



**João Nuno Paulino Mourão**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

## **Inovação tecnológica do processo WAAM com vibração mecânica do banho de fusão**

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.

Co-orientador: Doutor João Pedro Sousa Oliveira, Professor Auxiliar  
Convidado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da  
Universidade Nova de Lisboa.

Júri:

Presidente: Prof.a Doutora Carla Maria Moreira Machado

Vogais: Prof. Doutor Alexandre José da Costa Velhinho

Prof. Doutor Miguel Araújo Machado

Prof. Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Novembro 2020**



**Inovação tecnológica do processo WAAM com vibração mecânica do banho de fusão**

**Copyright © 2020 João Nuno Paulino Mourão**

**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

A realização da presente dissertação foi o culminar de um percurso académico onde me cruzei com pessoas fundamentais para a minha aprendizagem e sucesso. A todas elas o meu enorme agradecimento.

Quero agradecer ao Professor Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos não só pela orientação durante o desenvolvimento do protótipo e acompanhamento ao longo de toda a dissertação, mas também pelo exemplo de dedicação e rigor no trabalho que me transmitiu.

Quero agradecer ao Professor Doutor João Pedro Oliveira pela motivação e orientação ao longo de toda a dissertação, em especial durante a análise e caracterização do processo e amostras.

Os meus sinceros agradecimentos ao Sr. António Campos e Sr. Paulo Magalhães pelo apoio e ensinamentos transmitidos durante a construção do carro *Formula Student*, fabrico do protótipo e polimentos das amostras desta dissertação.

Um profundo agradecimento ao Eng.º Valdemar Duarte, Eng.º Tiago Rodrigues e Eng.º Francisco Ferreira pelo acompanhamento diário no laboratório. Sem eles este trabalho não teria sido possível.

Aos meus amigos que me acompanharam ao longo de todo o percurso académico e aos que conheci durante o trabalho diário no laboratório e que tornaram esta etapa muito animada.

À minha namorada pelo apoio incondicional e alegria. Ao longo destes 3 anos tenho cumprido e traçado objetivos que, graças à sua boa disposição e alegria contagiante, fazem-me ser uma pessoa feliz.

Finalmente, o meu eterno agradecimento aos meus pais por me suportarem e proporcionarem todas as ferramentas e ensinamentos para o meu crescimento e sucesso.



# RESUMO

O processo *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM) é uma tecnologia de Fabrico Aditivo (FA) que permite produzir peças com desperdício de material reduzido e elevadas taxas de deposição. No entanto, é necessário um conhecimento mais profundo do processo para melhorar a qualidade superficial, propriedades mecânicas e diminuição da ocorrência de defeitos.

O principal objetivo desta dissertação foi estudar o efeito da vibração mecânica do banho de fusão, com vista a promover um refinamento da microestrutura e melhorar as propriedades mecânicas em peças produzidas com aço inoxidável ER316L e magnésio AZ61A.

Foi desenvolvido um protótipo funcional que permitiu produzir amostras variando a frequência, amplitude e movimento de vibração. Avaliaram-se os efeitos da vibração mecânica na geometria e na microestrutura das amostras. Realizaram-se ensaios de microdureza, condutividade elétrica e termografia. Foi medida a temperatura com termopares e captados vídeos do processo em câmara lenta.

Conclui-se que o protótipo desenvolvido permitiu a realização de peças por WAAM com vibração no banho de fusão. Nas amostras de ER316L a nucleação aumentou 47% e o comprimento das dendrites diminuiu 44%. Nas amostras de AZ61A o tamanho de grão diminuiu 59%. Tanto a frequência como a amplitude não afetaram significativamente a altura e largura das paredes, no entanto, as ondulações periódicas tornaram-se 20% menores a 10 Hz de frequência e 2 mm de amplitude. A vibração não foi suficiente para provocar uma diminuição significativa da condutividade elétrica ou da dureza nas amostras.

# PALAVRAS-CHAVE

*Wire and Arc Additive Manufacturing*, vibração, protótipo funcional, banho de fusão, microestrutura, aço inoxidável e magnésio.



# ABSTRACT

Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) is an Additive Manufacturing (AM) technology that produces parts with reduced material waste and high deposition rate. However, a deeper knowledge of the process is needed to improve surface quality, mechanical properties and decrease defects.

The main objective of this dissertation was to study the effect of the mechanical vibration of the melting pool, in order to promote grain refinement and improve the mechanical properties in parts produced with stainless steel ER316L and magnesium AZ61A.

A functional prototype was developed that produced the variation in frequency, amplitude and type of vibration. The effects of mechanical vibration on geometry and microstructure are evaluated. Microhardness, electrical conductivity and thermography tests were carried out. The temperature was measured with thermocouples and videos of the process were captured in slow motion.

It is concluded that the developed prototype allowed the realization of parts by WAAM with vibration in the melting pool. In ER316L samples, nucleation increased 47% and dendrite length decreased 44%. In the samples of AZ61A the grain size decreased by 59%. Both the frequency and the amplitude did not affect complementing the height and width of the walls, however, as periodic ripples become 20% finer at 10 Hz frequency and 2 mm amplitude. The vibration was not sufficient to cause a decrease in electrical conductivity or hardness in the configurations.

# KEY-WORDS

Wire and Arc Additive Manufacturing, vibration, functional prototype, melting pool, microstructure, stainless steel and magnesium.



# ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO.....	iii
PALAVRAS-CHAVE .....	iii
ABSTRACT .....	v
KEY-WORDS .....	v
ÍNDICE .....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xiii
NOMENCLATURA.....	xv
1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – Estado da Arte e Motivação.....	1
1.2 – Objetivo .....	2
1.3 – Trabalho desenvolvido .....	2
1.4 – Estrutura da Dissertação .....	2
2 – REVISÃO DO ESTADO DA ARTE.....	5
2.1 – Introdução .....	5
2.2 – Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) .....	6
2.2.1– Parâmetros do processo.....	8
2.2.2– Descrição do processo e das propriedades microestruturais .....	8
2.3 – Defeitos .....	10
2.4 – Estratégias para diminuir defeitos e melhorar a microestrutura do material .....	10
2.5 – Aplicação de vibração na soldadura por fusão .....	11
3 – DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO E TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO .	17
3.1 – Introdução .....	17
3.2 – Materiais.....	18
3.3 – Desenvolvimento de equipamento personalizado.....	19
3.3.1– Tocha WAAM .....	19
3.3.2– Máquina de soldadura .....	22
3.3.3– Sistema de movimento .....	23
3.3.4– Circuito elétrico e pneumático.....	23
3.4 – Estratégia de deposição .....	24
3.4.1– Velocidade média e taxa de deposição.....	24
3.5 – Técnicas de caracterização .....	25
3.5.1– Produção e preparação de amostras.....	25
3.5.2– Caracterização geométrica .....	25
3.5.3– Microscopia ótica .....	26
3.5.4– Medições de microdureza.....	26
3.5.5– Medição de temperatura com termografia .....	26

3.5.6– Medição de condutividade elétrica.....	27
3.5.7– Captação de vídeo.....	27
3.5.8– Aquisição de temperatura com termopares.....	27
4 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	29
4.1 – Efeito da vibração na geometria da parede .....	29
4.1.1– Efeito dos parâmetros de vibração na geometria.....	30
4.1.2– Efeito dos parâmetros de vibração na microestrutura .....	32
4.2 – Estudo da deposição de 30 camadas de ER316L .....	33
4.2.1– Microestrutura.....	34
4.2.2– Medições de microdureza.....	37
4.3 – Estudo da deposição de 12 camadas com AZ61A.....	38
4.3.1– Microestrutura.....	40
4.3.2– Medição de temperatura com termografia .....	46
4.3.3– Medições de microdureza.....	48
4.3.4– Medição de condutividade elétrica.....	49
4.3.5– Captação de vídeo.....	50
4.3.6– Aquisição de temperatura no banho de fusão com termopares .....	51
5 – CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	53
BIBLIOGRAFIA.....	55

# LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ilustração esquemática do processo WAAM [5].	7
Figura 2.2 – Representação esquemática da influência do campo magnético axial no arco elétrico e banho de fusão. $j$ – densidade de corrente; $B$ – campo magnético; $F_a$ – força atuada no arco; $F_p$ – força atuada no metal líquido do banho de fusão [14].	12
Figura 2.3 – Distribuição estatística do tamanho de grão ao variar a aceleração de vibração [19].	13
Figura 2.4 – Alívio de tensões durante a soldadura por vibração [20].	14
Figura 2.5 – Efeito da frequência de oscilação do arco durante a soldadura de Mg AZ31A. a) sem oscilação. b) com frequência de oscilação de 1 Hz e 2 mm de amplitude de vibração [21].	15
Figura 3.1 – Vista frontal e vista de corte da Tocha WAAM.	20
Figura 3.2 – Sistema de afinação do curso do pneumático.	21
Figura 3.3 – Esquema representativo das medidas da Tocha WAAM.	22
Figura 3.4 – Circuitos de controlo da Tocha WAAM. a) Circuito elétrico, b) Representação do circuito pneumático.	23
Figura 3.5 – Trajetória de deposição. a) ao longo da altura. b) Vibração perpendicular com a direção de deposição. c) Vibração coincidente com a direção de deposição.	24
Figura 3.6 – Representação da preparação de amostras. a) Corte da amostra no plano yy. b) Corte da amostra no plano xx. c) Corte da amostra no plano zz.	25
Figura 3.7 – Representação esquemática do ponto de aquisição de temperatura.	26
Figura 3.8 – Representação esquemática das indentações de dureza Vickers.	27
Figura 3.9 – Representação esquemática da posição dos termopares.	27
Figura 4.1 – Amostras produzidas na Etapa 1. a) P0 - 0 Hz. b) P2 - 4 Hz 1 mm. c) P3 - 10 Hz 1 mm. d) P5 - 4 Hz 2 mm. e) P6 - 10 Hz 2 mm.	31
Figura 4.2 – Amostras produzidas na Etapa 1. a) P7 - 2 Hz 4 mm. b) P8 - 4 Hz 4 mm c) P9 - 10 Hz 4 mm.	31
Figura 4.3 – Microestrutura das amostras produzidas. a) P0 – sem vibração. b) P5 - 4 Hz 2 mm c) P6 -10 Hz 2 mm.	32
Figura 4.4 – Vista do plano yy das amostras produzidas pelo processo WAAM. a) P0 - sem vibração. b) P6 - 10 Hz e 2 mm.	33
Figura 4.5 – Amostras produzidas pelo processo WAAM. a) amostra sem vibração. b) amostra com vibração de 10 Hz e 2 mm de amplitude.	34
Figura 4.6 – Vista do plano zz das amostras produzidas pelo processo WAAM. a) amostra sem vibração. b) amostra com vibração de 10 Hz e 2 mm de amplitude.	35

Figura 4.7 – Vista do plano yy das amostras produzidas pelo processo WAAM. a) amostra sem vibração. b) amostra com vibração de 10 Hz e 2 mm de amplitude.....	36
Figura 4.8 – Vista do plano xx das amostras produzidas pelo processo WAAM. a) amostra sem vibração. b) amostra com vibração de 10 Hz e 2 mm de amplitude.....	36
Figura 4.9 – Número de dendrites por mm <sup>2</sup> e comprimento de dendrites das amostras produzidas sem e com vibração de 10 Hz e 2 mm.....	37
Figura 4.10 – Perfil de microdurezas ao longo da altura das amostras P0 e P6.....	38
Figura 4.11 – Amostras produzidas pelo processo WAAM com AZ61A. a) amostra sem vibração. b) amostra com vibração de 4 Hz e 2 mm de amplitude. c) amostra com vibração de 10 Hz e 2 mm de amplitude. ....	39
Figura 4.12 – Ondulações periódicas da superfície. a) Amostra P0 (0 Hz). b) Amostra P6 (10 Hz 2 mm).....	39
Figura 4.13 – Amostras produzidas pelo processo WAAM com AZ61A. a) amostra com vibração de 4 Hz e 2 mm de vibração perpendicular. b) amostra com vibração de 4 Hz e 2 mm de vibração coincidente. ....	40
Figura 4.14 – Representação esquemática do método de interseção [24]. ....	41
Figura 4.15 – Tamanho vertical e horizontal de grão no plano yy das amostras produzidas sem e com vibração. ....	42
Figura 4.16 – Vista do plano yy das amostras produzidas pelo processo WAAM. a) amostra sem vibração. b) amostra com vibração de 4 Hz e 2 mm. c) amostra com vibração de 10 Hz e 2 mm de amplitude. ....	42
Figura 4.17 - Tamanho vertical e horizontal de grão da no plano zz das amostras produzidas sem e com vibração. ....	43
Figura 4.18 – Vista do plano zz das amostras produzidas pelo processo WAAM. a) amostra sem vibração. b) amostra com vibração de 4 Hz e 2 mm. c) amostra com vibração de 10 Hz e 2 mm de amplitude. ....	43
Figura 4.19 – Vista do plano yy das amostras produzidas. a) amostra com vibração de 4 Hz e 2 mm de vibração perpendicular e b) amostra com vibração de 4 Hz e 2 mm de vibração coincidente. ....	44
Figura 4.20 – Presença de poros das amostras. a) P0 (0 Hz) e b) P6 (10 Hz 2 mm)..	45
Figura 4.21 – Sequência de ciclos térmicos obtidos durante a deposição das amostras P0 (0 Hz) e P6 (10 Hz 2 mm). ....	46
Figura 4.22 – Comparação entre ZTA das amostras: a) P0 (0 Hz) e b) P6 (10 Hz 2 mm). ....	47
Figura 4.23 – Perfil de microdurezas ao longo da altura das amostras P0 (0 Hz), P5 (4 Hz 2 mm) e P6 (10 Hz 2 mm). ....	48
Figura 4.24 – Perfil de microdurezas ao longo da altura das amostras P5, P5-V2. ....	49

Figura 4.25 – Perfil de condutividades ao longo da altura das amostras P0 (0 Hz), P5 (4 Hz 2 mm) e P6 (10 Hz 2 mm). .....	49
Figura 4.26 – Movimento de queda da gota durante a deposição com AZ61A. a) Formação da gota e b) Transferência da gota. ....	50
Figura 4.27 – Aderência do fio AZ61A ao material base durante a extinção do arco elétrico.....	51
Figura 4.28 – Aquisição de temperatura com termopares. a) antes da deposição e b) depois da deposição.....	51
Figura 4.29 – Perfil de temperaturas adquiridas pelos termopares. ....	52



## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Composição química do aço inox ER316L. (Valores em peso %) .....	18
Tabela 3.2 – Composição química do magnésio AZ61A e AZ31B. (Valores em peso %) %) .....	18
Tabela 3.3 – Propriedades mecânicas do material utilizado.....	18
Tabela 3.4 – Composição do gás de proteção. (Valores em %).....	18
Tabela 3.5 – Medidas utilizadas para a geometria do equipamento.....	22
Tabela 4.1 – Arranjos das amostras produzidas. ....	30
Tabela 4.2 – Parâmetros do processo para ER316L .....	30
Tabela 4.3 – Média de largura do cordão, altura da amostra, ondulação, taxa de deposição e velocidade média das amostras.....	30
Tabela 4.4 – Representação dos resultados obtidos na deposição de 4 camadas de ER316L.....	33
Tabela 4.5 – Média de largura do cordão, altura da amostra, ondulação, taxa de deposição e velocidade média das amostras.....	34
Tabela 4.6 – Parâmetros do processo para AZ61A. ....	38
Tabela 4.7 – Média de largura do cordão, altura da amostra, ondulação, taxa de deposição e velocidade média das amostras.....	39
Tabela 4.8 – Média de largura do cordão, altura da amostra, ondulação, taxa de deposição e velocidade média das amostras P5 e P5-V2.....	40
Tabela 4.9 – Tamanho, medidas verticais, horizontais e rácio de forma dos grãos das amostras produzidas sem e com vibração no plano yy. ....	41
Tabela 4.10 – Tamanho, medidas verticais, horizontais e rácio de forma dos grãos das amostras produzidas sem e com vibração no plano zz. ....	44
Tabela 4.11 – Tamanho e medidas verticais, horizontais e rácio de forma dos grãos das amostras P5 e P5-V2 no plano yy. ....	45



# NOMENCLATURA

3D	Três dimensões
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
C	Comprimento
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CTWD	<i>Contact Tip to Work Distance</i>
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
<i>f</i>	Frequência
FA	Fabrico Aditivo
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
FPS	<i>Frames Per Second</i>
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
I	Intensidade de Corrente
IACS	<i>International Annealed Copper Standard</i>
HV	<i>Vickers Hardness</i>
LMD	<i>Laser Metal Deposition</i>
NTI	Núcleo de Tecnologia Industrial
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i>
SGF	<i>Shield Gas Flow</i>
SLM	<i>Selective Laser melting</i>
SMU	<i>Source Measure Unit</i>
TD	Taxa de deposição
TS	<i>Travel Speed</i>
UNL	Universidade Nova de Lisboa
V	Voltagem
WAAM	<i>Wire and Arc Additive Manufacturing</i>
WFS	<i>Wire feed speed</i>
ZTA	Zona termicamente afetada



# **1 – INTRODUÇÃO**

## **1.1 – Estado da Arte e Motivação**

A indústria enfrenta uma grande procura por peças personalizadas e componentes de geometria complexa com prazos de entrega curtos. A maioria das tecnologias de fabrico convencionais não satisfazem estes requisitos devido às limitações quanto ao tempo de fabrico, desperdício de material e custos. Contudo, o fabrico aditivo de materiais metálicos demonstrou ser capaz de ultrapassar estes desafios e é cada vez mais estudado e aplicado à indústria.

