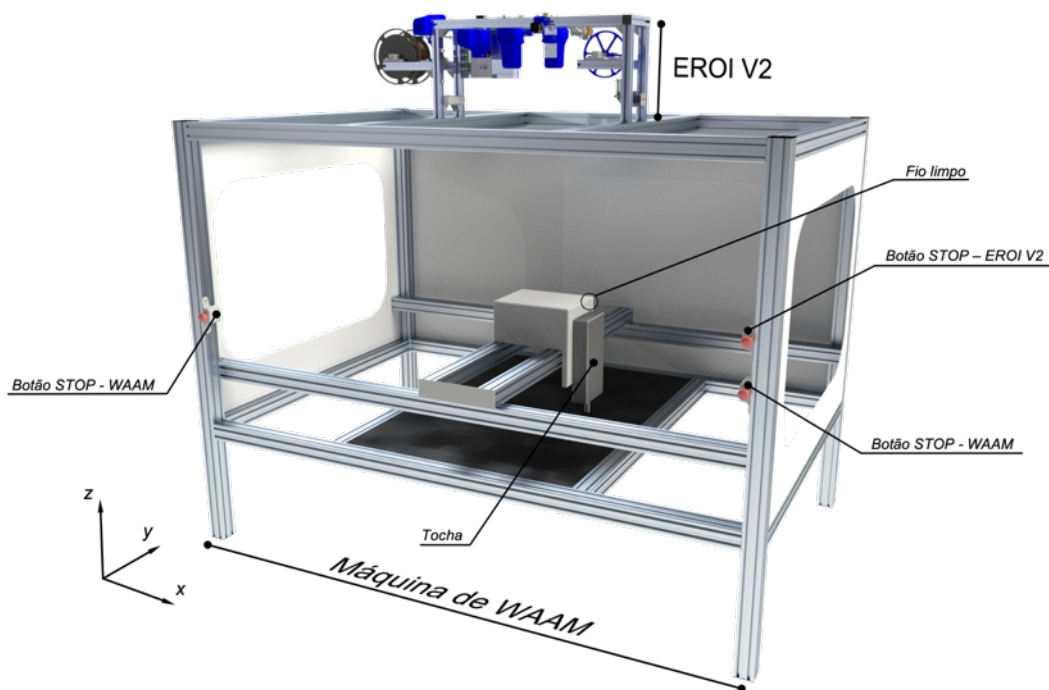


Figura 3.6 - Representação da implementação do EROI V2 na máquina de WAAM do DEMI da FCT-UNL.

O EROI V2 permite uma simples substituição da roldana por uma bobina de fio para que se possa usar o engenho manualmente numa bancada. Deste modo, o operador roda a segunda bobina para que o fio limpo fique enrolado. Esta adaptação, apresentada na Figura 3.7 e que se denomina por EROI V2-B, surge com o intuito de se usar a máquina de soldadura *Oerlikon Citowave III*, presente na Figura A3 do Anexo 1, cujo alimentador de fio integra a bobina e o mecanismo de tração do fio de soldadura no mesmo compartimento. Assim, é obrigatório efetuar a limpeza do filamento antes de se proceder ao processo de WAAM.

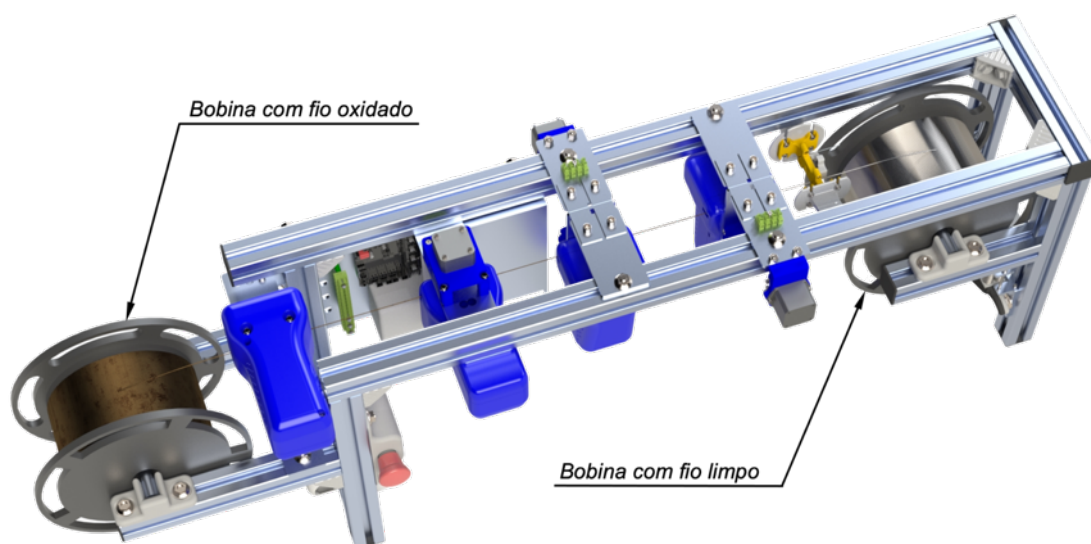






Figura 3.7 – Representação da adaptação de bancada denominada por EROI V2-B, onde existe a transferência do fio de soldadura de uma bobina para outra, sendo efetuada a limpeza e a inspeção por CI do fio de soldadura.

3.2 – Produção e testagem do EROI V2

O EROI V2 contém diversos equipamentos necessários para o seu funcionamento identificados na Tabela 3.1. A montagem de alguns destes elementos encontra-se presente na Figura 3.8. Após várias iterações, foi estabelecido que uma tensão de alimentação de 60 V resultaria na velocidade de rotação ideal para os motores DC escolhidos. A placa de impressão selecionada permite o controlo de 5 motores (no máximo) que pode ser feito através do *software Repetier-Host*.

Tabela 3.1 – Lista de componentes eletrónicos adquiridos para o EROI V2.

Equipamento e Quantidade	Características	Ilustração	Ref.
Fonte de alimentação industrial dos motores DC que atuam os roletes de escova de aço Quantidade: 1	Modelo: RD6006 - JOY-IT JT-RD6006-NT Tensão de saída: 60 V com ajuste de $\pm 10\%$ Corrente de saída máxima: 6,6 A Potência de saída máxima: 400 W		[83]

Fonte de alimentação da placa de impressão	Modelo: ELC-ALF2902M Tensão de saída: 6 - 28 V Corrente de saída: 2 - 4 A		[84]
Quantidade: 1	Potência de saída: 60 W		
Placa de impressão	Modelo: BIGTREETECH SKR V1.3 Alimentação: 12/24 V Controla até 5 motores de passo (X, Y, Z, E0, E1) Entrada USB para computador/ <i>raspberry pi</i>		[85]
Quantidade: 1			
Motor DC de alta velocidade (atuam os roletes de escova de aço)	Modelo: TK-DC5512M23 Tensão máxima de alimentação: 230 V Corrente (motor em rotação livre): 0,04 A Velocidade angular: 11730 rpm		
Quantidade: 4	Potência máxima: 29,8 W		

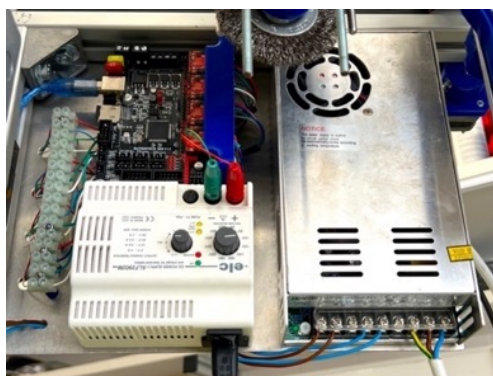


Figura 3.8 - Quadro elétrico do EROI V2.

Para além dos componentes eletrónicos apresentados, usou-se 4 motores de passo distribuídos pelas 4 UL's que permitem a afinação da distância entre o fio de soldadura e a escova de aço rotativa através da rotação de um veio roscado. A Figura 3.9 apresenta a sua implementação em cada UL. Este sistema permite efetuar este ajuste à distância com um computador e um cabo USB, ou no caso de se usar a versão de bancada, o EROI V2-B, é possível efetuar este ajuste manualmente, bastando desligar os 4 motores de passo.

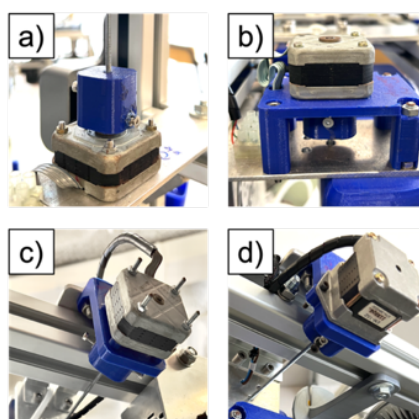


Figura 3.9 - Implementação de 4 motores de passo para o ajuste da distância entre o fio de soldadura e a escova de aço rotativa de cada UL, permitindo a realização deste ajuste quando o operador não pode estar perto do EROI V2.

Tanto as várias UL's como a UM foram produzidas de acordo com as especificações de projeto apresentadas no Capítulo 3.1 e podem ser observadas na Figura 3.10. A UL Superior produzida sem a carcaça superior montada pode ser observada nas Figuras A5 e A6 no Anexo 1, sendo visível a escova de aço que atua sobre o fio de soldadura. Por fim, o EROI V2-B, apresentado na Figura 3.11, foi produzido também de acordo com as várias especificações definidas e permite ainda o ajuste manual da altura do fio relativamente ao rolete de escova de aço. Deste modo, também é possível utilizar a máquina sem um computador, o que é útil quando usado em bancada. As Figuras 3.12 e 3.13 apresentam o EROI V2-B através de outras perspetivas.

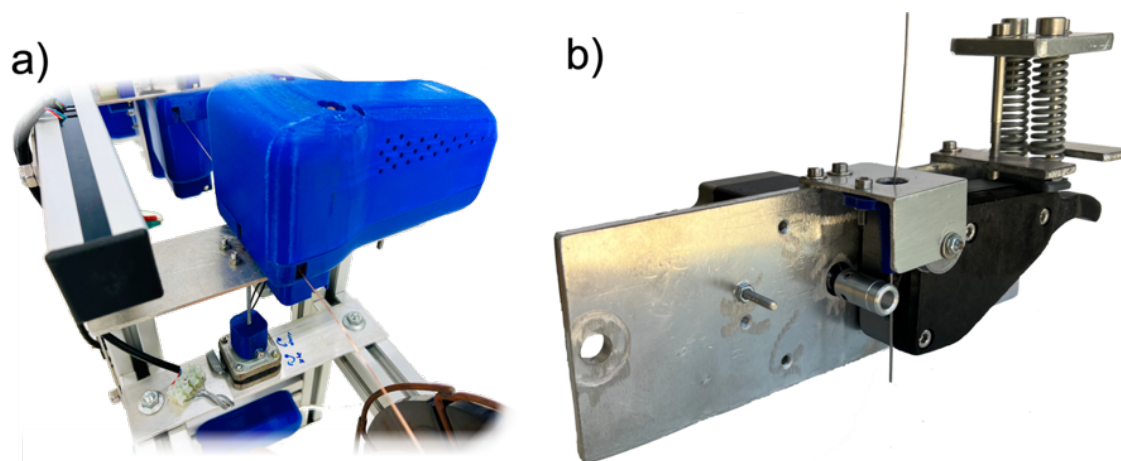


Figura 3.10 - Apresentação de montagens modulares essenciais ao funcionamento do EROI-V2:
a) UL Superior; b) UM.

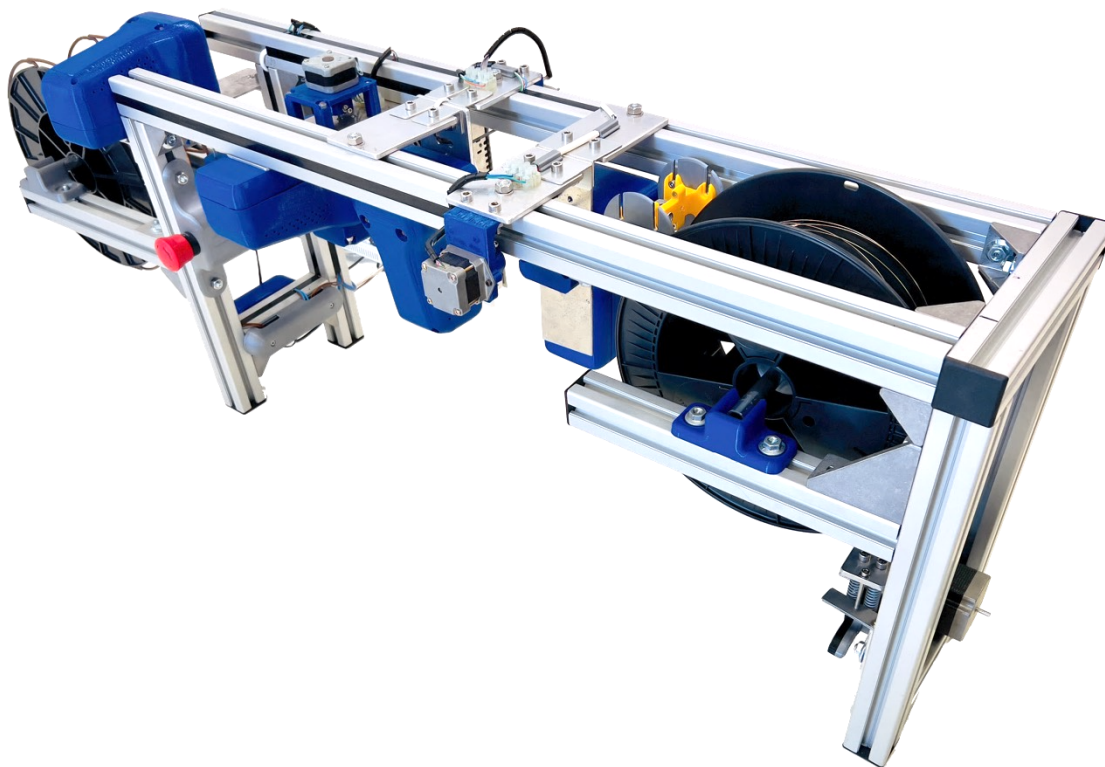


Figura 3.11 - Apresentação do EROI V2-B finalizado.

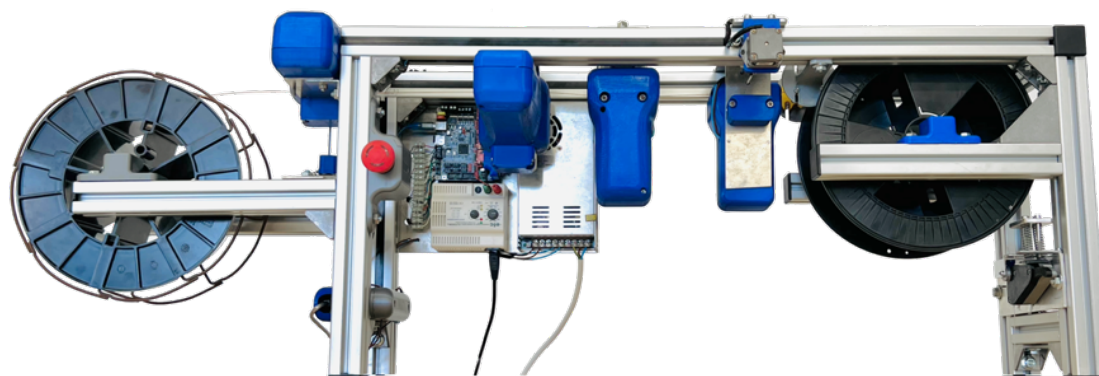


Figura 3.12 - Apresentação do EROI V2-B (alçado principal).

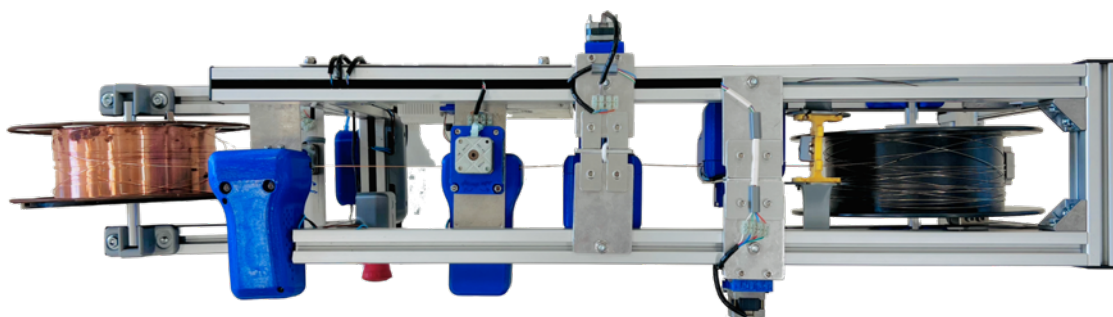


Figura 3.13 - Apresentação do EROI V2-B (planta).

