



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Sérgio Manuel Mendes Gonçalves

**PROJETO, REALIZAÇÃO E CARATERIZAÇÃO
MECÂNICA DE UMA PEÇA ESTRUTURAL
PRODUZIDA POR SISTEMA ROBOTIZADO
BASEADO NA TECNOLOGIA WIRE-ARC
ADDITIVE MANUFACTURING (WAAM)**

Dissertação no âmbito do Mestrado integrado em Engenharia Mecânica, na área de Produção e Projeto, orientada pelo Professor Doutor Joaquim Norberto Cardoso Pires da Silva e Professora Doutora Trayana Tankova e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica na Faculdade de Ciências e Tecnologias.

Outubro de 2021

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Projeto, realização e caracterização mecânica de uma peça estrutural produzida por sistema robotizado baseado na tecnologia Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

Design, execution and mechanical characterization of a structural part produced by a robotized system based on wire-arc additive manufacturing technology (WAAM)

Autor

Sérgio Manuel Mendes Gonçalves

Orientadores

Professor Doutor Joaquim Norberto Cardoso Pires da Silva

Professora Doutora Trayana Stoykova Tankova

Júri

Presidente Professora Doutora Dulce Maria Esteves Rodrigues
Professora Associada c/ Agregação da Universidade de Coimbra

Vogais Professor Doutor Ricardo Nuno Madeira Soares Branco
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Doutor David Andrade
Investigador Doutoramento da Universidade de Coimbra

Orientador Professora Doutora Trayana Stoykova Tankova
Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, outubro, 2021

Manufacturing is so hard. I have the utmost respect for those who build things.

@elonmusk, Twitter 2021

Para o Pedro e Dinis,
nunca percam a curiosidade e doçura do vosso olhar.

Agradecimentos

Foi possível realizar o trabalho aqui apresentado com o apoio e colaboração de algumas pessoas às quais gostaria de deixar agradecimentos:

Agradeço ao Professor Doutor Joaquim Norberto Cardoso Pires da Silva, um homem visionário, lutador pela academia, empresas e comunidade. Tenho um grande respeito pela sua obra e pelo seu imenso legado.

À Professora Doutora Trayana Stoykova Tankova, pelo seu brilhantismo, dedicação, apoio e resiliência.

Ao Professor Doutor Luís Simões da Silva, pela confiança e incentivo inicial.

Ao Engenheiro Carlos Zhu, Engenheiro Vasco Ferreira, Engenheiro Eduardo Ferreira, Engenheiro Filipe Cordeiro e Bruno Santos pela amizade, ajuda oferecida na facilitação de tecnologia e recursos – o meu agradecimento muito sincero.

Aos elementos do ISISE e do CEMMPRE, agradeço o apoio, acesso a equipamentos e tecnologia que viabilizou este estudo.

Agradeço profundamente aos meus pais pelo apoio que sempre ofereceram, suporte que só os pais sabem oferecer.

Por fim quero dar um agradecimento especial à Sílvia, minha esposa e companheira, e também aos nossos filhotes, porque a família é tudo – princípio, meio e fim.

Resumo

O processo de Fabrico Aditivo (FA) *Wired and Arc Additive Manufacturing* (WAAM) através de *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) tem alcançado uma relevância especial para o setor da construção metálica e mista, sobretudo devido à familiaridade da tecnologia envolvida e rapidez de execução, em relação aos outros processos de FA conhecidos. Estudos e investigações recentes têm aumentado a visibilidade do processo WAAM e conseguido obter bons resultados a nível de qualidade, controlo do processo e monitorização de defeitos, em produtos de grande dimensão,

O presente trabalho centra-se no fabrico através de WAAM de duas paredes e uma aranha de união de vidros, em aço inoxidável AISI 316. Para isso, programou-se um braço robótico para soldadura GMAW, através de *Cold Metal Transfer* (CMT). O principal desafio e inovação deste estudo foi a aplicação da WAAM peças estruturais de pequenas dimensões, em aço inoxidável, otimização de parâmetros, trajetórias e, realização de ensaios não destrutivos complementares aos ensaios mecânicos.

Após o fabrico, efetuaram-se ensaios de tração e dureza em provetes retirados de paredes WAAM na condição "como soldado", "maquinado" e em provetes retirados de uma aranha em aço inoxidável AISI 316 adquirida no mercado. Verificou-se que os provetes WAAM na condição "maquinado" apresentavam valores de tensão limite elástico e de rotura 13% acima dos valores dos provetes na condição "como soldado". Os ensaios mostraram que a aranha original apresentava os valores mais baixos, para as propriedades referidas. Adicionalmente, criaram-se provetes WAAM para ensaios de radiografia e líquidos penetrantes, observando-se a existência dos seguintes defeitos de soldadura: poros, faltas de fusão e inclusões – originados por instabilidade de arco elétrico e erros de trajetória durante a deposição. No final é feita uma reflexão sobre os resultados obtidos e realizam-se recomendações para trabalhos futuros.

Palavras-Chave: Fabrico aditivo, WAAM, AEC, Aço inoxidável, CMT, Aranha para união de vidros.

Abstract

Wired and Arc Additive Manufacturing (WAAM) by Gas Metal Arc Welding (GMAW) achieved special relevance for metal and hybrid construction, due to the familiarity of the technology and speed of execution in relation to other processes. Recent studies and research on WAAM increased process visibility and achieved good results in terms of quality for large products, process control and defect monitoring.

The present work focuses on the execution by WAAM of two walls and a spider fitting, made of AISI 316 stainless steel. For this, a robotic arm was programmed for GMAW welding, through *Cold Metal Transfer* (CMT). The main challenge and innovation of this study was the application of WAAM process for small stainless steel structural parts, optimization of parameters, paths, conducting non-destructive tests in addition of mechanical tests.

After manufacture, tensile and hardness tests were carried out on samples taken from WAAM walls in the condition "as built", "machined" and samples taken from an AISI 316 stainless steel spider fitting acquired on the market. It was found that WAAM samples in the "machined" condition presented yield and ultimate tensile strength 13% higher than "as built" condition. It was also found that the original spider presented the lowest values, for the properties mentioned. Additionally, WAAM samples were created for NDT. Radio Test (RT) and Penetrating Test (PT) were made, noting the existence of the following welding defects: fusion faults and inclusions – originated by electric arc instability and trajectory errors during deposition. At the end, a reflection is made on the results obtained and recommendations are made for future work.

Keywords Additive Manufacturing, WAAM, AEC, Stainless Steel, CMT, Spider fitting.

ÍNDICE

Índice de figuras	ix
Índice de tabelas	xi
Simbologia e Siglas	xiii
Siglas	xiii
Simbologia.....	xiv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Motivação	1
1.2. Objetivo	2
1.3. Estrutura do documento	2
2. O FABRICO ADITIVO	5
2.1. O estado da arte.....	5
2.2. O mercado	7
2.3. Processos.....	8
2.4. Qualidade	10
2.5. Ensaio não destrutivo.....	12
2.6. Detecção de defeitos em tempo real	13
3. DEPOSIÇÃO POR SOLDADURA	15
3.1. Controlo da transferência por Curto-Circuito	15
3.2. Variáveis a controlar	17
3.3. Propriedades após deposição	22
3.4. Aço inoxidável austenítico.....	23
3.5. Imperfeições e defeitos	24
4. DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO	27
4.1. Recursos para o Fabrico.....	27
4.1.1. Célula de Fabrico Aditivo	27
4.1.2. Software.....	28
4.1.3. Metal de adição e gás de proteção	30
4.2. Fabrico	31
4.3. Variáveis e Parâmetros de soldadura	33
4.4. Ensaio realizados nas peças.....	33
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1. Resultados dos ensaios não destrutivos	37
5.2. Resultados de ensaios de caracterização mecânica.....	39
6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	45
6.1. Conclusões	45
6.2. Propostas para trabalhos futuros	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
ANEXO A – lista de normas FA	55
ANEXO B – relatórios de ensaios e certificados	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Aplicação de Aranha de união em fachada envidraçada [5]	2
Figura 2.1 – Aplicações recentes de Fabrico Aditivo.....	5
Figura 2.2 – Casas realizadas por Fabrico Aditivo.....	6
Figura 2.3 – Habitat <i>Marsha</i> [15].....	6
Figura 2.4 – Criações da empresa MX3D [16].....	7
Figura 2.5 – Distribuição do mercado FA. Adaptado de [17]	7
Figura 2.6 – Power bed fusion.....	8
Figura 2.7 – Binder jetting.....	8
Figura 2.8 – FDM	8
Figura 2.9 – DED Laser beam	9
Figura 2.10 – DED WAAM	9
Figura 2.11 – Sheet lamination.....	9
Figura 2.12 – Comparativo de processos FA para metais [22]	10
Figura 2.13 – Abrangência da certificação FA [25]	11
Figura 2.14 – END em soldadura – Formação CMM: Marcação CE [37].....	12
Figura 2.15 – Monitorização por espectrometria [43].....	13
Figura 3.1 – Controlo de transferência por curto-circuito – STT e CMT [44].....	15
Figura 3.2 – Fases do ciclo CMT [45].....	16
Figura 3.3 – Taxa de depósito e Corrente de Soldadura [46]	17
Figura 3.4 – Representação esquemática do efeito de Molhagem [54].....	18
Figura 3.5 – Robô manipulando tocha de soldadura – Fronius [45].	19
Figura 3.6 – Sobreposição de passes [57]	19
Figura 3.7 – Posições de soldadura ISO 6947 [14]	21
Figura 3.8 – Valores de dureza ao longo de uma peça WAAM – LORCH [61].....	22
Figura 3.9 – Precipitados de carbono no limite de grão [72]	23
Figura 3.10 – Deformação visível após deposição WAAM.....	24
Figura 3.11 – Quatro trajetórias possíveis para uma deposição WAAM [73]	25
Figura 4.1 – Célula AMCONSTRUCTION em produção	28
Figura 4.2 – <i>Screenshot</i> de um modelo Slic3r [74]	29
Figura 4.3 – Ecrã de visualização da APP de comunicação – <i>by jnp</i>	29

Figura 4.4 – Instalação do gás de proteção	30
Figura 4.5 – <i>Spider</i> de compra e modelos 3D a executar.....	31
Figura 4.6 – Iterações para definição de parâmetros.....	31
Figura 4.7 – Materiais defeituosos	32
Figura 4.8 – Posicionamento da tocha de soldadura no fabrico da peça final	32
Figura 4.9 – Modificação de desenho original da <i>Spider</i> e das trajetórias de deposição....	32
Figura 4.10 – Representação das fases do ensaio PT	34
Figura 4.11 – Exemplos de imagens de defeitos detetados por ensaio RT (fonte: biblioteca pessoal).....	35
Figura 4.12 – Macrografia de soldadura com aço inoxidável ER316 LSi (fonte: biblioteca pessoal).....	36
Figura 4.13 – Representação de um provete de ensaio <i>Wall</i> WAAM.....	36
Figura 5.1 – Deposições WAAM.....	37
Figura 5.2 – Realização do ensaio PT	38
Figura 5.3 – Ensaio RT aplicado a <i>Wall</i> WAAM	38
Figura 5.4 – Macrografia a provete de <i>Wall</i> WAAM	39
Figura 5.5 – Filiação de durezas em <i>Spider</i> original.....	39
Figura 5.6 - Representação esquemática dos provetes retirados da <i>Wall</i> WAAM	40
Figura 5.7 – Curva tensão-deformação de um provete produzido por WAAM.....	41
Figura 5.8 – Curvas tensão-deformação de material na condição "maquinado".....	42
Figura 5.9 – Curvas tensão-deformação de material na condição "como soldado"	42
Figura 5.10 – Curva tensão-deformação de material da <i>Spider</i> original.....	43

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 –END recomendados para aços austeníticos (EN ISO I7635:2016)	12
Tabela 3.1 – Efeito do azoto, oxigénio e hidrogénio, na soldadura	18
Tabela 4.1 – Composição química (%pd.) de referência e real ER 316 LSi	30
Tabela 4.2 – Valores e parâmetros adotados	33
Tabela 4.3 – Ensaio realizados nas peças	33
Tabela 5.1 – Propriedades mecânicas do material depositado, para várias condições de acabamento e diferentes direções	40
Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas do material da <i>Spider</i> original	43

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Siglas

AEC – Arquitetura, Engenharia e Construção

AISI – American Iron and Steel Institute

BJ – Binder Jetting

CMT – Cold Metal Transfer

CT – Comissão Técnica

DED – Direct Energy Deposition

EBM – Electron Beam

END – Ensaios Não Destrutivos

FA – Fabrico Aditivo

FDM – Fused Deposition Modeling

GMAW – Gas Metal Arc Welding

GTAW – Gas Tungsten Arc Welding

IPQ – Instituto Português da Qualidade

L-PBF – Laser Power Bed Fusion

MAG – Metal Active Gas

MIG – Metal Inert Gas

NASA – National Aeronautics and Space Administration

PAW – Plasma Arc Welding

PME – Pequenas e Médias empresas

PT – Ensaio não destrutivo: Líquidos penetrantes

RT – Ensaio não destrutivo: Radiografia

VT – Ensaios não destrutivo: Inspeção visual

WAAM – Wired Arc Additive Manufacturing

WFS – Wire Feed Speed

Simbologia

Q – Entrega térmica

k – Grau de eficiência térmica do processo

U – Tensão do arco elétrico

I – Intensidade de corrente elétrica

v – Velocidade de soldadura

Ar – Árgon

He – Hélio

CO_2 – Dióxido de Carbono

O_2 – Molécula de oxigénio

R_{p02} – Tensão de cedência a 0,2%

R_m – Tensão de rotura

\mathcal{E}_{total} – Extensão total

\mathcal{E}_m – Extensão na rotura

E – Módulo de Young

σ – Tensão convencional

\mathcal{E} – Deformação convencional

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

O presente trabalho resulta do interesse pessoal pela evolução tecnológica na engenharia, pela inerente criação de oportunidades de cooperação, desenvolvimento social e económico.

O setor de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) é um dos pilares basilares da economia global. O processo construtivo e a necessidade de recursos na construção contribuem para um excessivo consumo energético, produção de resíduos e poluição ambiental. A Europa assumiu um compromisso de redução de 40% das emissões dos gases com efeito de estufa até ao ano 2030 [1] em relação aos valores de referência dos anos 90 do século XX. A capacidade de desenvolver rapidamente novos produtos com uma gestão eficiente de recursos fizeram despertar o interesse da indústria para o Fabrico Aditivo (FA) nos últimos anos.

O Fabrico Aditivo é uma das tecnologias chave para a Quarta Revolução Industrial e influenciará em curto espaço de tempo a forma como gerimos a cadeia de fornecimento [2]. Atualmente debate-se no seio do parlamento europeu formas de acelerar a integração do FA e novos métodos disruptivos, que potenciem o crescimento económico e a sua utilização por parte das Pequenas e Médias Empresas (PME) [3].

Atualmente já encontramos alguma investigação relacionada com a aplicação de FA a estruturas metálicas e componentes de médio ou grande porte. No entanto, não existe muita informação disponível sobre componentes estruturais de menores dimensões para o setor da AEC.

O processo *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM), objeto de estudo neste trabalho, é um dos muitos processos de FA atualmente disponíveis no mercado. Este processo tem um potencial interesse para a Construção Metálica e Mista por utilizar *hardware* de duas tecnologias já familiares às metalomecânicas e disponíveis no mercado – soldadura e robótica. Este processo de FA permite ainda alcançar boas taxas de deposição, tempo reduzido do ciclo de produção, baixo impacto ambiental e baixos custos de produção [4].

1.2. Objetivo

Este trabalho tem por objetivo fabricar por *Wired Arc Additive Manufacturing* (WAAM) uma peça com geometria complexa em aço inoxidável AISI 316 e caracterizar posteriormente as suas propriedades mecânicas através de ensaios de tração e de durezas. Utilizam-se técnicas de ensaios não destrutivos, nomeadamente Raio-X e líquidos penetrantes, para identificar a localização de eventuais defeitos de soldadura. Pretende-se ainda comparar as propriedades de uma peça fabricada por WAAM, com as propriedades de uma peça semelhante existente no mercado.

Para a concretização deste objetivo criou-se um modelo digital 3D de uma peça utilizada nas estruturas de suporte de fachadas envidraçadas (Figura 1.1), a aranha de união de vidros [5]. Através do ficheiro informático, de parametrização de trajetória e soldadura, imprimiu-se uma réplica do mesmo material, aplicando a tecnologia disponível. Por fim efetuou-se a caracterização e comparação de propriedades mecânicas da peça obtida com a peça adquirida.

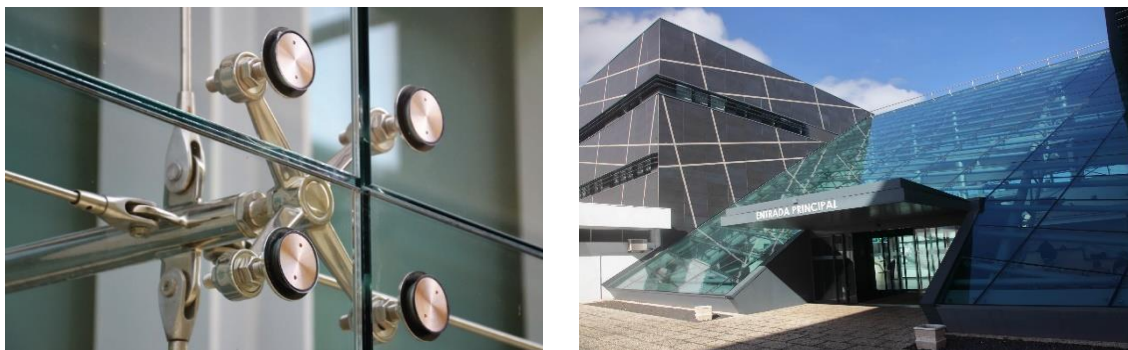


Figura 1.1 – Aplicação de Aranha de união em fachada envidraçada [5]

1.3. Estrutura do documento

Este relatório está estruturado em 6 capítulos, pela seguinte ordem:

- **Capítulo 1** – Apresenta a motivação, o principal objetivo e descreve a estrutura global deste documento.

- **Capítulo 2** – Descreve o estado-de-arte dos processos de Fabrico Aditivo, o valor de mercado atual e expetativas em torno desta área. É dada especial atenção ao WAAM e restantes tecnologias de FA de metal. É realizada uma abordagem na perspetiva da gestão da qualidade e controlo de qualidade do processo, e são apresentados os recentes referenciais de qualificação de processo e de pessoas. Neste capítulo faz-se ainda uma referência às técnicas de Ensaio Não Destrutivo (END) que são normalmente aplicados no controlo da soldadura de aços inoxidáveis.
- **Capítulo 3** – Descreve os fundamentos do processo de soldadura com Controlo da Transferência por Curto Circuito, nomeadamente o *Cold Metal Transfer* (CMT), consumíveis, parâmetros, gases de proteção, fenómenos e defeitos típicos associadas à soldadura de aço inoxidável austenítico através do processo *Gas Metal Arc Welding* (GMAW).
- **Capítulo 4** – Apresenta uma descrição dos procedimentos experimentais utilizados ao longo de diferentes etapas deste trabalho. São descritos os principais recursos tecnológicos utilizados, o consumível de soldadura, gás de proteção, os parâmetros do processo e variáveis que têm influência sobre o resultado. Apresenta-se ainda o resumo de inspeções e ensaios adotados.
- **Capítulo 5** – Sumariza os resultados das inspeções, ensaios mecânicos e não destrutivos efetuados. É efetuada uma análise e discussão desses mesmos resultados.
- **Capítulo 6** – Resume as conclusões globais do trabalho e identifica algumas propostas para investigação futura.

