



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Emanuel Tavares Bento

**ANÁLISE AO PROCESSO DE FABRICO POR *WIRE-  
ARC ADDITIVE MANUFACTURING***

**PROJETO E REALIZAÇÃO DE UMA PEÇA DE  
COMPROVAÇÃO DE CONCEITO**

**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 pelo Professor Doutor Ricardo Nuno Madeira Soares Branco e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.**

Setembro de 2021



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

**ANÁLISE AO PROCESSO DE FABRICO POR WIRE-  
ARC ADDITIVE MANUFACTURING: *Projeto e  
Realização de uma peça de comprovação de conceito***

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

**ANALYSIS OF THE PRINTING PROCESS BY WIRE-ARC  
ADDITIVE MANUFACTURING: Design and Production of a proof-of-  
concept part**

Autor

**Emanuel Tavares Bento**

Orientadores

**Professor Doutor Joaquim Norberto Cardoso Pires Silva**

**Professor Doutor Ricardo Nuno Madeira Soares Branco**

Júri

Presidente **Professor Doutor João Paulo da Silva Gil Nobre**  
**Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra**

Vogal **Professora Doutora Dulce Maria Esteves Rodrigues**  
**Professora Associada com Agregação à Universidade de Coimbra**

Orientador **Professor Doutor Ricardo Nuno Madeira Soares Branco**  
**Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra**



Esta tese representa o fim dum grande capítulo da minha vida.

Assim, tenho a agradecer àqueles que de alguma forma me ajudaram neste percurso:

Aos **meus pais** que, apesar de todas as dificuldades, tornaram esta jornada possível.

Aos **professores e colegas do DEM** por todo o apoio ao longo dos 5 anos.

... e, em especial:

Ao professor **Norberto Pires** que me orientou ao longo da realização deste trabalho e me deu a oportunidade única de ter contacto direto com a implementação duma nova tecnologia.

Ao professor **Ricardo Branco** que me aconselhou na melhor trajetória a seguir e me auxiliou na escrita desta dissertação.

E, ao **Carlos Zhu**, que partilhou comigo o seu conhecimento e esteve sempre disponível para me ajudar, tendo tornado possível a conclusão desta dissertação.

A todos, um grande obrigado.



## RESUMO

A 4ª Revolução Industrial, que decorre nos tempos atuais, pretende introduzir um conjunto de novas tecnologias no tecido industrial, entre elas, o fabrico aditivo. Este, por sua vez, promete revolucionar os processos produtivos atuais, uma vez que apresenta menores limitações em termos de complexidade geométrica, sendo possível adaptar a peça à respetiva função (em vez de a adaptar às limitações do método produtivo).

Embora o foco inicial do fabrico aditivo tenha sido a implementação nos polímeros, em especial como método de ‘prototipagem rápida’, a classe de materiais com mais destaque na engenharia e indústria em geral é a dos metais, daí o recente interesse nas técnicas *MAM* (*metal additive manufacturing*), em especial as *DED* (*direct energy deposition*), que apresentam maiores taxas de deposição.

No entanto, apesar das suas inúmeras vantagens, estas são técnicas ainda relativamente recentes, que carecem das décadas de conhecimento acumulado que os métodos convencionais possuem, pelo que, na sua maioria, ainda apresentam problemas a nível dimensional e das propriedades mecânicas obtidas, pelo que serão necessários mais estudos.

Entre estas técnicas encontra-se o fabrico aditivo por arco elétrico (ou *WAAM*), a técnica em análise nesta dissertação. Assim, o objetivo deste trabalho é auxiliar no desenvolvimento desta tecnologia, nomeadamente, na análise inicial ao processo e no desenvolvimento duma metodologia que permita usar o sistema desenvolvido para obter peças a partir do respetivo modelo *CAD*.

Esta dissertação é, portanto, composta por uma componente teórica onde é feita uma revisão sobre o fabrico aditivo em geral, a técnica *WAAM*, os sistemas cinemático e de controlo e a metodologia atualmente utilizada; e por uma componente prática onde é apresentado o sistema desenvolvido e, o procedimento experimental e respetivos resultados (ou seja, os problemas encontrados, soluções desenvolvidas e peças produzidas).

**Palavras-chave:** Impressão 3D; Fabrico Aditivo de Metais; Fabrico Aditivo por Soldadura por Arco Elétrico; *GMAW*; *CMT*; Liga de Titânio Ti-6Al-4V; Aço Carbono AWS A5.18 ER70S-6.



## ABSTRACT

The 4<sup>th</sup> Industrial Revolution, which is taking place in current times, intends to introduce a set of new technologies into the manufacturing industry, one of them being 3D printing (or additive manufacturing). This, in turn, promises to revolutionize current production processes since it has fewer limitations in terms of geometric complexity, making it possible to adapt the part produced to its respective function (instead of adapting it to the limitations of the production method).

Although its initial intent was to be implemented as a ‘rapid prototyping’ method to produce polymeric parts, the most prominent class of materials in engineering and industry in general are metals, hence the recent interest in MAM (metal additive manufacturing) techniques, in particular the ones classified under the DED (direct energy deposition) category, which have the highest deposition rates.

However, despite their numerous advantages, these techniques are still relatively recent, lacking the decades of accumulated knowledge that conventional methods have. For that reason, they still present problems in terms of dimensional and mechanical properties, demonstrating the need for more studies to be performed.

Among these techniques, wire-arc additive manufacturing (WAAM) is the method under analysis in this dissertation. Thus, the objective of this work is to assist in the development of this technology, namely, in the initial analysis of the process and in the development of a methodology that allows for the use of the system developed as a way to obtain parts from its CAD (computer-aided manufacturing) model.

Therefore, this dissertation is composed of a theoretical part where a review is made about additive manufacturing in general, the WAAM technique, the kinematic and control systems and the methodology currently used, and by a practical part where the developed system and experimental procedure (problems found, solutions developed, and parts produced) are presented.

**Keywords:** 3D Printing; Metal Additive Manufacturing (MAM); Wire-Arc Additive Manufacturing (WAAM); Gas Metal Arc Welding (GMAW); Cold Metal Transfer (CMT); Titanium Ti-6Al-4V; Carbon Steel AWS A5.18 ER70S-6.



---

## ÍNDICE

|  |      |
|--|------|
| ÍNDICE DE FIGURAS .....  | vii  |
| ÍNDICE DE TABELAS .....  | xi   |
| SIGLAS .....   | xiii |
| 1. INTRODUÇÃO.....   | 1    |
| 1.1. ENQUADRAMENTO.....  | 1    |
| 1.2. OBJETIVOS E MOTIVAÇÕES .....                                  | 2    |
| 1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....                                 | 4    |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                                     | 5    |
| 2.1. FABRICO ADITIVO .....   | 5    |
| 2.1.1. Introdução: Definição e História .....                      | 5    |
| 2.1.2. Motivações: Vantagens e Desvantagens.....                   | 6    |
| 2.1.3. Áreas de Aplicação .....                                    | 7    |
| 2.1.4. Diferentes Técnicas <i>MAM</i> .....                        | 8    |
| 2.2. <i>WIRE-ARC ADDITIVE MANUFACTURING (WAAM)</i> .....           | 11   |
| 2.2.1. Introdução: Definição, História e Motivação .....           | 11   |
| 2.2.2. Variantes da Técnica <i>WAAM</i> .....                      | 13   |
| 2.2.3. Parâmetros do Processo .....                                | 14   |
| 2.2.4. Problemas e Desafios .....                                  | 18   |
| 2.2.5. Soluções propostas para os problemas apresentados.....      | 22   |
| 2.3. <i>COLD METAL TRANSFER</i> APLICADO AO TI-6AL-4V .....        | 26   |
| 2.3.1. O Processo: <i>Cold Metal Transfer (CMT)</i> .....          | 26   |
| 2.3.2. O Material: Liga de Titânio (Ti-6Al-4V) .....               | 28   |
| 2.3.3. Revisão de Artigos de Investigação: <i>CMT</i> + Ti64 ..... | 30   |
| 2.4. SISTEMA E PROCESSO DE IMPRESSÃO .....                         | 32   |
| 2.4.1. Fases do Processo de Impressão .....                        | 32   |
| 2.4.2. Sistema de Monitorização e Controlo .....                   | 34   |
| 3. SISTEMA: COMPOSIÇÃO E FUNCIONAMENTO .....                       | 37   |
| 4. MATERIAIS, MÉTODOS E RESULTADOS.....                            | 43   |

|  |    |
|--|----|
| 4.1. MATERIAL: FIO, SUBSTRATO E GÁS DE PROTEÇÃO..... | 43 |
| 4.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E RESULTADOS.....     | 44 |
| 4.2.1. Peça nº1 (Tubos interconectados) .....        | 48 |
| 4.2.2. Peça nº2 .....                                | 55 |
| 5. CONCLUSÕES.....                                   | 57 |
| 5.1. TRABALHOS FUTUROS .....                         | 58 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                     | 61 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1. Exemplo das juntas complexas e de grandes dimensões utilizadas em construção civil [2], cujo projeto onde esta dissertação se engloba (AMConstruction) pretende substituir – em vez de serem produzidas pela ligação de múltiplos componentes, é impressa numa única peça. ....   | 2  |
| Figura 2.1. À esquerda, quota do mercado <i>AM</i> para cada área de aplicação, adaptado de [4], e; à direita, crescimento anual do mercado <i>AM</i> (2013-2021) [13]. ....  | 7  |
| Figura 2.2. Classificação dos processos <i>AM</i> de acordo com a norma EN ISO/ASTM 52921 (2015), com a respetiva separação entre processos diretos e indiretos <i>MAM</i> [6]. ..  | 9  |
| Figura 2.3. Representação esquemática de diversas técnicas <i>direct MAM</i> : (a) <i>BJ</i> ; (b) <i>SL</i> ; (c) <i>L-PBF</i> ; (d) <i>EB-PBF</i> [6]. ....   | 10 |
| Figura 2.4. Representação esquemática das técnicas <i>DED</i> : (a) <i>L-DED</i> ; (b) <i>EB-DED</i> ; (c) <i>WAAM</i> [6]. ....  | 11 |
| Figura 2.5. Representação esquemática do processo <i>WAAM</i> [20] com os dois tipos de sistemas cinemáticos possíveis para a movimentação da tocha: a) robô manipulável [22], e; b) ‘ <i>gantry machine</i> ’. ....  | 12 |
| Figura 2.6. Comparação de diferentes propriedades do processo <i>WAAM</i> (a amarelo) com outras técnicas <i>MAM</i> [25]. ....   | 13 |
| Figura 2.7. Representação esquemática das técnicas <i>WAAM</i> : (a) <i>GMAW</i> ; (b) <i>GTAW</i> , e; (c) <i>PAW</i> [6]. ....  | 14 |
| Figura 2.8. (a) Resultados do estudo feito por Raven Reisch <i>et al.</i> onde se pode verificar o efeito de diferentes orientações da tocha na geometria dos cordões depositados [9], e; (b) Resultados do estudo feito por Jiankang Huang <i>et al.</i> com cordões para diferentes estratégias de deposição ( <i>SD</i> e <i>RD</i> ) [8]. ....  | 17 |
| Figura 2.9. Diferentes padrões para a trajetória de impressão das zonas maciças [28]. ....  | 18 |
| Figura 2.10. Exemplos de equipamentos comerciais com a técnica <i>WAAM</i> : (a) ARCEMY <sup>®</sup> da AML3D <sup>®</sup> [30]; (b) M1 <sup>®</sup> <i>System</i> da MX3D <sup>®</sup> [32]; (c) sistema desenvolvido pela BMA <sup>®</sup> ( <i>Big Metal Additive</i> ) [31] / e, híbridos ( <i>WAAM</i> + métodos subtrativos): (d) VARIAXIS j-600AM <sup>®</sup> da MAZAK <sup>®</sup> [33], e; (e) projeto LASIMM <sup>®</sup> [36]. .... | 21 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.11. Exemplos de peças produzidas por <i>WAAM</i> : (a) Hélice de navio produzida pela RAMLAB® [34]; (b) Ponte em aço (com 12 metros e 4500 kg) produzida pela MX3D® e instalada num canal, no centro de Amesterdão; (c) ‘ <i>Thales Alenia Space pressure vessel</i> ’ produzido em titânio pela WAAM3D® (permitindo usar 30 vezes menos matéria-prima) [37], e; (d) braço dum robô ABB®, otimizado de forma a conter apenas ½ da massa inicial e, produzido pela MX3D® [32]..... | 21 |
| Figura 2.12. Esquema das soluções propostas: (a) <i>Matriz manufacturing strategy</i> [19]; (b) <i>Surface rolling</i> [6]; (c) <i>Shot peening</i> [6], e; (d) <i>Hot forging</i> [11].....   | 24 |
| Figura 2.13. Esquema do <i>HM (WAAM + maquinagem)</i> : (a) Maquinagem posterior à impressão para remoção do efeito <i>staircase</i> ; (b) Maquinagem ao longo do processo de impressão [6].....   | 26 |
| Figura 2.14. Representação esquemática do modo de transferência por curto-circuito ( <i>CMT</i> ) [41].....  | 27 |
| Figura 2.15. Sistema de soldadura da Fronius® com os componentes que permitem o modo <i>CMT</i> [44] (o ‘ <i>wire buffer</i> ’ é a zona de amortecimento que permite a rápida alternância na direção de alimentação do fio [45]). .....  | 28 |
| Figura 2.16. (a) Diagrama de fases do Ti-6Al-4V, e; (b) Diagrama com a transformação de fases de acordo com a velocidade de arrefecimento [14]. .....  | 29 |
| Figura 2.17. Valores de resistência à tração ( <i>UTS</i> ), tensão de cedência ( <i>YS</i> ) e deformação ( <i>el</i> ) para diferentes microestruturas da liga Ti-6Al-4V [14].....   | 30 |
| Figura 2.18. Fases do processo <i>WAAM</i> : a verde, o planeamento do processo; a azul, o processo de fabrico, e; a laranja, os possíveis pós-processamentos.....   | 32 |
| Figura 2.19. Exemplos de componentes sujeitos a <i>topology optimization</i> – peça original e otimizada: (a) Braço robótico (fabricado por moldação em areia, cujos moldes são obtidos por <i>AM</i> ) [54]; Suporte estrutural: (b) [55] e (c) [56], e; (d) ‘ <i>Sentinel-1b Satellite antenna bracket</i> ’ [57].....   | 33 |
| Figura 2.20. Funcionamento ‘idealizado’ duma estação de monitorização e controlo <i>in-the-loop</i> [24].....  | 36 |
| Figura 3.1. ‘Sistema real’ desenvolvido para o fabrico aditivo por <i>CMT</i> , composto pelos sistemas cinemático (1-3), de soldadura (4) e componentes auxiliares (5-8). .....   | 37 |
| Figura 3.2. À esquerda, ‘ <i>digital twin</i> ’ do sistema desenvolvido, e; à direita, o ‘sistema real’ em fase idêntica de fabrico.....   | 38 |

---

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.3. <i>APP</i> desenvolvida para controlar o sistema de impressão (real e virtual). .....   | 39 |
| Figura 3.4. Conceito do Projeto ‘AMConstruction’ onde este trabalho se engloba, com a representação das diferentes fases/estações a serem disponibilizadas no sistema [59]. .....                                     | 42 |
| Figura 4.1. (a) Parede com 480x300x6mm, e; (b) Cilindro oco com Ø140x500x6mm.....   | 45 |
| Figura 4.2. Primeira peça com <i>overhang angles</i> e respetivo modelo <i>CAD</i> . .....  | 46 |
| Figura 4.3. Modelo <i>CAD</i> da peça fabricada e diferença na orientação da tocha tendo em conta os diferentes <i>overhang angles</i> (zonas 100% sobrepostas vs. zonas com inclinação). .....                       | 47 |
| Figura 4.4. <i>Frames</i> da sequência de impressão da primeira peça com <i>overhang angles</i> cuja impressão foi bem-sucedida (tempo de impressão: ±75 minutos). .....  | 47 |
| Figura 4.5. Cilindro (oco) inclinado: (a) peça segundos após o fim da impressão, e; (b) peça após limpeza da superfície. ....   | 47 |
| Figura 4.6. Modelo <i>CAD</i> da peça nº1: (a) vista com cotas (em milímetros), e; (b) outras vistas – normal e com secções internas. ....  | 48 |
| Figura 4.7. (a) Aplicação desenvolvida para adaptar o Slic3r® à impressão de metais; (b) <i>slicing</i> da peça nº1 (no Slic3r®), e; (c) G-code gerado.....   | 49 |
| Figura 4.8. <i>Slicing</i> das camadas 15, 16 e 17, com ênfase na trajetória da camada 15 onde se vêem possíveis problemas com a trajetória.....  | 50 |
| Figura 4.9. Programa desenvolvido em C# para editar o <i>G-code</i> (selecionada a camada 15 onde se verifica a necessidade de corrigir certos pontos da trajetória, onde esta não está completa). .....              | 51 |
| Figura 4.10. (a) Separador da <i>APP</i> que permite converter o G-code em código legível pelo controlador ABB® e, ficheiros gerados: (b) ficheiro com todos os pontos, e (c) ficheiro com os parâmetros globais..... | 52 |
| Figura 4.11. Separador da <i>APP</i> que permite indicar o <i>IP</i> do sistema ao qual estará ligado, definir as coordenadas iniciais de impressão, entre outros. ....   | 53 |
| Figura 4.12. Separador da <i>APP</i> que permite controlar e verificar o progresso da impressão. ....   | 54 |
| Figura 4.13. (a) Impressão da zona crucial da peça (união dos dois tubos); (b) Peça, momentos após impressão, e; (c) Peça final após separação do substrato. ....   | 55 |

Figura 4.14. Modelo *CAD* da peça nº2: (a) vista com cotas (em milímetros) e; (b) vista com secções internas..... 55

Figura 4.15. (a) 1ª tentativa de impressão, onde se verificaram problemas de ligação. Peça final: (b) momentos após a impressão, e; (c) após separação do substrato..... 56

---

## ÍNDICE DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 2.1. Tabela resumo dos artigos de investigação com os parâmetros utilizados.....   | 30 |
| Tabela 2.2. Tabela resumo com os resultados obtidos para o conjunto de parâmetros acima apresentados. ....  | 31 |
| Tabela 2.3. Propriedades mecânicas obtidas por métodos convencionais para a liga Ti64.  | 31 |
| Tabela 4.1. Requisitos da <i>AWS</i> para a composição elementar (em %wt.) do aço A5.18 ER70S-6 [64].....   | 43 |
| Tabela 4.2. Conjunto de parâmetros para o processo de soldadura <i>GMAW</i> pelo modo de transferência por curto-circuito, sugeridos por diferentes fornecedores para um fio de AWS A5.18 ER70S-6 com um diâmetro de $\pm 1$ mm. .... | 44 |
| Tabela 4.3. Conjunto de parâmetros de soldadura obtidos a partir do processo de otimização inicial. ....  | 45 |



---

## **SIGLAS**

*AM – additive manufacturing*

*AWS - American Welding Society*

*BJ – binder jetting*

*CAD – computer-aided design*

*CAM – computer-aided manufacturing*

*CEMMPRE – Centre for Mechanical Engineering, Materials and Processes*

*CMT – cold metal transfer*

*CR – cooling rate*

*CT – cooling time*

*DED – direct energy deposition*

*EB-DED – electron beam direct energy deposition*

*EB-PBF – electron beam powder bed fusion*

*el - elongation*

*FDM – fused deposition modelling*

*GMAW – gas metal arc welding*

*GTAW – gas tungsten arc welding*

*HM – hybrid manufacturing*

*ISISE – Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering*

*L-DED – laser direct energy deposition*

*L-PBF – laser powder bed fusion*

*MAM – metal additive manufacturing*

*MIG/MAG – metal inert gas/ metal active gas*

*PAW – plasma arc welding*

*PBF – powder bed fusion*

*RD – reverse direction*

*SD – same direction*

*SL – sheet lamination*

*SLA – stereolithography*

*SP – shot peening*

*SR – surface rolling*

*TCP – transmission control protocol*

*TIG – tungsten inert gas*

*TS – travel speed*

*UDP – user datagram protocol*

*UTS – ultimate tensile strength*

*WAAM – wire-arc additive manufacturing*

*WFR – wire feed rate*

*YS – yield strength*

---

*GMAW* (designação americana) e *MIG/MAG* (designação europeia) representam a mesma técnica, no entanto a primeira é mais usada nas referências bibliográficas analisadas, pelo que se optou por usar a mesma (*GMAW*) ao longo de todo o trabalho.

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. ENQUADRAMENTO

Desde o início da história da humanidade que o homem tem procurado melhorar a forma como obtém o que consome. Este esforço evolutivo permitiu-lhe, numa primeira fase, passar de uma sociedade caçadora-coletora para uma sociedade produtiva, permitindo libertar a mente humana que, com mais tempo para pensar, se dedicou à procura de fazer mais e melhor, o que possibilitou o surgimento e desenvolvimento das várias artes e, mais tarde, das ciências. Estas, quando implementadas, permitiram o surgimento de novos métodos produtivos que, por sua vez, melhoraram drasticamente a forma como se produz e, conseqüentemente, as condições de vida da sociedade em geral.

O contínuo aumento populacional levou a que as necessidades produtivas aumentassem, criando pressão para que se otimizassem os processos produtivos existentes e se desenvolvessem novas técnicas de fabrico mais eficientes. Embora este seja um percurso provavelmente tão antigo quanto o próprio Homem, a História marca o início da 1ª Revolução Industrial apenas nos finais do século 18, quando se passou duma produção predominantemente manual para a dominância das máquinas a vapor e, com elas, a criação dum novo conceito: as fábricas. Um século depois deu-se a 2ª Revolução, com a eletrificação das mesmas e a implementação das *assembly lines*, conceito popularizado por Henry Ford, que permitiu a produção em massa. Já a 3ª Revolução Industrial remonta à segunda metade do século 20 e é comumente denominada de ‘Revolução Digital’; esta surgiu com a incorporação da eletrónica, computação e telecomunicações nos sistemas mecânicos existentes, criando-se outro novo conceito: o de automação industrial.

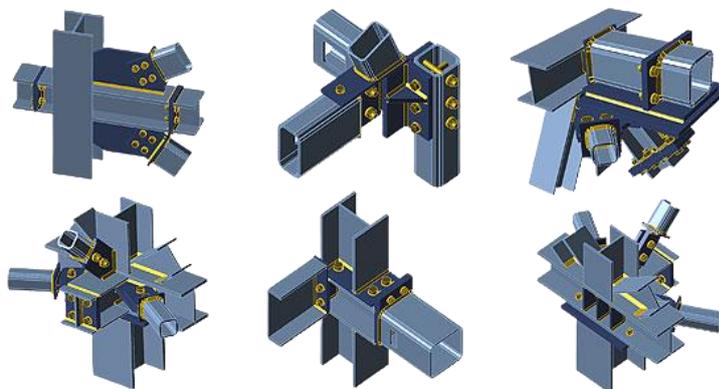
Por fim, a 4ª Revolução Industrial, que decorre nos tempos atuais, tem em conta o surgimento da internet e pretende aumentar a conectividade entre todas as máquinas dum sistema produtivo, eliminando as barreiras entre o físico e o digital, para assim reduzir ineficiências. Nesta revolução incluem-se grandes setores como a Análise de Dados, Robôs Autónomos, Simulação em Ambiente Virtual, Realidade Aumentada, Fabrico Aditivo, etc... [1]. Assim, o projeto onde o tema desta dissertação se engloba pretende fazer parte desta

revolução através do desenvolvimento dum sistema que incorpora não só o fabrico aditivo, como a automação dos componentes robóticos, a simulação prévia em ambiente virtual e a análise de dados com auxílio de inteligência artificial para otimizar o processo produtivo, conforme o conceito introduzido na **Figura 3.4**.

## 1.2. OBJETIVOS E MOTIVAÇÕES

O ‘fabrico aditivo por soldadura por arco elétrico’ (ou *wire-arc additive manufacturing (WAAM)*) realizado com recurso a sistema robótico é um processo produtivo relativamente recente que apresenta um grande potencial relativamente aos métodos tradicionais e outras técnicas de fabrico aditivo, por ser capaz de produzir componentes densos e funcionais, com elevadas taxas de deposição, uma elevada eficiência energética, baixo custo e uma baixa pegada carbónica. No entanto, este apresenta alguns problemas, uma vez que existe um conjunto de defeitos inerentes ao processo produtivo derivados da alta quantidade de calor gerado pelo mesmo. Para resolver esses problemas foram desenvolvidas várias soluções, entre elas, a técnica em análise nesta dissertação: o *cold metal transfer (CMT)*.

Esta é, portanto, uma técnica com uma vasta gama de aplicações, podendo ser usada na metalomecânica em geral onde os aços são o material de eleição, ou na engenharia de alta *performance* onde se dá preferência a metais como as ligas de titânio, que apresentam uma excelente relação resistência-peso. Desta forma, quando combinados com os processos *WAAM*, estes materiais tem o potencial de (a curto prazo) virem a permitir obter componentes críticos para indústrias como a aeroespacial, automóvel, biomédica e militar, ou estrutural, civil, etc...



**Figura 1.1.** Exemplo das juntas complexas e de grandes dimensões utilizadas em construção civil [2], cujo projeto onde esta dissertação se engloba (AMConstruction) pretende substituir – em vez de serem produzidas pela ligação de múltiplos componentes, é impressa numa única peça.

No entanto, para que esta possa ser usada como o processo de fabrico preferencial para a produção de pequenas séries de peças de elevada complexidade geométrica, será necessário desenvolver o sistema de fabrico:

(1) seja, pela análise das propriedades mecânicas obtidas e respetiva relação com os parâmetros de soldadura utilizados, de forma a otimizá-los, mitigando os defeitos inerentes ao processo (como a baixa precisão dimensional, alta rugosidade superficial e defeitos internos);

(2) seja, pelo desenvolvimento do sistema de controlo de forma a tornar o processo de fabrico autónomo (independente dum operador).

Assim, o objetivo deste trabalho será ajudar no desenvolvimento desta nova tecnologia/processo de fabrico de forma a aproveitar as suas vantagens, eliminando ou mitigando os problemas associados à mesma. Para isso, será realizada uma análise ao processo inicial de implementação do sistema, às fases de preparação da impressão e à própria impressão, no sentido de se desenvolver uma metodologia que permita usar o sistema desenvolvido para imprimir peças a partir do respetivo ficheiro *CAD*. Para trabalhos futuros fica a necessidade de se realizarem análises às propriedades mecânicas, microestruturais e dimensionais das peças fabricadas, comparando-as com os valores obtidos por outros métodos produtivos (tanto métodos convencionais como outras técnicas de fabrico aditivo).

Embora este processo tenha sido inicialmente preparado para o estudo dum material de alta *performance*, a liga de titânio Ti-6Al-4V, por atrasos na implementação do processo, dificuldades na acessibilidade do material, entre outros, foi necessário reconsiderar os objetivos desta dissertação, tendo-se optado por fazer a análise dum material já disponível: um aço-carbono [3]. Assim, a análise inicial do método produtivo usando um aço como material de deposição deverá permitir verificar a viabilidade do processo para aplicações na indústria geral (por exemplo, estrutural ou civil); no entanto, uma vez que as vantagens do fabrico aditivo tornam este processo bastante atrativo para as indústrias de alta *performance*, daí os extensivos estudos realizados pelos mesmos na matéria, apesar das limitações no acesso ao material, optou-se por manter o estudo realizado à liga de titânio uma vez que este poderá ser usado para trabalhos futuros de forma a comprovar a aplicabilidade do método produtivo também nas indústrias de alta *performance* (como a aeroespacial).