De seguida, procedeu-se à testagem do EROI V2. Foi feito um teste com os 4 motores DC ligados, sem fio de soldadura, durante 15 minutos, onde não se verificou qualquer aquecimento dos mesmos. Posteriormente, já com fio de soldadura encostado às quatro escovas de aço rotativas, verificou-se um aquecimento mais acentuado.

3.3 – Síntese do Capítulo

Neste capítulo foi abordado a conceção e a construção de um mecanismo denominado por EROI V2 que efetua a limpeza, inspeção e tração do fio de soldadura que alimenta o processo de fabrico WAAM. Este mecanismo foi desenhado para ser montado diretamente na máquina de WAAM da FCT-UNL, mas também pode ser usado em bancada (EROI V2-B), sendo a transferência do fio de soldadura feita manualmente de uma bobina para a outra.

Foi representado de forma ilustrativa alguns dos seus componentes e, da mesma maneira, foi explicado o seu funcionamento. Por fim, apresentou-se o EROI V2 finalizado de várias perspetivas.

Com um dispositivo deste género, será possível efetuar a monitorização *in-line* com o método das CI de fio de soldadura cujas condições de armazenamento não sejam as mais ideais. É necessário perceber as implicações que um fio de soldadura com descontinuidades possa ter no processo de WAAM para diversos materiais.

4 – METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Como já foi visto no Capítulo 2, a sujidade e até a má qualidade superficial do fio de soldadura pode influenciar o processo de WAAM. No entanto, existe pouca informação na literatura acerca da relação entre descontinuidades no fio de soldadura e a qualidade da soldadura ou das peças fabricadas por WAAM. A fim de perceber esta relação, foram feitas diversas descontinuidades em fio de soldadura de aço inoxidável AISI 316L com 1,0 mm de diâmetro. Escolheu-se este material com o intuito de evitar que a oxidação da superfície do fio de soldadura influenciasse os resultados e dividiu-se as experiências laboratoriais em 3 ensaios diferentes. Este capítulo apresentará a metodologia usada para efetuar estes ensaios experimentais.



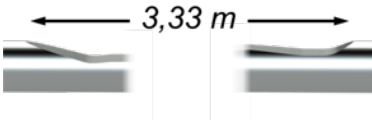
4.1 – Produção de descontinuidades no fio de soldadura e respetiva caracterização

4.1.1 - Produção das descontinuidades no fio de soldadura

Começou-se por estabelecer 3 ensaios de acordo com o tipo de descontinuidade a ser estudada tal como está determinado na Tabela 4.1. Para os Ensaios 1 e 2 existirá uma parede de WAAM de referência denominada por Parede Ref-E1-E2. Já o Ensaio 3 terá outra parede de referência denominada por Parede Ref-E3 porque o mesmo foi efetuado num dia diferente e na

máquina de WAAM de 3 eixos, e os Ensaios 1 e 2 foram efetuados num braço robótico, como se verá no Capítulo 4.2.

Tabela 4.1 – Ensaios a serem efetuados e suas características.

Ensaio	Tipo de descontinuidade	Material	Ilustração
1	Variação de diâmetro pontual	Aço AISI 316L	
2	Indentação	Aço AISI 316L	
3	Variação de diâmetro contínua	Aço AISI 316L	

Antes da produção de descontinuidades no fio de soldadura, é necessário primeiro definir como é que as mesmas se irão estabelecer ao longo do fio de soldadura para cada um dos ensaios.

- **Ensaios 1 e 2**

Com o objetivo de cada descontinuidade no fio de soldadura ocorrer no meio de cada camada da parede de WAAM e de maneira alternada (camada com defeito, camada sem defeito, e assim sucessivamente), é preciso primeiro estabelecer alguns parâmetros do processo WAAM com a finalidade de se calcular a posição de cada defeito no fio de soldadura. A Tabela 4.2 apresenta os parâmetros que tiveram de ser pré-estabelecidos para os Ensaios 1, 2 e 3.

Tabela 4.2 - Parâmetros do processo de WAAM pré-estabelecidos para os Ensaios 1, 2 e 3.

Parâmetro, símbolo, unidades	Ensaios 1 e 2	Ensaios 3
Comprimento da camada, c , [mm]	50	100
Número de camadas, N_c	18	10
Velocidade de avanço da tocha, v_t , [mm/s]	6	6
Velocidade de alimentação do fio, v_f , [m/min]	3	3

Considerando o movimento do fio uniforme, a Equação 4.1 relaciona velocidade constante, v [m/s], deslocamento, d [m], e tempo, t [s], permitindo obter uma estimativa do comprimento de fio necessário para produzir um cordão de soldadura com determinado comprimento.

$$v = \frac{d}{t} \quad (4.1)$$

Aplicando diretamente a Equação 4.1, obtém-se o tempo para produzir uma camada no processo de WAAM através da Equação 4.2:

$$v_t = \frac{c}{t} \Leftrightarrow t = \frac{c}{v_t} \Rightarrow t = \frac{0,050}{0,006} \approx 8,33 \text{ s} \quad (4.2)$$

Sabendo a velocidade de alimentação do fio e o tempo de produção de cada camada, aplicando a Equação 4.1 mais uma vez, está-se em condições de calcular o comprimento de fio necessário para produzir uma camada, c_f [m], através da Equação 4.3:

$$v_f = \frac{c_f}{t} \Leftrightarrow c_f = v_f \times t \Rightarrow c_f = 0,05 \times 8,33 \approx 0,417 \text{ m} \quad (4.2)$$

Portanto, o comprimento entre cada descontinuidade para os Ensaios 1 e 2 será de 417 mm. A maneira como cada uma está disposta ao longo de todo o comprimento do fio de soldadura é descrita nas Tabelas A1 e A2, respetivamente, no Anexo 2.

- **Ensaio 3**

A descontinuidade a ser estudada no Ensaio 3, sendo uma variação de comprimento contínua ao longo de um certo comprimento do fio, exige uma estratégia de posicionamento diferente, mas mais simples relativamente aos Ensaios 1 e 2. Pretende-se que a Parede E3 tenha as 4 primeiras camadas afetadas por esta variação de diâmetro

Partindo dos parâmetros pré-estabelecidos na Tabela 4.2 e da aplicação direta da Equação 4.1, calcula-se o tempo necessário para produzir uma camada, que tendo o dobro do comprimento e os mesmo parâmetros pré-estabelecidos, significa que demorará o dobro do tempo dos Ensaios 1 e 2, ou seja, aproximadamente 16,67 s. Repetindo o raciocínio da Equação 4.3, obtém-se o comprimento de fio de 0,83 m para produzir uma camada. Visto que se pretende que este efeito se faça sentir nas 4 primeiras camadas, multiplica-se este valor por quatro, resultando numa variação de diâmetro que se prolongará nos primeiros 3,33 metros de fio de soldadura. A Tabela A3 no Anexo 2 descreve como esta variação de diâmetro é disposta ao longo de todo o comprimento do fio.

Em jeito de resumo, a Figura 4.1 a) ilustra as zonas da parede fabricada por WAAM onde as descontinuidades no fio de soldadura dos Ensaios 1 e 2 poderão causar defeitos e a Figura 4.1 b) ilustra o mesmo, mas para o Ensaio 3.

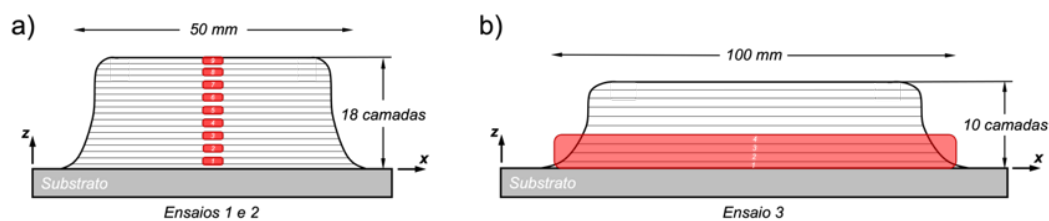


Figura 4.1 – Esquema da possível localização de defeitos nas paredes E1, E2 e E3:
 a) esquema para as paredes E1 e E2; b) esquema para a parede E3

4.1.2 - Caracterização das descontinuidades no fio de soldadura

Uma vez definida a posição de cada descontinuidade no fio de soldadura, procede-se à sua produção e caracterização. As descontinuidades do Ensaio 1 foram feitas com uma *Dremel*, as do Ensaio 2 foram produzidas com um serrate e a variação de diâmetro contínua do Ensaio 3 com recurso ao esmeril.

Para os Ensaio 1 e 2, a caracterização de cada descontinuidade passa por tirar uma fotografia no microscópio e posteriormente, inspecionar o fio na zona da descontinuidade com a sonda de CI de modo a obter um sinal com a variação de impedância ao longo do comprimento do fio de soldadura. A Figura 4.2 mostra um exemplo para os Ensaio 1 e 2 em que as restantes caracterizações encontram-se compiladas, respetivamente, nas Tabelas A4 e A5 no Anexo 2.

Como já foi visto no Capítulo 2.4.1, a sonda de CI do fio de soldadura opera em modo absoluto compensante, que no caso da presença de uma descontinuidade na primeira bobina, irá gerar uma variação de impedância por comparação ao fio de soldadura de referência na segunda bobina. Esta variação de impedância reflete-se no pico que é observado nos gráficos da Figura 4.2 a) e b).

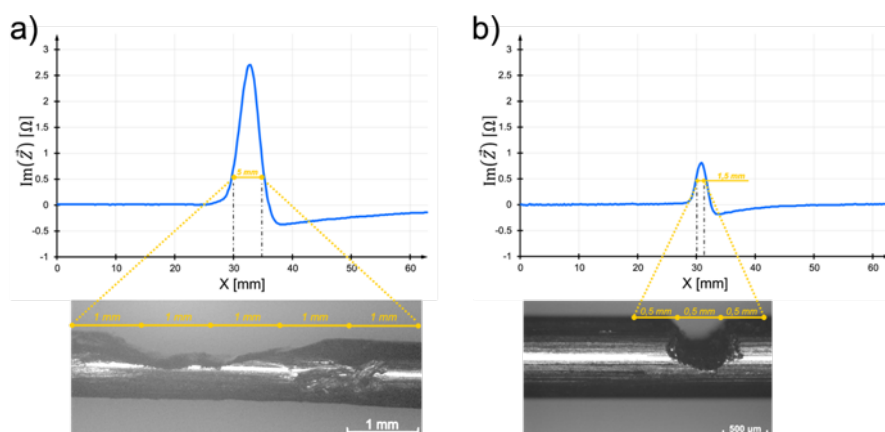


Figura 4.2 – Exemplo da caracterização de descontinuidades no fio de soldadura por inspeção visual e pelo método das CI para os Ensaio 1 e 2:
 a) terceira descontinuidade do Ensaio 1 (E1-D3); b) quinta descontinuidade do Ensaio 2 (E2-D5).

A inspeção do fio foi feita numa mesa triaxial com um leitor de impedâncias (*Nortec 600D* da marca *OLYMPUS*) e uma placa de aquisição de dados (*National Instruments*) como apresenta a Figura 4.3 a). A Figura 4.3 b) mostra uma das descontinuidades a ser caracterizada pela sonda.

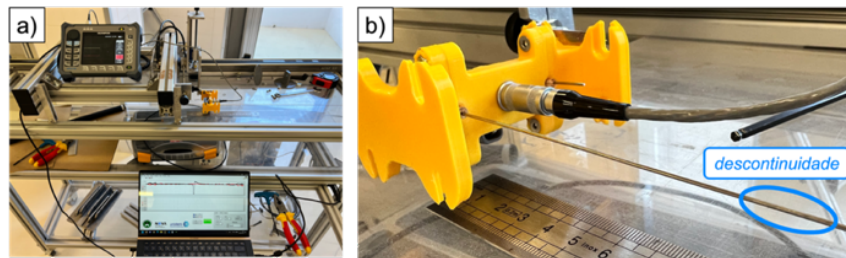


Figura 4.3 - Aparato experimental para caracterização das descontinuidades pelo método das CI:
a) mesa triaxial do DEMI; b) sonda de CI do fio de soldadura e descontinuidade a ser caracterizada.

Relativamente ao Ensaio 3, a Figura 4.4 a) apresenta o fio na sua condição normal e as Figuras 4.4 b), c) e d) apresentam algumas fotografias retiradas do microscópio ao longo da descontinuidade de 3,33 m de comprimento.

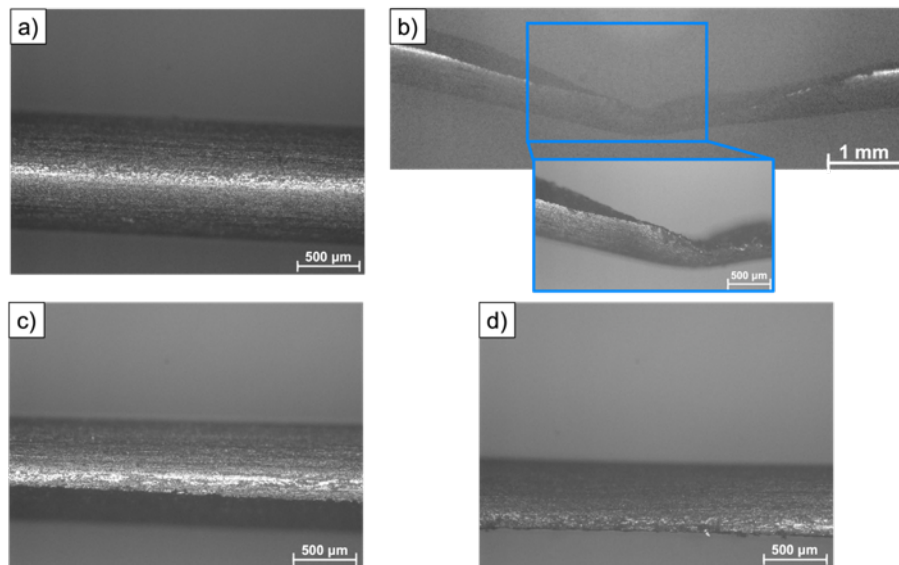


Figura 4.4 - Fotografias do microscópio tiradas ao longo da variação de diâmetro de 3,33 m:
a) fio na sua condição normal; b) maior variação de diâmetro registada com deformação plástica;
c) variação de diâmetro de cerca de 0,4 mm; d) variação de diâmetro de cerca de 0,5 mm.

4.2 – Fabrico de paredes por WAAM

Após a produção e caracterização das descontinuidades, procede-se para o fabrico das paredes por WAAM. Todos os ensaios foram efetuados com a máquina de soldar *Oerlikon Citowave III*. Os Ensaios 1 e 2 realizaram-se no braço robótico *Kuka KRC1*, presente na Figura 4.5 b) e o Ensaio 3 na máquina de WAAM triaxial apresentada na Figura 4.4 a).

