



**Francisco Monge Gouveia**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

**Desenvolvimento de nova variante de fabrico aditivo:  
 $\mu$  - WAAM**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Orientador: Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos, Professor  
Associado com Agregação, Faculdade de Ciências  
e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Coorientador: Doutor João Pedro Sousa Oliveira, Professor  
Auxiliar Convidado, Faculdade de Ciências e  
Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Doutora Catarina Isabel Silva Vidal

Vogais: Doutora Rosa Maria Mendes Miranda  
Doutor Nuno Alberto Marques Mendes  
Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos



### **Desenvolvimento da variante de processo: $\mu$ - WAAM**

Copyright © Francisco Monge Gouveia, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

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



# Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu sincero agradecimento a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para o meu percurso académico nesta instituição que guardo para a vida.

Em primeiro lugar agradecer ao orientador desta dissertação, o professor Telmo Santos, pelo voto de confiança nas oportunidades concedidas, disponibilidade incondicional e interesse demonstrado por este trabalho.

Agradecer também ao coorientador, professor João Oliveira, por todo o apoio e conselhos prestados.

Ao Eng.º Francisco Ferreira, Eng.º Valdemar Duarte e Eng.º Tiago Rodrigues por todo o auxílio e disponibilidade de colaboração.

Um agradecimento ao Sr. António Campos e Sr. Paulo Magalhães pelo auxílio e disponibilidade no laboratório.

Aos colegas de mestrado com quem tive o prazer de partilhar o laboratório, um obrigado pela motivação e apoio.

Um grande agradecimento a todos os amigos, e em especial aos que acompanharam de perto esta minha jornada. Foram fundamentais ao longo destes cinco anos e espero manter viva esta amizade para com eles.

Por toda a força e companheirismo, um agradecimento especial a quem muito me apoiou neste trabalho, Inês Bragança, com que espero vir a contar para o futuro.

Por fim e de uma forma muito especial um agradecimento aos meus pais, Francisco Pereira e Margarida Monge, e irmã, Mónica Gouveia, pela motivação, compreensão e sacrifícios para me proporcionarem o melhor. Com muito orgulho a eles devo-lhe tudo o que sou hoje. Por tudo isso dedico-lhes este trabalho.



# Resumo

Atualmente, o fabrico aditivo é alvo de grande interesse por parte da indústria. O *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM) é uma variante do fabrico aditivo de metais que se destaca pela elevada taxa de deposição. Contudo apresenta desvantagens, como o fraco rigor dimensional e geométrico, motivando desta forma o estudo de uma nova abordagem de WAAM para a produção de peças de reduzidas dimensões.

No âmbito deste trabalho para reduzir a taxa de deposição e, conseqüentemente, melhorar a precisão dimensional, foi desenvolvida a variante  $\mu$  - WAAM na qual foi reduzido o diâmetro do fio de alimentação.

Foi desenvolvido um protótipo funcional e otimizados os parâmetros de processo para diferentes metais. Utilizando fio de alimentação com diâmetro entre 200 – 300  $\mu\text{m}$  foram produzidos provetes em forma de parede. Estes foram posteriormente caracterizados geometricamente.

Os resultados obtidos comprovam a viabilidade da tecnologia desenvolvida, constituindo um bom ponto de partida para trabalhos futuros. Foi possível compreender a influência dos parâmetros de processo no estabelecimento do arco e na geometria do cordão. Produziram-se paredes consolidadas, no entanto, mesmo aquecendo o substrato, surgiram dificuldades em garantir a adesão entre camadas.

**Palavras-chave:** Fabrico aditivo; Fabrico aditivo de metais, Fabrico aditivo por arco elétrico; Micro fabrico aditivo; Micro fabrico aditivo por arco elétrico.



# Abstract

Additive manufacturing is nowadays the target of great industry attention. The Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) process is an additive manufacturing variant with metal that is highlighted by its high deposition rate. However, it has some disadvantages when it comes to its dimensional and geometrical precision and accuracy. Thus, motivating the study of a new approach to WAAM to produce small parts.

In the scope of developing the work already done, a new variant has been developed, named  $\mu$  - WAAM, in which the diameter of the feeding wire has been decreased to lower the deposition rate and consequently, to improve the dimensional accuracy.

A functional prototype was developed, and the process parameters were optimized for different metals. A series of linear samples were built using a feeding wire with a diameter comprised between 200 – 300  $\mu\text{m}$ . These samples were later geometrically characterized.

The results obtained show the feasibility of the newly developed technology, establishing a good starting point for future work. It was possible to comprehend the influence of the process parameters in the geometry of the sample. Multi-layered walls were built, however, even when the substrate was heated, the lack of adhesion between layers was noticeable.

**Keywords:** Additive manufacturing; Metal additive Manufacturing; Wire and arc additive manufacturing; Micro additive manufacturing; Micro wire arc additive manufacturing.



# Índice

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. MOTIVAÇÃO.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	1
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	2
CAPÍTULO 2. ESTADO DA ARTE.....	3
2.1. FABRICO ADITIVO .....	3
2.2. FABRICO ADITIVO METAIS.....	5
2.2.1. <i>Alimentação por pó metálico</i> .....	6
2.2.2. <i>Alimentação por fio metálico</i> .....	7
2.3. WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING (WAAM) .....	8
2.3.1. <i>Processos de soldadura usados no WAAM</i> .....	8
2.3.2. <i>Parâmetros de processo</i> .....	9
2.3.3. <i>Acabamento superficial - Ondulações</i> .....	10
2.3.4. <i>Comparação de WAAM com SLM</i> .....	11
2.3.4.1. <i>Fabrico híbrido SLM - WAAM</i> .....	12
2.4. ESTUDOS PARA MELHORAR O RIGOR DIMENSIONAL DO FABRICO ADITIVO ..	12
2.4.1. <i>3D Micro Welding</i> .....	13
2.5. RESUMO E CONCLUSÕES DO CAPÍTULO .....	14
CAPÍTULO 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	15
3.1. SELEÇÃO DE COMPONENTES E MONTAGEM EXPERIMENTAL.....	15
3.1.1. <i>Mecanismo de alimentação de fio</i> .....	16
3.1.2. <i>Motor de avanço</i> .....	17
3.1.3. <i>Fontes de energia para o <math>\mu</math> - WAAM</i> .....	18
3.2. AUTOMAÇÃO DOS SISTEMAS DE MOVIMENTAÇÃO.....	19
3.2.1. <i>Cálculos do processo</i> .....	20
3.3. MATERIAIS.....	21
3.3.1. <i>Fio de adição</i> .....	21
3.3.2. <i>Substrato</i> .....	22
3.3.3. <i>Gás de proteção</i> .....	22
3.4. AQUECIMENTO DO SUBSTRATO.....	23
3.5. ESTUDO DA INTENSIDADE DE CORRENTE E TENSÃO ELÉTRICA .....	24
3.6. ANÁLISE MICROSCÓPICA DA GEOMETRIA DAS PAREDES .....	25

3.7.	ENSAIO DE FUSÃO POR EFEITO DE JOULE .....	25
3.8.	RESUMO E CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	26
CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....		27
4.1.	ENSAIOS PRELIMINARES .....	27
4.1.1.	<i>Energia por volume de fio fundido .....</i>	<i>27</i>
4.1.2.	<i>Otimização de parâmetros para o aço AISI 304.....</i>	<i>28</i>
4.2.	ENSAIO DE FUSÃO POR EFEITO DE JOULE .....	29
4.3.	ENSAIOS COM FONTE DE ALIMENTAÇÃO .....	30
4.3.1.	<i>Ensaio do Aço ASTM A228 com a fonte de alimentação .....</i>	<i>30</i>
4.3.1.1.	Tensão elétrica fornecida pela fonte de alimentação.....	32
4.3.1.2.	Aquecimento do substrato .....	32
4.3.1.3.	Relação de velocidades - Avanço / Alimentação.....	32
4.3.1.4.	Sobreposição de camadas - Paredes.....	34
4.3.2.	<i>Ensaio do Aço AISI 316L com a fonte de alimentação.....</i>	<i>35</i>
4.3.3.	<i>Ensaio do alumínio com a fonte de alimentação.....</i>	<i>36</i>
4.3.4.	<i>Ensaio da Liga Níquel Titânio – NiTi com fonte de alimentação ..</i>	<i>36</i>
4.3.5.	<i>Ensaio do Alumel com fonte de alimentação .....</i>	<i>37</i>
4.3.6.	<i>Ensaio do Cromel com fonte de alimentação.....</i>	<i>37</i>
4.4.	ENSAIOS COM BATERIA DE 12 V .....	38
4.4.1.	<i>Ensaio com Aço ASTM A228 com a bateria .....</i>	<i>38</i>
4.4.2.	<i>Ensaio do Aço AISI 316L com a bateria .....</i>	<i>39</i>
4.4.3.	<i>Taxa de deposição do <math>\mu</math> - WAAM .....</i>	<i>39</i>
4.5.	ESTUDO DA INTENSIDADE DE CORRENTE E TENSÃO ELÉTRICA .....	40
4.5.1.	<i>Registo do consumo de intensidade de corrente e tensão elétrica em ensaios com fonte alimentação.....</i>	<i>40</i>
4.5.2.	<i>Registo do consumo de intensidade de corrente e tensão elétrica em ensaios com a bateria de 12 V.....</i>	<i>42</i>
4.6.	ANÁLISE MICROSCÓPICA DA GEOMETRIA DAS PAREDES .....	44
4.6.1.	<i>Análise microscópica de ensaios com a fonte de alimentação.....</i>	<i>45</i>
4.6.2.	<i>Análise microscópica de ensaios com a bateria.....</i>	<i>46</i>
4.7.	RESUMO DOS ENSAIOS .....	47
CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO .....		49
REFERÊNCIAS51		
ANEXO A – DIAGRAMA DE BLOCOS LABVIEW.....		57
ANEXO B – GRÁFICOS DA TENSÃO ELÉTRICA (A) E INTENSIDADE DE CORRENTE (B), NO DECORRER DA DEPOSIÇÃO DOS ENSAIOS P28 E P29 .....		59
ANEXO C – CORDÕES E PAREDES OBTIDOS COM OS ENSAIOS MAIS RELEVANTES DE $\mu$ - WAAM .....		61

# Índice de Figuras

Figura 1.1 Esquematização gráfica do objetivo da dissertação .....	2
Figura 2.1 Exemplos de variantes de fabrico aditivo em metais [5], [14] .....	5
Figura 2.2 Esquemático PBF , adaptado de [17] .....	6
Figura 2.3 Esquema genérico representativo de sistemas de alimentação por fio metálico, adaptado de [21].....	7
Figura 2.4 Representação esquemática do processo WAAM, adaptado de [5] .....	8
Figura 2.5 Ondulações na secção transversal de um provete produzido por WAAM, [16] .....	11
Figura 2.6 Microestrutura de provetes produzidos pelo processo híbrido SLM – WAAM, [32] ..	12
Figura 2.7 Condições e parâmetros experimentais no 3DMW [39] .....	13
Figura 2.8 Tamanho da gota em função da intensidade de corrente [39] .....	13
Figura 2.9 Morfologia de um provete de 50 camadas sobrepostas em função da intensidade de corrente [39].....	14
Figura 2.10 Enquadramento do $\mu$ - WAAM no âmbito do fabrico aditivo.....	14
Figura 3.1 Montagem experimental do equipamento de $\mu$ - WAAM.....	15
Figura 3.2 Esquema CAD do mecanismo de alimentação do fio .....	16
Figura 3.3 Interface gráfica do programa <i>LabVIEW</i> para controlo do processo $\mu$ - WAAM .....	19
Figura 3.4 Equipamento para aquisição da temperatura do substrato .....	24
Figura 3.5 Instrumentação da intensidade de corrente e tensão elétrica do $\mu$ - WAAM Nomenclatura: National Instruments USB 6008 (1), LEM HTA 600-S (2) .....	25
Figura 3.6 Montagem experimental para o ensaio de fusão por efeito de Joule.....	26
Figura 4.1 Ponto de partida da deposição de material .....	28
Figura 4.2 Cordões de $\mu$ - WAAM otimizados para o aço AISI 304.....	29
Figura 4.3 Segmento de fio de comprimento, h (mm) e diâmetro, $\varnothing$ (mm) .....	30
Figura 4.4 Morfologia dos cordões obtidos com o fio de aço ASTM A228.....	31
Figura 4.5 Percorso de deposição das paredes .....	34
Figura 4.6 Vista lateral das paredes de aço ASTM A228 .....	34
Figura 4.7 Vista lateral (a) e superior (b) de uma parede separada do substrato .....	35
Figura 4.8 Morfologia dos cordões com fio de aço AISI 316L .....	35
Figura 4.9 Enrolamento do fio de alumínio no mecanismo de alimentação .....	36
Figura 4.10 Morfologia dos cordões com fio de NiTi .....	37
Figura 4.11 Morfologia dos cordões com fio de Alumel.....	37
Figura 4.12 Morfologia dos cordões com fio de Cromel .....	38
Figura 4.13 Vista lateral de uma parede ligada (a) e separada do substrato (b) .....	38

Figura 4.14 Vista lateral de uma parede de aço AISI 316L .....	39
Figura 4.15 Gráfico representativo da tensão elétrica (a) e intensidade de corrente (b), no decorrer da deposição do ensaio P27 com a fonte de alimentação. ....	41
Figura 4.16 Morfologia do cordão obtido com o fio de aço ASTM A228 no ensaio P27 .....	42
Figura 4.17 Gráfico representativo da tensão (a) e intensidade de corrente (b), no decorrer da deposição do ensaio P26 com a bateria conectada diretamente.....	43
Figura 4.18 Gráfico representativo da tensão (a) e intensidade de corrente (b), no decorrer da deposição do ensaio P26 com a bateria conectada com resistências em série .....	43
Figura 4.19 Caracterização intensidade de corrente eficaz do ensaio P26 com a bateria conectada com resistências em série.....	44
Figura 4.20 Micrografias da secção transversal e longitudinal de provetes produzidos em ASTM A228 com a fonte de alimentação .....	45
Figura 4.21 Micrografias da secção transversal e longitudinal de provetes produzidos com a bateria como fonte de energia .....	46
Figura 4.22 Macrografia da secção longitudinal de uma parede de aço ASTM A228, realizada com os parâmetros do ensaio P25 com a bateria como fonte de energia .....	47

# Índice de Tabelas

Tabela 2.1 Classificação em categorias de AM, de acordo com o ASTM [8], [9].....	4
Tabela 2.2 Comparação de SLM com o WAAM, adaptado de [2].....	11
Tabela 3.1 Lista de equipamentos e respectivas características .....	17
Tabela 3.2 Composição química dos materiais selecionados (Valores em %) .....	21
Tabela 3.3 Propriedades mecânicas dos materiais selecionados .....	21
Tabela 3.4 Fios metálicos estudados e respectivos diâmetros .....	22
Tabela 3.5 Composição química do gás de proteção ALPHAGAZ 1 .....	23
Tabela 3.6 Composição química do gás de proteção ARCAL 121 .....	23
Tabela 3.7 Lista de componentes utilizados no aquecimento do substrato .....	23
Tabela 4.1 Parâmetros do WAAM convencional e respetiva energia por volume de fio.....	27
Tabela 4.2 Ponto de partida dos parâmetros de processo .....	28
Tabela 4.3 Otimização dos parâmetros de processo para o aço AISI 304 .....	28
Tabela 4.4 Cálculo da densidade de corrente para dois fios de aço inoxidável.....	29
Tabela 4.5 Parâmetros de processo estabelecidos para o aço ASTM A228 .....	31
Tabela 4.6 Janela de velocidades para o fio em ASTM A228 com 250 $\mu\text{m}$ de diâmetro.....	33
Tabela 4.7 Parâmetros de deposição das paredes do aço ASTM A228.....	34
Tabela 4.8 Parâmetros de processo estabelecidos para o aço AISI 316L.....	35
Tabela 4.9 Parâmetros de processo estabelecidos para o a NiTi .....	36
Tabela 4.10 Parâmetros de processo estabelecidos para o AlumeI .....	37
Tabela 4.11 Parâmetros de processo estabelecidos para o Cromel.....	38
Tabela 4.12 Parâmetros de deposição das paredes de aço ASTM A228 com a bateria.....	38
Tabela 4.13 Parâmetros de deposição da parede de aço AISI 316L com a bateria .....	39
Tabela 4.14 Cálculo da taxa de deposição do WAAM, do SLM e do $\mu$ - WAAM .....	40
Tabela 4.15 Parâmetros estabelecidos para o estudo da intensidade de corrente e tensão elétrica fornecida pela fonte de alimentação usando o aço ASTM A228 .....	41
Tabela 4.16 Parâmetros estabelecidos para o estudo da intensidade de corrente e tensão elétrica fornecidos pela bateria.....	42
Tabela 4.17 Ensaio relevantes para este trabalho de $\mu$ - WAAM .....	47



# Abreviaturas e Acrónimos

- μ - WAAM - Micro Wire Arc Additive Manufacturing
- 3D - Tridimensional
- AISI - American Iron and Steel Institute
- ALM - Additive Layer Manufacturing
- AM - Additive Manufacturing
- ASE - Área Superficial Específica
- ASTM - American Society for Testing and Materials
- BMF - Boston Micro Fabrication
- CAD - Computer Aided Design
- CAM - Computer Aided Manufacturing
- CTWD - Contact Tip to Work Distance
- DC - Direct Current
- EBM - Electron Beam Melting
- ED - Energia por volume de fio fundido
- GMAW - Gas Metal Arc Welding
- GTAW - Gas Tungsten Arc Welding
- PAW - Plasma Arc Welding
- PBF - Powder Bed Fusion
- RMS - Root Mean Square
- SLM - Selective Laser Melting
- SLS - Selective Laser Sintering
- TS - Travel Speed
- WAAM - Wire Arc Additive Manufacturing
- WFS - Wire Feed Speed
- ZTA - Zona Termicamente Afetada



# CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Motivação

O Fabrico Aditivo, ou *Additive Manufacturing* (AM) tem vindo a ser cada vez mais implementado na indústria. O fabrico do componente é garantido pela deposição incremental de material com camadas sobrepostas, possibilitando assim a obtenção de geometrias complexas, impensáveis até então pelos processos convencionais. O interesse industrial nesta tecnologia conduziu ao desenvolvimento de diferentes variantes, sendo atualmente aplicável a diferentes materiais, inclusive metais.

A alimentação de material no AM de metais é garantida por pós ou fio. Tipicamente, a alimentação por pó garante uma boa precisão dimensional, no entanto a taxa de produção é reduzida, tornando o processo lento. Em contrapartida, a alimentação por fio metálico assegura taxas de deposição superiores, mas acabamentos superficiais inferiores aos conseguidos por pó.

O *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM) é uma abordagem de AM que recorre à alimentação por fio metálico. Esta apresenta várias vantagens competitivas frente a outras tecnologias de fabrico, como a elevada taxa de deposição e ao baixo custo dos equipamentos. No entanto, o tamanho e o rigor dos componentes produzidos são condicionados pelos equipamentos, motivando assim o estudo e desenvolvimento de uma nova variante.