Entre as tecnologias disponíveis de fabrico aditivo, as que se baseiam em fusão e solidificação de material têm vantagens na utilização de equipamentos não dispendiosos, de fácil manutenção e com taxas de deposição elevadas. No entanto, é necessário um conhecimento mais profundo do processo para melhorar a qualidade superficial, propriedades mecânicas e diminuir a ocorrência de defeitos. Isto pode ser alcançado através do controlo da microestrutura do material pela utilização de vibração mecânica do banho de fusão.

## 1.2 – Objetivo

O principal objetivo desta dissertação é estudar o efeito da vibração mecânica do banho de fusão na microestrutura e propriedades mecânicas durante o processo *Wire and Arc Additive Manufacturing* (WAAM). Para atingir este objetivo científico definiu-se também um objetivo de carácter tecnológico, que consiste no desenvolvimento de um protótipo funcional com vista a provocar o movimento da tocha que deposita o material e assim provocar vibração no banho de fusão. Pretendeu-se ainda realizar diferentes ensaios de WAAM com diferentes parâmetros e caracterizar a microestrutura do material depositado.

## 1.3 – Trabalho desenvolvido

Tendo em conta os objetivos definidos, foi desenvolvida e produzida uma tocha de WAAM dedicada ao sistema de movimento de coordenadas XYZ existente no DEMI da FCT NOVA com o propósito de produzir amostras variando a frequência, amplitude e tipo de vibração. O domínio de frequências utilizadas variou entre 2 e 10 Hz para amplitudes de 1 e 2 mm. Também foram experimentados 2 tipos de vibração: perpendicular com a direção de deposição e coincidente com a direção de deposição. Produziu-se amostras com arame de ER316L e arame de AZ61A.

Avaliaram-se os efeitos da vibração mecânica na geometria e na microestrutura das amostras. Realizaram-se ensaios de microdureza nas amostras e efetuaram-se ensaios de termografia durante a deposição das camadas com recurso à câmara termográfica FLUKE 400 TI. Foi captado um vídeo a 1000 fps para observar o comportamento do banho de fusão e por último, foram desenvolvidos provetes para ensaios de tração uniaxial com diferentes orientações a partir das paredes produzidas em AZ61A.

## 1.4 – Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos, nos quais se descreve os temas abordados e o trabalho desenvolvido.

No capítulo 2 é apresentado o estado da arte dos temas em estudo, dividido em 4 partes. Em 2.2 é descrita a tecnologia WAAM, os seus parâmetros de processo e propriedades microestruturais. Em 2.3 são apresentados defeitos resultantes do fabrico aditivo e estratégias com vista a melhorar a microestrutura do material. E por fim, em 2.4 é aprofundada a aplicação de vibração na soldadura por fusão.

No capítulo 3 é descrito o desenvolvimento do protótipo e as técnicas de caracterização das amostras sobre as quais incidiu o trabalho experimental.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos. Em 4.1 são analisadas amostras produzidas com deposição de quatro camadas de fio ER316L. Em 4.2 descreve-se a microestrutura das paredes produzidas com 30 camadas de ER316L e em 4.3 foi avaliado o efeito da vibração com deposição de fio AZ61A para 2 tipos de vibração.

No capítulo 5 apresentam-se as conclusões do trabalho desenvolvido e propostas para desenvolvimentos futuros.



## 2 – REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

### 2.1 – Introdução

O fabrico aditivo é um processo de produção de peças, projetadas a partir de modelos geométricos criados em computador. É um processo automatizado que permite produzir peças com geometrias complexas e com desperdício de material reduzido através da deposição de material camada a camada ao longo da altura da peça.

Inicialmente o processo era utilizado para a produção de protótipos de modo a facilitar a aprovação funcional e estética antes de avançar para o fabrico da peça final. Isto conduziu a vantagens no desenvolvimento do produto, reduzindo o tempo e desperdício de material, e aumentando a probabilidade da peça final ser fabricada corretamente.

De acordo com a ASTM Internacional, existem 7 categorias de fabrico aditivo: *Binder Jetting*, deposição seletiva de um agente de ligação líquido para garantir a união das partículas de pó; *Direct Energy Deposition*, deposição e fusão de material através de energia térmica; *Material Extrusion*, aquecimento e extrusão de material através de uma matriz de extrusão e deposição camada a camada; *Material Jetting*, deposição de material fotossensível que solidifica com a exposição à luz ultravioleta; *Powder Bed*

*Fusion*, deposição de material por camadas e fusão seletiva a laser ou feixe de elétrons; *Sheet Lamination*, união de folhas ou fitas metálicas por soldadura ultrassônica; *Photopolymerization*, utilização de luz ultravioleta para curar resina líquida, enquanto a plataforma que suporta a peça se move para baixo após a cura da nova camada.

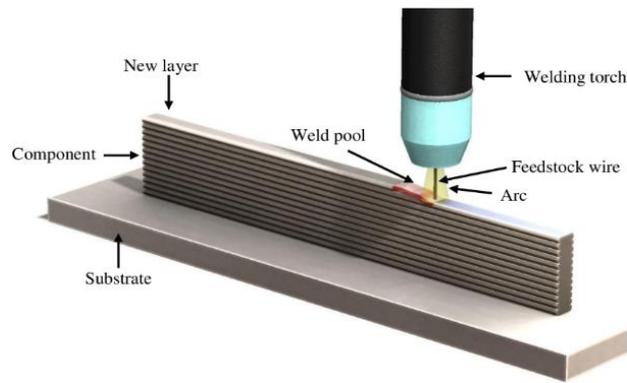
Atualmente, o objetivo do desenvolvimento do fabrico aditivo é a fabricação de peças metálicas funcionais de formato complexo em materiais de difícil processamento, como titânio e ligas à base de níquel. Na indústria aeroespacial, automóvel e médica já é utilizada para fabrico de componentes funcionais.

Contudo, a manufatura aditiva tem limitações que não devem ser desprezadas. As principais limitações são: a fraca qualidade superficial que, para peças metálicas leva à necessidade de efetuar maquinação para obter as dimensões exatas; o tamanho das peças é limitado pela dimensão da máquina que as fabrica e processos como o *Powder Bed* apresentam taxas de deposição baixas e custos muito elevados.

## 2.2 – Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)

O WAAM é uma tecnologia de fabrico com grande semelhança à soldadura por fusão, uma vez que se baseia em fusão e solidificação de material *layer-by-layer* ao longo da altura da peça, onde os fundamentos e conceitos adquiridos na soldadura *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) e *Plasma Arc Welding* (PAW) são extrapolados para o processo WAAM, para estudar as propriedades e características da microestrutura do material [1].

O *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) é o processo mais utilizado na tecnologia WAAM (Figura 2.1) onde o calor gerado por um arco elétrico funde o eletrodo consumível e o material base para serem unidos. Este processo decorre sob uma atmosfera de gás de proteção inerte (He ou Ar) ou ativo (CO<sub>2</sub> ou outras misturas gasosas). Dependendo dos parâmetros de processo do GMAW, as taxas de deposição podem variar entre 15 e 160 g/min para o fabrico de peças de grande escala [2]. Uma variante deste processo, designada por *Cold Metal Transfer* (CMT), foi adaptada ao fabrico aditivo e permite obter um arco elétrico mais estável e reduzir a entrega térmica devido ao leve período de curto-circuito [3].



**Figura 2.1** – Ilustração esquemática do processo WAAM [5].

Este processo consiste na deteção do elétrodo consumível quando este entra em contacto com o banho de fusão, sendo ativado um servomotor que retrai o elétrodo promovendo a transferência de gotas. Ao reduzir a intensidade da corrente, é possível evitar a formação de salpicos.

Embora a aplicação dos processos de GTAW e PAW à manufatura aditiva apresentem menos problemas de distorção, porosidades e salpicos em relação ao GMAW, nestas duas tecnologias, o fio não é alimentado coaxialmente, uma vez que o elétrodo não é consumível. Assim, são causadas variações no processo ao alterar a direção da soldadura e existe extrema sensibilidade com o comprimento do arco elétrico. O sistema de soldadura robótica necessitaria de um eixo rotativo para orientar o bocal de alimentação e mantê-lo sincronizado com a direção de deposição [4].

Atualmente o fabrico aditivo baseado em fusão está maioritariamente focada na tecnologia de camas de pó que utiliza um feixe laser/eletrões como fonte de calor e pó como material de base, sendo assim propícia a formação de defeitos relacionados com porosidades que, quando sujeito a solicitações dinâmicas podem afetar a integridade das peças. Apesar da boa precisão e tolerâncias adquiridas nesta tecnologia de fabrico, a taxa de deposição é baixa, aumentando os tempos de fabrico [2]. Enquanto que o processo *Selective Laser melting* (SLM) permite taxas de deposição até 171 cm<sup>3</sup>/h e o processo *Laser Metal Deposition* (LMD) até 300 cm<sup>3</sup>/h, a taxa de deposição da tecnologia *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM) aumenta até 330 cm<sup>3</sup>/h.

O processo WAAM utiliza como fonte de calor o arco elétrico e fio sólido como material de base. Permite produzir peças de grandes dimensões devido à elevada taxa de deposição, contudo, as peças apresentam ondulação superficial que pode provocar propagação de fissuras, sendo necessário realizar maquinação, no entanto, existe um desperdício de material reduzido uma vez que o processo permite produzir peças com

medidas próximas das exatas [2]. Donde, o rácio de *Buy-To-Fly*, que representa o rácio entre o peso da matéria prima adquirida e o peso da peça final, é baixo.

### **2.2.1 – Parâmetros do processo**

A tecnologia WAAM tem um enorme potencial de implementação na indústria com possibilidade de se tornar económica, uma vez que é apenas necessário um sistema de movimento por coordenadas automatizado, fonte de energia, tocha de deposição, fio de alimentação, gás de proteção e substrato.

Os parâmetros operacionais podem ser modificados para controlar a microestrutura, as propriedades mecânicas e a formação de defeitos do material durante o fabrico aditivo por fusão. [5]. De modo a obter boa qualidade de soldadura durante a produção de peças, é necessário controlar corretamente os vários parâmetros do processo. Os parâmetros incluem: intensidade da corrente, tensão, tipo de gás de proteção, taxa de fluxo, velocidade de deslocamento, velocidade de alimentação do fio, distância *tip-to-work* e estratégia de deposição. A otimização destes parâmetros é muito importante na determinação da largura, penetração, tamanho do cordão, taxa de deposição e rugosidade da superfície. A estratégia de deposição é crítica em processos de fabrico aditivo baseados em fusão para obter peças totalmente preenchidas, com tensões residuais minimizadas, com controlo da evolução microestrutural durante a deposição de múltiplas camadas e o efeito da temperatura entre as camadas [2].

Segundo o estudo realizado por M. Dinovitzer *et al.* [5], onde foram analisados os efeitos dos parâmetros do processo WAAM em diferentes deposições, observou-se que a altura do cordão aumenta linearmente com a taxa de alimentação do fio. O aumento da velocidade de deslocamento provoca a diminuição da largura do cordão e a fusão em profundidade, no entanto, a rugosidade superficial aumenta. Quanto à corrente elétrica, a sua diminuição provoca a diminuição da rugosidade superficial e da largura do cordão de soldadura. O fluxo de gás de proteção faz variar a aparência da parede [2].

### **2.2.2 – Descrição do processo e das propriedades microestruturais**

Devido às condições de solidificação que ocorrem no fabrico aditivo por fusão, as características microestruturais obtidas podem diferenciar-se das características resultantes de processos convencionais, donde, a necessidade de produção aditiva de materiais complexos implica o desenvolvimento de novas variantes que por sua vez permitem obter novas propriedades nos materiais processados [2].

No processo WAAM, inicialmente é depositada por fusão uma primeira camada no substrato. De seguida, é depositada a segunda camada sobre a anterior, onde a entrega térmica deve ser suficiente para fundir o material a ser depositado e refundir parcialmente a camada depositada anteriormente. Este processo é repetido ao longo da altura da peça até estar concluída.

Durante este processo, são gerados perfis térmicos complexos no material dado que, ao depositar a primeira camada é formada uma zona afetada pelo calor. Logo, o calor introduzido para depositar cada camada gera zonas sucessivamente afetadas pelo calor nas camadas depositadas anteriormente [1]. Devido às rápidas taxas de arrefecimento, a expansão e contração após o aquecimento e arrefecimento, respetivamente, não ocorrem uniformemente provocando distorções, deformações plásticas permanentes e tensões residuais no material [6]. Com o aumento da temperatura, a expansão de material é restringida por material mais distante que se encontra a uma temperatura inferior, portanto, são geradas tensões de tração e compressão nas zonas de fusão e zonas afetadas pelo calor [1]. Caso as tensões residuais ultrapassem a tensão de cedência do material, ocorre deformação plástica.

As peças produzidas pelo processo WAAM normalmente apresentam grandes grãos colunares, formados por crescimento epitaxial a partir do substrato alinhado ao longo da direção de deposição de camadas, que possui o gradiente de temperatura máximo, eliminando assim a necessidade de nucleação. Isto resulta em propriedades anisotrópicas, que podem ser prejudiciais para condições de carregamento multiaxial [2].