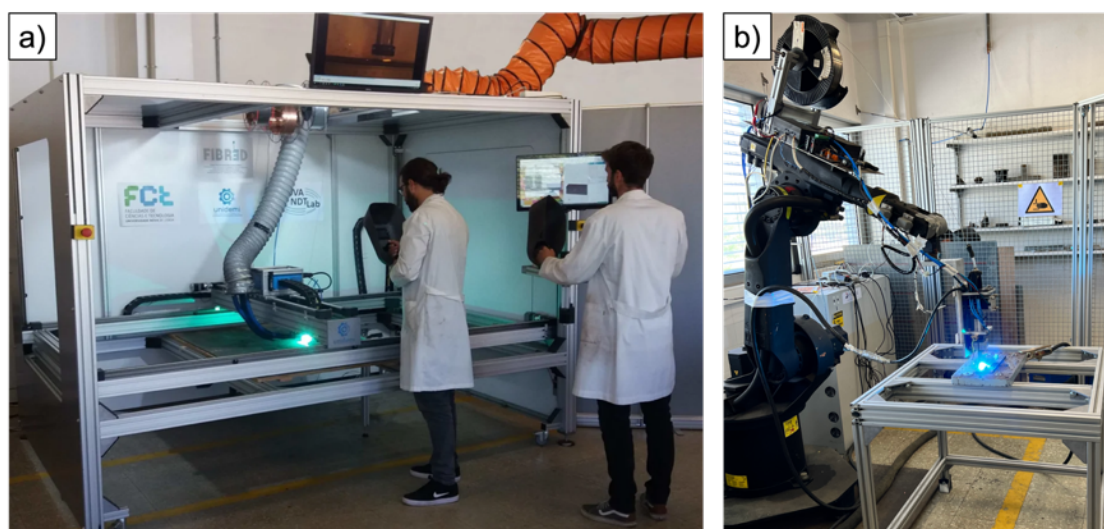


Figura 4.5 – Plataformas para a realização dos Ensaios 1, 2 e 3:

a) máquina de WAAM triaxial do DEMI da FCT-UNL para realização do Ensaio 3 [1];

b) célula robótica *Kuka* KRC1 adaptada para o WAAM para realização dos Ensaios 1 e 2.

A partir de outros ensaios previamente efetuados no braço robótico no âmbito de outros projetos, estabeleceu-se os parâmetros do processo de WAAM, apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Parâmetros selecionados do processo de WAAM para os Ensaios 1, 2 e 3.

Parâmetro	Ensaios 1 e 2	Ensaios 3
Comprimento da camada [mm]	50	100
Número de camadas	18	10
Velocidade de avanço da tocha [mm/s]	6	6
Velocidade de alimentação do fio [m/min]	3	3
Tempo entre camadas [s]	30	90
Caudal de gás [L/min]	16	16
Gás	Árgon	Árgon
Tensão [V]	19	19
Intensidade de corrente [A]	82	82

4.3 – Síntese do capítulo

Neste capítulo foi apresentada a metodologia usada para efetuar os diferentes ensaios experimentais com a finalidade de estudar o impacto que certos tipos de descontinuidades no fio de soldadura possam ter no processo de WAAM.

Foram abordados os diferentes tipos de descontinuidades a serem estudadas, a estrutura dos diferentes ensaios e o procedimento para produzir descontinuidades no fio de soldadura de forma a controlar a posição em que cada uma surge no momento de deposição em determinada

camada. Além disso, foi apresentada a caracterização das diferentes descontinuidades produzidas, tanto por inspeção visual, como por CI.

Por fim, foi indicado o procedimento para a produção das paredes por WAAM para os três ensaios estabelecidos, mostrando a plataforma onde as mesmas foram fabricadas e os parâmetros do processo escolhidos para cada ensaio.

5 - VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão tratados os resultados e discutidos os mesmos, onde será avaliada a eficácia do EROI V2 na limpeza de fio de soldadura oxidado. Para além disso, serão apresentadas as paredes fabricadas por WAAM nos Ensaios 1, 2 e 3 com fio de soldadura de aço AISI 316L com descontinuidades. Para cada uma será efetuada uma inspeção visual do seu interior através de sucessivas maquinações e por fim, será usado o END por raio-X com o intuito de verificar a presença de porosidades ou outro tipo de descontinuidade típica do processo WAAM, tal como foi discutido no Capítulo 2.2.1.

5.1 - EROI V2

Realizou-se um ensaio de limpeza ao fio de soldadura de aço ER-70 com 0,8 mm de diâmetro onde, nas Figuras 5.1 a) e c), é possível observar a oxidação na sua superfície antes de o mesmo ser processado pelo engenho e, nas Figuras 5.1 b) e d), a sua superfície totalmente limpa onde são visíveis as marcas deixadas pelas escovas de aço rotativas. O EROI V2 foi capaz de limpar o fio de soldadura na totalidade da sua superfície cilíndrica, que, em caso contrário, não seria usado em processos de soldadura e não resultaria num sinal sem ruído por parte da sonda de CI como já foi visto em [82]. A UM também foi testada e funcionou como pretendido,

sendo verificada a sua rigidez, aspeto que foi melhorado comparativamente a iterações anteriores.

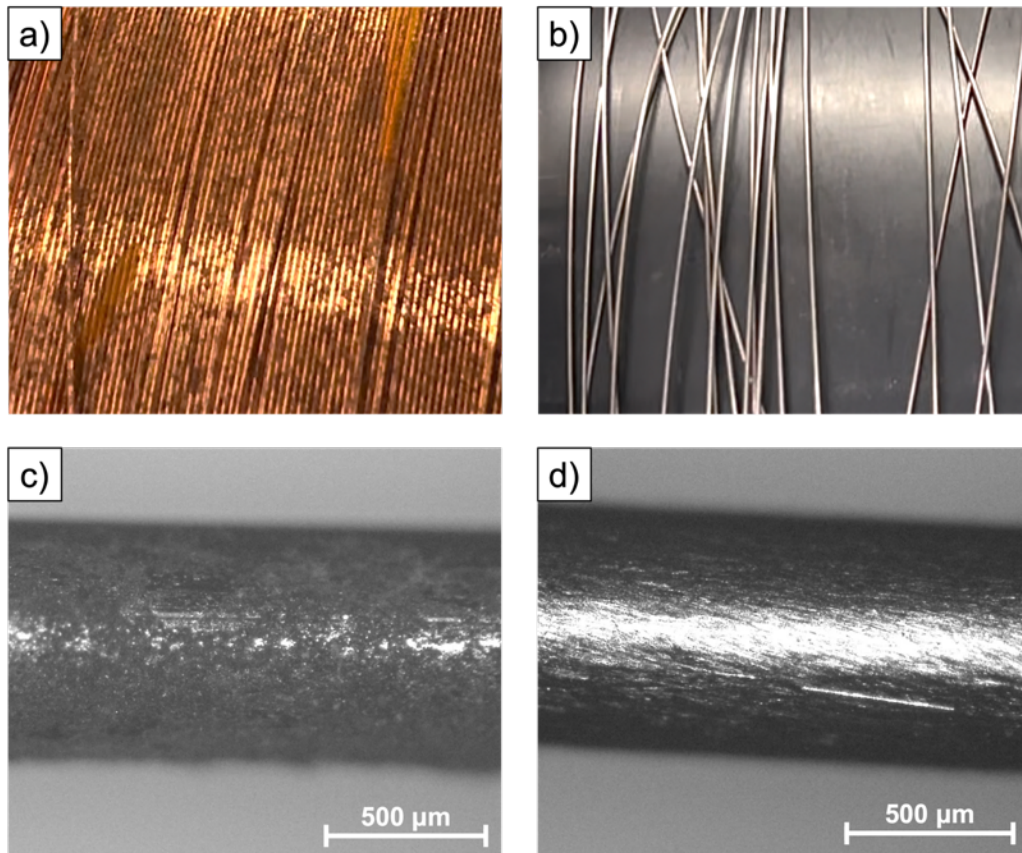


Figura 5.1 - Fio de soldadura de aço ER-70 antes e depois de ser processado pelo EROI V2:
a) fio de soldadura oxidado enrolado na bobina; b) fio de soldadura limpo enrolado na bobina (EROI V2-B);
c) fio de soldadura oxidado visto ao microscópio; d) fio de soldadura limpo pelo EROI V2 visto ao microscópio.

Após efetuada a limpeza do fio de soldadura e várias medições com um paquímetro com resolução de 0,05 mm, não se verificou qualquer variação de diâmetro do fio de soldadura que possa comprometer o processo de WAAM ou que obrigue ao ajuste dos parâmetros do mesmo. A Figura 5.2 compara as secções do fio de soldadura antes e depois de ser processado pelo EROI V2. Vale a pena notar que o pequeno desvio na medição do diâmetro horizontal no fio de soldadura limpo, presente na Figura 5.1 b), se pode dever à perspetiva em que a fotografia é tirada no microscópio, e não ao desgaste que as escovas de aço rotativas possam causar.

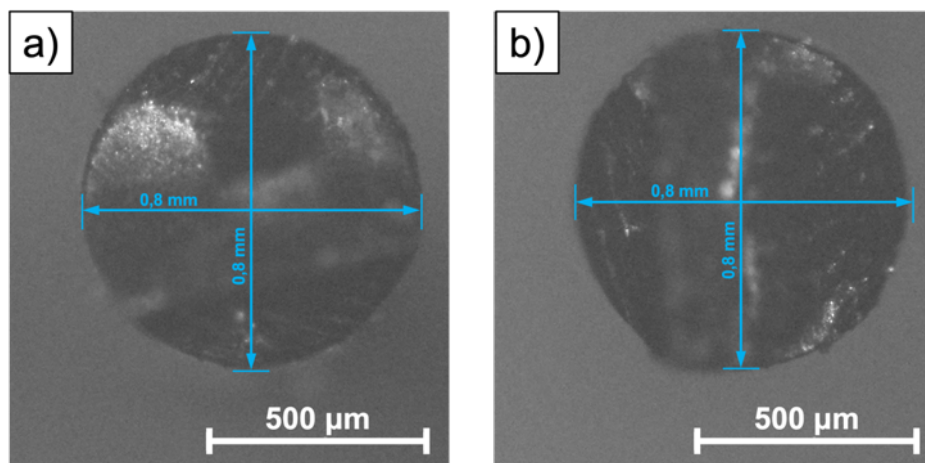


Figura 5.2 – Análise da secção do fio de soldadura limpo no EROI V2: a) antes da limpeza; b) depois da limpeza.

5.2 – Paredes produzidas por WAAM

Neste subcapítulo serão apresentadas todas as paredes produzidas por WAAM nos diferentes ensaios e efetuar-se-á a sua observação.

É importante lembrar que existe uma parede de referência para os Ensaios 1 e 2, e outra para o Ensaio 3 devido ao facto de os Ensaios 1 e 2 terem sido efetuados numa plataforma diferente e num dia diferente do Ensaio 3. As mesmas denominam-se, respetivamente, Ref-E1-E2 e Ref-E3, tendo como finalidade verificar que os parâmetros do processo são adequados. Além disso, servem como termo de comparação relativamente às paredes dos vários ensaios. Todas as paredes de referência foram sempre produzidas antes de qualquer ensaio, de modo a garantir que os parâmetros do processo de WAAM não tivessem impacto na qualidade das paredes fabricadas, visto que, o objetivo é entender apenas o impacto que discontinuidades no fio de soldadura possam ter na qualidade de peças produzidas por WAAM.

5.2.1 - Fio de soldadura com discontinuidades pontuais (Ensaios 1 e 2)

Começando pelos Ensaios 1 e 2, as paredes fabricadas têm 18 camadas com 50 mm de comprimento. A parede de referência para estes dois ensaios, Ref-E1-E2, presente na Figura 5.3, apresenta alguma ondulação lateral, não sendo identificada visualmente qualquer tipo de descontinuidade.



Figura 5.3 – Parede de referência fabricada por WAAM dos Ensaio 1 e 2 (Ref-E1-E2).

A parede fabricada no Ensaio 1 apresenta-se na Figura 5.4 onde se observa a presença de porosidade no seu topo e uma ondulação e rugosidade mais elevada no meio da mesma. Existiram algumas paragens não programadas durante o processo de fabrico devido à extinção do arco elétrico. Tal acontecimento pode dever-se a erros desconhecidos na célula robótica ou, mais provavelmente, à falta de contacto entre o rolete de pressão e o fio de soldadura na zona de diminuição de diâmetro, visto que, no mecanismo de tração, existe um rasgo no rolete motriz no qual o fio de soldadura afunda. O escorregamento do fio na tocha da célula robótica impede uma alimentação contínua do eletrodo consumível, levando à extinção do arco elétrico. Estas paragens não permitem a deposição de uma camada uniformemente o que, mesmo com a retoma do processo no local da paragem, resulta uma geometria inconsistente da camada.



Figura 5.4 – Parede fabricada por WAAM no Ensaio 1 na célula robótica.

O mesmo se sucede para a parede fabricada no Ensaio 2, presente na Figura 5.5, onde existiram algumas paragens não programadas a meio do processo, sendo possível observar porosidade nas camadas superiores e alguma ondulação lateral.



Figura 5.5 - Parede fabricada por WAAM no Ensaio 2 na célula robótica.

É importante anotar que durante todo o procedimento experimental (produção das descontinuidades, inspeção no microscópio, inspeção pelo método das CI) ambos os fios de soldadura estiveram sujeitos a adquirir impurezas na sua superfície, durante o seu manuseamento, e que provavelmente causaram o aumento da presença de poros na parede. Foi, por isso, importante redobrar o cuidado durante todo o procedimento experimental relativo ao Ensaio 3 de maneira a reduzir ao máximo a sujidade na superfície do fio de soldadura, visto que, não é o objetivo desta experiência estudar o impacto que qualquer impureza possa ter na qualidade de peças fabricadas por WAAM.

5.2.2 - Fio de soldadura com descontinuidade contínua (Ensaio 3)

Este ensaio foi orquestrado de maneira que a variação de diâmetro não provocasse qualquer escorregamento do fio de soldadura no mecanismo de tração denominado por *Oerlikon DMU W500*, da máquina de soldadura *Oerlikon Citowave III*. O mesmo acontece porque posicionou-se a descontinuidade de 3,33 m de comprimento de modo que o rolete de pressão estivesse sempre em contacto com fio de soldadura em boas condições. Tal é possível pois, entre o mecanismo de tração e a ponta do fio de soldadura onde é estabelecido o arco elétrico, existem cerca de 3,5 m de tubagem. É importante lembrar que este ensaio foi efetuado na máquina de WAAM triaxial, ao contrário dos Ensaio 1 e 2, que foram realizados na célula robótica.

Na Figura 5.6, é possível observar a parede de referência do Ensaio 3 que não apresenta qualquer tipo de descontinuidade na sua superfície, o que indica que foi feita uma boa escolha de parâmetros do processo.



Figura 5.6 - Parede de referência fabricada por WAAM do Ensaio 3 (Ref-E3).

Já a parede produzida no Ensaio 3, em termos geométricos, é idêntica à parede de referência, o que indica que a variação de diâmetro de 3,3 m não teve um impacto elevado na geometria da mesma. Acontece que, nas 6 camadas posteriores aos 3,3 m, quando o fio de soldadura se encontrava em condições normais, foi estabilizada a ondulação das camadas da zona inferior da parede, apresentada na Figura 5.7, na qual se observa uma falta de adição de material causada pela descontinuidade identificada na Figura 4.4 b), do Capítulo 4.1.2.

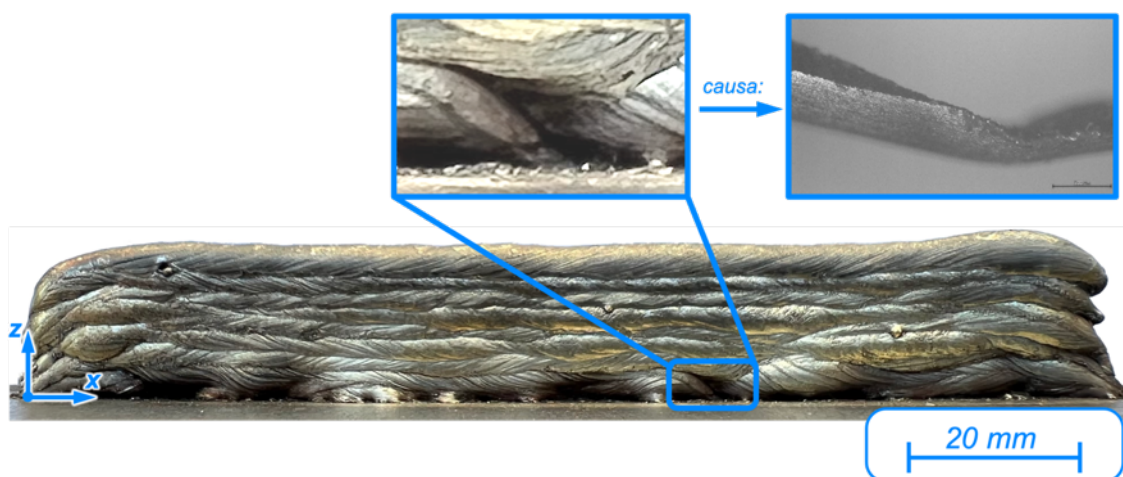


Figura 5.7 - Parede fabricada por WAAM no Ensaio 3 na máquina de WAAM triaxial.