## 1.2. Objetivos

Neste trabalho pretende-se desenvolver e testar uma variante inovadora do processo WAAM, designada de  $\mu$  - WAAM. Para competir com a alimentação por pó do processo *Selective Laser Melting* (SLM) o  $\mu$  - WAAM deve apresentar menor taxa de deposição e maior precisão dimensional, tal como sugerido na

Figura 1.1. Deste modo, o objetivo deste trabalho é aproximar o WAAM do SLM, integrando num só processo vantagens das duas tecnologias.

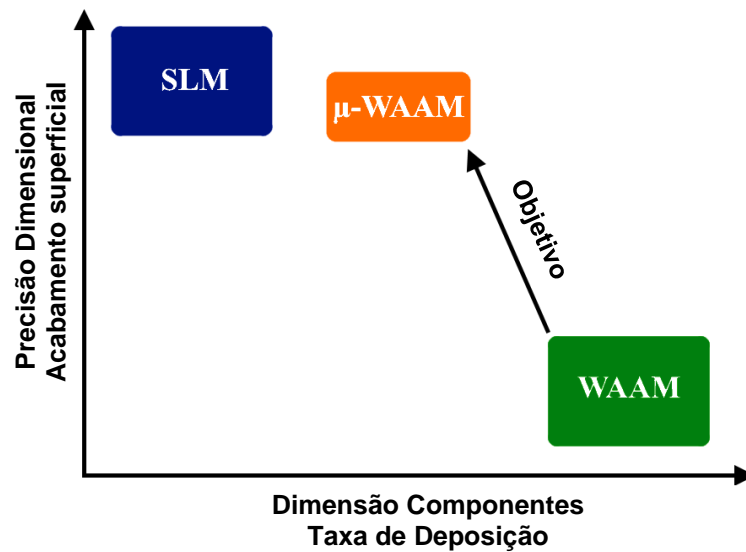


Figura 1.1 Esquematização gráfica do objetivo da dissertação

Através de um protótipo funcional, e com a otimização dos parâmetros de processo, pretendeu-se estabelecer um arco estável para produzir provetes lineares com diferentes metais. Estes foram posteriormente estudados e caracterizados geometricamente.

### 1.3. Estrutura da dissertação

Este documento encontra-se organizado nos seguintes cinco capítulos:

- O primeiro e atual capítulo detalha a motivação e objetivos deste trabalho;
- O segundo capítulo apresenta o enquadramento deste trabalho no estado de arte;
- O terceiro capítulo detalha o procedimento experimental adotado;
- O quarto capítulo apresenta os resultados alcançados e respetivas discussões;
- O quinto e último capítulo apresenta as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2. ESTADO DA ARTE

Neste capítulo são apresentados e discutidos os principais conceitos do fabrico aditivo, nomeadamente, as variantes que recorrem ao arco elétrico como fonte de calor.

### 2.1. Fabrico aditivo

O fabrico aditivo, vulgarmente designado impressão 3D, é uma tecnologia que produz componentes pela deposição incremental de material em camadas sobrepostas, pelo que de acordo com a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) define-se como *Additive Layer Manufacturing* (ALM) [1].

Nos últimos 30 anos, a AM tem vindo a ganhar relevância na indústria [2], tendo o interesse inicial surgido com a prototipagem rápida. Com a qual é possível, desenvolver e avaliar, num reduzido intervalo de tempo, uma versão provisória e representativa de um determinado componente. E assim melhorar os modelos até atingir o produto final pretendido [3].

O potencial desta tecnologia levou ao seu desenvolvimento, sendo que atualmente se recorre à AM para o fabrico de componentes funcionais em diferentes indústrias como a aeroespacial, automóvel, militar e até no sector de saúde [4].

Há um conjunto de vantagens inerentes à AM. A possibilidade de ser automatizada com recurso a *Computer Aided Design* (CAD) reduz a intervenção humana e encurta os prazos de entrega [5]–[7]. Esta tecnologia possibilita ainda a redução do desperdício de material e a produção de componentes com geometrias complexas, impensáveis para os métodos de fabrico convencionais [8].

Com a implementação da AM surgiu a necessidade de classificar as diferentes variantes, para isso, com a norma ASTM F2792 [9], foram agrupadas as configurações técnicas e não técnicas em 7 categorias. Estas encontram-se apresentadas com as respetivas definições na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1** Classificação em categorias de AM, de acordo com o ASTM [8], [9]

<b>Categoria</b>	<b>Descrição</b>
<i>Binder jetting</i>	Um agente de ligação líquido é seletivamente depositado de forma a ligar o material em pó.
<i>Directed energy deposition</i>	Recorre a uma fonte concentrada de energia térmica para fundir o material depositado
<i>Material extrusion</i>	O material é seletivamente fornecido através de um bocal ou orifício.
<i>Material jetting</i>	O material de adição é seletivamente depositado através de gotículas.
<i>Powder bed fusion</i>	Recorre-se a uma fonte de energia térmica para fundir seletivamente zonas de uma cama de pó.
<i>Sheet lamination</i>	Processo de fabrico aditivo em que chapas de material são seletivamente ligadas.
<i>Vat photopolymerization</i>	Um fotopolímero líquido é seletivamente curado por ação de uma luz ultravioleta.

Em resposta às necessidades da indústria, surgiram variantes de processo de AM que possibilitam o fabrico com diferentes matérias. Destacando-se os polímeros, os cerâmicos e os metais, com particular interesse para indústria aeroespacial e automóvel [10], [11].

## 2.2. Fabrico aditivo metais

Quando comparada com os processos convencionais a AM de metais apresenta vantagens competitivas, tais como: o fabrico de componentes com geometria inexequível para os processos convencionais, a redução de massa e do número de componentes por conjunto. Evitando deste modo, a necessidade de recorrer a ligações entre componentes [8], [12].

A capacidade de fabricar numa vasta gama de metais (ligas de titânio, alumínio, aço, entre outros), tornam estas tecnologias aliciantes para diferentes indústrias, inclusive a aeroespacial, com especial interesse nas ligas de alumínio e titânio [13].

A alimentação de material na AM de metais é garantida por pós ou por fio [2]. Em ambos os casos são envolvidos complexos modos de transferência de massa e energia. Pelo que, é possível classificar as diferentes variantes tendo em conta o tipo de alimentação, tal como ilustrado na Figura 2.1.

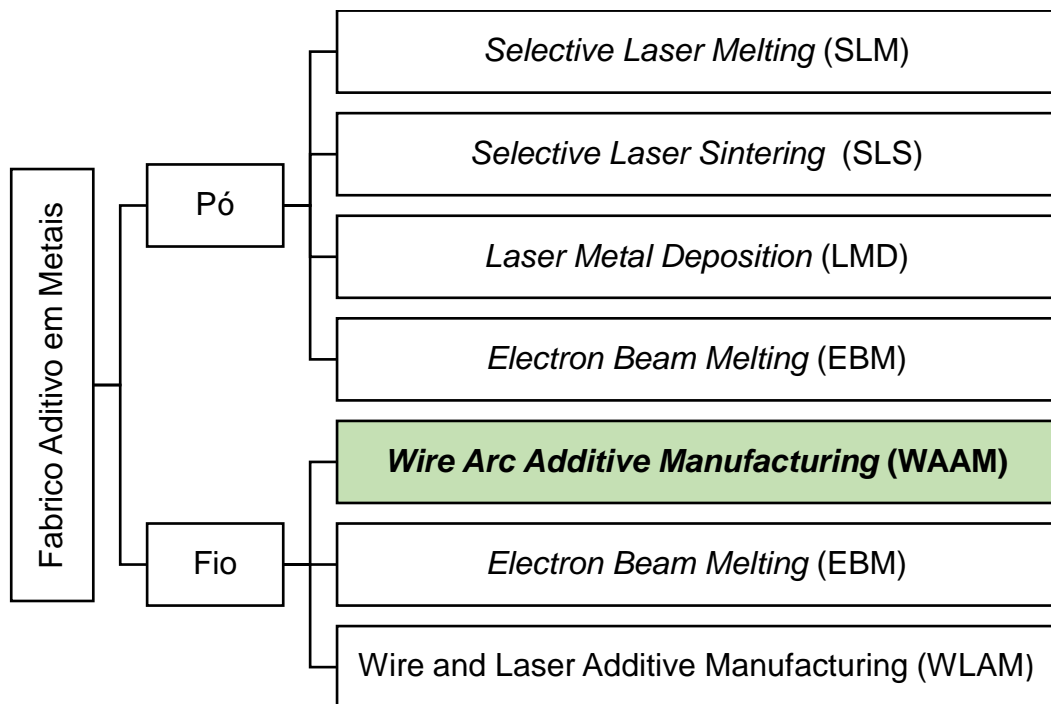


Figura 2.1 Exemplos de variantes de fabrico aditivo em metais [5], [14]

### 2.2.1. Alimentação por pó metálico

Nas tecnologias de AM baseadas no pó metálico, *Powder Bed Fusion* (PBF), a energia para fundir uma fina camada de pó é fornecida diretamente através de um feixe de elétrons ou laser [15], [16]. Em seguida um distribuidor de pó deposita uma nova camada sobreposta. Tal como a Figura 2.2 sugere, este ciclo é repetido até o componente estar concluído.

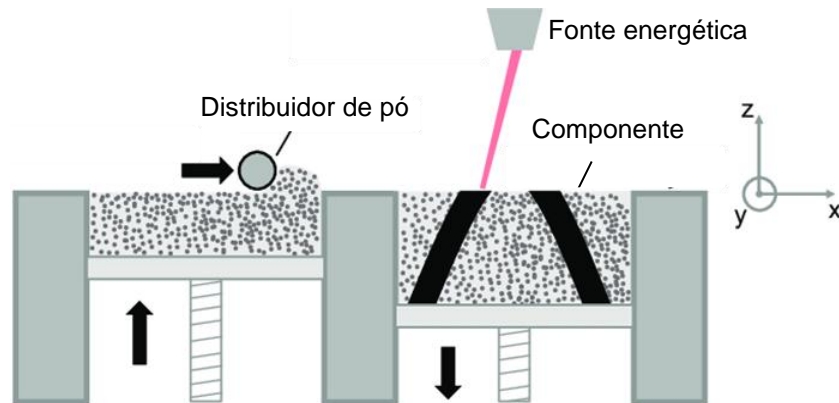


Figura 2.2 Esquemático PBF , adaptado de [17]

Nestes processos a fonte energética movimenta-se segundo o plano XY, e como forma de garantir a renovação da camada de pó, a plataforma move-se segundo o eixo Z. Estas deslocações estabelecidas com recurso a *Computer Aided Manufacturing* (CAM).

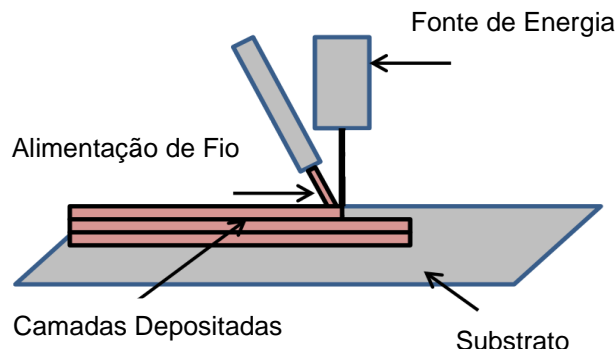
*Electron Beam Melting* (EBM), é um exemplo de uma variante que recorre a um feixe de elétrons como fonte energética. Para possibilitar o estabelecimento adequado do feixe de elétrons, no EBM, a atmosfera é protegida por uma câmara de vácuo. Esta solução evita também problemas de oxidação, pelo que é indicada para o fabrico com metais reativos, como o titânio. No entanto, a câmara de vácuo, acresce os custos do equipamento [18].

O *Selective Laser Sintering* (SLS) e o *Selective Laser Melting* (SLM) recorrem a um foco laser para fundir o pó e a gases inertes para garantir a proteção do banho de fusão. Estas duas variantes apresentam semelhanças, sendo o grau de fusão entre os grãos de pó, o que as distingue [11], [19]. No SLM a fusão é total, enquanto no SLS existe uma liquefação parcial ao nível dos limites de grão de pó [20].

### 2.2.2. Alimentação por fio metálico

Devido às elevadas taxas de deposição, os sistemas de alimentação por fio metálico são apropriados para a produção de grandes componentes com uma complexidade geométrica moderada [8].

O fio, tal como esquematizado na Figura 2.3, é alimentado através de um bocal e fundido por uma fonte energética. A deposição é efetuada seletivamente camada após camada.



**Figura 2.3** Esquema genérico representativo de sistemas de alimentação por fio metálico, adaptado de [21]

Dependendo da fonte de energia é possível classificar as variantes de alimentação por fio metálico em três grupos, nomeadamente: baseado no laser (WLAM), no feixe de elétrons (EBM) e no arco elétrico (WAAM) [2].

O laser é a fonte com melhor precisão, no entanto apenas 30 - 50 % da energia emitida é absorvida pelo substrato, pelo que a eficiência desta variante é reduzida [22]. Por outro lado, o feixe de elétrons assegura uma eficiência superior, mas requer a uma atmosfera controlada com uma câmara de vácuo, acrescentando assim o custo do equipamento. O EBM é adequado para o fabrico de componentes em que a qualidade é o requisito fundamental, como na indústria aeroespacial [23], [24]. Comparativamente ao laser e ao feixe de elétrons, o arco elétrico é a fonte com melhor eficiência, podendo em alguns casos, atingir uma eficiência energética de 90% [2], [25]. Os custos associados aos equipamentos de arco elétrico são relativamente baixos, no entanto instabilidades na geração do arco podem levar a problemas de precisão [26].

## 2.3. Wire arc additive manufacturing (WAAM)

O processo WAAM, graças à elevada taxa de deposição e ao baixo custo dos equipamentos, tem sido alvo de grande atração por parte da indústria. Este recorre ao arco elétrico como fonte energética e pode ser visto como uma automatização dos processos e equipamentos da soldadura por arco convencional. Pelo que é classificado tendo em conta o tipo soldadura usado, nomeadamente: *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Plasma Arc Welding* (PAW) e *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) [2], [5]. O processo encontra-se esquematizado na Figura 2.4, onde também é apresentada parte da nomenclatura utilizada.

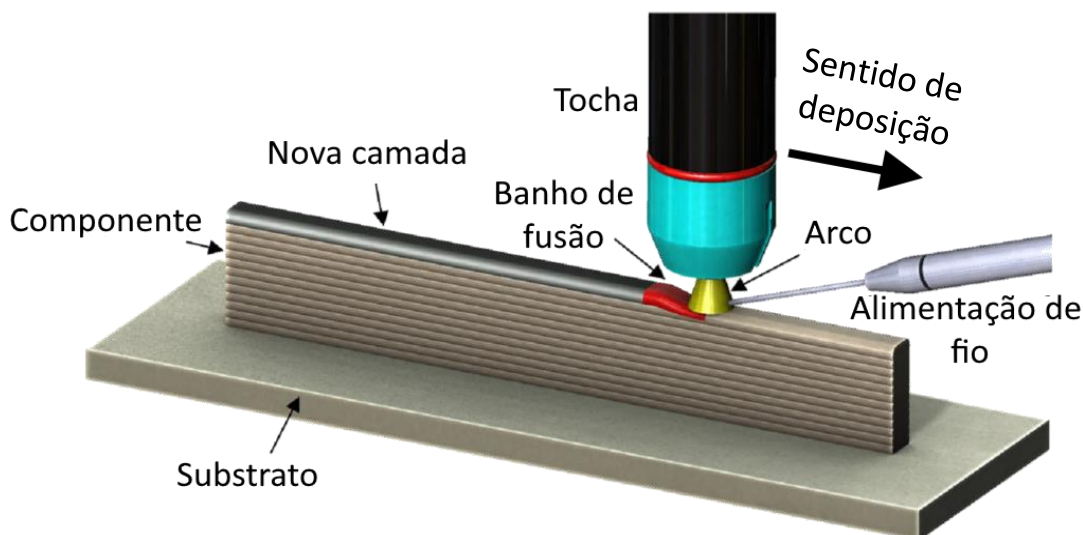


Figura 2.4 Representação esquemática do processo WAAM, adaptado de [5]

### 2.3.1. Processos de soldadura usados no WAAM

Neste trabalho a base de soldadura é o GMAW, pelo que é necessário entender esta variante. O GMAW é um processo de soldadura onde o arco elétrico é gerado entre o componente e um fio consumível, alimentado coaxialmente à tocha. O banho de fusão é protegido por um gás inerte ou ativo, *Metal Inert Gas* (MIG) e *Metal Active Gas* (MAG), respetivamente. A taxa de deposição é dependente dos parâmetros de processo impostos e varia entre 15 – 160 g/min. Daí esta variante ser ideal para a produção de componentes de grandes dimensões [5], [27].

Tanto o PAW como o GTAW recorrem a um eletrodo de tungsténio não consumível para gerar o arco elétrico, protegido por um gás inerte. Em comparação com o GMAW, estas variantes asseguram um arco mais estável, mas apresentam complicações na alimentação do fio consumível, sendo necessário recorrer a dispositivos externos à tocha. No PAW recorre-se a um orifício entre o cátodo e o ânodo para focar o arco, aumentando assim a densidade de energia debitada e, conseqüentemente, Zonas Termicamente Afetadas (ZTA) mais estreitas [5].

### 2.3.2. Parâmetros de processo

De uma forma geral a soldadura com base no arco elétrico é complexa, uma vez que para assegurar um bom cordão é necessário otimizar vários parâmetros. Nos processos MIG/MAG alguns destes parâmetros são [5], [28]: a intensidade de corrente e tensão elétrica, o tipo e caudal de gás de proteção, o material e diâmetro de fio, a distância entre a tocha e a peça (*Contact Tip to Work Distance*), a velocidade de alimentação do fio e ainda, a velocidade e o ângulo de atuação da tocha.

De notar que no WAAM os parâmetros devem ser adaptados e otimizados para cada componente, para isso é necessário ter em conta os equipamentos, o material e a geometria pretendida [5]. A intensidade de corrente e a tensão elétrica são os parâmetros com maior influência sobre a estabilidade do arco, pelo que os equipamentos de soldadura recentes têm ajustes predefinidos que automaticamente controlam estes valores.

A escolha destes parâmetros altera os modos de transferência, pelo que é possível controlar a morfologia do cordão, a penetração do banho de fusão, a taxa de deposição e até o acabamento superficial das paredes. No MIG/MAG os três principais modos de transferência de metal são [28]:

- **Globular** – Caracterizado por uma baixa entrega térmica e diâmetro de gotas superior ao do fio de adição. Estas são transferidas, por efeito da força gravítica, a uma taxa de 1-10 gotas/s. Modo pouco utilizado devido à excessiva quantidade de salpicos;

- **Curto-circuito** – Modo de transferência com a menor entrega térmica e baixa penetração do banho de fusão. O arco é gerado por curto circuito no contato do fio com o banho de fusão. A extinção deste curto circuito é garantida quando a tensão superficial do banho de fusão é suficiente para atrair a gota da extremidade do fio;
- **Spray** – Modo de transferência com a maior entrega térmica. Requer a proteção com gás inerte, como o argônio ou hélio e assegura uma elevada taxa de deposição e penetração. Recorrendo a tensões e intensidades de corrente elevadas, a deposição é assegurada por pequenas gotas que são aceleradas por forças eletromagnéticas do arco elétrico.