A elevada taxa de arrefecimento provoca a diminuição do tamanho de grão que, na maioria das ligas metálicas, contribui para o aumento da resistência mecânica do material. Relacionando o processo WAAM com a soldadura multipasse, onde é efetuada uma sobreposição de cordões de soldadura para união de 2 componentes [7], foi observada uma melhoria na tenacidade e a redução de tensões residuais através do refinamento do grão devido aos ciclos térmicos induzidos durante a aplicação de novas camadas. Também foi observada uma diminuição da taxa de arrefecimento com o pré-aquecimento do material produzido pelas passagens anteriores e por fim, devido aos sucessivos ciclos térmicos e a diminuição de tensões residuais impostas pelas passagens anteriores [1].

## 2.3 – Defeitos

Os principais defeitos encontrados nas peças produzidas por fabrico aditivo são: porosidades, defeitos que ocorrem maioritariamente nas ligas de alumínio e que são causadas pelos gases (N, O e H) retidos no banho de fusão durante a decomposição de óxidos a altas temperaturas; Imprecisão dimensional; Variação de espessura; Ondulação superficial; Fissuramento a frio, resultado da formação de fases duras e quebradiças; Fissuramento a quente devido à formação de composição eutética de baixa temperatura; Partes de fio não fundido coladas na peça final provocado pela extensão inconsistente de elétrodo que, quando é demasiado comprido, não é totalmente fundido, ficando colado na peça; Colapso, uma superfície de topo não plana, causada pela elevada dissipação de calor existente no início de cada camada e inferior no final das mesmas; Salpicos; Distorção, devido ao excesso de calor incidido na peça [1,2,8].

É possível melhorar as propriedades mecânicas dos materiais alterando a sua microestrutura. Para as ligas de Alumínio (Al) e Magnésio (Mg), a existência de grão fino na zona de fusão melhora a resistência à fissuração durante a solidificação [9].

Na zona de fusão são formados grãos colunares grosseiros que, de acordo com a equação de Hall - Petch, contribuem para a diminuição da tensão de cedência do material depositado que leva à diminuição da sua resistência mecânica [1]. No entanto, existe casos que a produção de peças através da formação de um único cristal é pretendida, como por exemplo no fabrico de pás de turbinas.

## 2.4 – Estratégias para diminuir defeitos e melhorar a microestrutura do material

As tensões residuais podem ser diminuídas com tratamentos térmicos efetuados após o fabrico da peça e com o correto planeamento do percurso de fabrico; os salpicos podem ser eliminados através da variação dos parâmetros de processo relacionados com os métodos de transferência de metal entre o elétrodo e o material base [2]; o colapso e fio não fundido podem ser evitados introduzindo sensores que garantem a distância bocal/peça e a temperatura entre camadas constante [2]; a ondulação superficial pode ser reduzida ao efetuar a deposição de material com trajetória zig zag originando menos desperdício de material após a maquinação; a diminuição das

ensões residuais pode ser obtida com o pré-aquecimento do substrato, diminuindo o gradiente térmico e homogeneizando a distribuição de temperatura.

O controlo da microestrutura na soldadura por fusão pode ser efetuado pelos seguintes métodos: manipulação da fonte de calor controlando a forma do pulso através de arco pulsado ou oscilado [10,11,12]; controlo da composição química da zona de fusão incorporando agentes inoculantes no banho de fusão; ajuste dos parâmetros de soldadura; e pela utilização de vibração eletromagnética e ultrassônica [13,14,15].

## 2.5 – Aplicação de vibração na soldadura por fusão

Provocando a vibração no banho de fusão pretende-se não só obter uma distribuição de tensões residuais mais uniforme e a diminuição do tamanho de grão, mas também que sejam formados grãos equiaxiais, reduzindo assim a suscetibilidade ao fissuramento e, ao mesmo tempo, melhorar a ductilidade, resultando em componentes com propriedades isotrópicas [2].

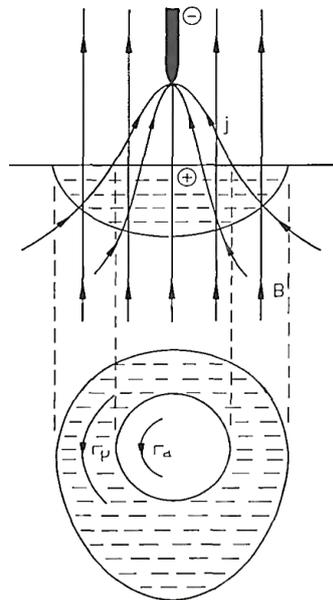
Já foi constatado que através da vibração eletromagnética durante a soldadura por arco elétrico é possível alterar as propriedades da microestrutura do material. Ao reorganizar o material no banho de fusão, ocorre o refinamento do grão e redução da formação de porosidades [14]. A eficácia do processo no refinamento do grão é dependente das técnicas de vibração utilizadas, parâmetros do processo e tempo de solidificação do material base. Ligas que necessitam de maior tempo de solidificação permitem mais tempo de reorganização das partículas no banho de fusão [15].

A vibração eletromagnética é conseguida através da força de Lorentz,  $\vec{F}$ . Esta força resulta do produto externo entre a densidade de corrente elétrica,  $\vec{j}$ , e de um campo magnético,  $\vec{B}$ . Ao colocar um campo magnético externo paralelo ao eixo do arco elétrico, resulta uma força perpendicular ao campo magnético e à componente radial da corrente, divergida através do banho de fusão e arco elétrico [1]. Esta força provoca a rotação do arco elétrico e escoamento anular do metal líquido no banho de fusão, no entanto, no centro e na extremidade do banho de fusão a velocidade do escoamento anular é nula (Figura 2.2) [14].

No estudo realizado por G. Den Ouden et al. [14], a aplicação de um campo magnético constante provoca assimetria do cordão de soldadura, que pode ser reduzida com a diminuição da intensidade do campo e quando é aplicado um campo

magnético alternado é produzido um cordão de soldadura simétrico. Ao aumentar a intensidade do campo magnético, a profundidade de penetração diminui e a largura dos cordões aumenta, e aumentando a velocidade de deslocamento tanto a profundidade de penetração como a largura diminuem. Observou-se um aumento do refinamento de grão com o aumento da intensidade do campo magnético e diminuição da frequência.

Q. Yao et al. [12] aplicou um campo magnético externo durante o processo de soldadura por resistência. O campo magnético foi conseguido através de dois ímanes com os mesmos pólos colocados um contra o outro, onde as componentes verticais dos dois campos magnéticos diminuem gradualmente até ao plano central da montagem, enquanto que as componentes horizontais se sobrepõem. A componente radial do campo magnético externo interage com a componente vertical da corrente de soldadura resultando uma força magnética externa perpendicular às duas componentes. Como resultado, a força magnética induzida provoca o movimento rotacional do metal fundido no plano de simetria, provocando o refinamento das microestruturas na zona de fusão e aumento da tensão de corte.



**Figura 2.2** – Representação esquemática da influência do campo magnético axial no arco elétrico e banho de fusão.  $\vec{j}$  – densidade de corrente;  $\vec{B}$  – campo magnético;  $\vec{F}_a$  – força atuada no arco;  $\vec{F}_p$  – força atuada no metal líquido do banho de fusão [14].

No estudo realizado por A. Fritzsche et al. [16], é demonstrado que a aplicação de vibração eletromagnética durante a soldadura laser ou soldadura por feixe de elétrons de ligas de alumínio reduz significativamente a densidade de poros.

No estudo realizado por Liu et al. [17], é aplicado um campo magnético externo durante o processamento a laser de Inconel 718, onde foi observada uma distribuição de tensões residuais mais uniforme, a quebra dos grãos colunares e a diminuição da formação de fase(s) de Laves que é resultado da segregação de elementos de liga (N, Ti, Al) durante a solidificação. Os resultados apresentaram melhorias nas propriedades mecânicas do material relativamente aos obtidos sem aplicação de campo magnético.

Os autores B. Lu et al. [18] realizaram um estudo do controlo do tamanho de grão no fabrico aditivo por fusão aplicando vibração eletromagnética externa. Foi utilizado um campo magnético externo durante o fabrico aditivo por arco de plasma e foi observada a alteração da microestrutura de dendrítica colunar para quase esferoidal na solidificação. As forças de Lorentz permitiram a quebra das pontas dendríticas devido à rotação do metal líquido. A existência de fragmentos dendríticos e redução do gradiente de temperatura no banho de fusão favoreceu o refinamento e uniformização do grão.

Já foi constatado que através de vibração mecânica no processo *Vibration assisted welding* (VAW) é possível reduzir as tensões residuais, distorções e melhorar as propriedades mecânicas da soldadura [19]. Portanto, é espectável que a aplicação de vibração durante o processo WAAM seja uma solução eficaz na diminuição da formação de defeitos e no melhoramento das propriedades mecânicas das peças produzidas por este processo

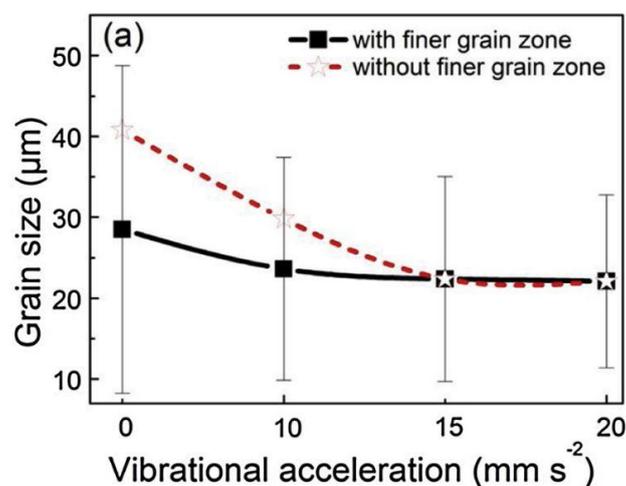
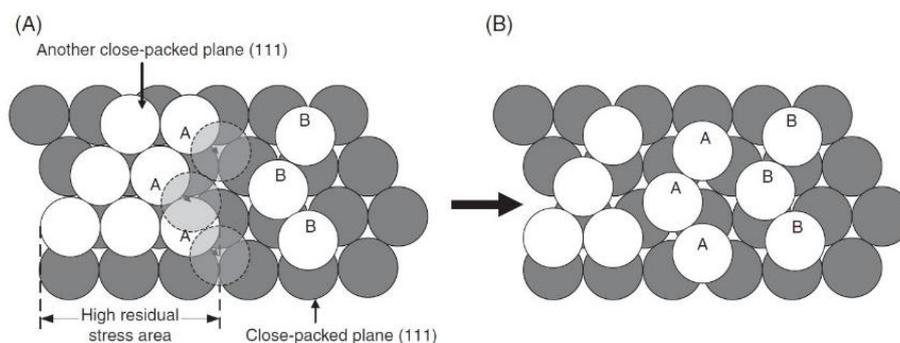


Figura 2.3 – Distribuição estatística do tamanho de grão ao variar a aceleração de vibração [19].

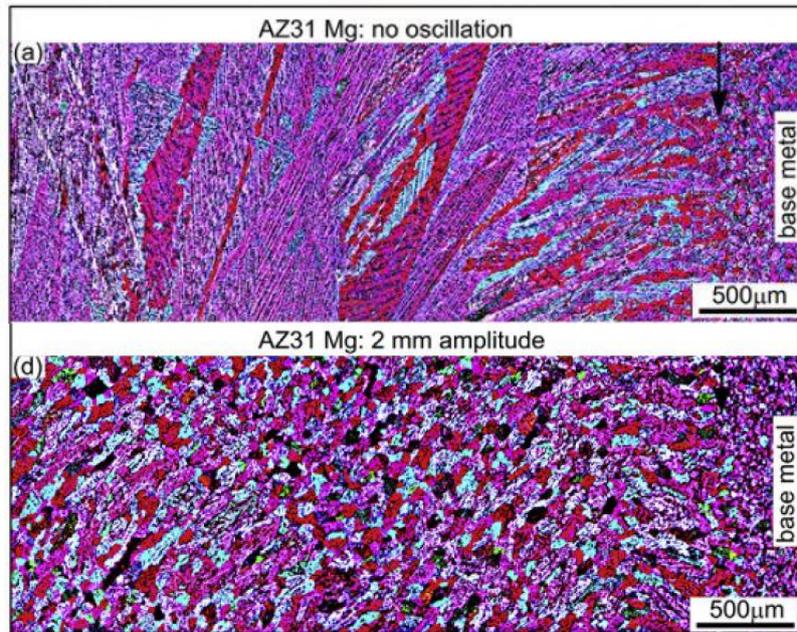
Mais recentemente, C. Zhang, et al. [19] reportou pela primeira vez a aplicação de vibração no componente durante o seu fabrico em WAAM. Foi utilizado um substrato de alumínio sobre uma mesa vibratória e fio de Al-Mg como material base. A vibração provocou o efeito de refinamento de grão e como pode ser observado na Figura 2.3, numa zona de grãos finos o tamanho médio do grão diminuiu de 28,50  $\mu\text{m}$  para 22,10  $\mu\text{m}$  com o aumento da aceleração de vibração de 0 a 20  $\text{mm/s}^2$ . Reduziu a porosidade de 6,66% para 1,52% e a tensão de rotura aumentou 30 MPa em comparação com a não aplicação de vibração no componente.

No estudo realizado por Kuo et al [20], foi utilizado um motor de massa excêntrica para produzir vibração na base de trabalho durante o processo de soldadura GTAW em aço inoxidável AISI 304. A soldadura por vibração melhorou a nucleação de  $\delta$  ferrite que limitou o crescimento das ramificações das dendrites resultando numa microestrutura refinada e uniforme. A vibração provocou a redução das tensões residuais de 262 para 206 MPa. Quando a vibração é aplicada os átomos A têm energia suficiente para migrar e encaixam nos locais de baixa energia, como é representado pelos círculos a tracejado na Figura 2.4.

No estudo realizado por T. Yuan et al. [21] foi investigado o refinamento de grão na soldadura GTAW de magnésio através da oscilação do arco. Foram utilizadas amplitudes de oscilação a variar entre 0 e 2 mm e frequências de 1 a 50 Hz. Com 2 mm de amplitude (medida igual ao comprimento de arco) e com uma frequência de 1 Hz foi possível identificar refinamento de grão como mostra a Figura 2.5. Foi possível verificar também que a refusão durante a solidificação do banho favorece a quebra de dendrites ao fundir as suas ramificações e reduz o gradiente de temperatura durante a solidificação do banho.



**Figura 2.4** – Alívio de tensões durante a soldadura por vibração [20].



**Figura 2.5** – Efeito da frequência de oscilação do arco durante a soldadura de Mg AZ31A. a) sem oscilação. b) com frequência de oscilação de 1 Hz e 2 mm de amplitude de vibração [21].



## **3 – DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO E TÉCNICAS DE CARACTERIZAÇÃO**

### **3.1 – Introdução**

Neste capítulo são descritos os materiais base e substratos, os equipamentos necessários à deposição com vibração mecânica, bem como a produção e técnicas de caracterização utilizadas nas amostras.

De modo a conseguir provocar a vibração na tocha durante o fabrico aditivo desenvolveu-se uma tocha WAAM personalizada, que consiste num cabeçote adaptável ao sistema de movimento por coordenadas XYZ existente no laboratório. O desenvolvimento do protótipo foi organizado em 3 etapas: a) projeto e fabrico do protótipo, b) ligação e instalação dos componentes no sistema de movimento, c) teste e validação através da otimização de parâmetros.