Apesar da geometria desta parede não ter sido afetada, a geometria da mesma nas suas primeiras 4 camadas, onde a variação de diâmetro esteve presente, teve uma irregularidade mais elevada. A Figura 5.8 permite acompanhar a evolução do aspeto da parede com 2, 3, 4 e 5 camadas depositadas, sendo que, após a deposição da quarta camada, os efeitos da descontinuidade identificada na Figura 4.4 b), em termos geométricos, foram praticamente atenuados. Esta descontinuidade também provocou a extinção do arco elétrico na deposição da segunda camada, presente na Figura 5.8 a), onde é possível observar uma ondulação superficial mais elevada ao longo de toda a camada devido a variações no fluxo de material de adição, consequência da inconsistência do diâmetro do fio de soldadura.

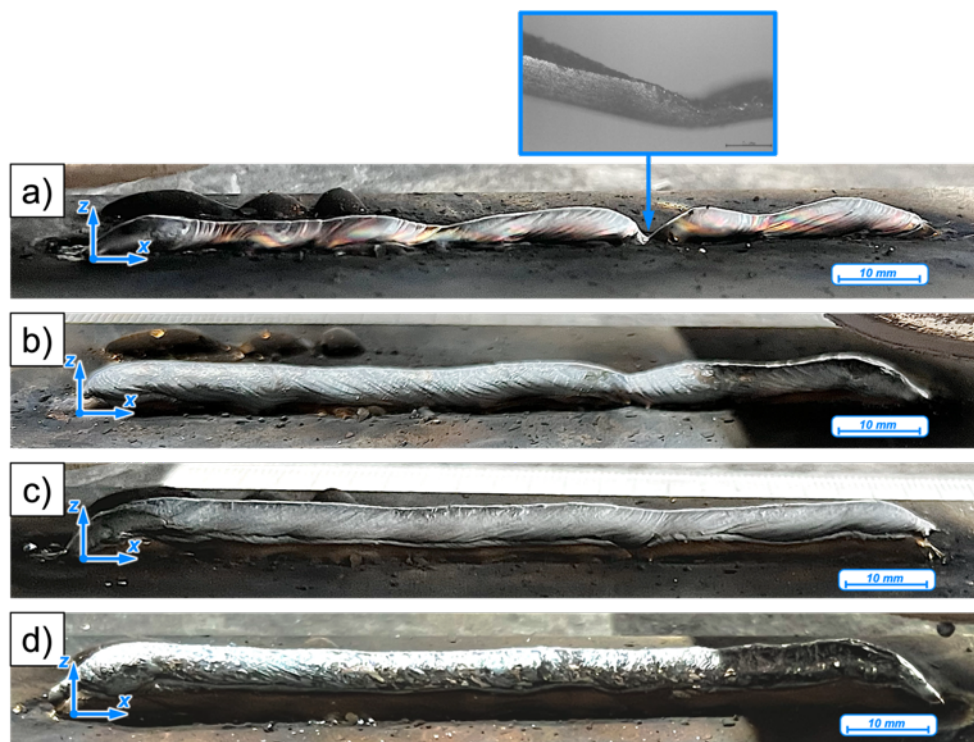


Figura 5.8 - Evolução do fabrico da parede por WAAM durante e após a variação de diâmetro contínua: a) segunda camada; b) terceira camada; c) quarta camada; d) quinta camada.

5.3 – Inspeção das paredes produzidas

Independentemente do aspeto exterior das paredes, é necessário averiguar a qualidade do interior das paredes, uma vez que, existe a possibilidade de descontinuidades, como por exemplo, poros ou fissuras, poderem estar presentes nessa zona e que possam ter sido causados pelas descontinuidades no fio de soldadura.

Nos vários ensaios, cada parede foi maquinada numa máquina fresadora manual. Removeu-se a ondulação lateral de modo a reduzir a espessura da parede, facilitando a inspeção por raio-X porque não será necessária uma potência mais elevada para que a radiação atravesse toda a espessura da parede. Além disso, entre cada maquinação foi efetuada uma inspeção visual a olho nu com a finalidade de rapidamente se perceber se existia algum poro cujo diâmetro fosse superior a aproximadamente $500\ \mu\text{m}$. É importante ter em consideração que qualquer poro estará sujeito a ser colapsado devido à deformação de material no processo de corte por arranque de aparas, e por isso, as velocidades de avanço e de *spindle* escolhidas na fresagem foram mínimas para diminuir ao máximo este fenómeno. A profundidade de corte em cada passagem foi de $250\ \mu\text{m}$.

5.3.1 - Ensaio 1 e 2

A parede de referência dos Ensaio 1 e 2 (Ref-E1-E2) foi maquinada até que restassem cerca de 2 mm de espessura. A Figura 5.9 apresenta ambos os lados da parede, sendo possível afirmar que não existe porosidade relevante (acima de 500 μm). As marcas curvilíneas são provenientes do processo de fresagem.

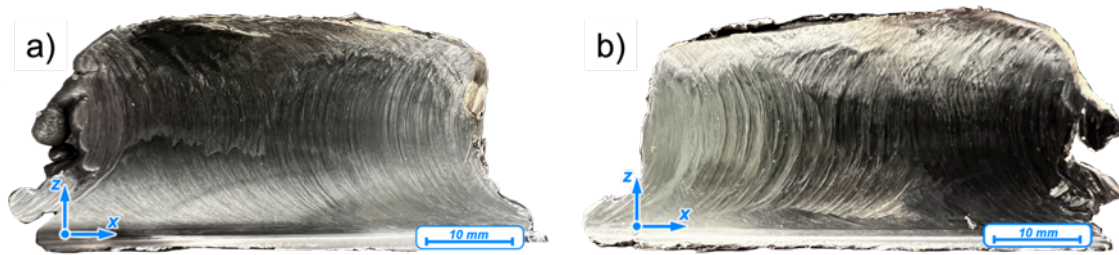


Figura 5.9 - Inspeção visual após maquinação por fresagem da parede Ref-E1-E2: a) frente; b) trás.

De seguida, foi efetuado um raio-X à parede Ref-E1-E2, presente na Figura 5.10, que confirma a não existência de poros ou fissuras no material que não foi maquinado, com a exceção dos poros na parte superior direita. Os mesmos podem ter sido causados por alguma instabilidade do processo durante a deposição da última camada. Tanto no início como no fim da deposição de uma camada, o processo pode ter alguma instabilidade pelo que a probabilidade de existirem descontinuidades nestas zonas é maior. Esta é, provavelmente, a razão da existência de poros na zona inferior esquerda da parede Ref-E1-E2. Daqui em diante, qualquer descontinuidade presente nessa zona não será considerada nos resultados e na discussão dos mesmos.

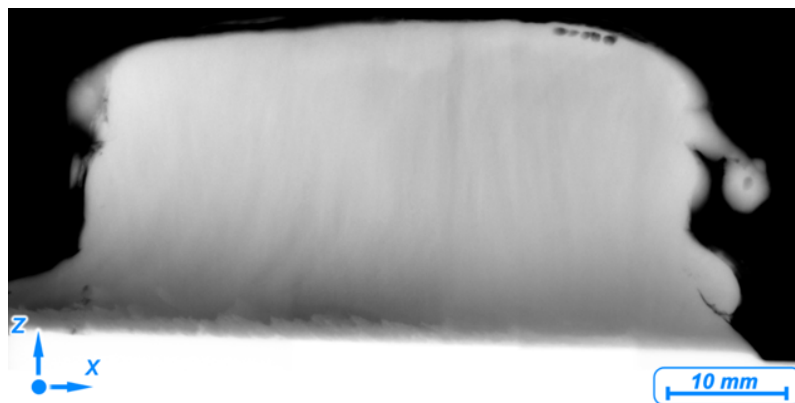


Figura 5.10 - Raio-X efetuado à parede Ref-E1-E2.

Já no Ensaio 1, é possível observar na Figura 5.11 b) a presença de descontinuidades no meio da parede após efetuada a sua maquinação. Tanto na Figura 5.11, assim como no raio-X presente na Figura 5.12, não só se deteta uma grande quantidade de vazios na camada superior, assim como, se deteta uma ondulação superficial elevada. Mais ainda, no raio-X está assinalada uma segunda descontinuidade que não é visível a olho nu na Figura 5.11.

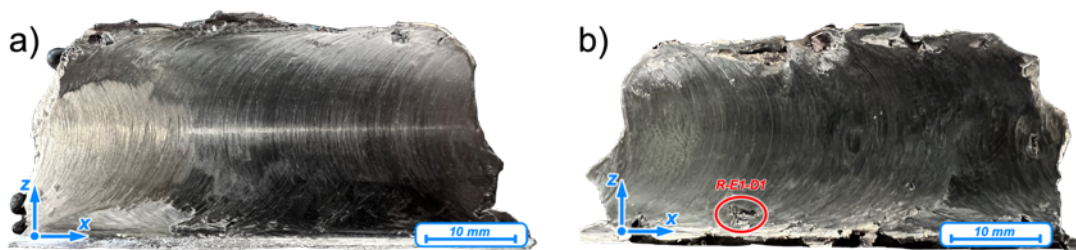


Figura 5.11 - Inspeção visual após maquinação por fresagem da parede E1. Identifica-se um vazio, denominado por R-E1-D1: a) frente; b) trás.

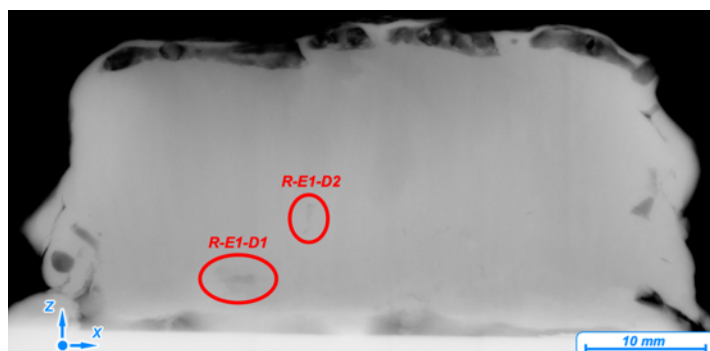


Figura 5.12 – Raio-X efetuado à parede E1, onde se identificam duas descontinuidades, uma já identificada na inspeção visual (R-E1-D1), e outra no presente raio-X (R-E1-D2), e ainda, porosidade elevada na última camada.

Existem vários fatores que poderão ter contribuído para o aparecimento das descontinuidades R-E1-D1 e R-E1-D2. O primeiro e mais provável é o facto de a variação de diâmetro do fio de soldadura, tal como já foi referido no Capítulo 5.2.1, provocar a extinção do arco elétrico devido à falta de contacto entre o rolete de pressão e o fio de soldadura no mecanismo de tração da máquina de soldadura, parando o movimento do fio de soldadura que alimenta o processo. Quando tal aconteceu, reposicionou-se a tocha no local onde se deu a extinção do arco elétrico, ou no caso de ocorrer já no fim da deposição da camada, reposicionou-se a tocha no local de início da deposição da camada seguinte. As sucessivas paragens e recomeços do processo aumentaram a ondulação lateral da parede e não só podem ter causado as descontinuidades identificadas no meio da parede, assim como, podem ter originado alguns dos vazios na camada superior.

Esta última observação surge da possibilidade de poros que tenham sido formados na deposição de camadas anteriores, poderem ir ascendendo ao longo do decorrer do processo. Tal é explicado pela diferença de densidades entre o gás presente no poro e o aço que, no caso de o mesmo se encontrar no estado líquido no momento da deposição, permite a subida do poro. Esta ascensão de poros acontece devido ao aparecimento de uma força de impulsão que ocorre devido à diferença de densidades entre o poro e o líquido que lhe aplica uma pressão hidrostática. Este fenómeno é explicado pela Lei de Arquimedes.

É importante notar que quanto maior a variação de diâmetro no fio de soldadura, maior a probabilidade de haver escorregamento entre o rolete de pressão e o fio de soldadura no mecanismo de tração. É o caso das descontinuidades E1-D2, E1-D3, E1-D7 e E1-D8,

identificadas na Tabela A4 do Anexo 2. As mesmas também podem causar instabilidade do arco elétrico, levando à inclusão de gás de proteção no banho de fusão, no entanto, estes ensaios não permitem estabelecer essa relação causa-efeito pois não existiu nenhum meio para detetar a ocorrência de tal fenómeno.

Como já se verificou na Figura 5.8, a variação de diâmetro pode também reduzir o fluxo de material de adição, causando ondulação superficial das camadas, ou pode até causar a extinção do arco elétrico, provocando uma falta de deposição de material, que pode estar relacionado com as descontinuidades identificadas no raio-X (R-E1-D1 e R-E1-D2). A descontinuidade R-E1-D1 poderá estar associada às variações de diâmetro no fio E1-D1 ou E1-D2 e a descontinuidade R-E1-D2 associada às variações de diâmetro E1-D3 ou E1-D4.

Passando agora ao Ensaio 2, cujas descontinuidades no fio de soldadura são indentações, veja-se as Figuras 5.13 e 5.14 que apresentam, respetivamente, a parede maquinada por fresagem em ambos os lados e o raio-X que lhe foi efetuado. Não são identificadas quaisquer descontinuidades no seu interior com a exceção do elevado número de vazios na camada superior, tal como se sucedeu no Ensaio 1.

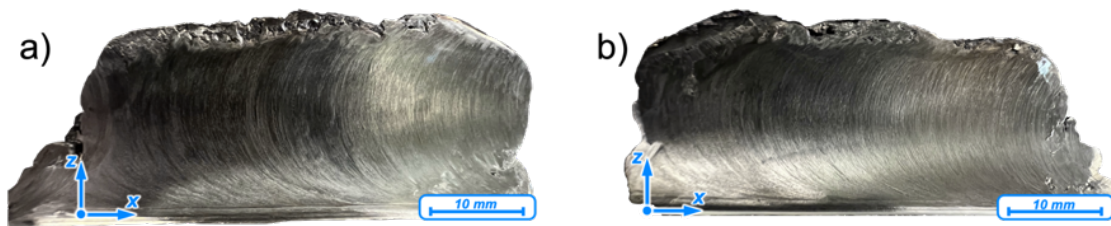


Figura 5.13 - Inspeção visual após maquinação por fresagem da parede E2: a) frente; b) trás.

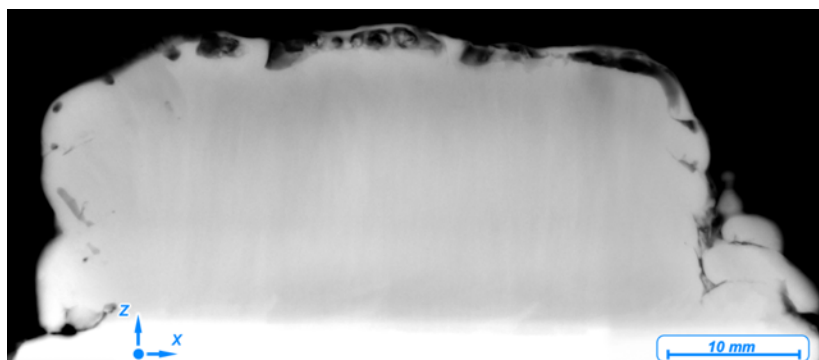


Figura 5.14 – Raio-X efetuado à parede E2, onde se identifica um elevado número de poros na última camada.

Neste ensaio houve paragens inesperadas durante o processo de fabrico da parede, também devido à extinção súbita do arco elétrico. Em cada paragem foram identificados problemas na alimentação do fio de soldadura, sugerindo que, mais uma vez, indentações no fio de soldadura podem causar também o escorregamento entre o rolete de pressão e o fio de soldadura, impedindo assim a alimentação do fio. As mesmas paragens e reinícios podem ter causado alguns dos poros que acabaram por ir ascendendo ao longo do processo de WAAM.

O caudal de gás de proteção foi verificado periodicamente em todos os ensaios e não foram identificadas variações no seu valor. Mesmo assim, os vazios observados na parede de referência dos Ensaios 1 e 2 podem sugerir que houve alguma inconsistência com o escoamento do gás de proteção à saída do bocal. A sujidade presente no fio de soldadura que adveio do seu manuseamento em laboratório é a causa mais provável para o aparecimento da maioria dos poros.

5.3.2 - Ensaio 3

Tal como os Ensaios 1 e 2, a parede foi maquinada até que restassem cerca de 2 mm de espessura, sendo a restante espessura inspecionada por raio-X. A Figura 5.15 apresenta a parede de referência do Ensaio 3 após a sua maquinação por fresagem, onde são visíveis ambos os lados. Da sua observação não se identifica qualquer descontinuidade.