Apesar das inúmeras vantagens do WAAM na indústria, a dificuldade no controle dos parâmetros e a instabilidade do modo físico de transferência, faz deste um processo suscetível ao aparecimento de defeitos. Pelo que para garantir a otimização dos parâmetros é importante conhecer os defeitos típicos, sendo estes: deformações, porosidades e fissurações [4], [8].

### **2.3.3. Acabamento superficial - Ondulações**

O acabamento superficial representa um dos maiores obstáculos do WAAM, sendo que as ondulações, verificadas entre camadas de deposição, geram pontos de concentração de tensões que podem originar problemas de fadiga. Para atenuar estas ondulações e melhorar o rigor dimensional recorrem-se a sistemas híbridos, em que se realiza a pós-maquinação dos componentes, integrando assim a tecnologia aditiva com a subtrativa [5], [30].

O diâmetro do fio de alimentação é um importante fator de controle no WAAM [2]. Para além de influenciar a taxa de deposição, existe um compromisso entre o diâmetro de fio e o acabamento superficial. Diâmetros maiores induzem a piores acabamentos superficiais, enquanto diâmetros menores atenuam as ondulações no componente. Como definido na literatura [31], estas ondulações podem ser caracterizadas de acordo com a distância máxima entre picos e vales, tal como ilustrado na Figura 2.5.

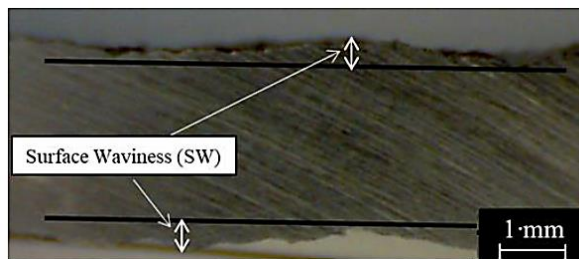


Figura 2.5 Ondulações na secção transversal de um provete produzido por WAAM, [16]

### 2.3.4. Comparação de WAAM com SLM

Tal como já referido, nestes processos existe um compromisso entre o acabamento superficial e a taxa de deposição. Por análise da Tabela 2.2 entende-se que o SLM garante melhor acabamento superficial e rigor dimensional, no entanto a taxa de deposição é baixa. Em contrapartida, a alimentação por fio metálico assegura maiores taxas de deposição, mas acabamentos superficiais piores aos conseguidos por pó. Pelo que o WAAM é mais apropriado para o fabrico de componentes maiores e com menor detalhe geométrico [32].

Tabela 2.2 Comparação de SLM com o WAAM, adaptado de [2]

Processo	Espessura da Camada ( $\mu\text{m}$ )	Taxa de Deposição (g/min)	Rugosidade Superficial (mm)
SLM	75	~0.1	$\pm 0.04$
WAAM	~1500	15-160	$\pm 0.2$ (Ondulações)

Uma das limitações do SLM é o elevado custo dos equipamentos, podendo este processo ser até 50 vezes mais dispendioso que o WAAM [33]. Essa disparidade de custos pode ser também justificada com as tecnologias de obtenção da matéria prima. Para o mesmo metal, a trefilagem de um fio é menos dispendiosa do que a atomização a gás ou a pulverização por plasma, processos atualmente recorridos para a obtenção do pó de granulometria controlada [34].

Como forma de complementar as diferentes vantagens do SLM/WAAM, Xuezhi Shia *et al.*, estudou a combinação das duas variantes de processo num sistema híbrido [32].

#### 2.3.4.1. Fabrico híbrido SLM - WAAM

Para compreender a viabilidade do fabrico híbrido SLM – WAAM, foram realizados ensaios preliminares com a liga Ti – 64Al – 4V. Neste estudo usaram-se pré-formas produzidas por SLM como substrato para a deposição do WAAM. Como forma de validação do ensaio, foi realizada uma análise microestrutural e obtida a curva de tensão – deformação das paredes produzidos. Tal como ilustrado na Figura 2.6, foi possível identificar três regiões distintas na microestrutura: zona SLM, zona WAAM e zona mista (onde se deu a ligação ao substrato). Nos pra de tensão verificou-se que a fratura ocorre na zona WAAM.

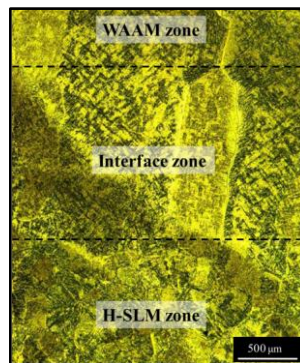


Figura 2.6 Microestrutura de provetes produzidos pelo processo híbrido SLM – WAAM, [32]

## 2.4. Estudos para melhorar o rigor dimensional do fabrico aditivo

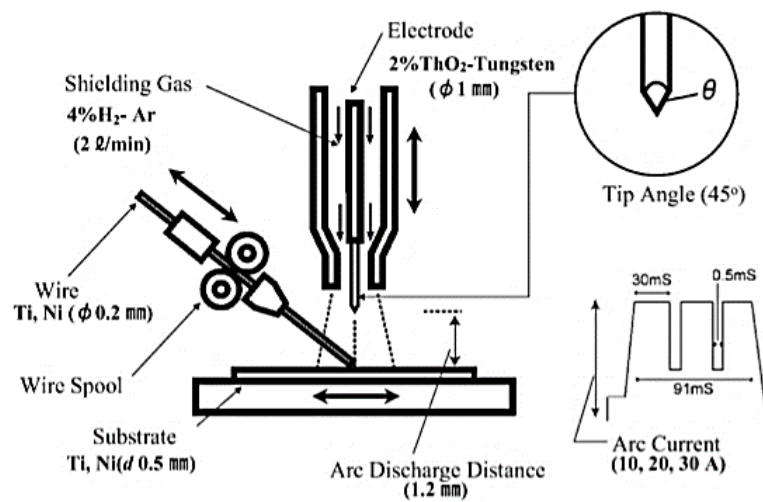
Com a diminuição da dimensão dos componentes surgem obstáculos para a utilização das tecnologias de AM, tal como John Kawola referiu [35], “*When it comes to additive manufacturing, the next frontier of innovation isn’t big, it’s high precision, small parts*”. Este mesmo autor fundou a *Boston Micro Fabrication* (BMF) [36], empresa essa que estudou e desenvolveu equipamentos mais exatos e precisos, possibilitando assim o fabrico de pequenos componentes poliméricos.

Em aplicações de GMAW no WAAM o diâmetro do fio de alimentação varia tipicamente entre 0,9 e 1,6 mm [37], pelo que até à data não há estudos relativos

a aplicações de MIG/MAG com diâmetros de fio inferiores. No entanto, foram desenvolvidas variantes de GTAW e PAW com  $\mu$ -Fio [38].

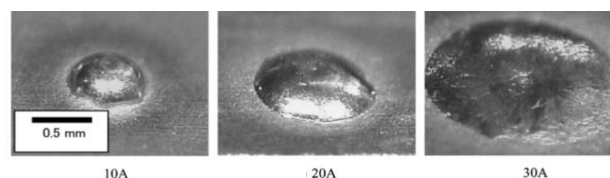
### 2.4.1. 3D Micro Welding

M. Katou *et al.* [39] desenvolveu uma variante do GTAW chamada de *3D Micro Welding* (3DMW). Este estudo realizou-se com um fio 200  $\mu\text{m}$  de diâmetro, da liga metálica NiTi e tem como objetivo entender a influência da intensidade de corrente. A Figura 2.7 esquematiza os ensaios realizados no estudo 3DMW.



**Figura 2.7** Condições e parâmetros experimentais no 3DMW [39]

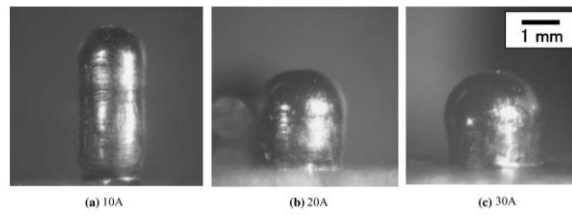
A composição do gás de proteção utilizado foi Ar - 4% H<sub>2</sub> e o caudal de fornecimento foi de 2 l/min. A intensidade de corrente estabelecida varia entre 10 e 30 A, tal como representado na Figura 2.8.



**Figura 2.8** Tamanho da gota em função da intensidade de corrente [39]

Verificou-se que o tamanho da gota varia em função da intensidade de corrente, aumentando com o incremento desta. Pelo que, para uma maior precisão dimensional poderá ser interessante recorrer a menores intensidades

de corrente, tal como sugerido na Figura 2.9 com provetes produzidos com a sobreposição de 50 camadas.

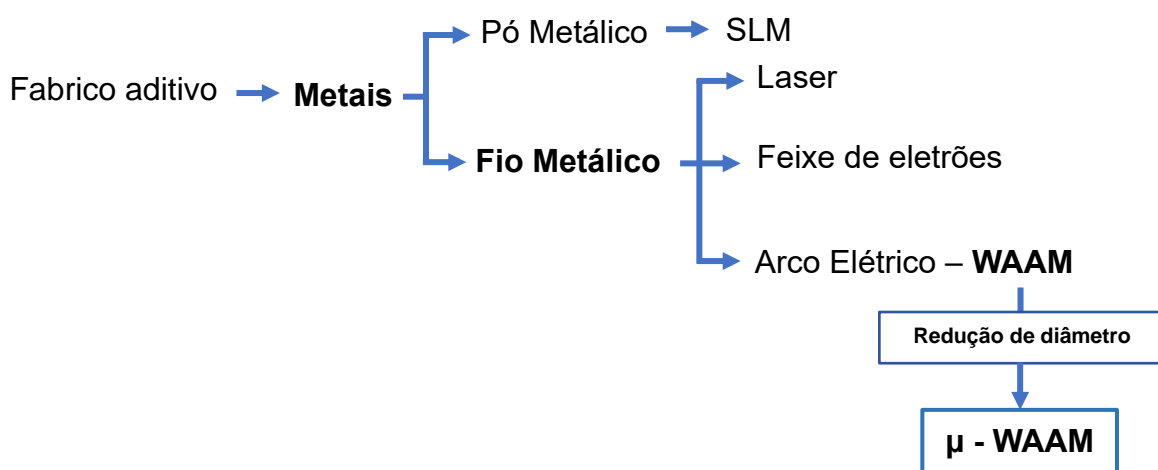


**Figura 2.9** Morfologia de um provete de 50 camadas sobrepostas em função da intensidade de corrente [39]

## 2.5. Resumo e conclusões do capítulo

O interesse da indústria nas tecnologias de fabrico aditivo conduziu ao desenvolvimento de diferentes variantes, como o WAAM, que recorre ao arco elétrico para produzir componentes metálicos de grandes dimensões sem grande precisão dimensional. Tipicamente, pequenos componentes metálicos com geometrias complexas requerem taxas de deposição baixas e, portanto, torna-se mais adequado o uso de Laser ou Feixe de Eletrões.

Não havendo nenhuma variante do WAAM adequada para o fabrico de pequenos componentes, é prudente estudar e desenvolver uma. Pelo que é este o objetivo desta dissertação de mestrado, com o  $\mu$  - WAAM. Este encontra-se enquadrada no fabrico aditivo atual através do esquema ilustrado na Figura 2.10.



**Figura 2.10** Enquadramento do  $\mu$  - WAAM no âmbito do fabrico aditivo

# CAPÍTULO 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Este capítulo descreve o equipamento utilizado na montagem experimental e os sistemas de movimentação e a automatização destes, com recurso ao *Software, LabView*. São também descritos os materiais utilizados e o procedimento experimental para a realização de ensaios.

## 3.1. Seleção de componentes e montagem experimental

O equipamento experimental utilizado consiste numa vertente de WAAM com GMAW, para produzir provetes lineares. Para esse efeito, recorre-se a um motor de alimentação de fio e a uma estrutura que garante a deposição, com a movimentação linear da tocha de WAAM.

A estrutura de dimensões 390 x 230 x 170 mm, apresentada na Figura 3.1, foi construída em perfil Bosch Rexroth's com secção 20 x 20 mm. Este perfil caracteriza-se pela elevada rigidez e versatilidade na montagem de componentes, pelo que é ideal para este projeto.

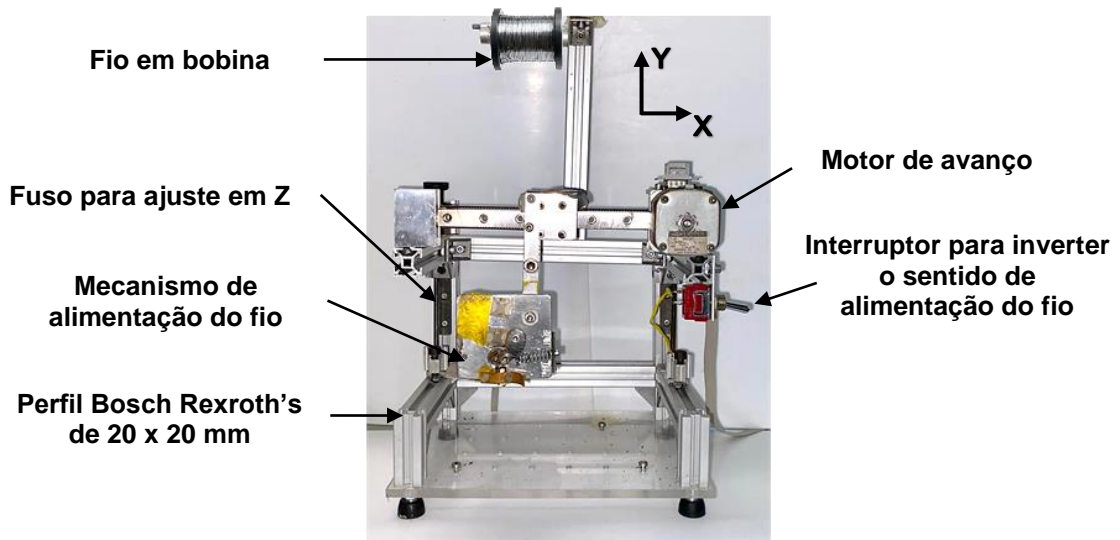


Figura 3.1 Montagem experimental do equipamento de  $\mu$  - WAAM

A montagem experimental respeita os dois Graus de Liberdade (GDL) requisitados para o funcionamento do equipamento. Uma vez que, os dois fusos permitem o ajuste no eixo Z e um conjunto motor/correia garante movimentação da tocha no eixo X.

### 3.1.1. Mecanismo de alimentação de fio

Como forma de garantir a alimentação de fio projetou-se o mecanismo representado na Figura 3.2. Neste, o fio é conduzido entre um rolamento e o veio do motor. Este motor de passo é controlado por um sinal, imposto num gerador de sinais, e amplificado por um driver alimentado por uma fonte de alimentação de 24 V. Alterando a frequência de atuação do sinal é possível regular a velocidade de alimentação do fio, parâmetro fundamental para o controlo do processo de  $\mu$  - WAAM.

A energia elétrica para o  $\mu$  - WAAM é introduzida na tocha, pelo que, para proteger os restantes componentes, é importante garantir o isolamento elétrico entre a tocha e o chassi do mecanismo de alimentação. Para isso, recorreram-se a componentes de ligação isolantes, nomeadamente anilhas e parafusos de Nylon e a uma confirmação da descontinuidade elétrica do equipamento com um multímetro.

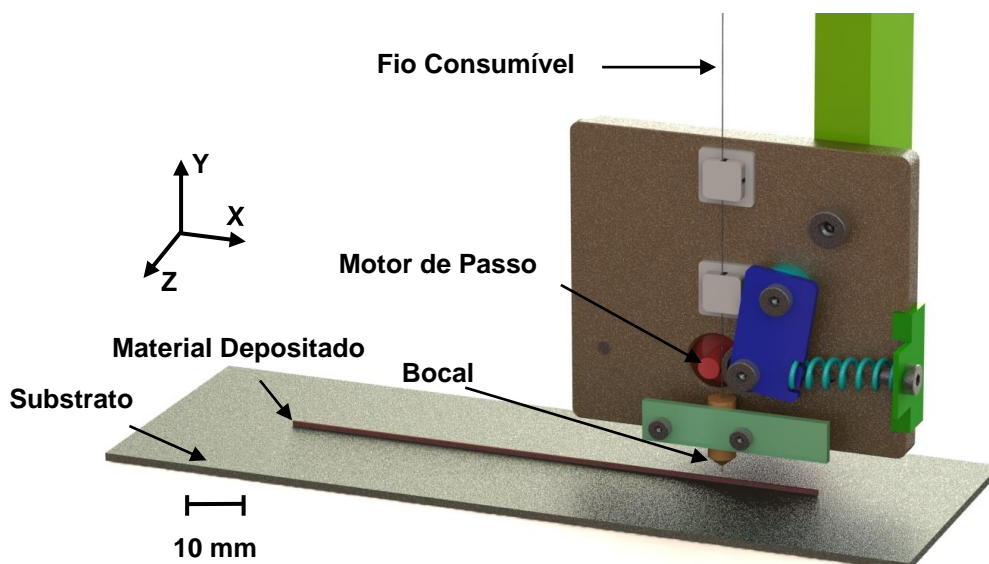






Figura 3.2 Esquema CAD do mecanismo de alimentação do fio

### 3.1.2. Motor de avanço

O motor de avanço movimenta linearmente o mecanismo de alimentação de fio, garantindo assim a deposição de material no substrato segundo o eixo X. A potência deste motor é fornecida por uma fonte de alimentação e o controlo é estabelecido com o *software LabVIEW*.