### 1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Assim, esta dissertação está dividida em 5 capítulos:

- O capítulo 1 – “INTRODUÇÃO” –, aqui apresentado, funciona como elemento introdutor da dissertação, onde se apresenta o tema em análise, os motivos do seu estudo e os objetivos deste trabalho.

- No capítulo 2 – “REVISÃO BIBLIOGRÁFICA” –, é realizada uma breve exposição do tema em análise, nomeadamente: **(1)** o fabrico aditivo em geral; **(2)** a técnica *WAAM*, com os desafios apresentados pela mesma e soluções encontradas por diferentes autores; **(3)** a variante *CMT*; **(4)** uma análise da liga de titânio e uma síntese de artigos de investigação: *CMT+Ti64*, com conjunto de parâmetros usados e propriedades mecânicas obtidas, e; **(5)** a componente robótica.

- No capítulo 3 – “SISTEMA: COMPOSIÇÃO E FUNCIONAMENTO” – faz-se a apresentação do sistema de impressão, ou seja, apresenta-se a lista dos componentes físicos que o compõem e descreve-se o *software* desenvolvido para os controlar.

- No capítulo 4 apresentam-se os “MATERIAIS, MÉTODOS E RESULTADOS”, nomeadamente, introduzem-se os materiais usados (fio, substrato e gás de proteção), o procedimento experimental (ou seja, as fases de preparação da impressão, dificuldades encontradas durante a mesma e soluções implementadas) e, as peças impressas.

- Por fim, no capítulo 5 apresentam-se as “CONCLUSÕES” do trabalho, nomeadamente, os problemas encontrados, sugestões de alterações ao sistema ou modo de impressão e, propostas de trabalhos futuros para melhor desenvolver o tema.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será realizada uma revisão do estado da arte sobre fabrico aditivo em geral, nomeadamente o que o distingue dos métodos convencionais, a sua história e, respetivas vantagens e desvantagens, assim como as áreas onde é atualmente utilizado e os diferentes tipos de técnicas existentes.

Após a abordagem introdutória ao tema, será realizada uma análise ao processo *WAAM*, nomeadamente ao nível das suas características diferenciadoras, história, vantagens e desvantagens, parâmetros do processo e, problemas encontrados e soluções desenvolvidas por outros autores para os resolver.

Numa terceira fase será feita uma análise mais focada no tema desta dissertação, passando pela introdução da variante em estudo: *CMT*, da liga de titânio: Ti-6Al-4V e, por uma análise dos parâmetros utilizados e propriedades mecânicas obtidas por outros autores para a impressão de peças para esta liga e processo em específico.

Por fim, será feita uma introdução à componente robótica do trabalho, nomeadamente, uma apresentação das fases de preparação da impressão e, dum sistema ainda em fase de desenvolvimento que pretende automatizar todo o processo de seleção dos parâmetros iniciais e sua variação durante o fabrico dos componentes.

### 2.1. FABRICO ADITIVO

#### 2.1.1. Introdução: Definição e História

O fabrico aditivo, ou do inglês: *additive manufacturing (AM)*, é definido pela norma ASTM Standard F2792 como um processo produtivo que, ao contrário dos processos subtrativos tradicionais (como a maquinagem), permite a formação direta de peças por um processo de impressão camada a camada a partir dum modelo *CAD 3D* inicial [4].

O seu estudo teve início na década de 80 com o desenvolvimento de novas técnicas que permitiram a obtenção de peças 3D em plástico, num método que ficou conhecido por ‘prototipagem rápida’ [5]. Em 1981, Hideo Kodama apresentou um processo que permitia produzir objetos 3D através do endurecimento dum líquido polimérico

utilizando luzes ultravioleta. Por sua vez, em 1990 Charles Hull introduziu uma técnica denominada de *stereolithography (SLA)* e, em 1991, Scott Crump apresentou o *fused deposition modelling (FDM)*, também elas técnicas capazes de produzir objetos poliméricos tridimensionais num processo de impressão camada a camada usando uma fonte térmica localizada. No entanto, foi só em 1993, com o desenvolvimento do *binder jetting (BJ)* por Ely Sachs *et al.*, que o fabrico aditivo foi aplicado ao grupo dos metais [6].

### **2.1.2. Motivações: Vantagens e Desvantagens**

Estas e outras técnicas de fabrico aditivo, nomeadamente, de fabrico aditivo de metais ou *metal additive manufacturing (MAM)*, tem sido alvo de grande estudo [7] e atraído bastante atenção no meio industrial [8] devido às inúmeras vantagens que as mesmas apresentam relativamente aos processos tradicionais (por exemplo, técnicas subtrativas).

Por um lado, uma vez que nos processos subtrativos se começa com um bloco inicial procedendo-se à remoção das partes não relevantes e no fabrico aditivo se faz o oposto, ou seja, apenas se imprimem as partes que de facto compõem a peça, obtendo-se uma estrutura *near-net-shape* [9], é possível diminuir os desperdícios de matéria-prima e o consumo energético, ambos fatores importantes tanto na redução do impacto ambiental do processo produtivo como no custo final da peça [4], [10].

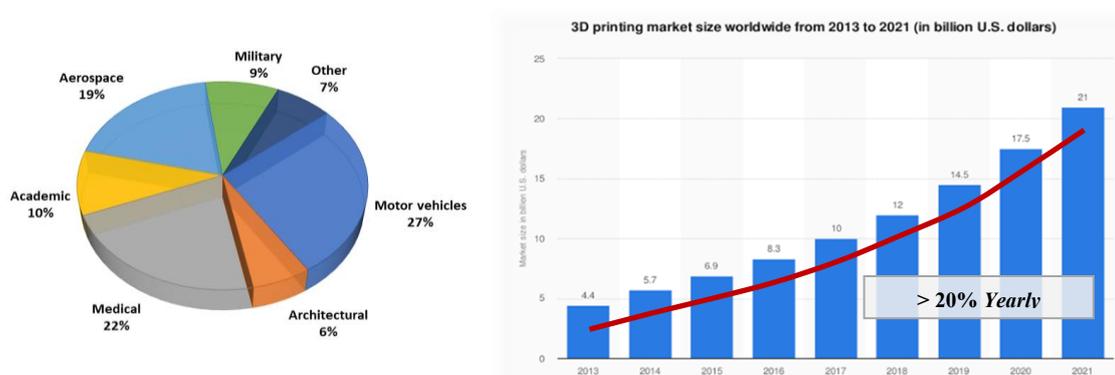
Por outro, é possível obterem-se peças com uma maior complexidade geométrica [11], peças essas impossíveis de obter pelos métodos tradicionais, ou de muito difícil obtenção, onde seriam necessários longos ciclos de maquinagem ou mesmo a produção de subpartes e a realização da respetiva montagem [4], [10]. A maior flexibilidade geométrica permite ainda que os componentes desenvolvidos sejam desenhados de forma a melhor se adaptarem à sua função: um exemplo disso é o desenvolvimento de moldes de injeção, onde a geometria dos canais de refrigeração deixa de estar limitada pelo acesso das ferramentas de maquinagem e passa a poder ser otimizada (com trajetórias não lineares), de modo a permitir uma refrigeração mais rápida e uniforme [12].

Há ainda que ter em conta outras vantagens como: a capacidade de redução do tempo de produção [10], fator particularmente relevante quando comparado com o tempo de processamento na maquinagem de peças de grande complexidade geométrica em ligas duras, e; a capacidade de produzir peças sem a necessidade de moldes [7], essencial para a produção de protótipos, peças únicas ou pequenos lotes, de forma económica.

No entanto, o fabrico aditivo também apresenta algumas desvantagens relativamente aos métodos tradicionais, nomeadamente, limitações ao nível do tamanho do lote e do tamanho máximo das peças produzidas [4]. Para além disso, dependendo do processo usado, da fonte de calor, do material e do grau de otimização dos parâmetros utilizados, estas também podem apresentar problemas a nível estrutural, seja defeitos internos, tensões residuais, rugosidade excessiva, etc.; problemas esses que afetam a qualidade final da peça, seja ao nível das propriedades mecânicas, tolerâncias dimensionais ou aspeto visual [6], [8], daí o estudo intensivo que tem sido realizado na análise destes novos processos produtivos.

### 2.1.3. Áreas de Aplicação

Por estas razões, o uso do fabrico aditivo como alternativa aos processos tradicionais tem-se disseminado em indústrias tão importantes como a aeroespacial, automóvel e biomédica (e, em menor relevo, na arquitetura e setor da defesa, etc.) [4] – conforme se pode verificar na **Figura 2.1**, já que estes três setores representam quase 70% do mercado *AM*.



**Figura 2.1.** À esquerda, quota do mercado AM para cada área de aplicação, adaptado de [4], e; à direita, crescimento anual do mercado AM (2013-2021) [13].

No setor aeroespacial o principal objetivo é obter componentes com uma alta resistência específica<sup>1</sup> uma vez que desta forma será possível obter peças mais leves para realizar a mesma função, permitindo reduzir o consumo de combustível e, conseqüentemente, as emissões poluentes. Neste caso, o fabrico aditivo é particularmente vantajoso uma vez que a falta de restrições geométricas permite eliminar toda a massa não relevante para a função do componente [4].

<sup>1</sup> resistência específica (ou '*force-to-weight ratio*'): relação entre a resistência mecânica e a massa total da peça.

Outro fator com elevada relevância para o setor aeroespacial é o *buy-to-fly ratio*<sup>2</sup>, uma vez que este está diretamente relacionado com o desperdício de matéria-prima (muito importante para metais de alto custo, como o titânio). Também neste fator o fabrico aditivo se destaca, uma vez que, por exemplo, para um componente aeroespacial em titânio é possível obter rácios entre 3-12:1, em *AM*, muito inferiores aos 12-25:1, dos métodos subtrativos [14].

Na indústria automóvel o fabrico aditivo tem objetivo idêntico ao do setor aeroespacial, ou seja, reduzir a massa dos componentes para diminuir o consumo de combustível e as emissões de CO<sub>2</sub>. No entanto, o seu interesse vai mais longe, sendo que o mesmo já está a ser analisado para a produção de estruturas ocas, como tubos de escape, uma vez que permitiria simplificar o seu processo produtivo.

Por sua vez, na medicina, o fabrico aditivo é particularmente relevante na obtenção de peças de acordo com as especificações do paciente, ou seja, este permite uma fácil customização de implantes dentários e ortopédicos, próteses, e outros aparelhos biomédicos e ferramentas cirúrgicas [4].

Portanto, este é um método que não só permitirá obter 'protótipos rápidos', utilizados para a verificação do *design* dum componente, encaixe com outras peças ou análise da sua *performance* em condições reais (permitindo acelerar o processo de projeto e aperfeiçoamento do *design*), como permitirá obter peças estéticas, ferramentas industriais e peças funcionais, onde boas propriedades mecânicas são essenciais [15].

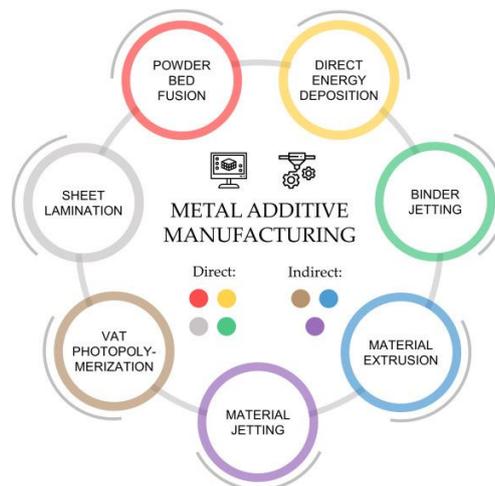
#### **2.1.4. Diferentes Técnicas MAM**

A norma EN ISO/ASTM 52921 divide os processos de fabrico aditivo em 7 categorias diferentes, conforme **Figura 2.2.**, sendo que apenas 4 delas são usadas como processo produtivo direto de peças metálicas: o *binder jetting*, *powder bed fusion*, *sheet lamination* e *direct energy deposition*; já as restantes são usadas noutras classes de materiais, como polímeros ou cerâmicos, ou como um processo indireto no fabrico de metais [6].

Uma vez que o processo em análise nesta dissertação (*WAAM*) é uma técnica de fabrico direto de metais, apenas será realizada uma análise comparativa das técnicas *direct MAM*.

---

<sup>2</sup> *buy-to-fly ratio*: relação entre a massa de matéria-prima usada e a massa final do componente.



**Figura 2.2.** Classificação dos processos AM de acordo com a norma EN ISO/ASTM 52921 (2015), com a respetiva separação entre processos diretos e indiretos MAM [6].

Assim, o *binder jetting* (*BJ*) é uma técnica que consiste na deposição de uma camada de pó na plataforma de construção, seguindo-se a injeção seletiva dum adesivo líquido de forma a unir os pós nas zonas pretendidas (**Figura 2.3. (a)**). Depois de inserido o adesivo, a plataforma baixa, depositando-se uma nova camada de pó e repetindo-se todo o processo, camada a camada, até se obter a ‘*green part*’. Por fim, esta passará por um processo de aquecimento, onde o adesivo será removido e o pó sinterizado, obtendo-se a peça final.

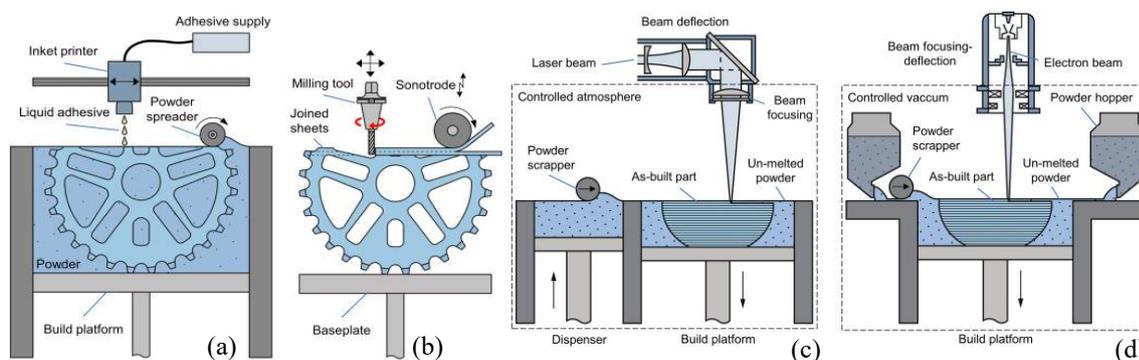
A principal desvantagem deste processo prende-se com a baixa densidade da ‘*green part*’ (cerca de 60%) [6], que, aquando da sinterização, encolhe, fazendo-a subir para cerca de 80% da densidade em maciço [16]. Ou seja, este processo implica uma perda de precisão dimensional, para além de, por se obterem densidades finais relativamente baixas, originar peças com piores propriedades mecânicas que as obtidas pelos métodos tradicionais.

Por sua vez, *sheet lamination* (*SL*) é um processo que consiste na sobreposição dum conjunto de folhas metálicas usando um sistema de rolos e a realização da respetiva união, seja por *adhesive bonding*, *ultrasonic welding* ou *friction stir welding*, seguida da maquinaria das zonas não essenciais (folha a folha) (**Figura 2.3. (b)**) [6]. Entre as 4 técnicas *direct MAM* este é o processo que produz as peças com menor qualidade, tanto ao nível das propriedades mecânicas como da resolução, pelo que as peças produzidas por *SL* não são indicadas para funções estruturais, servindo apenas para o fabrico de ‘protótipos rápidos’ não funcionais e moldes de fundição em areia [17].

*Powder bed fusion* (*PBF*) é um processo semelhante ao *BJ*, no entanto, em vez de se fazer injeção seletiva dum adesivo, é usada uma fonte térmica localizada para fundir o

pó nas zonas que constituirão a peça. Se a fonte térmica utilizada for um laser o processo será denominado de ***L-PBF*** (**Figura 2.3. (c)**), e se for um feixe de eletrões o processo será denominado de ***EB-PBF*** (**Figura 2.3. (d)**).

Ambas as técnicas permitem produzir peças com uma boa resolução e com um reduzido desperdício de matéria-prima (já que o pó não fundido pode ser reciclado), no entanto, requerem equipamentos dispendiosos [18] e tem o seu tamanho limitado pelas dimensões da câmara do equipamento. O *L-PBF* permite obter taxas de deposição até 0,1kg/h e rugosidades superficiais máximas entre 10-20µm, enquanto que o *EB-PBF* é uma técnica mais complexa que obriga a que o fabrico seja feito em condições de vácuo, no entanto, é útil para metais de difícil processamento (como ligas de cobalto e níquel) e, permite obter taxas de deposição até 0,2kg/h e rugosidades superficiais entre 15-30µm.



**Figura 2.3.** Representação esquemática de diversas técnicas *direct MAM*: (a) *BJ*; (b) *SL*; (c) *L-PBF*; (d) *EB-PBF* [6].

Por fim, o ***direct energy deposition (DED)*** é um processo em que o material (em pó ou fio) é conduzido pelo bocal da ferramenta até à zona de impressão, onde é fundido no exato momento da deposição por meio de uma fonte térmica localizada, seja: um laser (***L-DED***), feixe de eletrões (***EB-DED***) ou arco elétrico (***WAAM***) – conforme **Figura 2.4**.

Estes destacam-se pelas altas taxas de deposição (até 2kg/h para o *L-DED*, entre 3-10kg/h para o *EB-DED* e entre 5-6kg/h para o *WAAM*) e pela capacidade de produção de peças de grandes dimensões. No entanto, geram rugosidades superficiais superiores às do *PBF*, pelo que obrigam a operações de maquinagem posteriores [6].

Outra vantagem associada à categoria *DED* é a capacidade de ser usada para fazer reparações em componentes de alto valor, como turbinas, sendo possível obter propriedades mecânicas iguais, ou superiores, às originais [14].

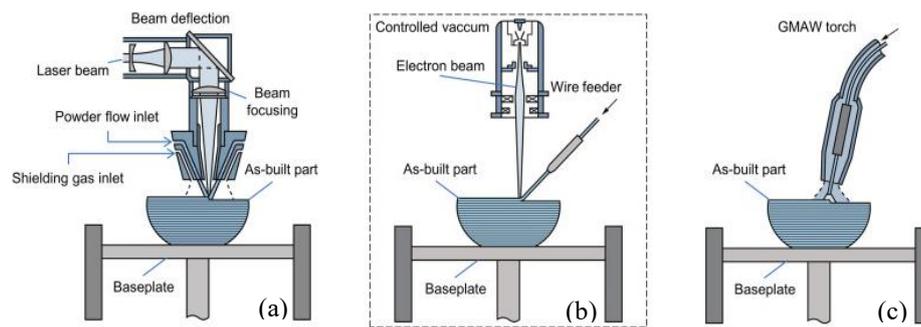


Figura 2.4. Representação esquemática das técnicas DED: (a) L-DED; (b) EB-DED; (c) WAAM [6].

## 2.2. WIRE-ARC ADDITIVE MANUFACTURING (WAAM)

### 2.2.1. Introdução: Definição, História e Motivação

O *wire-arc additive manufacturing (WAAM)* é uma técnica de fabrico aditivo englobada na categoria *DED*, ou seja, nas técnicas onde a fusão se dá no exato momento da deposição, que faz uso dos princípios de soldadura por arco elétrico para obter peças tridimensionais metálicas [6].

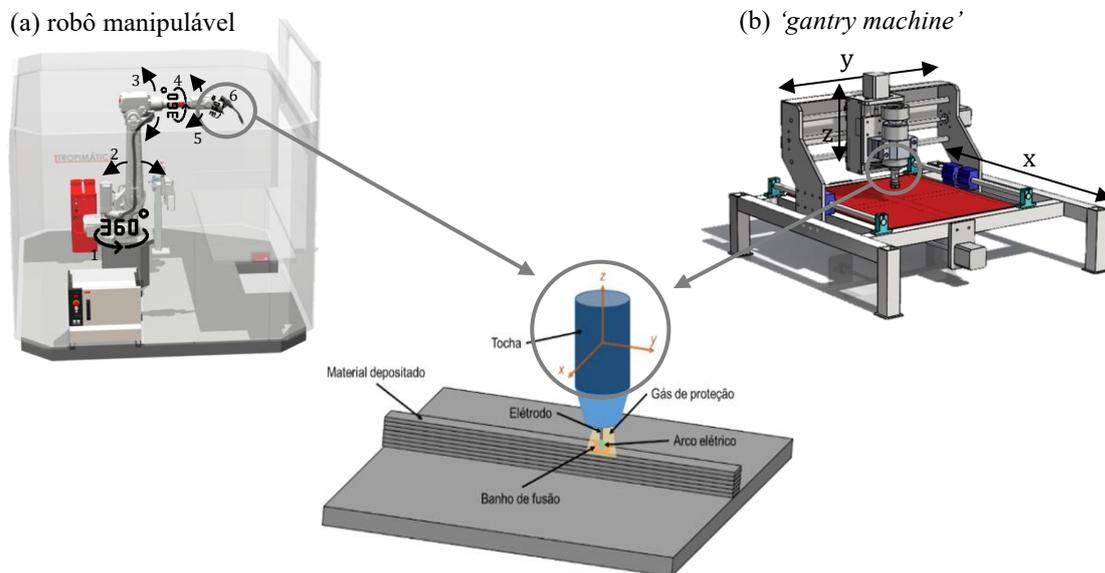
Esta teve origem em 1920 com o pedido de patente apresentado por Ralph Baker, que introduziu uma nova técnica denominada de ‘*ornamental arc welding*’, a qual faz uso dum arco elétrico, produzido por sistemas de soldadura convencionais, para fundir metal e produzir camadas sobrepostas de forma a se obterem peças decorativas [19]–[21].

No entanto, foram os trabalhos realizados na década de 90 por Dickens *et al.* e Prinz & Weiss, que combinam os princípios de soldadura anteriormente apresentados com robótica e *software CAM (computer-aided manufacturing)*, para a definição e execução da trajetória e controlo da alimentação do fio, que são hoje considerados como os responsáveis pelo desenvolvimento do *WAAM* [6]. Este processo seria então composto por uma tocha de soldadura convencional, responsável por criar o arco elétrico que permite fundir o fio de metal, aplicada a um robô manipulável (ou ‘*gantry machine*’<sup>3</sup>) – conforme **Figura 2.5.** –,

<sup>3</sup> As ‘*gantry machines*’ apresentam 3 graus de liberdade, podendo-se usar uma plataforma de construção (‘*tilting rotary table*’) que permite orientar o substrato, aumentando-os para 5. Estes sistemas cinemáticos não são os ideais para aplicações em fabrico aditivo uma vez que a ferramenta de impressão terá uma orientação fixa em relação ao substrato e, como será analisado na subsecção 2.2.3. (9), a orientação da tocha tem efeito no aspeto dos cordões depositados, pelo que a sua fixação irá limitar a qualidade das peças obtidas.

Devido às limitações apresentadas, apesar de numa fase inicial a comunidade em geral ter optado por este tipo de sistemas cinemáticos, o estudo do fabrico aditivo tem evoluído, sendo agora maioritariamente estudada a sua aplicação em robôs manipuláveis uma vez que os mesmos apresentam mais graus de liberdade, permitindo alterar a orientação da ferramenta de deposição [5] e obter configurações que permitem chegar a um maior número de posições, aumentando-se assim a complexidade dos componentes que podem ser produzidos.

que permite mover o bocal da tocha até à zona onde se pretende iniciar a impressão e seguir a trajetória capaz de converter o modelo 3D da peça numa estrutura metálica *near-net-shape*.

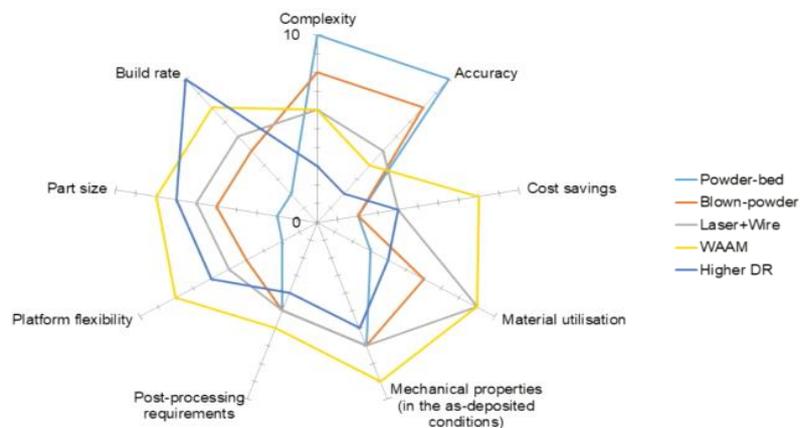


**Figura 2.5.** Representação esquemática do processo WAAM [20] com os dois tipos de sistemas cinemáticos possíveis para a movimentação da tocha: a) robô manipulável [22], e; b) 'gantry machine'.

Esta técnica destaca-se pela sua alta eficiência, tanto a nível energético como de consumo de matéria-prima [23]; altas taxas de deposição, o que se traduz em menores tempos de produção [10]; por poder ser usada numa alta variedade de metais e suas ligas, como aços, ligas de níquel, alumínio e titânio [4], e; por permitir a produção de peças de grandes dimensões [24] e com boas propriedades mecânicas [19], requerendo um menor investimento inicial que outras técnicas MAM, uma vez que combina equipamentos convencionais (tochas de soldadura + robôs já existentes, que podem ser adaptados à nova função). Ou seja, esta técnica tem ganho destaque nos últimos anos, tanto no meio científico como no meio industrial, devido à capacidade de fabrico rápido de peças metálicas de grande dimensão sem a necessidade de grandes investimentos iniciais [6].

No entanto, esta também apresenta algumas desvantagens, uma vez que os componentes produzidos apresentam uma menor precisão e qualidade superficial que obrigam a operações de maquinagem posteriores [23], e; limitações ao nível da complexidade [9]. Para além disso, uma vez que este é um processo com uma elevada adição de calor, se não houver um devido controlo da temperatura as camadas impressas estarão sujeitas a temperaturas excessivas e ciclos térmicos com altos gradientes, que induzirão anisotropia na peça, maiores tamanhos de grão, tensões residuais, distorções térmicas e

defeitos internos, que, associados à existência de porosidades, causam um significativo declínio na *performance* do componente (perda de resistência mecânica) [10], [11], [15].



**Figura 2.6.** Comparação de diferentes propriedades do processo WAAM (a amarelo) com outras técnicas MAM [25].

### 2.2.2. Variantes da Técnica WAAM

Dependendo da forma como o arco elétrico é gerado, esta categoria pode ser dividida em 3 técnicas diferentes: *gas metal arc welding* (**GMAW** ou **MIG/MAG**), *gas tungsten arc welding* (**GTAW** ou **TIG**) e *plasma arc welding* (**PAW**) [24].

Na técnica **GMAW** o arco elétrico é gerado entre o eletrodo consumível (a matéria-prima, sob a forma de fio) e o substrato, funcionando como a fonte térmica que permite fundir o metal a depositar. Este, ao fundir, gerará um banho de fusão que, por sua vez, pode ser revestida por uma atmosfera inerte, de forma a inibir reações com a atmosfera externa, ou ativa, originando reações controladas [6].

Assim, uma vez que o metal de adição é usado como eletrodo para criar o arco elétrico, o calor vai-se concentrar no mesmo, permitindo obter maiores taxas de deposição (2-3 vezes superiores às dos outros dois processos) [10], no entanto, a concentração de calor no metal a depositar poderá provar aquecimento excessivo da matéria-prima, originando peças com piores propriedades mecânicas. Para além disso, provocará uma menor estabilidade do arco, uma vez que a corrente elétrica atua diretamente sobre o metal a depositar, resultando em projeções, que originará peças com uma maior rugosidade superficial [19].