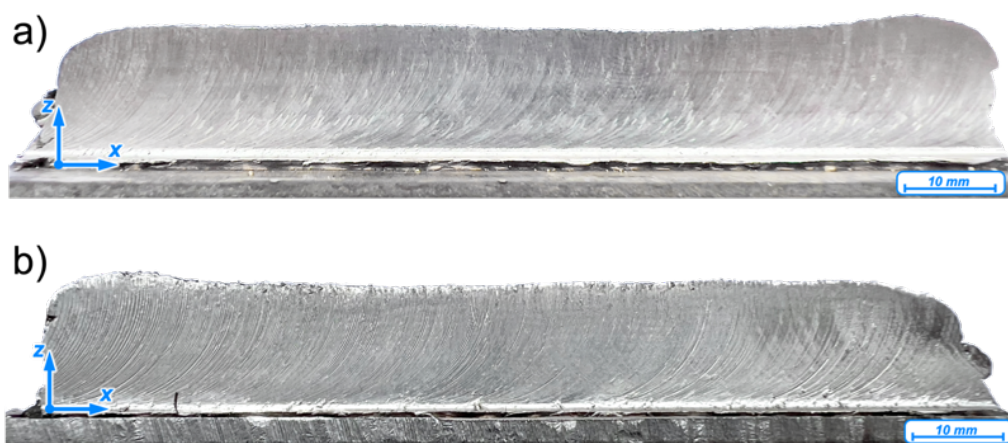


Figura 5.15 - Inspeção visual após maquinação por fresagem da parede Ref-E3: a) frente; b) trás.

A Figura 5.15 apresenta o raio-X efetuado à parede de referência onde se pode observar algumas descontinuidades provenientes do normal decorrer do processo.



Figura 5.16 – Raio-X efetuado à parede Ref-E3.

Prosseguindo da mesma maneira, a maquinação da parede do Ensaio 3 pode ser observada na Figura 5.17, onde a olho nu não se identifica qualquer descontinuidade. Note-se que as marcas curvilíneas presentes tanto na Figura 5.15, como na Figura 5.17, são provenientes do processo de fresagem usado para reduzir a espessura das paredes.

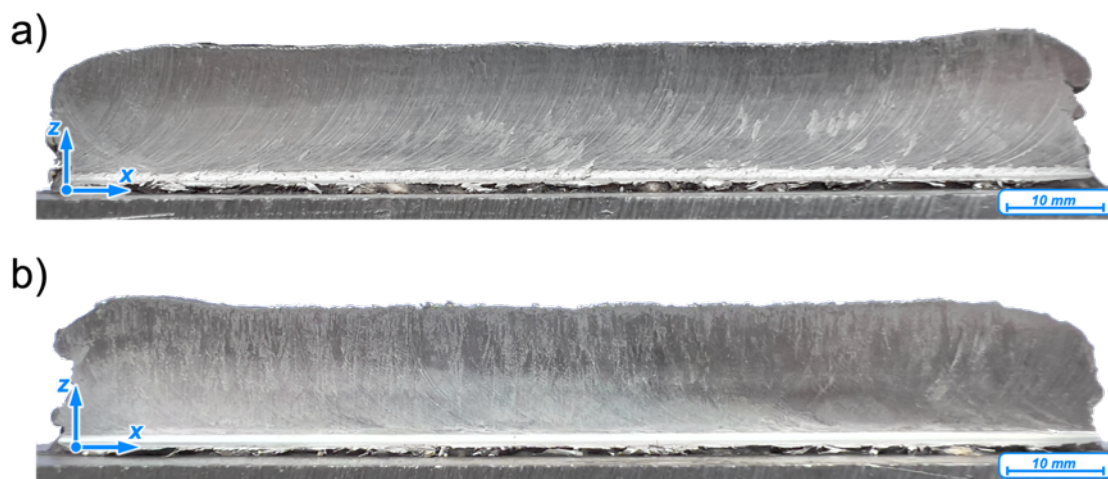


Figura 5.17 - Inspeção visual após maquinação por fresagem da parede E3: a) frente; b) trás.

O raio-X efetuado à parede maquinação do Ensaio 3, presente na Figura 5.18, revela algumas descontinuidades de dimensões reduzidas, mas em maior quantidade do que na parede de referência, podendo sugerir que tenham sido causadas devido a sujidade presente no fio de soldadura, resultado do seu manuseamento em laboratório no ato de produção da variação de diâmetro e da sua observação no microscópio. É importante referir que a disposição das descontinuidades na parede do Ensaio 3 sugere que a variação de diâmetro não tem um grande impacto no aumento de porosidade ou de outro tipo de defeito.



Figura 5.18 – Raio-X efetuado à parede E3.

5.4 – Síntese do Capítulo.

Neste capítulo apresentou-se os resultados obtidos relativamente aos vários ensaios realizados e discutiu-se acerca dos mesmos.

Quanto à produção das paredes por WAAM, nos Ensaio 1 e 2 onde a descontinuidade no fio de soldadura é pontual e a plataforma é o braço robótico, a parede de referência continha alguma ondulação lateral e posteriormente, no raio-X que lhe foi efetuado, identificaram-se alguns vazios na camada superior, indicando que o escoamento de gás de proteção poderá não ter sido o mais indicado para os Ensaio 1 e 2. Ainda assim, o interior da parede de referência não tinha qualquer descontinuidade relevante que invalidasse qualquer um dos ensaios.

O Ensaio 1 revelou que uma variação de diâmetro no fio de soldadura pode causar a extinção do arco elétrico durante o processo de WAAM devido à ausência de contacto entre o rolete de pressão e o fio de soldadura no mecanismo de tração da máquina de soldadura. Esta situação causa a paragem da alimentação do fio de soldadura, em que as sucessivas interrupções e recomeços do processo podem aumentar a ondulação lateral da parede e diminuir a precisão geométrica da mesma, principalmente no caso de o processo recomeçar na deposição da próxima camada (extremo da parede), ao invés de recomeçar na zona onde se deu a extinção do arco elétrico (completando a camada interrompida). A presença de um elevado número de vazios na camada superior detetada no raio-X pode ser resultado tanto do fluxo de gás inapropriado, da instabilidade do arco elétrico, das sucessivas paragens e recomeços do processo, mas mais provavelmente de impurezas presentes na superfície do fio de soldadura, provenientes do seu manuseamento em laboratório. A variação de diâmetro pontual pode causar uma diminuição do fluxo de material de adição, podendo provocar vazios identificados no raio-X (R-E1-D1 e R-E1-D2).

O Ensaio 2 revelou que indentações no fio também podem causar a ausência de contacto entre o rolete de pressão e o fio de soldadura no mecanismo de tração, provocando a extinção do arco elétrico, tal como no Ensaio 1. No raio-X realizado à parede do Ensaio 2, não foram identificados vazios na zona central, sugerindo que indentações no fio podem não ter tanta influência na formação de poros. Igualmente ao Ensaio 1, existe um grande número de poros na última camada, o que aponta para a presença de impurezas na superfície do fio de soldadura.

O Ensaio 3 permitiu observar os efeitos que uma variação de diâmetro contínua (3,33 m) no fio de soldadura tem no processo de WAAM. De modo a evitar que a variação de diâmetro pudesse provocar a extinção do arco elétrico por problemas de alimentação como nos dois ensaios anteriores, toda a descontinuidade encontrava-se numa zona do fio de soldadura entre a tocha e o mecanismo de tração cuja distância é, aproximadamente, 3,5 m. Verificou-se que uma variação de diâmetro que se prolongue ao longo do fio pode provocar uma maior ondulação das camadas devido ao fluxo de material de adição inconstante. Para além disso, estava identificada no fio de soldadura uma variação de diâmetro mais abrupta que causou a extinção do arco elétrico no momento da sua deposição e por conseguinte, a falta de adição de material, deixando uma ondulação na camada muito acentuada. Esta ondulação pode comprometer a precisão geométrica de peças fabricadas por WAAM, ainda assim, após a deposição de 3 camadas com fio de soldadura tanto com variação de diâmetro, como em condições normais, essa mesma ondulação foi suprimida, sendo a geometria final da parede praticamente idêntica à da parede de referência do Ensaio 3.

É importante lembrar que todos estes resultados e possíveis causa-efeitos só são válidos para o Aço Inoxidável AISI 316L, que foi o material eleito para este estudo, pelo que, os resultados poderão ser diferentes para qualquer outro material.

6 – CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Neste capítulo apresentam-se as conclusões mais relevantes advindas de todo o trabalho experimental. Do mesmo modo, discute-se os possíveis trabalhos futuros que possam dar continuidade a esta dissertação ou que a complemente.

6.1 – EROI V2 e o seu possível contributo para o aumento da qualidade de peças produzidas por WAAM

Na literatura, existem poucos estudos que relacionam o estado da superfície do fio de soldadura com a qualidade de peças produzidas por WAAM. De forma a garantir que a superfície do mesmo esteja livre de óxidos ou de outras impurezas, foi projetado uma segunda versão de um mecanismo capaz de efetuar a sua limpeza, denominado por EROI V2. Uma superfície de fio de soldadura limpa contribui para o aumento da qualidade de peças fabricadas pelo processo de WAAM e garante uma elevada relação sinal/ruído da leitura de variação de impedância efetuada pela sonda de CI do fio de soldadura.

O chassis do EROI V2 foi projetado para ser montado no topo da máquina de WAAM do DEMI da FCT-UNL e albergar 4 UL's, uma UM para tracionar o fio de soldadura, a sonda de CI do fio de soldadura e uma roldana para auxiliar na mudança de direção do fio de soldadura. Esta última pode ser substituída por uma bobina onde se enrola o fio limpo com o intuito de se poder processar o mesmo de forma manual numa bancada (EROI V2-B). Toda a modelação e renderização do EROI V2 foi realizada através do *software SolidWorks*.

Este mecanismo cumpriu todas as especificações definidas e foi capaz de limpar toda a superfície oxidada do fio de soldadura usado em processos de soldadura ou no WAAM. A oxidação do fio de soldadura é mais comum em ambientes húmidos e quando as condições de armazenamento não são as mais ideais. O simples manuseamento da bobina pode aumentar a presença de impurezas na superfície do fio de soldadura, como por exemplo, gordura ou pó. Deste modo, o EROI V2 contribui para evitar o desperdício de fio de soldadura que já não esteja em condições de ser usado, garantindo a remoção de impurezas que podem aumentar a porosidade de peças fabricadas por WAAM. Durante a testagem do engenho, foi verificado um aumento da temperatura dos motores DC responsáveis por acionar as escovas de aço durante a limpeza. Já o diâmetro do fio de soldadura permaneceu inalterado. A UM apresentou uma boa rigidez durante o seu funcionamento, aspeto que foi melhorado quando comparado com iterações anteriores desde dispositivo.

O EROI V2 é, assim, uma máquina que pode contribuir para o aumento da qualidade de peças fabricadas por WAAM, aumento da qualidade de soldadura por MIG/MAG e que contribui para um menor desperdício de fio de soldadura.

6.2 – Impacto de descontinuidades presentes no fio de soldadura na qualidade de peças produzidas por WAAM em aço inoxidável AISI 316L

Verificou-se que variações de diâmetro e indentações no fio de soldadura de aço inoxidável AISI 316L provocaram várias interrupções do processo de WAAM. Tal fenómeno deve-se à ausência de contacto entre o rolete de pressão e o fio de soldadura no mecanismo de tração que, como ilustrado na Figura 6.1, causa um escorregamento e, por conseguinte, a extinção do arco elétrico pois não existe alimentação. As sucessivas interrupções-recomeços provocaram uma maior ondulação lateral das paredes. Verificou-se que as descontinuidades do fio de soldadura E1-D2, E1-D3, E1-D7 e E1-D8 podem ter provocado vazios na parede, resultado da instabilidade do arco elétrico ou da falta de adição de material. A sujidade presente no fio de soldadura, devido ao seu manuseamento em laboratório durante a produção de descontinuidades e caracterização das mesmas, é a causa mais provável da porosidade presente nas paredes do Ensaio 1 e 2. Pela Lei de Arquimedes, ou seja, devido à diferença de densidades entre o poro e o aço, os mesmos podem ter subido durante as sucessivas fusões/re-solidificações e alojaram-se na camada superior da parede. As indentações também provocaram o escorregamento no mecanismo de tração, mas não com tanta frequência, quando comparado com o Ensaio 1.

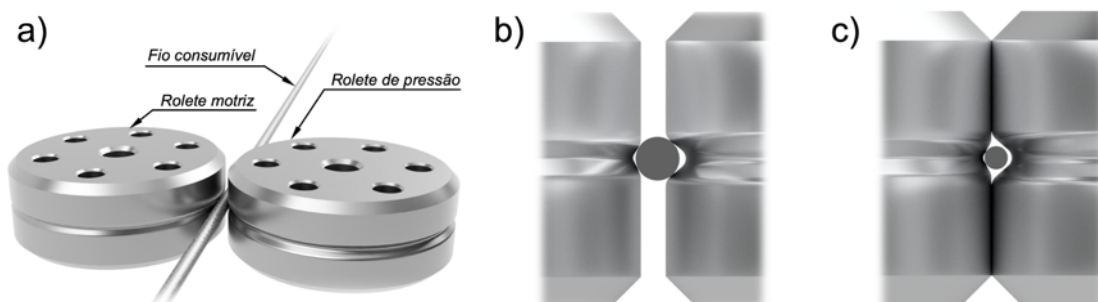


Figura 6.1 – Ilustração do escorregamento de fio de soldadura no mecanismo de tração da máquina de soldadura:
 a) ilustração simplificada do mecanismo de tração;
 b) fio com diâmetro normal onde existe contacto entre o mesmo e o rolete de pressão;
 c) fio com redução de diâmetro onde não existe contacto entre o mesmo e o rolete de pressão.

Relativamente à variação de diâmetro contínua de 3,3 metros, verificou-se que, durante a sua deposição, existe um aumento significativo da ondulação superficial das várias camadas, resultado da variação de fluxo de material prolongada. Foram necessárias cerca de 2 camadas de fio de soldadura em condições normais para que a ondulação fosse suprimida. Nas primeiras camadas, em zonas no fio de soldadura em que a variação de diâmetro fosse mais elevada, ocorreu a extinção do arco elétrico momentânea, o que provocou uma falta de deposição de material. A mesma provocou a extinção do arco elétrico na camada seguinte devido ao aumento da distância entre a ponta do eléctrodo e a superfície da última camada. Esta ocorrência provocou a maior ondulação superficial registada. A mesma foi atenuada após a deposição de 4 camadas, das quais, três foram depositadas com variação de diâmetro, e uma com fio de soldadura em condições normais.

Sumarizando:

- A sujidade presente no fio de soldadura devido ao seu manuseamento em laboratório é a causa mais provável do aumento do número de poros nas paredes metálicas produzidas por WAAM.
- Segundo a Lei de Arquimedes, os poros podem ter subido ao longo da parede com o decorrer do processo, alojando-se na camada superior.
- Uma variação de diâmetro, por menor que seja em termos de comprimento, pode causar a interrupção do processo devido à ausência de contacto entre o fio de soldadura e o rolete de pressão do mecanismo de tração da máquina de soldadura. Isto provoca a extinção do arco elétrico pois não existe alimentação do fio.
- Um mecanismo de tração dupla é uma possível solução para o problema do escorregamento do fio de soldadura.
- As sucessivas paragens e recomeços do processo provocam um aumento da ondulação lateral das paredes produzidas por WAAM, pondo em causa a precisão geométrica de peças produzidas por este processo.

- A variação de diâmetro contínua provoca um aumento da ondulação superficial das camadas devido ao fluxo inconstante de material de adição.
- Uma variação de diâmetro de valores mais elevados pode provocar a extinção do arco elétrico e, por conseguinte, a falta de deposição de material momentânea, causando uma elevada ondulação superficial na zona onde essa variação de diâmetro foi depositada. A mesma pode também causar vazios na peça produzida por WAAM.
- Uma falta de deposição de material que gere uma ondulação superficial elevada pontual necessitará, no mínimo, de 4 camadas depositadas para que essa mesma ondulação seja suprimida em termos geométricos.
- A ligeira ondulação superficial causada pela variação de diâmetro constante é suprimida, geometricamente, com a deposição de, pelo menos e pelo que foi observado, entre uma a duas camadas cujo fio de soldadura se encontre em boas condições.