Os principais equipamentos de controlo e potência, tanto da componente motora como a de soldadura, encontram-se listados na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1** Lista de equipamentos e respetivas características

Equipamento	Características	Ilustração
Fonte energética para o $\mu$ - WAAM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo: Keithley 2260b-30-72 [40]</li> <li>• Potência: 720 W</li> <li>• Intervalo corrente: 0 – 72 A</li> <li>• Intervalo tensão: 0 – 30 V</li> </ul>	
Bateria como fonte energética para o $\mu$ - WAAM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo: Varta Silver Dynamic H3</li> <li>• Tensão nos terminais: Aprox. 12 V</li> <li>• Capacidade: 100 Ah</li> <li>• Intensidade de corrente máxima para o: 830 A</li> </ul>	
Gerador de sinais para o motor de alimentação de fio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo: RS Pro SDG805 [41]</li> <li>• Frequência de sinal: 1 <math>\mu</math>Hz - 5 MHz</li> <li>• Amplitude pico a pico: 2 mVpp – 10 Vpp</li> <li>• Forma da onda: Sinusoidal, quadrada, rampa, pulsada</li> </ul>	
Fonte de alimentação para o motor de alimentação de fio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo: ELC - ALF2902M</li> <li>• Potência: 60 W</li> <li>• Intervalo tensão: 5 – 29 V</li> </ul>	

---

Fonte de alimentação para o motor de avanço

- Modelo: AIM-TTI EX 2020R [42]
- Potência: 400 W
- Intervalo corrente: 0 – 20 A
- Intervalo tensão: 0 – 20 V



---

Placa de Aquisição

- Modelo: National Instruments NI myDAQ [43]
- Resolução de entrada: 16 bits
- Taxa de amostragem máxima: 200 kS/s



---

### 3.1.3. Fontes de energia para o $\mu$ - WAAM

Como fonte de energia para o  $\mu$  - WAAM utilizou-se uma fonte de alimentação de corrente contínua (DC) programável. É possível controlar a intensidade de corrente e a tensão elétrica, estabelecendo a diferença de potencial entre os dois terminais do equipamento e definindo o valor máximo da corrente fornecida ao sistema.

Como forma de estudar outra fonte de energia, recorreu-se a uma bateria de 12 V. De forma a regular a tensão elétrica fornecida no  $\mu$  -WAAM, foram utilizadas resistências ajustáveis, ligadas em série.

Variando o modo de conexão dos polos da fonte com o equipamento é possível variar a polaridade do arco. Com o cátodo na tocha/arame e o ânodo no substrato consegue-se uma maior concentração de energia na peça, gerando uma maior penetração do banho de fusão, este tipo de polaridade é designada como direta. Em contrapartida, para concentrar o calor do arco elétrico no fio de alimentação, de modo a garantir uma maior facilidade no destacamento das gotas de metal fundido, a polaridade inversa é a adequada.

### 3.2. Automação dos sistemas de movimentação

Como forma de automatizar o processo recorreu-se ao *LabVIEW*. Com este *software* garante-se a sistematização experimental e controlam-se os motores de avanço e de alimentação do arame. Para isso, foi necessário estabelecer retas de calibração experimentais, que asseguram conformidade entre as velocidades preestabelecida e as reais, registadas na montagem experimental em serviço.

Cada um dos motores apresenta uma gama de funcionamento. O motor de avanço, com uma configuração de meio passo, garante velocidades de deposição entre 0,7 - 13 mm/s. Do mesmo modo, a gama de funcionamento do motor de alimentação permite velocidades de fio entre 12 - 105 mm/s.

De forma a facilitar a inserção do fio no mecanismo de alimentação é possível inverter o sentido deste e acionar somente o motor de alimentação do fio. É também possível atuar no sentido de deposição através do interruptor apresentado na interface gráfica do programa *LabVIEW*, da Figura 3.3.

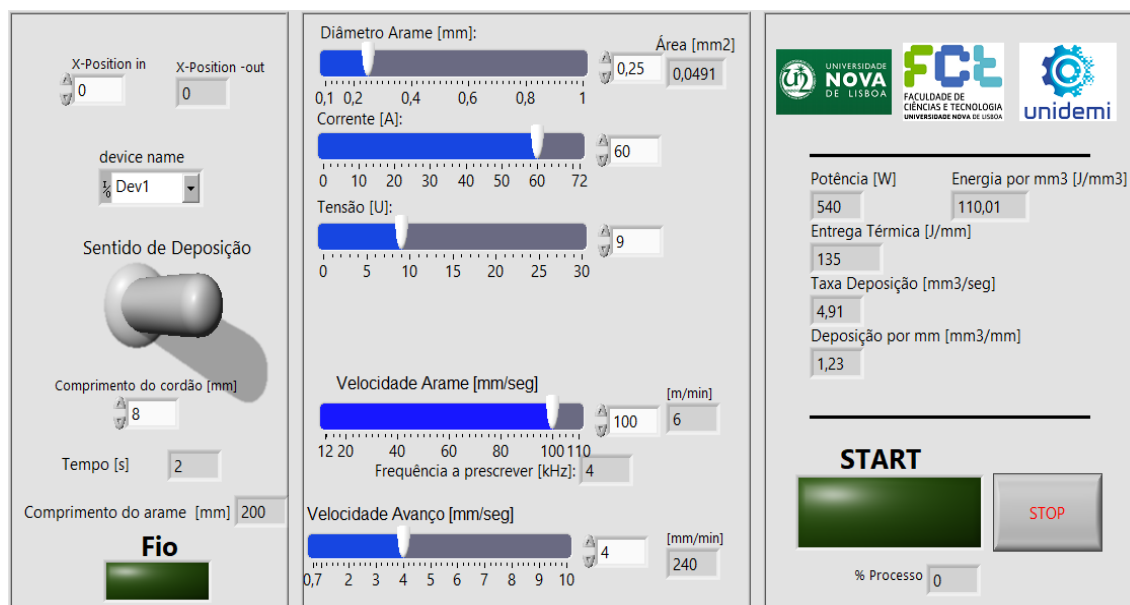


Figura 3.3 Interface gráfica do programa *LabVIEW* para controlo do processo  $\mu$  - WAAM

### 3.2.1. Cálculos do processo

Como condição de paragem do processo tem-se o comprimento do cordão,  $L_{\text{Cordão}}$  [mm], sendo que os motores cessam marcha quando o cordão atinge o comprimento previamente determinado. Estabelecendo a velocidade de fio (*Wire Feed Speed*) e de avanço (*Travel Speed*),  $WFS$  [mm/s] e  $TS$  [mm/s] respetivamente, a intensidade de corrente,  $I$  [A] e a tensão,  $U$  [V], para um determinado diâmetro de fio,  $\varnothing$  [mm] é possível calcular diversas grandezas físicas, nomeadamente:

- A área de secção de fio,  $A$  [mm<sup>2</sup>] (Eq. 3.1);
- A Potência,  $P$  [W] (Eq. 3.2);
- A entrega térmica,  $HI$  [J/mm] (Eq. 3.3);
- A taxa de deposição,  $DR$  [mm<sup>3</sup>/s] (Eq. 3.4);
- Volume depositado por comprimento de cordão,  $VD$  [mm<sup>3</sup>/mm] (Eq. 3.5);
- A densidade de energia por volume de fio fundido,  $ED$  [J/mm<sup>3</sup>] (Eq. 3.6);
- O tempo de deposição do cordão,  $\Delta t$  [s] (Eq. 3.7);
- O comprimento de fio necessário para depositar o cordão,  $L_{\text{FIO}}$  [mm] (Eq. 3.8).

$$A = \frac{\pi}{4} \times \varnothing^2 \quad 3.1$$

$$P = U \times I \quad 3.2$$

$$HI = \frac{P}{TS} \quad 3.3$$

$$DR = WFS \times A \quad 3.4$$

$$VD = \frac{DR}{TS} \quad 3.5$$

$$ED = \frac{P}{DR} \quad 3.6$$

$$\Delta t = \frac{L_{\text{Cordão}}}{TS} \quad 3.7$$

$$L_{\text{FIO}} = \Delta t \times WFS \quad 3.8$$

Estes cálculos encontram-se esquematizados no diagrama de blocos do programa de *LabVIEW*, apresentado no Anexo A.

### 3.3. Materiais

#### 3.3.1. Fio de adição

Como fio de alimentação selecionaram-se diferentes metais, com diâmetro entre 100 – 450  $\mu\text{m}$ , incidindo mais na gama dos 200 – 300  $\mu\text{m}$ . Foram estudados o aço AISI 316L [44], conhecido pela elevada resistência à corrosão, e o aço ASTM A228 [45], que devido ao elevado teor de carbono, apresenta uma elevada resistência à fadiga. A Tabela 3.2 e a Tabela 3.3, apresentam a composição química e as propriedades mecânicas destes materiais, respetivamente.

**Tabela 3.2** Composição química dos materiais selecionados (Valores em %)

	C	Mn	P	S	Si.	Ni	Cr	Mo	N	Fe
AISI 316L	0,03	2	0,045	0,03	0,75	10 - 14	16 - 18	2 - 3	0,1	Bal.
ASTM A228	0,7 - 1	0,2 - 0,7	0,025	0,03	00,3	NA	3	NA	NA	Bal.

**Tabela 3.3** Propriedades mecânicas dos materiais selecionados

	Tensão de cedência (MPa)	Tensão de rotura (MPa)	Enlongamento (%)	Trabalho de impacto ISO – V (J)	Dureza Rockwell
AISI 316L	303	586	56	103 [46]	B 81
ASTM A228	2650	NA	NA	NA	C 41- 60 [47]

A viabilidade do processo estudou-se também para outros metais, como: o alumínio, a liga de níquel/titânio (NiTi), o aço AISI 304 e dois fios de um termopar do tipo K, mais concretamente, o Cromel e o Alumel. A Tabela 3.4 apresenta todos os metais estudados e os respetivos diâmetros de fio.

**Tabela 3.4** Fios metálicos estudados e respetivos diâmetros

Metal	Diâmetro de fio ( $\mu\text{m}$ )	Observações	
AISI 316L	100 e 200	Utilizado como material de adição nos processos de soldadura convencionais	
ASTM A228	250	Designado <i>music spring steel</i> , pelas aplicações no encordoamento de instrumentos musicais	
Alumínio	450	Série 6000, aplicação em condutores elétrico [48]	
NiTi [49]	300	<i>Shape Memory Alloy</i>	
AISI 304 [50]	250	Aço inoxidável	
Termopar, tipo K [51]	Cromel	300	Ni 90% e Cr 10%
	Alumel	300	Ni 95%, Mn 2%, Al 2% e Si 1%

Relativamente à metodologia experimental é importante garantir que o fio é guiado tangencialmente ao veio do motor sem haver escorregamento. De forma a gerar atrito entre o fio e o mecanismo de alimentação, realizou-se um recartilhado no veio do motor. É também importante evitar contaminações do banho de fusão, pelo que se recorre a uma lixa fina para remover possíveis óxidos da superfície do fio.

### 3.3.2. Substrato

Como substrato utilizaram-se chapas finas de aço, aço inoxidável, alumínio e cobre. Visto que a entrega térmica do  $\mu$  - WAAM é inferior à do WAAM convencional, é conveniente favorecer a adesão ao substrato. Desta forma, recorreu-se também ao chumbo, por apresentar um ponto de fusão baixo.

### 3.3.3. Gás de proteção

Para a proteção gasosa da soldadura utilizou-se ALPHAGAZ 1 e ARCAL 121, as composições químicas destes gases são apresentadas na Tabela 3.5 e Tabela 3.6, respetivamente. O fornecimento realizou-se com um caudal aproximado de 5 l/min, através de um tubo externo ao bocal da tocha.

**Tabela 3.5** Composição química do gás de proteção ALPHAGAZ 1

Ar	Impurezas ppm (v/v)		
	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>
99,999 %	< 3	< 2	< 0.5

**Tabela 3.6** Composição química do gás de proteção ARCAL 121



Ar	He	CO <sub>2</sub>
Balanço	18 % ± 1,8 %	1 % ± 0,2 %

### 3.4. Aquecimento do Substrato

A redução de diâmetro do fio limita a potência que é possível transferir durante o  $\mu$  - WAAM. De forma a compensar este decréscimo energético, estudou-se o fornecimento adicional de energia ao sistema. Para isso aqueceu-se o substrato e analisou-se a influência na adesão entre camadas de deposição e com o substrato.

O aquecimento do substrato realizou-se colocando este sobre uma resistência de potência e um elemento de aquecimento cerâmico. Estes componentes apresentam gamas de temperatura distintas, tal como verificado na Tabela 3.7 que apresenta os equipamentos utilizados para o aquecimento.

**Tabela 3.7** Lista de componentes utilizados no aquecimento do substrato

Componente	Características	Ilustração
Resistência de potência de alumínio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo: ARCOL HS100 1R5 J [52]</li> <li>• Potência: 100 W</li> <li>• Resistência: 1,5 <math>\Omega</math></li> <li>• Temperatura máxima: + 200 °C</li> </ul>	
Fonte de alimentação da resistência	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo: ISO-TECH IPS3303 [53]</li> <li>• Potência: 195 W</li> <li>• Intervalo corrente: 0 – 6 A</li> <li>• Intervalo tensão: 0 – 60 V</li> </ul>	

---

Elemento de aquecimento revestido a cerâmica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modelo: Código RS - 198-8529 [54]</li> <li>• Potência: 500 W</li> <li>• Temperatura máxima: + 750 °C</li> <li>• Tensão de alimentação: 230 V</li> </ul>
--	--

---



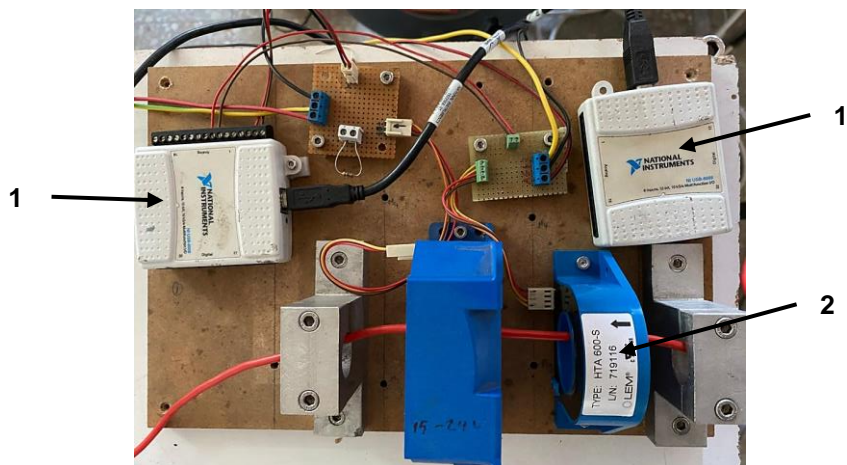
Como forma de monitorizar a temperatura do substrato, recorreu-se ao conjunto Termopar/Multímetro, ilustrado na Figura 3.4 numa aplicação com o elemento de aquecimento revestido a cerâmica. Escolheu-se um termopar do tipo K [51] por ter uma gama de temperatura extensa, entre - 200°C e 1100 °C.



**Figura 3.4** Equipamento para aquisição da temperatura do substrato

### 3.5. Estudo da intensidade de corrente e tensão elétrica

De forma a caracterizar os modos de transferência envolvidos no  $\mu$  - WAAM e estudar o comportamento da fonte, realizou-se a aquisição da intensidade de corrente e tensão elétrica. Para isso utilizou-se a instrumentação apresentada na Figura 3.5, anteriormente desenvolvida no laboratório de tecnologias do DEMI - FCT NOVA, tal como um programa *LabVIEW* para processar os dados recolhidos por duas placas de aquisição, *National Instruments USB 6008*.



**Figura 3.5** Instrumentação da intensidade de corrente e tensão elétrica do  $\mu$  - WAAM  
Nomenclatura: National Instruments USB 6008 (1), LEM HTA 600-S (2)

Os dados recolhidos foram guardados em ficheiros de texto, sendo depois processados em *MATLAB*. A resposta é apresentada graficamente com a ligação dos pontos de tensão elétrica e da intensidade de corrente recolhidos. O detalhe destes gráficos pode ser melhorado aumentando a taxa de aquisição, ou seja, recolhendo mais pontos por intervalo de tempo.

### 3.6. Análise microscópica da geometria das paredes

Como forma de visualizar a morfologia do cordão e avaliar a adesão entre camadas depositadas, realizaram-se análises microscópicas. Para isso foram preparadas amostras para observar tanto as secções transversal como a longitudinal. Estas foram embebidas em resina e posteriormente desbastadas com lixas até atingir um acabamento superficial satisfatório.

As superfícies foram examinadas com recurso ao microscópio *Olympus CX40* e à câmara de captação, *Olympus DP21*.

### 3.7. Ensaio de fusão por efeito de Joule

De modo a estudar o efeito que a variação do diâmetro de fio tem no estabelecimento do arco elétrico, efetuou-se um ensaio para registar e analisar a corrente necessária para levar dois fios condutores de diâmetro distinto a fundir por efeito de Joule.

Como amostras utilizaram-se fios de aço inoxidável com 50 mm de comprimento e diâmetros distintos de 0,2 mm e 0,5 mm. Estes foram conectados aos terminais da fonte de alimentação Keithley 2260b-30-72, tal como ilustrado na Figura 3.6.



**Figura 3.6** Montagem experimental para o ensaio de fusão por efeito de Joule

A intensidade de corrente fornecida pela fonte no momento da fusão do fio foi registada. Como forma de aumentar a confiança do resultado, este ensaio foi repetido três vezes, para cada diâmetro de fio. Calculou-se, de seguida, a média aritmética dos valores.

Para entender a influência da variação do diâmetro de fio,  $\varnothing$  [mm], é fundamental relacionar a intensidade de corrente,  $I$  [A], com a área de secção do fio,  $A$  [mm<sup>2</sup>] (Eq. 3.9), pelo que se define a densidade de corrente,  $J$  [A/mm<sup>2</sup>] (Eq. 3.10).

$$A = \frac{\pi}{4} \times \varnothing^2 \quad 3.9$$

$$J = \frac{I}{A} \quad 3.10$$

### 3.8. Resumo e conclusões do capítulo

Com a montagem experimental desenvolvida e através da interface gráfica de controlo do *LabVIEW*, é possível atuar nos parâmetros de processo de forma sistemática e intuitiva. Recorreram-se a vários fios para a alimentação e a diversos métodos para fundamentar e caracterizar os ensaios realizados.

# CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 4.1. Ensaio preliminares

Com os primeiros ensaios procurou-se estabelecer uma referência para os parâmetros de processo e caracterizar a geometria do cordão de ensaios com as duas estratégias de polaridade. Estes ensaios foram realizados com fio de aço inoxidável AISI 304, com a fonte de alimentação da *Keithley* e com a proteção gasosa do ALPHAGAZ 1.

### 4.1.1. Energia por volume de fio fundido

A energia por volume de fio fundido é um bom ponto de partida para a otimização dos parâmetros. Uma vez que se tem como referência os valores de energia por volume das aplicações convencionais do WAAM.

Recorrendo às equações 3.1, 3.2, 3.4 e 3.6 foi possível preencher a Tabela 4.1. Esta apresenta a energia por volume de fio fundido, ED ( $J/mm^3$ ), em estudos de WAAM, com fio de 1 mm de diâmetro, decorridos no laboratório de tecnologias do DEMI - FCT NOVA.