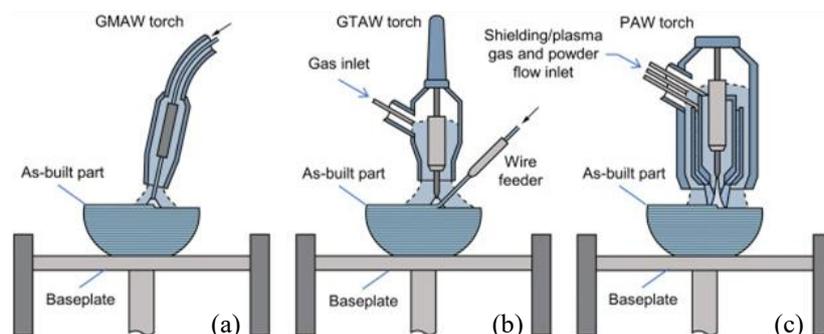
Por outro lado, sendo o eletrodo na tocha composto pelo metal consumível, poder-se-á dizer que o mesmo é coaxial à tocha de soldadura, conforme **Figura 2.7. (a)**, pelo

que o processo será mais simples de planear [10] e implicará menos limitações em termos de posição da tocha, permitindo obter geometrias mais complexas; uma vez que não requerá equipamentos auxiliares, esta também será mais barata de implementar [4], sendo por essas razões a técnica *WAAM* mais utilizada.

Por sua vez, nas técnicas *GTAW* e *PAW* o arco elétrico é formado entre um eléctrodo não consumível de tungsténio (na tocha de soldadura) e o substrato (ou peça em construção), sendo o metal a depositar fornecido de forma externa e lateral à tocha, conforme **Figura 2.7. (b) e (c)**. Estas técnicas também fazem uso de atmosferas protetoras, mas neste caso usam-se apenas atmosferas inertes [6].

Uma vez que o metal de adição é fornecido de forma externa à tocha, através duma unidade de alimentação separada, a geração das trajetórias e programação da componente robótica serão mais complexos e, as técnicas, mais caras de implementar [10].

No entanto, a técnica *GTAW* permitirá obter peças com melhores propriedades mecânicas que a *GMAW* e, menor porosidade, que é responsável por reduzir a vida do componente à fadiga [4]. Por sua vez, a técnica *PAW* é a única que permite usar o metal de adição tanto sob a forma de fio como de pó e apresenta uma maior concentração energética que a *GTAW*, o que se traduzirá numa maior taxa de deposição; para além disso, apresenta uma maior estabilidade do arco [6] e, permite gerar cordões com melhor qualidade e menores distorções térmicas, mas apresenta limitações ao nível do tamanho das peças produzidas [10].



**Figura 2.7.** Representação esquemática das técnicas *WAAM*: (a) *GMAW*; (b) *GTAW*, e; (c) *PAW* [6].

### 2.2.3. Parâmetros do Processo

Estes são, portanto, processos complexos que, para permitirem a obtenção de peças com boas propriedades mecânicas, uma alta compatibilidade geométrica com o modelo CAD que lhe dá origem e bom aspeto visual, requerem o controlo apertado dum vasto conjunto de parâmetros [10].

Assim, a seleção dos parâmetros do processo deverá ter em conta não só a técnica usada (*GMAW*, *GTAW* ou *PAW*), como o material a depositar<sup>4</sup> e, a geometria da peça que se pretende obter. Significa isto que o processo é específico ao material e aplicação, requerendo a repetição dos estudos realizados (e a realização de ajustes nos parâmetros utilizados) de cada vez que se altera a liga e se pretendem obter geometrias (drasticamente) diferentes.

Portanto, os parâmetros a ter em consideração nos processos *WAAM* são:

1. O **equipamento de soldadura** usado e a **técnica** em específico;
2. O **material a depositar** e respetivo diâmetro do fio (ou granulometria do pó, no caso do *PAW*);
3. O **material do substrato** e se contém (ou não) pré-aquecimento:

O pré-aquecimento permite diminuir o gradiente térmico entre o substrato e as primeiras camadas depositadas, originando uma solidificação mais lenta que possibilitará a formação duma microestrutura mais estável e com melhores propriedades mecânicas [10].

4. O **gás de proteção** – composição e fluxo:

O gás de proteção afeta a geometria e o aspeto dos cordões depositados, a estabilidade do processo e o modo de transferência, no entanto, a sua principal função é impedir que o metal (a altas temperaturas) reaja com a atmosfera (por exemplo, oxide) [15].

Os dois fatores a ter em conta são: a sua composição elementar, que dita se o mesmo será inerte (exemplo, argon (Ar)) ou ativo (exemplo, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)), e; o fluxo, que se for baixo não protegerá devidamente as camadas soldadas e se for muito elevado causará um fluxo em regime turbulento, que misturará o gás de proteção com a atmosfera, levando á contaminação das soldas [18].

5. Os **parâmetros elétricos** – voltagem (V) e intensidade de corrente (I):

Estudos indicam que o aumento da intensidade de corrente do arco elétrico origina uma diminuição da rugosidade do cordão de soldadura, assim como um aumento da largura do cordão e profundidade de fusão [10]. Por sua vez, um aumento da voltagem deverá levar, apenas, a um aumento da largura do cordão [15].

---

<sup>4</sup> A otimização dos parâmetros de soldadura é um processo específico para cada material já que diferentes materiais terão diferentes temperaturas de fusão e de transformação de fase, gerarão fases diferentes, comportar-se-ão de maneira diferente para os mesmos gradientes térmicos e terão maior ou menor tendência á oxidação ou certos defeitos internos, etc...

**6. A distância da ponta do eléctrodo à peça** (*working distance*);

**7. A velocidade de alimentação do fio** (*wire feed rate - WFR*):

A velocidade de alimentação do fio relaciona-se diretamente com a altura do cordão, sendo que quando maior o *WFR* mais alto será o cordão depositado.

**8. A velocidade da tocha** (*travel speed - TS*):

Por um lado, um aumento de *TS* provocará uma diminuição da largura do cordão e da profundidade de fusão (uma vez que tanto o material como o calor depositados estarão dispersos por um maior comprimento) e, por outro, fará aumentar (ligeiramente) a sua rugosidade. Esta tem ainda influência nas tensões residuais dos cordões, pelo que para diminuir estas tensões se deverá diminuir *TS* [10].

**9. A orientação da tocha:**

Num trabalho realizado por Raven Reisch *et al.* [9] estudou-se o efeito da orientação da tocha na geometria dos cordões de soldadura para o fabrico de paredes simples. No mesmo, o ângulo da tocha é dividido em 2 ângulos diferentes: o *lead angle* ( $\alpha$ ) e o *tilt angle* ( $\beta$ ), tendo-se concluído que diminuir o *lead angle* torna o processo mais instável, gerando um maior número de projecções e instabilidade do arco, o que resulta num cordão descontínuo e não uniforme, e; a alteração do *tilt angle* faz com que os cordões depositados fiquem inclinados em relação às camadas inferiores – conforme **Figura 2.8. (a)**. Assim, e após uma análise para múltiplos conjuntos de ( $\alpha$  e  $\beta$ ), concluiu-se que para o fabrico de cordões 100% sobrepostos é aconselhável o uso de  $\alpha$  e  $\beta$  nulos, uma vez que estes permitem obter cordões com boas características, para além de facilitarem o processo de planeamento da trajetória.

No entanto, as peças que se pretendem produzir terão uma maior complexidade geométrica, pelo que haverá camadas que não estarão 100% sobrepostas, ou seja, haverá camadas que se estenderão para fora da extensão da camada inferior criando um *overhang angle* (zona sem material de suporte para permitir a deposição).

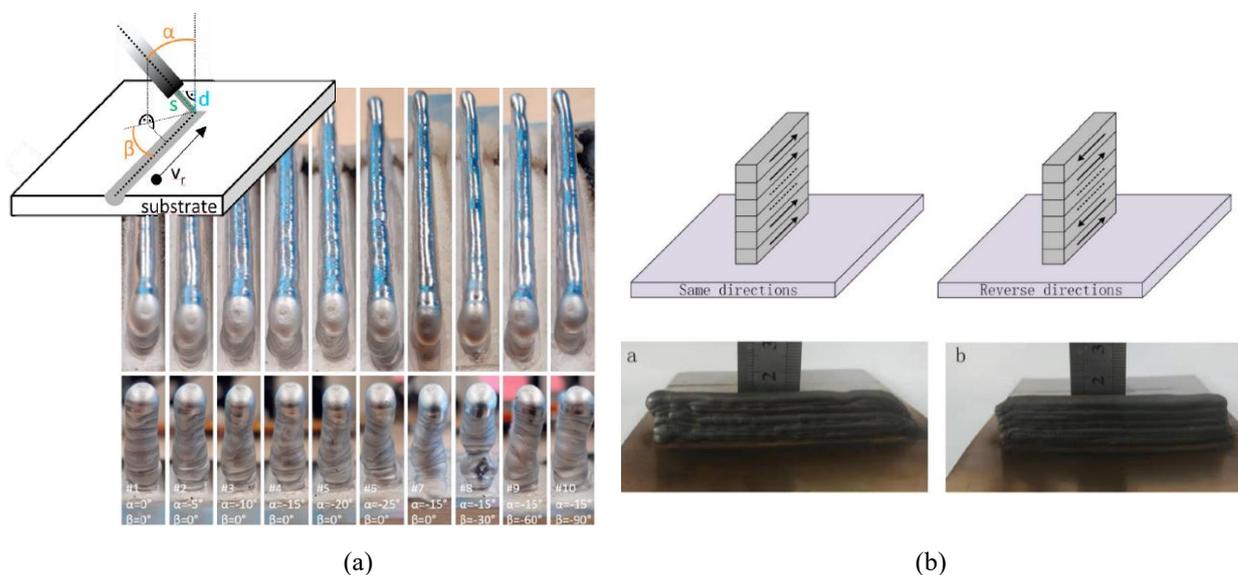
Este *overhang angle* é crucial para determinar se uma peça pode ser impressa por *WAAM* e se requer (ou não) material de suporte, uma vez que, se for muito alto, o material a depositar não terá suporte suficiente para se manter na posição pretendida. De forma a resolver este problema são apresentadas duas propostas: (1) adicionar material de suporte de forma a diminuir o *overhang angle*, ou; (2) adaptar a orientação da tocha de soldadura de

forma a aumentar a área de contacto. Esta adaptação da orientação da tocha deverá eliminar, ou pelo menos minimizar, a necessidade do material de suporte, pelo que se deve orientar a ferramenta de impressão de forma a que a mesma aponte no sentido da camada inferior<sup>5</sup> [26], [27].

#### 10. A percentagem de *overlapping* entre cordões adjacentes [19] (tanto na mesma camada, como entre camadas sobrepostas):

O *overlapping* é o parâmetro que permite que as camadas depositadas não sejam apenas um conjunto de cordões individuais, mas se unam para formar o componente. A sua análise é essencial uma vez que, se o seu valor for muito baixo, poderá levar á formação de vazios entre as camadas depositadas, o que degradará a *performance* do componente obtido.

Um estudo apresentado por D. Ding *et al.* introduziu um modelo analítico desenvolvido com o intuito de determinar o valor ótimo de *overlapping* para cordões na mesma camada, tendo concluído que, para se cumprirem os requisitos de tolerância dimensional e precisão geométrica, assim como se obterem cordões com um bom acabamento superficial, a distância ótima entre cordões adjacentes deverá ser de 0,738 vezes a largura do cordão [18].



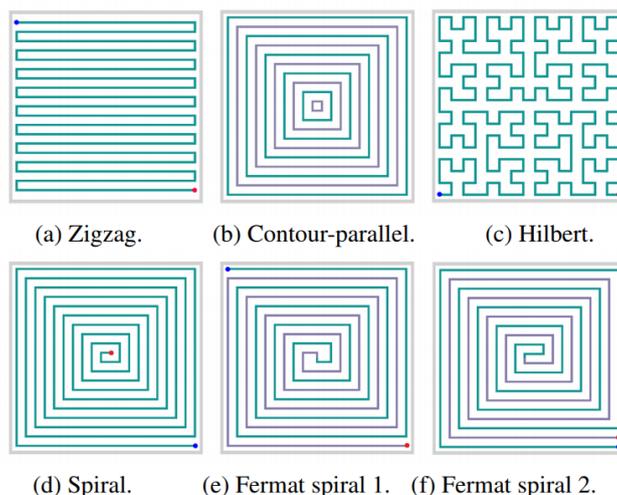
**Figura 2.8.** (a) Resultados do estudo feito por Raven Reisch *et al.* onde se pode verificar o efeito de diferentes orientações da tocha na geometria dos cordões depositados [9], e; (b) Resultados do estudo feito por Jiankang Huang *et al.* com cordões para diferentes estratégias de deposição (SD e RD) [8].

<sup>5</sup> Neste projeto, durante a impressão das primeiras peças mais complexas (com *overhang angles*), deparamo-nos com problemas idênticos que originaram a falha na impressão dessas peças, pelo que este processo é apresentado, em mais detalhe, na análise da componente prática do trabalho.

### 11. A estratégia de deposição (*path strategy*):

Quanto à estratégia de deposição existem dois grandes modos de impressão: na mesma direção, ou *same direction (SD)*, e em direções alternadas, ou *reverse direction (RD)*. A principal diferença entre as duas estratégias encontra-se na forma como o calor é distribuído; assim, estudos indicam que o calor será melhor distribuído pela peça se for usada uma estratégia do tipo *RD*, o que implicaria que as tensões residuais estariam dispersas mais uniformemente e as distorções térmicas seriam inferiores (cerca de 25%). Por essa razão é possível verificar na **Figura 2.8. (b)** que, usando uma estratégia do tipo *SD* se obtém paredes menos uniformes do que usando uma estratégia do tipo *RD* (ou seja, a parede *SD* é mais alta no ponto final que no ponto inicial, devido à forma como o calor é distribuído) [8], [10].

Para peças complexas (e maciças), e não apenas para a impressão de paredes, não é suficiente dizer se a estratégia é do tipo *SD* ou *RD*, havendo diversas estratégias de impressão – diferentes padrões para a trajetória de impressão das zonas maciças (exemplos na **Figura 2.9.**).



**Figura 2.9.** Diferentes padrões para a trajetória de impressão das zonas maciças [28].

**12. tempo e taxa de arrefecimento** (*cooling time – CT*, e *cooling rate - CR*) entre camadas depositadas [19].

#### 2.2.4. Problemas e Desafios

Os principais desafios na aplicação dos processos *WAAM* podem ser resumidos em 3 pontos: (1) **precisão do fabrico**, (2) **controlo de qualidade** e (3) **nível de automação**.

O primeiro grande desafio, a **precisão (dimensional) do fabrico** – ou, **compatibilidade geométrica com o modelo CAD** –, encontra-se limitada por múltiplos

---

fatores, desde: o diâmetro do fio usado como metal de adição, à estabilidade do arco elétrico (que, se for baixa, provocará flutuações na geometria do cordão), à quantidade de calor adicionado ao cordão, que está diretamente relacionada com a seleção dos parâmetros de soldadura e, ao efeito *staircase* [24].

Por sua vez, também o **controle da qualidade** se apresenta como um desafio para este tipo de processos *MAM*, tanto ao nível dos defeitos internos como da microestrutura, ambos fatores com impacto nas propriedades mecânicas do componente final. Assim, nos processos *WAAM*, os defeitos podem ser divididos em duas classes: os que são inerentes ao princípio de funcionamento (arco elétrico) e que são partilhados com os métodos de soldadura convencionais e, os inerentes aos processos de deposição camada a camada e que são partilhados com os processos *AM* em geral. Entre os defeitos comuns aos processos de soldadura incluem-se: as deformações, zonas não fundidas e os defeitos e rugosidades superficiais; por sua vez, em comum com os processos *AM* tem-se a tendência para se formarem vazios, e; comuns aos três têm-se: as porosidades, a oxidação e as fraturas (ou falhas) – que podem ser minimizados, ou mesmo eliminados, através duma correta seleção dos parâmetros usados [24].

Estes defeitos resultam de contaminações na superfície do substrato e/ou do metal de adição, duma má seleção dos parâmetros usados, duma má escolha dos gases que constituem a atmosfera protetora (ou dum fluxo insuficiente), de instabilidades no arco elétrico, dum mau planeamento da trajetória da tocha, etc...[10], [24]; no entanto, o principal fator com impacto no surgimento de defeitos internos é a excessiva adição de calor. Uma vez que estas técnicas requerem uma alta quantidade de calor para fundir o metal de adição irão originar-se altos gradientes térmicos que, associados a consecutivos ciclos de aquecimento e arrefecimento, ou seja, repetidas expansões e contrações térmicas, derivadas da refusão de camadas previamente depositadas, produzirão tensões residuais [10].

As tensões residuais irão, por sua vez, aumentar à medida que o número de camadas aumenta, uma vez que o calor se dissipa mais facilmente pelo substrato, sendo que à medida que as camadas se sobrepõem se torna mais difícil dispersar o calor transmitindo ao cordão [8]. Assim, a distribuição não uniforme das tensões residuais ao longo da peça será responsável por distorções (que originarão desvios dimensionais), delaminação, falhas e, conseqüentemente, a deterioração da performance do componente à fadiga e fratura [10], [29].

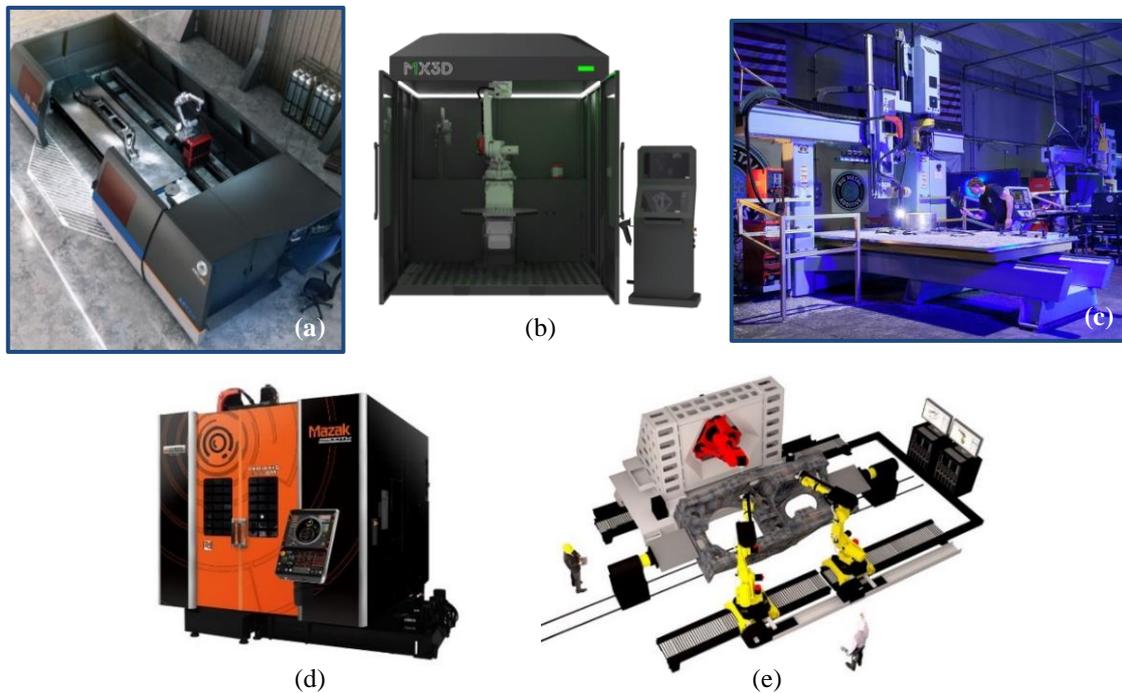
Uma vez que as tensões residuais são responsáveis por um vasto conjunto de defeitos que surgem no interior do componente, uma forma de minimizar a quantidade e dimensão dos defeitos na peça é através dum controlo dessas tensões. Esse controlo pode ser feito através: **(1)** da otimização da orientação da peça no *slicer*, de forma a que as camadas depositadas tenham o menor comprimento possível (já que quanto menor o comprimento do cordão, menores serão as tensões residuais desenvolvidas) [10], e; **(2)** da seleção duma estratégia de deposição do tipo *RD*, que provou apresentar uma melhor distribuição do calor e, como tal, das tensões residuais [8].

Por fim, o último ponto a ter em consideração é o **nível de automação** do processo. Na verdade, á semelhança doutras técnicas *MAM*, já existem alguns equipamentos comerciais cujo princípio de funcionamento se baseia neste tipo de técnica, assim como empresas a produzir e vender peças produzidas por *WAAM* – por exemplo: *WAAM3D*<sup>®</sup> [25], *AML3D*<sup>®</sup> [30], *BMA*<sup>®</sup> [31], *MX3D*<sup>®</sup> [32], *MAZAK*<sup>®</sup> [33] e *RAMLAB*<sup>®</sup> [34] (**Figuras 2.10.** e **2.11.**). No entanto, os sistemas atualmente existentes são altamente dependentes do operador, estando os seus sistemas de controlo ainda em fase de desenvolvimento, ou seja, apesar deste processo já ter sido bastante investigado por universidades, centros de investigação e empresas, ainda não existe um equipamento que inclua todo o sistema de fabrico, de monitorização e controlo da deposição (de forma a se poderem obter componentes com boas propriedades mecânicas e tolerâncias dimensionais) e, sistemas auxiliares (com vista à correção dos problemas que surjam durante o processo).

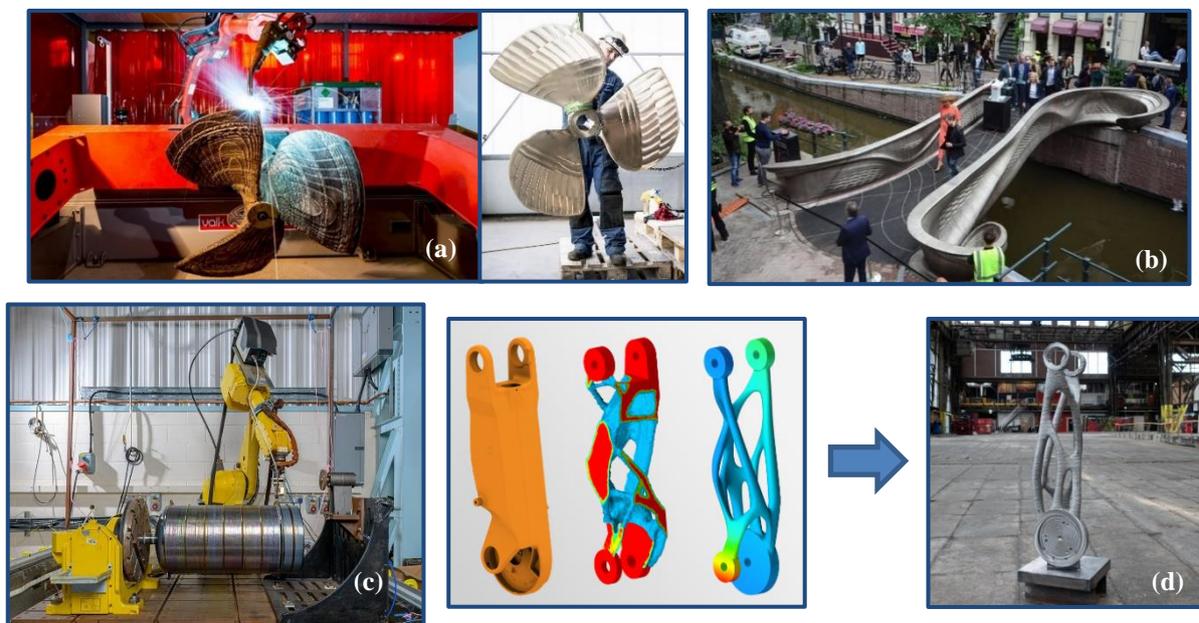
O objetivo será, portanto, desenvolver todo um sistema que permita a automação do processo, sendo apenas necessário inserir o ficheiro *CAD* do componente que se pretende fabricar e informação sobre o material, deixando que todo o processo seja comandado pelo próprio sistema de controlo para se obterem peças com boas propriedades mecânicas [35].

Uma proposta para resolver este desafio é a utilização de modelos de previsão para assistir na seleção dos parâmetros iniciais do processo e no planeamento da trajetória de deposição. No entanto, uma vez que estes modelos têm por base princípios físicos (como o método dos elementos finitos), de termodinâmica, etc..., à medida que o número de camadas depositadas aumenta a realidade vai desviar-se do modelo de previsão, sendo necessário usar sistemas de monitorização em tempo real que, através do uso de sensores, são capazes de recolher informação sobre o sistema e introduzi-la num algoritmo que a analisa e otimiza os parâmetros de deposição, em tempo real, de acordo com a mesma. Este

tipo de controlo *in-the-loop* deverá permitir prevenir a criação de defeitos, corrigir problemas na geometria do cordão depositado, controlar a sua microestrutura e respetivas propriedades mecânicas, etc... [24].



**Figura 2.10.** Exemplos de equipamentos comerciais com a técnica WAAM: (a) ARCEMY® da AML3D® [30]; (b) M1® System da MX3D® [32]; (c) sistema desenvolvido pela BMA® (Big Metal Additive) [31] / e, híbridos (WAAM + métodos subtrativos): (d) VARIAXIS j-600AM® da MAZAK® [33], e; (e) projeto LASIMM® [36].



**Figura 2.11.** Exemplos de peças produzidas por WAAM: (a) Hélice de navio produzida pela RAMLAB® [34]; (b) Ponte em aço (com 12 metros e 4500 kg) produzida pela MX3D® e instalada num canal, no centro de Amesterdão; (c) 'Thales Alenia Space pressure vessel' produzido em titânio pela WAAM3D® (permitindo usar 30 vezes menos matéria-prima) [37], e; (d) braço dum robô ABB®, otimizado de forma a conter apenas  $\frac{1}{2}$  da massa inicial e, produzido pela MX3D® [32].

### **2.2.5. Soluções propostas para os problemas apresentados**

Para resolver os problemas apresentados na secção anterior ao nível de defeitos internos e seu efeito nas propriedades mecânicas do componente, tolerâncias dimensionais e qualidade superficial da peça, velocidade de impressão, entre outros, foram apresentadas diversas soluções nos artigos analisados. Abaixo apresentam-se, em síntese, as soluções encontradas.

#### **2.2.5.1. *Matriz manufacturing strategy***

Esta solução, apresentada por Alfredo Suárez *et al.* [19], passa pelo fabrico de múltiplos componentes ao mesmo tempo (**Figura 2.12. (a)**), de forma a eliminar os tempos não produtivos – período de arrefecimento entre camadas. Segundo os autores a mesma deverá permitir aumentar a produtividade em cerca de 25%.

Devido à alta quantidade de calor gerada nos processos *WAAM* para se fundir o metal a depositar é normalmente necessário proceder ao arrefecimento da camada recém-depositada antes de se iniciar uma nova deposição, para que as camadas inferiores da peça (ainda em processo de solidificação) não colapsem com o peso das camadas superiores. No entanto, este processo poderá implicar grandes paragens, o que gerará ineficiências; o que esta solução propõe é a produção de várias peças ao mesmo tempo, assim, enquanto uma das camadas está a arrefecer pode-se usar esse tempo para fabricar a mesma camada na peça seguinte.