### 3.2 – Materiais

Foram utilizados dois tipos de eletrodo consumível e para cada um deles um substrato de material diferente. Para os testes preliminares foi depositado um fio sólido de aço inox ER316L de 1 mm de diâmetro sobre uma chapa de aço estrutural com 8 mm de espessura. Posteriormente foi depositado fio de magnésio AZ61A de 1.6 mm de diâmetro sobre uma chapa de AZ31B com 3 mm de espessura. Os substratos foram previamente preparados para remover a contaminação na superfície.

Na Tabela 3.1 e 3.2 apresenta-se os valores da composição química dos eletrodos consumíveis e do substrato de magnésio. Na Tabela 3.3 apresenta-se as propriedades mecânicas dos respectivos materiais e na Tabela 3.4 apresenta-se os valores da composição química do gás de proteção utilizado nos testes experimentais.

**Tabela 3.1** – Composição química do aço inox ER316L. (Valores em peso %)

Material	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	S	P	Cu
ER316L	0.03	1.0-2.5	0.65	11.0-14.0	18.0-20.0	2.5-3.0	0.02	0.03	0.3

**Tabela 3.2** – Composição química do magnésio AZ61A e AZ31B. (Valores em peso %)

Material	Mg	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	Fe
AZ61A	92	5.8-7.2	0.4-1.5	0.15	0.10	0.05	0.005	0.005
AZ31B	97	2.5-3.5	0.6-1.4	0.20	0.10	0.05	0.005	0.005

**Tabela 3.3** – Propriedades mecânicas do material utilizado.

Material	Tensão de cedência [N/mm <sup>2</sup> ]	Tensão de rotura [N/mm <sup>2</sup> ]	Alongamento [%]	Impacto ISO-V [J] +20°C	HB max
ER316L	350	550-650	>30	100	217
AZ61A	230	310	16	4.10	60
AZ31B	200	260	15	4.30	49

**Tabela 3.4** – Composição do gás de proteção. (Valores em %)

Material	Ar	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
Alphagaz 1	99.999	<3 ppm	<2 ppm	<0.5 ppm

### **3.3– Desenvolvimento de equipamento personalizado**

#### **3.3.1 – Tocha WAAM**

Para permitir a deposição de material com vibração do banho de fusão foi desenvolvido uma tocha WAAM personalizada. Esta consiste na atuação de um pneumático para vibrar o bocal da tocha e um motor de passo para controlar a velocidade de alimentação de arame, o qual pode apresentar diferentes diâmetros. A pressão no pneumático foi controlada por um manómetro e o seu curso foi limitado por 2 batentes de modo a controlar a amplitude de vibração. A taxa de fluxo de gás de proteção foi controlada por um rotâmetro com perda de carga ajustável e o acionamento foi remotamente controlado através de uma válvula solenóide. Na Figura 3.1 pode observar-se a Tocha WAAM que foi acoplada ao sistema de movimento para permitir o deslocamento durante a deposição. O deslocamento da tocha, o ligar e desligar da deposição e o acionamento do pneumático foi controlado através da linguagem de programação código G, no entanto o pneumático foi também controlado através do *software LabVIEW*.

#### **Requisitos funcionais**

De modo a projetar e construir o cabeçote de vibração mecânica foi necessário definir os seguintes requisitos funcionais:

- Funcionar com o processo de soldadura MIG/MAG;
- Ser adaptável ao sistema de movimento existente no laboratório;
- Permitir amplitudes de vibração no bocal da tocha até 4 mm;
- Permitir vibrações até 10 Hz;
- Fornecer uma alimentação controlada do material de base;
- Permitir vibração perpendicular e coincidente ao sentido de deslocamento da tocha WAAM;
- Permitir a canalização de gás de proteção.

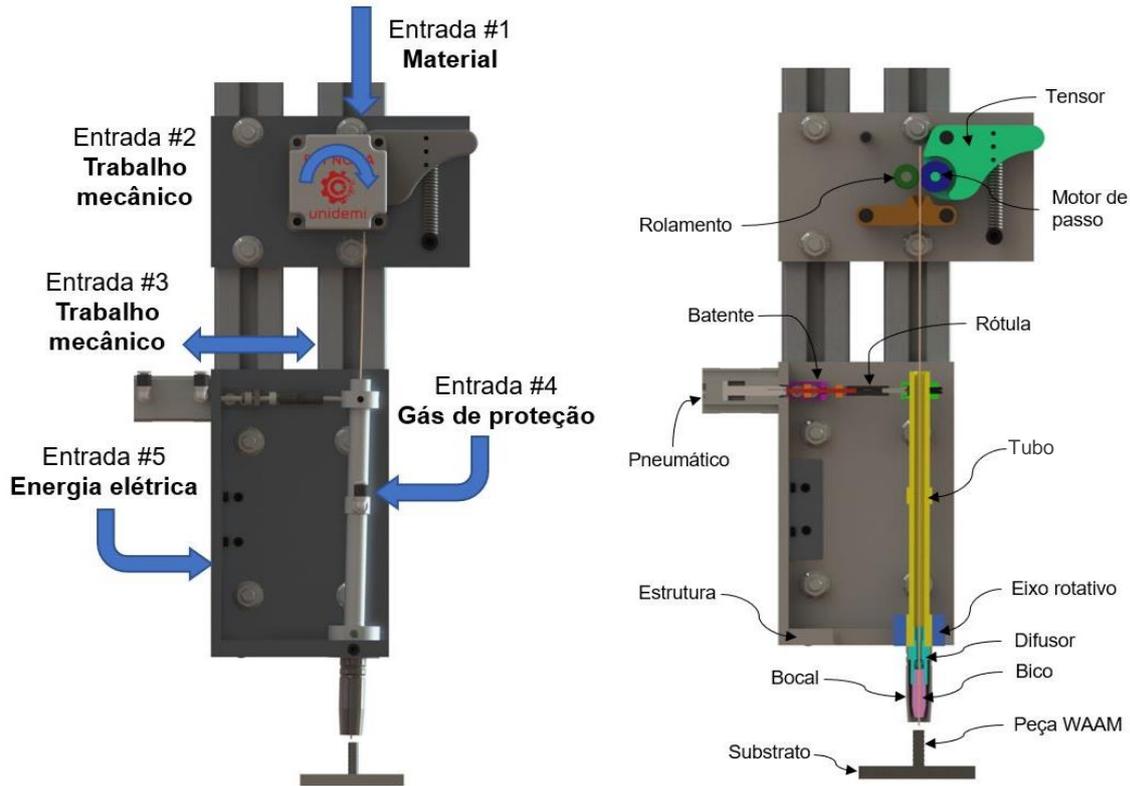


Figura 3.1 – Vista frontal e vista de corte da Tocha WAAM.

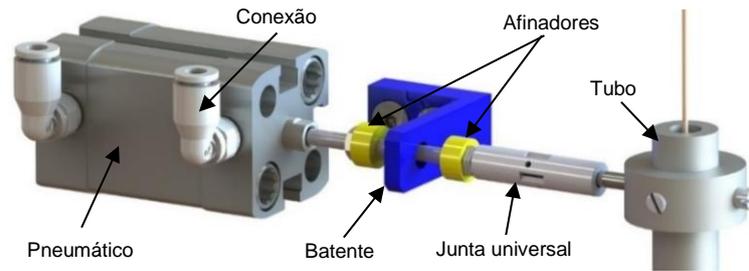
## Componentes

- Motor de passo

A alimentação de fio para a tocha foi controlada com o motor MY23HS0-1 NEMA-23 Bipolar. Este motor possui uma caixa de engrenagens planetária integrada que permite um funcionamento definido por 200 incrementos por revolução com uma precisão angular de  $\pm 5\%$  para variações de  $1,8^\circ$ . O deslocamento do fio foi efetuado através do atrito entre uma peça cilíndrica ligada ao veio do motor e um rolamento. A peça cilíndrica permitiu uma ligação desmontável com um perno de aperto ao veio do motor.

- Pneumático e acessórios adjacentes

Foi utilizado o FESTO ADN-12-10-I-P-A, um pneumático de duplo efeito com duas portas de conexão para a entrada e saída de ar comprimido permitindo a haste do pistão estender e retrair com um curso máximo de 10 mm (Figura 3.2). A pressão máxima admitida pelo pneumático é de 10 bar sendo que, para o trabalho experimental foi regulada uma pressão de 2 bar com um manômetro de pressão.



**Figura 3.2** – Sistema de afinação do curso do pneumático.

- Junta universal dupla em latão

Para permitir a transferência de movimento entre o cilindro pneumático e a tocha, foi utilizado uma junta universal dupla e varão roscado M3.

- Válvula solenóide de 5/2 vias

Foi utilizada uma válvula solenóide VUVS-LK20-B52-D-G18-1C1-S de 5 portas e 2 posições que permite controlar a frequência de funcionamento do pneumático através do software *LabVIEW*. As ligações à válvula são efetuadas com conexões e tubo de poliuretano de 4 mm de diâmetro. As ligações ao manômetro são efetuadas com tubo de poliuretano de 8 mm de diâmetro.

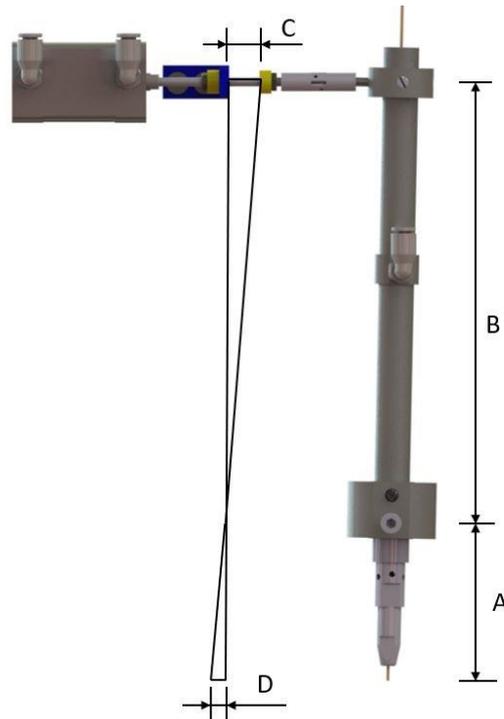
- Tubo de guiamento do arame

Foi projetado e maquinado um tubo de alumínio para resistir às oscilações impostas pelo pneumático. O tubo foi produzido a partir de um varão de alumínio torneado e roscado para permitir a montagem do difusor, extrusor e bocal. A entrada de fluxo de gás foi efetuada através de uma conexão apertada na lateral do tubo para direcionar o gás para o banho de fusão através do bocal.

- Batente

O controle da amplitude de vibração foi conseguido pelos afinadores de alumínio ao afinar a sua distância ao batente. Através da semelhança de triângulos foi possível calcular a distância  $C$  em função da amplitude  $D$  e das medidas  $A$  e  $B$  (Equação 3.1). Na Figura 3.2. estão representados os componentes do sistema de afinação do curso do pneumático. Na Figura 3.3 pode observar-se o esquema representativo das medidas necessárias ao cálculo do curso do pneumático.

$$\frac{(D \cdot B)}{A} = C \quad (3.1)$$



**Figura 3.3** – Esquema representativo das medidas da Tocha WAAM.

Para obter os valores pretendidos de amplitude de vibração, foi necessário fixar as medidas de A e B para 60 e 150 mm respetivamente. Na Tabela 3.3 apresenta-se os valores das variáveis utilizadas na geometria da Tocha WAAM para obter amplitudes de vibração de 1 a 4 mm.

**Tabela 3.5** – Medidas utilizadas para a geometria do equipamento.

C [mm]	D [mm]	A [mm]	B [mm]
10	4	60	150
7.5	3	60	150
5	2	60	150
2.5	1	60	150

### 3.3.2 – Máquina de soldadura

Foi utilizada uma máquina de soldadura (alimentador de arame e unidade de controlo) da KEMPY, modelo Pro MIG 501 e modelo Pro MIG 3200 para depositar o material sobre o substrato. Esta máquina permite 3 modos de soldadura MIG: (1) onda pulsada sinérgica, (2) onda contínua sinérgica, (3) onda contínua convencional. Enquanto que no modo convencional o valor da tensão pode ser definido

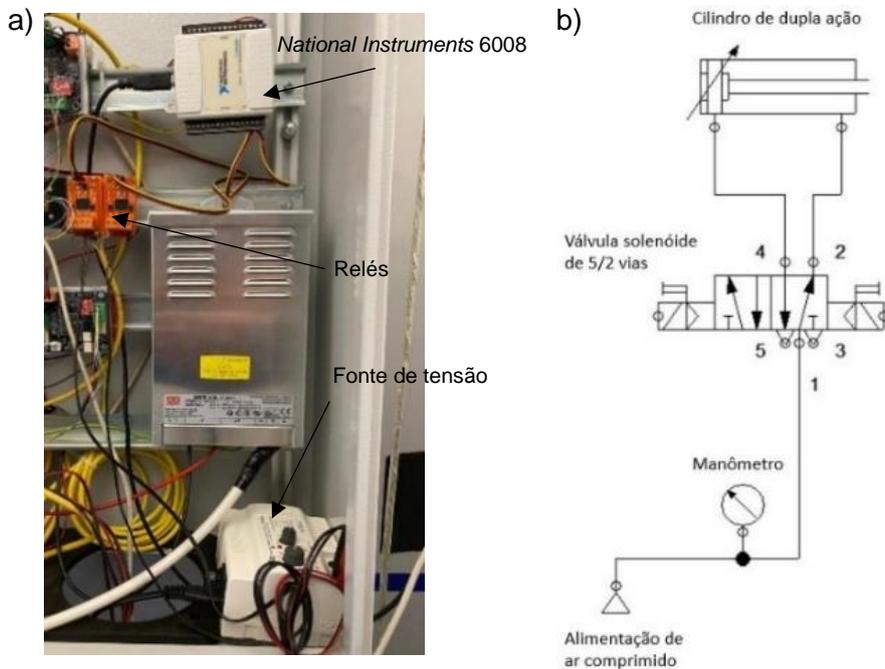
independentemente da velocidade de alimentação de fio, no modo sinérgico, a corrente e tensão dependem da velocidade de alimentação de fio definida. Neste estudo foram utilizados 2 modos de deposição. Para as amostras depositadas com fio de ER316L foi utilizado o modo de onda contínua convencional enquanto que nas amostras produzidas com fio de AZ61A utilizou-se o modo de onda pulsada sinérgica.

### 3.3.3 – Sistema de movimento

Para garantir a repetibilidade das condições e parâmetros de deposição, foi utilizada uma estação de trabalho de fabrico aditivo com um substrato fixo e uma cabeça móvel em 3 direções ortogonais (XYZ). Na cabeça móvel foi acoplada a tocha WAAM personalizada. O deslocamento do bocal, velocidade de alimentação de fio e estratégia de deposição foram controlados através do software Repetier Host com linguagem Código G e um Arduino Mega 2560.