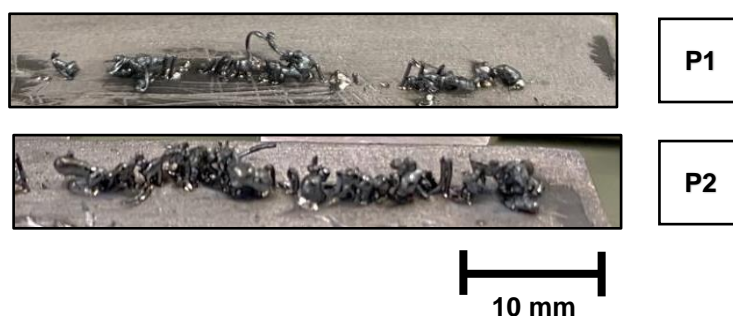
**Tabela 4.1** Parâmetros do WAAM convencional e respetiva energia por volume de fio

Ref.	Tensão (V)	Corrente (A)	WFS (mm/s)	ED ( $J/mm^3$ )
[55]	21	95	50	50,8
[8]	21	78	50	42,1

Tendo como referência a energia por volume de fio calculada, realizaram-se dois ensaios com substrato de chumbo. Os parâmetros estabelecidos para estes ensaios encontram-se apresentados na Tabela 4.2. e as respetivas geometrias de cordão na Figura 4.1.

**Tabela 4.2** Ponto de partida dos parâmetros de processo

Ensaio	Tensão (V)	Corrente (Limitada) (A)	WFS (mm/s)	TS (mm/s)	ED (J/mm <sup>3</sup> )
P1	6	25	60	2	50,9
P2	5	30	70	1,75	43,7



**Figura 4.1** Ponto de partida da deposição de material

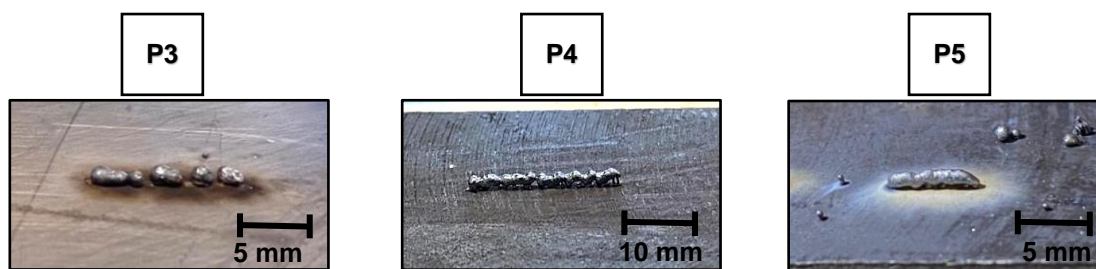
É evidente que nos ensaios realizados não se registou continuidade ao longo do cordão de deposição. No entanto a relação entre o diâmetro de fio e a energia por volume permitiu estabelecer os parâmetros com os quais se iniciou o processo de otimização.

#### 4.1.2. Otimização de parâmetros para o aço AISI 304

A Tabela 4.3 apresenta os parâmetros otimizados para o aço AISI 304, sendo os respetivos cordões apresentados na Figura 4.2.

**Tabela 4.3** Otimização dos parâmetros de processo para o aço AISI 304

Ensaio	P3	P4	P5
Tensão (V)	9	9	9
Corrente (Limitada) (A)	30	30	30
WFS (mm/s)	65	75	75
TS (mm/s)	5	2	2
Polaridade	Inversa	Inversa	Direta
Substrato	Aço Inoxidável	Aço	Aço
ED (J/mm <sup>3</sup> )	84,6	73,2	73,2



**Figura 4.2** Cordões de  $\mu$  - WAAM otimizados para o aço AISI 304

Com o ensaio P3 foi garantida a estabilidade do arco para o material e diâmetro de fio em causa, no entanto não se verificou continuidade ao longo do cordão. Como correção, reduziu-se a velocidade de avanço e aumentou-se a de alimentação, tal como parametrizado para os ensaios P4 e P5. Nestes, a continuidade foi assegurada, porém no P5, devido à utilização de polaridade direta, obteve-se uma melhor uniformidade ao longo do cordão. Tal como sugerido no Capítulo 3, este tipo de polaridade é mais adequado para a variante em causa. Pelo que se optou pela polaridade direta para a realização dos restantes ensaios.

Nestes ensaios a energia por volume de fio fundido verificou-se superior à registada no WAAM convencional. Esse resultado é expectável pois o cálculo da energia por volume foi realizado em função da corrente máxima, limitada pela fonte e não com o valor equivalente da intensidade de corrente eficaz.

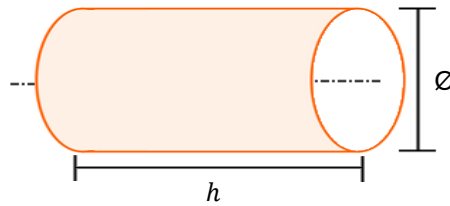
## 4.2. Ensaio de fusão por efeito de Joule

A Tabela 4.4 apresenta os valores de intensidade de corrente verificados no momento de fusão do fio, a respetiva média aritmética e, recorrendo às equações 3.9 e 3.10, a densidade de corrente

**Tabela 4.4** Cálculo da densidade de corrente para dois fios de aço inoxidável

	Diâmetro, $\varnothing$ (mm)	
	0,2	0,5
Intensidade de corrente, I (A)	2,33	8,62
	2,41	8,83
	2,12	8,85
Média da Intensidade de corrente, $\bar{I}$ (A)	2,29	8,77
Área, A (mm <sup>2</sup> )	0,0314	0,196
Densidade de corrente, J (A/mm <sup>2</sup> )	72,79	44,65

Com este ensaio foi possível fundamentar a relação verificada entre o diâmetro de fio e a energia fornecida por volume de fio fundido. Uma vez que é necessária uma maior densidade de corrente elétrica para fundir o fio de menor diâmetro. Este resultado é expectável e pode ser explicado com a relação entre o diâmetro de fio e a área superficial específica, ASE ( $\text{mm}^2/\text{mm}^3$ ). A Equação 4.1 apresenta o cálculo da ASE, para um segmento representativo de fio, com um comprimento,  $h$  (mm) e diâmetro,  $\varnothing$  (mm), tal como apresentado na Figura 4.3.



**Figura 4.3** Segmento de fio de comprimento,  $h$  (mm) e diâmetro,  $\varnothing$  (mm)

$$ASE = \frac{\text{Área da superfície lateral}}{\text{Volume}} = \frac{\pi \times \varnothing \times h}{\frac{1}{4} \times \pi \times \varnothing^2 \times h} = \frac{4}{\varnothing} \quad 4.1$$

A relação,  $ASE = \frac{4}{\varnothing}$ , é válida para qualquer diâmetro de fio. Pelo que, no  $\mu$  - WAAM verifica-se uma área superficial específica superior e, conseqüentemente, uma maior perda energética superficial por volume de fio.

### 4.3. Ensaio com fonte de alimentação

A redução do diâmetro de fio limita a potência que é possível transferir para o banho de fusão, comprometendo assim a adesão das camadas de deposição. Deste modo, considerou-se pertinente estudar o fornecimento de energia adicional através do aquecimento do substrato.

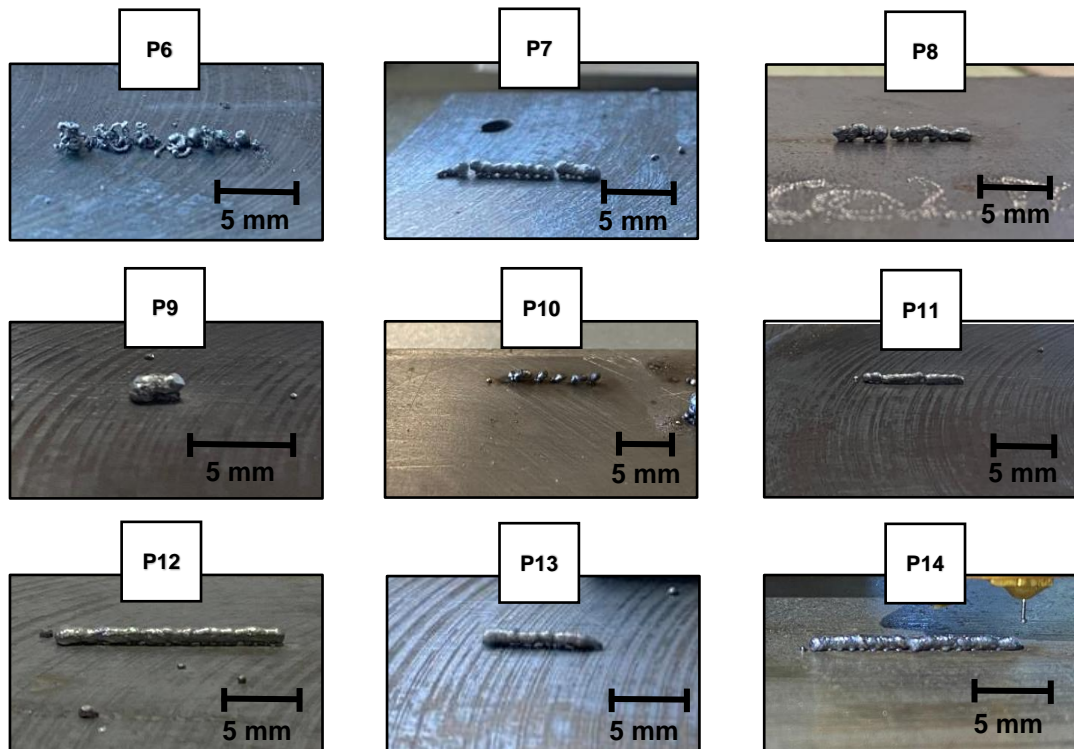
#### 4.3.1. Ensaio do Aço ASTM A228 com a fonte de alimentação

Com estes ensaios pretendeu-se estudar a influência do aquecimento do substrato, otimizar os valores da intensidade de corrente e tensão elétrica fornecidos pela fonte de alimentação e ainda, obter uma relação de velocidades, para o material e diâmetro de fio em causa. A Tabela 4.5 apresenta os parâmetros estabelecidos para o aço AISI 304, com os respetivos cordões apresentados na Figura 4.4.

**Tabela 4.5** Parâmetros de processo estabelecidos para o aço ASTM A228

Ensaio	Tensão (V)	Corrente (Limitada) (A)	WFS (mm/s)	TS (mm/s)	Temperatura substrato (°C)	Material Substrato	ED (J/mm <sup>3</sup> )
P6	5	40	50	5	500	Aço	82
P7	9	50	60	5	550	Aço	153
P8	9	50	60	5	25	Aço	153
P9	9	50	75	3	500	Aço	122
P10	11	50	45	11	400	Alumínio	249
P11	12	60	75	11	500	Aço	196
P12	10	60	90	9	550	Aço	136
P13	10	60	90	9	25	Aço	136
P14	10	60	105	11	25	Aço Inoxidável	116

Nota: Todos os ensaios foram realizados sobre proteção gasosa do ARCAL 121.



**Figura 4.4** Morfologia dos cordões obtidos com o fio de aço ASTM A228

#### 4.3.1.1. Tensão elétrica fornecida pela fonte de alimentação

A tensão imposta interfere na altura de estabelecimento do arco, verificando-se assim um compromisso entre a tensão e a *Contact Tip to Work Distance* (CTWD). Mais concretamente, o aumento dos valores de tensão pressupõe, também o aumento da CTWD e vice-versa.

Para o diâmetro e material de fio em causa foi possível classificar os seguintes intervalos de funcionamento da tensão elétrica:

- 4 - 6 V: O arco não é gerado e o fio funde por efeito de Joule, tal como ocorreu em P6;
- 7 - 12 V: O arco mostrou-se estável para uma CTWD de aproximadamente 4 mm;
- 13 V: O arco é instável e o fio funde no interior do *nozzle*, impossibilitando assim a alimentação deste.

#### 4.3.1.2. Aquecimento do substrato

Os ensaios P8 e P13 foram realizados sem aquecimento do substrato, em contrapartida, nos ensaios P7 e P12 o substrato foi aquecido até 550 °C. Ao fixar os restantes parâmetros garantiu-se que a variável de controlo é a temperatura do substrato. Comparando os cordões P7/P8 e P12/P13 é constatada uma ligeira melhoria na adesão ao substrato, no entanto a geometria dos cordões pode ser equiparada.

#### 4.3.1.3. Relação de velocidades - Avanço / Alimentação

É fundamental entender a dependência entre as velocidades. Para isso, fixou-se a intensidade de corrente e a tensão elétrica, e realizaram-se ensaios adicionais com diferentes combinações de velocidades. Os resultados são apresentados na janela de parâmetros da Tabela 4.6, que classifica o cordão com base numa escala de cores.

**Tabela 4.6** Janela de velocidades para o fio em ASTM A228 com 250 µm de diâmetro

TS (mm/s) \ WFS (mm/s)	3	5	7	9	11	13
105					P14	
90				P12 P13		
75	P9				P11	
60		P7 P8				
45					P10	
30						

A autorregulação de fio foi respeitada para valores de WFS entre 75 – 105 mm/s, uma vez que para valores de WFS inferiores verificou-se que a velocidade alimentação do fio é insuficiente em relação à de fusão deste. As melhores condições de deposição (indicadas a verde) verificaram-se quando se combina este intervalo de WFS com a TS entre 7 – 11 mm/s.

As relações de velocidades indesejadas são indicadas a vermelho e, de uma forma global, é possível distinguir estes cordões em duas subcategorias:

- TS > 11 mm/s – Cordão descontínuo, pois a alimentação do fio é insuficiente para o avanço imposto, tal como verificado no ensaio P10;
- TS < 7 mm/s – Pouco avanço para a velocidade de fio imposta, registando-se assim uma deposição incremental sobre forma de gota, tal como ilustrado no ensaio P9, onde a altura da gota atingiu a extremidade do *nozzle*.

A classificação amarela verificou-se na transição entre o verde e o vermelho. Os cordões P7, P8 e P11 são exemplos destes cordões, uma vez que se constatou zonas com falta de continuidade ao longo do cordão.

#### 4.3.1.4. Sobreposição de camadas - Paredes

Tendo em conta as velocidades e os valores fornecidos pela fonte de alimentação no ensaio P12, foram depositadas paredes segundo a estratégia de deposição ilustrada na Figura 4.5. Estes ensaios foram realizados a quente e a frio sobre um substrato de aço inoxidável, tal como apresentado na Tabela 4.7. As respetivas vistas laterais das paredes são apresentadas na Figura 4.6.

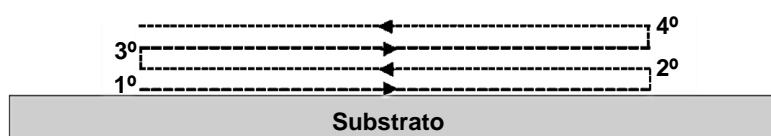


Figura 4.5 Percurso de deposição das paredes

Tabela 4.7 Parâmetros de deposição das paredes do aço ASTM A228

Ensaio	Tensão (V)	Corrente (Limitada) (A)	WFS (mm/s)	TS (mm/s)	Nº de Camadas	Temperatura Substrato (°C)
P15	10	55	90	9	10	550
P16	10	55	90	9	7	25

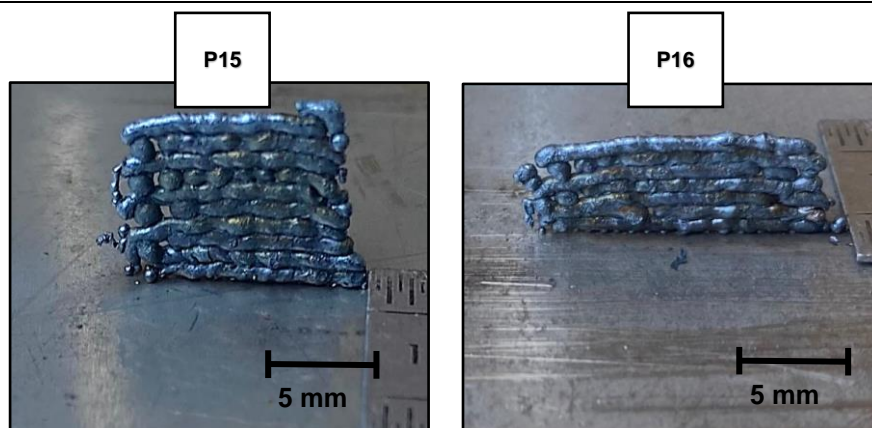
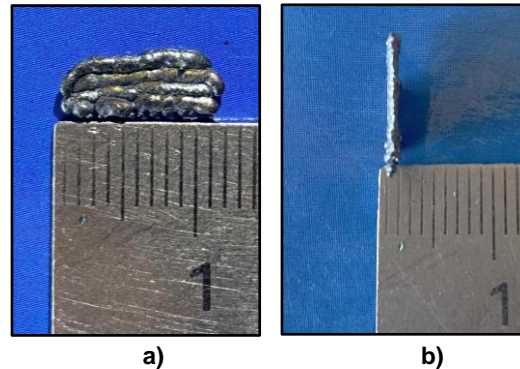


Figura 4.6 Vista lateral das paredes de aço ASTM A228

Por observação macroscópica, o aquecimento do substrato foi irrelevante nestes ensaios, uma vez que, ambas as paredes apresentam um aspeto idêntico. Quer a quente quer a frio, a energia transferida pelo fio é insuficiente para refundir adequadamente a camada inferior. Pelo que, apesar das camadas se encontrarem parcialmente ligadas, foi verificado falta de adesão entre camadas, originando assim descontinuidades na superfície das paredes.

No  $\mu$  - WAAM a falta de adesão facilita o processo de libertação do substrato. Apesar de alguns autores considerarem o substrato parte do componente final [56], outros estudam mecanismos para a libertação do mesmo [57]. Deste modo, a falta adesão da primeira camada de deposição pode ser conveniente para determinadas aplicações. A Figura 4.7 apresenta uma parede com quatro camadas, prevenidamente separada de um substrato de aço.



**Figura 4.7** Vista lateral (a) e superior (b) de uma parede separada do substrato

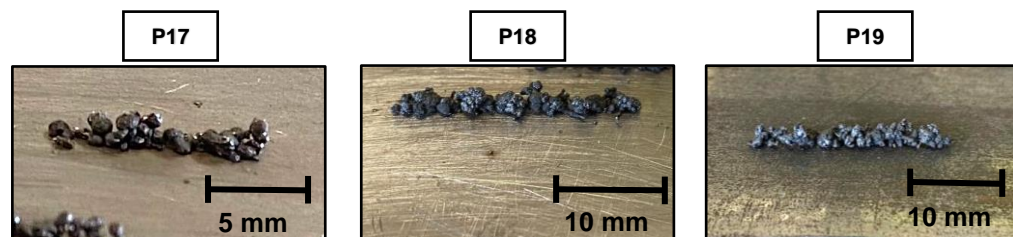
#### 4.3.2. Ensaio do Aço AISI 316L com a fonte de alimentação

Surgiram dificuldades em alimentar o fio com 100  $\mu$ m de diâmetro, pelo que se estudou unicamente o fio de 200  $\mu$ m. Os parâmetros destes ensaios são apresentados na Tabela 4.8 e os respetivos cordões na Figura 4.8.