2. O FABRICO ADITIVO

No presente capítulo realiza-se uma revisão bibliográfica sobre Fabrico Aditivo e o enquadramento das tecnologias disponíveis para o setor de Arquitetura Engenharia e Construção. Efetua-se uma referência ao valor económico atual deste mercado, assim como as previsões e expetativas para o futuro. Detalha-se por fim a tecnologia WAAM utilizada para a realização de amostras em aço inoxidável austenítico, a soldadura GMAW, assim como as particularidades a observar durante o processo de deposição de forma a obter amostras livres de defeitos e de problemas metalúrgicos.

2.1. O estado da arte

O Fabrico Aditivo caracteriza-se pela deposição sucessiva de camadas [6] otimizando o consumo de matérias-primas devido à menor quantidade de material a ser removido em pós-processamento, possibilitando a criação de estruturas complexas anteriormente não exequíveis pelos métodos tradicionais, maior liberdade de design e criação de protótipos à escala no mesmo (ou outro) material, diretamente a partir de ficheiros digitais [7]. A consolidação de várias partes numa única peça permite simplificar a construção de objetos complexos, eliminando muitos dos constrangimentos técnicos do fabrico convencional. As articulações e partes constituintes passam a ser construídas de uma só vez, o que permite



Figura 2.1 – Aplicações recentes de Fabrico Aditivo

reduzir o número de etapas no processo de produção, eliminar grande parte [2] de trabalho manual de montagem ou manutenção assim como os custos associados a estes.

Os setores de maior componente tecnológica já exploram os benefícios que a manufatura aditiva oferece. Como exemplos, no setor aeroespacial os motores [8] do SpaceX (Figura 2.1a), no setor automóvel o protótipo de chassis [9] da BMW S1000RR (Figura 2.1b), as infraestruturas logísticas para o palco de operações (Figura 2.1c) utilizadas pela Agência de Defesa Europeia [9] e próteses na área de medicina (Figura 2.1d).

Na área de AEC a implementação de FA, tal como a implementação de sistemas digitais ou automáticos na produção [11] continua ainda a fazer-se de forma muito lenta [12]. Algumas empresas desenvolveram sistemas de deposição de betão, como é o caso dos exemplos da Figura 2.2, onde observamos uma casa de dois andares da empresa belga KampC [13] e as casas para isolamento profilático de infetados com Covid19 da chinesa Winsun [14].



Figura 2.2 – Casas realizadas por Fabrico Aditivo

A aplicação do FA nas AEC é realizada maioritariamente ao nível conceptual, mas deposita-se grande esperança nesta solução. Como exemplo disso, destacam-se os *habitats* no planeta Marte, como o *Marsha* (Figura 2.3) vencedor do desafio [15] colocado pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) a estudantes, projetistas e arquitetos, o qual acabou por ser construído por FA em Illinois – Estados Unidos da América.

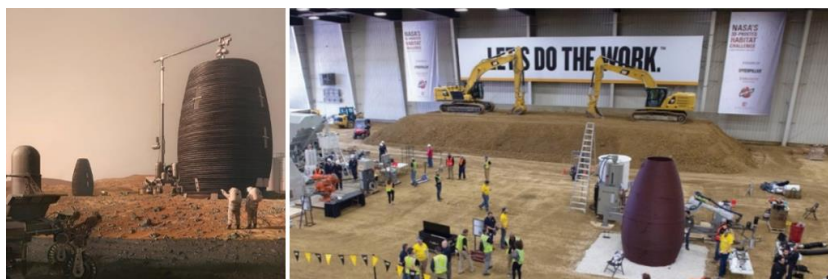


Figura 2.3 – Habitat *Marsha* [15]

Na área da construção metálica, destaca-se o trabalho incontornável da empresa MX3D [16], a qual utilizou o processo WAAM para construir uma ponte já instalada nos Países Baixos e continua a desenvolver outras peças, conforme exemplos da Figura 2.4.



Figura 2.4 – Criações da empresa MX3D [16]

2.2. O mercado

Em 2020 o valor global do FA de metais e polímeros foi de 7.170,00 milhões de Euro. Espera-se um crescimento anual de 20,0% para este mercado e, portanto, projeta-se atingir 17.830,00 milhões de Euro em 2025 [17]. Nos metais, o FA está avaliado atualmente em 2.030,00 milhões de Euro com um crescimento anual esperado de 29,2% até 2025.

As 5 maiores indústrias com aplicação de FA (medicina, defesa, automóvel, robótica e automação, aviação) representam 62% do valor total de mercado. Por enquanto a indústria de AEC não tem representação significativa (Figura 2.5).

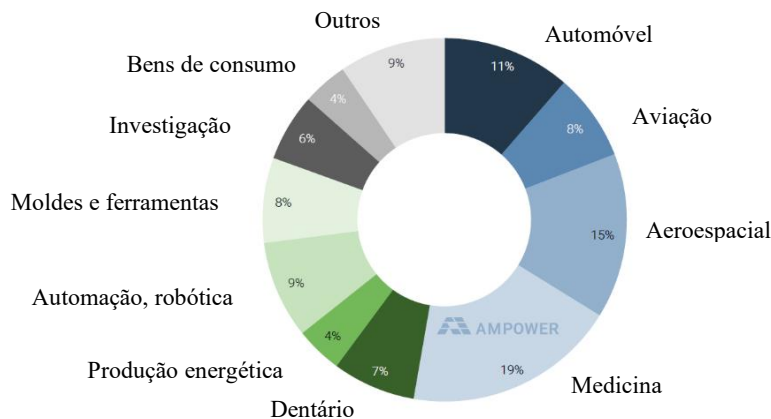


Figura 2.5 – Distribuição do mercado FA. Adaptado de [17]

2.3. Processos

A norma ISO/ASTM 52900 [6] classifica os processos de Fabrico Aditivo [18] em 7 categorias principais: *Extrusion*, *Material Jetting*, *Binder Jetting*, *Sheet lamination*, *Vat polymerization*, *Power bed fusion*, *Directed Energy Deposition*.

O custo de produção, tempo, geometria da peça, acabamento e tecnologia disponível ditam a seleção do processo [19]. O FA de metais assenta em tecnologias já bem conhecidas, como é o caso da utilização de feixes laser, eletrões, laminagem ou até arco elétrico de soldadura.

- ***Power bed fusion (L-PBF e EBM)***

Utiliza uma fonte de energia de alta densidade de energia para fundir seletivamente o pó metálico. Dependendo do tipo de fonte de energia, o PBF (Figura 2.6) pode ser dividido em duas técnicas principais para obter a fusão: laser (L-PBF) e feixe de eletrões (EBM).

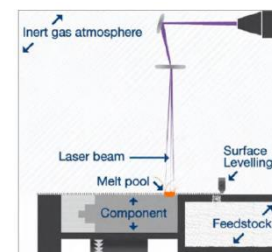


Figura 2.6 – Power bed fusion

- ***Binder jetting (BJ)***

É um processo em leito de pó metálico que utiliza a tecnologia das impressoras a jato de tinta e um ligante (Figura 2.7). O ligante, em estado líquido é utilizado para "colar" o pó metálico entre si e entre camadas. Após cada camada, a mesa baixa para dar espaço à próxima camada. A peça resultante precisa de ser colocada num forno de sinterização para finalizar a produção.

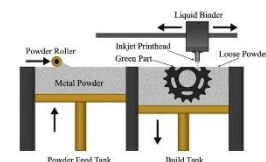


Figura 2.7 – Binder jetting

- ***Fused Deposition Modeling (FDM)***

O filamento de material termoplástico e partículas metálicas é aquecido e guiado através de um bocal e, em seguida, depositado camada a camada. O bocal move-se nos eixos x e y para formar uma determinada camada. A mesa baixa para dar espaço para novas camadas. Depois de concluída a peça, é colocada num forno de sinterização para eliminar o polímero. O Fabrico Aditivo por extrusão (Figura 2.8) tem sido amplamente utilizado para polímeros, mas só recentemente em peças metálicas.

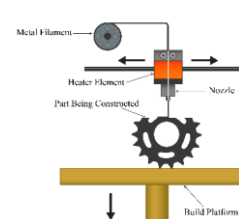


Figura 2.8 – FDM

- **Direct Energy Deposition (DED)– Laser Beam**

Pode ser dividida em duas variantes principais com base no tipo de matéria-prima: fluxo de pó metálico ou fio metálico. A fonte laser ou feixe de elétrons funde e deposita o material no topo do substrato (Figura 2.9). É possível colocar a aparelhagem acoplada a um robot, por isso é possível imprimir metal sobre superfícies curvas, e com liberdade para produzir peças de grandes dimensões.

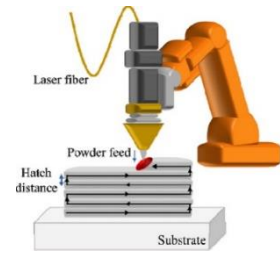


Figura 2.9 – DED Laser beam

- **DED – WAAM**

Patenteada em 1920, o WAAM é provavelmente o processo mais antigo [19, 20], simples, mas menos divulgado da gama de processos de Fabrico de Aditivo. Esta tecnologia requer um equipamento de soldadura (fonte, tocha, alimentação de consumível e sistema de gás de proteção) para estabelecer um arco elétrico entre um eletrodo (consumível ou não) e o metal base. É necessário existir um sistema automático de movimentação da tocha e uma bancada para suportar o metal depositado. Na Figura 2.10 está representado esquematicamente uma instalação WAAM, utilizando um braço robótico como manipulador da tocha.

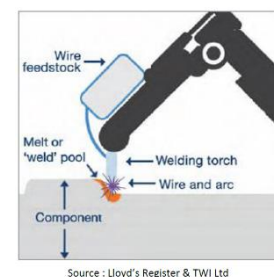


Figura 2.10 – DED WAAM

Os processos de soldadura correntemente utilizados em WAAM são: *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) e *Plasma Arc Welding* (PAW). O GMAW é o processo mais rápido e versátil. O acabamento da superfície e o controlo da temperatura conseguem ser otimizados recorrendo a fontes de potência e controlo da transferência por curto-circuito (p.e. o CMT da Fronius).

- **Sheet lamination**

Utiliza folhas metálicas como matéria-prima e uma fonte de energia localizada, por ultrassons ou laser, para ligar folhas recortadas em cada camada para formar um objeto 3D (Figura 2.11). Aplicando ondas ultrassónicas e pressão mecânica as interfaces das folhas empilhadas são ligadas por difusão.

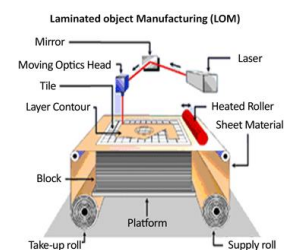


Figura 2.11 – Sheet lamination

A Figura 2.12 apresenta as principais diferenças, vantagens e desvantagens de cada um dos processos mencionados anteriormente.

Technology Selection							
Topic	L-PBF	EBM	Binder Jetting	FDM	DED-LB	DED-WAAM	Sheet lamination
Feedstock	Metal powder < 60 µm	Metal powder < 80 µm	Metal powder up to 100 µm	MIM feedstock, wire or pellet	Metal powder < 150 µm or wire	Metal wire ø 0.8-1.6 mm (multi-wire)	Metal sheets
Bonding means	Laser	Electron beam	Polymer binder	Extruded in heated nozzle	Laser	Electric arc	Friction, mechanical
Part size	Std : 250 mm Max : 1000 mm	Std : 200 mm Max : 380 mm	Std : 100 mm Max : 800 mm	Std : 100 mm Max : 300 mm	Up to several m (robot vs CNC)	Up to > 10 m (robot on rail config.)	Up to 4m
Min wall thickness	0.3 mm	0.8 mm	1 mm	1.2 mm	1 - 2 mm (focal spot, material)	2 - 3 mm (ø wire, material)	Depends
Strengths	<ul style="list-style-type: none"> - Accuracy - Surface finish - Fine details 	<ul style="list-style-type: none"> - Limited stress - Handle bulky parts - Low contamination - Manufacturing speed 	<ul style="list-style-type: none"> - Limited stress - Atm. Conditions - High speed 	<ul style="list-style-type: none"> - Limited stress - Clean - Affordable 	<ul style="list-style-type: none"> - Medium size ... - AM on existing part - Multi-material and FGM 	<ul style="list-style-type: none"> - High deposition rate - Lower investment/m² - Integrate substrate - Good density 	<ul style="list-style-type: none"> - Sheet mech. properties - As-built accuracy - Sensor embedded - Multimaterials
Weakness	<ul style="list-style-type: none"> - Supports removal - Internal stresses - Post process 	<ul style="list-style-type: none"> - Powder cake removal - Limited material range - As-built roughness 	<ul style="list-style-type: none"> - Needs sintering (Shrinkage 20%) - OR Infiltration (weakness infiltrant) 	<ul style="list-style-type: none"> - Shrinkage 20% - Needs sintering - Slow technology 	<ul style="list-style-type: none"> - No supports - Limited overhang and precision - Surface finish (waviness) 	<ul style="list-style-type: none"> - Low part complexity and surface finish - High HI, residual stresses and distortions - Under development 	<ul style="list-style-type: none"> - Slow process
Applications	<ul style="list-style-type: none"> - Large range of thin, accurate parts - Parts with cavities, channels 	<ul style="list-style-type: none"> - Small to medium bulky organic structural components without cavities 	<ul style="list-style-type: none"> - Small parts, with quite thin walls in huge quantities 	<ul style="list-style-type: none"> - Small parts, with quite thin walls in small quantities 	<ul style="list-style-type: none"> - Parts of medium ... - Cladding, repair - Customization of existing parts 	<ul style="list-style-type: none"> - Large structural parts (aerospace, marine) - Large machine parts, tooling (machining) 	<ul style="list-style-type: none"> - Quite uncommon
Suppliers	SLM Solutions Concept Laser 3D Systems EOS Trumpf AddUp	Arcam (GE) EBAM (Sciaky)	Digital metal ExOne Desktop Metal HP	Markforged Desktop Metal 3DVigo AIM3D Pollen	Optomec Trumpf DMG Mori Seiki BeAM Hornet (modular)	Gefertec Prodways Hornet (modular)	Stratoconception

Figura 2.12 – Comparativo de processos FA para metais [22]

2.4. Qualidade

O sucesso das organizações depende não só dos seus produtos ou serviços, mas também da forma como gera e monitoriza a informação, do funcionamento interno dos processos, da forma como se adapta ao contexto geral e como gere as ligações com as partes interessadas (funcionários, clientes, acionistas, fornecedores, sociedade) – este é o conceito mais atual colocado em prática nos modernos sistemas de gestão da qualidade [21, 22].

Integrar o Fabrico Aditivo na empresa passa por implementar regras, procedimentos e controlo em todas as fases, desde o *design*, cálculo, planeamento, aprovisionamento, execução até à expedição e pós-venda.

A normalização para Fabrico Aditivo está ainda numa fase embrionária, crescendo a um ritmo muito elevado, fruto da necessidade latente na sociedade e de uma cooperação sem precedentes entre duas grandes organizações: *International Standard Organization (ISO)* e *American Society for Testing and Materials (ASTM)*. Toda a normalização internacional é acompanhada pela comissão técnica nacional IPQ CT220 – Manufatura Aditiva. De

momento a normalização existente incide sobretudo sobre a validação dos modelos CAD, verificação dos dados do processo, realização e controlo visual de produto, dimensional [25] e forma. No ANEXO A encontra-se um resumo do acervo normativo sobre o Fabrico Aditivo, até à data. Justificado pela disseminação do processo ou criticidade dos componentes, verificamos que a maioria das normas são relacionadas com o FA de polímeros, havendo outras relacionadas com elementos de segurança dos veículos e aeronaves. Alguns Organismos Notificados (p.e. Lloyd's Register, AMPower), atentos à evolução do mercado neste setor, criaram referenciais com vista a uma certificação abrangente do FA nas empresas (Figura 2.13), desde a criação do modelo, materiais, processos, segurança digital, até ao produto final[24, 25].

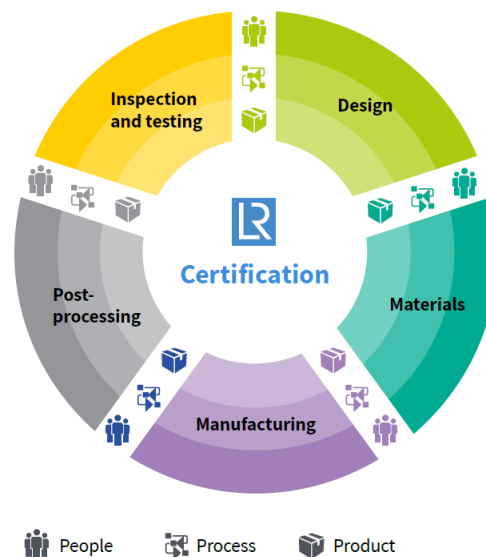


Figura 2.13 – Abrangência da certificação FA [25]

Devido à escassez e necessidade de técnicos [26, 27] altamente especializados, foram criados referenciais de qualificação de pessoas, tais como o referencial criado para os operadores de equipamentos laser PBF – ISO/ASTM 52942:2020 [31], ou o referencial *International AM Qualification System (IAMQS)* criado em colaboração com a *European Welding Federation* [32].

Os referenciais mencionados são fundamentais para a rápida disseminação da tecnologia, com qualidade e consistência, em linha com os objetivos estratégicos propostos pelos governos para uma nova era de digitalização dos processos.

2.5. Ensaios não destrutivos

O Fabrico Aditivo de metais partilha grande parte da tecnologia da união de metais por soldadura [33], [34]. A nível de ensaios não destrutivos, está em fase de desenvolvimento um relatório técnico internacional [35], que auxiliará na seleção dos ensaios – *ISO/ASTM DTR 52905: Additive manufacturing of metals — Non-destructive testing and evaluation — Defect detection in parts*. O relatório não está ainda finalizado, no entanto existem estudos recentes, como o de Ana Lopez [36] que descreve as técnicas de ensaios não destrutivos que podem ser aplicáveis ao FA de metais, nomeadamente ao WAAM. O estudo conclui que a generalidade dos métodos de END aplicáveis aos processos de soldadura (Figura 2.14) são adequados para FA, no entanto alguns são mais expeditos (p.e. condutividade elétrica), alguns são menos seguros (p.e. a radiografia) e outros carecem de uma grande preparação de superfície (p.e. ultrassons). Tal como na soldadura convencional, não há uma técnica END que permita ver todo o tipo de imperfeições em toda a extensão, por isso é necessário planear quais as técnicas a aplicar antes da produção.

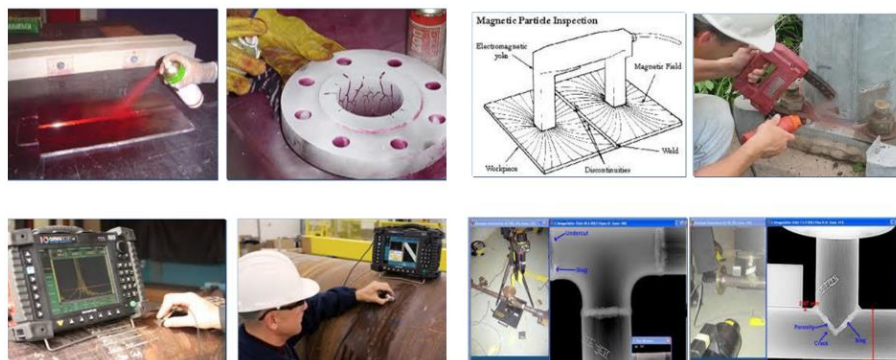


Figura 2.14 – END em soldadura – Formação CMM: Marcação CE [37]

Seguindo as prescrições de END para juntas soldadas, apresentam-se na Tabela 2.1 os ensaios sistemáticos recomendados.