De um modo geral, para o aço AISI 316L, pode-se afirmar que as variações de diâmetro e indentações não têm um impacto tão elevado na qualidade de peças metálicas fabricadas por WAAM, quando comparado com os efeitos da presença de impurezas no fio de soldadura, partindo do princípio de que as descontinuidades no fio de soldadura não provoquem a interrupção do processo. Caso contrário, as várias paragens e recomeços, se não forem bem efetuados, podem comprometer a precisão geométrica das peças.

6.3 – Propostas para desenvolvimentos futuros

Existem ainda diversos aspetos que devem ser estudados para dar continuação a este trabalho que serão agora discutidos. Sugere-se que, para complementar este mesmo estudo, é importante ainda verificar o impacto que a oxidação presente na superfície do fio de soldadura tem na qualidade de peças fabricadas por WAAM. Para além disso, com o objetivo de continuar o processo de validação do EROI V2, deve-se usar o mesmo fio de soldadura oxidado, efetuar a sua limpeza no engenho e depois, produzir uma parede por WAAM, avaliando a sua qualidade e comparando-a com a parede produzida com fio oxidado. Sugere-se o uso do aço ER-70 ou ER-90 para esta atividade laboratorial.

Relativamente ao EROI V2 em si, como se verificou um aquecimento dos motores DC que acionam as escovas de aço rotativas, quando a limpeza do fio de soldadura decorre, será necessária a implementação de uma ventoinha em cada UL com o intuito de provocar um escoamento de ar que contorne a superfície do motor DC, promovendo a convexão forçada e facilitando, assim, o escoamento do calor. Para tal, será necessário redesenhar a carcaça superior da UL de forma a poder albergar uma ventoinha de 12 V.

É importante lembrar que as conclusões aqui apresentadas apenas se aplicam ao aço inoxidável AISI 316L, pelo que, descontinuidades presentes em fio de soldadura de outro

material metálico podem ter um impacto diferente na qualidade das peças fabricadas por WAAM bem como na estabilidade do processo. Por isso, é necessário repetir este estudo com diferentes materiais, como o aço, alumínio, inonel e titânio. Para além disso, será necessário repensar a metodologia para a produção de descontinuidades no fio de soldadura de forma a minimizar ao máximo a fixação de impurezas na superfície do fio provenientes do seu manuseamento em laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Santos TG. Impressão 3D: realidade e mitos. Observador 2020. <https://observador.pt/opiniaio/impressao-3d-realidade-e-mitos/> (acedido 14 de Setembro de 2021).
- [2] Bynum W. Breve História da Ciência. 2ª. Lisboa: Clube do Autor; 2018.
- [3] Rodrigues TA, Duarte V, Miranda RM, Santos TG, Oliveira JP. Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). Mater 2019, Vol 12, Page 1121 2019;12:1121. <https://doi.org/10.3390/MA12071121>.
- [4] Williams SW, Martina F, Addison AC, Ding J, Pardal G, Colegrove P. Wire + Arc Additive Manufacturing. Mater Sci Technol 2016. <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>.
- [5] Waller J, Parker B, Hodges K, Walker J. Nondestructive Evaluation of Additive Manufacturing State-of-the Discipline Report. NASA 2014.
- [6] Soller S, Barata A, Beyer S, Dahlhaus A, Guichard D, Humbert E, et al. Selective Laser Melting (SLM) of Inconel 718 and Stainless Steel Injectors for Liquid Rocket Engines 2016.
- [7] Lopes JG, Machado CM, Duarte VR, Rodrigues TA, Santos TG, Oliveira JP. Effect of milling parameters on HSLA steel parts produced by Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). J Manuf Process 2020;59:739–49. <https://doi.org/10.1016/J.JMAPRO.2020.10.007>.
- [8] Gibson I, Rosen D, Stucker B. Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Second Edi. Springer; 2015.
- [9] Goh GD, Yap YL, Tan HKJ, Sing SL, Goh GL, Yeong WY. Process–Structure–Properties in Polymer Additive Manufacturing via Material Extrusion: A Review. Crit Rev Solid State Mater Sci 2019;45:113–33. <https://doi.org/10.1080/10408436.2018.1549977>.
- [10] Faes M, Valkenaers H, Vogeler F, Vleugels J, Ferraris E. Extrusion-based 3D Printing of Ceramic Components. Procedia CIRP 2015;28:76–81.

- <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2015.04.028>.
- [11] Wang Y, Zhou Y, Lin L, Corker J, Fan M. Overview of 3D additive manufacturing (AM) and corresponding AM composites. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2020;139:106114. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2020.106114>.
- [12] Li JLZ, Alkahari MR, Rosli NAB, Hasan R, Sudin MN, Ramli FR. Review of wire arc additive manufacturing for 3d metal printing. *Int J Autom Technol* 2019;13:346–53. <https://doi.org/10.20965/ijat.2019.p0346>.
- [13] Ding D, Pan Z, Cuiuri D, Li H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *Int J Adv Manuf Technol* 2015 811 2015;81:465–81. <https://doi.org/10.1007/S00170-015-7077-3>.
- [14] Flynn JM, Shokrani A, Newman ST, Dhokia V. Hybrid additive and subtractive machine tools - Research and industrial developments. *Int J Mach Tools Manuf* 2016;101:79–101. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.11.007>.
- [15] Spierings AB, Starr TL, Wegener K. Fatigue performance of additive manufactured metallic parts. *Rapid Prototyp J* 2013;19:88–94. <https://doi.org/10.1108/13552541311302932/FULL/XML>.
- [16] Kah P, Latifi H, Suoranta R, Martikainen J, Pirinen M. Usability of arc types in industrial welding. *Int J Mech Mater Eng* 2014;9:1–12. <https://doi.org/10.1186/s40712-014-0015-6>.
- [17] Martina F, Mehnen J, Williams SW, Colegrove P, Wang F. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V. *J Mater Process Technol* 2012;212:1377–86. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.02.002>.
- [18] Oliveira JP, Crispim B, Zeng Z, Omori T, Braz Fernandes FM, Miranda RM. Microstructure and mechanical properties of gas tungsten arc welded Cu-Al-Mn shape memory alloy rods. *J Mater Process Technol* 2019;271:93–100. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.03.020>.
- [19] McAndrew AR, Alvarez Rosales M, Colegrove PA, Hönnige JR, Ho A, Fayolle R, et al. Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement. *Addit Manuf* 2018;21:340–9. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.006>.

- [20] Horgar A, Fostervoll H, Nyhus B, Ren X, Eriksson M, Akselsen OM. Additive manufacturing using WAAM with AA5183 wire. *J Mater Process Technol* 2018;259:68–74. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.04.014>.
- [21] Suban M, Tušek J. Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on the type of shielding gas used. *J Mater Process Technol* 2001;119:185–92. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00940-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00940-2).
- [22] Dinovitzer M, Chen X, Laliberte J, Huang X, Frei H. Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure. *Addit Manuf* 2019;26:138–46. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.12.013>.
- [23] Martina F, Ding J, Williams S, Caballero A, Pardal G, Quintino L. Tandem metal inert gas process for high productivity wire arc additive manufacturing in stainless steel. *Addit Manuf* 2019;25:545–50. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.022>.
- [24] RAMLAB unveils world's first class approved 3D printed ship's propeller 2017. <https://www.ramlab.com/updates/ramlab-unveils-worlds-first-class-approved-3d-printed-ships-propeller/> (acedido 17 de Janeiro de 2022).
- [25] Yehorov Y, da Silva LJ, Scotti A. 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* 2019;3. <https://doi.org/10.3390/jmmp3020032>.
- [26] Xiong J, Li Y, Li R, Yin Z. Influences of process parameters on surface roughness of multi-layer single-pass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing. *J Mater Process Technol* 2018;252:128–36. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.09.020>.
- [27] Chernovol N, Sharma A, Tjahjowidodo T, Lauwers B, Van Rymenant P. Machinability of wire and arc additive manufactured components. *CIRP J Manuf Sci Technol* 2021;35:379–89. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.06.022>.
- [28] Ayarkwa KF, Williams S, Ding J. Investigation of pulse advance cold metal transfer on aluminium wire arc additive manufacturing. *Int J Rapid Manuf* 2015;5:44. <https://doi.org/10.1504/IJRAPIDM.2015.073547>.
- [29] Biswal R, Zhang X, Syed AK, Awd M, Ding J, Walther F, et al. Criticality of porosity defects on the fatigue performance of wire + arc additive manufactured titanium alloy.

- Int J Fatigue 2019;122:208–17. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.01.017>.
- [30] Biswal R, Zhang X, Shamir M, Al Mamun A, Awd M, Walther F, et al. Interrupted fatigue testing with periodic tomography to monitor porosity defects in wire + arc additive manufactured Ti-6Al-4V. *Addit Manuf* 2019;28:517–27. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.04.026>.
- [31] Wang F, Williams S, Colegrove P, Antonysamy AA. Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V. *Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci* 2013;44:968–77. <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1444-6>.
- [32] Ryan EM, Sabin TJ, Watts JF, Whiting MJ. The influence of build parameters and wire batch on porosity of wire and arc additive manufactured aluminium alloy 2319. *J Mater Process Technol* 2018;262:577–84. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.07.030>.
- [33] Cong B, Ding J, Williams S. Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy. *Int J Adv Manuf Technol* 2015;76:1593–606. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6346-x>.
- [34] Sridar S, Klecka MA, Xiong W. Interfacial characteristics of P91 steel - Inconel 740H bimetallic structure fabricated using wire-arc additive manufacturing. *J Mater Process Technol* 2022;300:117396. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117396>.
- [35] Liao Z, Yang B, Xiao S, Yang G, Zhu T. Fatigue crack growth behaviour of an Al-Mg4.5Mn alloy fabricated by hybrid in situ rolled wire + arc additive manufacturing. *Int J Fatigue* 2021;151:106382. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106382>.
- [36] Shen C, Pan Z, Cuiuri D, Ding D, Li H. Influences of deposition current and interpass temperature to the Fe3Al-based iron aluminide fabricated using wire-arc additive manufacturing process. *Int J Adv Manuf Technol* 2017;88:2009–18. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8935-3>.
- [37] Thavamani R, Balusamy V, Nampoothiri J, Subramanian R, Ravi KR. Mitigation of hot cracking in Inconel 718 superalloy by ultrasonic vibration during gas tungsten arc welding. *J Alloys Compd* 2018;740:870–8. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.295>.
- [38] Park SC, Bang HS, Seong WJ. Effects of material properties on angular distortion in wire arc additive manufacturing: Experimental and computational analyses. *Materials (Basel)* 2020;13. <https://doi.org/10.3390/ma13061399>.

- [39] Xu F, Dhokia V, Colegrove P, McAndrew A, Williams S, Henstridge A, et al. Realisation of a multi-sensor framework for process monitoring of the wire arc additive manufacturing in producing Ti-6Al-4V parts. *Int J Comput Integr Manuf* 2018;31:785–98. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2018.1466395>.
- [40] Montevocchi F, Venturini G, Grossi N, Scippa A, Campatelli G. Finite Element mesh coarsening for effective distortion prediction in Wire Arc Additive Manufacturing. *Addit Manuf* 2017;18:145–55. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.10.010>.
- [41] Ley FH, Campbell SW, Galloway AM, McPherson NA. Effect of shielding gas parameters on weld metal thermal properties in gas metal arc welding. *Int J Adv Manuf Technol* 2015;80:1213–21. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7106-2>.
- [42] Cunningham CR, Flynn JM, Shokrani A, Dhokia V, Newman ST. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. *Addit Manuf* 2018;22:672–86. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.020>.
- [43] Singh SR, Khanna P. Wire arc additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials. *Mater Today Proc* 2021;44:118–28. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.030>.
- [44] Wu B, Pan Z, Ding D, Cuiuri D, Li H, Xu J, et al. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. *J Manuf Process* 2018;35:127–39. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>.
- [45] Lopez A, Bacelar R, Pires I, Santos TG, Sousa JP, Quintino L. Non-destructive testing application of radiography and ultrasound for wire and arc additive manufacturing. *Addit Manuf* 2018;21:298–306. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.020>.
- [46] Ding D, Pan Z, van Duin S, Li H, Shen C. Fabricating superior NiAl bronze components through wire arc additive manufacturing. *Materials (Basel)* 2016;9. <https://doi.org/10.3390/ma9080652>.
- [47] Hauser T, Reisch RT, Seebauer S, Parasar A, Kamps T, Casati R, et al. Multi-Material Wire Arc Additive Manufacturing of low and high alloyed aluminium alloys with in-situ material analysis. *J Manuf Process* 2021;69:378–90. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.08.005>.
- [48] Rosli NA, Alkahari MR, bin Abdollah MF, Maidin S, Ramli FR, Herawan SG. Review on effect of heat input for wire arc additive manufacturing process. *J Mater Res Technol*

- 2021;11:2127–45. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.02.002>.
- [49] Li F, Chen S, Shi J, Zhao Y, Tian H. Thermoelectric cooling-aided bead geometry regulation in wire and arc-based additive manufacturing of thin-walled structures. *Appl Sci* 2018;8. <https://doi.org/10.3390/app8020207>.
- [50] Rodrigues TA, Duarte V, Avila JA, Santos TG, Miranda RM, Oliveira JP. Wire and arc additive manufacturing of HSLA steel: Effect of thermal cycles on microstructure and mechanical properties. *Addit Manuf* 2019;27:440–50. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.029>.
- [51] Wang F, Williams S, Rush M. Morphology investigation on direct current pulsed gas tungsten arc welded additive layer manufactured Ti6Al4V alloy. *Int J Adv Manuf Technol* 2011;57:597–603. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3299-1>.
- [52] Martina F, Colegrove PA, Williams SW, Meyer J. Microstructure of Interpass Rolled Wire + Arc Additive Manufacturing Ti-6Al-4V Components. *Metall Mater Trans A Phys Metall Mater Sci* 2015;46:6103–18. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-3172-1>.
- [53] Duarte VR, Rodrigues TA, Schell N, Miranda RM, Oliveira JP, Santos TG. Hot forging wire and arc additive manufacturing (HF-WAAM). *Addit Manuf* 2020;35:101193. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101193>.
- [54] Hönnige JR, Colegrove PA, Ganguly S, Eimer E, Kabra S, Williams S. Control of residual stress and distortion in aluminium wire + arc additive manufacture with rolling. *Addit Manuf* 2018;22:775–83. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.015>.
- [55] Colegrove PA, Donoghue J, Martina F, Gu J, Prangnell P, Hönnige J. Application of bulk deformation methods for microstructural and material property improvement and residual stress and distortion control in additively manufactured components. *Scr Mater* 2017;135:111–8. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2016.10.031>.
- [56] Xie Y, Zhang H, Zhou F. Improvement in Geometrical Accuracy and Mechanical Property for Arc-Based Additive Manufacturing Using Metamorphic Rolling Mechanism. *J Manuf Sci Eng Trans ASME* 2016;138. <https://doi.org/10.1115/1.4032079/454603>.
- [57] Li Z, Liu C, Xu T, Ji L, Wang D, Lu J, et al. Reducing arc heat input and obtaining equiaxed grains by hot-wire method during arc additive manufacturing titanium alloy. *Mater Sci Eng A* 2019;742:287–94. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.022>.