**Tabela 4.8** Parâmetros de processo estabelecidos para o aço AISI 316L

Ensaio	Tensão (V)	Corrente (Limitada) (A)	WFS (mm/s)	TS (mm/s)	Temperatura substrato (°C)	Gás de proteção
P17	9	45	75	7	500	ALPHAGAZ 1
P18	7	72	100	3	25	ARCAL 121
P19	9	72	60	4	25	ARCAL 121

Nota: Todos estes ensaios foram realizados sobre substrato de aço inoxidável

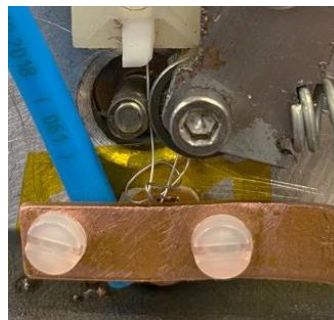


**Figura 4.8** Morfologia dos cordões com fio de aço AISI 316L

Para as combinações praticáveis de parâmetros, não foi possível depositar um cordão consolidado. Pelo que, com o aço AISI 316L, a fonte de alimentação não se mostrou viável. O aço AISI 316L apresenta uma película de óxidos na superfície, esta protege o metal contra a oxidação, no entanto é uma possível justificação para estes resultados de  $\mu$  - WAAM.

#### 4.3.3. Ensaio do alumínio com a fonte de alimentação

Nos ensaios com o alumínio verificou-se que quando o fio entra em contato com o substrato funde por efeito de Joule e cola. Este resultado justifica-se com o facto de a potência fornecida pela fonte de alimentação ser insuficiente para o diâmetro de 450  $\mu$ m. Verificou-se também que a elevada ductilidade do material dificulta a alimentação do fio, enrolando tal como ilustrado na Figura 4.9.



**Figura 4.9** Enrolamento do fio de alumínio no mecanismo de alimentação

#### 4.3.4. Ensaio da Liga Níquel Titânio – NiTi com fonte de alimentação

Os parâmetros estabelecidos nos ensaios com o NiTi encontram-se apresentados na Tabela 4.9 e os respetivos cordões ilustrados na Figura 4.10.

**Tabela 4.9** Parâmetros de processo estabelecidos para o a NiTi

Ensaio	Tensão (V)	Corrente (Limitada) (A)	WFS (mm/s)	TS (mm/s)	Temperatura substrato (°C)	Material Substrato
P20	8	45	36	1,8	250	Chumbo
P21	10	60	50	2	25	Chumbo
P22	8	65	36	1	200	Cobre

Nota: Todos estes ensaios foram realizados com proteção gasosa do ALPHAGAZ 1

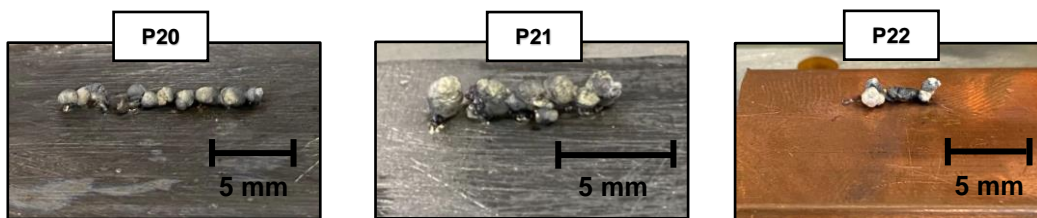


Figura 4.10 Morfologia dos cordões com fio de NiTi

Para testar a adesão ao substrato, no ensaio P20, aqueceu-se o substrato de chumbo a uma temperatura próxima da de fusão (327,5 °C). Ainda assim os resultados são semelhantes aos realizados a frio no ensaio P21, não se verificando adesão ao substrato.

#### 4.3.5. Ensaio do Aludel com fonte de alimentação

Apesar de não se ter obtido uniformidade ao longo do cordão, foi possível garantir um arco estável e deposição de material, tal como ilustrado na Figura 4.11 com os parâmetros de ensaio apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 Parâmetros de processo estabelecidos para o Aludel

Ensaio	Tensão (V)	Corrente (Limitada) (A)	WFS (mm/s)	TS (mm/s)	Temperatura substrato (°C)	Gás de proteção	Material Substrato
P23	11	62	75	4	400	ARCAL 121	Alumínio

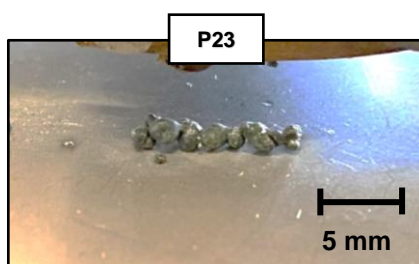


Figura 4.11 Morfologia dos cordões com fio de Aludel

#### 4.3.6. Ensaio do Cromel com fonte de alimentação

Apesar de se terem verificado descontinuidades no cordão, foi possível depositar material. Os parâmetros do melhor ensaio com o cromel encontram-se apresentados na Tabela 4.11 e o respetivo cordão depositado é ilustrado na Figura 4.12.

**Tabela 4.11** Parâmetros de processo estabelecidos para o Cromel

Ensaio	Tensão (V)	Corrente (Limitada) (A)	WFS (mm/s)	TS (mm/s)	Temperatura substrato (°C)	Gás de proteção	Material Substrato
P24	9	70	75	3	25	ARCAL 121	Aço



**Figura 4.12** Morfologia dos cordões com fio de Cromel

## 4.4. Ensaios com bateria de 12 V

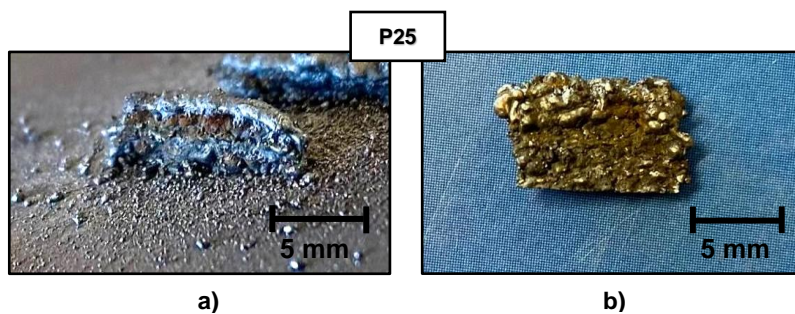
Recorrendo à bateria como fonte de energia foram realizados ensaios com os fios de aço ASTM A228 e AISI 316L.

### 4.4.1. Ensaio com Aço ASTM A228 com a bateria

A Tabela 4.12 apresenta os parâmetros estabelecidos para a deposição das paredes ilustradas na Figura 4.13.

**Tabela 4.12** Parâmetros de deposição das paredes de aço ASTM A228 com a bateria

Ensaio	WFS (mm/s)	TS (mm/s)	Nº de Camadas	Gás de proteção	Substrato
P25	90	9	8	ARCAL 121	Aço inoxidável frio



**Figura 4.13** Vista lateral de uma parede ligada (a) e separada do substrato (b)

Comparado com os ensaios precedentes com a fonte de alimentação, verificou-se um aumento da adesão entre camadas, constatando-se assim um progresso na uniformidade da parede e a redução das ondulações superficiais.

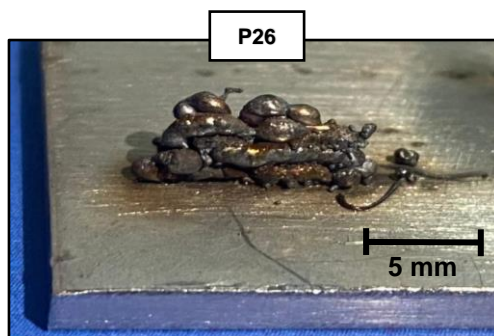
Mesmo realizando o ensaio a frio foi claro um aumento da adesão ao substrato, dificultando deste modo a libertação do componente.

#### 4.4.2. Ensaio do Aço AISI 316L com a bateria

Nestes ensaios surgiu a necessidade de reduzir a tensão elétrica imposta na soldadura, pelo que se recorreram a resistências em série na ligação ao equipamento. A Tabela 4.13 apresenta os restantes parâmetros estabelecidos para a deposição das paredes ilustradas na Figura 4.14.

**Tabela 4.13** Parâmetros de deposição da parede de aço AISI 316L com a bateria

Ensaio	WFS (mm/s)	TS (mm/s)	Nº de Camadas	Gás de proteção	Substrato
P26	60	4	4	ARCAL 121	Aço inoxidável frio



**Figura 4.14** Vista lateral de uma parede de aço AISI 316L

Ao contrário do verificado com a fonte de alimentação, com a bateria foi possível realizar ensaios com o aço AISI 316L. Nas paredes depositadas a adesão entre camadas mostrou-se inapropriada, no entanto a união entre estas foi garantida.

#### 4.4.3. Taxa de deposição do $\mu$ - WAAM

Recorrendo às equações 3.1 e 3.4, calculou-se a taxa de deposição, DR ( $\text{mm}^3/\text{s}$ ), para os ensaios de  $\mu$  - WAAM. Estes valores são apresentados na Tabela 4.14, em conjunto com os de estudos de WAAM e SLM.

**Tabela 4.14** Cálculo da taxa de deposição do WAAM, do SLM e do  $\mu$  - WAAM

Processo	Material	Ensaio	Diâmetro (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	WFS (mm/s)	DR (mm <sup>3</sup> /s)
WAAM	ER110S-G	[55]	1	0,7854	50	39,27
		[58]		NA		0,45
SLM	Ti6Al4V	[59]		NA		7,2
		[60]		NA		4,5
	AISI 304	P5	0,25	0,0491	75	3,68
	ASTM A228	P12	0,25	0,0491	90	4,42
$\mu$ - WAAM	NiTi	P21	0,3	0,0707	50	3,53
	Alumel	P23	0,3	0,0707	75	5,3
	Cromel	P24	0,3	0,0707	75	5,3
	AISI 316L	P26	0,2	0,0314	60	1,88

Foi possível constatar que a taxa de deposição do  $\mu$  - WAAM é equiparável à taxa de produção assegurada em aplicações de SLM. Por outro lado, comparativamente com o WAAM convencional, verificou-se uma redução percentual entre 86,5 % e 95,2 %.

## 4.5. Estudo da intensidade de corrente e tensão elétrica

Para estudar o comportamento das fontes de energia usadas no  $\mu$  - WAAM realizou-se a instrumentação do processo usando a fonte de alimentação e a bateria de 12 V.

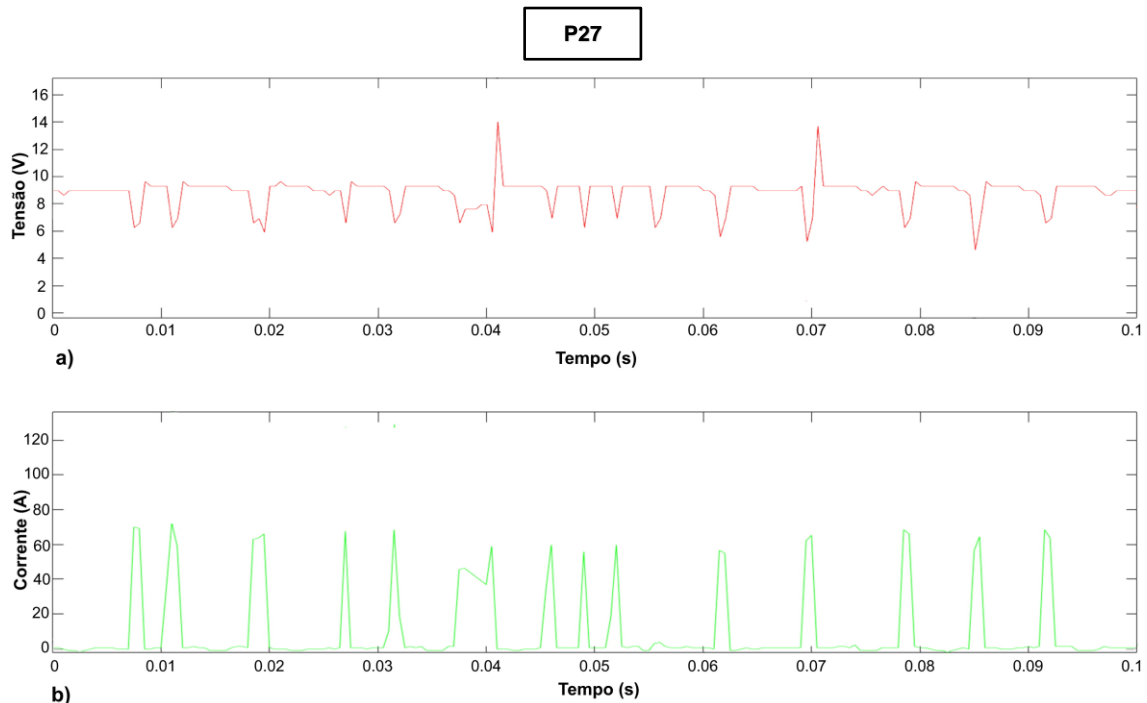
### 4.5.1. Registo do consumo de intensidade de corrente e tensão elétrica em ensaios com fonte alimentação

Para estudar o comportamento da fonte de alimentação realizaram-se cordões, com o fio de aço ASTM A228, segundo os parâmetros de deposição apresentados na Tabela 4.15.

**Tabela 4.15** Parâmetros estabelecidos para o estudo da intensidade de corrente e tensão elétrica fornecida pela fonte de alimentação usando o aço ASTM A228

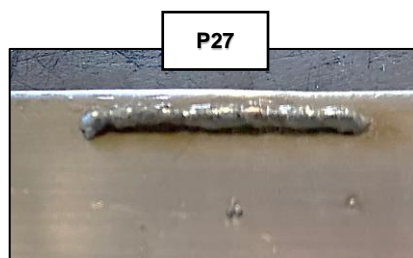
Ensaio	Tensão (V)	Corrente (Limitada) (A)	WFS (mm/s)	TS (mm/s)	Gás de proteção	Substrato
P27	9	65	100	7	ARCAL 121	Aço 25 °C
P28	11	72	100	7	ARCAL 121	Aço 25 °C
P29	7	55	100	7	ARCAL 121	Aço 25 °C

Os dados relativos à tensão (V), e intensidade de corrente (A), adquiridos ao longo do tempo de deposição (s), são apresentados graficamente na Figura 4.15 para o ensaio P27 e o respectivo cordão obtido na Figura 4.16. Como forma garantir detalhe dos sinais obtidos, selecionou-se uma taxa de aquisição de 3000 pontos por segundo e um período temporal de amostragem de 0,1 segundos.



**Figura 4.15** Gráfico representativo da tensão elétrica (a) e intensidade de corrente (b), no decorrer da deposição do ensaio P27 com a fonte de alimentação.

Quando o fio entra em contato com o substrato ocorre um curto circuito momentâneo, podendo este ser identificado nos picos de corrente, com um valor igual ao limitado pela fonte de alimentação, 65 A. Tal como expectável, estes picos de corrente registam-se alinhados com o decaimento do valor da tensão. Este comportamento é confirmado com as medições realizadas para os ensaios P28 e P29, apresentados no Anexo B.



**Figura 4.16** Morfologia do cordão obtido com o fio de aço ASTM A228 no ensaio P27

#### 4.5.2. Registo do consumo de intensidade de corrente e tensão elétrica em ensaios com a bateria de 12 V

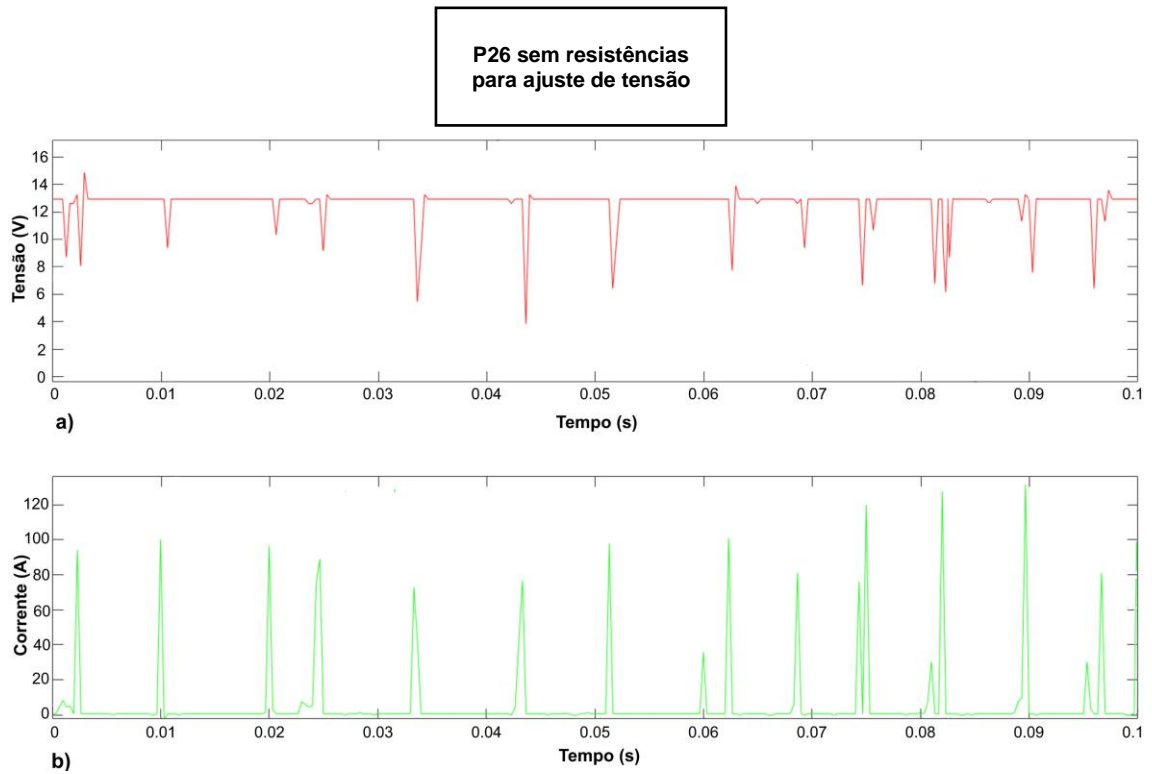
Para estudar o comportamento da bateria realizaram-se dois cordões, com fio de aço AISI 316L, segundo os parâmetros de deposição apresentados na Tabela 4.16.