#### **2.2.5.2. Arrefecimento forçado (entre deposição de camadas)**

Outra solução para reduzir o tempo que é desperdiçado a arrefecer os cordões recém-depositados é o uso de arrefecimento forçado. Neste caso, as camadas acabadas de depositar seriam arrefecidas por convecção forçada da atmosfera protetora ou usando um óleo de refrigeração.

Para além disso, uma vez que esta solução originaria um arrefecimento mais rápido, seria possível refinar o tamanho de grão, obtendo-se melhores propriedades mecânicas [10].

#### **2.2.5.3. Adaptação da velocidade da tocha (*TS*) ao longo da peça**

Esta proposta é apresentada em [10] como solução para corrigir a excessiva acumulação de calor derivada da sobreposição das camadas depositadas. Assim, à medida

que se adicionam novos cordões de soldadura, e mesmo dando tempo para que as camadas arrefeçam (parcialmente), vai haver acumulação de calor, pelo que as camadas superiores estarão sujeitas a temperaturas mais elevadas que as inferiores. Uma forma de corrigir este efeito acumulativo é reduzir o calor adicionado à medida que novas camadas são depositadas; mais especificamente, o que esta solução propõe é reduzir o seu valor entre 5 a 20% por camada. Para se obter esta redução os autores propõem um aumento da velocidade da tocha, no entanto, é de notar que o aumento consecutivo de *TS* poderá levar a que os cordões depositados se tornem irregulares.

#### **2.2.5.4. Tratamentos térmicos de pós-processamento**

Uma solução para resolver os problemas associados ao tamanho de grão, microestrutura e fases geradas aquando do arrefecimento dos cordões depositados, que condicionam as propriedades mecânicas das peças fabricadas, é a realização de tratamentos térmicos de pós-processamento. Neste caso, usando-se uma temperatura e velocidade de arrefecimento controladas é possível refinar o tamanho de grão, selecionar as fases a desenvolver (mediante as características mecânicas de cada fase e os objetivos para a peça) e reduzir a anisotropia e tensões residuais [7], [10], [19].

#### **2.2.5.5. Surface rolling (SR)**

Esta é outra proposta apresentada para melhorar as propriedades mecânicas da peça final e passa por usar um rolo, de metal duro e altamente polido, para submeter a camada recém-soldada a alta pressão (**Figura 2.12. (b)**), que irá originar a deformação plástica dos cordões, comprimindo-os e colapsando os poros internos. Desta forma, será possível diminuir a porosidade da peça, obter melhores tolerâncias dimensionais – pois reduz-se a variação na altura do cordão depositado –, diminuir a anisotropia, refinar o tamanho de grão e induzir tensões compressivas que irão anular o efeito das tensões residuais existentes [6], [10].

#### **2.2.5.6. Shot peening (SP)**

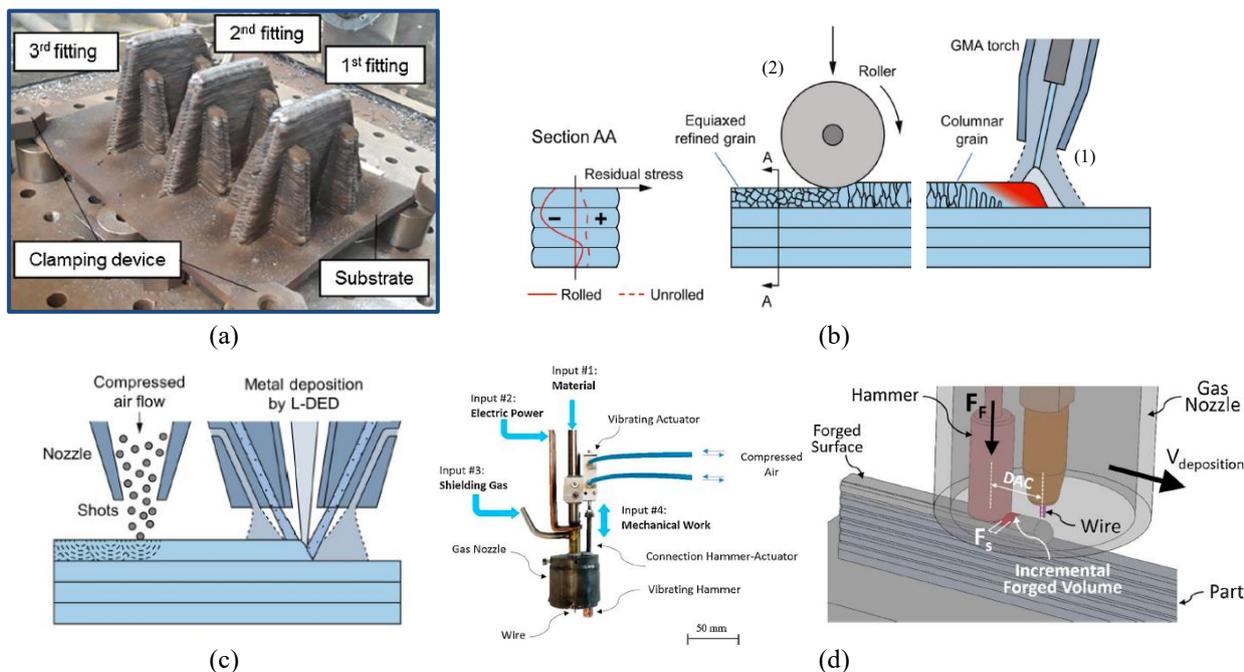
O *shot peening* é uma técnica usada para aliviar as tensões residuais e, conseqüentemente, minimizar distorções. Este funciona através da colisão de pequenas bolas dum material duro nas camadas depositadas (**Figura 2.12. (c)**), de forma a causar deformação plástica e induzir tensões residuais de compressão que permitirão atrasar a

iniciação das falhas, aumentando, dessa forma, a vida à fadiga do componente, e melhorando as suas propriedades mecânicas [6], [10], [29].

### 2.2.5.7. Hot forging

Esta técnica foi recentemente proposta por Duarte *et al.* [11] como um processo alternativo ao *cold rolling* e ao *shot peening*, em que se adiciona um martelo com um atuador vibratório junto á tocha de soldadura (neste estudo, incorporada num sistema do tipo ‘*gantry machine*’) – conforme **Figura 2.12 (d)**. Assim, o cordão é depositado pela tocha de soldadura e imediatamente forjado após deposição, originando deformação plástica a altas temperaturas. Uma vez que não é necessário deixar o cordão arrefecer, é possível obter melhores propriedades mecânicas sem aumentar o tempo de fabrico e com um menor consumo energético (já que a altas temperaturas a força necessária para deformar o cordão será menor).

Ou seja, à semelhança do *SR* e do *SP*, será possível reduzir a porosidade nos cordões depositados e refinar a sua microestrutura, permitindo melhorar as propriedades mecânicas da peça [6]; por outro lado, tal como no *SR*, será possível melhorar a precisão dimensional do cordão depositado, uma vez que, ao se martelar o cordão, é possível corrigir as diferenças de altura.



**Figura 2.12.** Esquema das soluções propostas: (a) *Matrix manufacturing strategy* [19]; (b) *Surface rolling* [6]; (c) *Shot peening* [6], e; (d) *Hot forging* [11].

#### 2.2.5.8. *Hybrid manufacturing (HM)*

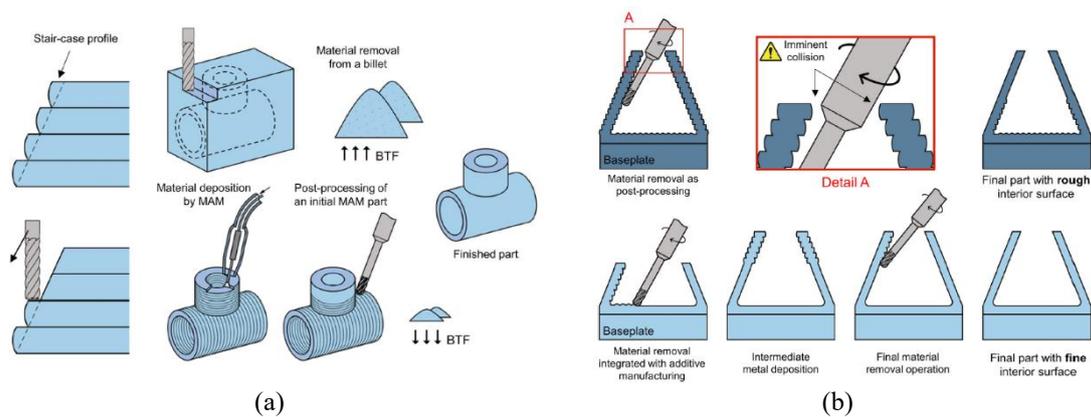
*Hybrid manufacturing* é a designação que é dada a um processo que combina duas (ou mais) tecnologias diferentes de forma a superar as limitações que cada processo tem individualmente e beneficiando das vantagens de cada um [6].

O processo *HM* mais mencionado nos artigos analisados é o uso de processos subtrativos (maquinagem) em conjunto com o processo aditivo (*WAAM*) de forma a permitir a correção dos defeitos e rugosidades superficiais inerentes ao processo *MAM* assim como a sua baixa tolerância dimensional [5], [6], [9], [10], [19], [23], [29], [38], [39]. Nestes artigos são propostas duas abordagens diferentes: (1) usar a maquinagem como uma técnica de pós-processamento, e; (2) usá-la durante o processo de deposição, alternando com o processo *MAM* – conforme **Figura 2.13 (a)** e **(b)**, respetivamente.

No primeiro caso, a maquinagem é usada para melhorar as tolerâncias dimensionais e rugosidade superficial da peça recém-depositada através da remoção dos perfis do tipo *staircase* e do material de suporte (adicionado em zonas com *overhang angles* demasiado altos que tornam impossível fazer a deposição) [6]. O segundo caso é usado quando as partes que se pretendem remover estão fisicamente restritas por uma qualquer parte da peça, pelo que se torna necessário proceder á remoção do material antes de se bloquear o acesso da ferramenta de remoção; ou seja, esta técnica é necessária quando se pretende remover material de zonas internas ou em geometrias onde as camadas superiores restringirão o acesso da ferramenta de remoção às camadas inferiores [6], [29].

Assim, a combinação do *WAAM* com processos subtrativos deverá permitir obter peças com uma rugosidade superficial até 0,1mm [9], essencial para eliminar os defeitos superficiais que tem grande impacto na vida á fadiga do componente, uma vez que funcionam como ponto de concentração de tensões para a iniciação da fenda por fadiga e a sua rápida propagação. Por outro lado, a maquinagem induzirá tensões compressivas na superfície da peça que contribuirão para reduzir o efeito das tensões residuais iniciais [29].

No entanto, é necessário ter em conta que os processos *WAAM* podem gerar peças com elevada anisotropia, pelo que será mais difícil planear o processo de maquinagem já que diferentes propriedades ao longo da peça terão impacto nas forças que podem ser exercidas.



**Figura 2.13.** Esquema do HM (WAAM + maquinagem): (a) Maquinagem posterior à impressão para remoção do efeito *staircase*; (b) Maquinagem ao longo do processo de impressão [6].

Outras formas de *hybrid manufacturing* são:

a) A combinação do processo AM com técnicas de fabrico tradicionais, como o forjamento, a extrusão e a laminagem: as técnicas tradicionais permitem produzir peças semiacabadas às quais são adicionados elementos extra por AM. Esta solução permite obter mais facilmente peças com formas relativamente simples, mas com pequenos elementos que tornam o seu processo de fabrico (muito) mais complexo [6].

b) O uso de múltiplas fontes de energia: Quian *et al.*, Zhang *et al.* e Wu *et al.* propuseram a adição dum laser para assistir nas múltiplas técnicas WAAM de forma a acelerar o processo de impressão e se obterem melhores propriedades mecânicas [6].

c) A conjugação de vários processos AM: uma proposta para obtenção de peças de grandes dimensões com boas propriedades mecânicas é produzir subpartes com outras técnicas de fabrico aditivo (por exemplo, *PBF*) e uni-las por soldadura [4]; neste caso, continua a ser necessário fazer uma boa otimização dos parâmetros de soldadura utilizados para que as uniões não se tornem em zonas críticas de fácil rotura.

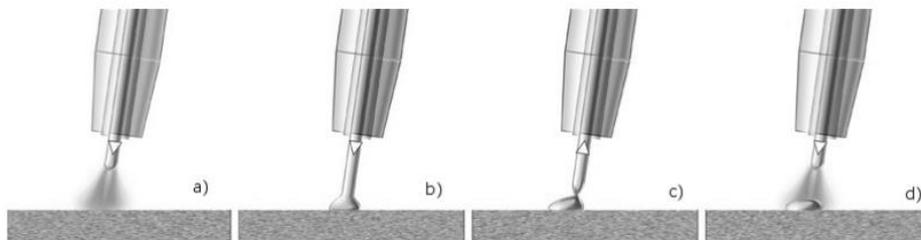
## 2.3. COLD METAL TRANSFER APLICADO AO TI-6AL-4V

### 2.3.1. O Processo: *Cold Metal Transfer (CMT)*

Outra solução para os problemas relacionados com a excessiva adição de calor dos processos WAAM é usar uma variante do processo *GMAW*: o *cold metal transfer (CMT)*. Esta variante foi desenvolvida pela Fronius® em 2004 e baseia-se no modo de transferência por curto-circuito (controlado) [40].

Assim, o modo de transferência (fator diferenciador entre o *CMT* e a técnica original: *GMAW*) pode ser resumido nos seguintes passos [41] (**Figura 2.14.**):

- 1) Formação dum arco elétrico entre o eléctrodo (metal de adição) e o substrato;
- 2) O eléctrodo consumível é, de seguida, ‘alimentado’ pela tocha de soldadura, movendo-se até ao local de deposição;
- 3) Quando a ponta do eléctrodo toca no substrato (ou na parte já formada) dá-se um curto-circuito, extinguindo-se o arco elétrico e, o fio é removido (retrai);
- 4) Este movimento de retração faz libertar uma única gotícula de metal;
- 5) Quando o eléctrodo volta á posição inicial, o arco elétrico forma-se novamente e o processo repete-se.



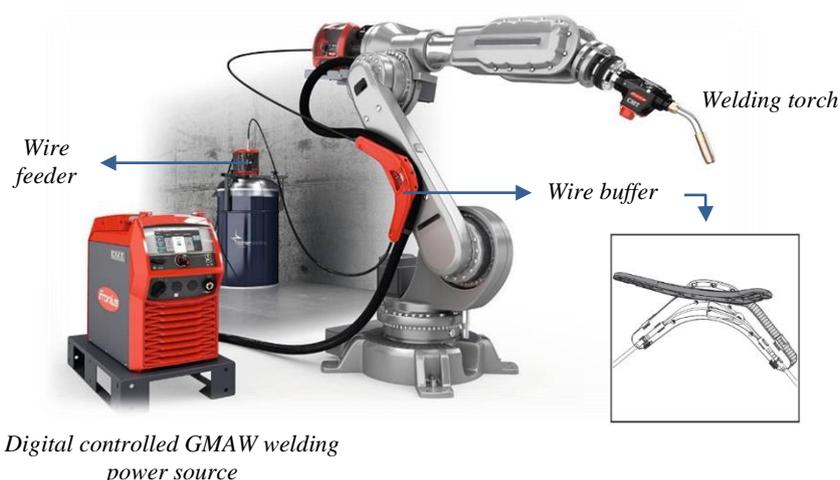
**Figura 2.14.** Representação esquemática do modo de transferência por curto-circuito (*CMT*) [41].

Uma vez que o arco elétrico se forma com o posicionamento do fio e se extingue mal se dá o curto-circuito, o tempo em que de facto se está a impor calor ao metal é muito curto, pelo que o mesmo é resumido, pela própria Fronius<sup>®</sup>, como: “*Hot, cold, hot, cold, hot, cold.*” [42]. Ou seja, as principais vantagens deste processo são: uma baixa quantidade de calor gerado, que resulta em menores tensões residuais e, consequentemente, menores distorções térmicas e defeitos internos, e; um maior controlo do processo derivado duma maior estabilidade do arco, que resulta num processo “sem projecções”<sup>6</sup>, permitindo obter cordões com um melhor aspeto visual [7], [40], [42].

Uma versão alternativa é o modo ‘*CMT Advanced*’ que permite variar a polaridade do eléctrodo, alternando entre ciclos com eléctrodo positivo e negativo (cada um composto por uma série de curto-circuitos). A reversão da polaridade, que ocorre na fase de curto-circuito de forma a garantir a estabilidade do processo, permite alternar o ponto de maior concentração do calor (entre o eléctrodo e o substrato), originando um processo “*even cooler*” que o modo *CMT* original. Por outro lado, este também permite aumentar a taxa de deposição até 60% acima da do método original [41], [43].

<sup>6</sup> Traduzido diretamente do folheto da Fronius onde consta que este processo é: “*spatter-free*”.

Este processo é realizado pela Fronius® com recurso a um sistema de alimentação inovador que permite alimentar e retrair o fio a altas velocidades, controlado com recurso a um *'high-speed digital controller'* [40] que permite realizar todo o processo múltiplas vezes por segundo (>100 vezes/segundo) [41]– **Figura 2.15.**



**Figura 2.15.** Sistema de soldadura da Fronius® com os componentes que permitem o modo *CMT* [44] (o *'wire buffer'* é a zona de amortecimento que permite a rápida alternância na direção de alimentação do fio [45]).

Por fim, é de notar que no modo *CMT* os parâmetros elétricos serão selecionados de forma automática pelo sistema de controlo da Fronius®, bastando para isso ter informação sobre a velocidade de alimentação do fio (*WFR*) e sobre o material usado (com respetivo diâmetro do fio) – mais especificamente, são necessárias as *'linhas sinérgicas'* características do material.

### 2.3.2. O Material: Liga de Titânio (Ti-6Al-4V)

A liga Ti-6Al-4V, também denominada de Ti64 ou *'Titanium Grade 5'*, é uma liga de titânio ao qual foi adicionado 6% *wt.* de alumínio e 4% *wt.* de vanádio. Esta é a liga de titânio mais popular, representando quase 50% de todo o mercado e sendo amplamente usada no setor aeroespacial, médico, químico e biomédico, assim como (em menor relevo) na indústria marítima, automóvel e energética [14], [46].

Esta liga é caracterizada por ter uma resistência mecânica elevada, baixa densidade, alta tenacidade à fratura, excelente resistência à corrosão (à maior parte dos ácidos e bases), alta estabilidade a altas temperaturas e biocompatibilidade [14], [47], daí a sua atratividade para uma gama tão grande de aplicações.

No entanto, apesar das suas inúmeras vantagens, esta também apresenta alguns desafios que dificultam o seu processo de fabrico, nomeadamente: uma alta dureza, baixa condutibilidade térmica e, uma alta reatividade química com o oxigénio, azoto e hidrogénio (principalmente a altas temperaturas) [14].

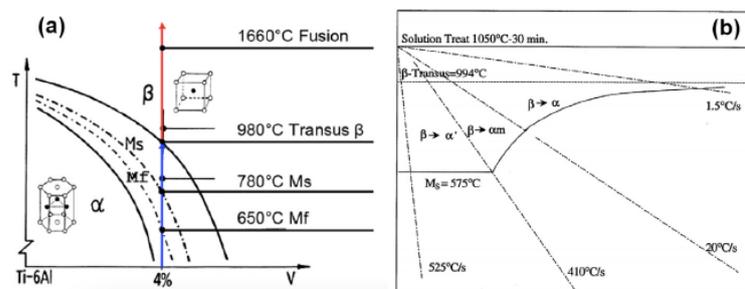
Na produção por métodos convencionais as peças com alguma complexidade geométrica são, normalmente, obtidas em duas fases:

- 1º Obtém-se um bloco da liga por fundição, e;
- 2º Maquina-se o bloco até se obter a geometria final.

Como esta se trata duma liga dura, o processo de maquinagem requererá, no entanto, ferramentas especiais (dum material mais duro) e menores velocidades, para além de gerar grandes desperdícios de matéria-prima (podendo representar quase 85% do volume original), o que torna o seu processo de fabrico num método caro e lento [14] – razão pela qual o estudo dos métodos *AM* é tão interessante para o fabrico deste tipo de ligas.

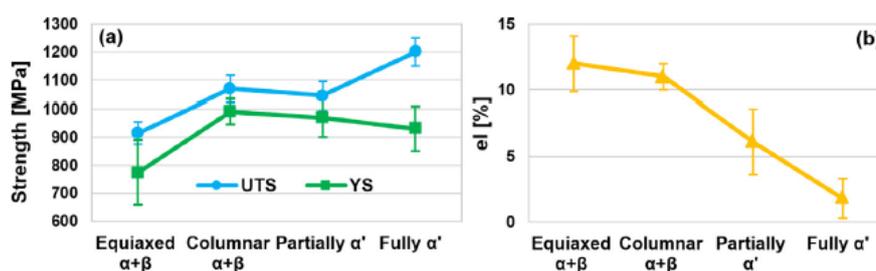
Ao se optar por um processo de fabrico aditivo (como o *WAAM*) será necessário ter em conta que a baixa condutividade térmica da liga requererá um maior tempo de arrefecimento entre camadas para permitir a dissipação do calor, e que a maior reatividade da liga ao oxigénio, azoto e hidrogénio (que são componentes da atmosfera) obrigará a uma boa escolha do gás de proteção e respetivo fluxo, de forma a evitar a contaminação do banho de fusão (como deverá ter ocorrido nos ensaios realizados, por exemplo, na **Figura 2.8. (a)**, onde se verifica que o cordão foi contaminado pelo oxigénio, tendo-se formado óxidos, de cor azul).

Por fim, para uma análise completa à liga à ainda a ter em conta as fases que podem compor a sua microestrutura, que variam de acordo com a temperatura atingida na deposição e com a taxa de arrefecimento – evolução em detalhe na **Figura 2.16**.



**Figura 2.16.** (a) Diagrama de fases do Ti-6Al-4V, e; (b) Diagrama com a transformação de fases de acordo com a velocidade de arrefecimento [14].

Ou seja, o Ti64 pode surgir em 2 tipos de estruturas,  $\alpha$  e  $\beta$ , ou numa mistura de ambas (*dual phase*  $\alpha+\beta$ ). Sabendo-se que fase se formará para uma determinada temperatura e taxa de arrefecimento, pode-se controlar o processo de forma a adaptar as propriedades da liga aos objetivos do componente, uma vez que, do estudo realizado por Galarraga *et al.*, e compilado nos esquemas da **Figura 2.17.**, é possível relacionar os valores de resistência à tração, tensão de cedência e deformação com as diferentes microestruturas que podem surgir, sendo possível escolher a microestrutura com as propriedades mais próximas do pretendido e adaptar os parâmetros de soldadura de forma a obter.



**Figura 2.17.** Valores de resistência à tração (*UTS*), tensão de cedência (*YS*) e deformação (*el*) para diferentes microestruturas da liga Ti-6Al-4V [14].

### 2.3.3. Revisão de Artigos de Investigação: CMT + Ti64

Nesta subsecção é apresentado, em resumo (**Tabela 2.1.** e **2.2.**), um conjunto de artigos de investigação em que foram estudadas as propriedades mecânicas de peças em Ti-6Al-4V produzidas por *CMT* [7], [46], [48]–[50]. O objetivo é que as tabelas apresentadas possam ser usadas, em trabalhos futuros, como ponto de partida para o processo de otimização inicial dos parâmetros de deposição.

**Tabela 2.1.** Tabela resumo dos artigos de investigação com os parâmetros utilizados.

| Artigo                              | Parâmetros           |             |            |                 |                |                             |
|-------------------------------------|----------------------|-------------|------------|-----------------|----------------|-----------------------------|
|                                     | Diâmetro do fio (mm) | WFR (m/min) | TS (m/min) | Gás de proteção | Fluxo (L/min.) | Arrefecimento entre camadas |
| Jian Gou <i>et al.</i> (2019) [7]   | 1,2                  | 7,0         | 0,3        | 99,99%Ar        | 20             | 120 seg.                    |
| Jian Gou <i>et al.</i> (2020) [46]  | 1,2                  | 8,0         | 0,25       | 99,99%Ar        | 20             | -                           |
| Z.W. Yang <i>et al.</i> (2021) [50] | 1,2                  | 7,5         | 0,12       | 99,99%Ar        | 15             | Até atingir os 50°C         |

**Tabela 2.2.** Tabela resumo com os resultados obtidos para o conjunto de parâmetros acima apresentados.

| Artigo                         | Propriedades            |            |                |           |            |
|--------------------------------|-------------------------|------------|----------------|-----------|------------|
|                                | Altura dos cordões (mm) | Direção    | Dureza (HV0.5) | UTS (MPa) | Strain (%) |
| Jian Gou <i>et al.</i> (2019)  | ≈ 4                     | -          | 350 ±22        | 1017      | 7,54       |
| Jian Gou <i>et al.</i> (2020)  | ≈ 4                     | Horizontal | 352            | 959       | 7,91       |
|                                |                         | Vertical   | -              | 1011      | 8,13       |
| Z.W. Yang <i>et al.</i> (2021) | -                       | Horizontal | -              | 918 ±29   | 8,0 ±0,53  |
|                                |                         | Vertical   | -              | 929 ±34   | 8,2 ±1,24  |

No entanto, para que estes resultados tenham algum significado necessitam de ser comparados com os valores obtidos pelos métodos convencionais ou pelos requisitos das indústrias em específico. Abaixo, na **Tabela 2.3.**, encontra-se um resumo das gamas de valores de propriedades mecânicas normalmente obtidas pelos métodos tradicionais, sendo possível concluir que os valores obtidos (e compilados na Tabela 2.2.) estarão dentro da gama aceitável para certas aplicações comerciais, pelo que os parâmetros da Tabela 2.1. poderão ser usados como consideração inicial para os primeiros testes de trabalhos futuros, sendo, no entanto, necessário controlar a anisotropia dos componentes, assim como defeitos internos e rugosidade superficial, que poderão ter um impacto não visível através da comparação aqui realizada.