- [58] Oliveira JP, Gouveia FM, Santos TG. Micro Wire and Arc Additive Manufacturing (μ -WAAM). *Addit Manuf Lett* 2022;100032. <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2022.100032>.
- [59] Rodrigues TA, Duarte VR, Miranda RM, Santos TG, Oliveira JP. Ultracold-Wire and arc additive manufacturing (UC-WAAM). *J Mater Process Technol* 2021;296:117196. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117196>.
- [60] Introduction to Nondestructive Testing. Am Soc Non-destructive Test sem data. https://www.asnt.org/MajorSiteSections/About/Introduction_to_Nondestructive_Testing.aspx (acedido 13 de Fevereiro de 2022).
- [61] Machado MA, Rosado LFSG, Mendes NAM, Miranda RMM, dos Santos TJG. New directions for inline inspection of automobile laser welds using non-destructive testing. *Int J Adv Manuf Technol* 2022;118:1183–95. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08007-0>.
- [62] Duarte VR, Rodrigues TA, Machado MA, Pragana JPM, Pombinha P, Coutinho L, et al. Benchmarking of Nondestructive Testing for Additive Manufacturing. *3D Print Addit Manuf* 2021;8:263–70. <https://doi.org/10.1089/3dp.2020.0204>.
- [63] Dwivedi SK, Vishwakarma M, Soni PA. Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review. *Mater Today Proc* 2018;5:3690–8. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.620>.
- [64] Kumar S, Mahto D. Recent Trends In Industrial And Other Engineering Applications Of Non Destructive Testing: A Review. *Int J Sci Eng Res* 2013;4:183–95.
- [65] LASIMM sem data. <https://www.lasimm.eu/index.html> (acedido 13 de Fevereiro de 2022).
- [66] Bento JB, Lopez A, Pires I, Quintino L, Santos TG. Non-destructive testing for wire + arc additive manufacturing of aluminium parts. *Addit Manuf* 2019;29:100782. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100782>.
- [67] Honarvar F, Varvani-Farahani A. A review of ultrasonic testing applications in additive manufacturing: Defect evaluation, material characterization, and process control. *Ultrasonics* 2020;108:106227. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106227>.
- [68] Ma Y, Hu Z, Tang Y, Ma S, Chu Y, Li X, et al. Laser opto-ultrasonic dual detection for simultaneous compositional, structural, and stress analyses for wire + arc additive

- manufacturing. Addit Manuf 2020;31:100956. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100956>.
- [69] Yang D, Wang G, Zhang G. Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography. *J Mater Process Technol* 2017;244:215–24. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.01.024>.
- [70] Ramalho A, Santos TG, Bevans B, Smoqi Z, Rao P, Oliveira JP. Effect of contaminations on the acoustic emissions during wire and arc additive manufacturing of 316L stainless steel. *Addit Manuf* 2022;51. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102585>.
- [71] Zhang C, Gao M, Chen C, Zeng X. Spectral diagnosis of wire arc additive manufacturing of Al alloys. *Addit Manuf* 2019;30:100869. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100869>.
- [72] Xiong J, Zhang G, Qiu Z, Li Y. Vision-sensing and bead width control of a single-bead multi-layer part: Material and energy savings in GMAW-based rapid manufacturing. *J Clean Prod* 2013;41:82–8. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.10.009>.
- [73] Zhan Q, Liang Y, Ding J, Williams S. A wire deflection detection method based on image processing in wire + arc additive manufacturing. *Int J Adv Manuf Technol* 2017;89:755–63. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9106-2>.
- [74] Bhagi P. Basics Eddy Current Testing : Basics. *J Non Destr Test Eval* 2011;10:7–16.
- [75] KontrollTechnik. Eddy Current Principle sem data. <https://www.kontrolltechnik.com/methods/eddy-current-principle> (acedido 16 de Fevereiro de 2022).
- [76] García-Martín J, Gómez-Gil J, Vázquez-Sánchez E. Non-destructive techniques based on eddy current testing. *Sensors* 2011;11:2525–65. <https://doi.org/10.3390/s110302525>.
- [77] Anatoliy B, Galina B, Natalia G, Sergey M, Mikhail G. Main Pipelines Corrosion Monitoring Device. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 2017;50. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/50/1/012032>.
- [78] tec-science. Eddy current testing (ECT) sem data. <https://www.tec-science.com/material-science/material-testing/eddy-current-testing-ect/>.
- [79] Machado M. «Development of Non-Destructive Testing by Eddy Currents for Highly Demanding Engineering Applications», Dissertação de Doutoramento. FCT-UNL, 2018.

- [80] Iowa State University - Center for Nondestructive Evaluation. Eddy Current Testing - Mode of Operation sem data. <https://www.nde-ed.org/NDETechniques/EddyCurrent/ProbesCoilDesign/ProbesModeOp.xhtml>.
- [81] Santos T, Vilaça P, Dos Santos J, Quintino L. A new NDT system for micro imperfections detection: Application to FSW and FSpW. *Weld World* 2009;53:361–6.
- [82] Lopes D. Monitorização e ensaios não destrutivos para peças metálicas produzidas por waam. FCT-UNL, 2021.
- [83] Mauser. Fonte de alimentação industrial 60VDC 6.6A 400W p/ fonte de laboratório RD6006 - JOY-IT JT-RD6006-NT sem data. https://mauser.pt/catalog/product_info.php?cPath=23_2630_2975&products_id=096-9655 (acedido 13 de Setembro de 2022).
- [84] Conrad. ELC ALF2902M Bench PSU (fixed voltage) 6 - 28 V 2 - 4 A 60 W No. of outputs 1 x sem data. <https://www.conrad.com/p/elc-alf2902m-bench-psu-fixed-voltage-6-28-v-2-4-a-60-w-no-of-outputs-1-x-090423> (acedido 13 de Setembro de 2022).
- [85] TinyTronics. BIGTREETECH SKR V1.3 - 3D Printer motherboard sem data. <https://www.tinytronics.nl/shop/en/bigtreetech-skr-v1.3-3d-printer-motherboard>.

ANEXOS

Anexo 1 – Características do EROI V2

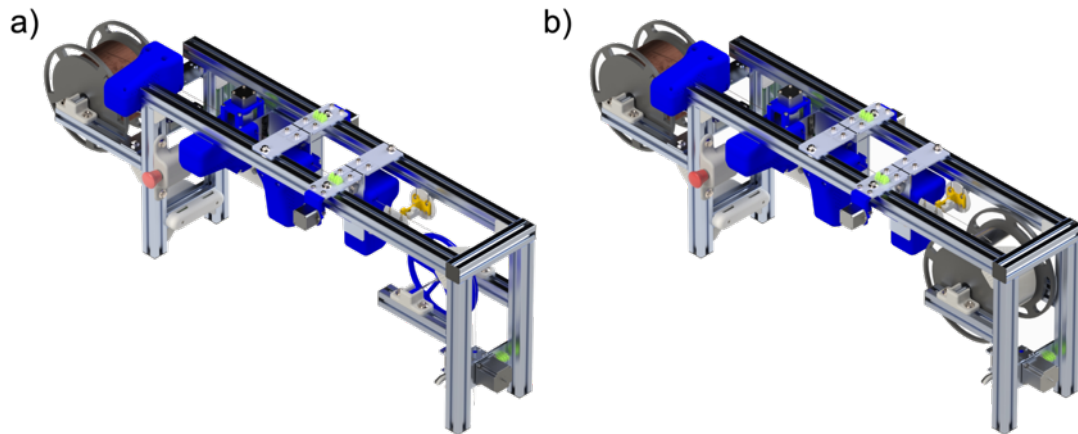


Figura A1 - Renderização com vista isométrica do EROI V2:

- a) versão para montar diretamente na máquina de WAAM do DEMI da FCT-UNL;
- b) versão para funcionar em bancada, onde o fio de soldadura limpo é enrolado manualmente numa segunda bobina, sendo esta versão denominada por EROI V2-B.

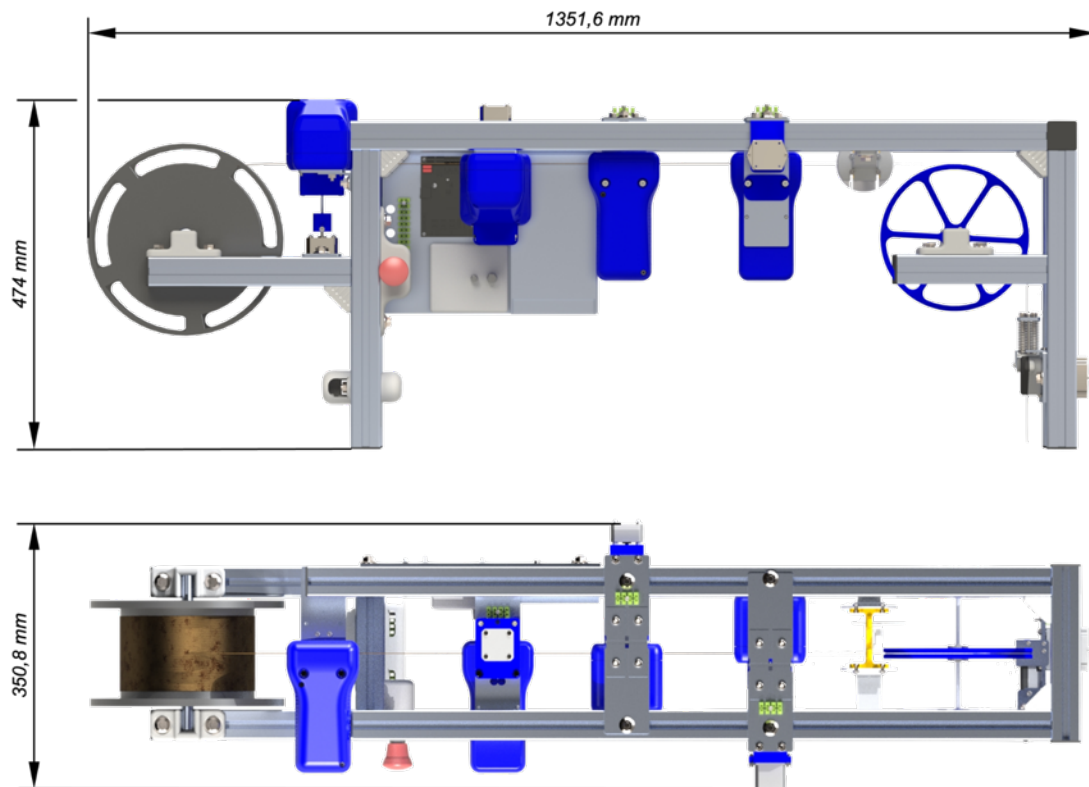
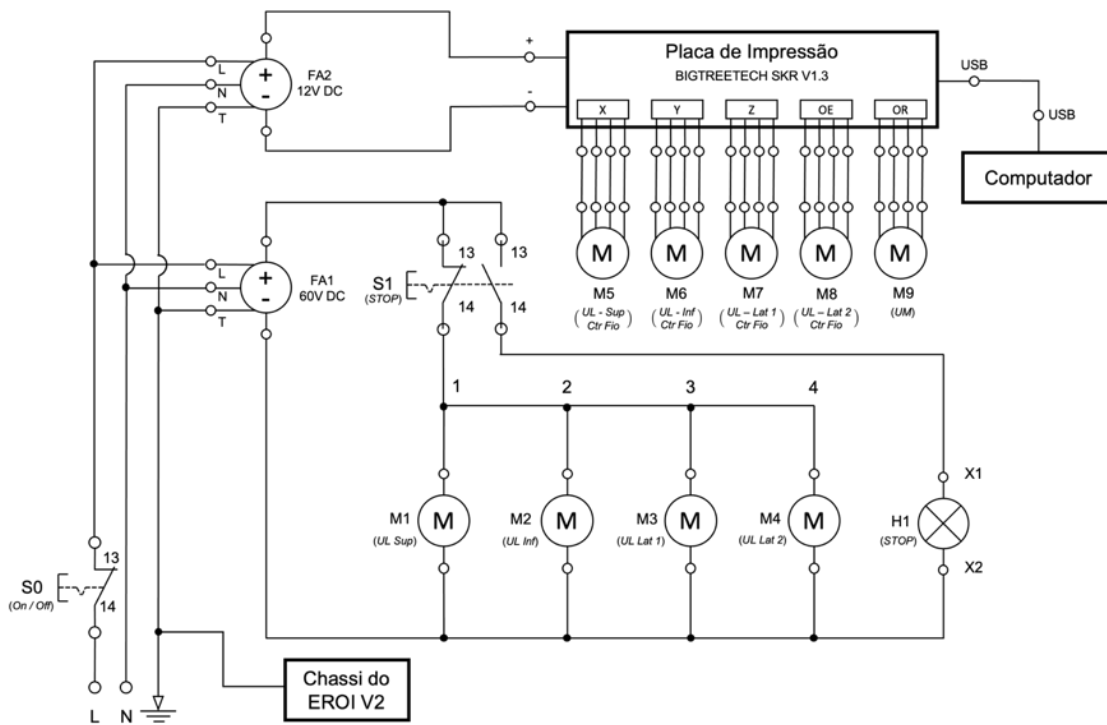


Figura A2 – Renderização do EROI V2 em duas perspetivas com as principais dimensões: alçado principal (em cima) e planta (em baixo).



Figura A3 - Máquina de soldar usada no processo de WAAM para os Ensaios 1, 2 e 3, cujo nome é *Oerlikon Citowave III* e cujo mecanismo de tração modular se chama *Oerlikon DMU W500*.



Legenda:

- | | |
|--|--|
| FA1 - Fonte de Alimentação dos Motores DC | M3 - Motor DC acionador da escova da UL Lateral 1 |
| FA2 - Fonte de Alimentação da placa de impressão | M4 - Motor DC acionador da escova da UL Lateral 2 |
| S0 - Botão On/Off do EROI V2 | M5 - Motor de passo para ajustar altura do fio na UL Superior |
| S1 - Botão STOP do EROI V2 | M6 - Motor de passo para ajustar altura do fio na UL Superior |
| H1 - Luz de aviso: EROI V2 ligado em modo STOP | M7 - Motor de passo para ajustar altura do fio na UL Lateral 1 |
| M1 - Motor DC acionador da escova da UL Superior | M8 - Motor de passo para ajustar altura do fio na UL Lateral 2 |
| M2 - Motor DC acionador da escova da UL Inferior | M9 - Motor de passo para tracionar o filamento metálico (UM) |

Figura A4 - Esquema elétrico do EROI V2 e respetiva legenda.



Figura A5 - UL Superior produzida sem a carcaça superior, onde se pode observar o rolete de escova de aço que atua sobre o fio de soldadura oxidado.

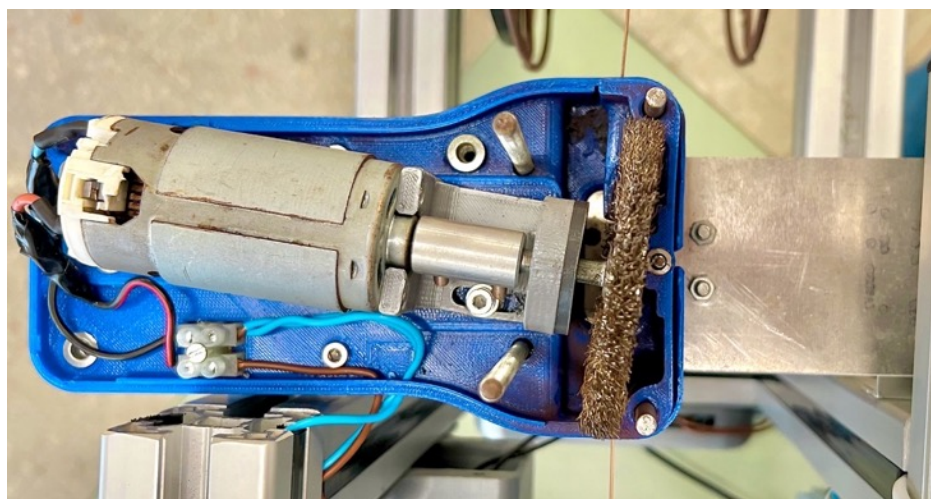


Figura A6 - UL Superior produzida sem a carcaça superior, vista de cima.

Anexo 2 – Produção e caracterização das descontinuidades do fio de soldadura para os Ensaios 1 e 2

Tabela A1 – Posicionamento das descontinuidades no fio para o Ensaio 1. Cada descontinuidade é posicionada para o meio de cada camada, com incrementos de 417 mm.