**Tabela 4.16** Parâmetros estabelecidos para o estudo da intensidade de corrente e tensão elétrica fornecidos pela bateria

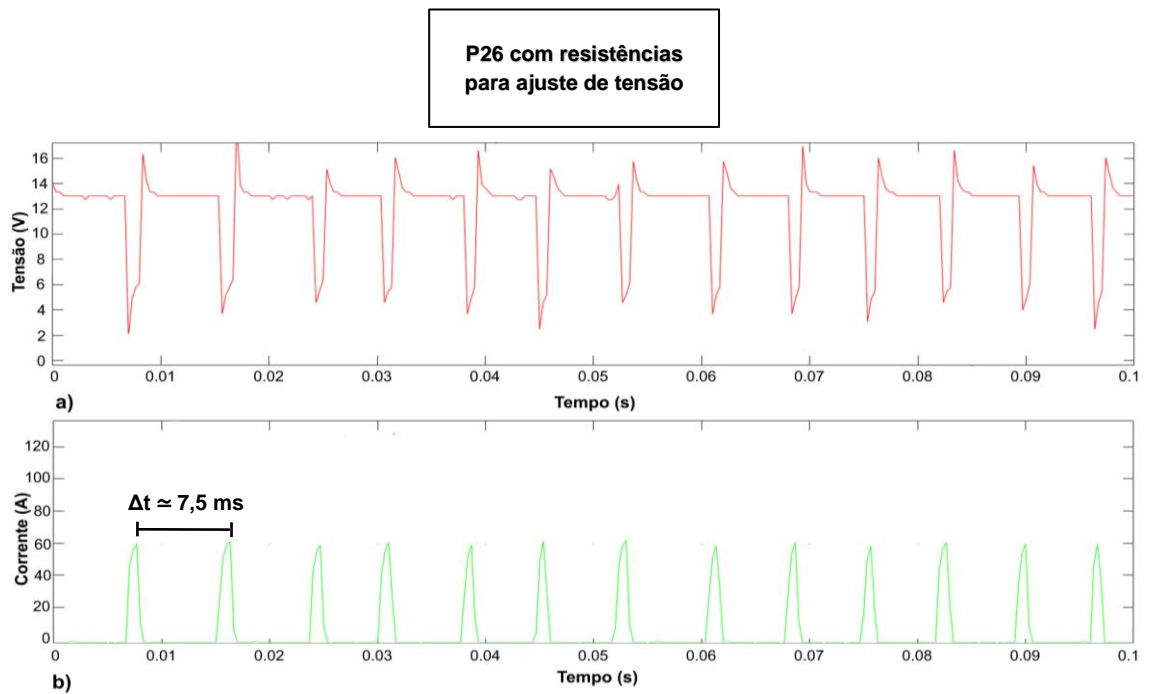
Ensaio	WFS (mm/s)	TS (mm/s)	Gás de proteção	Substrato
P26	60	4	ARCAL 121	Aço inoxidável 25 °C

A tensão e corrente ilustrada no gráfico da Figura 4.17, foi adquirida com a bateria conectada diretamente ao substrato e à tocha de  $\mu$  - WAAM. Em contrapartida, no gráfico da Figura 4.18, recorreu-se a uma conexão com resistências em série, como forma de reduzir a tensão de arco elétrico. Mais uma vez, a taxa de aquisição utilizada foi de 3000 pontos por segundo e o período de amostragem escolhido para análise gráfica foi de 0,1 segundos.

A morfologia de cordão do ensaio P26 com resistências, para ajuste de tensão, foi apresentado anteriormente na Figura 4.14.



**Figura 4.17** Gráfico representativo da tensão (a) e intensidade de corrente (b), no decorrer da deposição do ensaio P26 com a bateria conectada diretamente

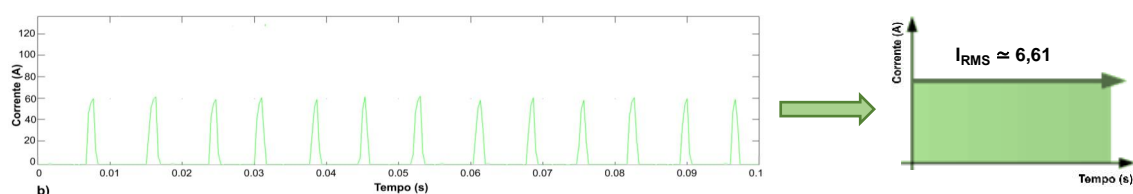


**Figura 4.18** Gráfico representativo da tensão (a) e intensidade de corrente (b), no decorrer da deposição do ensaio P26 com a bateria conectada com resistências em série

Comparativamente ao sinal recolhido sem resistência, com resistências, verificou-se a redução do valor mínimo da tensão elétrica, de aproximadamente 9 para 3 V, nos momentos em que o arco é estabelecido. Registou-se também um decaimento do valor máximo de corrente, de 90 para cerca de 60 A, atingidos nos picos.

Comparativamente aos sinais recolhidos com a fonte de alimentação, com a bateria, é possível realçar uma maior periodicidade dos sinais de intensidade de corrente e tensão elétrica, que corresponde a um período de aproximadamente 7,5 ms.

Para caracterizar o sinal da intensidade de corrente apresentado na Figura 4.18, procedeu-se a um cálculo aproximado do valor equivalente da intensidade de corrente eficaz,  $I_{RMS}$  (A). Para isso, através de uma contagem de pixels no *software Adobe Photoshop CS6*, calculou-se o valor aproximado do integral abaixo da curva. Dividindo este valor pelo intervalo de tempo de amostragem estabeleceu-se,  $I_{RMS} \approx 6,61$  A, tal como ilustrado na Figura 4.19.



**Figura 4.19** Caracterização intensidade de corrente eficaz do ensaio P26 com a bateria conectada com resistências em série

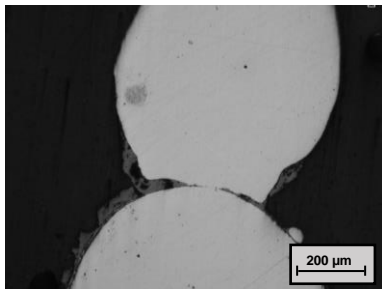
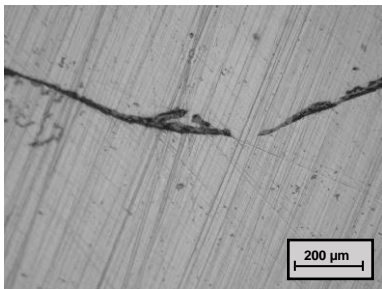
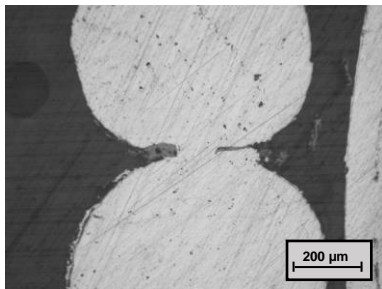
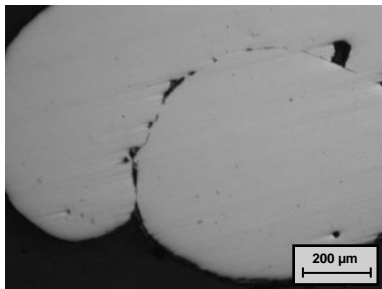
## 4.6. Análise microscópica da geometria das paredes

Para avaliar o grau de adesão entre camadas, realizou-se a análise microscópica da secção transversal e longitudinal de paredes, depositadas em ensaios com a fonte de alimentação e com a bateria.

A reduzida espessura das paredes dificulta a preparação das amostras longitudinais. Mesmo recorrendo a lixas finas, é complicado realizar o desbaste até meia espessura do provete, onde a união é estabelecida.

**4.6.1. Análise microscópica de ensaios com a fonte de alimentação**

Na impossibilidade de depositar uma parede de aço AISI 316L com a fonte de alimentação, a Figura 4.20 apresenta unicamente as micrografias recolhidas com o fio de aço ASTM A228, sobre o substrato quente ou frio.

Ensaio	Temperatura do substrato	Secção transversal	Secção longitudinal
P15	550 °C		
P16	25 °C		

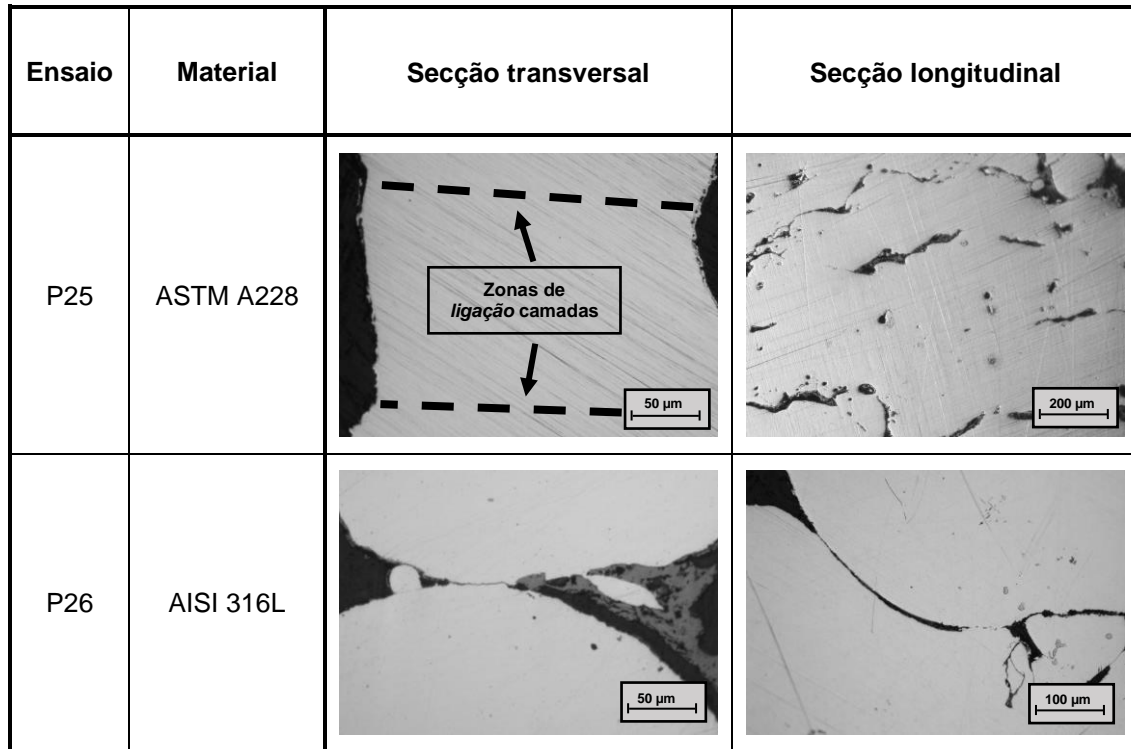
**Figura 4.20** Micrografias da secção transversal e longitudinal de provetes produzidos em ASTM A228 com a fonte de alimentação

A micrografia evidenciou mais uma vez a falta de ligação entre camadas devido à falta de fusão da camada inferior. Garantindo-se a união apenas com pequenos segmentos de ligação ao longo do cordão.

As micrografias das paredes depositadas a quente e a frio são equiparáveis. Por esta razão, com os ensaios realizados com a fonte de alimentação, é possível constatar que o aquecimento do substrato foi aparentemente ineficaz para a adesão entre camadas.

#### 4.6.2. Análise microscópica de ensaios com a bateria

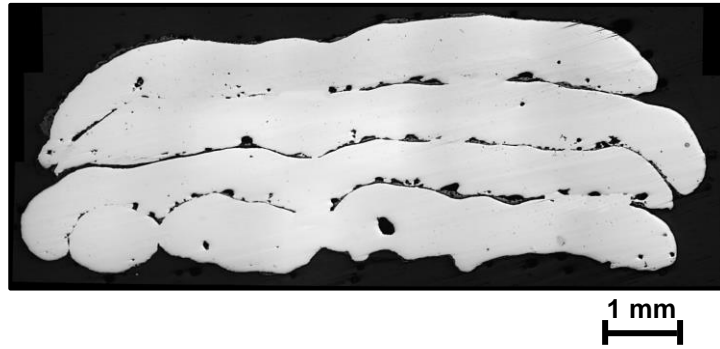
A Figura 4.21 apresenta as micrografias dos ensaios com a bateria. Estes foram realizados com o substrato a frio para os parâmetros otimizados, quer para o fio de aço ASTM A228, quer para o AISI 316L.



**Figura 4.21** Micrografias da secção transversal e longitudinal de provetes produzidos com a bateria como fonte de energia

Comparativamente à fonte de alimentação, os resultados atingidos com a bateria são mais satisfatórios. Para além de funcionar para o aço AISI 316L, é evidente que a bateria garante uma melhor adesão entre camadas.

O fio de aço ASTM A228 com a bateria resultou na parede mais uniforme. A Figura 4.22 apresenta a secção longitudinal de uma parede realizada com os parâmetros do ensaio P25, anteriormente apresentado. Apesar desta parede apresentar um aspeto consolidado e uma boa ligação entre camadas, a dificuldade em preparar a amostra de espessura fina acentuou segmentos com falta de ligação entre camadas.



**Figura 4.22** Macrografia da secção longitudinal de uma parede de aço ASTM A228, realizada com os parâmetros do ensaio P25 com a bateria como fonte de energia

### 4.7. Resumo dos ensaios

De forma a resumir os resultados obtidos no processo de otimização do  $\mu$  - WAAM, é apresentado na Tabela 4.17 os ensaios mais relevantes. Nesta é também realizada uma classificação a verde dos melhores resultados.

No Anexo C são apresentadas os cordões e paredes obtidos com estes ensaios.

**Tabela 4.17** Ensaios relevantes para este trabalho de  $\mu$  - WAAM

Ensaio	Fio		Energia			Velocidades		Substrato		Gás de proteção	Nº de camadas	Notas e comentários
	Material	Ø (µm)	U (V)	I (A)	Fonte ou Bat.	WFS (mm/s)	TS (mm/s)	Material	Temp.(°C)			
P1	AISI 304	250	6	25	Fonte	60	2	Chumbo	25	ALPHAGAZ 1	1	Ponto de partida
P4	AISI 304	250	9	30	Fonte	75	2	Chumbo	25	ALPHAGAZ 1	1	Polaridade inversa
P5	AISI 304	250	9	30	Fonte	75	2	Chumbo	25	ALPHAGAZ 1	1	Polaridade direta
P6	ASTM A228	250	5	40	Fonte	50	5	Aço	500	ARCAL 121	1	Fusão por efeito de Joule
P7	ASTM A228	250	9	50	Fonte	60	5	Aço	550	ARCAL 121	1	Arco estável, mas WFS insuficiente
P8	ASTM A228	250	9	50	Fonte	60	5	Aço	25	ARCAL 121	1	Aquecimento do substrato ineficaz, cordão equiparável ao ensaio P7
P10	ASTM A228	250	11	50	Fonte	45	11	Alumínio	400	ARCAL 121	1	Muito avanço, cordão descontinuo
P12	ASTM A228	250	10	60	Fonte	90	9	Aço	550	ARCAL 121	1	Arco estável e cordão contínuo
P14	ASTM A228	250	10	60	Fonte	105	11	Aço Inox.	25	ARCAL 121	1	Boa qualidade de cordão
P15	ASTM A228	250	10	55	Fonte	90	9	Aço Inox.	550	ARCAL 121	10	Camadas parcialmente ligadas
P16	ASTM A228	250	10	55	Fonte	90	9	Aço Inox.	550	ARCAL 121	7	Parede equiparável ao ensaio P15
P19	AISI 316L	200	9	72	Fonte	60	4	Aço Inox.	25	ARCAL 121	1	Melhor combinação de parâmetros, mas má qualidade de cordão
P21	NiTi	300	10	60	Fonte	50	2	Chumbo	25	ALPHAGAZ 1	1	Cordão descontinuo
P23	Alumel	300	11	61	Fonte	75	4	Alumínio	400	ARCAL 121	1	Melhor ensaio, mas cordão descontinuo
P24	Cromel	300	9	70	Fonte	75	3	Aço	25	ARCAL 121	1	Melhores parâmetros para o Cromel
P25	ASTM A228	250	NA	NA	Bateria	90	9	Aço Inox.	25	ARCAL 121	8	Melhor parede com o aço A228
P26	AISI 316L	200	≈13	60 Max.	Bateria	60	4	Aço Inox.	25	ARCAL 121	4	Melhor ensaio com o AISI 316L (com ajuste da tensão)



## CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

Com este trabalho foi efetuada uma primeira abordagem ao  $\mu$  - WAAM, para isso foram estudados diferentes metais e diferentes parâmetros de processo com o equipamento desenvolvido. Posto isto, os objetivos previamente estabelecidos foram atingidos, podendo-se retirar as seguintes conclusões:

1. A relação,  $ASE = \frac{4}{\varnothing}$ , é válida para qualquer diâmetro de fio. Pelo que, no  $\mu$  - WAAM verifica-se uma área superficial específica superior e, conseqüentemente, uma maior perda energética superficial por volume de fio;
2. A polaridade direta verificou-se mais adequada para as aplicações de  $\mu$  - WAAM;
3. Nos ensaios com a fonte de alimentação, com fio de diâmetro entre 200 – 300  $\mu\text{m}$ , o arco mostrou-se estável para valores de tensão elétrica entre 7 – 12 V;
4. O aquecimento do substrato favoreceu ligeiramente a adesão ao substrato. No entanto, mesmo com o substrato de chumbo aquecido até perto do ponto de fusão, a geometria dos cordões com e sem aquecimento são equiparadas;
5. O aquecimento do substrato foi ineficaz para a adesão entre camadas, não se registando qualquer diferença nas paredes realizadas com e sem aquecimento;
6. Os ensaios efetuados com a bateria asseguram melhores resultados face aos conseguidos com a fonte de alimentação. Uma vez que, com a bateria, os ensaios com o aço ASTM A228 apresentam melhor adesão e uniformidade ao longo da parede e, com o aço inoxidável AISI 316L, é possível depositar um cordão contínuo, contrariamente ao verificado com a fonte de alimentação;
7. Tanto com a fonte de alimentação como com a bateria, o melhor resultado foi realizado com o fio ASTM A228 de diâmetro 250  $\mu\text{m}$ . A

relação de velocidades mais apropriada para estabelecer este cordão foi: TS = 9 mm/s e WFS = 90 mm/s;

8. Contrariamente ao esperado, para a gama de diâmetros utilizada e para a WFS estabelecida, a taxa de deposição do  $\mu$  - WAAM é equiparável à taxa de produção assegurada em aplicações de SLM;
9. Comparativamente ao WAAM convencional, verificou-se uma redução entre 86,5 % e 95,2 % da taxa de deposição;
10. Com os sinais de intensidade de corrente e tensão recolhidos, foi possível verificar comportamentos distintos das fontes de energia. Podendo esse facto explicar as disparidades dos resultados obtidos;
11. Com a micrografia foi possível caracterizar de uma forma mais detalhada a geometria das paredes, verificando-se assim acentuadas ondulações superficiais.

Reunindo os resultados obtidos é comprovado o potencial do  $\mu$  - WAAM. No entanto, como esta variante se encontra numa fase inicial de desenvolvimento, é importante sugerir os seguintes temas para futuros trabalhos:

1. O mecanismo de alimentação de fio só se mostrou eficaz para diâmetros de fio superiores a 200  $\mu$ m, pelo que é interessante repensar o mecanismo de alimentação para diâmetros de fio inferiores;
2. Apesar do caudal de gás ser reduzido, com a utilização contínua do equipamento, verificou-se o gasto desnecessário de gás. Pelo que uma possível solução é implementar uma electroválvula acionada pelo comando *START* do *LabVIEW*. Assegurando desta forma o fornecimento de gás somente durante a deposição de material;
3. De forma a estudar outras geometrias de cordão, adaptar a tocha de  $\mu$  - WAAM ao equipamento de 3 eixos, desenvolvido no laboratório de tecnologias do DEMI - FCT NOVA;
4. Caracterização geométrica microestrutural para diferentes metais.