### 3.3.4 – Circuito elétrico e pneumático

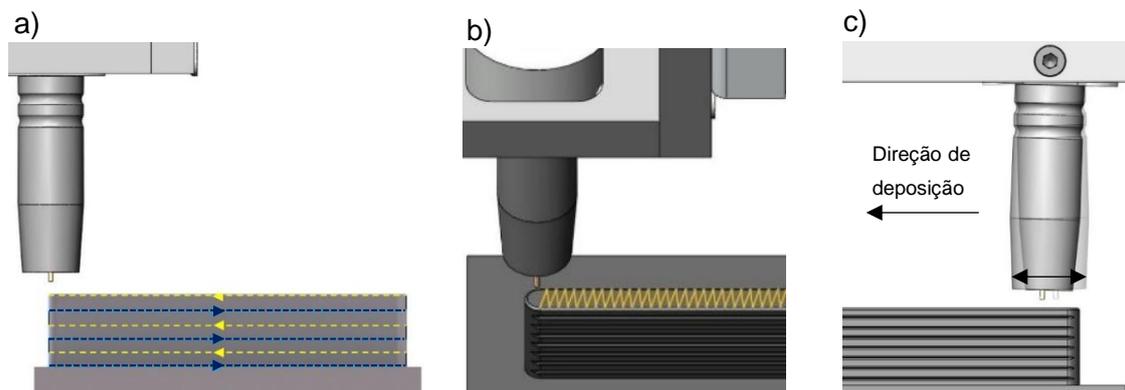
O controlo do pneumático foi efetuado usando o sistema de aquisição de dados *National Instruments USB 6008* e o *software LabVIEW*. No circuito elétrico representado na Figura 3.4 a) os relés alimentados pela fonte de tensão de 24 V ativam a válvula solenóide do circuito pneumático (Figura 3.4 b)).



**Figura 3.4** – Circuitos de controlo da Tocha WAAM. a) Circuito elétrico, b) Representação do circuito pneumático.

### 3.4 – Estratégia de deposição

A estratégia de deposição tem grande influência nas condições de solidificação, no gradiente térmico e nas tensões residuais do material. Conforme ilustrado na Figura 3.5 a), as deposições foram efetuadas ao longo da altura da peça. As linhas azuis e amarelas representam o trajeto das deposições e a preto o movimento da tocha sem deposição. No início da deposição o excesso de dissipação de calor diminui a penetração de material base e no final da deposição a baixa dissipação de calor contribui para a queda da altura da deposição resultando numa parede com grandes diferenças de altura. Ao intercalar o sentido de deposição evita-se esta variação melhorando as características geométricas da parede. Mantendo a estratégia de deposição, aplicou-se dois tipos de vibração na tocha WAAM. Durante a deposição de ER316L a vibração da tocha foi efetuada perpendicularmente com a direção de deposição (Figura 3.5 b)). Na deposição de AZ61A, além da vibração descrita anteriormente, aplicou-se vibração coincidente com a direção de deposição (Figura 3.5 c)).



**Figura 3.5** – Trajetória de deposição. a) ao longo da altura. b) Vibração perpendicular com a direção de deposição. c) Vibração coincidente com a direção de deposição.

#### 3.4.1 – Velocidade média e taxa de deposição

A velocidade média de vibração foi calculada através da equação 3.1, onde  $F$  [Hz] representa a frequência e  $A$  [mm] a amplitude de vibração.

A taxa de deposição foi calculada através da equação 3.2, onde  $L$  [cm] representa o comprimento de deposição, o  $W$  [cm] a largura média da deposição,  $H$  [cm] a altura média e  $DT$  [h] o tempo de deposição.

$$v = F \cdot A \quad (3.1)$$

$$DR = \frac{L \cdot W \cdot H}{DT} \quad (3.2)$$

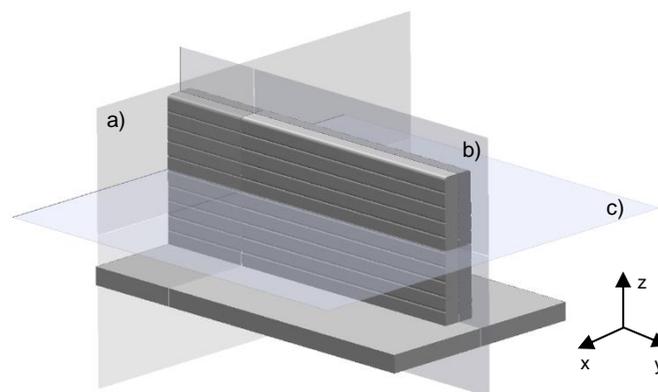
### 3.5 – Técnicas de caracterização

#### 3.5.1 – Produção e preparação de amostras

Para os diferentes métodos de caracterização das amostras, foram utilizadas diferentes preparações. Foram efetuadas observações óticas da microestrutura em 3 planos de orientação como mostra a Figura 3.6. Cada amostra foi cortada em fatias com aproximadamente 10 mm de espessura.

#### 3.5.2 – Caracterização geométrica

A qualidade da deposição foi avaliada pela ondulação superficial, largura e altura das camadas. Uma deposição com baixa ondulação superficial possui baixas variações de altura, o que demonstra ser benéfico *a posteriori* deposição de camadas ao manter uma distância de trabalho constante e precisão geométrica. As medições de largura, altura e ondulação foram efetuadas com o *ImageJ*, um *software* de processamento de imagem. A ondulação superficial foi medida através da distância máxima entre pico e vale do perfil de uma determinada área da parede.



**Figura 3.6** – Representação da preparação de amostras. a) Corte da amostra no plano yy. b) Corte da amostra no plano xx. c) Corte da amostra no plano zz.

### 3.5.3 – Microscopia ótica

Para observação microscópica as amostras foram cortadas com a serra de fita GBS 218 AutoCut e colocadas num disco de resina. Posteriormente, as amostras de ER316L foram lixadas (grão 180, 240, 320, 600, 800 e 1000), polidas com pasta abrasiva de diamante de 1  $\mu\text{m}$  e contrastadas com reagente Vilella, constituído por 1 g de ácido pícrico, 5 ml de ácido clorídrico e 100 ml de etanol. As amostras de AZ61A foram polidas com alumina de 1  $\mu\text{m}$  e o contrastante utilizado foi constituído por 5 g de ácido pícrico, 5 mL de ácido acético glacial, 10 mL de água purificada e 100 mL de etanol. As microestruturas foram examinadas e registadas com o microscópio Olympus CX40.

### 3.5.4 – Medições de microdureza

Foram realizadas medições de microdureza Vickers com o equipamento Mitutoyo HM – 112. Para as amostras produzidas em ER316L foram efetuadas medições em 3 zonas distintas ao longo de uma linha vertical com uma distância de 0,25 mm entre indentações (Figura 3.7 a)), aplicando uma carga de 5 N durante 10 segundos. Para as amostras de AZ61A foram efetuadas medições em 2 zonas distintas com 0,25 mm entre indentações aplicando uma carga de 3 N durante 10 segundos. Este teste permitiu analisar as variações de dureza ao longo da altura das amostras.

### 3.5.5 – Medição de temperatura com termografia

Para avaliar a evolução da taxa de arrefecimento durante a deposição de camadas com e sem vibração, foi registada a temperatura do material no ponto representado na Figura 3.7 b). Este registo foi efetuado em vídeo com a câmara infravermelha Fluke Ti400 com a gama de temperaturas configurada para um máximo de 1200  $^{\circ}\text{C}$ , com uma precisão de medição de  $\pm 2$   $^{\circ}\text{C}$  e uma taxa de atualização de 9 Hz. O valor de emissividade utilizado foi de 0.2, valor semelhante ao utilizado por Guoli Liang *et al.* [22]. Posteriormente os vídeos das deposições foram processados no *software* SmartView e todos os valores de temperatura foram guardados e representados em gráficos.

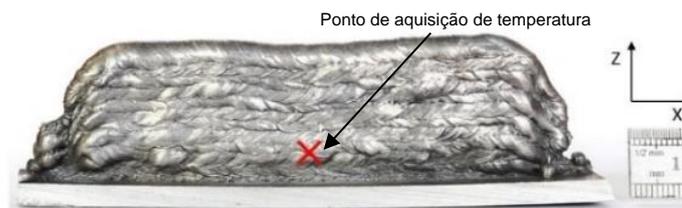


Figura 3.7 – Representação esquemática do ponto de aquisição de temperatura.

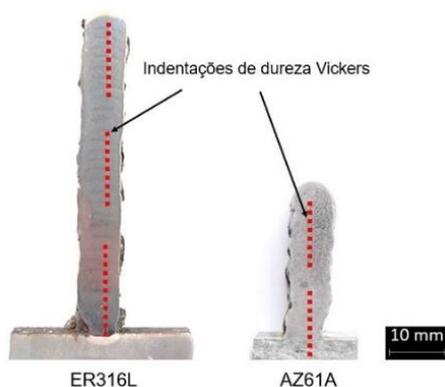


Figura 3.8 – Representação esquemática das indentações de dureza Vickers.

### 3.5.6 – Medição de condutividade elétrica

Para comparar as propriedades do material das amostras produzidas em magnésio com 0, 4 e 10 Hz de frequência, foi medida a condutividade elétrica com uma sonda de 4 pontos. As medições foram feitas ao longo da altura das amostras, começando no substrato. Foi utilizada uma sonda Jandel™ de 4 pontos lineares padrão com 0,635 mm de espaçamento de sonda e 40 μm de raio de ponta juntamente com uma *Source Measure Unit* (SMU), Keithley™ 2450.

### 3.5.7 – Captação de vídeo

Para avaliar o efeito da vibração mecânica no banho de fusão foi efetuado um registo de imagens a 1000 fps durante a deposição de camadas. Para isso foi utilizado um dispositivo desenvolvido no Laboratório de Tecnologias do DEMI da FCT NOVA que extingue o arco elétrico permitindo a observação do banho de fusão. Neste teste foi utilizada a câmara Sony Cyber-shot DSC-RX0 II.

### 3.5.8 – Aquisição de temperatura com termopares

Foram utilizados 2 termopares para medição da temperatura durante a deposição de uma camada com fio de AZ61A. Foi utilizado um módulo de entrada de temperatura *National Instruments* 9211. O termopar 1 foi posicionado a 22 mm do início da camada e o termopar 2 a 30 mm do final como encontra-se representado na Figura 3.9.

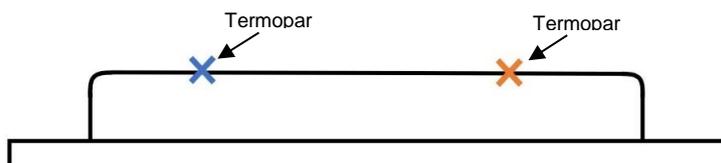


Figura 3.9 – Representação esquemática da posição dos termopares.



## **4 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

Foi desenvolvido um estudo com o objetivo de avaliar os efeitos dos parâmetros de vibração mecânica no processo WAAM. Foram depositadas quatro camadas com fio de ER316L e analisado o efeito da vibração na geometria e qualidade da parede. Foi observada a microestrutura das paredes produzidas com 30 camadas de ER316L e por último, foi avaliado o efeito da vibração com deposição de fio AZ61A para 2 tipos de vibração.

### **4.1 – Efeito da vibração na geometria da parede**

Foram realizados ensaios com o fio de ER316L para investigar o domínio de vibrações e amplitudes que seria adequado aprofundar quando a vibração é aplicada perpendicularmente à direção de deposição. Desse modo foram produzidas 9 amostras alterando apenas as variáveis: amplitude e frequência de vibração (Figura 4.1). Na Tabela 4.1 pode observar-se as diferentes combinações de frequências e amplitudes experimentados neste estudo. A amostra P0 foi produzida sem vibração mantendo todos os outros parâmetros servindo assim de referência. Na Tabela 4.2 são apresentados os valores dos parâmetros utilizados. Estes valores foram obtidos com base nos estudos realizados em deposição de ER316L no DEMI da FCT NOVA.

**Tabela 4.1** – Arranjos das amostras produzidas.

Freq. [Hz]	Amplitude de vibração [mm]		
	1	2	4
2	Ensaio P1	P4	P7
4	P2	P5	P8
10	P3	P6	P9

**Tabela 4.2** – Parâmetros do processo para ER316L

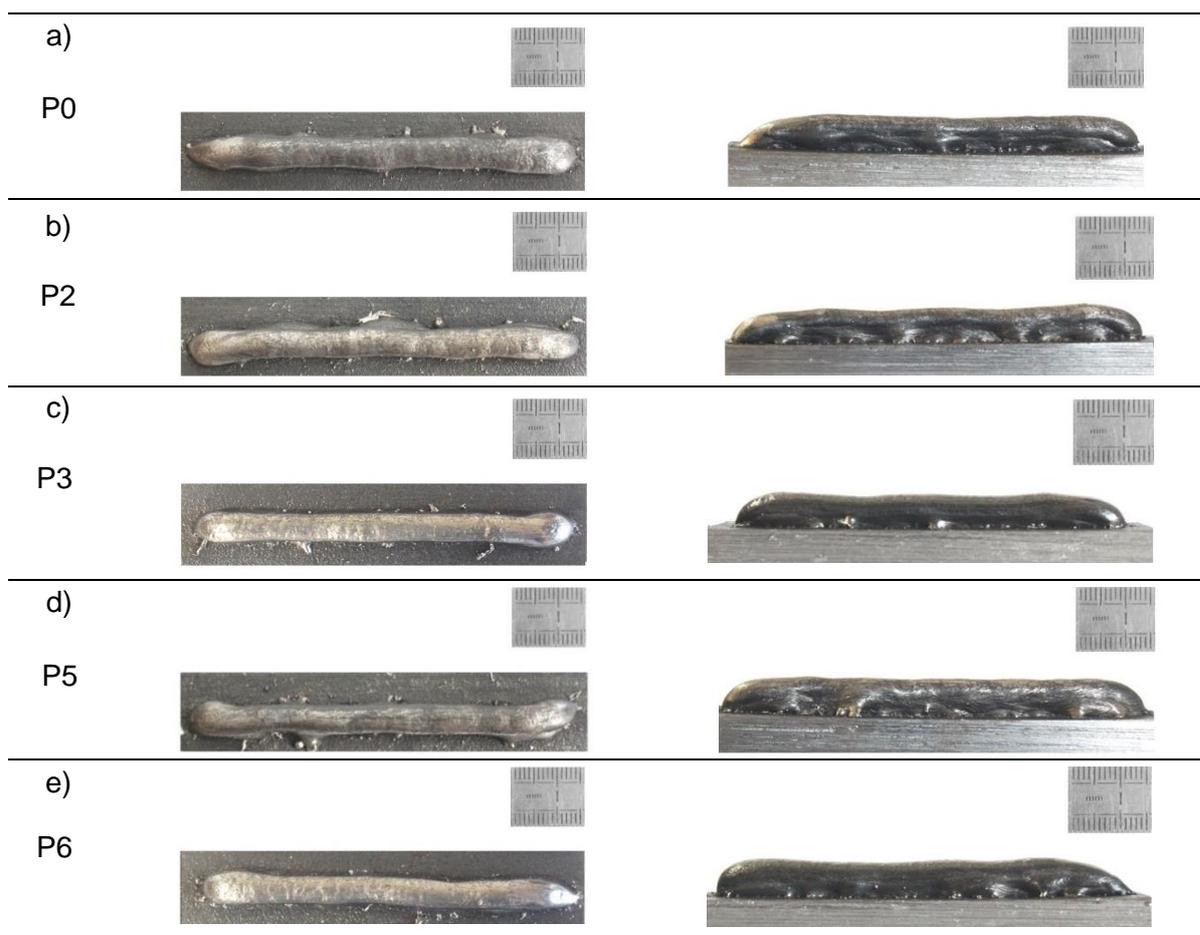
Nº de camadas	WFS [m/min]	TS [mm/min]	SGF [l/min]	U [V]	C [mm]
4	4	300	20	20	80