Nº da camada da parede	Tem descontinuidade?	Designação (Ensaio-Descont.)	Posição da descontinuidade no fio desde o seu início (m)
1	Não	---	0.208
2	Sim	E1-D1	0.625
3	Não	---	1.042
4	Sim	E1-D2	1.458
5	Não	---	1.875
6	Sim	E1-D3	2.292
7	Não	---	2.708
8	Sim	E1-D4	3.125
9	Não	---	3.542
10	Sim	E1-D5	3.958
11	Não	---	4.375
12	Sim	E1-D6	4.792
13	Não	---	5.208
14	Sim	E1-D7	5.625
15	Não	---	6.042
16	Sim	E1-D8	6.458
17	Não	---	6.875
18	Sim	E1-D9	7.292

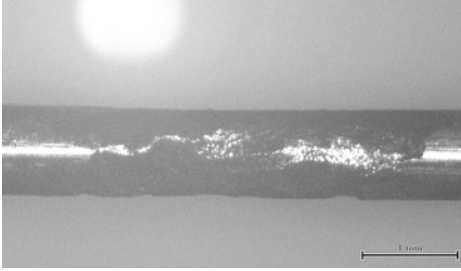
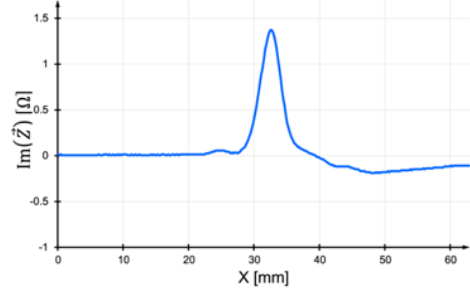

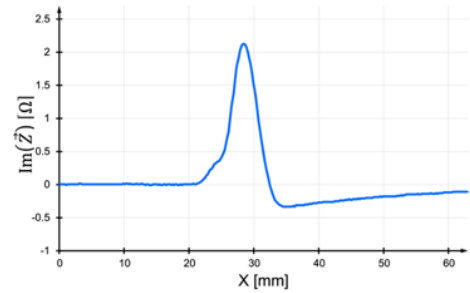

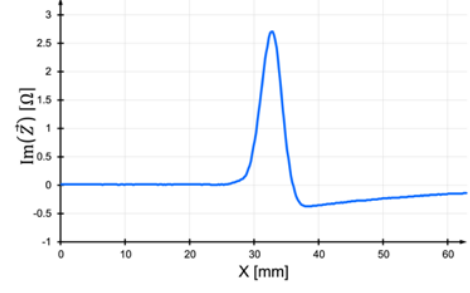
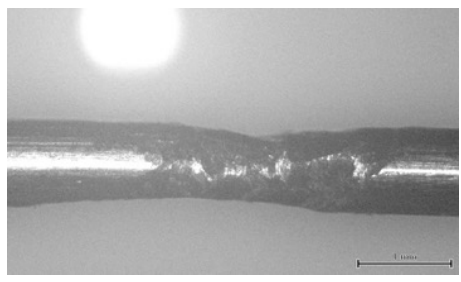
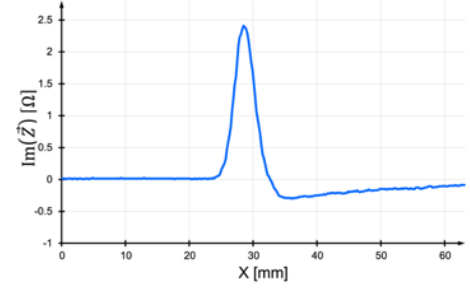
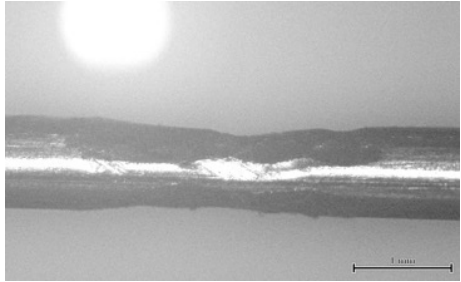
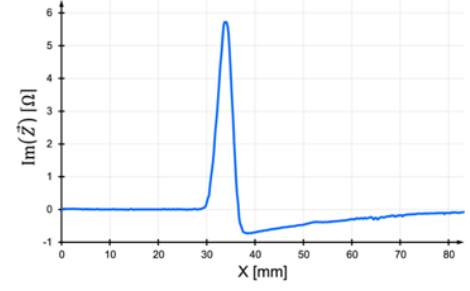
Tabela A2 - Posicionamento das descontinuidades no fio para o Ensaio 2. Cada descontinuidade é posicionada para o meio de cada camada, com incrementos de 417 mm.

Nº da camada da parede	Tem descontinuidade?	Designação (Ensaio-Descont.)	Posição da descontinuidade no fio desde o seu início (m)
1	Não	---	0.208
2	Sim	E2-D1	0.625
3	Não	---	1.042
4	Sim	E2-D2	1.458
5	Não	---	1.875
6	Sim	E2-D3	2.292
7	Não	---	2.708
8	Sim	E2-D4	3.125
9	Não	---	3.542
10	Sim	E2-D5	3.958
11	Não	---	4.375
12	Sim	E2-D6	4.792
13	Não	---	5.208
14	Sim	E2-D7	5.625
15	Não	---	6.042
16	Sim	E2-D8	6.458
17	Não	---	6.875
18	Sim	E2-D9	7.292

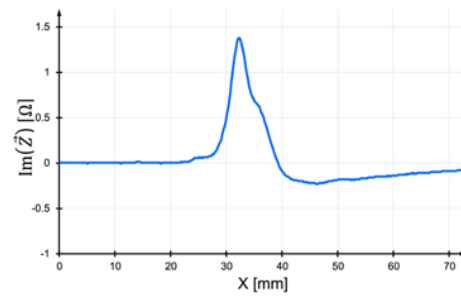
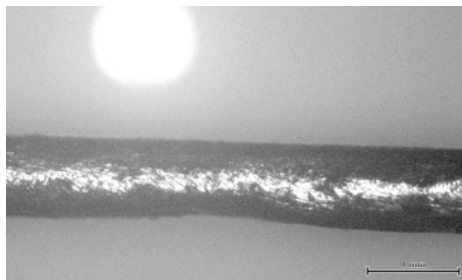
Tabela A3 - Posicionamento da descontinuidade contínua no fio para o Ensaio 3. A descontinuidade, no seu todo, é posicionada para 4 camadas, cada uma tem um incremento de 833 mm.

Nº da camada da parede	Tem descontinuidade em toda a camada?	Designação (Ensaio-Descont.)	Posição da descontinuidade no fio desde o seu início (m)
1	Sim	E3-D1	0 – 0,833
2	Sim	E3-D1	0,833 – 1,667
3	Sim	E3-D1	1,667 – 2,500
4	Sim	E3-D1	2,500 – 3,333
5	Não	---	4,167
6	Não	---	5,000
7	Não	---	5,833
8	Não	---	6,667
9	Não	---	7,500
10	Não	---	8,333

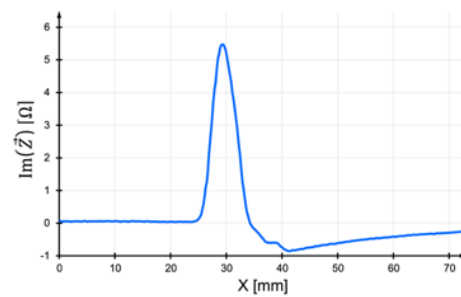
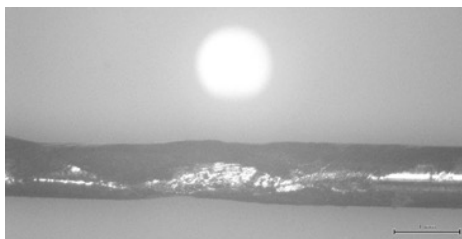
Tabela A4 – Caracterização das descontinuidades do Ensaio 1 por CI.

Designação	Microscópio	Variação de Impedância
E1-D1		
E1-D2		
E1-D3		
E1-D4		
E1-D5		

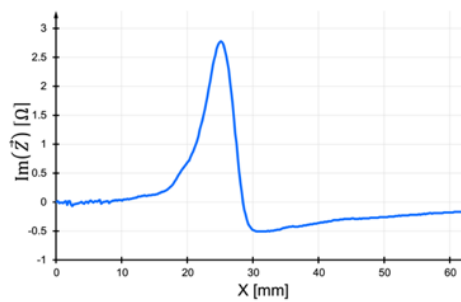
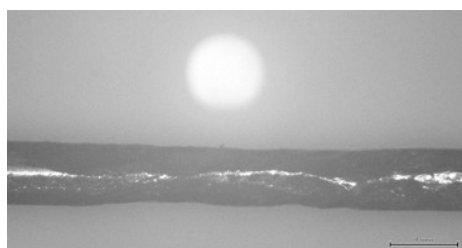
E1-D6



E1-D7



E1-D8



E1-D9

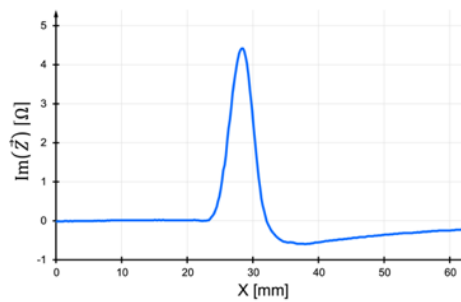
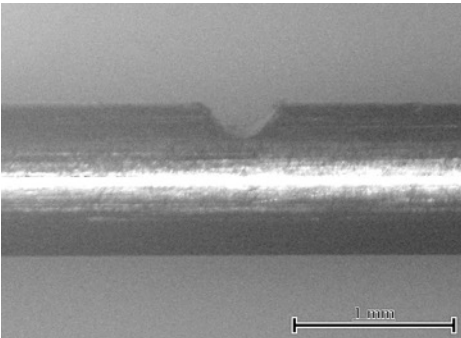
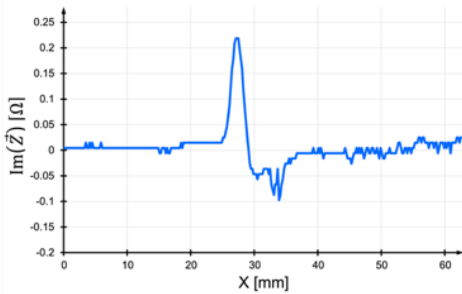
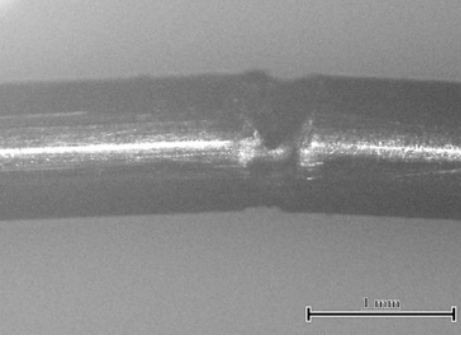
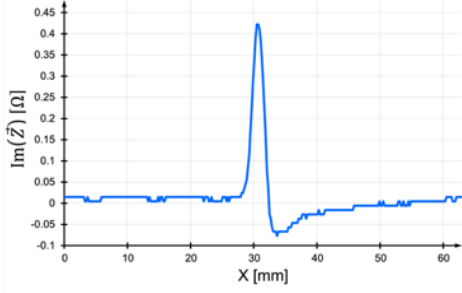
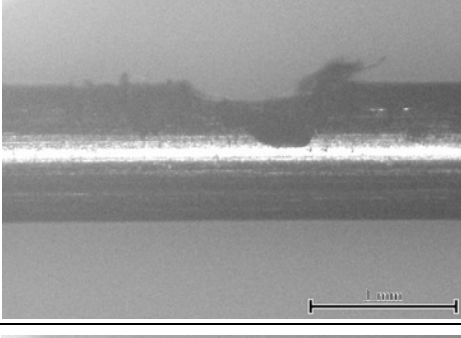
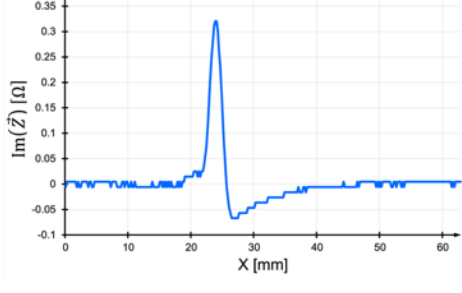
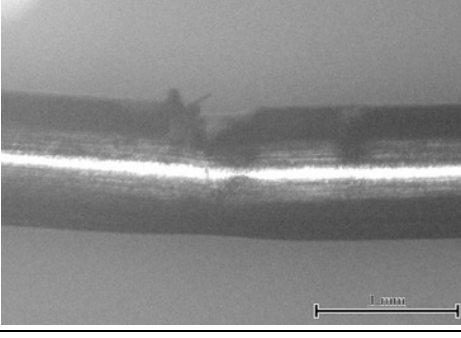
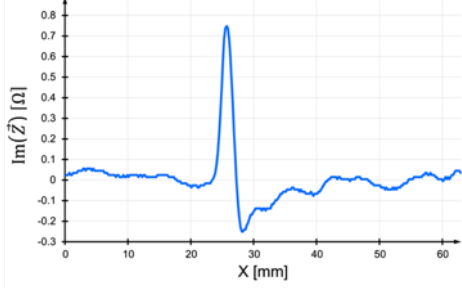
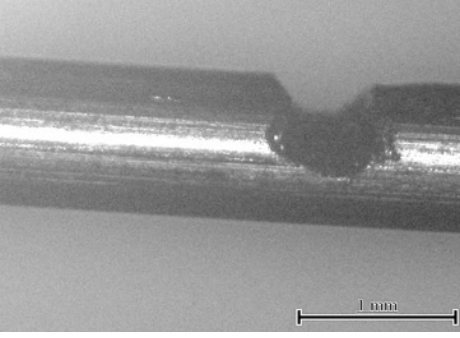
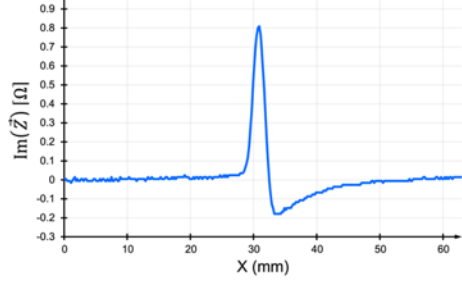
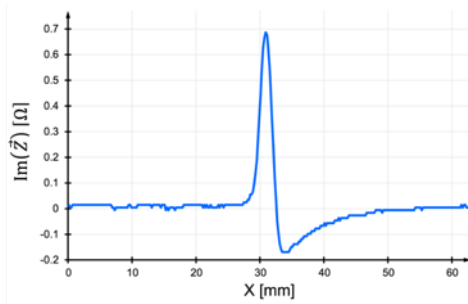
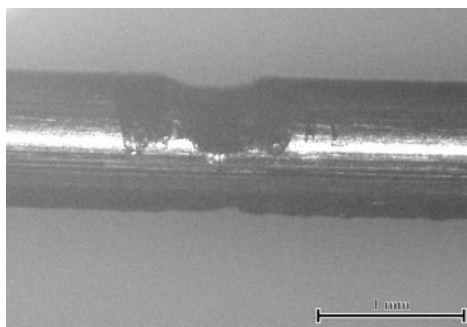


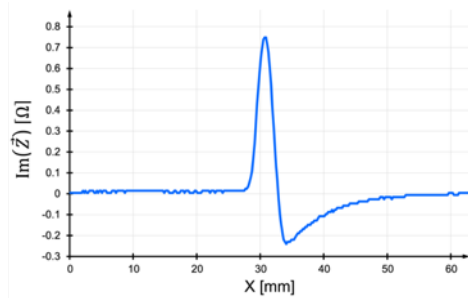
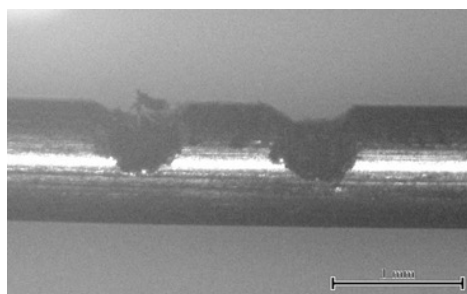
Tabela A5 - Caracterização das descontinuidades do Ensaio 2 por CI.

Designação	Microscópio	Variação de Impedância
E2-D1		
E2-D2		
E2-D3		
E2-D4		
E2-D5		

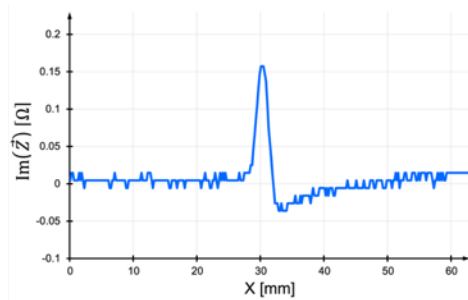
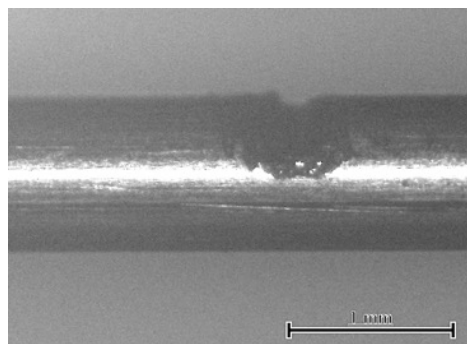
E2-D6



E2-D7



E2-D8



E2-D9