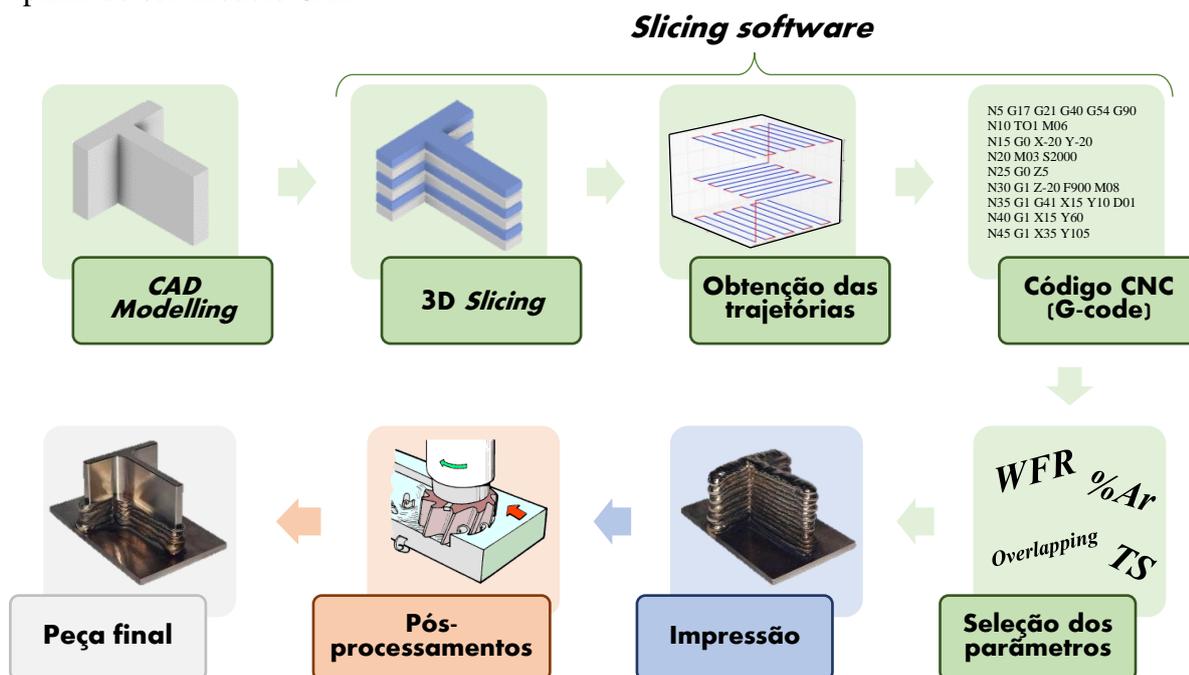
**Tabela 2.3.** Propriedades mecânicas obtidas por métodos convencionais para a liga Ti64.

| Técnica  |                              | Propriedades |           |            |             |
|--|------------------------------|--------------|-----------|------------|-------------|
|  |                              | UTS (MPa)    | YS (MPa)  | Strain (%) | Dureza (HV) |
| Forjamento (c/ tratamento térmico) [14]<br><i>Forged + mill annealed</i> |                              | 1006 / 1030  | 960 / 970 | 16 / 18,37 | -           |
| Moldação   | [14]                         | 875 / 980    | 750 / 865 | 4,5 / 13,5 | -           |
|  | (c/ tratamento térmico) [51] | 1100 - 1400  | -         | 1,2 - 4    | 360 - 425   |
| ASTM F136 [52]<br>(implantes cirúrgicos)                                 |                              | >860         | >795      | >10        | -           |

## 2.4. SISTEMA E PROCESSO DE IMPRESSÃO

### 2.4.1. Fases do Processo de Impressão

Por fim, falta fazer uma descrição das fases que compõem o processo *WAAM* [10], [35], resumidas na **Figura 2.18.**, e que permitem obter um determinado componente a partir do seu modelo *CAD*.



**Figura 2.18.** Fases do processo *WAAM*: a verde, o planeamento do processo; a azul, o processo de fabrico, e; a laranja, os possíveis pós-processamentos.

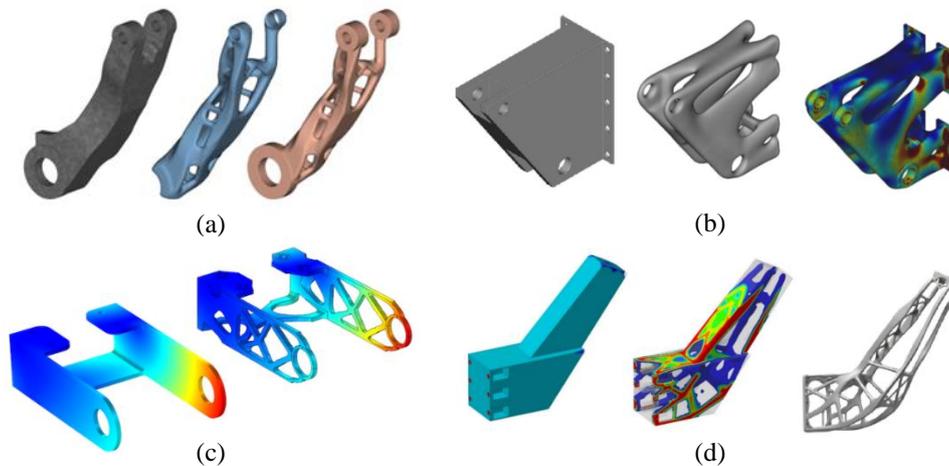
Assim, o processo começa com a (1) **obtenção do modelo *CAD-3D*** do componente que se pretende imprimir, que pode ser obtido de duas formas:

- a) Por desenho assistido por computador (*software CAD*), ou;
- b) Por um processo de ‘*reverse engineering*’, usando um *scanner 3D*:

normalmente usado quando se pretendem reproduzir peças ou objetos que já existem, mas dos quais não se contém o respetivo ficheiro *CAD*.

Após a obtenção do modelo 3D, e para se tirar total partido das vantagens associadas ao fabrico aditivo, pode ser realizado um processo de ‘*topology optimization*’ – exemplos na **Figura 2.19.** Este processo é particularmente importante para a produção de peças onde toda a massa não essencial à função do componente deve ser eliminada (por exemplo, no setor aeroespacial, espacial e automóvel), sendo realizado com recurso a

*software* especializado que requer, não só o modelo da peça original, bem como o conhecimento das restrições do sistema e das solicitações a peça estará sujeita [47], [53].



**Figura 2.19.** Exemplos de componentes sujeitos a *topology optimization* – peça original e otimizada: (a) Braço robótico (fabricado por moldação em areia, cujos moldes são obtidos por AM) [54]; Suporte estrutural: (b) [55] e (c) [56], e; (d) ‘Sentinel-1b Satellite antenna bracket’ [57].

Por fim, pode ainda ser necessário realizar alterações ao ficheiro *CAD* de forma a adaptar a peça ao processo de fabrico [19] (por exemplo, acrescentando zonas de suporte onde os *overhang angles* são muito acentuados, ou aumentando a escala de toda a peça para ter em conta o volume de material que será necessário remover por maquinagem).

A segunda fase do processo passa por inserir o modelo *CAD-3D* da versão final da peça (*STL file*) num *software de slicing* [10], [35] capaz de:

- (2) Converter o modelo 3D num conjunto de camadas 2D – **3D Slicing**;
- (3) Converter os *slices* num conjunto de pontos ordenados, a seguir na trajetória de deposição – **obtenção da trajetória** (*path planning*);
- (4) Transformar a trajetória obtida num ficheiro CNC (*G-code*), com informação sobre a posição geométrica de cada ponto da trajetória – **CNC code generation**.

O ficheiro com o *G-code* deverá, depois, ser inserido no software de controlo onde será realizada a (5) **seleção dos parâmetros de soldadura** que vão ser utilizados. À semelhança do que já foi falado na subsecção 2.2.4., estes poderão ser selecionados manualmente pelo operador ou, pode-se usar um sistema de seleção automática que, numa primeira fase fará uso de modelos de previsão para obter os parâmetros iniciais e, mais tarde, deverá ser capaz de usar a informação recolhida em tempo real pelo sistema de monitorização para ajustar esses parâmetros.

Assim, tendo-se os pontos a seguir pelo sistema cinemático (*G-code*) e os parâmetros a utilizar pelo sistema de soldadura, o planeamento do processo estará concluído, passando-se à (6) **impressão da peça**, onde a única coisa que pode ser feita são ajustes aos parâmetros usados (pelo sistema de monitorização e controlo – apresentado, em mais detalhe, a seguir).

Após a impressão da peça podem ainda ser realizados (7) **pós-processamentos** para melhorar a tolerância dimensional, eliminar a rugosidade superficial, melhorar as propriedades mecânicas, etc., obtendo-se, no fim, a peça final.

#### **2.4.2. Sistema de Monitorização e Controlo**

Da análise até aqui realizada pode-se concluir que um equipamento cujo princípio de funcionamento se baseie numa das técnicas *WAAM* deverá ser composto pelos elementos de trabalho e de controlo dos sistemas cinemático e de soldadura. Adicionalmente, é proposta na literatura analisada a incorporação dum sistema composto por um conjunto de sensores associados a um *software* de inteligência artificial, que permitirá a **monitorização *in-situ* e em tempo real** do sistema físico e controlará os parâmetros de deposição de forma contínua e automática (*'compensation strategy'*).

Este **sistema de controlo *in-the-loop*** é apresentado, em vários artigos, como uma solução para resolver os diversos problemas associados aos processos *WAAM*, uma vez que será capaz de: (1) fazer a seleção dos parâmetros iniciais, usando para isso modelos de previsão (com base em métodos físicos e matemáticos e, na informação recolhida em experiências anteriores); e (2) controlar os parâmetros em tempo real, fazendo-os variar de acordo com a informação recolhida de forma a se obterem peças sem defeitos e com boas propriedades mecânicas (por exemplo, reduzindo a adição de calor de forma a compensar distorções ou, variando o *WFR* e o *TS* para corrigir a geometria do cordão) [9], [10], [24] – conforme **Figura 2.20**.

Assim, será necessário associar ao sistema um conjunto de sensores que permitam a monitorização em contínuo dum vasto número de propriedades (realização de ensaios não destrutivos) ou parâmetros. Esses sensores podem ser do tipo:

1) **Térmico**: como câmaras ou sensores de infravermelhos, capazes de mapear a temperatura da peça. Estes permitirão obter a temperatura a que o metal é depositado, os gradientes térmicos sofridos durante o arrefecimento (*cooling rate*) e, mapear a temperatura

---

em toda a peça, de forma a identificar diferenças no seu comportamento térmico e relacioná-las com a existência de defeitos ou com a formação de diferentes fases.

Num controlo *in-the-loop* estes podem ainda ser usados para: (1) parar e recomeçar o processo quando determinados limites térmicos sejam atingidos; e (2) definir o tempo de arrefecimento entre camadas ao definir-se uma temperatura a partir do qual o sistema pode depositar a camada seguinte.

2) **Visual** ou **dimensional**: como câmaras ou *scanners laser 3D*, que permitem fazer medições: ao tamanho do banho de fusão, à altura e largura dos cordões depositados, à distância da ponta do elétrodo à zona de deposição e, à quantidade de projeções formada.

Para um controlo *in-the-loop* os *scanners* são mais indicados do que as câmaras (visuais), uma vez que as mesmas recolhem muito mais informação, que demoraria muito tempo a processar, causando um *lag effect* no controlo dos parâmetros. Portanto, estas são mais indicadas para recolher informação a processar posteriormente, como a morfologia das camadas depositadas e da superfície da peça (por exemplo, defeitos superficiais), que pode depois ser utilizada pelo sistema de aprendizagem do *software* de controlo.

Por outro lado, existem ainda autores que propõem o uso de *optical emission spectroscopy* para identificar a transformação de fases na microestrutura dos cordões depositados [24].

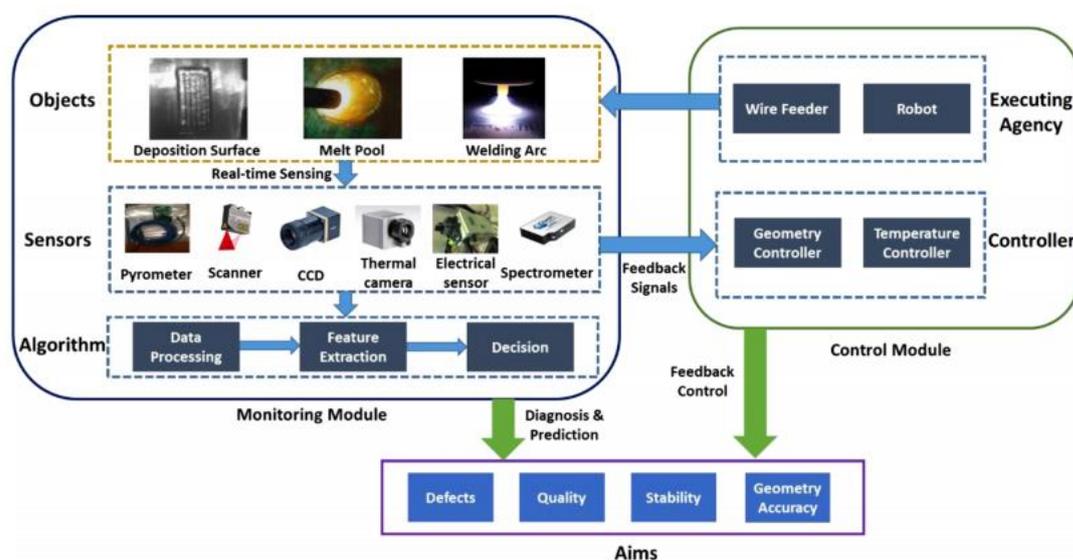
3) **Sonoro**: como microfones. A produção de som nos processos de soldadura por arco elétrico tem múltiplas fontes: o arco elétrico, o gás de proteção, o equipamento de soldadura e fenómenos decorrentes da formação de defeitos internos; assim, alguns autores argumentam que será possível retirar correlações entre a variação de certos parâmetros e fenómenos (como a oscilação do arco), com as emissões sonoras [20]. Estas correlações também poderão ser estabelecidas de forma a detetar a formação de defeitos, como fraturas, respetiva posição na peça e direção de propagação, assim como avaliar as tensões residuais e nível de porosidade interna [24].

Para além disso, poder-se-á também usar *acoustic spectroscopy* para mapear a microestrutura dos cordões depositados [10].

Por sua vez, os parâmetros elétricos não requerem a adição de sensores adicionais uma vez que os mesmos podem ser recolhidos a partir do sistema de soldadura.

Assim, estes sensores deverão ser todos conectados ao sistema de monitorização e controlo, que processará a informação recolhida pelos mesmos, permitindo ao *software* adquirir conhecimento sobre a relação entre um determinado conjunto de parâmetros e os defeitos detetados ou a geometria do cordão. À medida que o número de impressões for aumentando (e usando-se diferentes conjuntos de parâmetros), o *software* acumulará informação que poderá usar para otimizar o modelo de previsão usado na obtenção dos parâmetros iniciais e o processo de variação dos parâmetros em contínuo, de forma a que se possam obter peças sem defeitos nas futuras impressões [9], [35].

Por outro lado, e como nenhum sistema é infalível, se for detetado um defeito que não foi possível evitar, o mesmo deverá ser capaz de: (1) parar o fabrico do componente e descartar a peça, evitando o desperdício de mais recursos, ou; (2) usar processos subtrativos para eliminar a parte do componente com defeito e retomar o processo de fabrico no início da zona removida, tornando os desperdícios de matéria-prima mínimos [10], [24].

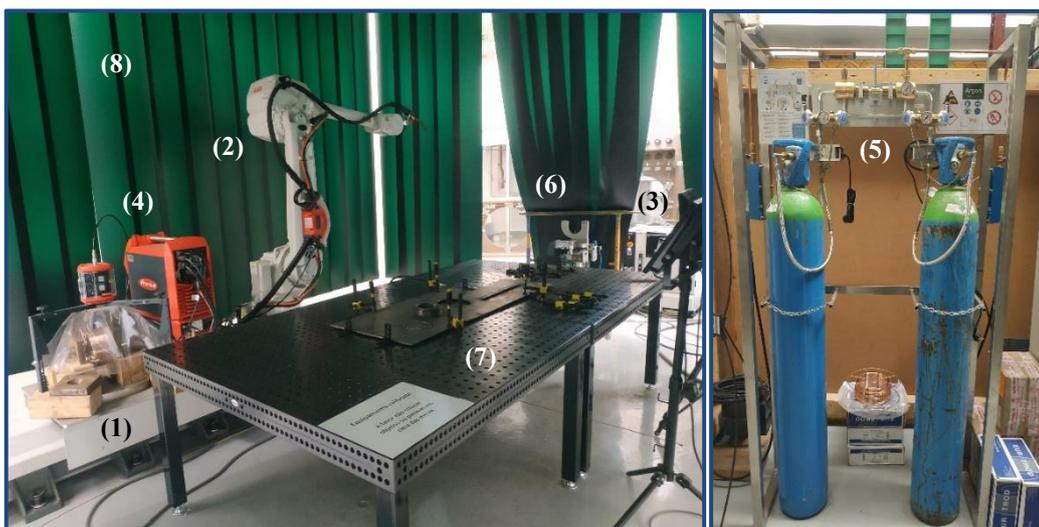


**Figura 2.20.** Funcionamento ‘idealizado’ duma estação de monitorização e controlo *in-the-loop* [24].

### 3. SISTEMA: COMPOSIÇÃO E FUNCIONAMENTO

O sistema desenvolvido para o processo de impressão (**Figura 3.1.**) faz parte do projeto AMConstruction – *Additive Manufacturing in Steel Construction*, uma iniciativa que reúne os esforços do *Centre for Mechanical Engineering, Materials and Processes (CEMMPRE)* e do *Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering (ISISE)* – e é composto por:

- a) Sistema cinemático:
  - i. Trilha linear (5 metros): **(1) ABB® IRBT 2005**;
  - ii. Robô de 6 eixos: **(2) ABB® IRB 4600**;
  - iii. Controlador: **(3) ABB® IRC5**;
- b) Sistema de soldadura: **(4) FRONIUS® TPS 400i CMT Advanced**;
- c) Componentes auxiliares:
  - i. Sistema de armazenamento e distribuição do gás de proteção **(5)**;
  - ii. Sistema de calibração e limpeza da tocha de soldadura: **(6) ABB® BullsEye**;
  - iii. Mesa de trabalho para fixação do substrato (3 x 1,5 metros) **(7)**, e;
  - iv. ‘Câmara’ de isolamento da zona de fabrico **(8)**.

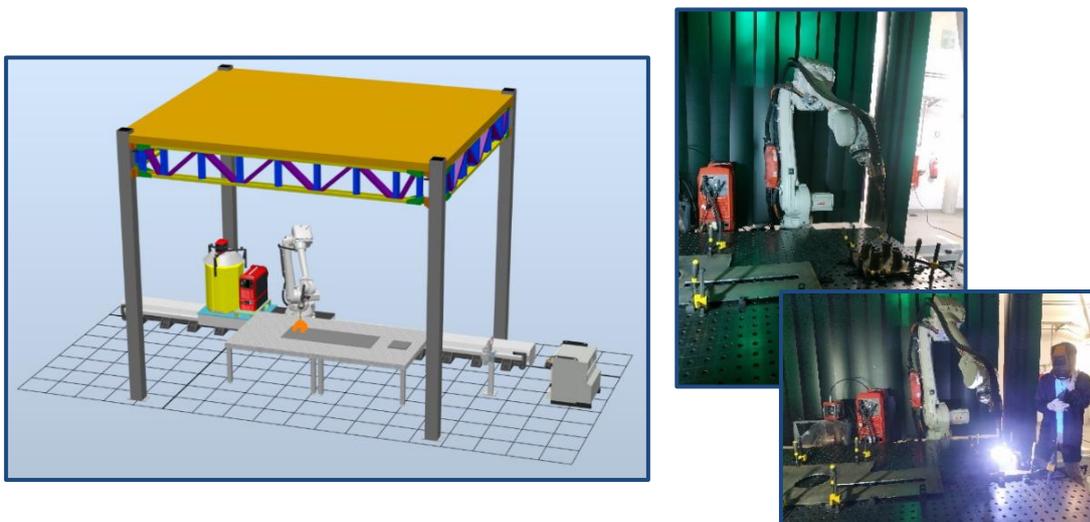


**Figura 3.1.** ‘Sistema real’ desenvolvido para o fabrico aditivo por CMT, composto pelos sistemas cinemático (1-3), de soldadura (4) e componentes auxiliares (5-8).

Assim, o sistema cinemático (1-3) é responsável por manipular a tocha de soldadura, permitindo que a mesma siga a trajetória de deposição. Esta, por sua vez, faz parte do sistema de soldadura (4), que é responsável por fornecer o fio do material a depositar e a energia térmica capaz de o fundir, assim como o gás de proteção – armazenado em sistema auxiliar (5) – que protege o banho de fusão de reações não controladas com a atmosfera. Este é ainda complementado por (6), sistema de calibração e limpeza da tocha, que permite cortar a ‘ponta’ do elétrodo consumível, eliminando possíveis contaminações do metal de adição, e limpar o bico da tocha, e; por (8), câmara de isolamento e sistema de extração da atmosfera interior, que protege a atmosfera externa dos gases de proteção (prejudiciais ao operador) e, da luminosidade e calor gerados na deposição.

Por fim, o sistema é ainda composto pela mesa de trabalho, (7), que permite uma fixação precisa do substrato, eliminando movimentações devido às forças aplicadas pelo sistema cinemático que poderiam causar desvios na trajetória. De ter em conta que o sistema de soldadura deve estar ligado ao substrato, através de fio de transmissão de corrente elétrica, de forma a completar o circuito e permitir a soldadura (por arco elétrico).

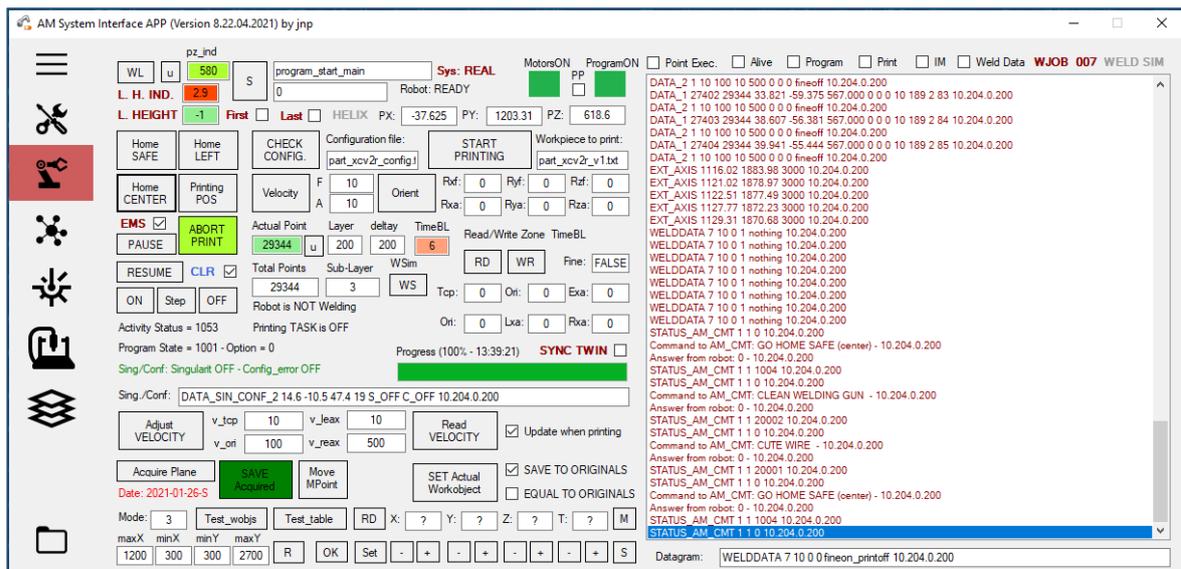
Em complemento ao ‘**sistema físico**’ acima apresentado, foi desenvolvido um sistema idêntico em ambiente virtual, ou seja, um ‘*digital twin*’ criado em RobotStudio®, o ambiente de programação da ABB® – **Figura 3.2**. Este sistema pode ser usado para: (1) programar os componentes do sistema cinemático (trilha linear e robô manipulável); (2) simular a trajetória de deposição antes da impressão, de forma a detetar possíveis problemas com o processo (como problemas na trajetória, colisões e singularidades na configuração



**Figura 3.2.** À esquerda, ‘*digital twin*’ do sistema desenvolvido, e; à direita, o ‘sistema real’ em fase idêntica de fabrico.

dos eixos do robô) e corrigi-los, evitando que ocorram (e causem danos) no sistema físico, e; (3) funcionar em paralelo com o ‘sistema real’, de forma a permitir que o operador siga a impressão sem a necessidade de olhar diretamente para o sistema físico (devido aos problemas associados com a inalação dos gases protetores e, ao excessivo calor e luminosidade gerados).

Para o controlo do sistema físico e virtual foi desenvolvido um *software* pelo Prof. Dr. Norberto Pires, orientador desta dissertação, em C Sharp (C#), no VisualStudio® da Microsoft® – **Figura 3.3.** Este painel de controlo, apelidado de ‘AM System Interface APP’, é capaz de enviar comandos para os componentes do sistema físico e para o ambiente de simulação virtual, assim como receber informações sobre o processo de impressão, de forma automática e periódica, ou a pedido do operador – o seu desenvolvimento e funcionamento é explicado em mais detalhe nos artigos publicados pelo mesmo: [5], [58], [59], etc.



**Figura 3.3.** APP desenvolvida para controlar o sistema de impressão (real e virtual).

Em resumo, será a partir desta APP que todo o processo de fabrico será controlado, começando-se pela (1) introdução do ficheiro CAD da peça que se pretende imprimir (*STL file*), no painel de controlo, que o enviará e abrirá no (2) programa de slicing. Neste caso, usou-se o Slic3r®, um “*open source 3D printing toolbox*” [60], que corta em *slices* o modelo 3D da peça (mediante a introdução da espessura do cordão) e converte-os em pontos ordenados (mediante a seleção da estratégia de deposição e, doutras opções, como por exemplo, a escolha do ponto inicial da trajetória de cada camada, que pode ter uma

posição aleatória, permitindo dispersar os pontos iniciais da impressão pela peça, ou fixa), gerando-se, por fim, um ficheiro em linguagem *G-code*.

Uma vez que o programa utilizado foi desenvolvido para o fabrico aditivo de peças poliméricas, podem surgir alguns problemas na trajetória de impressão, já que os métodos tem características diferentes, para além do comportamento do material em deposição ser diferente – no caso dos polímeros, este é derretido, mas o fio não se separa, pelo que o material a depositar estará ligado à parte da peça já impressa; já no *CMT* o fio separa-se em gotículas, pelo que a parte já depositada não auxiliará no processo de suporte e direcionamento do material em deposição. Deste modo, de forma a (3) corrigir os pontos da trajetória que o operador não considere adequados para este modo de impressão, foi adicionada à *APP* um programa que permite ver todos os pontos, camada a camada, e eliminar do *G-code* aqueles que se entendam ser desnecessários.

Este '*G-code* corrigido' é depois (4) convertido (pela *APP*) em código legível pelo sistema cinemático, ou seja, é convertido num conjunto de linhas com as coordenadas de cada ponto da trajetória e respetivas velocidades e ângulos da tocha nesses pontos (*XML file*)– considerando-se as velocidades e os ângulos inicialmente iguais a zero. Por sua vez, este novo ficheiro pode ter os (5) ângulos da tocha alterados, usando-se para isso um programa desenvolvido em MATLAB<sup>®</sup> que permite selecionar determinadas zonas ou secções da peça e alterar os ângulos em todos os pontos dessa área, ou, em opção, pode-se deixar o ficheiro intacto e alterar os ângulos diretamente no painel de controlo durante o processo de fabrico, para determinadas camadas, e de acordo com o que o operador visualizar em tempo real.

Tendo-se obtido o ficheiro final com coordenadas e ângulos da tocha para cada ponto da trajetória, será necessário (6) selecionar os parâmetros de soldadura a usar no processo de fabrico (*WFR, TS, etc.*), o que permitirá incorporar a velocidade da tocha no código a enviar ao sistema cinemático e configurar o sistema de soldadura. Neste caso, deverá ser criada uma base de dados com os parâmetros utilizados em experiências anteriores e respetivas propriedades mecânicas (para cada liga), de forma a que esta informação possa ser usada para auxiliar o processo de seleção dos parâmetros em impressões futuras. No entanto, no futuro, com a incorporação de sensores no sistema, deverá ser possível integrar um sistema de monitorização e controlo *in-the-loop* na *APP*, pelo que a seleção dos

parâmetros iniciais e a sua variação ao longo do processo serão feitos de forma automática (ou seja, sem intervenção humana, conforme já mencionado em 2.4.2.).

Assim, faltará apenas (7) indicar as coordenadas do ponto central da zona onde ocorrerá a impressão, para que o processo de preparação esteja finalizado e se possa depositar o metal. Antes de se iniciar o processo de impressão esta é, no entanto, simulada no ambiente virtual desenvolvido em RobotStudio, para verificação final em fase de pré-impressão.