Tabela 2.1 –END recomendados para aços austeníticos (EN ISO I7635:2016)

Localização das descontinuidades	Tipo de junta	Métodos
Superfície	Juntas de ângulo e topo a topo	VT e PT
Interior	Topo a topo, $t \leq 8\text{mm}$	RT
	Topo a topo, $t > 8\text{mm}$	RT ou UT*

VT – Inspeção visual; PT – Inspeção por líquidos penetrantes; RT – Raios X; UT – Ultrassons; * – método utilizado com limitações

Estes ensaios devem ser realizados por técnicos qualificados pela norma EN ISO 9712:2012 [38] nas técnicas a serem desenvolvidas. Esta qualificação valida a sua competência para selecionar a metodologia, realizar ou interpretar as indicações.

Antes da entrada em produção, os ensaios sistemáticos atrás referenciados são complementados por outros (não destrutivos e destrutivos); p.e. ensaios *Charpy*, tensão-deformação, durezas; conforme recomendação das normas de qualificação de procedimentos de soldadura EN ISO 15614:2017 [39]. Esta informação serviu de apoio para a seleção dos END a aplicar às peças, mais à frente neste relatório.

2.6. Detecção de defeitos em tempo real

Analisar as peças depois da produção origina perda de tempo e recursos. Colocar sensores e dispositivos para efetuar uma análise em tempo real é relativamente difícil, devido às condições do processo [40] (temperatura da peça, fumos) e dispendiosa. Contudo, desenvolvimentos recentes propõem a análise por espectrometria (Figura 2.15) como uma forma eficaz de monitorizar a sanidade da deposição e a existência de defeitos, mesmo durante a deposição de material [41] [42].

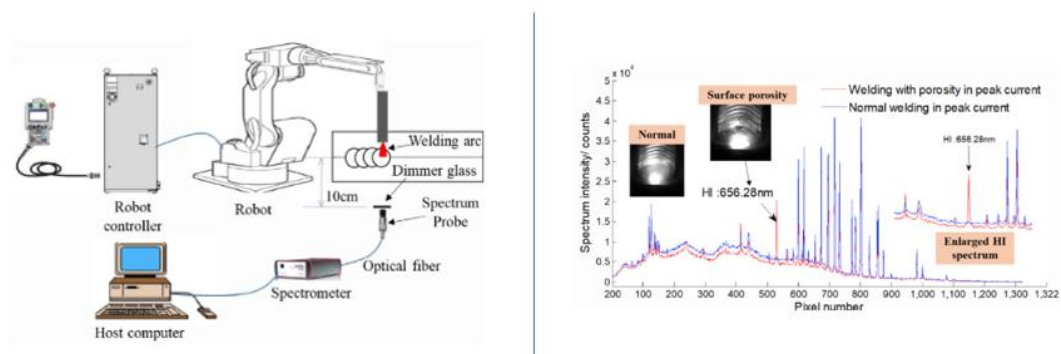


Figura 2.15 – Monitorização por espectrometria [43]

3. DEPOSIÇÃO POR SOLDADURA

O processo GMAW, também é conhecido pelos subtipos *Metal Inert Gas* (MIG) ou *Metal Active Gas* (MAG) em função do gás de proteção utilizado. Nestes casos utiliza-se um fio de soldadura como consumível, o qual estabelece o arco elétrico com o substrato metálico. As taxas de depósito situam-se entre 0,5 a 4 kg/hora [26]. A tecnologia WAAM baseada no processo de soldadura GMAW é mais simples de implementar, consegue maiores taxas de depósito, mas origina uma alta rugosidade e ondulações significativas quando comparada com processos PAW ou GTAW, estes processos são sobretudo utilizados para ligas de Titânio ou Alumínio[40].

3.1. Controlo da transferência por Curto-Circuito

Nas últimas décadas, as principais marcas de equipamentos de soldadura têm vindo a desenvolver sistemas com melhor desempenho e mais fáceis de operar. Exemplos disso são o STT da Lincoln (Figura 3.1a), o DP da Kempi, o RMD da Miller ou o CMT da Fronius (Figura 3.1b). Estes sistemas foram originalmente desenvolvidos para trabalhar chapas finas ou passes de raiz, principalmente de tubagem, por conseguirem uma maior produtividade e maior facilidade operatória em relação ao *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) manual. Os equipamentos GMAW permitem maior facilidade operatória e maior taxa de depósito, conseqüentemente maior produtividade, em relação aos equipamentos GTAW que se usam tradicionalmente naquelas aplicações.

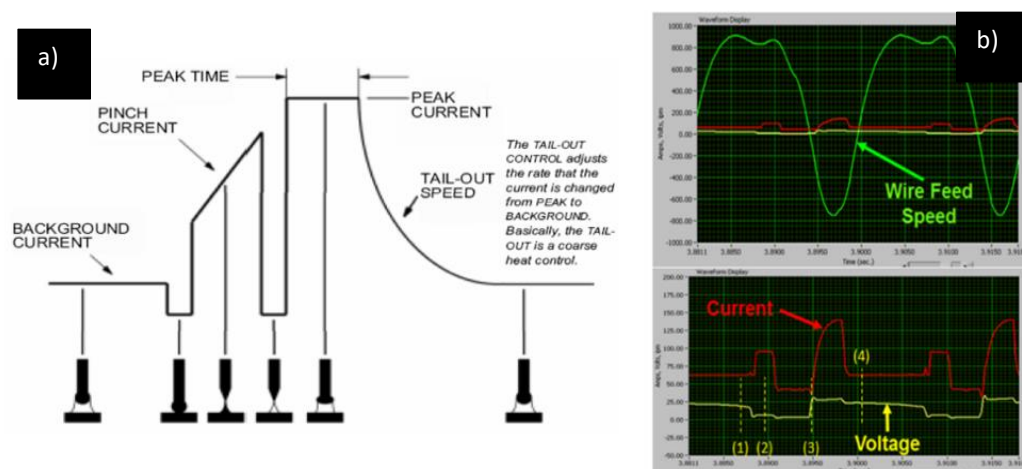


Figura 3.1 – Controlo de transferência por curto-circuito – STT e CMT [44]

A tecnologia CMT da Fronius é uma variante GMAW [44] resultado da Investigação e Desenvolvimento da marca, com o objetivo de reduzir a projeção de salpicos e melhorar qualidade dos cordões de soldadura através do controlo de transferência de gota do material de adição e redução de entrega térmica. Para o conseguir, a Fronius desenvolveu um controlo eletrónico de onda elétrica conjugado com o controlo mecânico de oscilação (Figura 3.2) na alimentação do fio, que leva a um corte preciso da gota quando está a ser depositada [45]. A largura mínima do cordão que se consegue alcançar depende essencialmente do diâmetro do fio, velocidade do fio e dos parâmetros de soldadura selecionados [45, 46].

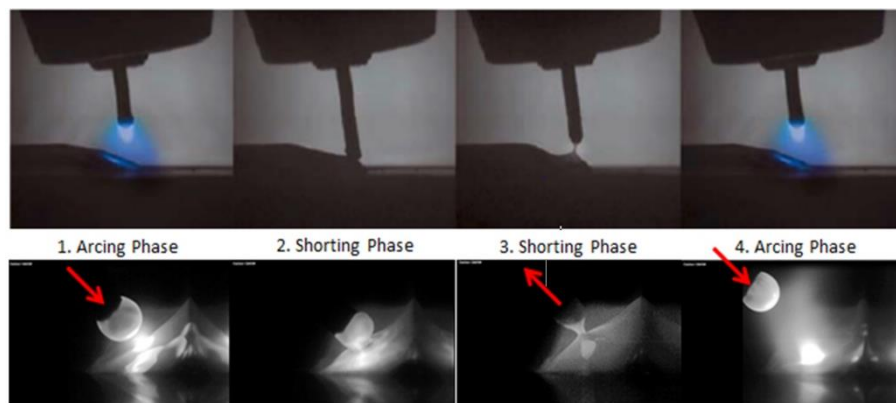


Figura 3.2 – Fases do ciclo CMT [45]

Descrição das fases do ciclo CMT [48]:

1. Escorvamento, início do ciclo com uma determinada curva de corrente.
2. Curto Circuito, arco é extinto, a corrente é diminuída.
3. O Alimentador faz recuar o fio minimizando o efeito dos salpicos e o tempo necessário ao destacamento da gota, a corrente continua baixa.
4. A gota destaca-se reinicia-se um novo ciclo.

Existem novas variantes de CMT [49] criadas para aplicações muito específicas, tais como: o CMT Pulse, CMT Advance, CMT Pulse Advance, CMT Dynamic, CMT Pin e CMT Synchro Pulse. Cada uma destas variantes parte do mesmo princípio de funcionamento de controlo da onda de corrente e tensão, assim como do movimento oscilatório de avanço e recuo do fio de arame, distinguindo-se do processo CMT original através de introdução de novos ciclos, curvas sinérgicas, formas de onda e diferente movimentação de alimentação do fio.

O processo CMT utiliza valores baixos de corrente elétrica porque se baseia na transferência em curto-circuito [50]. A transferência por curto-circuito é uma vantagem porque permite aumentar a resolução da impressão. Contudo, as taxas de deposição mais elevadas em GMAW estão associadas ao modo de transferência em *spray-arc*, impossível de alcançar com CMT.

3.2. Variáveis a controlar

As principais variáveis com influência no processo são:

1. Seleção do consumível

Relativamente ao consumível, existem processos com eletrodo consumível (p.e. GMAW) e processos cujo eletrodo é não-consumível (p.e. PAW, GTAW). Tradicionalmente utilizam-se os consumíveis de soldadura disponíveis no mercado, contudo já existem alguns estudos e referenciais criados para a qualificação de consumíveis próprios para Fabrico Aditivo. Por exemplo, o recente programa de certificação de consumíveis específico para FA da Lloyd's [28].

A seleção do consumível é fulcral [22] — no caso da soldadura automatizada a estabilidade do arco e a qualidade dos cordões de soldadura são fortemente influenciados por qualquer variação no eletrodo consumível (p.e. o diâmetro, ovalização, calibração, homogeneização e composição química). Neste contexto, algumas marcas já apresentam a sua linha de consumíveis específicos para FA, como é o caso da Böhler [51].

2. Diâmetro do fio

O diâmetro influencia diretamente a taxa de depósito e a produtividade. Para fundir fios com maior diâmetro é preciso regular o equipamento de soldadura com parâmetros superiores —exemplos na Figura 3.3. No caso de soldadura tradicional de chapas finas é conveniente trabalhar com fios de menor diâmetro (0,8mm, 1,00mm), para não perfurar o material base. No caso de Fabrico Aditivo pretendemos fios na mesma ordem de grandeza de diâmetro, para procurar uma resolução de impressão tão boa quanto possível.

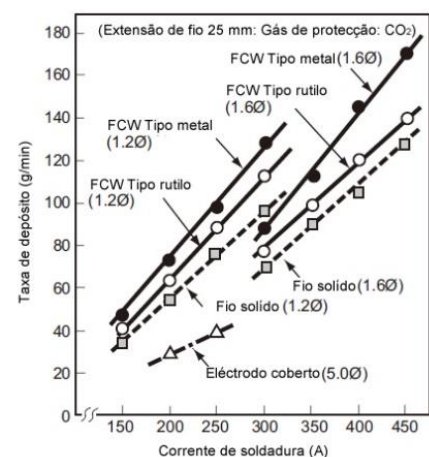


Figura 3.3 – Taxa de depósito e Corrente de Soldadura [46]

3. Seleção do gás de proteção

Os gases de proteção de soldadura dividem-se em duas categorias: inertes ou ativos. A diferença dos últimos é que a sua decomposição durante a reação gás-metal influencia ativamente a morfologia do cordão de soldadura. A função principal dos gases de proteção de soldadura é a de proteger o banho de fusão do ar ambiente, que contém essencialmente Azoto, Hidrogénio e Oxigénio. A retenção destes elementos no cordão de soldadura de aço pode ser nefasta (Tabela 3.1) a nível de fissuração, resistência a impactos e resistência mecânica [52].

Tabela 3.1 – Efeito do azoto, oxigénio e hidrogénio, na soldadura

	Azoto	Oxigénio	Hidrogénio
Aço	Aumenta a resistência, mas reduz a tenacidade	Reduz a tenacidade, mas melhora-a se a ferrite acicular for promovida	Induz fissuração por hidrogénio
Aços inoxidáveis austeníticos ou duplex	Reduz ferrite e promove a fissuração na solidificação		
Alumínio		Forma filmes de óxido que podem ficar aprisionados na forma de inclusões	Forma a porosidade por gás e reduz a resistência e a ductilidade
Titânio	Aumenta a resistência, mas reduz a ductilidade	Aumenta a resistência, mas reduz a ductilidade	

A classificação dos gases de soldadura é efetuada na norma ENISO14175:2008 [53] em função da composição química. A escolha do tipo de gás depende do processo de soldadura e das características do metal, da reação entre gás-metal, morfologia pretendida (p.e. molhagem ou penetração) e do custo de produção. As misturas inertes de Árgon (*Ar*) com Hélio (*He*) são utilizadas principalmente na soldadura GTAW [54]. As misturas ativas estão normalmente associadas a GMAW ou FCAW, devido à necessidade de melhorias na molhagem ou penetração que se obtém com a adição de alguns elementos gasosos. No caso de soldadura GMAW com aço inoxidável a adição de pequenas percentagens de dióxido de carbono (*CO₂*) ao Árgon (*Ar*) é desejável para melhorar a molhagem do cordão (Figura 3.4).

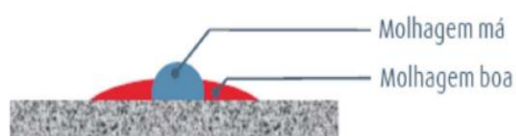


Figura 3.4 – Representação esquemática do efeito de Molhagem [54]

Ao introduzir CO_2 conseguimos melhorar a transferência e conseqüentemente a velocidade de soldadura. Em contrapartida a excessiva adição de CO_2 pode originar a instabilidade do arco elétrico, projeção excessiva de salpicos ou inclusão de óxidos metálicos. Uma alternativa para melhorar molhagem e conseqüente suavidade dos cordões é utilizar uma mistura de $Ar + CO_2 + He$ [55].

4. Velocidade de soldadura

Influencia diretamente a entrega térmica, a estabilidade do arco, a altura e largura do cordão depositado [56]. Na deposição é desejável ter velocidades tão altas quanto possível, que produzam cordões sãos e com a resolução pretendida, mas não tão altas que provoquem instabilidade e a extinção do arco elétrico. Na nossa montagem, a velocidade de soldadura é a velocidade linear da tocha de soldadura suportada pelo braço robótico (Figura 3.5).



Figura 3.5 – Robô manipulando tocha de soldadura – Fronius [45].

5. Sobreposição dos passes

A sobreposição de passes, esquematizada na Figura 3.6, influencia a aparência e a sanidade do cordão. A sobreposição correta é a que mantém um perfil estável ao longo de toda a deposição. O estudo de Ding [57] conclui que o valor ideal da distância entre centro de cordões é 74% da largura do cordão.

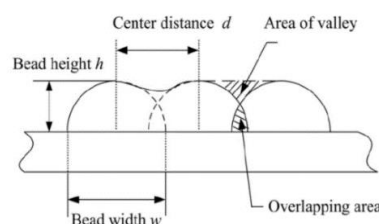


Figura 3.6 – Sobreposição de passes [57]

6. Intensidade de corrente (I)

A Intensidade de corrente elétrica define todo o regime de soldadura, em conjunto com a tensão. A taxa de depósito é diretamente dependente da intensidade de corrente, logo maiores valores de intensidade originam uma maior produtividade. A escolha do parâmetro depende do diâmetro de fio selecionado, da penetração pretendida e da entrega térmica que se pretende realizar.

7. Velocidade de alimentação do fio (WFS)

A velocidade de alimentação depende diretamente da intensidade de corrente selecionada (a possibilidade inversa também se verifica na regulação de alguns equipamentos).

O equipamento mantém uma velocidade de corrente média próxima da selecionada, mas durante o funcionamento há algumas variações — justificadas pelos regimes transitórios do arco elétrico, pela autorregulação do aparelho e flutuações do afastamento da tocha à peça provocadas pelas irregularidades naturais dos cordões já depositados.

Na utilização de equipamentos sinérgicos ao selecionar-se o fio, gás, material e espessura, o equipamento sugere automaticamente os parâmetros de soldadura sendo permitido ao operador alguma afinação.

8. Polaridade da corrente

Para GMAW é recomendado corrente contínua com polaridade positiva (DC+). Contudo, alguns procedimentos de soldadura podem ser desenvolvidos com inversão da polaridade da corrente, sacrificando penetração a favor de uma maior taxa de depósito – maior velocidade de soldadura.

9. Tensão (U)

Num equipamento sinérgico o valor de tensão é sugerido diretamente pelo equipamento, podendo existir uma ligeira correção manual (isto não ocorre com CMT). Um desvio positivo abre o arco tornando-o menos denso, conseqüentemente a gota de metal espalha-se na deposição. Um desvio negativo no valor de tensão selecionada leva a um arco restrito, concentrado, e a uma deposição mais direcionada da gota de metal fundido – desta forma pode existir um risco de bordos queimados na soldadura, que tem de ser corrigido com uma técnica operatória adequada.

10. Comprimento de arco

Um arco mais curto é mais estável. Comprimentos de arco maiores de 15 mm têm tendência a originar uma maior porosidade no cordão [19].

11. Caudal do gás

O caudal deve ser selecionado essencialmente em função da posição (Figura 3.7) e do tipo de gás (densidade). A posição PA (ao baixo) é vantajosa para gases mais densos, devido à ação da gravidade. Os valores típicos situam-se entre os 10 e os 15 l/min dependendo do ambiente (corrente de ar) e da posição da tocha de soldadura. Um caudal insuficiente de gás pode provocar uma má proteção do banho de fusão e consequentes porosidades no cordão depositado.

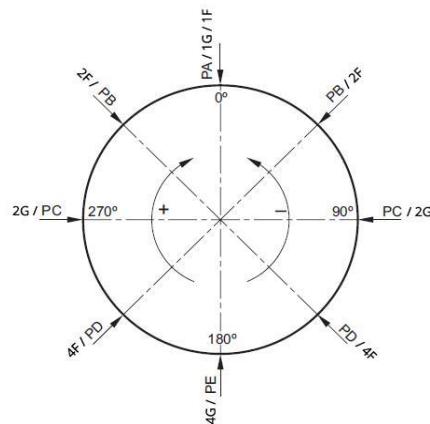


Figura 3.7 – Posições de soldadura ISO 6947 [14]

12. Temperatura de interpasse

A temperatura de interpasse controla-se realizando um período de espera programado na operação. O tempo de espera é frequentemente programado entre passes ou camadas subsequentes (dependendo do número de passes por camada e da entrega térmica) para evitar o sobreaquecimento do material. Em materiais com elevada sensibilidade às temperaturas de interpasse (por exemplo, < 150°C necessários para aços *duplex*) pode ser mais adequado programar um tempo de espera após cada passe. Em materiais menos sensíveis, como aço estrutural, pode ser feito um tempo de espera entre cada camada (*layer*) [19]. O tempo de espera pode representar mais de 30% do tempo total de impressão, nesses casos pode ser necessário efetuar o controlo da temperatura por meio externo (por exemplo, arrefecimento forçado) ou controlo do processo (por exemplo, tempo de espera variável) [19].