## REFERÊNCIAS

- [1] A. Gebhardt, J.-S. Hötter, A. Gebhardt, and J.-S. Hötter, “Basics, Definitions, and Application Levels,” *Addit. Manuf.*, pp. 1–19, 2016.
- [2] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, “Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 81, no. 1–4, pp. 465–481, 2015.
- [3] D. L. Bourell, J. J. Beaman, and T. Wohlers, “History of Additive Manufacturing,” *Addit. Manuf. Process.*, pp. 1–8, 2020.
- [4] K. V. Wong and A. Hernandez, “A Review of Additive Manufacturing,” *ISRN Mech. Eng.*, vol. 2012, pp. 1–10, 2012.
- [5] T. A. Rodrigues, V. Duarte, R. M. Miranda, T. G. Santos, and J. P. Oliveira, “Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM),” *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 7, 2019.
- [6] A. Lopez, R. Bacelar, I. Pires, T. G. Santos, J. P. Sousa, and L. Quintino, “Non-destructive testing application of radiography and ultrasound for wire and arc additive manufacturing,” *Addit. Manuf.*, vol. 21, no. April, pp. 298–306, 2018.
- [7] A. W. Gebisa and H. G. Lemu, “Design for manufacturing to design for Additive Manufacturing: Analysis of implications for design optimality and product sustainability,” *Procedia Manuf.*, vol. 13, pp. 724–731, 2017.
- [8] P. Doutora, R. Maria, and M. Miranda, “Valdemar Rebelo Duarte Additive manufacturing of a high resistance steel by MIG/MAG,” 2016.
- [9] ASTM International, “F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies,” *Rapid Manuf. Assoc.*, pp. 10–12, 2013.
- [10] S. Singh, S. Ramakrishna, and R. Singh, “Material issues in additive manufacturing: A review,” *J. Manuf. Process.*, vol. 25, no. January 2017,

pp. 185–200, 2017.

- [11] E. Uhlmann, R. Kersting, T. B. Klein, M. F. Cruz, and A. V. Borille, “Additive Manufacturing of Titanium Alloy for Aircraft Components,” *Procedia CIRP*, vol. 35, pp. 55–60, 2015.
- [12] C. Weller, R. Kleer, and F. T. Piller, “Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 164, pp. 43–56, 2015.
- [13] U. M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, and M. Dolen, “The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0,” *Procedia Manuf.*, vol. 11, no. June, pp. 545–554, 2017.
- [14] S. A. M. Tofail, E. P. Koumoulos, A. Bandyopadhyay, S. Bose, L. O’Donoghue, and C. Charitidis, “Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities,” *Mater. Today*, vol. 21, no. 1, pp. 22–37, 2018.
- [15] T. Kurzynowski, E. Chlebus, B. Kuźnicka, and J. Reiner, “Parameters in selective laser melting for processing metallic powders,” *High Power Laser Mater. Process. Lasers, Beam Deliv. Diagnostics, Appl.*, vol. 8239, no. October 2014, p. 823914, 2012.
- [16] T. M. A. Rodrigues, “Wire and arc additive manufacturing : equipment development and parts characterization,” 2018.
- [17] A. Wiberg, *Towards Design Automation for Additive Manufacturing A Multidisciplinary Optimization approach Anton Wiberg FACULTY OF SCIENCE AND ENGINEERING*. 2019.
- [18] M. Galati and L. Iuliano, “A literature review of powder-based electron beam melting focusing on numerical simulations,” *Addit. Manuf.*, vol. 19, pp. 1–20, 2018.
- [19] “What’s the Difference Between SLS and SLM? | Online 3D Printing Service | Fast & Affordable | FDM, MJF, SLS +.” [Online]. Available: <https://www.rapidmade.com/rapidmade-blog/2014/6/30/ycjnxytvt8n85gqutk5wj67cmx4t7>. [Accessed: 10-Jun-

2020].

- [20] “Fusão a laser seletiva – HiSoUR Arte Cultura Exposição.” [Online]. Available: <https://www.hisour.com/pt/selective-laser-melting-40644/>. [Accessed: 10-Jun-2020].
- [21] W. E. Frazier, “Metal additive manufacturing: A review,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 23, no. 6, pp. 1917–1928, 2014.
- [22] R. R. Unocic and J. N. DuPont, “Process Efficiency Measurements in the Laser Engineered Net Shaping Process,” *Metall. Mater. Trans. B Process Metall. Mater. Process. Sci.*, vol. 35, no. 1, pp. 143–152, 2004.
- [23] R. F. Brito and R. M. Maria, “Análise comparativa da eficiência energética dos processos WAAM e Fundição.”
- [24] L. E. Rannar, A. Glad, and C. G. Gustafson, “Efficient cooling with tool inserts manufactured by electron beam melting,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 13, no. 3, pp. 128–135, 2007.
- [25] N. Stenbacka, I. Choquet, and K. Hurtig, “IIW Commission IV-XII-SG212 Intermediate Meeting Review of Arc Efficiency Values for Gas Tungsten Arc Welding,” pp. 1–21, 2012.
- [26] R. J. Silva, G. F. Barbosa, and J. Carvalho, “Additive manufacturing of metal parts by welding,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 28, no. 3, pp. 2318–2322, 2015.
- [27] B. Wu *et al.*, “A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement,” *J. Manuf. Process.*, vol. 35, no. February, pp. 127–139, 2018.
- [28] F. Martina, J. Ding, S. Williams, A. Caballero, G. Pardal, and L. Quintino, “Tandem metal inert gas process for high productivity wire arc additive manufacturing in stainless steel,” *Addit. Manuf.*, vol. 25, no. October 2018, pp. 545–550, 2019.
- [29] J. Song, R. Field, A. Clarke, Y. Fu, and M. Kaufman, “ASM Vol 6 WELDING, BRAZING, AND SOLDERING,” *Acta Mater.*, vol. 165, pp. 362–

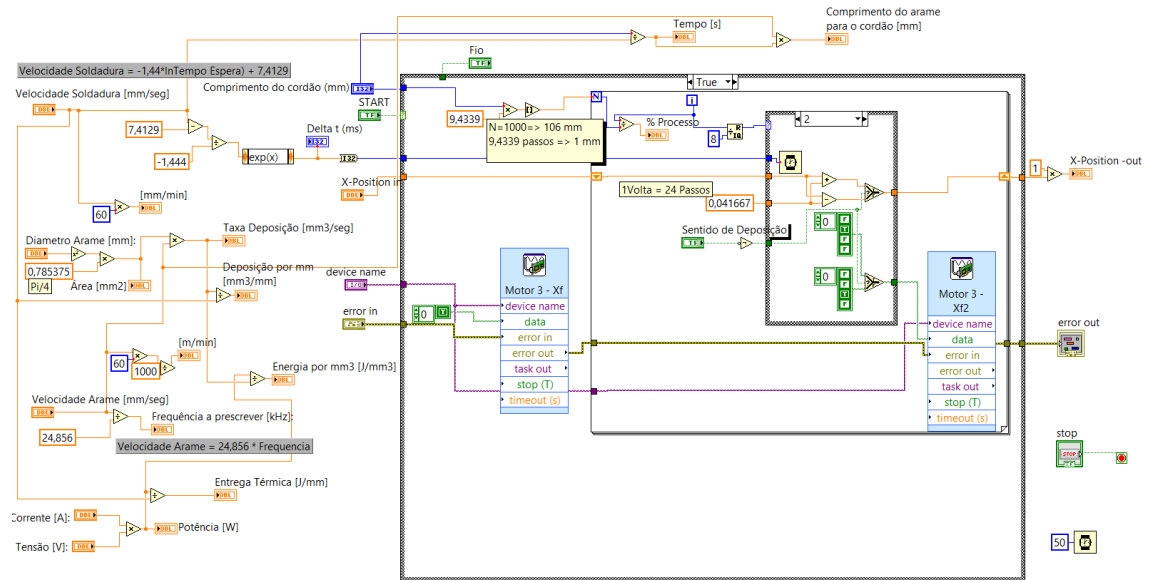
372, 2019.

- [30] J. L. Prado-Cerqueira, J. L. Diéguez, and A. M. Camacho, "Preliminary development of a Wire and Arc Additive Manufacturing system (WAAM)," *Procedia Manuf.*, vol. 13, pp. 895–902, 2017.
- [31] P. Kazanas, P. Deherkar, P. Almeida, H. Lockett, and S. Williams, "Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 226, no. 6, pp. 1042–1051, 2012.
- [32] X. Shi *et al.*, "Selective laser melting-wire arc additive manufacturing hybrid fabrication of Ti-6Al-4V alloy: Microstructure and mechanical properties," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 684, no. November 2016, pp. 196–204, 2017.
- [33] V. Dhinakaran, J. Ajith, A. Fathima Yasin Fahmidha, T. Jagadeesha, T. Sathish, and B. Stalin, "Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) process of nickel based superalloys – A review," *Mater. Today Proc.*, vol. 21, pp. 920–925, 2019.
- [34] "How Metal Powder Is Made: Step 1 of the Powder Metallurgy Process." [Online]. Available: <https://www.horizontechnology.biz/blog/how-are-metal-powders-made-powder-metallurgy-process>. [Accessed: 04-Sep-2020].
- [35] "Interview: Boston Micro Fabrication announces global launch of PμSL 3D printing technology - TCT Magazine." [Online]. Available: <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/boston-micro-fabrication-pusl-3d-printing-technology/>. [Accessed: 22-Sep-2020].
- [36] W. Paper, "Micro vs. Nano 3D Printing," pp. 1–3.
- [37] "Welding Consumeables - MIG & Flux-Cored Wire." [Online]. Available: [https://www.weldersuniverse.com/MIG\\_wire.html](https://www.weldersuniverse.com/MIG_wire.html). [Accessed: 15-Nov-2020].
- [38] "Laser Welding Versus Micro Welding : MoldMaking Technology." [Online]. Available: <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/laser-welding->

- versus-micro-welding. [Accessed: 15-Feb-2020].
- [39] M. Katou, J. Oh, Y. Miyamoto, K. Matsuura, and M. Kudoh, "Freeform fabrication of titanium metal and intermetallic alloys by three-dimensional micro welding," *Mater. Des.*, vol. 28, no. 7, pp. 2093–2098, 2007.
- [40] Keithley, "2260B Series Multi-Range Programmable DC Power Supplies," no. August, 2015.
- [41] P. Datasheet, "Product Datasheet Stock No: 1236458 RS Pro ARBITRARY / FUNCTION WAVEFORM GENERATOR SDG800 SERIES."
- [42] E. Series, "EL-R Series Simplicity with Precision," *Wire*.
- [43] National Instruments, "NI myDAQ manual," no. Dmm, pp. 1–40, 2016.
- [44] Sandemeyer Steel Company, "Specification Sheet: Alloy 316 / 316L," *Sandemeyer Steel Co.*, no. 1, pp. 9–11, 2013.
- [45] A228/A228M-07, "Standard Specification for Steel Wire, Music Spring Quality." ASTM International.
- [46] "ASM Material Data Sheet." [Online]. Available: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MQ316Q>. [Accessed: 20-Oct-2020].
- [47] "ASTM A228 Steel (UNS K08500)." [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=4bcaab41d4eb43b3824d9de31c2c6849>. [Accessed: 20-Oct-2020].
- [48] "Overview of materials for 6000 Series Aluminum Alloy." [Online]. Available: <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=26d19f2d20654a489aefc0d9c247cebf&ckck=1>. [Accessed: 20-Oct-2020].
- [49] P. L. Inácio, E. F. Camacho, N. Schell, F. M. Braz Fernandes, J. P. Oliveira, and T. G. Santos, "Production and characterization of functionally graded NiTi shape memory alloys by Joule effect," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 285, no. June, 2020.

- [50] "304 Stainless Steel." [Online]. Available: <http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=abc4415b0f8b490387e3c922237098da&ckck=1>. [Accessed: 20-Oct-2020].
- [51] RS Components, "Thermocouple Selection Guide," 2018.
- [52] Arcol, "HS Aluminium Housed Resistors," pp. 11–12, 1872.
- [53] L. D. C. P. Supply, "Triple Output Linear D . C . Power Supply GPC-3030DQ," p. 90.
- [54] P. Sock, "RS Stock number 448-382," no. 448, p. 8529.
- [55] T. A. Rodrigues, V. Duarte, J. A. Avila, T. G. Santos, R. M. Miranda, and J. P. Oliveira, "Wire and arc additive manufacturing of HSLA steel: Effect of thermal cycles on microstructure and mechanical properties," *Addit. Manuf.*, vol. 27, no. March, pp. 440–450, 2019.
- [56] H. Lockett, J. Ding, S. Williams, and F. Martina, "Design for wire + Arc additive manufacture: Design rules and build orientation selection," *J. Eng. Des.*, vol. 28, no. 7–9, pp. 568–598, 2017.
- [57] A. S. Haselhuhn, B. Wijnen, G. C. Anzalone, P. G. Sanders, and J. M. Pearce, "In situ formation of substrate release mechanisms for gas metal arc weld metal 3-D printing," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 226, pp. 50–59, 2015.
- [58] L. Thijs, F. Verhaeghe, T. Craeghs, J. Van Humbeeck, and J. P. Kruth, "A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V," *Acta Mater.*, vol. 58, no. 9, pp. 3303–3312, 2010.
- [59] X. Shi *et al.*, "Performance of high layer thickness in selective laser melting of Ti6Al4V," *Materials (Basel)*, vol. 9, no. 12, 2016.
- [60] I. Maskery *et al.*, "Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Selectively Laser Melted Parts with Body-Centred-Cubic Lattices of Varying cell size," *Exp. Mech.*, vol. 55, no. 7, pp. 1261–1272, 2015.

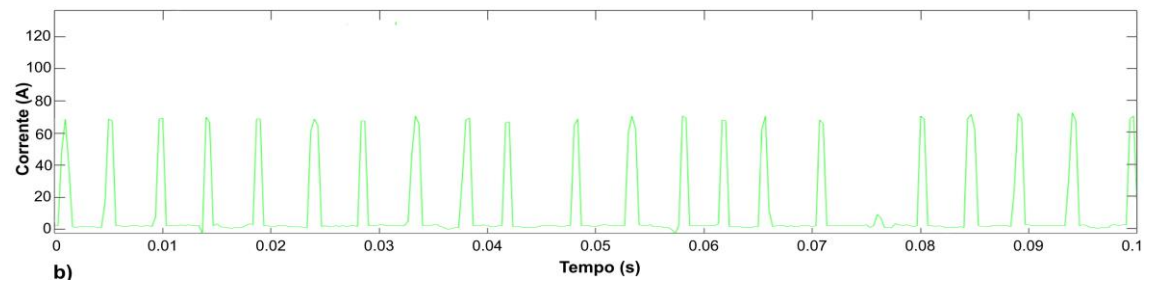
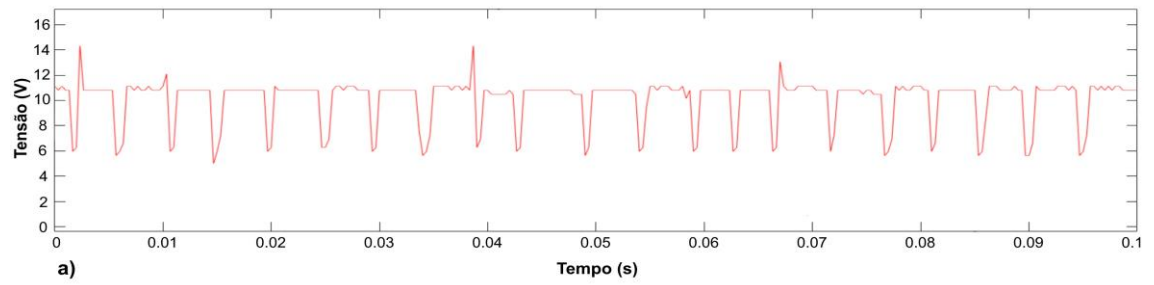
# ANEXO A – Diagrama de blocos LabVIEW



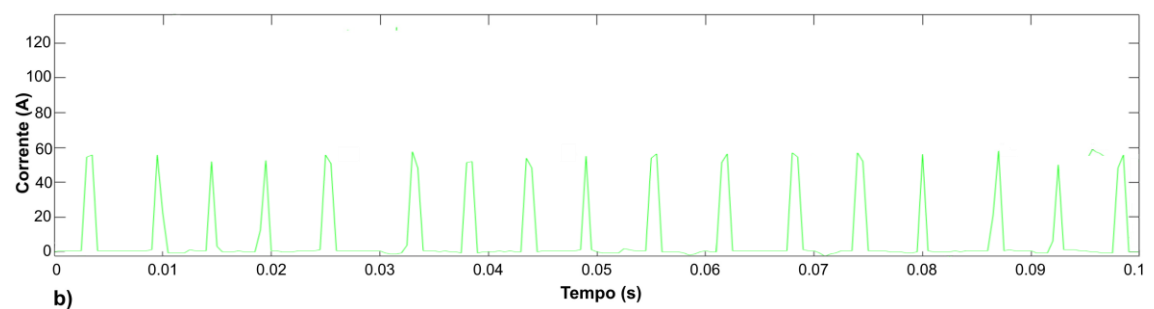
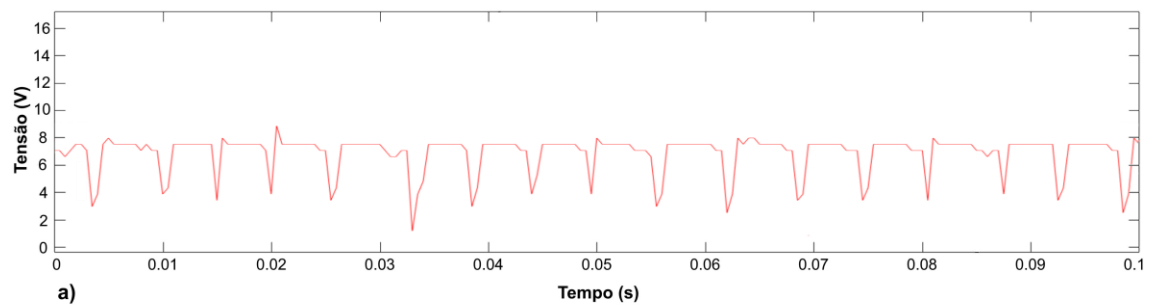


**ANEXO B** – Gráficos da tensão elétrica (a) e intensidade de corrente (b), no decorrer da deposição dos ensaios P28 e P29

**P28**



**P29**





**ANEXO C – Cordões e paredes obtidos com os ensaios mais relevantes de  $\mu$  - WAAM**