Após verificação final, o processo de fabrico é iniciado, pelo que a *APP* passará a enviar informação sobre as coordenadas, velocidades e ângulos em cada ponto a seguir pelo sistema cinemático, assim como ordens do operador (como indicação de limpeza e calibração da tocha de soldadura, paragem forçada para verificação de uma determinada situação ou para arrefecimento das camadas depositadas, etc.) – mensagens de comando implementadas como *'TCP/IP client socket messages'*<sup>7</sup>. Por outro lado, a mesma receberá respostas dos diferentes componentes do sistema, ou de forma automática e periódica, ou a pedido do operador – mensagens de eventos implementadas como *'UDP/IP client messages'*<sup>8</sup>.

Após o fim da deposição obter-se-á uma peça *near-net-shape* que terá de passar por um processo de maquinagem, de forma externa, para remover a rugosidade superficial; no entanto, o objetivo deste projeto é no futuro incorporar a maquinagem no processo produtivo (intercalado com o fabrico aditivo). Ou seja, este é um sistema ainda em fase de desenvolvimento que há medida que mais investigação for realizada irá avançar para um sistema automatizado em que apenas será necessário fornecer o ficheiro *CAD* da peça que se pretende obter, o material a usar e as propriedades mecânicas pretendidas, para ser possível produzir o componente com boas propriedades mecânicas e, sem intervenção do operador. Na **Figura 3.4.** apresenta-se o conceito idealizado para o sistema com a identificação de todas as fases que o compõem.

---

<sup>7</sup> O **TPC (Transmission Control Protocol)** é um protocolo de transmissão de dados que garante a receção de toda a informação na ordem exata pela qual é transmitida. Para isso, faz uso dum sistema de sequenciamento de dados e requer o envio duma mensagem de retorno (ao servidor) para que o mesmo reconheça que a informação foi rececionada; se o servidor não receber nenhuma mensagem, faz a retransmissão dos dados.

<sup>8</sup> Por sua vez, quando a prioridade é a velocidade com que a informação é transmitida e não a garantia de que toda a informação chega ao cliente e, na ordem com que foi transmitida, usa-se o protocolo **UDP (User Datagram Protocol)**. Este tem uma menor fiabilidade na transmissão, uma vez que pode implicar que parte da informação se perca, chegue de forma aleatória ou se repita [72].

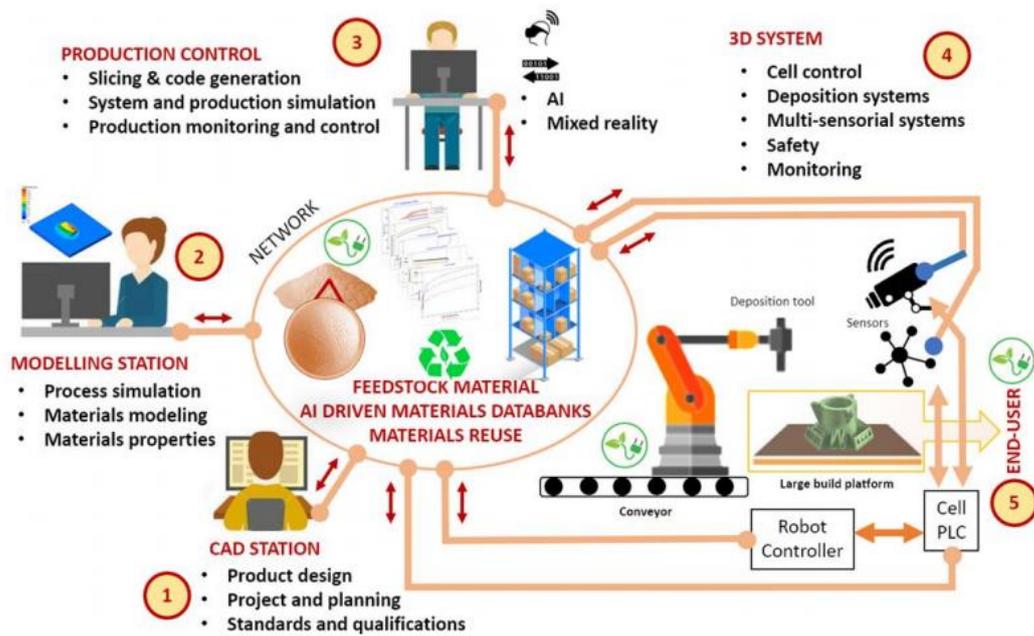


Figura 3.4. Conceito do Projeto 'AMConstruction' onde este trabalho se engloba, com a representação das diferentes fases/estações a serem disponibilizadas no sistema [59].

## 4. MATERIAIS, MÉTODOS E RESULTADOS

### 4.1. MATERIAL: FIO, SUBSTRATO E GÁS DE PROTEÇÃO

O procedimento experimental foi realizado com recurso ao **fio de soldadura** de aço-carbono AWS A5.18 ER70S-6<sup>9</sup> – ‘*copper-coated mild steel wire*’ – da EuroTrod<sup>®</sup>, com 1,0mm de diâmetro e uma composição elementar apresentada em detalhe na **Tabela 4.1**. Segundo o fabricante, este tem uma tensão de cedência de 420MPa, uma resistência à tração de 520MPa e uma deformação máxima superior a 30% [61].

A escolha desta classe de aços-carbono para realizar os primeiros testes ao sistema prende-se com a sua composição, uma vez que as concentrações mais altas de manganês (Mn) e silício (Si) permitem desoxidar o substrato [62] e o revestimento de cobre retarda a oxidação do fio [63] (diminuindo a possibilidade de se gerarem defeitos nos cordões depositados por contaminação dos materiais).

**Tabela 4.1.** Requisitos da AWS para a composição elementar (em %wt.) do aço A5.18 ER70S-6 [64].

|        | <b>C</b> | <b>Mn</b> | <b>Si</b> | <b>P</b> | <b>S</b> | <b>Ni</b> | <b>Cr</b> | <b>Mo</b> | <b>V</b> | <b>Cu</b> |
|--------|----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|
| % min. | 0,06     | 1,40      | 0,80      | -        | -        | -         | -         | -         | -        | -         |
| % máx. | 0,15     | 1,85      | 1,15      | 0,025    | 0,035    | 0,15      | 0,15      | 0,15      | 0,03     | 0,5       |

Por sua vez, foram usados dois tipos de **substratos** dum aço geral, um com 5 mm de espessura e outro com 20 mm, utilizado apenas como suporte da deposição, sendo removidos após impressão (pelo que as suas propriedades mecânicas não são relevantes). O substrato com menor espessura foi inicialmente adquirido e usado nos primeiros testes, no entanto, como a distorção térmica obtida foi bastante elevada, optou-se por usar um substrato de maior espessura para a impressão das peças de comprovação de conceito.

Como **gás de proteção** é utilizada uma mistura composta por 98% de argon (Ar) e 2% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), uma vez que, devido às altas temperaturas necessárias

<sup>9</sup> O aço-carbono AWS A5.18 ER70S-6 é, segundo o fabricante: “um fio sólido cobreado para a soldadura de aços de construção correntes, pode ser usado num vasto leque de aplicações. Boas características mecânicas. Construção metálica em geral; estruturas; navios; pontes; reservatórios; etc.” [61].

para fundir o fio de soldadura, o ambiente da deposição será altamente reativo, pelo que é necessária uma alta concentração de árgon (gás inerte) para inibir as reações com a atmosfera; no entanto, existe uma pequena concentração de dióxido de carbono, uma vez que, como indicado pela Fronius<sup>®</sup>, o processo *CMT* requer o uso deste gás de proteção para permitir que se obtenha “*extremely low spattering: -99% spatter*” [41].

## 4.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E RESULTADOS

A primeira fase do procedimento experimental passou pela **otimização inicial dos parâmetros de soldadura**, ou seja, partindo-se dos intervalos de parâmetros sugeridos pela própria Fronius<sup>®</sup> (fornecedora do equipamento de soldadura) e pelos fornecedores do aço em questão [65]–[69] – **Tabela 4.2.** –, imprimiu-se uma série de amostras com diferentes conjuntos de parâmetros (*WFR* e *TS*) até se obterem cordões estáveis e com aspeto satisfatório.

**Tabela 4.2.** Conjunto de parâmetros para o processo de soldadura *GMAW* pelo modo de transferência por curto-circuito, sugeridos por diferentes fornecedores para um fio de AWS A5.18 ER70S-6 com um diâmetro de  $\pm 1$  mm.

| Referência | Diâmetro            | <i>WFR</i><br>(m/min.) | Voltagem<br>(V) | Corrente<br>(A) | <i>TS</i>                  | Gás de<br>proteção       |
|------------|---------------------|------------------------|-----------------|-----------------|----------------------------|--------------------------|
| [65]       | 0,035in<br>(0,9mm)  | -                      | 16-25           | 60-235          | 11-40ipm<br>(4,7-16,9mm/s) | 98%Ar+2%O <sub>2</sub>   |
|            | 0,045in<br>(1,14mm) | -                      | 18-23           | 90-290          | 12-22ipm<br>(5,1-9,3mm/s)  |                          |
| [66]       | 0,035in             | -                      | 15-18           | 100-160         | -                          | -                        |
|            | 0,045in             | -                      | 17-18           | 100-120         | -                          |                          |
| [67]       | 0,035in             | -                      | 16-20           | 140-200         | -                          | 75%Ar+25%CO <sub>2</sub> |
|            | 0,045in             | -                      | 18-30           | 160-280         | -                          |                          |
| [68]       | 0,9mm               | 2,5                    | 18              | 80              | -                          | 100%CO <sub>2</sub>      |
|            |                     | 3,8                    | 19              | 120             |                            |                          |
|            |                     | 6,4                    | 22              | 175             |                            |                          |
|            | 1,2mm               | 3,2                    | 19              | 145             | -                          |                          |
|            |                     | 3,8                    | 20              | 165             |                            |                          |
| 5,1        | 21                  | 200                    |                 |                 |                            |                          |
| [69]       | 0,035in             | -                      | 22-25           | 100-140         | -                          | 100%CO <sub>2</sub>      |
|            | 0,045in             | -                      | 23-26           | 120-150         | -                          | 75%Ar+25%CO <sub>2</sub> |

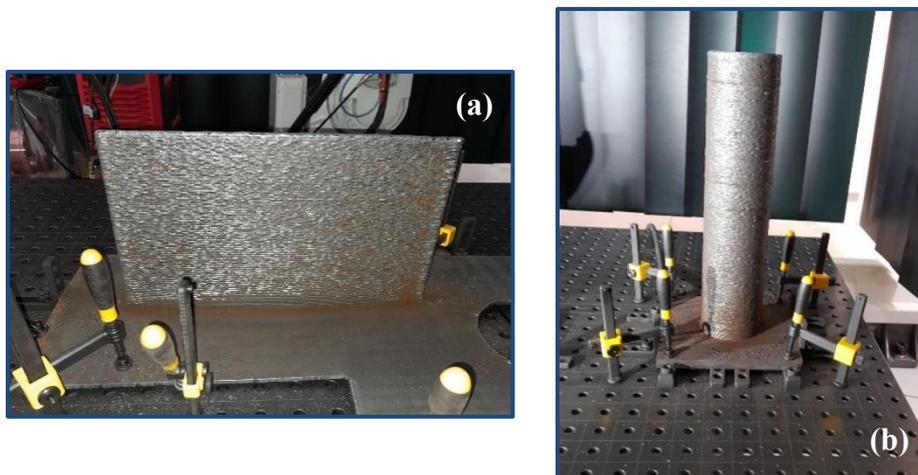
Destes testes foi possível concluir que, para esta liga, se obtém uma boa deposição para o conjunto de parâmetros apresentado na **Tabela 4.3.**; para além disso, foi ainda possível determinar que, para o conjunto de parâmetros utilizados, as camadas

depositadas terão uma altura de aproximadamente 3mm e uma largura de 2,5mm – valores essenciais para o processo de *slicing*.

**Tabela 4.3.** Conjunto de parâmetros de soldadura obtidos a partir do processo de otimização inicial.

|   |          |
|---|----------|
| Velocidade da tocha ( <i>TS</i> )                         | 10mm/s   |
| Velocidade de alimentação do fio ( <i>WFR</i> )           | 6m/min.  |
| Parâmetros dependentes do <i>WFR</i> & material:          |          |
| - Intensidade da corrente                                 | 155A     |
| - Voltagem  | 15,7V    |
| Distância do bocal da tocha à peça ( <i>'stick out'</i> ) | 15mm     |
| Arrefecimento entre camadas ( <i>CT</i> )                 | 5s       |
| Fluxo de gás de proteção (98%Ar+2%CO <sub>2</sub> )       | 10l/min. |

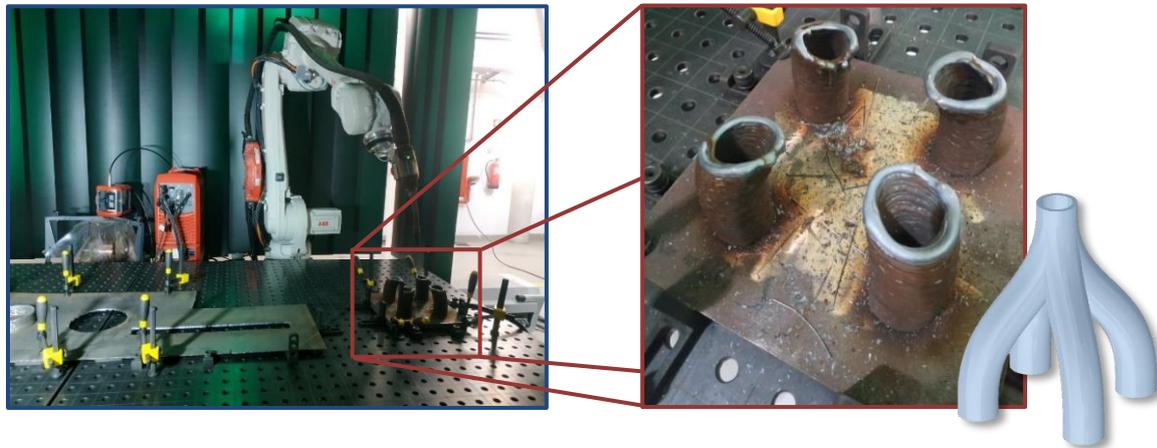
Com os parâmetros otimizados, foram fabricadas algumas peças de baixa complexidade geométrica, nomeadamente, uma parede e um cilindro (oco), conforme **Figuras 4.1. (a)** e **(b)**. Estas peças são consideradas simples uma vez que as camadas se encontram sempre 100% sobrepostas (ou seja, não existem *overhang angles*), pelo que se pode usar um ângulo de tocha nulo (ou seja, perpendicular à direção do movimento).



**Figura 4.1.** (a) Parede com 480x300x6mm, e; (b) Cilindro oco com  $\varnothing 140 \times 500 \times 6$ mm.

Após esta fase de impressão de peças mais simples, e uma vez que uma das vantagens do processo é a sua flexibilidade geométrica, passou-se para a fase de estudo e fabrico de peças com *overhang angles*. Foi neste ponto que os verdadeiros problemas começaram a surgir e é a fase que será apresentada em mais detalhe, abordando-se as fases de preparação (pré-impressão), os problemas encontrados e soluções desenvolvidas e, a própria impressão.

Este não foi um processo linear, mas sim algo iterativo, de tentativa e erro. Abaixo, na **Figura 4.2.**, apresenta-se uma das primeiras tentativas realizadas.

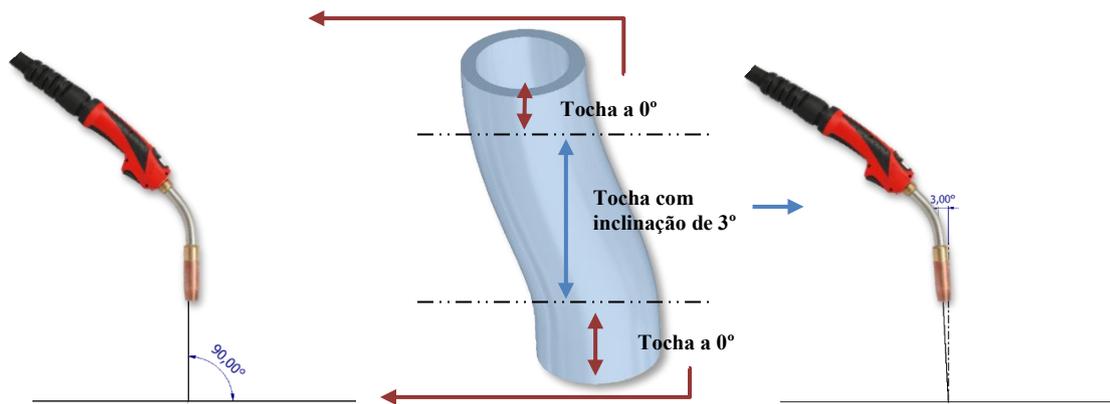


**Figura 4.2.** Primeira peça com *overhang angles* e respetivo modelo CAD.

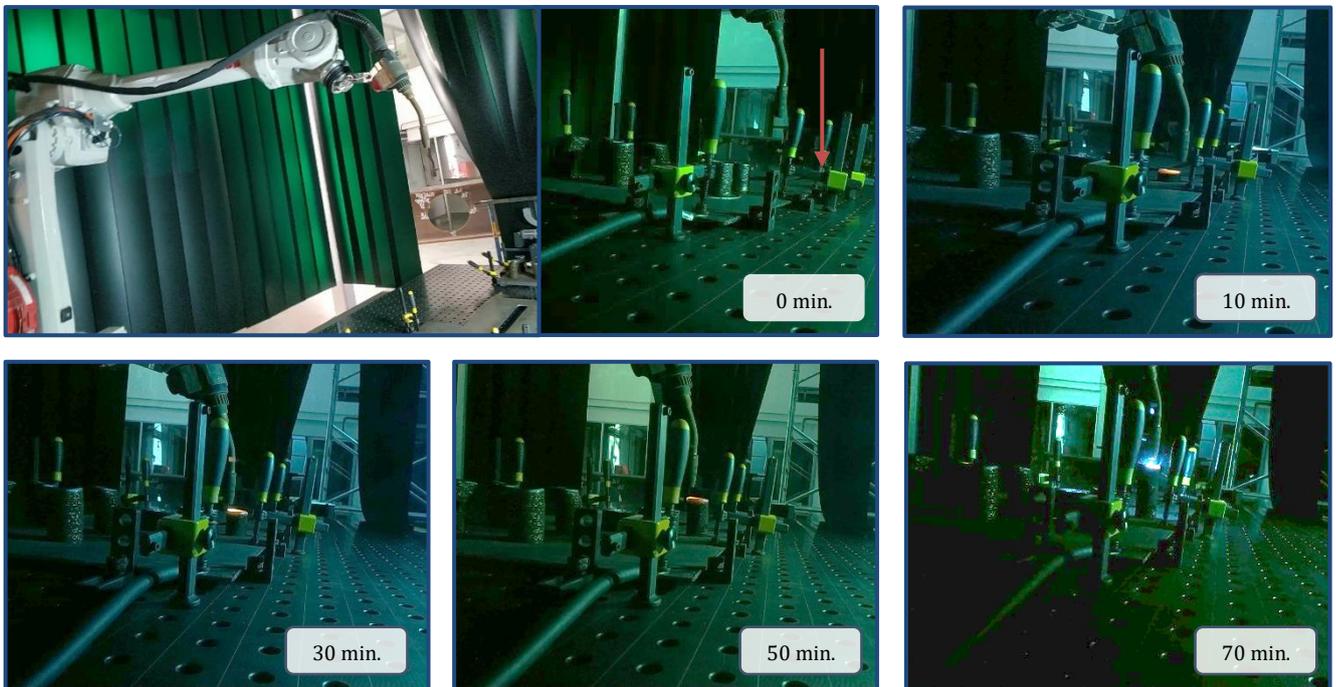
Como neste caso existem camadas com material que se estende para fora da camada inferior, não sendo 100% suportadas, a primeira tentativa de impressão, realizada com uma orientação de tocha com ângulo nulo, tornou a impressão instável, originando um maior número de projeções e acabando por gerar a falha da impressão. Assim, foi necessário repetir o processo para a mesma peça, desta vez com uma orientação da tocha com um ângulo de  $10^\circ$ , (sempre) no sentido da camada inferior, que voltou a originar falhas na impressão.

Uma vez que a solução proposta na literatura para o problema em análise se baseia na imposição de um ângulo de tocha, assumiu-se que o ângulo usado era excessivo, pelo que se voltou a repetir o processo com um ângulo de  $3^\circ$ ; desta vez imprimiu-se apenas uma das “pernas” da peça, de forma a poupar matéria-prima, tendo sido possível concluir a impressão sem problemas – *frames* da sequência da impressão na **Figura 4.4.** e peça final na **Figura 4.5.**

Ou seja, neste caso, como as primeiras camadas da peça estão perfeitamente alinhadas (100% sobrepostas), iniciou-se o processo com um ângulo nulo na tocha, tendo-se passado para um ângulo de  $3^\circ$  quando a inclinação começou, e voltado a colocar o ângulo a zeros quando voltou a ter as camadas perfeitamente alinhadas – conforme **Figura 4.3.** Esta alteração foi feita manualmente pelo operador, durante a impressão, na interface da *APP*.



**Figura 4.3.** Modelo CAD da peça fabricada e diferença na orientação da tocha tendo em conta os diferentes *overhang angles* (zonas 100% sobrepostas vs. zonas com inclinação).



**Figura 4.4.** Frames da sequência de impressão da primeira peça com *overhang angles* cuja impressão foi bem-sucedida (tempo de impressão:  $\pm 75$  minutos).



**Figura 4.5.** Cilindro (oco) inclinado: (a) peça segundos após o fim da impressão, e; (b) peça após limpeza da superfície.

Como se pode verificar na **Figura 4.5.** a superfície da peça momentos após a impressão encontra-se oxidada, pelo que será necessário encontrar uma solução que permita proteger os cordões no processo de solidificação até atingirem a temperatura ambiente (atualmente, o gás de proteção só protege o banho de fusão).

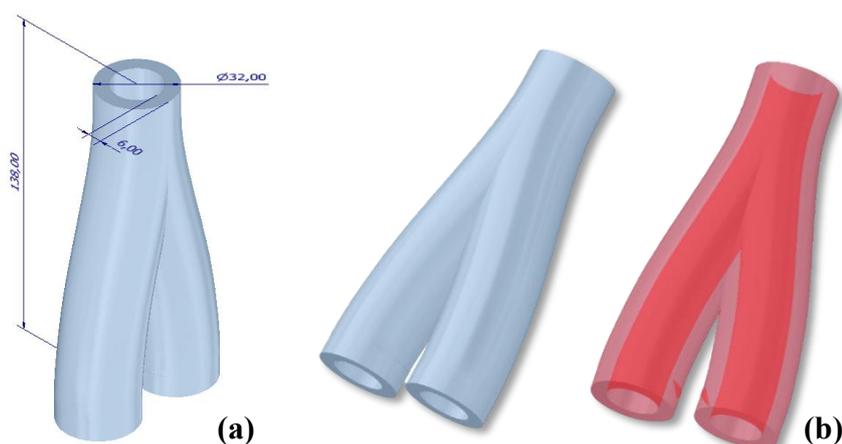
Apesar disso, tendo a impressão acima apresentada sido concluída com êxito, procedeu-se ao fabrico de duas peças de comprovação de conceito. Abaixo apresentam-se os passos que levaram à impressão das peças nº 1 e nº2.

#### 4.2.1. Peça nº1 (Tubos interconectados)

##### 4.2.1.1. Modelo CAD

O primeiro passo no processo de fabrico de qualquer peça passa pela obtenção do seu ficheiro *STL* a partir do respetivo modelo *CAD*.

Assim, a primeira peça de comprovação de conceito (**Figura 4.6.**) foi obtida por desenho assistido por computador, usando-se para isso o Inventor<sup>®</sup>. Com esta peça pretende-se dar continuação ao estudo de peças de maior complexidade geométrica com destaque para a zona de conexão dos dois tubos que deverá apresentar uma trajetória de difícil impressão, ou seja, procura-se dar foco aos problemas encontrados no sentido de desenvolver novas soluções para resolver esses problemas.



**Figura 4.6.** Modelo *CAD* da peça nº1: (a) vista com cotas (em milímetros), e; (b) outras vistas – normal e com secções internas.

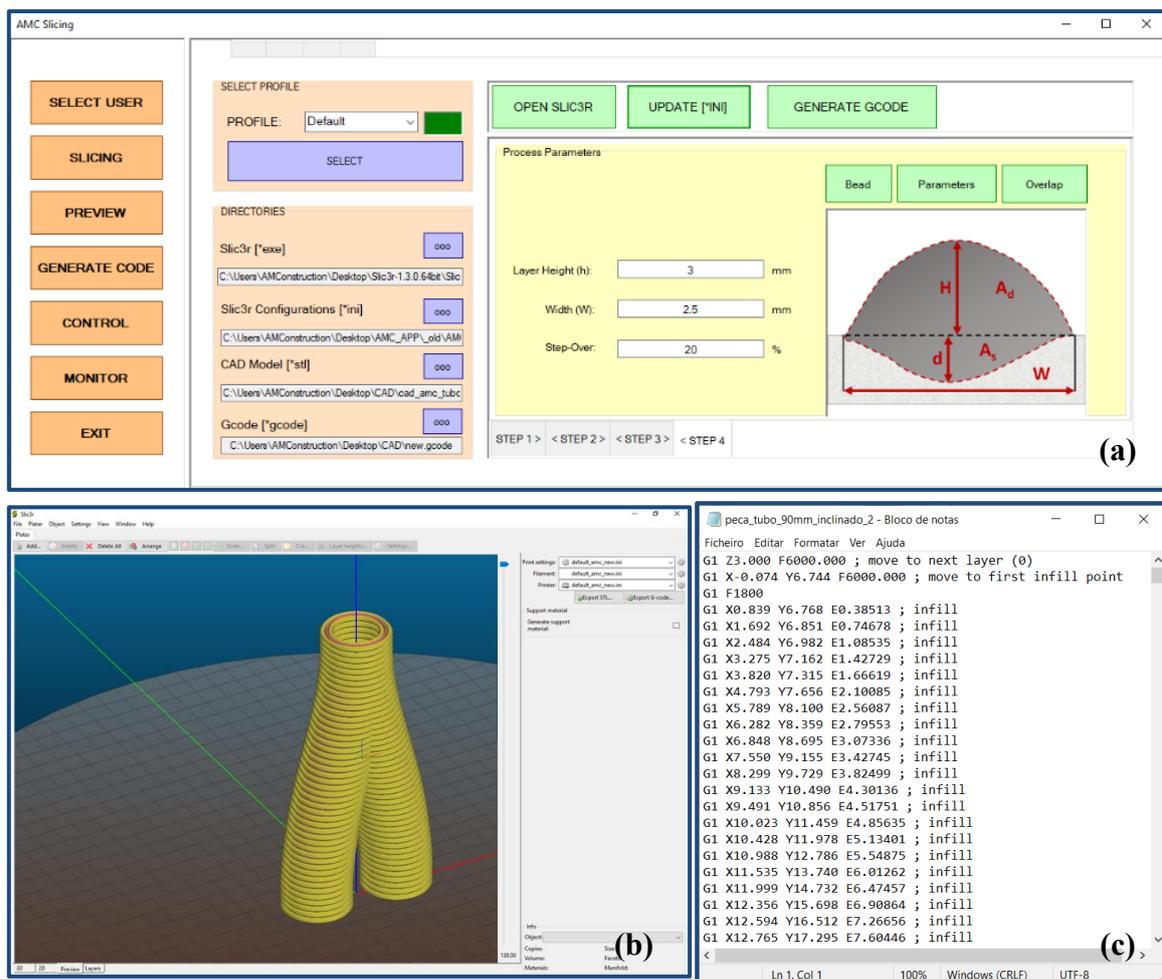
##### 4.2.1.2. Slicing e Obtenção do G-code

A segunda fase do processo de preparação pré-impressão passa por inserir o ficheiro *STL* no programa de *slicing* – o Slic3r<sup>®</sup>. Uma vez que este programa foi

desenvolvido para aplicação em polímeros, de modo a adaptar e simplificar o processo de *slicing*, foi desenvolvida uma aplicação em C# pelo Investigador Carlos Zhu que se foca apenas nos parâmetros relevantes para este tipo de processo produtivo.