13. Inclinação e suporte de secções

É possível depositar uma parede inclinada até um determinado ângulo máximo. O estudo de Zhang e da sua equipa, demonstrou ser possível realizar peças com elevada inclinação de paredes (cerca de 45°) [58]. Na estratégia de deposição, pode ser vantajoso posicionar ou dividir uma peça 3D em diferentes secções, que podem ser soldadas em conjunto posteriormente.

3.3. Propriedades após deposição

No Fabrico Aditivo por WAAM a peça é totalmente formada pelo material de adição. As investigações [58, 59] demonstraram que as propriedades após deposição são adequadas ao uso estrutural. Ensaios realizados sobre amostras de aço ao carbono e aço inoxidável demonstraram que os resultados dos ensaios de tração, alongamento e de impacto, são ligeiramente superiores [19] aos valores previstos e anunciados na classificação do fio.

Um estudo de Wang [61] demonstra que as propriedades mecânicas no fundo da peça elaborada (parede simples) são ligeiramente superiores às do resto da peça e, justifica este fenómeno pelo facto de se dar um refinamento do grão mais pronunciado no fundo, provocado por ciclos térmicos consecutivos com maior velocidade de arrefecimento, uma vez que o escoamento de calor se faz pela peça e também pelo suporte na base. O mesmo estudo infere que o refinamento de grão aumenta quando a entrega térmica é menor e demonstra que a dureza também aumenta junto à base (Figura 3.8).

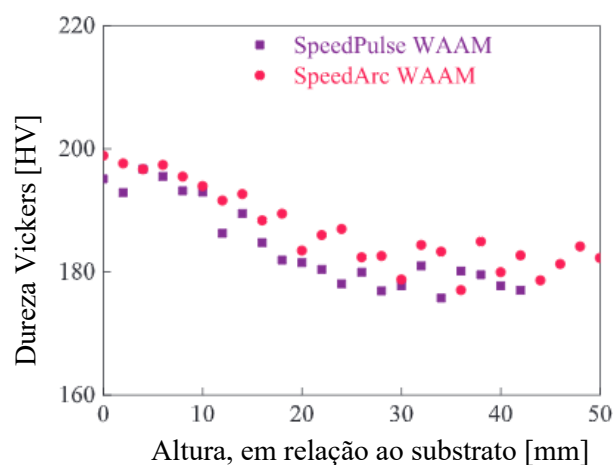


Figura 3.8 – Valores de dureza ao longo de uma peça WAAM – LORCH [61]

3.4. Aço inoxidável austenítico

A resistência à corrosão dos aços inoxidáveis austeníticos advém da camada passiva de óxido de cromo que se forma muito facilmente na superfície. Estes aços são também caracterizados por uma boa ductilidade, boa soldabilidade e boa resistência mecânica. As aplicações comuns são: tubagens, recipientes de cozinha, trabalhos de arquitetura. O grupo 18-8 (AISI 301, 302 e 304), apresenta uma composição com aproximadamente 18% de cromo e 8% de níquel. Na soldadura deste tipo de aços existe o risco de formação de precipitados de carbono nos limites de grão (Figura 3.9), que pode originar um fenómeno conhecido por corrosão intergranular.

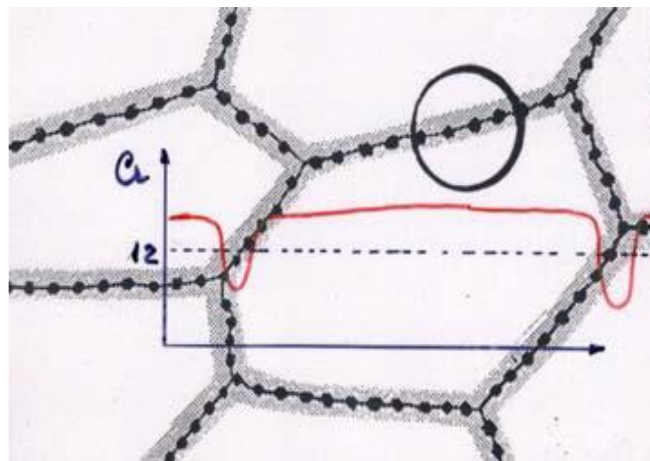


Figura 3.9 – Precipitados de carbono no limite de grão [72]

Os consumíveis com classificação L (*low carbon*) possuem uma percentagem máxima de carbono de 0,03%, de forma a minimizar ou anular a formação dos precipitados de carbono nos limites de grão ([62]).

O aço AISI 316, de aplicação comum na indústria, distingue-se dos aços do grupo anterior principalmente pela introdução do molibdénio na sua composição. Com o molibdénio, a resistência à corrosão melhora significativamente para aplicações com a presença de cloretos, o que torna o aço particularmente interessante para a indústria petroquímica, alimentar e em trabalhos de serralharia, mesmo os colocados na área costeira.

3.5. Imperfeições e defeitos

A avaliação de imperfeições e defeitos em manufatura aditiva por WAAM pode ser diretamente relacionada com a avaliação em soldadura convencional. A presença de defeitos é um fator crítico, uma vez que o resultado final e aceitação da peça depende da sua existência ou aceitação. A presença de porosidade ou inclusões no interior da peça pode levar a uma redução da resistência mecânica ou fadiga — a porosidade está associada a um caudal insuficiente de gás de proteção ou correntes de ar, humidade ou contaminação na peça. A presença de fissuras ou poros à superfície pode levar a uma redução de resistência à fadiga ou à não aceitação da peça devido a fatores estéticos ou funcionais. Enquanto os poros estão relacionados com o gás ou contaminação da peça, as fissuras estão associadas a parâmetros de soldadura inadequados ou temperaturas de interpasse excessivas.

Um outro defeito que pode surgir em WAAM é a deformação da peça (Figura 3.10). Os ciclos repetitivos na soldura provocam a expansão não uniforme durante o aquecimento e a contração do material no arrefecimento[63], o que origina tensões internas.

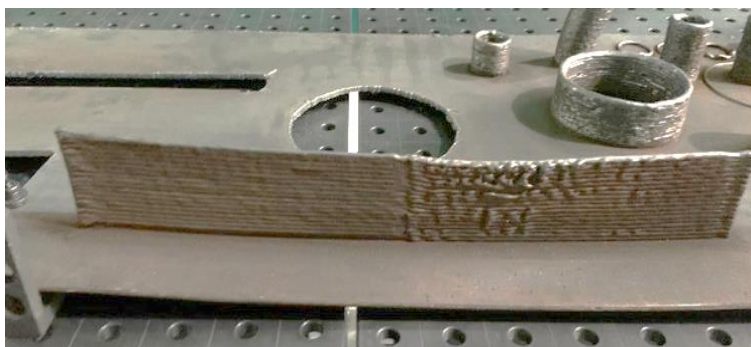


Figura 3.10 – Deformação visível após deposição WAAM

As tensões induzidas termicamente fazem com que o material distorça livremente para o equilíbrio, caso não haja restrições ao movimento. Por outro lado, havendo restrições ao movimento livre serão originadas tensões internas residuais que podem ser altamente prejudiciais, levando no limite à ocorrência de fissuração.

Tal como na soldadura convencional, quanto menor a quantidade de energia entregue à peça menor será a probabilidade de ocorrência destes fenómenos. Podemos atuar diretamente para evitar este problema utilizando parâmetros de soldadura baixos, sem

comprometer a estabilidade do arco; definindo trajetória otimizadas, exemplificadas na Figura 3.11; ou empregando tempos de espera entre passes generosos que promovam o escoamento de calor e equilíbrio de temperatura ao longo de toda a peça.

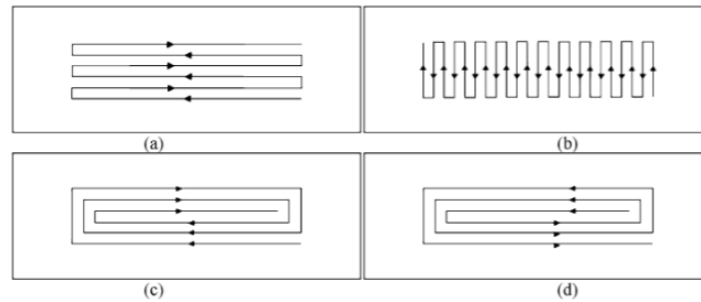


Figura 3.11 – Quatro trajetórias possíveis para uma deposição WAAM [73]

4. DESCRIBÇÃO DO PROCEDIMENTO

Neste capítulo apresenta-se a componente prática desta dissertação, desde a descrição dos recursos utilizados, das etapas de fabrico e conclui-se com a verificação da qualidade de deposição e caracterização mecânica dos materiais.

Na secção 4.1, é detalhado o equipamento, materiais e software utilizado. A Secção 4.2 descreve o processo de fabrico desde as primeiras iterações até à obtenção das peças finais e, a Secção 4.3 enuncia os parâmetros finais e valores de variáveis que obtiveram melhores resultados. Por fim, a Secção 4.4 é dedicada às inspeções e ensaios realizados.

4.1. Recursos para o Fabrico

Para o fabrico das peças utilizámos diversos recursos, tais como materiais, equipamentos e software. De seguida descrevem-se os mais relevantes.

4.1.1. Célula de Fabrico Aditivo

A célula é composta (Figura 4.1) por três componentes principais que se apresentam de seguida:

1. **ABB IRB 4600 Robô industrial** – É um robô manipulador de alta produtividade, desenhado para ciclos de tempo curtos e para células compactas.
2. **Trilho linear ABB IRBT 2005** – Plataforma de alta precisão, modular, que suporta a maioria das famílias de robôs ABB. Permite velocidades elevadas, reduzindo os ciclos de tempo de translação até 50% em relação aos trilhos convencionais.

3. **Fonte de soldadura Fronius TPS 400i CMT Advanced** – Esta fonte de potência, permite uma grande facilidade na seleção de parâmetros quando são ativados os parâmetros sinérgicos. Permite memorizar regulações (*Jobs*) em função dos materiais, consumíveis ou gases de soldadura. Está equipada com tecnologias de controlo de estabilidade de arco, redução de salpicos, modelação de onda pulsada, duplo pulsado, estabilizador e controlo de penetração na raiz de soldadura e possui ainda um módulo CMT integrado.

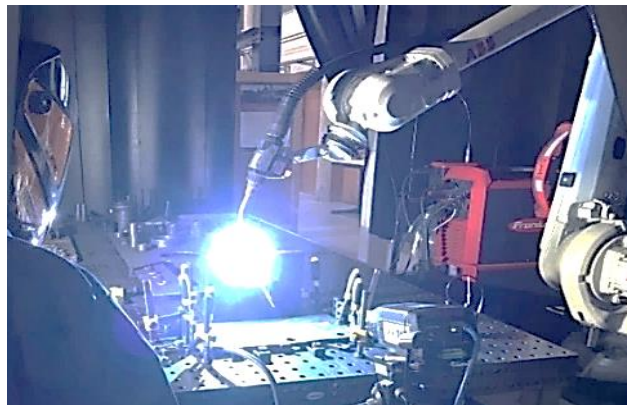


Figura 4.1 – Célula AMCONSTRUCTION em produção

4.1.2. Software

Para a modelação e fabrico das peças descritas, utilizou-se o seguinte software:

1. **Autodesk Inventor** – O Inventor é um dos softwares mais utilizados para *design* mecânico, na atualidade. O Inventor vai para além de um simples software CAD pois a simulação dinâmica e de esforços permite analisar o comportamento em serviço das peças desenhadas.
2. **Slic3r** – O Slic3r é um *freeware* lançado em 2011. É usado para converter modelos 3D (p.e. em Autodesk Inventor) em instruções de impressão GCode – a linguagem de programação mais utilizada em controlo numérico *CNC*. Os comandos GCode são interpretados pelo controlador do equipamento fazendo movimentar os motores num determinado sentido ao longo dos eixos, numa dada velocidade. Apesar de as trajetórias sugeridas pelo Slic3r serem criadas

para impressoras 3D de polímeros (Figura 4.2), foram aplicadas essas mesmas trajetórias em WAAM para forma a simplificar o processo.

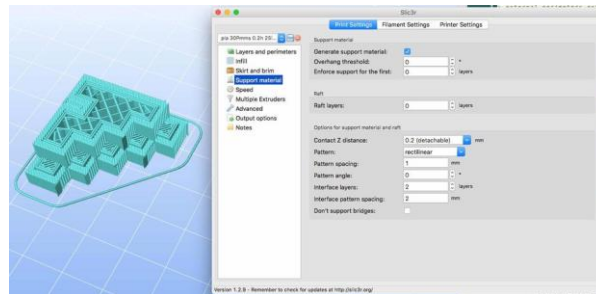


Figura 4.2 – Screenshot de um modelo Slic3r [74]

3. **Robotstudio** – Aplicação informática ABB que permite programar e simular movimentações do manipulador robótico em ambiente *online* ou *offline*. É possível criar um ambiente virtual com os equipamentos disponíveis na sua biblioteca ou outros importados, tais como robôs, mesas posicionadoras e eixos lineares. Esta aplicação é particularmente interessante na simulação e na verificação da integridade dos ficheiros e erros de execução.
4. **AM System Interface APP by jnp** — É uma aplicação realizada na Universidade de Coimbra pelo Professor Doutor Norberto Pires e pela sua equipa [63, 64]. Permite ao utilizador visualizar o estado do robô e da evolução da impressão, comunicar com o controlador do robô e ordenar a execução de tarefas simples de forma expedita num ambiente amigável, conforme ilustra a Figura 4.3.

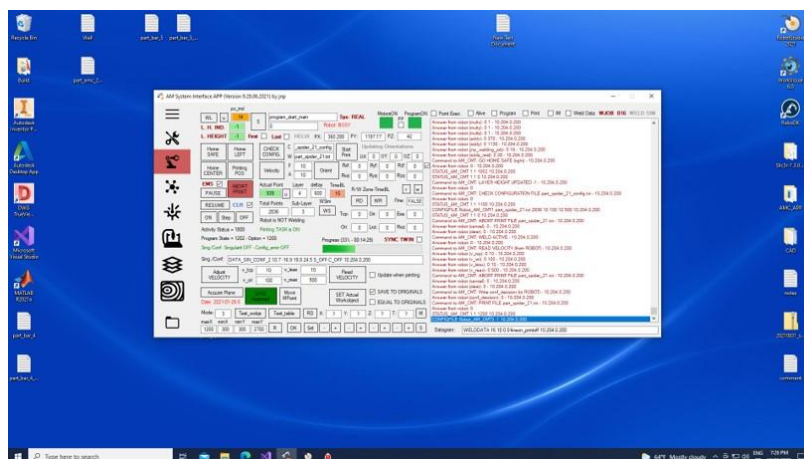


Figura 4.3 – Ecrã de visualização da APP de comunicação – by jnp

4.1.3. Metal de adição e gás de proteção

Utilizou-se fio sólido de aço inoxidável austenítico como metal de adição, cujo certificado de material pode ser consultado no ANEXO B –, com 1mm de diâmetro de Secção e referência normativa AWS A5.9: ER316LSi (EN ISO 14343-A: G 19 12 3 L Si). A redução da percentagem de carbono (sigla L na referência) neste fio permite minimizar o risco da formação de corrosão intergranular. O Silício (Si) está presente com o objetivo de melhorar a estabilidade do arco e a molhabilidade do metal fundido. Pela norma EN ISO 14343-A a letra G significa “*for gas metal arc welding*”, a resistência à tração deve ser de pelo menos 510MPa e o alongamento na rotura superior a 25%. O fio foi fornecido com o respetivo certificado de inspeção EN ISO 10204, onde se pode confirmar a composição química (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Composição química (%pd.) de referência e real ER 316 LSi

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
Valores de ref.	0,03	0,65	1,00	0,03	0,03	18,00	11,00	2,50	0,75	Balanço
EN14343-A	max.	a 1,20	a 2,50	max.	max.	a 20,00	a 14,00	a 3,00	max.	
Valores declarados [% de massa]	0,017	0,810	1,710	0,026	0,006	18,370	11,270	2,560	0,070	Balanço

O gás de proteção (Figura 4.4) utilizado foi o Arcal Chrome da AirLiquide, numa mistura de 98% de Árgon e 2% de CO_2 , com a classificação M12 pela norma EN ISO 14175:2008 [53].



Figura 4.4 – Instalação do gás de proteção

4.2. Fabrico

Desenharam-se modelos 3D (Figura 4.5b) de uma *Spider fitting* adquirida no mercado (Figura 4.5a) e de duas paredes de geometria simples em aço inoxidável (Figura 4.5c) com as dimensões 300×280×7,5 [mm] de forma a retirar material para ensaios. Consideraram-se três passos essenciais para obtenção da peça final e para o entendimento da influência das variáveis envolvidas, que se descrevem a seguir.

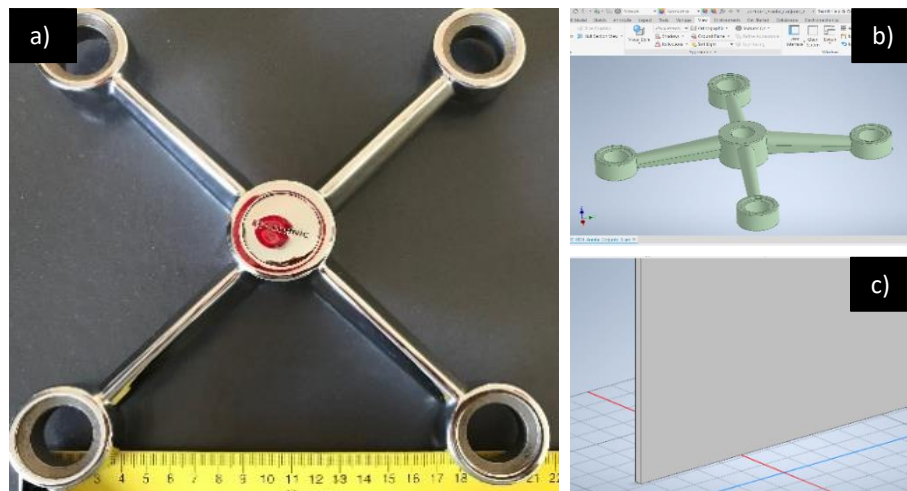


Figura 4.5 – *Spider* de compra e modelos 3D a executar

1º Passo – Objetivo: Estabilizar o processo depositando camadas sucessivas de material.

A Figura 4.6 ilustra várias tentativas para definição dos parâmetros a utilizar na deposição. Começou-se por estabelecer um arco elétrico estável, garantindo a continuidade dos cordões. De seguida otimizaram-se os parâmetros de soldadura, de modo a conseguir obter uma relação satisfatória entre a largura e altura de cordão. Por último estabeleceram-se os tempos de espera entre passes e os incrementos de altura da tocha em cada camada.



Figura 4.6 – Iterações para definição de parâmetros

2º Passo – Objetivo: Construir duas paredes (*Wall WAAM*) e retirar provetes para ensaios mecânicos de caracterização do material.