#### 4.1.1 – Efeito dos parâmetros de vibração na geometria

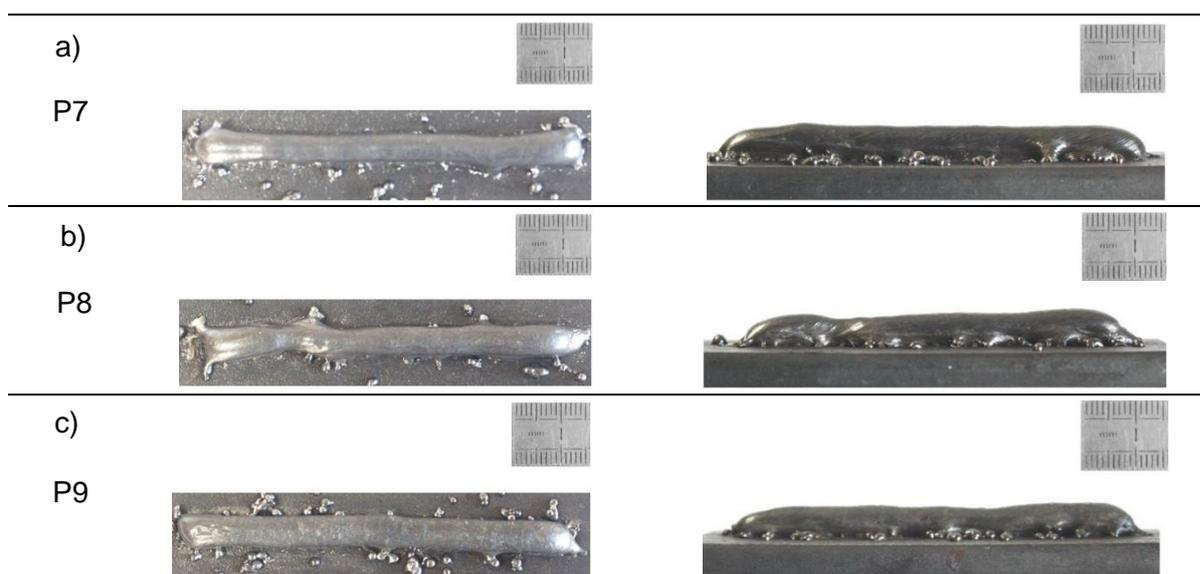
Os valores de largura e altura da amostra, ondulação, taxa de deposição e velocidade média de vibração estão apresentados na Tabela 4.3. Pode observar-se que tanto a frequência como a amplitude não afetam significativamente a altura e largura da parede. Sendo a amplitude inferior à largura da amostra P0, a vibração só atua no centro do cordão não perturbando as suas extremidades e não aumentando a sua largura. No entanto, com o aumento da amplitude de vibração para 4 mm, surge um aumento da formação de salpicos junto ao substrato como pode ser observado na Figura 4.2. Durante a deposição de material, o movimento das gotas é perturbado pela velocidade de vibração. Quanto maior a velocidade de vibração, maior é a quantidade de salpicos projetados para fora do banho de fusão e acumulados no substrato. A ondulação superficial parece diminuir com o aumento da frequência de vibração, no entanto, com a deposição de apenas 4 camadas qualquer conclusão sobre ondulação superficial carecerá de dados e será aprofundado posteriormente.

**Tabela 4.3** – Média de largura do cordão, altura da amostra, ondulação, taxa de deposição e velocidade média das amostras.

Nome da amostra	Largura [mm ± $\sigma$ ]	Altura [mm ± $\sigma$ ]	Ondulação [mm ± $\sigma$ ]	TD [cm <sup>3</sup> /h]	Velocidade Média [mm/s]
P0	7,14 ± 0,52	7,90 ± 0,25	0,33 ± 0,10	254,1	0
P2	7,08 ± 0,54	7,14 ± 0,30	0,23 ± 0,06	227,7	2
P3	6,51 ± 0,41	7,28 ± 0,24	0,12 ± 0,07	213,5	10
P5	6,99 ± 0,38	8,29 ± 0,45	0,15 ± 0,03	261,0	8
P6	6,83 ± 0,44	7,57 ± 0,28	0,21 ± 0,04	232,9	20
P7	6,39 ± 0,54	7,55 ± 0,21	0,14 ± 0,10	217,3	8
P9	6,80 ± 0,37	7,03 ± 0,29	0,21 ± 0,07	215,3	40



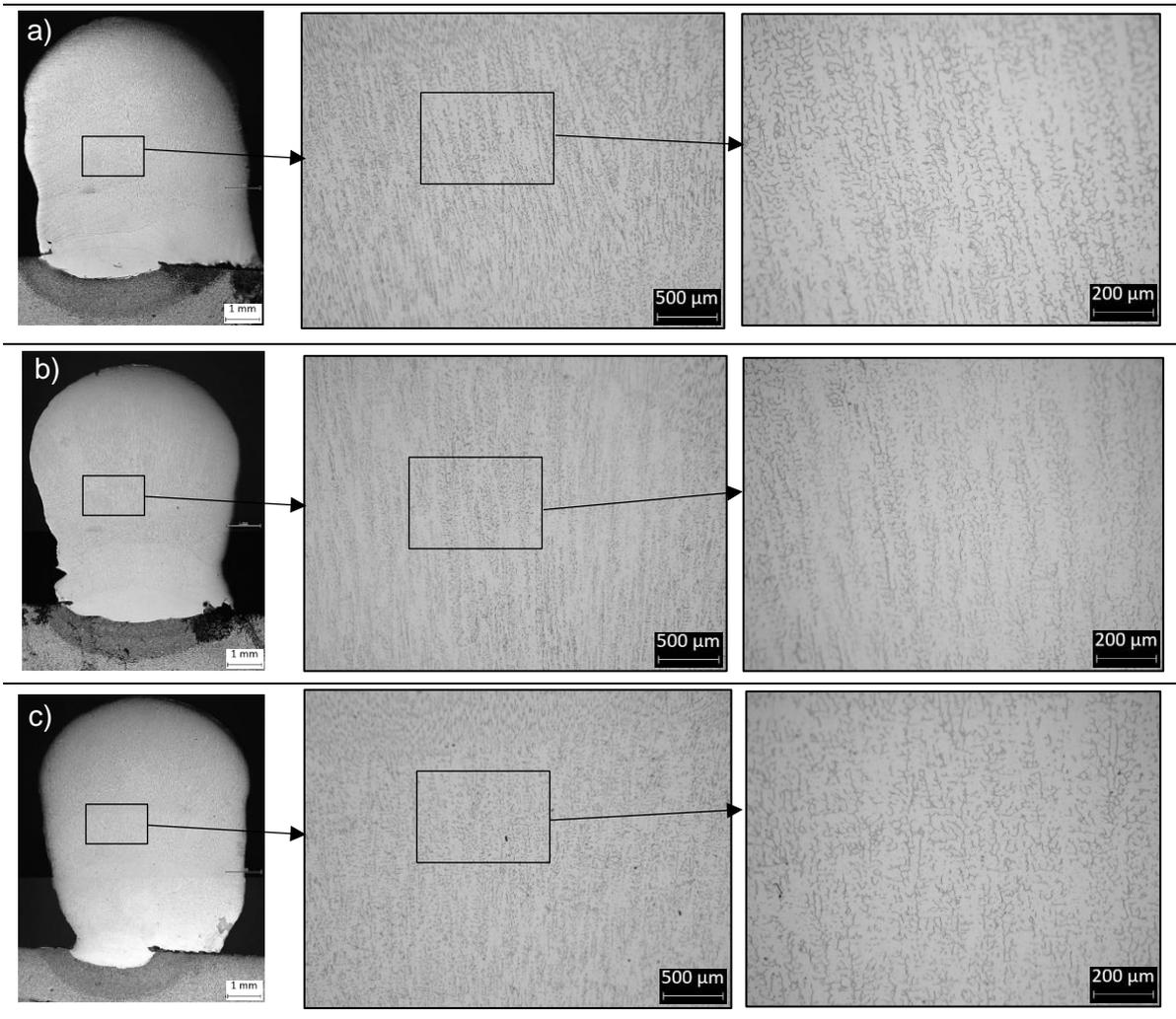
**Figura 4.1** – Amostras produzidas na Etapa 1. a) P0 - 0 Hz. b) P2 - 4 Hz 1 mm. c) P3 - 10 Hz 1 mm. d) P5 - 4 Hz 2 mm. e) P6 - 10 Hz 2 mm.



**Figura 4.2** – Amostras produzidas na Etapa 1. a) P7 - 2 Hz 4 mm. b) P8 - 4 Hz 4 mm c) P9 - 10 Hz 4 mm.

#### 4.1.2– Efeito dos parâmetros de vibração na microestrutura

De modo a avaliar em que medida a vibração afeta o material depositado durante o WAAM foi efetuada uma análise da microestrutura do material depositado. Foram cortadas, polidas e contrastadas as amostras P0, P3, P5 e P6. Como pode observar-se na Figura 4.3, é evidente a diferença no tamanho e orientação das dendrites à medida que a frequência de vibração aumenta. Na amostra P0 (Figura 4.3 a)) observa-se um padrão repetido de dendrites longas formadas durante a solidificação do banho de fusão que difere da amostra P6 (Figura 4.3 c)) onde as dendrites apresentam um padrão desorganizado e comprimento reduzido. Na amostra P5 (Figura 4.3 b)) as diferenças não são tão evidentes uma vez que as dendrites longas predominam ao longo da camada à semelhança da amostra P0.



**Figura 4.3** – Microestrutura das amostras produzidas. a) P0 – sem vibração. b) P5 - 4 Hz 2 mm c) P6 -10 Hz 2 mm.

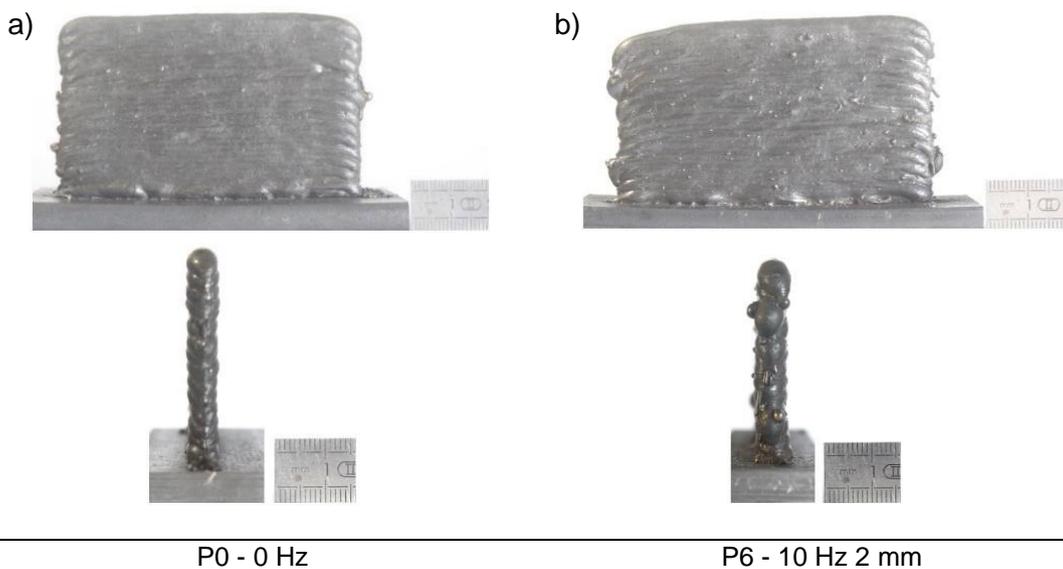
**Tabela 4.4** – Representação dos resultados obtidos na deposição de 4 camadas de ER316L.

Freq. [Hz]	Amplitude de vibração [mm]		
	1	2	4
2	Ensaio P1	P4	P7
4	P2	P5	P8
10	P3	P6	P9

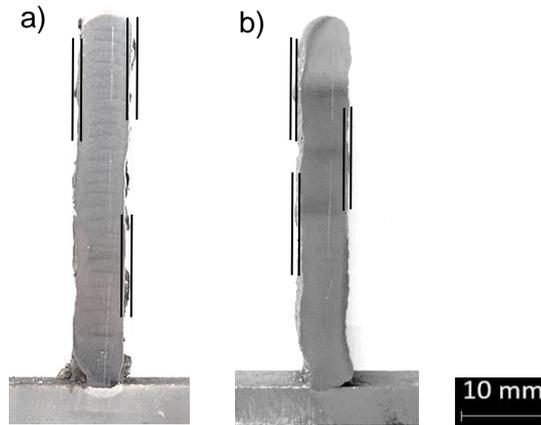
Na Tabela 4.4 estão representados os resultados obtidos. A amarelo e vermelho as amostras cujo estudo não foi aprofundado e a verde as amostras cujos parâmetros foram avaliados posteriormente. As amostras produzidas com 4 mm de amplitude de vibração apresentaram excesso de defeitos de fabrico e as amostras P1, P2, P4 e P5, produzidas a baixa frequência, não induziram diferenças significativas comparativamente à amostra P0. Representadas na Figura 4.1 c) e e), as amostras P3 e P6 apresentaram estabilidade na geometria e diferenças notórias na microestrutura comparativamente à amostra P0, no entanto sem diferenças consideráveis entre as amplitudes de 1 e 2 mm.

## 4.2 – Estudo da deposição de 30 camadas de ER316L

Após restringir a gama de frequências e amplitudes adequadas, foram produzidas amostras com 30 camadas mantendo os parâmetros da Tabela 4.2. Na Figura 4.5 a) e b) é apresentado o aspeto das amostras produzidas por WAAM sem e com vibração, respetivamente. A vibração não afetou significativamente a largura e altura da parede como pode ser observado na Tabela 4.5.



**Figura 4.4** – Vista do plano yy das amostras produzidas pelo processo WAAM. a) P0 - sem vibração. b) P6 - 10 Hz e 2 mm.



**Figura 4.5** – Amostras produzidas pelo processo WAAM. a) amostra sem vibração. b) amostra com vibração de 10 Hz e 2 mm de amplitude.

Apesar de no início e no final das deposições da amostra P6 existir maior irregularidade superficial, a ondulação das faces da parede sofreu uma diminuição percentual de 19% com a aplicação de vibração a 10Hz de frequência e 2 mm de amplitude. Na Figura 4.5 a) e b) é possível observar a diminuição da distância entre as linhas representativas dos picos e vales da amostra sem e com vibração, respetivamente.

**Tabela 4.5** – Média de largura do cordão, altura da amostra, ondulação, taxa de deposição e velocidade média das amostras.