Assim, usaram-se os parâmetros obtidos no processo de otimização inicial e experiências anteriores, nomeadamente, indicou-se que o cordão teria uma altura de 3mm e uma largura de 2,5mm. Para a definição do tipo de trajetória indicou-se que a mesma deverá ser composta por 2 perímetros – que fazem o contorno interno e externo dos tubos (a amarelo) – mais o padrão interno (a rosa).

Neste caso, como a espessura das paredes é relativamente fina quando comparada com a espessura do cordão, o padrão interno será composto apenas por uma linha, no entanto, para peças de maior espessura podem-se usar vários tipos de trajetórias (exemplos na **Figura 2.9.**). Os perímetros são particularmente importantes nesses casos uma vez que garantirão que a geometria da superfície é a mais próxima possível do modelo *CAD* original.

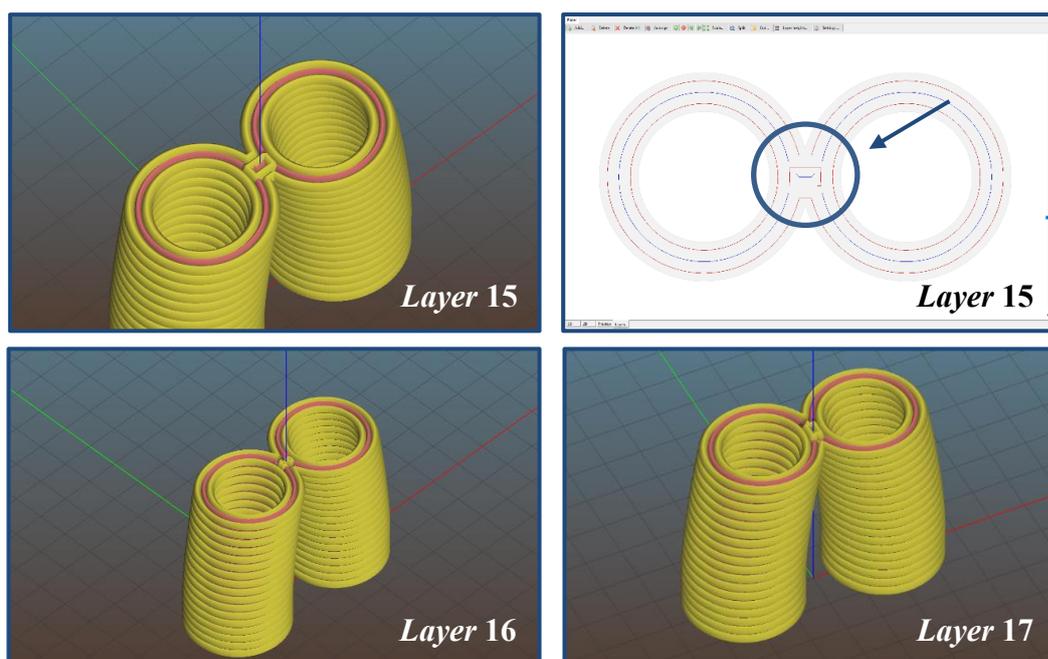


**Figura 4.7.** (a) Aplicação desenvolvida para adaptar o Slic3r® à impressão de metais; (b) *slicing* da peça nº1 (no Slic3r®), e; (c) G-code gerado.

Assim, como é possível ver na **Figura 4.7.**, o processo inicia-se pela introdução dos parâmetros na aplicação ‘*AMC Slicing*’ que abrirá a peça no Slic3r®. Após abertura no programa de *slicing* é necessário verificar a trajetória de cada camada, sendo possível fazer alterações aos parâmetros de entrada para melhorar a trajetória obtida; este é um processo iterativo de tentativa e erro, que requer a experiência do operador para seleccionar a melhor trajetória. Uma vez obtida uma trajetória aceitável, gera-se o ficheiro com o *G-code* (*TXT file*).

#### 4.2.1.3. Correção da trajetória (*G-code*)

Como mencionado no ponto inicial, o interesse desta peça encontra-se no estudo da zona de união dos dois tubos. Ora, do *slicing*, é possível verificar que as trajetórias na zona de união – camadas 15 a 19 – apresentam trajetórias complexas (exemplos na **Figura 4.8.**), que geraram a falha na primeira tentativa de impressão.

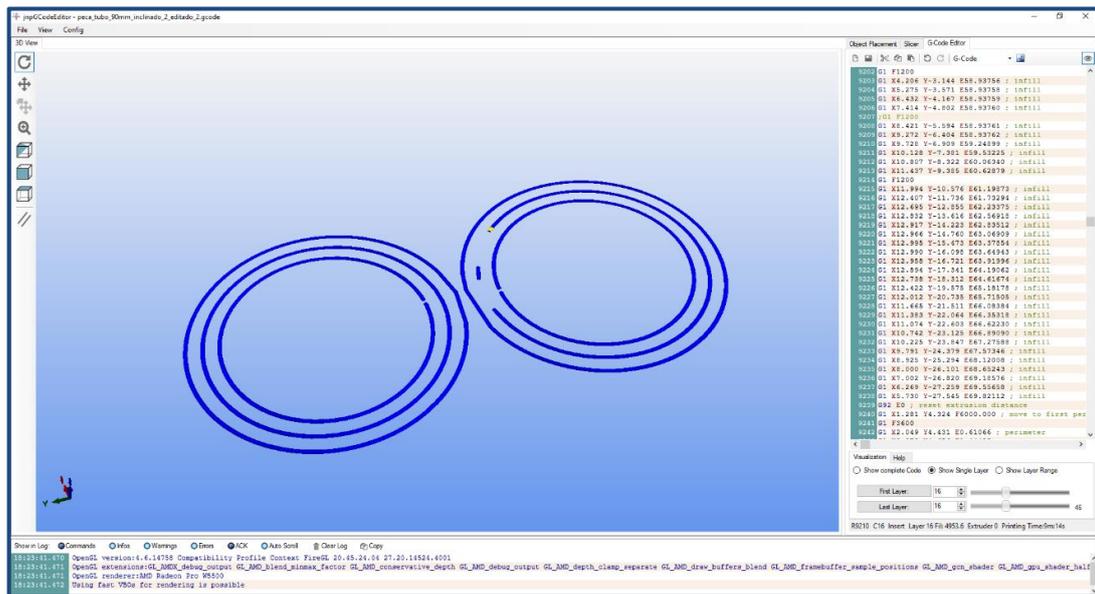


**Figura 4.8.** *Slicing* das camadas 15, 16 e 17, com ênfase na trajetória da camada 15 onde se vêem possíveis problemas com a trajetória.

Assim, será necessário corrigir os problemas na trajetória dessas camadas, nomeadamente, as zonas que contêm linhas muito próximas – que na impressão implicam a sobreposição do material depositado, gerando a fusão/corte do cordão já depositado –, e as zonas com linhas não completas, ou seja, onde a trajetória para num ponto e recomeça vários pontos à frente – o que originaria vazios (zonas sem material depositado).

Essa correção foi realizada por meio dum programa desenvolvido em C# pelo Prof. Dr. Norberto Pires denominado de ‘GCode Editor’ – **Figura 4.9**. Este permite inserir o *G-code* gerado pelo Slic3r®, selecionar a camada que se pretende visualizar e fazer alterações manuais às suas linhas de código, permitindo, por exemplo, unir a trajetória da camada 15 (visível na figura abaixo).

Após alteração do *G-code* gerado, exporta-se um ficheiro idêntico ao original, mas com os pontos alterados.



**Figura 4.9.** Programa desenvolvido em C# para editar o *G-code* (selecionada a camada 15 onde se verifica a necessidade de corrigir certos pontos da trajetória, onde esta não está completa).

#### 4.2.1.4. Conversão do *G-code*

Para que o *G-code* editado possa ser usado pelo sistema cinemático (robô e trilha linear ABB®) é necessário convertê-lo em código legível pelo seu *software* de controlo. Esta conversão é feita num dos separadores da *APP* (**Figura 4.10. (a)**), que permite introduzir o *G-code*, a velocidade com que se pretende realizar a impressão (*TS*) e a orientação da tocha. Os parâmetros impostos nesta fase serão a nível global, ou seja, para todos os pontos, no entanto, mais tarde será possível realizar alterações locais.

Assim, obter-se-ão dois ficheiros *TXT*: um com os parâmetros globais e, outro com os parâmetros para cada ponto (este é o ficheiro que poderá sofrer alterações locais).

O ficheiro com os parâmetros locais sairá sob a forma:  $P \ x \ y \ z \ R_x \ R_y \ R_z \ V \ (...)$ , onde:

- $P$  é o número do ponto na trajetória;

- $x, y$  e  $z$  são as coordenadas de cada ponto em relação ao centro da impressão;
- $R_x, R_y$  e  $R_z$  são a orientação local da tocha;
- $V$  é a velocidade linear, e;
- O restante (...) é nomenclatura própria do sistema, que indica o início e fim da deposição – essencial, por exemplo, para permitir o movimento da tocha entre camadas sem que haja deposição.

Assim, como se estão a usar os parâmetros otimizados inicialmente, indicou-se uma velocidade linear de 10mm/s e uma orientação da tocha de 0°. Ambos os parâmetros podem ser alterados localmente, no entanto, optou-se por se manter a velocidade linear fixa; por sua vez, o ficheiro pode ter a orientação local da tocha alterada por zonas, através do programa mencionado na introdução do sistema, no entanto, optou-se por fazer a alteração durante a impressão (mediante o *overhang angle* de cada camada).

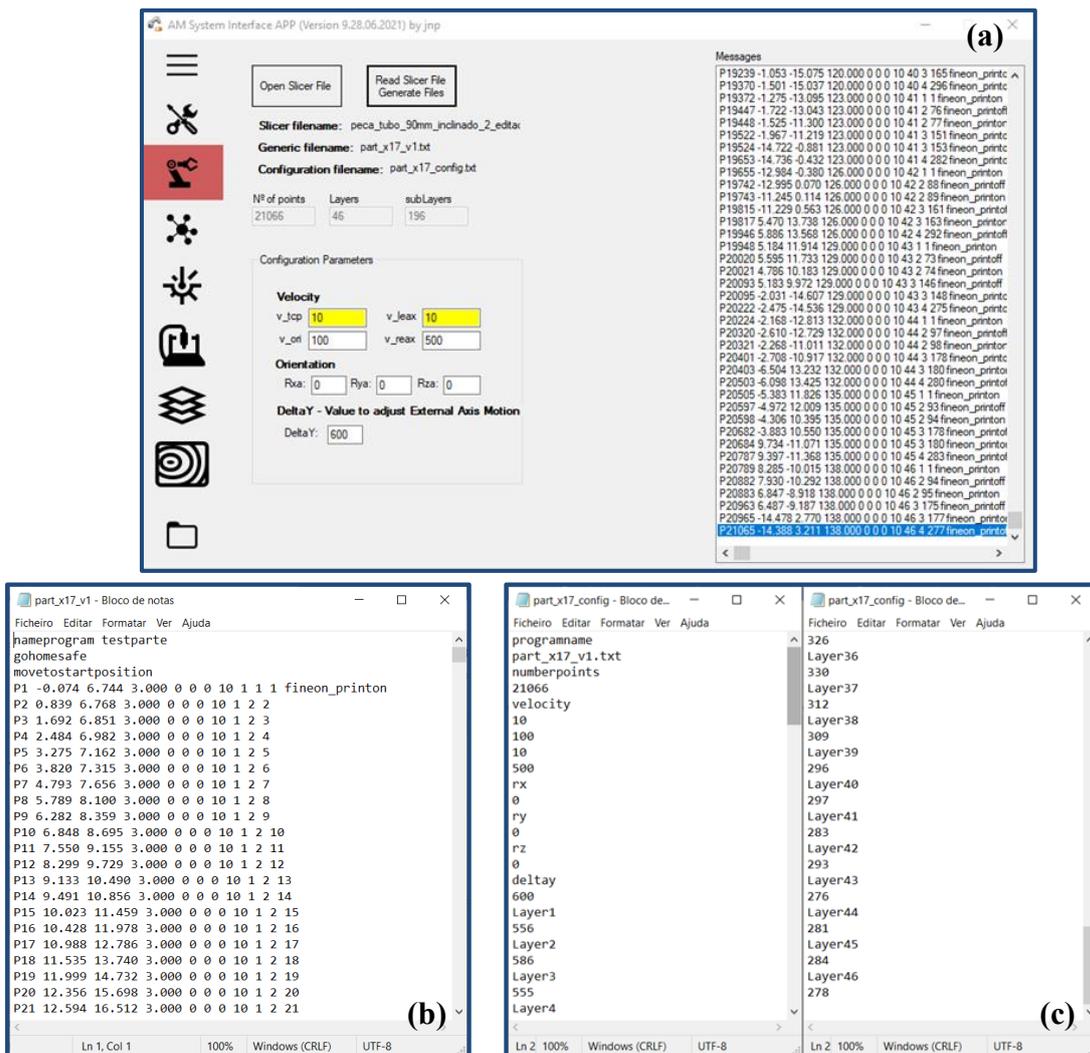
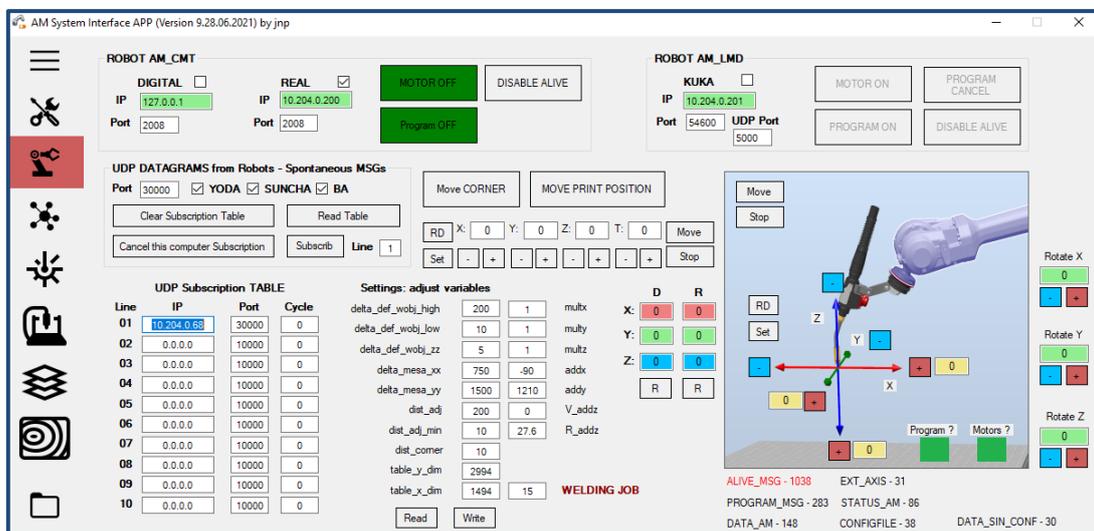


Figura 4.10. (a) Separador da APP que permite converter o G-code em código legível pelo controlador ABB® e, ficheiros gerados: (b) ficheiro com todos os pontos, e (c) ficheiro com os parâmetros globais.

#### 4.2.1.5. Preparações finais e impressão

Na última fase pré-impressão, e uma vez que a trajetória de deposição a seguir pelo sistema cinemático se encontra plenamente definida, será necessário transferir o código gerado na *APP* para o controlador real, processo esse realizado a partir do RobotStudio®.

A fase seguinte passará por definir o local onde será realizada a impressão, mais concretamente, as coordenadas iniciais de impressão em relação à origem do sistema. Esta definição é realizada no separador apresentado na **Figura 4.11.**, sendo necessário indicar as coordenadas  $x$  e  $y$  em relação ao centro da mesa ('*addx*' e '*addy*') e a altura do substrato em relação à superfície da mesma ('*R\_addz*').



**Figura 4.11.** Separador da *APP* que permite indicar o *IP* do sistema ao qual estará ligado, definir as coordenadas iniciais de impressão, entre outros.

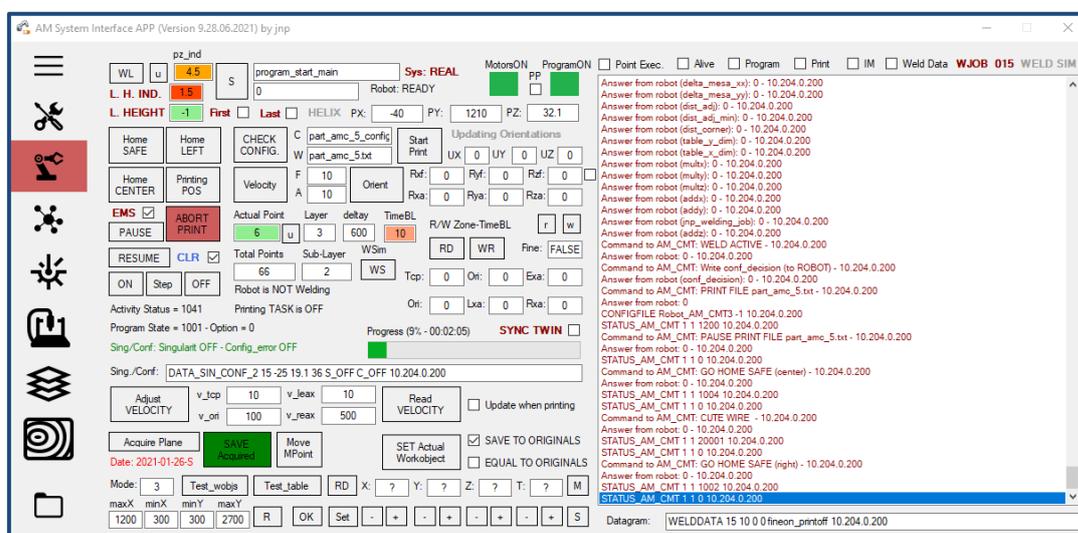
De seguida, simulou-se o processo no *digital twin* para analisar a trajetória de deposição, verificar se a configuração dos eixos do robô originará singularidades ou provocará colisão com os elementos fixos, e detetar possíveis *bugs*, erros ou quaisquer irregularidades no código.

Quanto à componente do sistema de soldadura, o seu controlo ainda é feito (maioritariamente) nos componentes reais, pelo que foi necessário fazer a seleção dos parâmetros de soldadura no controlador real. Esta seleção requer apenas que se configure um novo '*JOB*' indicando o modo de transferência, gás e materiais que se pretendem usar, assim como a taxa de alimentação do fio ( $WFR = 6m/min.$ ); com esses dados, o controlador usa as curvas sinérgicas do material para obter os restantes parâmetros elétricos.

Há ainda, que ter em conta a atmosfera protetora, pelo que é necessário seleccionar o fluxo de gás a usar (10L/min.), preparar o gás – abrindo as válvulas de segurança – e ativar o sistema de extração da atmosfera interna.

Por fim, entra-se no painel de controlo principal (que permite controlar e analisar o processo durante a impressão – **Figura 4.12.**), e:

- (1) Adiciona-se o ficheiro *TXT* com os parâmetros globais enviados para o sistema cinemático;
- (2) Dá-se ordem para ‘limpeza e calibração da ponta da tocha’, o que permite eliminar qualquer contaminação do eléctrodo consumível e garantir que o *stick out* será de aproximadamente 15mm;
- (3) Manda-se o robô para uma posição segura pré-definida (*‘Home’*);
- (4) Indica-se se se quer soldar ou apenas verificar a trajetória no sistema real;
- (5) Elimina-se toda a informação da impressão anterior (*‘Abort Print’*), para que não exista informação conflituosa no sistema, e;
- (6) Inicia-se a impressão (*‘Start Print’*).

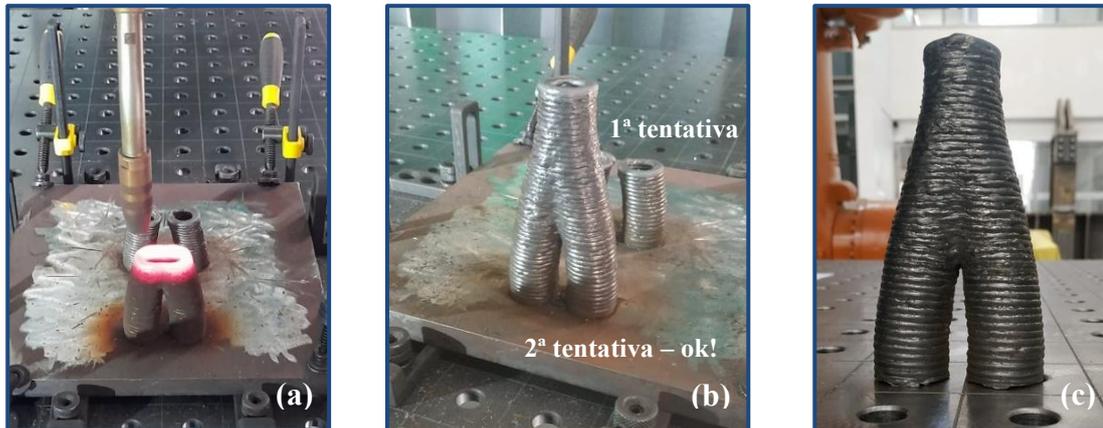


**Figura 4.12.** Separador da APP que permite controlar e verificar o progresso da impressão.

Durante o processo pode-se alterar a temporização entre camadas (de modo a acelerar o processo ou dar um maior tempo de arrefecimento); parar o processo para fazer inspeção aos cordões já depositados; mandar limpar a ponta da tocha e fazer calibração, e; alterar a orientação da tocha. Quanto ao último ponto, há ainda que ter em conta que, à semelhança da peça anterior, as primeiras camadas foram impressas com a orientação da tocha perpendicular à direção de deposição (0°), uma vez que as camadas estão perfeitamente

sobrepostas, tendo passado a 3º (no sentido da camada inferior) quando se passou a ter cordões parcialmente não suportados (*overhang angles*) e, voltado aos zero graus quando a união dos dois tubos se concluiu.

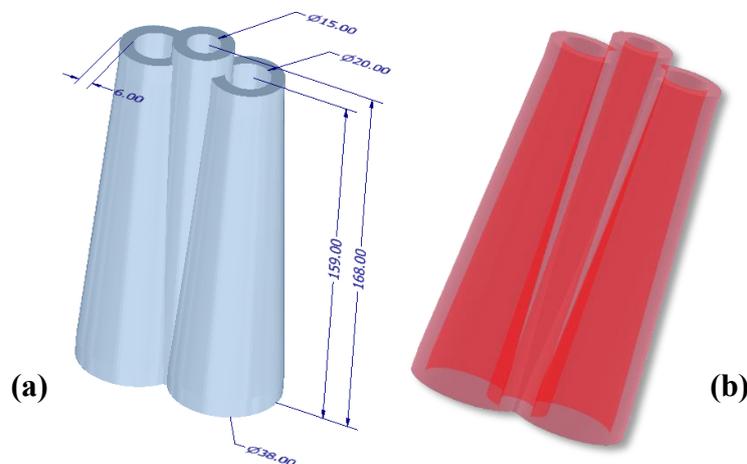
A impressão e resultado final (peça) são apresentados na **Figura 4.13**.



**Figura 4.13.** (a) Impressão da zona crucial da peça (união dos dois tubos); (b) Peça, momentos após impressão, e; (c) Peça final após separação do substrato.

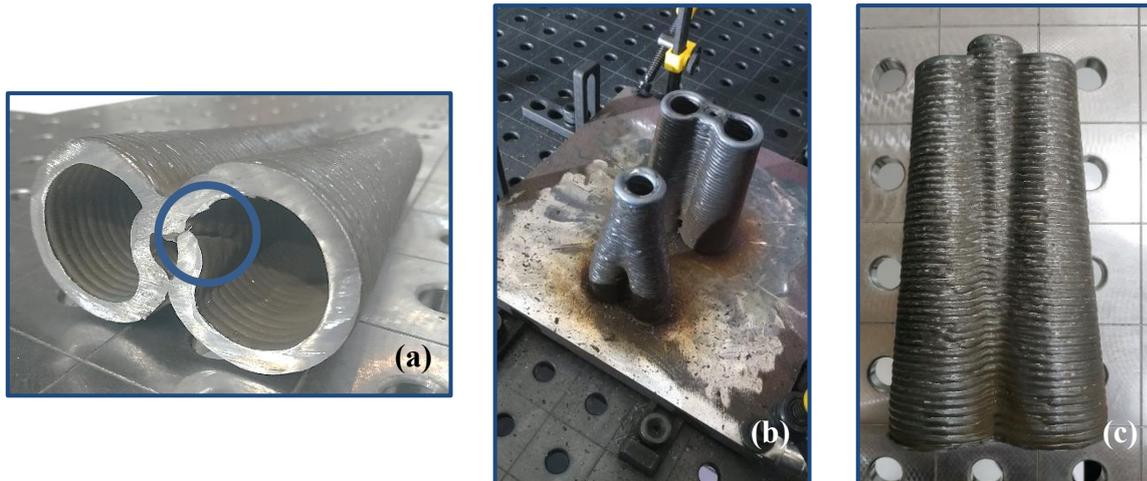
#### 4.2.2. Peça nº2

A segunda peça de comprovação de conceito é idêntica à anterior, no entanto, esta é composta por 3 tubos – 2 tubos externos de aspeto cónico e um interno de aspeto cilíndrico (conforme **Figura 4.14**). Uma vez que os mesmos se encontram ligados em toda a altura, o problema encontrado na peça nº1 estende-se por toda a peça, sendo necessário realizar um estudo idêntico, mas mais cuidado e aprofundado – ou seja, foi necessário realizar a análise da trajetória para todas as camadas, com respetiva correção do *G-code*.



**Figura 4.14.** Modelo CAD da peça nº2: (a) vista com cotas (em milímetros) e; (b) vista com secções internas.

Apesar disso, ainda surgiram alguns problemas na impressão (conforme **Figura 4.15. (a)**), pelo que, apesar de se ter usado o mesmo material, foi necessário realizar ajustes aos parâmetros de soldadura usados. Assim, foi possível obter uma boa impressão para a 2ª peça diminuindo a velocidade de alimentação do fio (*WFR*) de 6m/min para 4m/min., o que implicou uma atualização dos parâmetros elétricos que passaram a ser de 113A e 14,3V. A peça final é apresentada na **Figura 4.15. (b)** e **(c)**.



**Figura 4.15.** (a) 1ª tentativa de impressão, onde se verificaram problemas de ligação. Peça final: (b) momentos após a impressão, e; (c) após separação do substrato.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho começou-se por realizar uma revisão bibliográfica sobre o fabrico aditivo em geral e o processo *WAAM* em específico, tendo-se concluído que a técnica em estudo apresenta uma clara **vantagem** em relação às restantes técnicas *MAM* em termos de taxa de deposição, que se relaciona diretamente com a velocidade da impressão, e possibilidade de implementação com um menor investimento inicial, uma vez que permite reaproveitar tecnologia já existente na indústria.