A construção de cada parede, com as dimensões de $300 \times 280 \times 7,5$ [mm], é um processo demorado onde qualquer imprevisto pode inviabilizar a totalidade da peça. Realizaram-se várias tentativas e no seu decurso verificou-se a existência de bastante instabilidade do arco elétrico e paragens súbitas do aparelho. Concluiu-se que a ovalização do furo do bico de contacto provocada pelo desgaste e defeitos existentes de ondulação no enrolamento do fio (Figura 4.7), provocavam um mau funcionamento no sistema CMT do equipamento. Após correção do problema foram retirados provetes, maquinados e ensaiados. Os resultados são apresentados no capítulo 5.



Figura 4.7 – Materiais defeituosos

3º Passo – Objetivo: Construir a peça final – *Spider WAAM*

Foi necessário modificar o desenho original devido à necessidade de criar material de suporte na parte inferior da *Spider* (Figura 4.9a). Fabricou-se uma perna da *Spider* com a trajetória sugerida pelo software de fabrico aditivo de polímeros Slic3r, cujo resultado não foi satisfatório. Realizaram-se alterações na programação (Figura 4.9b) de trajetórias e sequência de passes e, na última iteração programou-se a inclinação da tocha de soldadura para um ângulo de 10° (Figura 4.8) relativamente ao eixo perpendicular ao plano de soldadura – Estas alterações eliminaram quase por completo a instabilidade local do arco elétrico, melhorando significativamente o aspeto final.

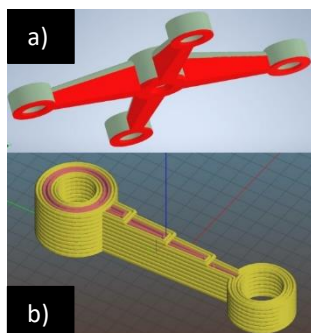


Figura 4.9 – Modificação de desenho original da *Spider* e das trajetórias de



Figura 4.8 – Posicionamento da tocha de soldadura no fabrico da peça final

4.3. Variáveis e Parâmetros de soldadura

Para determinar os parâmetros de soldadura adequados realizaram-se algumas tentativas iniciais com valores baixos de corrente, de modo a obter uma transferência estável em curto-circuito com auxílio CMT. Após vários testes determinaram-se os valores para os quais os resultados foram mais satisfatórios — Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores e parâmetros adotados

Variável	Valor
Posição	ISO 6947: PA
Consumível	EN ISO 14343-A: G 19 12 3 L Si AWS A5.9: ER 316 L Si
Diâmetro do fio	1,00 mm
Gás de proteção	CO ₂ (2%) + Ar (balance) EN ISO 14175: M12
Caudal	10 l/min
Intensidade de corrente	120 A
Polaridade	DC +
Tensão	13V (CMT)
Velocidade do fio	7,5 m/min
Taxa de deposição	2,9 kg/h
Velocidade avanço	10 mm/s
Stick out	25 mm
Tempo de espera entre passes	18 s
Entrega térmica calculada (EN1011)	0,125 kJ/mm

4.4. Ensaios realizados nas peças

Para efetuar a caracterização mecânica do material depositado e avaliar a existência de imperfeições superficiais ou internas, realizaram-se os ensaios mencionados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Ensaios realizados nas peças

Ensaios Não Destrutivos (recomendação EN ISO 14614-1)		
	Wall WAAM	Spider original
E1. Inspeção visual	×	×
E2. Líquidos Penetrantes	×	
E3. Radiografia	×	×
Ensaios para caracterização mecânica		
E4. Dureza <i>Vickers</i>	×	×
E5. Macrografia	×	×
E6. Tração	×	×

E1. Inspeção Visual (VT)

A inspeção visual é um método de ensaio que pode ser realizado isoladamente ou complementado com os restantes métodos de ensaio não destrutivos. É o ensaio mais simples e eficaz de realizar e o que deteta a maior parte das imperfeições. Pode ser realizado por observação direta da peça, através de equipamentos auxiliares ou mesmo com visão artificial. É um processo muito sensível aos fatores físicos (p.e. temperatura, luminosidade, limpeza), ao treino, percepção e até fatores psicológicos do inspetor na altura do exame da peça.

Nas várias etapas deste trabalho usou-se a Inspeção Visual, de forma a detetar imperfeições e corrigir parâmetros. As peças produzidas foram analisadas em 100% da sua extensão.

E2. Líquidos penetrantes (PT)

É um método utilizado para a avaliação de descontinuidades na superfície da peça, em materiais sólidos e não porosos. É possível inclusivamente detetar descontinuidades não visíveis a olho nu. Realiza-se de acordo com a norma EN ISO 3452-1 (Figura 4.10) e consiste basicamente em limpar a peça com solvente e depositar um líquido penetrante por um determinado tempo na superfície da peça. O líquido preenche as fissuras por capilaridade e o inspetor remove o excesso da superfície. De seguida aplica-se um produto absorvente – o revelador. As indicações surgem e ficam visíveis ao inspetor. Por fim, a peça é limpa, utilizando de novo o spray solvente. Este método, de utilização muito simples, aplica-se em materiais magnéticos ou não-magnéticos. No decurso deste trabalho foi ensaiada a superfície de um provete da *Wall* WAAM, através dos líquidos penetrantes.

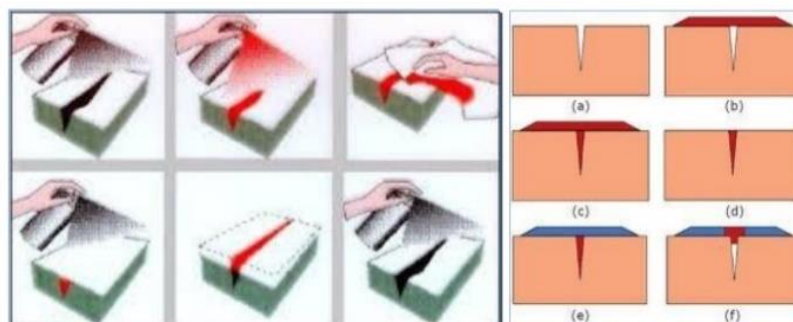


Figura 4.10 – Representação das fases do ensaio PT

E3. Radiografia (RT)

O ensaio por radiografia é um método de ensaio não destrutivo (END) que permite examinar a estrutura interna de componentes para confirmar a continuidade — ausência de defeitos planares ou volúmicos.

Nos ensaios por radiografia, a peça a ser ensaiada é colocada entre a fonte de radiação e o filme (ou detetor). A densidade do material e as diferenças de espessura da parte de ensaio farão diminuir a radiação penetrante, as diferenças de absorção são então registadas em películas de filme ou através de meios eletrónicos para visualização. A técnica tradicional de filme continua a ser bastante utilizada, mas a perder terreno face às modernas técnicas digitais. Na Figura 4.11 é possível visualizar as indicações de poros de gás no seio de um cordão de soldadura, em filmes de radiografia.

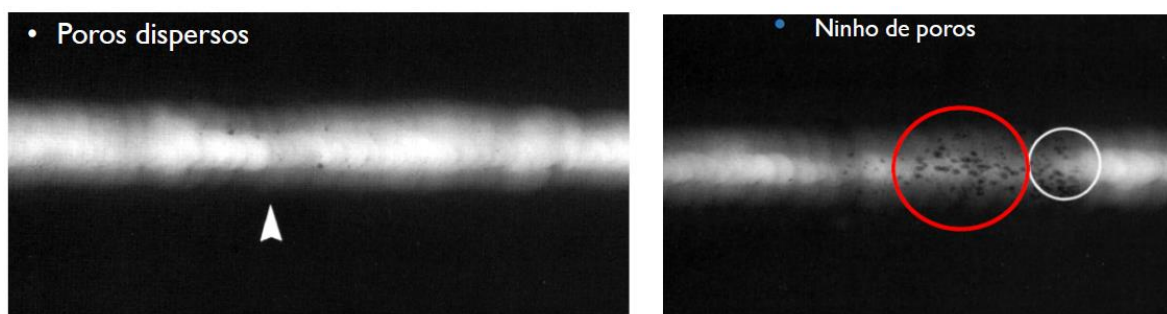


Figura 4.11 – Exemplos de imagens de defeitos detetados por ensaio RT
(fonte: biblioteca pessoal)

Existem duas fontes radioativas diferentes disponíveis para uso industrial: Raios-X e Raios Gama. Estas fontes de radiação usam um nível de energia muito elevado. Devido à radioatividade envolvida nos testes de radiografia, é fundamental assegurar que as regras de segurança sejam estritamente respeitadas durante o ensaio.

O ensaio por radiografia industrial é o mais oneroso e demorado de todos os tipos de ensaio. Esta técnica exige o isolamento da zona devido ao perigo de radioatividade e leva a um período de tempo muito significativo desde a execução do ensaio, revelação do filme até à posterior interpretação dos resultados. Para o presente estudo foram ensaiados dois provetes das *Wall WAAM* e também a *Spider* original.

E4. Ensaio de Durezas

Os ensaios de durezas foram executados segundo as normas EN ISO 6507-1:2018 [66] de ensaio de dureza *Vickers* e a EN ISO 9015-1 [67] de ensaio de dureza de juntas soldadas. Realizaram-se ensaios sobre a *Spider* original e sobre uma das *Wall* WAAM, para comparação de valores.

E5. Macrografia

Executada de acordo com a norma EN ISO 17639:2013 [68] e indicações do ISO/TR 16060:2003 [69]. Na Figura 4.12 pode observar-se um exemplo de uma macrografia de uma soldadura manual topo a topo, de um aço inoxidável austenítico. No âmbito deste trabalho realizou-se uma macrografia ao material depositado na *Wall* WAAM e *Spider* original.

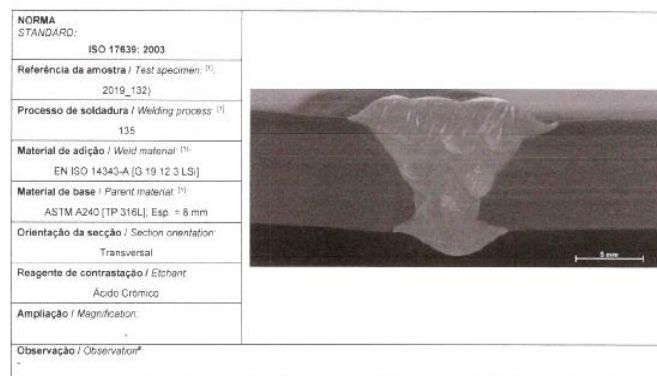


Figura 4.12 – Macrografia de soldadura com aço inoxidável ER316 LSi (fonte: biblioteca pessoal)

E6. Ensaios de tração

Os ensaios de tração dos provetes retirados da *Wall* WAAM (Figura 4.13) foram realizados de acordo com norma EN ISO 6892-1:2019 [70], método A, segundo os eixos Horizontal, Vertical, e inclinado HV045.

Realizaram-se também ensaios de tração sobre a *Spider* original, para caracterização do material dessa peça.

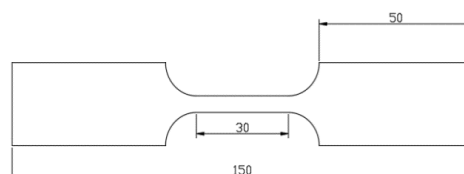


Figura 4.13 – Representação de um provete de ensaio *Wall* WAAM

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo faz-se a apresentação e discussão dos resultados, obtidos através dos ensaios mencionados no capítulo anterior. Alguns dos ensaios normalizados foram acompanhados pelo aluno, mas realizados por técnicos qualificados – os relatórios completos são disponibilizados no ANEXO B – relatórios de ensaios e certificados.

5.1. Resultados dos ensaios não destrutivos

E1. Inspeção Visual (VT)

A técnica de inspeção predominante em todas as fases produtivas deste trabalho é a Inspeção Visual. Após algumas iterações conseguiu-se produzir cordões de soldadura de morfologia e molhagem adequada e, no final foi possível obter peças com um baixo nível de imperfeições superficiais – tais como falta de fusão, desbordos ou porosidades.

Nas imagens (Figura 5.1) é possível observar a evolução entre a peça inicial repleta de defeitos e a peça final já com menor número de imperfeições, à direita vemos a *Spider* WAAM em planta, onde se destaca a boa definição da geometria e contornos da peça.



Figura 5.1 – Deposições WAAM

E2. Líquidos penetrantes (PT)

Na Figura 5.2 observa-se a aplicação dos líquidos penetrantes sobre o provete da *Wall* WAAM. É possível verificar que a peça está isenta de defeitos de uma forma geral, à exceção de algumas zonas com falta de fusão (resultante de paragem imprevista e arranque do equipamento) e zonas com incorreta transição entre passes e desbordos originados por instabilidade do arco elétrico (fenómenos referidos no capítulo anterior). Deve referir-se que a

qualidade da superfície melhorou após a criação destas *Wall*, após a correção da instabilidade do arco elétrico (troca do fio, orientação da tocha) – sendo possível eliminar a restante ondulação por maquinação, se desejável.



Figura 5.2 – Realização do ensaio PT

E3. Radiografia (RT)

nsaiaram-se dois provetes retirados das *Wall* WAAM (Figura 5.3). Detetaram-se faltas de fusão pontuais nos locais assinalados anteriormente, mas também inclusões de cobre, provenientes de desgaste ou contacto do bico, e alguma porosidade linear.

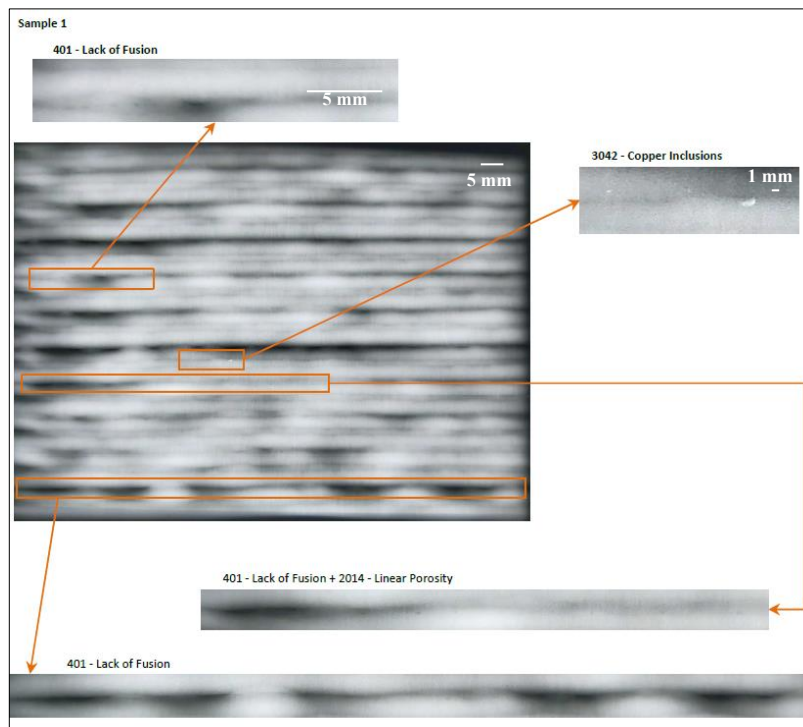


Figura 5.3 – Ensaio RT aplicado a *Wall*

5.2. Resultados de ensaios de caracterização mecânica

E4 e E5. Dureza Vickers e Macrografia

Realizou-se sobre a *Wall* WAAM um ensaio de dureza cujo resultado médio é 190 HV (7 medições na direção transversal) – este valor está em linha com os valores de fio ER 316 LSi, cujos resultados se situam em torno dos 180 HV. Apresenta-se na Figura 5.4 a macrografia executada à *Wall* WAAM, onde é possível observar os vários passes e as camadas de deposição efetuados.

Na *Spider* original obteve-se um valor de dureza de 149 HV, na filiação que se apresenta na Figura 5.5. Este valor está abaixo do limite máximo definido na norma do material, EN 10088-3:2014 – 211 HV.

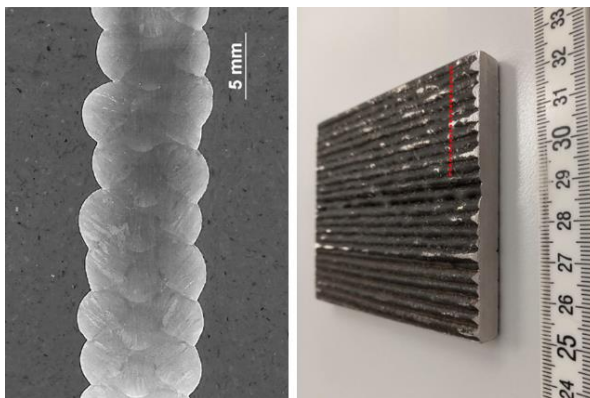


Figura 5.4 – Macrografia a provete de *Wall* WAAM

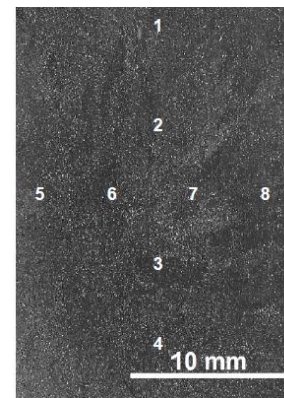


Figura 5.5 – Filiação de durezas em *Spider* original

E6. Ensaios de tração

Realizaram-se ensaios de tração sobre dezoito provetes das *Wall* WAAM, segundo as várias direções (Figura 5.6). Na Tabela 5.1 apresentam-se os valores médios dos três ensaios segundo cada uma das direções e estado de acabamento.

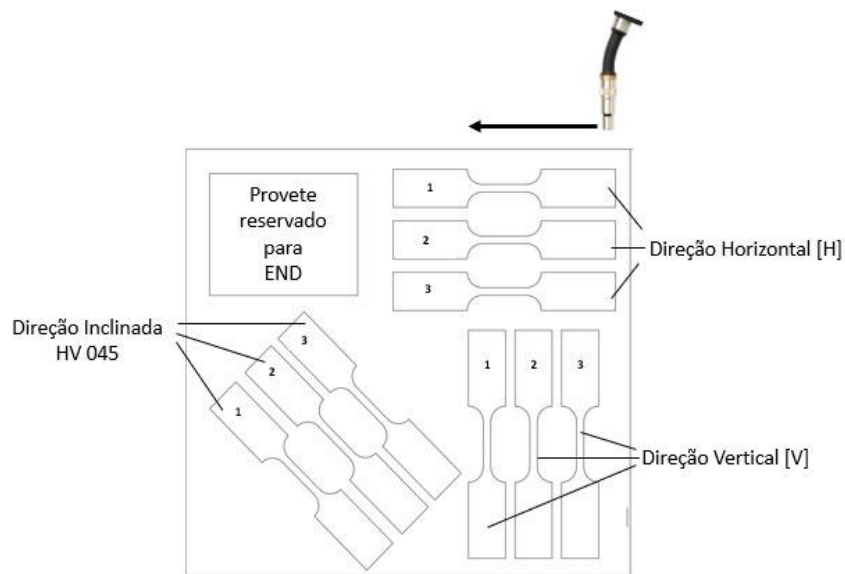


Figura 5.6 - Representação esquemática dos provetes retirados da *Wall* WAAM

Tabela 5.1 – Propriedades mecânicas do material depositado, para várias condições de acabamento e diferentes direções

Direção	V_MG	V_RG	I_MG	I_RG	H_MG	H_RG
	Vertical		Inclinada HV045		Horizontal	
Condição	Maquinado	Como soldado	Maquinado	Como soldado	Maquinado	Como soldado
R_{p02} [MPa]	405	351	430	373	384	332
R_m [MPa]	671	589	700	590	663	591
ϵ_{total} [%]	42	13	39	29	46	40
ϵ_m [%]	31	14	34	23	33	31
E [GPa]	151	112	278	163	185	119

Analisando os dados da Tabela 5.1 é possível observar que os valores de tensão limite de elasticidade e tensão de rotura nos provetes maquinados são 13% superiores, em relação aos da condição “como soldado”, o que indica uma diminuição de resistência devido às imperfeições superficiais. Verifica-se que os provetes retirados da direção inclinada HV045 apresentam os maiores valores de tensão limite de elasticidade. Observa-se que os ensaios dos provetes da direção Horizontal são aqueles que exibem menores resultados do valor de tensão de limite de elasticidade. Todos os provetes da condição “como soldados” produziram menores resultados de extensão total – este valor chega a ser reduzido a apenas um terço, no

caso dos provetes retirados da direção Vertical. Por fim, salienta-se que em todos os provetes produzidos, o valor da tensão de rotura obtido supera o valor alcançado no ensaio referente ao certificado do material de adição (570 MPa) apresentado no ANEXO B – relatórios de ensaios e certificados.