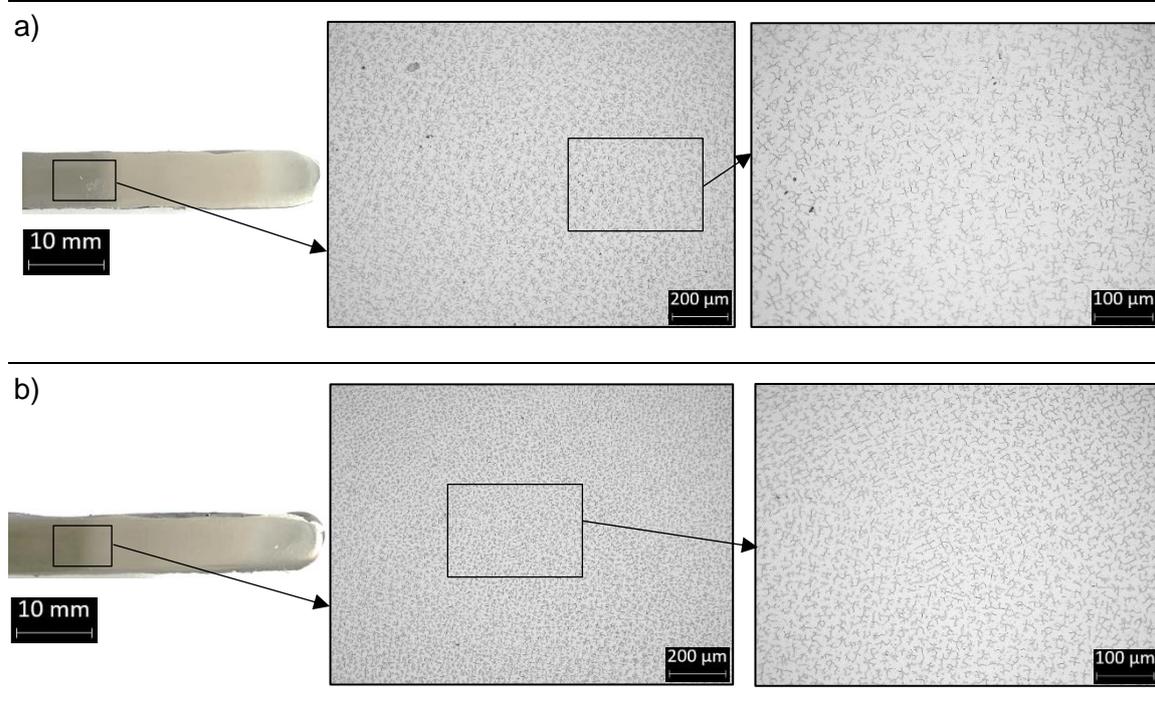
Nome da amostra	Largura [mm ± $\sigma$ ]	Altura [mm ± $\sigma$ ]	Ondulação [ $\mu\text{m}$ ± $\sigma$ ]	TD [Kg/h]	Velocidade Média [mm/s]
P0	6,69 ± 0,30	46,74 ± 0,75	517,6 ± 0,10	187,8	0
P6	6,45 ± 0,21	45,08 ± 1,26	418,0 ± 0,08	174,6	20

#### 4.2.1 – Microestrutura

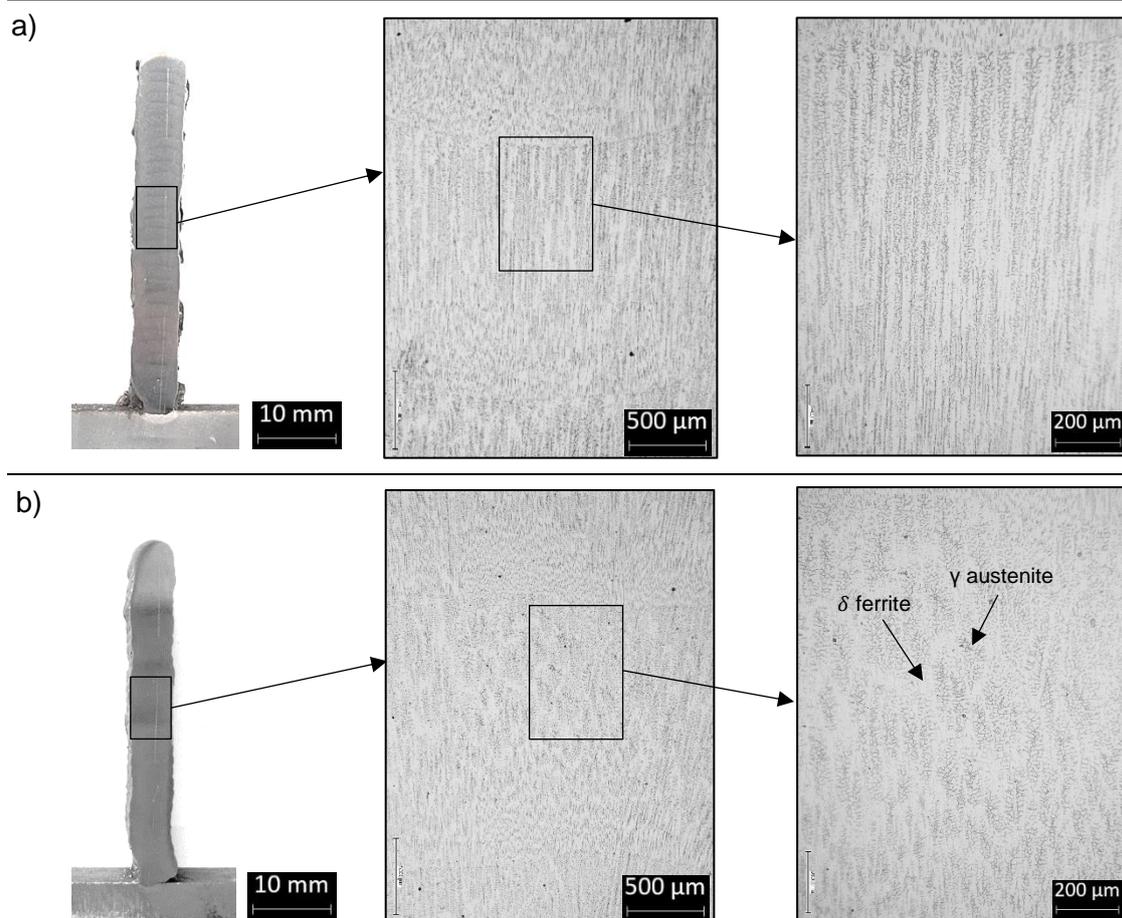
Após obter as micrografias das amostras P0 e P6, foi medido o número de dendrites existentes por unidade de área no plano zz (Figura 4.6) e o comprimento de dendrites no plano yy (Figura 4.7). A metodologia foi repetida 5 vezes para obter a média e desvio para cada amostra. Constatou-se que a aplicação de vibração durante o processo contribuiu para o aumento de dendrites por unidade de área, resultando numa microestrutura mais refinada, com o comprimento das dendrites reduzido [14]. Sem a vibração do arco elétrico observa-se dendrites longas ao longo das camadas depositadas (Figura 4.7 e 4.8), com vibração do arco ocorre uma desorganização e quebra das dendrites que é mais evidente para valores mais elevados de frequência.

A quebra de dendrites e refinamento de grão devido à frequência de vibração pode ser justificada com: (1) a fusão das ramificações das dendrites provocada pelo reaquecimento induzido pela vibração. (2) a turbulência no líquido. (3) a redução do gradiente térmico que reduz o crescimento das dendrites e contribui para o crescimento de grãos equiaxiais [21]. Quando a vibração orienta as ramificações das dendrites, a fusão interdendrítica bloqueia o movimento das dendrites e provoca tensões de flexão nas ramificações das dendrites. Quanto maior a aceleração, maiores são as forças de flexão e, caso as tensões excedam um certo limite, dá-se a quebra das dendrites e o aumento de nucleação que refina a microestrutura [19,20].

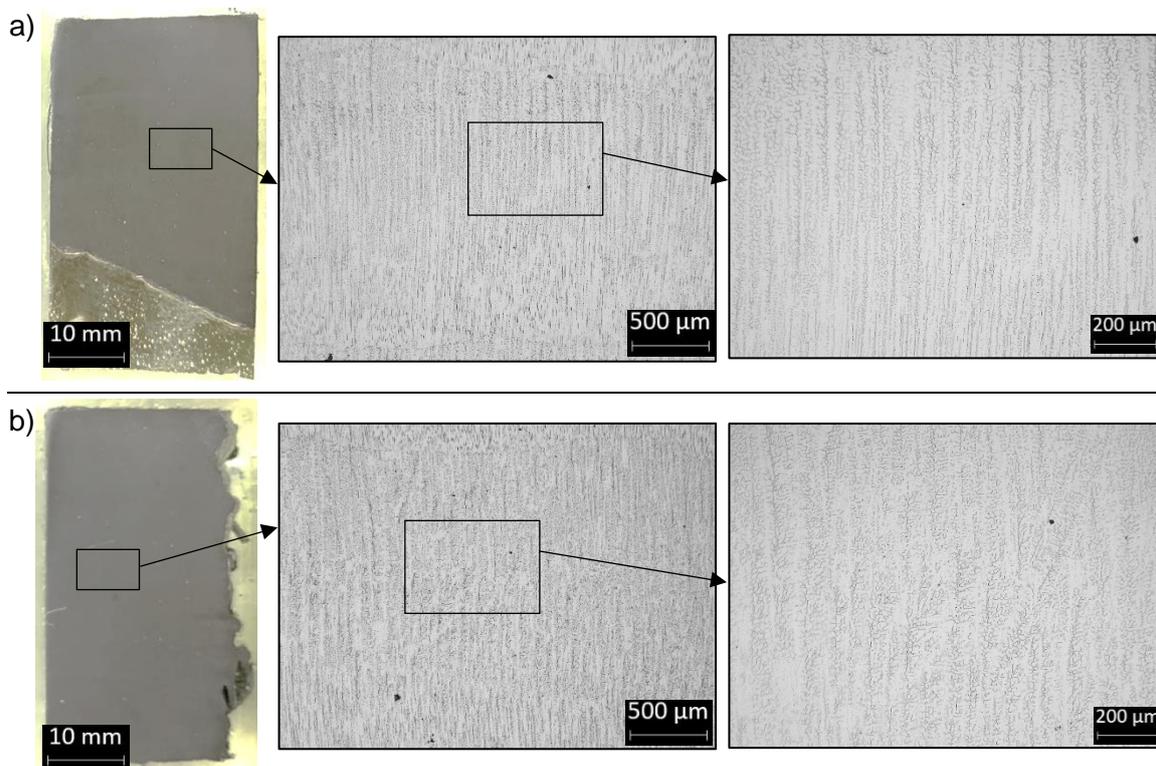
A vibração da tocha com frequência 10 Hz e amplitude 2 mm, provocou o aumento de 47% na nucleação e a diminuição de 44% no comprimento das dendrites comparativamente com a amostra sem vibração (Figura 4.9). Com o aumento de nucleação o crescimento de ramificações nas dendrites é estrangulado, contribuindo para a formação de uma microestrutura mais refinada [20]. Aumentando a amplitude de vibração é expectável que haja maior perturbação na solidificação do banho de fusão contribuindo para o aumento do refinamento de grão [21].



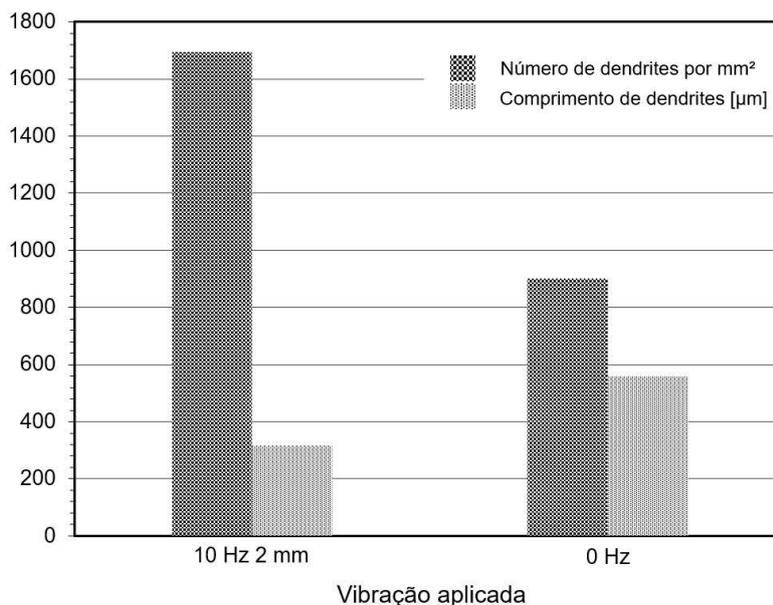
**Figura 4.6** – Vista do plano zz das amostras produzidas pelo processo WAAM. a) amostra sem vibração. b) amostra com vibração de 10 Hz e 2 mm de amplitude.



**Figura 4.7** – Vista do plano yy das amostras produzidas pelo processo WAAM. a) amostra sem vibração. b) amostra com vibração de 10 Hz e 2 mm de amplitude.



**Figura 4.8** – Vista do plano xx das amostras produzidas pelo processo WAAM. a) amostra sem vibração. b) amostra com vibração de 10 Hz e 2 mm de amplitude.



**Figura 4.9** – Número de dendrites por mm<sup>2</sup> e comprimento de dendrites das amostras produzidas sem e com vibração de 10 Hz e 2 mm.

Durante a deposição das paredes com aço inoxidável austenítico 316L, a temperatura de trabalho é cerca de 800-1200°C [23]. Como é possível observar nas micrografias (Figura 4.7), os espaços interdendríticos compostos por  $\delta$  ferrite e as dendrites de  $\gamma$  austenite são o resultado das altas taxas de arrefecimento que limitam a transformação da fase  $\delta$  para  $\gamma$  [24].

#### 4.2.2 – Medições de microdureza

Na Figura 4.10 pode observar-se a distribuição das microdurezas em 3 zonas distintas (junto ao substrato, na zona intermédia e no topo da secção da parede) das amostras P0 e P6. Para a amostra P0, os valores de dureza variam entre 188,6 e 173,4 HV na primeira zona, na segunda zona variam entre 174,3 e 174,6 HV e na terceira zona entre 180,0 e 175,2 HV. Para a amostra P6 os valores de dureza variam de 184 a 175,5 HV na primeira zona, de 169 a 161,6 HV na segunda zona e de 165,7 a 169,7 HV na terceira zona. Constatou-se que para as duas amostras o reaquecimento, provocado pela deposição sucessiva de camadas, favorece a formação de grãos de maior dimensão, levando à diminuição da dureza ao longo da altura da parede. No entanto, para a amostra P6, a tendência de valores demonstrou ser 5% inferior relativamente à amostra P0, o que parece indicar que a aplicação de vibração pode contribuir para a diminuição do gradiente de temperatura [14]. Este fenómeno será aprofundado posteriormente quando a medição de temperatura com termografia for analisada.