No entanto, fica também claro que, apesar de apresentar um grande potencial em termos de propriedades mecânicas, esta ainda requererá mais estudos de modo a eliminar/minimizar o efeito dos defeitos inerentes à mesma, entre eles: tensões residuais, porosidades internas, rugosidade superficial, etc.

Por outro lado, uma clara **desvantagem** deste processo quando comparado com outras técnicas *MAM*, em específico o *PBF*, onde o pó não fundido funciona como material de suporte para as camadas a depositar, são as limitações ao nível do *overhang angle* que implicam que partes suspensas no ar (ou seja, com ângulo muito elevado) não possam ser impressas, problema que pode ser resolvido através da adição de material de suporte que, no entanto, implicará um maior desperdício de matéria-prima.

Assim, e tendo em conta as claras vantagens associadas à tecnologia em análise, foi criado pela UC o projeto AMConstruction que implementou o sistema apresentado; este projeto tem como intuito estudar e desenvolver este novo método produtivo, com foco no desenvolvimento de soluções que permitam minimizar os seus problemas.

Uma vez que a sua implementação é relativamente recente, o objetivo desta dissertação passou por apresentar a abordagem inicial à implementação do sistema, assim como ajudar no desenvolvimento duma metodologia que permita usar o mesmo para obter peças a partir do respetivo ficheiro *CAD*. Apesar de ainda serem necessários muitos mais estudos, tais objetivos consideram-se atingidos uma vez que foi possível imprimir duas peças de elevada complexidade (as peças de comprovação de conceito).

Por outro lado, e apesar de não ter sido possível realizar testes às mesmas, estas aparentam ter uma boa união dos cordões, pelo que, duma análise visual, acredita-se ter sido

possível obter peças com boas propriedades tanto a nível dimensional como das suas propriedades mecânicas.

Assim, conclui-se que esta tecnologia apresenta um enorme potencial para a produção de pequenas séries de peças de médias e grandes dimensões com elevada complexidade geométrica. No entanto, ainda requer uma análise mais aprofundada para a tornar num método produtivo com viabilidade comercial.

## 5.1. TRABALHOS FUTUROS

Uma vez que, como já dito, esta tecnologia ainda se encontra em estado embrionário, tendo sido apenas feita uma primeira abordagem ao funcionamento do sistema, será necessário realizar uma investigação mais intensiva ao processo de fabrico, nomeadamente, a impressão de peças mais complexas, que implicarão a ocorrência de novos problemas e a necessidade de encontrar novas soluções para os mesmos, o estudo doutros materiais e a implementação de equipamento auxiliar.

Assim, em complemento à análise já realizada para o aço AWS A5.18 ER70S-6, será necessário realizar um **estudo às suas propriedades** mecânicas, microestrutura e tolerância dimensional, nomeadamente:

- (1) Analisar a microestrutura, a rugosidade superficial, bem como a tolerância dimensional/compatibilidade geométrica com o modelo *CAD* original;
- (2) Avaliar o nível de porosidade e os defeitos internos gerados;
- (3) Realizar ensaios de dureza, de tração e de charpy – para provetes com diferentes direções (por exemplo, horizontal, 45° e vertical), de forma a avaliar a anisotropia da impressão e num número suficiente (no mínimo 6) que permita eliminar possíveis erros derivados da inclusão de defeitos locais;
- (4) Analisar a superfície de fratura e os mecanismos de dano obtidos;
- (5) Avaliar o nível de tensões residuais, e;
- (6) Estudar o comportamento à fadiga, comparando a vida útil dos componentes obtidos com a que se teria para peças fabricadas por técnicas convencionais.

Por outro lado, sugere-se ainda:

- A realização duma **análise ao impacto da rugosidade superficial** nas propriedades mecânicas dos componentes obtidos, de forma a verificar se o mesmo é

mínimo, permitindo eliminar as operações de maquinagem pós impressão para aplicações onde não ocorre contacto mecânico com outros componentes ou não existem requisitos que o justifiquem;

- A realização duma **análise paramétrica**, de forma a relacionar a variação dum determinado parâmetro (por exemplo, *WFR*, *TS*, composição do gás de proteção, etc.) com o seu efeito no processo/propriedades mecânicas finais;

- A **repetição dos mesmos estudos para outros metais (e suas ligas)**, como a analisada na revisão bibliográfica (liga de titânio Ti-6Al-4V) que deverá permitir verificar a viabilidade do novo método produtivo na engenharia de alta *performance*, e **na combinação de múltiplos metais**, onde à semelhança dos processos *HM* se toma partido das vantagens de cada metal procurando mitigar as suas desvantagens individuais [70], [71], e;

- A **implementação dum sistema de monitorização e controlo** que permita à *APP* usar a informação recolhida pelos sensores a adicionar ao sistema físico no *software* de seleção dos parâmetros de soldadura.



---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] REIS, João Pedro (2019), “Indústria 4.0: Estado da arte, análise de casos de estudo e proposta de um serviço de consultoria”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto, Porto.  
Disponível: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/122497/2/354666.pdf>.
- [2] Gyoury Self, “*Steel Connection Design Services*”. Acedido a 10 de Agosto de 2021, em: <https://www.gyouryself.com/what-we-do/consulting-engineers/steel-connection-design-services-sussex-hampshire-london/>.
- [3] SILVA, Elias (2021), “Fabrico Aditivo para a Construção Metálica: Projeto, Realização e Caracterização”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias – Universidade de Coimbra, Coimbra.  
Disponível: <http://hdl.handle.net/10316/95490>.
- [4] KARAYEL, Elif e BOZKURT, Yahya (2020), “*Additive manufacturing method and different welding applications*”. *Review Article, Journal of Materials Research and Technology*, vol.9, no.5, pp 11424-11438, Sep. 01, 2020. doi: 10.1016/j.jmrt.2020.08.039.
- [5] RIBEIRO, Filipe, PIRES, J. Norberto e AZAR, Amin (2019), “*Implementation of a robot control architecture for additive manufacturing applications*”. *Research Article, Industrial Robot*, vol.46, no.1, pp 73-82, Apr. 2019. doi: 10.1108/IR-11-2018-0226.
- [6] PRAGANA, João, SAMPAIO, Rui, BRAGANÇA, Ivo, SILVA, Carlos e MARTINS, Paulo (2021), “*Hybrid metal additive manufacturing: A state-of-the-art review*”. *Review Article, Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, vol. 2, p. 100032, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.aime.2021.100032.
- [7] GOU, Jian, SHEN, Junqi, HU, Shengsun, TIAN, Yinbao e LIANG, Ying (2019), “*Microstructure and mechanical properties of as-built and heat-treated Ti-6Al-4V alloy prepared by cold metal transfer additive manufacturing*”. *Research Article, Journal of Manufacturing Processes*, vol. 42, pp. 41–50, Jun. 2019. doi: 10.1016/j.jmapro.2019.04.012.

- [8] HUANG, Jiankang, GUAN, Zhichen, YU, Shurong, YU, Xiaoquan, YUAN, Wen, LI Nan e FAN, Ding (2020), “*A 3D dynamic analysis of different depositing processes used in wire arc additive manufacturing*”. *Research Article, Materials Today Communications*, vol. 24, p. 101255, Sep. 2020. [doi: 10.1016/j.mtcomm.2020.101255](https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101255).
- [9] REISCH, Raven, HAUSER, Tobias, KAMPS, Tobias e KNOLL, Alois (2020), “*Robot based wire arc additive manufacturing system with context-sensitive multivariate monitoring framework*”. *Research Article, Procedia Manufacturing*, vol. 51, pp. 732–739, Nov. 2020. [doi: 10.1016/j.promfg.2020.10.103](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.103).
- [10] SINGH, Sudhanshu e KHANNA, Pradeed (2020), “*Wire arc additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials*”. *Research Article, Materials Today: Proceedings*, Sep. 2020, [doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.030](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.030).
- [11] DUARTE, Valdemar, RODRIGUES, Tiago, SCHELL, Norbert, MIRANDA, Rosa, OLIVEIRA, João e SANTOS, Telmo (2020), “*Hot forging wire and arc additive manufacturing (HF-WAAM)*”. *Research Paper, Additive Manufacturing*, vol. 35, p. 101193, Oct. 2020, [doi: 10.1016/j.addma.2020.101193](https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101193).
- [12] HAN, Shaohua, ZHANG, Zhongzhong, RUAN, Pengxiang, CHENG, Shiwen e XUE, Dingqi (2021), “*Fabrication of circular cooling channels by cold metal transfer based wire and arc additive manufacturing*”. *Review Article, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 235, no. 11, pp. 1715-1726, March 2021, [doi: 10.1177/0954405421995613](https://doi.org/10.1177/0954405421995613).
- [13] Statista, “*Global 3D printing market size forecast 2013-2021*”. Acedido a 14 de Agosto de 2021, em: <https://www.statista.com/statistics/796237/worldwide-forecast-growth-3d-printing-market/>.
- [14] LIU, Shunyu e SHIN, Yung (2019), “*Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review*”. *Research Article, Materials and Design*, vol. 164, p. 107552, Feb. 2019, [doi: 10.1016/j.matdes.2018.107552](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.107552).
- [15] DUARTE, Valdemar (2016), “*Additive manufacturing of a high resistance steel by MIG/MAG*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologias – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.  
[Disponível: http://hdl.handle.net/10362/19099](http://hdl.handle.net/10362/19099).
- [16] ANNONI, Massimiliano, GIBERTI, Hermes e STRANO, Matteo (2016), “*Feasibility Study of an Extrusion-based Direct Metal Additive Manufacturing Technique*”.

- Research Article, Procedia Manufacturing*, vol. 5, pp. 916–927, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.promfg.2016.08.079.
- [17] SIEMENS, “*Sheet Lamination*”. Acedido a 16 de Maio de 2021, em: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/pt/our-story/glossary/sheet-lamination/55512>.
- [18] RODRIGUES, Tiago (2018), “*Wire and arc additive manufacturing: equipment development and parts characterization*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologias – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.  
Disponível: <http://hdl.handle.net/10362/63263>.
- [19] SUÁREZ, Alfredo, ALDALUR, Eider, VEIGA, Fernando, ARTAZA, Teresa, TABERNERO, Iván e LAMIKIZ, Aitzol (2021), “*Wire arc additive manufacturing of an aeronautic fitting with different metal alloys: From the design to the part*”. *Research Article, Journal of Manufacturing Processes*, vol. 64, pp. 188–197, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.jmapro.2021.01.012.
- [20] CATARINO, Carlos (2019), “*Monitorização online do processo WAAM através de análise acústica*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologias – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.  
Disponível: <http://hdl.handle.net/10362/94121>.
- [21] BAKER, Ralph, “*Method of making decorative articles*”, US1533300A, April, 1925.
- [22] TROPIMÁTICA, “*Robotic welding cells*”. Acedido a 24 de Maio de 2021, em: <https://www.tropimatica.com/en/welding-cell.php>.
- [23] PRIARONE, Paolo, PAGONE, Emanuele, MARTINA, Filomeno, CATALANO, Angioletta e SETTINERI, Luca (2020), “*Multi-criteria environmental and economic impact assessment of wire arc additive manufacturing*”. *Research Article, CIRP Annals – Manufacturing Technology*, vol. 69, no. 1, pp. 37–40, May 2020, doi: 10.1016/j.cirp.2020.04.010.
- [24] XIA, Chunyang, PAN, Zengxi, POLDEN, Joseph, LI, Huijun, XU, Yanling, CHEN, Shanben e ZHANG, Yuming (2020), “*A review on wire arc additive manufacturing: Monitoring, control and a framework of automated system*”. *Review Article, Journal of Manufacturing Systems*, vol. 57., pp. 31–45, Oct. 2020. doi: 10.1016/j.jmsy.2020.08.008.

- [25] WAAM3D, “*Our Wire + Arc Additive Manufacturing and the Welding Engineering and Laser Processing Centre*”. Acedido a 17 de Junho de 2021, em: <https://waam3d.com/about-us>.
- [26] MARQUES, Tiago (2020), “Desenvolvimento de uma estratégia para a definição da orientação de uma ferramenta de deposição em tarefas de impressão 3D: Algoritmos tendo em conta impressão de metais”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias – Universidade de Coimbra, Coimbra.  
Disponível: <http://hdl.handle.net/10316/93923>.
- [27] ASCENSO, Francisco (2020), “Desenvolvimento de uma estratégia para a definição da orientação de uma ferramenta de deposição em tarefas de impressão 3D: Simulação em MATLAB e realização em RobotStudio”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologias – Universidade de Coimbra, Coimbra.  
Disponível: <http://hdl.handle.net/10316/94019>.
- [28] FabCentral – The Center for Bits and Atoms (Massachusetts Institute of Technology), “*MAS.865 2018 HOW TO MAKE SOMETHING THAT MAKES (ALMOST) ANYTHING - Slicers*”. Acedido a 25 de Julho de 2021, em: <http://fab.cba.mit.edu/classes/865.18/planning/slicers/>.
- [29] ZHANG, Shuai, GONG, Mengcheng, ZENG, Xiaoyan e GAO, Ming (2021), “*Residual stress and tensile anisotropy of hybrid wire arc additive-milling subtractive manufacturing*”. *Research Article, Journal of Materials Processing Technology*, vol. 293, p. 117077, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117077.
- [30] AML3D, “*ARCEMY – The future of large 3D metal printing is here.*”. Acedido a 17 de Junho de 2021, em: <https://aml3d.com/arcemy>.
- [31] CompanyWeek (by Eric Peterson), “*Big Metal Additive*”. Acedido a 26 de Julho de 2021, em: <https://companyweek.com/article/big-metal-additive>.
- [32] MX3D, “*MX3D - Introducing the advantages of 3D metal printing to new high-impact industries*”. Acedido a 2 de Junho de 2021, em: <https://mx3d.com>.
- [33] MAZAK, “*New VARIAXIS j-600AM Grows the Mazak Additive Series*”. Acedido a 26 de Julho de 2021, em: <https://www.mazakusa.com/news-events/news-releases/new-variaxis-j-600am-grows-the-mazak-additive-series/>.

- 
- [34] RAMLAB, “*RAMLAB - Certified High Quality WAAM | Metal parts on demand*”. Acedido a 26 de Julho de 2021, em: <https://www.ramlab.com/>.
- [35] DING, Donghong, SHEN, Chen, PAN, Zengxi, CUIURI, Dominic, LI, Huijun, LARKIN, Nathan e VAN DUIN, Stephen (2016), “*Towards an automated robotic arc-welding-based additive manufacturing system from CAD to finished part*”. *Research Article, Computer-Aided Design*, vol. 73, pp. 66–75, Apr. 2016, doi: 10.1016/J.CAD.2015.12.003.
- [36] LASIMM, “*About Us - LASIMM Project*”. Acedido a 26 de Julho de 2021, em: <https://www.lasimm.eu/about.html>.
- [37] WAAM3D, “*Titanium tank*”. Acedido a 16 de Agosto de 2021, em: [https://waam3d.com/case\\_studies/case\\_titanium-tank](https://waam3d.com/case_studies/case_titanium-tank).
- [38] BAIER, Daniel, BACHMANN, Andreas e ZAEH, Michael (2020), “*Towards Wire and Arc Additive Manufacturing of High-Quality Parts*”. *Research Article, Procedia CIRP*, vol. 95, pp. 54–59, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.01.180.
- [39] LOPES, João (2019), “*Feasibility of the milling process on HSLA parts produced with Wire and Arc Additive Manufacturing*”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologias – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.  
Disponível: <http://hdl.handle.net/10362/89773>.
- [40] SELVI, Selcuk, VISHVAKSENAN, A. e RAJASEKAR, E. (2018), “*Cold metal transfer (CMT) technology - An overview*”. *Review Article, Defence Technology*, vol. 14, no. 1, pp. 28–44, Feb. 2018. doi: 10.1016/j.dt.2017.08.002.
- [41] FRONIUS, “*Cold Metal Transfer | The technology*”. *PDF Catalogs (Technical Brochure)*, acedido a 23 de Junho de 2021, em: <https://pdf.directindustry.com/pdf/fronius/cold-metal-transfer/5983-579090.html>.
- [42] FRONIUS, “*CMT: Cold Metal Transfer | MIG/MAG dip-transfer arc process*”. *PDF Catalogs (Technical Brochure)*, acedido a 23 de Junho de 2021, em: <https://docplayer.net/21790089-Cmt-cold-metal-transfer-mig-mag-dip-transfer-arc-process.html>.
- [43] SCOTTI, Fernando, TEIXEIRA, Felipe, SILVA, Leandro, ARAÚJO, Douglas, REIS, Ruham e SCOTTI, Américo (2020), “*Thermal management in WAAM through the CMT Advanced process and an active cooling technique*”. *Research Article, Journal*

- of Manufacturing Processes*, vol. 57, pp. 23–35, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.06.007.
- [44] FRONIUS, “CMT- Cold Metal Transfer: The cold welding process for premium quality”. Acedido a 23 de Junho de 2021, em: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/world-of-welding/fronius-welding-processes/cmt>.
- [45] FRONIUS, “TPS/i Robotics welding system – PushPull CMT”. *Operating Instructions Manual*, Acedido a 23 de Junho de 2021, em: [https://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiugoKes5\\_yAhWNZMAKHv0ArEQFnoECAIQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.fronius.com%2F~%2Fdownloads%2FFPerfect%2520Welding%2FOperating%2520Instructions%2F42%252C0426%252C0219%252CEN.pdf&usg=AOvVaw0SWbwJILrnDjSb73vKYRr7](https://www.google.pt/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiugoKes5_yAhWNZMAKHv0ArEQFnoECAIQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.fronius.com%2F~%2Fdownloads%2FFPerfect%2520Welding%2FOperating%2520Instructions%2F42%252C0426%252C0219%252CEN.pdf&usg=AOvVaw0SWbwJILrnDjSb73vKYRr7).
- [46] GOU, Jian, WANG, Zhijiang, HU, Shengsun, LU, Wen e SHEN, Junqi (2020), “Microstructure evolution and mechanical properties of cold metal transfer additive manufactured Ti–6Al–4V wall with trace MoSi<sub>2</sub> addition”. *Research Article, Materials Science and Engineering A*, vol. 798, p. 140160, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.msea.2020.140160.
- [47] BLAKEY-MILNER, Byron, GRADL, Paul, SNEDDEN, Glen, BROOKS, Michael, PITOT, Jean, LOPEZ, Elena, LEARY, Martin, BERTO, Filippo, PLESSIS, Anton (2021), “Metal additive manufacturing in aerospace: A review”. *Research Article, Materials & Design*, vol. 209, p. 110008, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2021.110008.
- [48] GOU, Jian, WANG, Zhijiang, HU, Shengsun, SHEN, Junqi, TIAN, Yinbao, ZHAO, Guancheng e CHEN, Youquan (2020), “Effects of ultrasonic peening treatment in three directions on grain refinement and anisotropy of cold metal transfer additive manufactured Ti–6Al–4V thin wall structure”. *Research Article, Journal of Manufacturing Processes*, vol. 54, pp. 148–157, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.03.010.
- [49] GOU, Jian, WANG, Zhijiang, HU, Shengsun, SHEN, Junqi, TIAN, Yinbao, ZHAO, Guancheng e CHEN, Youquan (2020), “Effects of trace Nb addition on microstructure and properties of Ti–6Al–4V thin-wall structure prepared via cold metal transfer additive manufacturing”. *Research Article, Journal of Alloys and Compounds*, vol. 829, p. 154481, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.jallcom.2020.154481.

- 
- [50] YANG, Zhenwen, FU, Leqi, WANG, S., ZHANG, Mingxing, WANG, Ying, MA, Zongqing e WANG, Dongpo (2021), “*Balance of strength and plasticity of additive manufactured Ti-6Al-4V alloy by forming TiB whiskers with cyclic gradient distribution*”. *Research Article, Additive Manufacturing*, vol. 39, p. 101883, Mar. 2021, [doi: 10.1016/j.addma.2021.101883](https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101883).
- [51] AZARNIYA, Abolfazl, COLERA, Xabier, MIRZAALI, Mohammad, SOVIZI, Saeed, BARTOLOMEU, Flavio, WEGLOWSKI, Marek, WITS, Wessel, YAP, Chor, AHN, Joseph, MIRANDA, Georgina, SILVA, Filipe, HOSSEINI, Hamid, RAMAKRISHNA, Seeram e ZADPOOR, Amir (2019), “*Additive manufacturing of Ti-6Al-4V parts through laser metal deposition (LMD): Process, microstructure, and mechanical properties*”. *Review Article, Journal of Alloys and Compounds*, vol. 804, pp. 163–191, Oct. 2019, [doi: 10.1016/j.jallcom.2019.04.255](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.255).
- [52] ASTM F136-08, “*Standard Specification for Wrought Titanium-6Aluminum-4Vanadium ELI (Extra Low Interstitial) Alloy for Surgical Implant Applications (UNS R56401)*”. Norma ASTM, acedida a 22 de Agosto de 2021, em: <https://vpp-piercing.de/wp-content/uploads/2015/10/ASTMF13608.pdf>.
- [53] MONAHENG, Lehlohonolo, PREEZ, Willie, KOTZE, Nico e VERMEULEN, Marius (2020), “*Topology optimization of an aircraft nose-wheel fork for production in Ti6Al4V by the Aeroswift high-speed laser powder bed fusion machine*”. *Research Article, MATEC Web of Conferences*, vol. 321, p. 03013, 2020, [doi: 10.1051/mateconf/202032103013](https://doi.org/10.1051/mateconf/202032103013).
- [54] nTopology (by Alkaios Varotsis), “*Design Brief: 3D Printed Casting of 3-Foot Long Robot Arm*”. Acedido a 28 de Julho de 2021, em: <https://ntopology.com/blog/2021/05/04/design-brief-3d-printed-casting-of-3-foot-long-robot-arm/>.
- [55] nTopology (by Trevor Laughlin), “*Topology Optimization in a World of Fields and Implicit Geometry*”. Acedido a 28 de Julho de 2021, em: <https://ntopology.com/blog/2019/04/25/topology-optimization-in-a-world-of-fields-and-implicit-geometry/>.
- [56] COMSOL (by Kristian Jensen), “*Performing Topology Optimization with the Density Method*”. Acedido a 27 de Julho de 2021, em:
-

- <https://www.comsol.com/blogs/performing-topology-optimization-with-the-density-method/>.
- [57] ALTAIR, “*Additive Manufacturing of a Satellite Antenna Bracket*”. Acedido a 28 de Julho de 2021, em: <https://www.altair.com/resource/additive-manufacturing-of-a-satellite-antenna-bracket>.
- [58] PIRES, J. Norberto e AZAR, Amin (2018), “*Advances in robotics for additive/hybrid manufacturing: robot control, speech interface and path planning*”. *Research Paper, Industrial Robot*, vol. 45, no. 3, pp. 311–327, Jul. 2018, doi: 10.1108/IR-01-2018-0017.
- [59] PIRES, J. Norberto, AZAR, Amin, NOGUEIRA, Filipe, ZHU, Carlos, BRANCO, Ricardo e TANKOVA, Trayana (*revised version submitted*), “*Additive Manufacturing with emphasis on Robot-based Directed Energy Deposition: Part 1 - Revision on AM Processes and Introduction of an Novel Intelligent System*”.
- [60] SLIC3R, “*Slic3r: Open source 3D printing toolbox*”. Acedido a 24 de Junho de 2021, em: <https://slic3r.org/>.
- [61] EUROTROD, “*EUROTROD: Welding Consumables*”. *PDF Catalogs (Technical Brochure)*, acedido a 24 de Agosto de 2021, em: [http://www.electroportugal.com/downloads/file70\\_pt.pdf](http://www.electroportugal.com/downloads/file70_pt.pdf).
- [62] InWeld, “*AWS A5.18 ER 70S-6 DataSheet*”. *DataSheet*, acedido a 24 de Agosto de 2021, em: <https://www.inweldcorporation.com/downloads/70S-6%20Data%20Sheet.pdf>.
- [63] PARTSMaster, “.045 X 33 LB spool AWS A5.18 ER70S-6 solid MIG wire”. Acedido a 24 de Agosto de 2021, em: <https://www.partsmaster.com/pm-categories/Welding/Mig-Wires/.045-x-33-lb-spool-aws-a5.18-er70s-6-solid-mig-wire/>.
- [64] AWS A5.18/A5.18M:2005, “*Specification for Carbon Steel Electrodes and Rods for Gas Shielded Arc Welding*”. Norma AWS, acedida a 24 de Agosto de 2021, em: [http://www.goductanh.com/vnt\\_upload/download/11\\_2016/AWS\\_A5.18-A5.18M-2005.pdf](http://www.goductanh.com/vnt_upload/download/11_2016/AWS_A5.18-A5.18M-2005.pdf).
- [65] WMS (*Welding Material Sales*), “*Product Catalog – ER70S-6*”. Acedido a 25 de Agosto de 2021, em: <https://weldingmaterialsales.com/catalog/er70s-6/>.

- 
- [66] TULLYN, “*AWS A5.18 ER70S-6 Mild Steel Welding Wire*”. Acedido a 25 de Agosto de 2021, em: <https://www.tullyn.com/product/aws-a5-18-er70s-6-mild-steel-welding-wire/>.
- [67] Pinnacle Alloys, “*ER70S-6 DATA SHEET*”. *DataSheet*, acedido a 25 de Agosto de 2021, em: <http://www.pinnaclealloys.com/wp/wp-content/uploads/2015/11/Pinnacle-Alloys-ER70S-6-2.17.pdf>.
- [68] LINCOLN ELECTRIC, “*MIG/MAG Solid Wires – AWS: ER70S-6*”. Acedido a 25 de Agosto de 2021, em: [https://www.lincolnelectric.com/en-sg/consumables/Pages/product.aspx?product=Products\\_ConsumableEU\\_MIGWires-MERIT-MERITS6\(Lincoln\\_Electric\\_EU\\_Base\)](https://www.lincolnelectric.com/en-sg/consumables/Pages/product.aspx?product=Products_ConsumableEU_MIGWires-MERIT-MERITS6(Lincoln_Electric_EU_Base)).
- [69] NOACH Group Limited, “*CO2 Gas Shielded MIG MAG Welding Wire (AWS A5.18 ER70S-6)*”. Acedido a 25 de Agosto de 2021, em: <http://noachgroup-com.sell.everychina.com/p-106365213-co2-gas-shielded-mig-mag-welding-wire-aws-a5-18-er70s-6.html>.
- [70] TREUTLER, Kai, KAMPER, Swenja, LEICHER, Marcel, BICK, Tobias e WESLING, Volker (2019), “*Multi-Material Design in Welding Arc Additive Manufacturing*”. *Research Article, Metals 2019*, vol. 9, no. 7, p. 809, Jul. 2019, doi: 10.3390/MET9070809.
- [71] WAAM3D, “*MULTI-FUN project aims to enable multi-materials metal additive manufacturing for complex 3D parts without size constraints*”. Acedido a 30 de Agosto de 2021, em: <https://waam3d.com/blog/multi-fun-project-aims-to-enable-multi-materials-metal-additive-manufacturing-for-complex-3d-parts-without-size-constraints>.
- [72] Dartmouth College, “*CS 60 Computer Networks | Lecture3 and 4 | Socket Programming*”. Acedido a 17 de Agosto de 2021, em: <https://www.cs.dartmouth.edu/~campbell/cs60/socketprogramming.html>.