A Figura 5.7 representa graficamente os valores de tensão e deformação obtidos através do ensaio ao provete H_MG_3 – direção Horizontal, maquinado. Os valores obtidos nos outros ensaios de são semelhantes – este gráfico é representativo de todos eles.

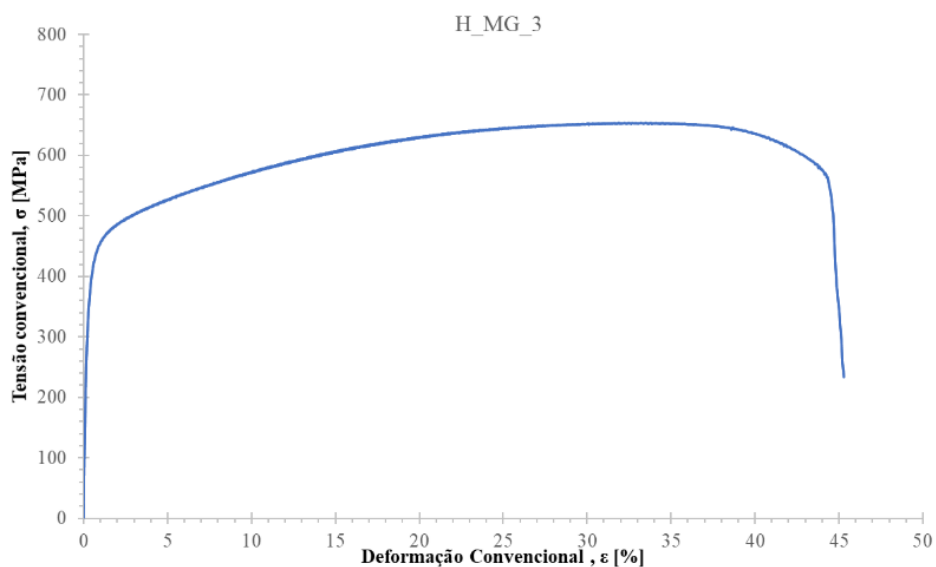


Figura 5.7 – Curva tensão-deformação de um provete produzido por WAAM

De uma forma geral, os resultados dos ensaios sobre todos os provetes maquinados revelam-se consistentes em todas as direções, como se pode observar na Figura 5.8.

Tal ocorrência não se verifica para os provetes não maquinados (como soldados), os quais apresentam uma grande dispersão nos resultados – Figura 5.9.

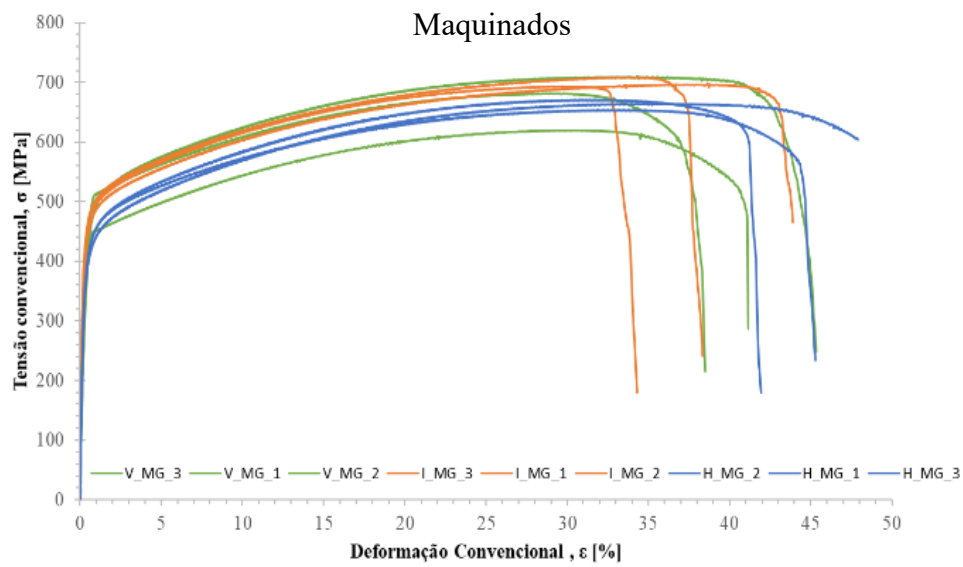


Figura 5.8 – Curvas tensão-deformação de material na condição "maquinado"

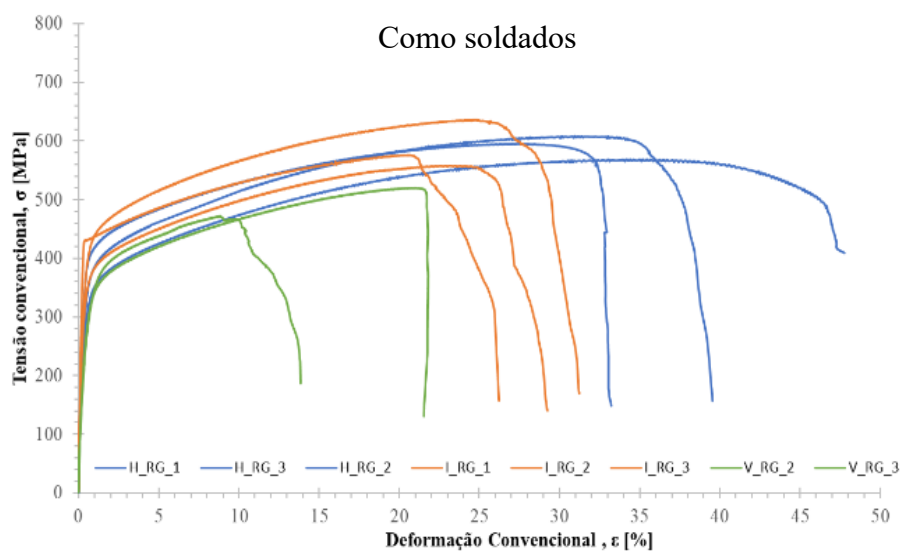


Figura 5.9 – Curvas tensão-deformação de material na condição "como soldado"

Para caracterização mecânica da *Spider* original, retiraram-se três provetes e obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 5.2. Os resultados das propriedades mecânicas do material da *Spider* original estão de acordo com os valores preconizados pela norma de aços inoxidáveis vazados, EN 10088-3:2014 [66].

Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas do material da *Spider* original

Test	T1	T2	T3
$R_{p0,2}$ [MPa]	220,1	208,1	218,1
R_m [MPa]	523	465	527
ϵ_{total} [%]	49	26	50
ϵ_m [%]	45	23	44
E [GPa]	110	184	122

A Figura 5.10 ilustra a curva tensão-deformação obtida a partir do ensaio de um provete representativo.

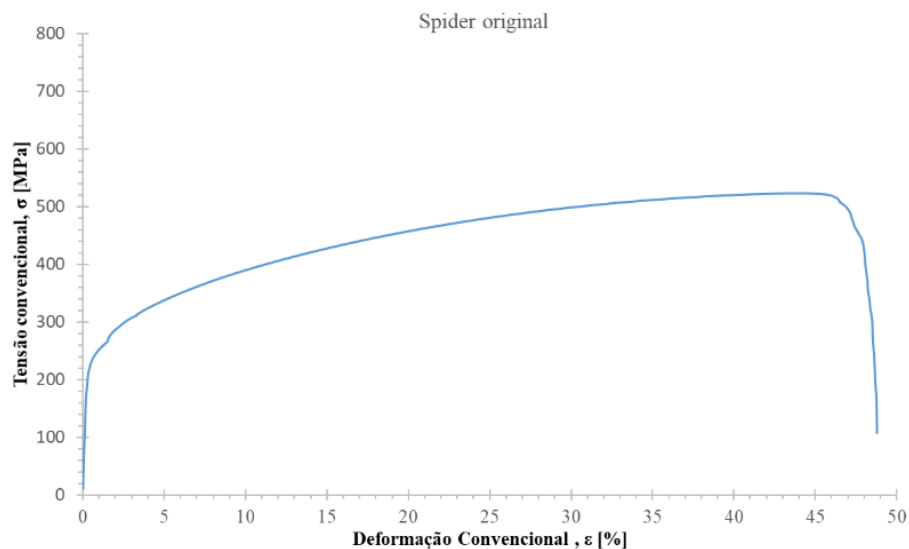


Figura 5.10 – Curva tensão-deformação de material da *Spider* original

A curva tensão-deformação apresenta valores inferiores aos valores da curva obtida por WAAM. Esta constatação, apesar de verdadeira, não permite tirar qualquer conclusão por comparação direta, uma vez que os materiais apresentam diferenças tanto na composição química como no estado final de fornecimento.

Contudo, podemos afirmar que estamos perante dois materiais interessantes, com aptidão para o uso estrutural e de engenharia em geral.

6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste último capítulo apresentam-se as principais conclusões e questões que ficaram por resolver, as quais permitem fazer sugestões para trabalhos futuros.

6.1. Conclusões

O objetivo inicial de trabalho foi cumprido — fabricar um componente estrutural de geometria complexa através da tecnologia WAAM e caracterizar posteriormente as propriedades mecânicas. Os resultados são muito satisfatórios, havendo espaço para melhorias na ondulação superficial e, por conseguinte, no comportamento mecânico das peças em estado não maquinado.

Aplicar a tecnologia de soldadura GMAW ao Fabrico Aditivo parecia no início uma tarefa simples de realizar. No decorrer dos trabalhos, o processo tornou-se cada vez mais desafiante, mas simultaneamente muito satisfatório e viciante, com o atingir de objetivos e análise dos resultados das experiências.

As principais conclusões retiradas deste estudo são:

- I. É possível obter peças em aço inoxidável com um moderado nível de detalhe através de WAAM, com propriedades mecânicas adequadas ao uso estrutural.
- II. A definição da trajetória é fundamental, as trajetórias de deposição de soldadura, não correspondem às sugeridas pelo Slic3r.
- III. As *Wall* WAAM foram fabricadas com a tocha de soldadura em posição perpendicular ao plano de soldadura. Por vezes tornava-se visível o desvio lateral do arco elétrico na periferia da peça e em algumas linhas de trajetória de enchimento. Esta instabilidade provoca imperfeições visuais à superfície, para além de potenciar a existência de espaços vazios no seio da peça. Na peça final foi implementado um ângulo lateral na tocha de 10° e a estabilidade aumentou consideravelmente.

- IV. A qualidade de fabrico do fio de soldadura, nomeadamente ondulação e vincos no enrolamento influenciam muito o decurso da operação, nomeadamente o funcionamento do sistema CMT, que é muito preciso, mas também sensível a estas variações.
- V. Até as condições de operação estabilizarem, o aspeto da superfície é de qualidade ligeiramente inferior à restante peça, isto é, nas camadas iniciais da deposição.
- VI. Por razões económicas trabalhou-se quase sempre com um substrato de aço carbono com algum uso. Qualquer marca ou indentação existente no aço replica-se nas camadas de deposição dificultando o processo de regulação do equipamento. Os requisitos básicos da execução de soldadura, como a limpeza e necessidade de preparação de substrato são ainda mais evidentes em WAAM por ser um processo automatizado. A *Spider* WAAM final foi executada sobre um substrato novo de aço inoxidável AISI 316 – confirmou-se o esperado pois a deposição dos cordões iniciais melhorou significativamente.

6.2. Propostas para trabalhos futuros

A manufatura aditiva por WAAM é uma área com enorme potencial de desenvolvimento. De forma a continuar a investigação sugere-se o desenvolvimento em trabalhos futuros:

- I. Analisar a estrutura interna do material depositado, através de ensaios metalográficos às peças produzidas. Investigar possível relação entre os desvios e a altura do material depositado.
- II. Realizar melhorias na técnica operatória: criação e estudo da influência de movimento de oscilação na tocha (*weaving*); ângulos de posicionamento da tocha; enchimento de cratera no final de cordão, rampas (parâmetros) de início e finalização do cordão de soldadura.

- III. Realizar testes práticos com a aplicação de consumíveis específicos WAAM — nomeadamente fios certificados e misturas de gás com Hélio. Estudar a influência na morfologia do depósito, microestrutura e caracterização mecânica.
- IV. Elaborar um estudo alargado sobre a influência das variáveis e parâmetros, nas propriedades mecânicas da peça fabricada. Investigar estratégias de deposição em função do controlo de ciclos térmicos e trajetórias, em diferentes geometrias.
- V. Criar um método numérico para previsão dos ciclos térmicos ao longo da deposição, que tome em conta a influência da geometria, estratégia de deposição e os parâmetros adotados. Aplicar o método na simulação *offline* e com recurso a inteligência artificial.
- VI. Desenvolver um mecanismo de manutenção de temperatura e controlo dos ciclos térmicos, baseado na compensação de parâmetros (tempo de espera entre passes, entrega térmica, sequência), com monitorização por infravermelhos.
- VII. Criar um dispositivo externo para controlo do ciclo térmico, tal como uma mesa de suporte com temperatura controlada (aquecimento ou arrefecimento).
- VIII. Monitorizar os defeitos, em tempo real, através de espectrometria. Aplicar em Realidade Aumentada [71].
- IX. Realizar análises do comportamento à fadiga de peças fabricadas por WAAM com várias estratégias de deposição e acabamento superficial.
- X. Investigar a possibilidade de criação de um produto ou técnica “desmoldante”, que permita separar o substrato da peça fabricada, com facilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Comissão Europeia, “https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_pt.” https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_pt (accessed Oct. 18, 2021).
- [2] Eurico Assunção, “Additive Manufacturing: from using it to implementing it,” 2021.
- [3] N.-D. Ciobota, G. I. Gheorghe, and V. Despa, “Additive Manufacturing as an Important Industry Player for the Next Decades,” *Scientific Bulletin of Valahia University - Materials and Mechanics*, vol. 17, no. 16, pp. 68–71, May 2019, doi: 10.2478/bsmm-2019-0010.
- [4] S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, and P. Colegrove, “Wire + Arc additive manufacturing,” *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, vol. 32, no. 7, pp. 641–647, Jun. 2016, doi: 10.1179/1743284715Y.0000000073.
- [5] “<https://fitechnic.com/point-fixing/>.” <https://fitechnic.com/point-fixing/> (accessed Oct. 18, 2021).
- [6] ISO ASTM, “ASTM/ISO 52900:2015- Additive manufacturing — General principles — Terminology,” 2015.
- [7] R. Ponche, J.-Y. Hascoet, O. Kerbrat, P. Mognol, J. Y. Hascoet, and O. Kerbrat, “A new global approach to design for additive manufacturing.” [Online]. Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01921270>
- [8] M. Tyrrell, “<https://www.pesmedia.com/spacex-3d-printing-kingsbury-uk/>.” <https://www.pesmedia.com/spacex-3d-printing-kingsbury-uk/> (accessed Oct. 18, 2021).
- [9] M. Nowak, “<https://www.motocykl-online.pl/newsy/Druk-3D-BMW-wydrukowalo-rame-do-S1000RR,12547,1>.” <https://www.motocykl-online.pl/newsy/Druk-3D-BMW-wydrukowalo-rame-do-S1000RR,12547,1> (accessed Oct. 18, 2021).
- [10] G. Santos, A. Álvarez, and P. (EDA) Vicente, “ADDITIVE MANUFACTURING FEASIBILITY STUDY & TECHNOLOGY DEMONSTRATION EDA AM State of the Art & Strategic Report,” Jan. 2018.
- [11] J. M. Davila Delgado *et al.*, “Robotics and automated systems in construction: Understanding industry-specific challenges for adoption,” *Journal of Building Engineering*, vol. 26, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.job.2019.100868.
- [12] T. Tankova, J. N. Pires, and L. Simões Da Silva, “Industry 4.0 for Steel Construction: an Outlook,” 2021, doi: 10.1002/cepa.
- [13] M. Meisenzahl, “<https://www.businessinsider.com/kamp-c-3d-printed-two-story-house-in-belgium-2020-8>.” <https://www.businessinsider.com/kamp-c-3d-printed-two-story-house-in-belgium-2020-8> (accessed Oct. 18, 2021).
- [14] C. V., “<https://www.3dnatives.com/en/winsun-coronavirus-260220205/>.” <https://www.3dnatives.com/en/winsun-coronavirus-260220205/> (accessed Oct. 18, 2021).
- [15] National Aeronautics and Space Administration, “3D-Printed Habitat Challenge,” 2020. [Online]. Available: www.nasa.gov
- [16] “<https://mx3d.com/>.”

- [17] M. Munsch, M. Schmidt-Lehr, E. Wycisk, and T. Fuhrer, “AMPOWER REPORT 2021- Additive Manufacturing, Management summary,” 2021.
- [18] Y. Zhang *et al.*, “Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review,” Springer New York LLC, Jan. 2018. doi: 10.1007/s11665-017-2747-y.
- [19] J. Tacq, F. Hendrickx, and F. Maas, “INSIDE Metal AM-3D Printing with Steel-white paper,” 2021. [Online]. Available: <https://www.flam3d.be/hoe-ziet-de-groei-van-3d-printing-eruit/>,
- [20] TWI, “WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING (WAAM).”
- [21] M. Douglass, “Unveiling the disguised complexities of wire-arc am.” https://bil-ibs.be/sites/default/files/publicaties/andere/3d-adept_202106_unveiling_the_disguised_complexities_of_wire-arc_am.pdf (accessed Oct. 22, 2021).
- [22] SIRRIS, “INSIDE Metal Additive Manufacturing Wire selection for WAAM: Quality insights”.
- [23] António Ramos Pires, *Sistemas de Gestão da Qualidade*, Ed.2. Edições Sílabo, 2016.
- [24] “iso-9001-quality-management.” <https://www.iso.org/iso-9001-quality-management.html> (accessed Oct. 24, 2021).
- [25] R. K. Leach, D. Bourell, S. Carmignato, A. Donmez, N. Senin, and W. Dewulf, “Geometrical metrology for metal additive manufacturing.” [Online]. Available: www.uspto.gov
- [26] Lloyd’s Register and TWI, “Guidance notes for Additive Manufacturing certification.”
- [27] Bureau Veritas, “Additive Manufacturing-Guidelines for Certification of Product made using Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process,” 2019, Accessed: Oct. 24, 2021. [Online]. Available: <https://marine-offshore.bureauveritas.com/bv-rules>
- [28] Lloyd’s and TWI, “Guidance Notes for the Certification of Consumables for WAAM.” <https://www.lr.org/en/guidance-notes-for-the-certification-of-consumables-for-waam/> (accessed Oct. 24, 2021).
- [29] “SAM_Report on the Analysis and Validation of Needs.”
- [30] Eurico Assunção, Adelaide Almeida, and Ana Beatriz Lopez, “Skills Needs and Upskilling Addressing the European Metal AM Industry,” *Journal of Materials Science and Engineering B*, vol. 11, no. 1, Jan. 2021, doi: 10.17265/2161-6221/2021.1-3.004.
- [31] A. manufacturing ISO/TC 261 and A. M. T. ASTM F 42, “Additive manufacturing — Qualification principles — Qualifying machine operators of laser metal powder bed fusion machines and equipment used in aerospace applications.” ISO, 2020.
- [32] EWF, “European Welding Federation- AM page.” <https://www.ewf.be/additive-manufacturing> (accessed Oct. 24, 2021).
- [33] T. Debroy *et al.*, “Additive manufacturing of metallic components-Process, structure and properties,” 2017, doi: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.
- [34] J. P. Oliveira, T. G. Santos, and R. M. Miranda, “Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: From theory to practice,” *Progress in Materials Science*, vol. 107. Elsevier Ltd, Jan. 01, 2020. doi: 10.1016/j.pmatsci.2019.100590.

- [35] ISO/ ASTM, “ISO/ASTM DTR 52905 Additive manufacturing of metals — Non-destructive testing and evaluation — Defect detection in parts.” <https://www.iso.org/standard/71988.html> (accessed Sep. 24, 2021).
- [36] A. Lopez, R. Bacelar, I. Pires, T. G. Santos, J. P. Sousa, and L. Quintino, “Non-destructive testing application of radiography and ultrasound for wire and arc additive manufacturing,” *Additive Manufacturing*, vol. 21, pp. 298–306, May 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.03.020.
- [37] S. Gonçalves, “Formação CMM: Marcação CE de estruturas metálicas,” 2021.
- [38] CEN, “EN ISO 9712:2012- Non-destructive Testing. Qualification and certification of NDT personnel,” 2012.
- [39] CEN, “EN ISO 15614-1:2017- Specification and qualification of welding procedures for metallic materials - Welding procedure test - Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys.” 2017.
- [40] T. A. Rodrigues, V. Duarte, R. M. Miranda, T. G. Santos, and J. P. Oliveira, “Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM),” *Materials*, vol. 12, no. 7, 2019, doi: 10.3390/ma12071121.
- [41] Z. Zhao, Y. Guo, L. Bai, K. Wang, and J. Han, “Quality monitoring in wire-arc additive manufacturing based on cooperative awareness of spectrum and vision,” *Optik*, vol. 181, pp. 351–360, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.ijleo.2018.12.071.
- [42] Y. M. Kwak and C. C. Dumanidis, “Geometry regulation of material deposition in near-net shape manufacturing by thermally scanned welding,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 4, no. 1, pp. 28–41, 2002, doi: 10.1016/S1526-6125(02)70131-X.
- [43] Z. Zhang, W. Ren, Z. Yang, and G. Wen, “Real-time seam defect identification for Al alloys in robotic arc welding using optical spectroscopy and integrating learning,” *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 156, May 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2020.107546.
- [44] S. Selvi, A. Vishvakshenan, and E. Rajasekar, “Cold metal transfer (CMT) technology - An overview | Elsevier Enhanced Reader.” <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2214914717301022?token=5AA370BAD2BF2D5173C28C45C6B9C9C295BDDA5174B9326CF6B7A88968256F44723E0BBCCE732772516B04F3403684E4&originRegion=eu-west-1&originCreation=20211024193127> (accessed Sep. 24, 2021).
- [45] Fronius, “CMT – COLD METAL TRANSFER: THE COLD WELDING PROCESS FOR PREMIUM QUALITY.” <https://www.fronius.com/en/welding-technology/world-of-welding/fronius-welding-processes/cmt> (accessed Oct. 24, 2021).
- [46] G. Posch, K. Chladil, and H. Chladil, “Material properties of CMT—metal additive manufactured duplex stainless steel blade-like geometries,” *Welding in the World* 2017 61:5, vol. 61, no. 5, pp. 873–882, May 2017, doi: 10.1007/S40194-017-0474-5.
- [47] C. G. Pickin and K. Young, “Evaluation of cold metal transfer (CMT) process for welding aluminium alloy”, doi: 10.1179/174329306X120886.
- [48] “Introducing Reciprocating Wire Feed Gas Metal Arc Welding.” <https://ewi.org/reciprocating-wire-feed-gmaw-an-advanced-short-circuit-gmaw-mode/> (accessed Sep. 26, 2021).

- [49] J. Evans, “COLD METAL TRANSFER Robotics - PDF Free Download.” <https://docplayer.net/49706706-Cold-metal-transfer-robotics.html> (accessed Sep. 24, 2021).
- [50] N. E. Imoudu, “The Characteristic of Cold Metal Transfer (CMT) and its application For Cladding,” 2017.
- [51] voestalpine, “3Dprint | Böehler Welding.” <https://www.voestalpine.com/welding/Brands/Boehler-Welding/3Dprint> (accessed Sep. 24, 2021).
- [52] S. Kou, *WELDING METALLURGY- 2nd. edition.* 2003.
- [53] ISO, “ISO 14175:2008 - Welding consumables — Gases and gas mixtures for fusion welding and allied processes.” <https://www.iso.org/standard/39569.html> (accessed Sep. 24, 2021).
- [54] J. Oliveira Santos and L. Quintino, “Processos de Soldadura ,” *ISQ- Edições técnicas*, 1993. <https://www.fnac.pt/Processos-de-Soldadura-Jose-F-Oliveira-Santos/a189751> (accessed Sep. 26, 2021).
- [55] Ítalo Ferreira, “Formação EWE/IWE- Módulo 1.6 - Gases e arco elétrico-diap.8/22,” 2014.
- [56] V. T. Le, D. S. Mai, T. K. Doan, and H. Paris, “Wire and arc additive manufacturing of 308L stainless steel components: Optimization of processing parameters and material properties,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 24, no. 4, pp. 1015–1026, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jestch.2021.01.009.
- [57] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, “A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM),” 2015. [Online]. Available: <http://ro.uow.edu.au/eispapers/3307>
- [58] J. Xiong, Y. Lei, H. Chen, and G. Zhang, “Fabrication of inclined thin-walled parts in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing with flat position deposition,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 240, pp. 397–403, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2016.10.019.
- [59] V. Laghi, M. Palermo, G. Gasparini, and T. Trombetti, “Computational design and manufacturing of a half-scaled 3D-printed stainless steel diagrid column,” *Additive Manufacturing*, vol. 36, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101505.
- [60] A. Queguineur, G. Rückert, F. Cortial, and J. Y. Hascoët, “Evaluation of wire arc additive manufacturing for large-sized components in naval applications,” *Welding in the World*, vol. 62, no. 2, pp. 259–266, Mar. 2018, doi: 10.1007/s40194-017-0536-8.
- [61] L. Wang, J. Xue, and Q. Wang, “Correlation between arc mode, microstructure, and mechanical properties during wire arc additive manufacturing of 316L stainless steel,” *Materials Science and Engineering A*, vol. 751, pp. 183–190, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.msea.2019.02.078.
- [62] T. Lincoln Electric Company, “Stainless Steels Welding Guide,” 2003.
- [63] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, “Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 81, no. 1–4. Springer London, pp. 465–481, Oct. 26, 2015. doi: 10.1007/s00170-015-7077-3.
- [64] C. Y. Zhu, J. N. Pires, and A. Azar, “A novel multi-brand robotic software interface for industrial additive manufacturing cells,” *Industrial Robot*, vol. 47, no. 4, pp. 581–592, Jun. 2020, doi: 10.1108/IR-11-2019-0237.

-
- [65] F. M. Ribeiro, J. N. Pires, and A. S. Azar, “Implementation of a robot control architecture for additive manufacturing applications,” *Industrial Robot*, vol. 46, no. 1, pp. 73–82, Apr. 2019, doi: 10.1108/IR-11-2018-0226.
- [66] CEN - CEN/TC 459/SC 1, “EN ISO 6507-1:2018 Metallic materials - Vickers hardness test - Part 1: Test method (ISO 6507-1:2018),” 2018.
https://standards.cencenelec.eu/dyn/www/f?p=CEN:110:0:::FSP_PROJECT,FSP_ORG_ID:40777,733642&cs=17F02C19E3DAB6D422799232AF50F45DD (accessed Sep. 29, 2021).
- [67] CEN - CEN/TC 121, “EN ISO 9015-1:2011 Destructive tests on welds in metallic materials - Hardness testing - Part 1: Hardness test on arc welded joints (ISO 9015-1:2001).”
https://standards.cencenelec.eu/dyn/www/f?p=CEN:110:0:::FSP_PROJECT,FSP_ORG_ID:35170,6103&cs=1B07C4F8D2489881F517D943D9183E53B (accessed Sep. 29, 2021).
- [68] CEN, “EN ISO 17639:2013 - Destructive tests on welds in metallic materials - Macroscopic and microscopic examination of welds (ISO 17639:2003),” 2013.
- [69] ISO, “ISO/TR 16060:2003 Destructive tests on welds in metallic materials — Etchants for macroscopic and microscopic examination,” 2003.
- [70] CEN - CEN/TC 459/SC 1, “EN ISO 6892-1:2019 Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature (ISO 6892-1:2019).”
https://standards.cencenelec.eu/dyn/www/f?p=CEN:110:0:::FSP_PROJECT,FSP_ORG_ID:69547,733642&cs=15F9D80AFF43B9EE288B5F6EA2B96775B (accessed Sep. 29, 2021).
- [71] J. Pedro and S. Neves, “Imagem Application of Mixed Reality Devices for Robot Manipulator Programming: Aspects Related to Graphical Animations Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto,” 2018.
- [72] Altino Loureiro, “Formação CMM: Marcação CE - Cap. Soldadura,” 2018.
- [73] E. Forozmehr and R. Kovacevic, “Effect of path planning on the laser powder deposition process: Thermal and structural evaluation,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 51, no. 5–8, pp. 659–669, Nov. 2010, doi: 10.1007/s00170-010-2659-6.
- [74] “<https://slic3r.org/>.” <https://slic3r.org/> (accessed Oct. 21, 2021).

ANEXO A – LISTA DE NORMAS FA

Tabela A.1 - Acervo normativo FA atualizado

Fonte: ASTM

Applications	
Designation	Title
ISO / ASTM52942 - 20	Additive manufacturing — Qualification principles — Qualifying machine operators of laser metal powder bed fusion machines and equipment used in aerospace applications
ISO / ASTM52941 - 20	Additive manufacturing — System performance and reliability — Acceptance tests for laser metal powder-bed fusion machines for metallic materials for aerospace application
Design	
Designation	Title
F3413 - 19	Guide for Additive Manufacturing — Design — Directed Energy Deposition
ISO / ASTM52910 - 18	Additive manufacturing — Design — Requirements, guidelines and recommendations
ISO / ASTM52911 - 1 - 19	Additive manufacturing — Design — Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals
ISO / ASTM52911 - 2 - 19	Additive manufacturing — Design — Part 2: Laser-based powder bed fusion of polymers
ISO / ASTM52915 - 20	Specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.2
ISO / ASTM52950 - 21	Additive manufacturing — General principles — Overview of data processing
Materials and Processes	
Designation	Title
F2924 - 14	Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion
F3001 - 14	Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium ELI (Extra Low Interstitial) with Powder Bed Fusion
F3049 - 14	Standard Guide for Characterizing Properties of Metal Powders Used for Additive Manufacturing Processes
F3055 - 14a	Standard Specification for Additive Manufacturing Nickel Alloy (UNS N07718) with Powder Bed Fusion
F3056 - 14e1	Standard Specification for Additive Manufacturing Nickel Alloy (UNS N06625) with Powder Bed Fusion

Materials and Processes (cont.)

Designation	Title
F3091 / F3091M - 14	Standard Specification for Powder Bed Fusion of Plastic Materials
F3184 - 16	Standard Specification for Additive Manufacturing Stainless Steel Alloy (UNS S31603) with Powder Bed Fusion
F3187 - 16	Standard Guide for Directed Energy Deposition of Metals
F3213 - 17	Standard for Additive Manufacturing – Finished Part Properties – Standard Specification for Cobalt-28 Chromium-6 Molybdenum via Powder Bed Fusion
F3301 - 18a	Standard for Additive Manufacturing – Post Processing Methods – Standard Specification for Thermal Post-Processing Metal Parts Made Via Powder Bed Fusion
F3302 - 18	Standard for Additive Manufacturing – Finished Part Properties – Standard Specification for Titanium Alloys via Powder Bed Fusion
F3318 - 18	Standard for Additive Manufacturing – Finished Part Properties – Specification for AlSi10Mg with Powder Bed Fusion – Laser Beam
F3434 - 20	Guide for Additive manufacturing – Installation/Operation and Performance Qualification (IQ/OQ/PQ) of Laser-Beam Powder Bed Fusion Equipment for Production Manufacturing
ISO / ASTM52901 - 16	Standard Guide for Additive Manufacturing – General Principles – Requirements for Purchased AM Parts
ISO / ASTM52904 - 19	Additive Manufacturing – Process Characteristics and Performance: Practice for Metal Powder Bed Fusion Process to Meet Critical Applications
ISO / ASTM52903 - 1 - 20	Additive manufacturing — Material extrusion-based additive manufacturing of plastic materials — Part 1: Feedstock materials
ISO / ASTM52903 - 2 - 20	Additive manufacturing — Material extrusion-based additive manufacturing of plastic materials — Part 2: Process equipment

Terminology

Designation	Title
ISO / ASTM52900 - 15	Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology

Test Methods	
Designation	Title
F2971 - 13	Standard Practice for Reporting Data for Test Specimens Prepared by Additive Manufacturing
Test Methods (cont.)	
Designation	Title
F3122 - 14	Standard Guide for Evaluating Mechanical Properties of Metal Materials Made via Additive Manufacturing Processes
ISO / ASTM52902 - 19	Additive manufacturing — Test artifacts — Geometric capability assessment of additive manufacturing systems
ISO / ASTM52921 - 13(2019)	Standard Terminology for Additive Manufacturing— Coordinate Systems and Test Methodologies
ISO / ASTM52907 - 19	Additive manufacturing — Feedstock materials — Methods to characterize metallic powders

Fonte: ISO


Designation	Title
ISO 17296-2:2015	Additive manufacturing — General principles — Part 2: Overview of process categories and feedstock
ISO 17296-3:2014	Additive manufacturing — General principles — Part 3: Main characteristics and corresponding test methods
ISO 27547-1:2010	Plastics — Preparation of test specimens of thermoplastic materials using mouldless technologies — Part 1: General principles, and laser sintering of test specimens
ISO/ASTM 52900:2015	Additive manufacturing — General principles — Terminology
ISO/ASTM 52901:2017	Additive manufacturing — General principles — Requirements for purchased AM parts
ISO/ASTM 52902:2019	Additive manufacturing — Test artifacts — Geometric capability assessment of additive manufacturing systems
ISO/ASTM 52903-1:2020	Additive manufacturing — Material extrusion-based additive manufacturing of plastic materials — Part 1: Feedstock materials
ISO/ASTM 52903-2:2020	Additive manufacturing — Material extrusion-based additive manufacturing of plastic materials — Part 2: Process equipment
ISO/ASTM 52904:2019	Additive manufacturing — Process characteristics and performance — Practice for metal powder bed fusion process to meet critical applications
ISO/ASTM 52907:2019	Additive manufacturing — Feedstock materials — Methods to characterize metal powders
ISO/ASTM 52910:2018	Additive manufacturing — Design — Requirements, guidelines and recommendations


Designation	Title
ISO/ASTM 52911-1:2019	Additive manufacturing — Design — Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals
ISO/ASTM 52911-2:2019	Additive manufacturing — Design — Part 2: Laser-based powder bed fusion of polymers
ISO/ASTM 52915:2020	Specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.2
ISO/ASTM 52921:2013	Standard terminology for additive manufacturing — Coordinate systems and test methodologies
ISO/ASTM 52941:2020	Additive manufacturing — System performance and reliability — Acceptance tests for laser metal powder-bed fusion machines for metallic materials for aerospace application
ISO/ASTM 52942:2020	Additive manufacturing — Qualification principles — Qualifying machine operators of laser metal powder bed fusion machines and equipment used in aerospace applications
ISO/ASTM 52950:2021	Additive manufacturing — General principles — Overview of data processing
ISO/ASTM AWI 52902	Additive manufacturing — Test artifacts — Geometric capability assessment of additive manufacturing systems
ISO/ASTM AWI 52908	Additive manufacturing of metals — Post-processing methods — Quality assurance and post processing of powder bed fusion
ISO/ASTM AWI 52909	Additive manufacturing — Finished part properties — Orientation and location dependence of mechanical properties for metal powder bed fusion
ISO/ASTM AWI 52910	Additive manufacturing — Design — Requirements, guidelines and recommendations
ISO/ASTM AWI 52911-3	Additive manufacturing — Design — Part 3: Electron beam powder bed fusion of metals
ISO/ASTM AWI 52917	Additive manufacturing — Round Robin Testing — Guidance for conducting Round Robin studies
ISO/ASTM AWI 52919-1	Additive manufacturing — Test method of sand mold for metalcasting — Part 1: Mechanical properties
ISO/ASTM AWI 52919-2	Additive manufacturing — Test method of sand mold for metalcasting — Part 2: Physical properties
ISO/ASTM AWI 52928	Additive Manufacturing of Metals — Feedstock Materials — Powder Life Cycle Management
ISO/ASTM AWI 52935	Additive manufacturing — Qualification principles — Qualification of coordinators for metallic parts production
ISO/ASTM AWI 52937	Additive Manufacturing of metals — Qualification principles — Qualification of designers

Designation	Title
ISO/ASTM AWI 52938-1	Additive manufacturing of metals — Environment, health and safety — Part 1: Safety requirements for PBF-LB machines
ISO/ASTM AWI TR 52905	Additive manufacturing of metals — Non-destructive testing and evaluation — Defect detection in parts
ISO/ASTM CD 52916	Additive manufacturing — Data formats — Standard specification for optimized medical image data
ISO/ASTM CD 52920	Additive manufacturing — Qualification principles — Quality requirements for industrial additive manufacturing sites
ISO/ASTM CD 52926-1	Additive manufacturing of metals — Qualification principles — Part 1: General qualification of machine operators
ISO/ASTM CD 52926-2	Additive manufacturing of metals — Qualification principles — Part 2: Qualification of machine operators for PBF-LB
ISO/ASTM CD 52926-3	Additive manufacturing of metals — Qualification principles — Part 3: Qualification of machine operators for PBF-EB
ISO/ASTM CD 52926-4	Additive manufacturing of metals — Qualification principles — Part 4: Qualification of machine operators for DED-LB
ISO/ASTM CD 52926-5	Additive manufacturing of metals — Qualification principles — Part 5: Qualification of machine operators for DED-Arc
ISO/ASTM CD 52931	Additive manufacturing — Environmental health and safety — Standard guideline for use of metallic materials
ISO/ASTM CD 52932	Additive manufacturing — Environmental health and safety — Standard test method for determination of particle emission rates from desktop 3D printers using material extrusion
ISO/ASTM CD 52936-1	Additive manufacturing — Qualification principles — Laser-based powder bed fusion of polymers — Part 1: General principles, preparation of test specimens
ISO/ASTM CD TR 52906	Additive manufacturing — Non-destructive testing — Intentionally seeding flaws in parts
ISO/ASTM CD TR 52918	Additive manufacturing — Data formats — File format support, ecosystem and evolutions
ISO/ASTM DIS 52900	Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary
ISO/ASTM DIS 52921	Additive manufacturing — General principles — Standard practice for part positioning, coordinates and orientation
ISO/ASTM DIS 52924	Additive manufacturing — Qualification principles — Classification of part properties for additive manufacturing of polymer parts

Designation	Title
ISO/ASTM DIS 52925	Additive manufacturing processes — Laser-based powder bed fusion of polymer parts (PBF-LB/P) — Qualification of materials
ISO/ASTM DTS 52930	Additive Manufacturing — Qualification principles — Installation, operation and performance (IQ/OQ/PQ) of PBF-LB equipment
ISO/ASTM TR 52912:2020	Additive manufacturing — Design — Functionally graded additive manufacturing
ISO/ASTM WD 52933	Additive manufacturing — Environment, health and safety — Consideration for the reduction of hazardous substances emitted during the operation of the non-industrial ME type 3D printer in workplaces, and corresponding test method

ANEXO B – RELATÓRIOS DE ENSAIOS E CERTIFICADOS






RADIOGRAPHIC INSPECTION REPORT

Client	Universidade de Coimbra	Rep. N.º	1
Address	-	Rev.	N.º -
Job N.º	-	Page	2/3


Scheme

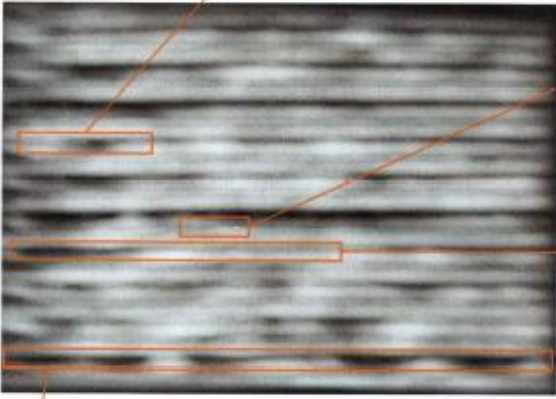
Sample 1

401 - Lack of Fusion




3042 - Copper Inclusions






401 - Lack of Fusion + 2014 - Linear Porosity

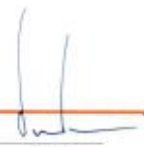


401 - Lack of Fusion



Remark 1: The results refer to the controlled items.

Remark 2: Opinions expressed in this report are not covered by the scope of Accreditation.


 Level 3

ND-RT.009/19

Rua da Indústria Ed.Bulis, Arm.L, Prac.7 Portais, 2830-237 Barreiro; Tel./Fax: 21 207 0814
 Sociedade por Quotas Lda, - Conservatória do Registo Comercial do Barreiro nº 03439 - Pessoa Colectiva 506992659

This Report only cannot be reproduced, unless integrally, without written agreement of Qualend

QUALEND

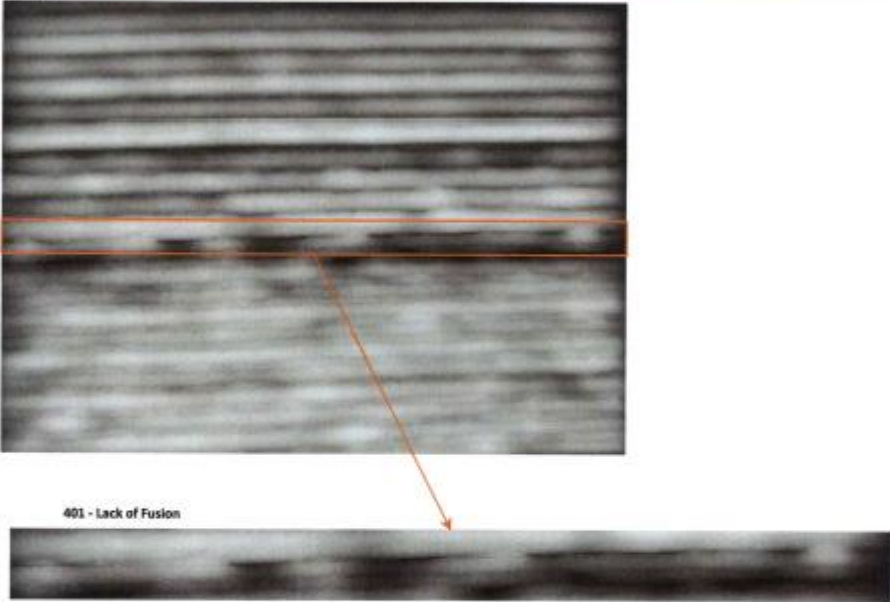
IPAC
accreditação
SISTEMA DE GESTÃO DA QUALIDADE (ENISO 9001)

RADIOGRAPHIC INSPECTION REPORT

Client	Universidade de Coimbra	Rep. N.º	1
Address	-	Rev.	- N.º -
Job N.º	-	Page	3/3

Scheme


Sample 1



401 - Lack of Fusion


This Report only cannot be reproduced, unless integrally, without written agreement of QualEnd

Remark 1: The results refer to the controlled items.
Remark 2: Opinions expressed in this report are not covered by the scope of Accreditation.


Level 3

Rua da Indústria Ed.Bulis, Arm.L, Prac.7 Portais, 2830-237 Barcelos; Tel./Fax: 21 207 0814
Sociedade por Quotas Lda, - Conservatória do Registo Comercial do Barcelos nº 03439 - Pessoa Colectiva 506992659
END-RT.009/19

Ensaio de dureza – Wall WAAM



LABMAT Nº LMAT210774_DUR2

LABMAT - LABORATÓRIO DE MATERIAIS

Tipo de ensaio e norma
 Test type and standard:

BRINELL <input type="checkbox"/> ISO 6506-1: 2014 ⁽¹⁾	VICKERS <input checked="" type="checkbox"/> ISO 6507-1: 2018 <input type="checkbox"/> ASTM E92-17	ROCKWELL <input type="checkbox"/> ISO 6508-1: 2016 <input type="checkbox"/> ASTM E18-19
---	---	---

Condições de Ensaio
 Test Conditions:

Força/Force (kgf)	10	Diâmetro da esfera /ball diameter ⁽²⁾ (mm)	-
-------------------	----	---	---

Escala Rockwell
 Rockwell Scale

A <input type="checkbox"/>	BW <input type="checkbox"/>	C <input type="checkbox"/>	D <input type="checkbox"/>	EW <input type="checkbox"/>	FW <input type="checkbox"/>	GW <input type="checkbox"/>	HW <input type="checkbox"/>	KW <input type="checkbox"/>
15N <input type="checkbox"/>	30N <input type="checkbox"/>	45N <input type="checkbox"/>	15TW <input type="checkbox"/>	30TW <input type="checkbox"/>	45TW <input type="checkbox"/>			

Identificação do equipamento
 Equipment Identification:

BRINELL	<input type="checkbox"/> DUR-0012	<input type="checkbox"/> D0716					
VICKERS	<input type="checkbox"/> DUR-0017	<input type="checkbox"/> DUR-0018	<input checked="" type="checkbox"/> DUR-0026	<input type="checkbox"/> DUR-0029			
ROCKWELL	<input type="checkbox"/> DUR-0003						

Referência da(s) amostra(s)
 Test specimen(s):

Parede (fabrico aditivado)

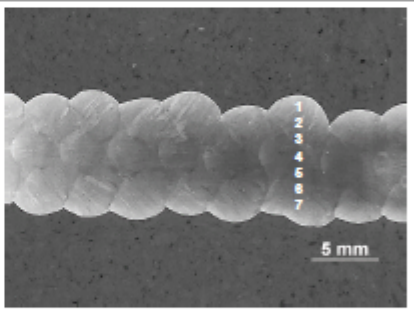
Localização
 Location:

Transversal (ver "Resultados")

Material(s) ⁽³⁾
 Material(s):

AISI 316

RESULTADOS
 RESULTS:

Indentação/ Indentation	Valor de dureza/ Hardness value (HV10)	
1	185	
2	191	
3	194	
4	193	
5	198	
6	195	
7	172	
Média / Average	190	
Incerteza/ Uncertainty ⁽⁴⁾	±12	

COMENTÁRIOS
 COMMENTS#:

-

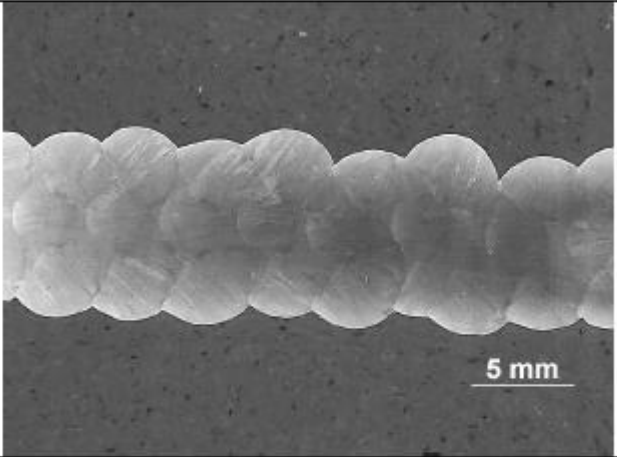
⁽¹⁾ No âmbito da acreditação para 2,5/62,5 HBW. / Within the scope of accreditation to 2,5/62,5 HBW.
⁽²⁾ Quando aplicável. / If applicable.
⁽³⁾ Informação da responsabilidade do cliente / The sole responsibility of this information lies with the client.
⁽⁴⁾ "A incerteza expandida apresentada, está expressa pela incerteza-padrão combinada multiplicada pelo fator de expansão k = 2, o qual corresponde a uma probabilidade de expansão de, aproximadamente 95%". / "The reported expanded measurement uncertainty is stated as the combined standard measurement uncertainty multiplied by the coverage factor k = 2 such that the coverage probability corresponds to approximately 95%."

Pág. 2/2

Macrografia – Wall WAAM

LABMAT Nº LMAT210774_MAC2

LABMAT - LABORATÓRIO DE MATERIAIS

PROCEDIMENTO PROCEDURE	
PE-LABMAT/UMC/16 ¹⁾	
Referência da amostra / Test specimen: ²⁾	
Parede (fabrico aditivado)	
Material / Material: ²⁾	
AISI 316	
Localização / Location:	
Ver Figura 1	
Orientação da secção / Section orientation:	
Transversal	
Método e reagente de contrastação/ Etching method and etchant:	
Electrolítico: ácido oxálico 10%	
Amplicação / Magnification:	
-	
Observação / Observation:	
-	

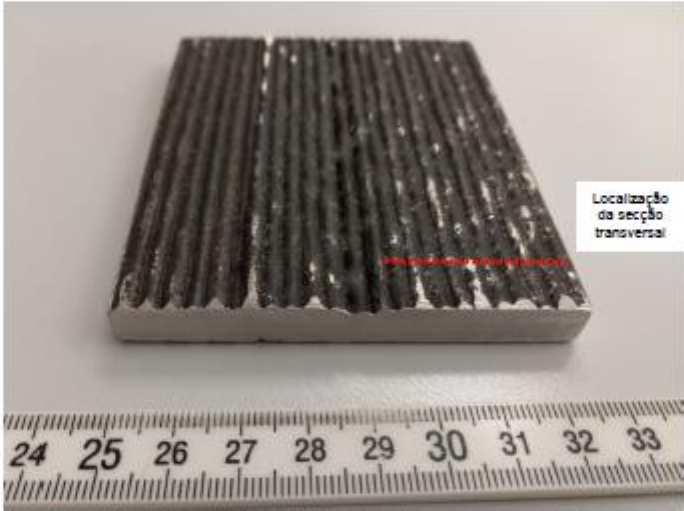



Figura 1 – Imagem ilustrativa da amostra com indicação da localização da secção transversal considerada.

¹⁾ Procedimento técnico interno/ Internal technical procedure.
²⁾ Informação da responsabilidade do cliente / The sole responsibility of this information lies with the client.

Pág. 2/2

Ensaio de dureza – Spider original



LABMAT Nº LMAT210774_DUR1

LABMAT - LABORATÓRIO DE MATERIAIS

Tipo de ensaio e norma
Test type and standard:

BRINELL	VICKERS	ROCKWELL
<input type="checkbox"/> ISO 6506-1: 2014 ^[1]	<input checked="" type="checkbox"/> ISO 6507-1: 2018	<input type="checkbox"/> ISO 6508-1: 2016
	<input type="checkbox"/> ASTM E92-17	<input type="checkbox"/> ASTM E18-19

Condições de Ensaio
Test Conditions:

Força/Force (kgf)	10	Diâmetro da esfera /ball diameter Φ (mm)	-
-------------------	----	---	---

Escala Rockwell
Rockwell Scale:

A <input type="checkbox"/>	BW <input type="checkbox"/>	C <input type="checkbox"/>	D <input type="checkbox"/>	EW <input type="checkbox"/>	FW <input type="checkbox"/>	GW <input type="checkbox"/>	HW <input type="checkbox"/>	KW <input type="checkbox"/>
15N <input type="checkbox"/>	30N <input type="checkbox"/>	45N <input type="checkbox"/>	15TW <input type="checkbox"/>	30TW <input type="checkbox"/>	45TW <input type="checkbox"/>			

Identificação do equipamento
Equipment Identification:

BRINELL	VICKERS	ROCKWELL
<input type="checkbox"/> DUR-0012	<input type="checkbox"/> DUR-0017	<input type="checkbox"/> DUR-0003
<input type="checkbox"/> D0716	<input type="checkbox"/> DUR-0018	<input checked="" type="checkbox"/> DUR-0025
	<input type="checkbox"/> DUR-0026	<input type="checkbox"/> DUR-0029

Referência da(s) amostra(s)
Test specimen(s):

Spider

Localização
Location:

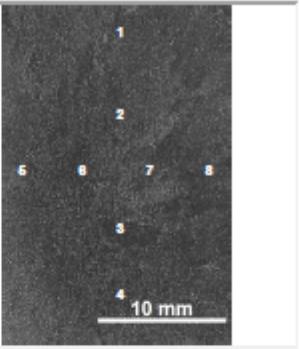
Transversal (ver "Resultados")

Material(s) ^[2]
Material(s):

AISI 316

RESULTADOS
RESULTS:

Indentação/ Indentation	Valor de dureza/ Hardness value (HV10)
1	147
2	144
3	151
4	146
5	154
6	146
7	155
8	146
Media / Average	149
Incerteza/ Uncertainty ^[3]	2,6%



COMENTÁRIOS
COMMENTS#:

-


[1] No âmbito da acreditação para 2.5/62.5 HBW. / Within the scope of accreditation to 2.5/62.5 HBW.
 [2] Quando aplicável. / If applicable.
 [3] Informação da responsabilidade do cliente / The sole responsibility of this information lies with the client.
 [4] "A incerteza expandida apresentada, está expressa pela incerteza-padrão combinada multiplicada pelo fator de expansão k = 2, o qual corresponde a uma probabilidade de expansão de, aproximadamente 95%". / "The reported expanded measurement uncertainty is stated as the combined standard measurement uncertainty multiplied by the coverage factor k = 2 such that the coverage probability corresponds to approximately 95%."

Pág. 2/2

Macrografia – *Spider* original

LABMAT Nº LMAT210774_MAC1

LABMAT - LABORATÓRIO DE MATERIAIS

NORMA STANDARD PE-LABMAT/UMC/16 ¹⁾	
Referência da amostra / Test specimen: ²⁾ Spider	
Material / Material: ²⁾ AISI 316	
Localização / Location: Ver Figura 1	
Orientação da secção / Section orientation: Transversal	
Método e reagente de contrastação/ Etching method and etchant: Eletrolítico: ácido oxálico 10%	
Ampliação / Magnification: -	
Observação / Observation:	

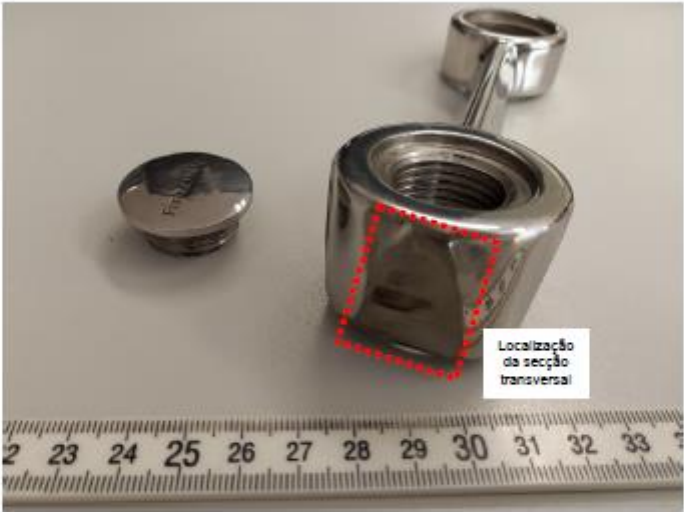



Figura 1 – Imagem ilustrativa da amostra com indicação da localização da secção transversal considerada.

¹⁾ Procedimento técnico interno/ Internal technical procedure.
²⁾ Informação da responsabilidade do cliente / The sole responsibility of this information lies with the client.

Pág. 2/2

Certificado do fio de soldadura



CERTIFICADO DE INSPEÇÃO
INSPECTION CERTIFICATE

Electro Portugal
Customer/Cliente: C0100092-MAQUILUDO-SOCIEDADE MAQUINAS FERRAM

CERTIFICATE NO. /
CERTIFICADO NO.: CQ-E012002417

DATE OF ISSUE /
DATA EMISSÃO: 19/11/2020

Shipment/Expedição: GRC-E012105878

TRADE DESIGNATION / DESIGNAÇÃO	DIAMETER X LENGTH (mm) DÍAMETRO X COMPRIMENTO (mm)	LOT LOTE	APPLICABLE SPECIFICATION AND CLASSIFICATION NORMAS APLICÁVEIS
FIO MIG EUROTROD M316L SI	Ø 1,0 mm	F9914803	AVIS AS 9145 9M; ER 316 LSI ISO 14343-A-19 1Z,3 LSI

1. CHEMICAL COMPOSITIONS OF ALL WELD METAL (wt%) (According to EN 10204-3.1 / ANÁLISE QUÍMICA DO METAL DEPOSITADO (wt%) (de acordo com EN 10204-3.1

ELEMENT / ELEMENTO	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Nb	Be	Bi
WELD METAL / METAL DEPOSITADO	0,0170	0,8100	1,7100	0,0260	0,0060	18,3700	11,2700	2,5600	0,0700	---	---	---	---

2. TENSILE TEST OF ALL WELD METAL (According to EN 10204-2.2

YIELD STRENGTH / TENSÃO DE CEDÊNCIA	TENSILE STRENGTH / TENSÃO DE RUPTURA	ELONGATION / ALONGAMENTO
Minim2	570	GL _{max} - D(%) 41

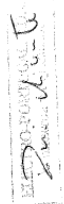
3. CHARPY IMPACT TEST OF WELD METAL (According to EN 10204-2.2

TESTING TEMPERATURE / TEMPERATURA DE TESTE	ABSORBED ENERGY / ENERGIA ABSORVIDA
(°C)	(J)
---	---

Remarks / Observações

WE HEREBY CERTIFY THAT THE TEST RESULTS OF THE ABOVE WELDING MATERIAL ARE UNDER THE REQUIRED RULES.
CERTIFICAMOS QUE OS RESULTADOS DOS TESTES CUMPREM COM AS NORMAS REQUERIDAS.

ELECTRO PORTUGAL
QA Manager
Director Qualidade



CQ-E012002417

Página 1 de 1