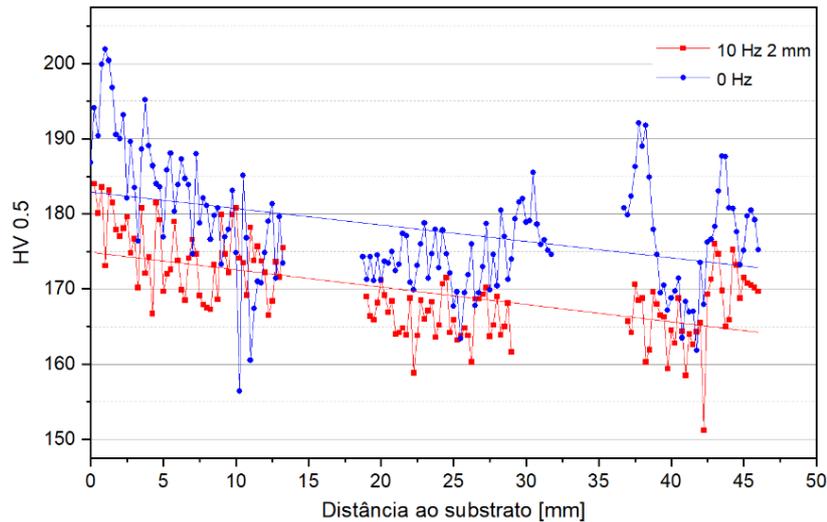


Figura 4.10 – Perfil de microdurezas ao longo da altura das amostras P0 e P6

### 4.3 – Estudo da deposição de 12 camadas com AZ61A

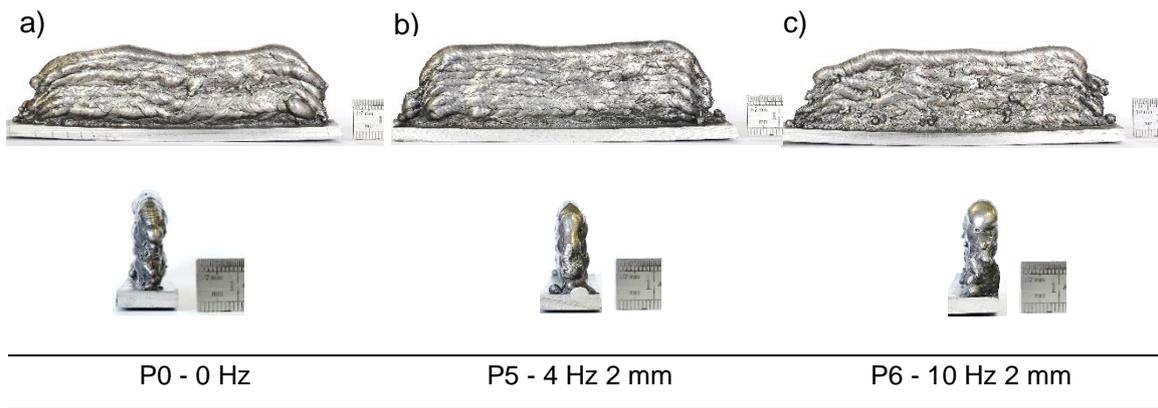
Devido à escassez de literatura na deposição de AZ61A com o processo WAAM, os parâmetros de soldadura foram ajustados e otimizados iterativamente.

Na Tabela 4.6 pode observar-se os valores dos parâmetros utilizados. Foram produzidas amostras com os parâmetros P0, P5 e P6. Como foi constatado na deposição de ER316L, a aplicação de 1 e 2 mm de amplitude não apresentou diferenças significativas nem na geometria, nem na microestrutura, logo optou-se por aplicar 2 mm com vista a provocar maior oscilação no banho de fusão. Na Figura 4.11 é apresentado o aspeto das amostras produzidas com fio AZ61A pelo processo WAAM.

A frequência de vibração tem um efeito significativo na ondulação das amostras (Tabela 4.7). Na superfície de topo das camadas depositadas sem vibração são observadas ondulações periódicas grosseiras e com o aumento da frequência de vibração até 10 Hz, as ondulações periódicas tornaram-se 20% menores (Figura 4.12).

Tabela 4.6 – Parâmetros do processo para AZ61A.

Nº de camadas	WFS [mm/min]	TS [mm/min]	SGF [l/min]	C [mm]
12	3,0	450	20	100

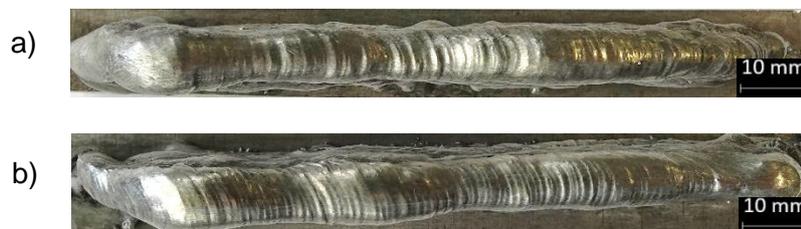


**Figura 4.11** – Amostras produzidas pelo processo WAAM com AZ61A. a) amostra sem vibração. b) amostra com vibração de 4 Hz e 2 mm de amplitude. c) amostra com vibração de 10 Hz e 2 mm de amplitude.

O fio é fundido no período de corrente de pico e a gota fundida adere ao fio no período de corrente base devido à tensão superficial. Quando a corrente base passa a corrente de pico, a gota fundida anteriormente cai no substrato ou nas camadas de deposição anteriores. Portanto, para frequências de vibração superiores, há menos tempo para a gota aumentar de tamanho, resultando em ondulações menores [25].

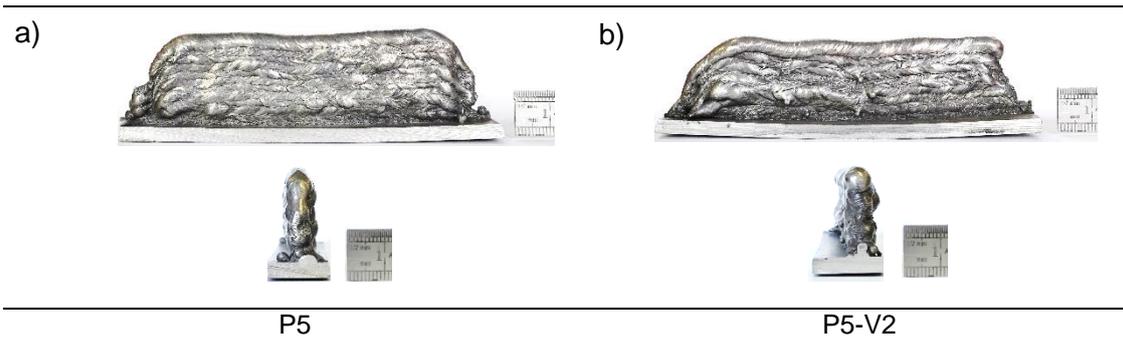
**Tabela 4.7** – Média de largura do cordão, altura da amostra, ondulação, taxa de deposição e velocidade média das amostras.

Nome da amostra	Largura [mm ± σ]	Altura [mm ± σ]	Ondulação [μm ± σ]	TD [Kg/h]	Velocidade Média [mm/s]
P0	9,87 ± 0,59	25,84 ± 1,10	814,2 ± 0,2	382,9	0
P5	9,31 ± 1,02	26,96 ± 1,17	764,5 ± 0,2	376,9	8
P6	9,27 ± 0,71	25,68 ± 0,65	652,2 ± 0,2	357,4	10



**Figura 4.12** – Ondulações periódicas da superfície. a) Amostra P0 (0 Hz). b) Amostra P6 (10 Hz 2 mm).

Para avaliar os efeitos do sentido da vibração na geometria, foi produzida a amostra P5-V2. A vibração foi efetuada no sentido coincidente com a direção de deposição mantendo todos os restantes parâmetros da amostra P5. Como pode observar-se na Tabela 4.8, as amostras produzidas com dois tipos de vibração nas mesmas condições de frequência e amplitude apresentaram valores de altura e largura semelhantes, no entanto houve um aumento da ondulação periódica superficial de topo como pode observar-se na Figura 4.13.



**Figura 4.13** – Amostras produzidas pelo processo WAAM com AZ61A. a) amostra com vibração de 4 Hz e 2 mm de vibração perpendicular. b) amostra com vibração de 4 Hz e 2 mm de vibração coincidente.

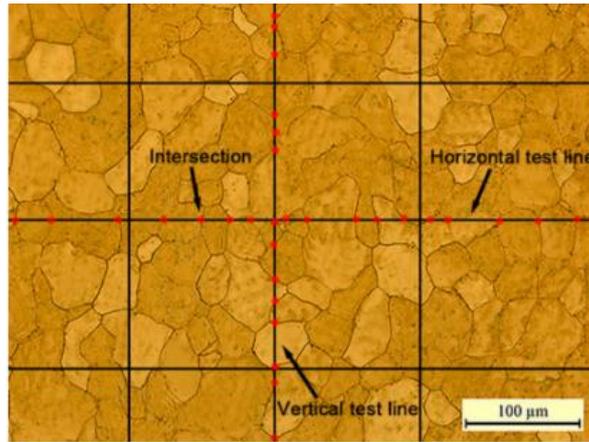
**Tabela 4.8** – Média de largura do cordão, altura da amostra, ondulação, taxa de deposição e velocidade média das amostras P5 e P5-V2.

Nome da amostra	Largura [mm ± σ]	Altura [mm ± σ]	Ondulação [μm ± σ]	TD [Kg/h]	Velocidade Média [mm/s]
P5	9,31 ± 1,02	26,96 ± 1,17	764,5 ± 0,2	376,9	8
P5-V2	9,52 ± 0,70	25,58 ± 0,65	832,9 ± 0,2	265,6	8

### 4.3.1 – Microestrutura

Após obter as micrografias das amostras P0, P5 e P6, que se encontram representadas na Figura 4.16, utilizou-se o método de interseção para medir o tamanho de grão e o rácio de forma. Primeiro foram colocadas 3 linhas na direção vertical e horizontal da micrografia igualmente espaçadas (Figura 4.14). De seguida foram contadas todas as interseções. A contagem vale 1 para cada interseção, 1 para cada interseção tangencial, 0.5 quando o fim de uma linha acabar exatamente na fronteira do grão e 1.5 quando a interseção ocorre num ponto triplo. Posteriormente, o tamanho do grão foi obtido pela Equação 4.1 [25].

$$d = \frac{L}{N} \quad (4.1)$$



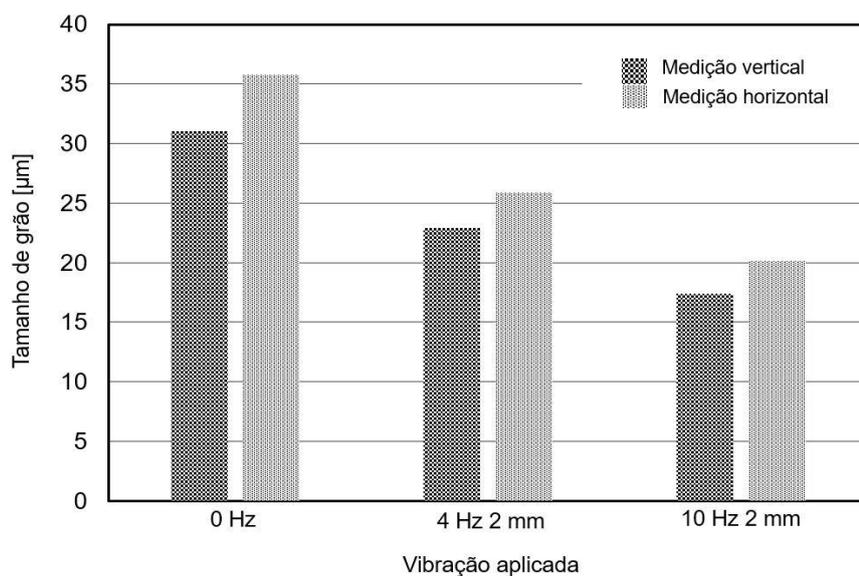
**Figura 4.14** – Representação esquemática do método de interseção [24].

Onde  $d$  [ $\mu\text{m}$ ] é o tamanho de grão,  $L$  [ $\mu\text{m}$ ] o comprimento da linha de teste e  $N$  o número de interseções. Por último, o método foi repetido 3 vezes para cada amostra e obtidas as médias do tamanho vertical e horizontal do grão. A diagonal das medidas verticais e horizontais corresponde ao tamanho de grão. O rácio de forma de grão foi definido pela divisão do comprimento vertical pelo comprimento horizontal do grão que, se for diferente de 1, reflete a anisotropia do material.

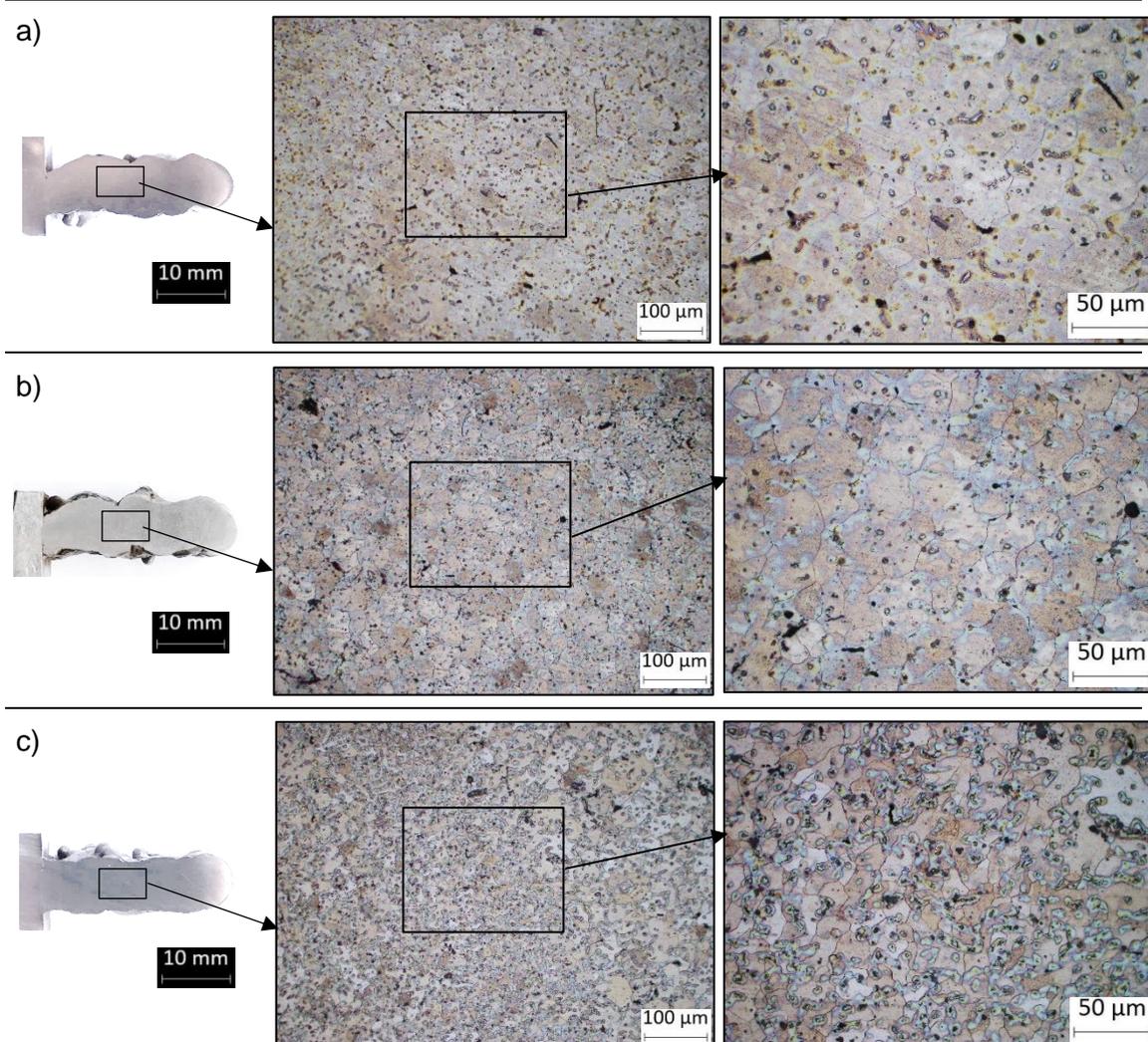
Na Tabela 4.9 apresenta-se o tamanho, medidas verticais, horizontais e os rácios de forma do grão das amostras P0, P5 e P6. À semelhança da deposição de ER316L, com o aumento da frequência de vibração, o refinamento de grão é mais evidente. A amostra P6 apresentou a maior diminuição do tamanho de grão com uma diminuição de 44% (Figura 4.15). Em todas as amostras o rácio de forma demonstrou ser próximo de 1, no entanto o valor horizontal superou ligeiramente o vertical. Associando este facto à geometria das paredes, o grão é mais alongado na direção de altura da amostra e mais estreito na largura da peça. Isto pode contribuir para maior resistência à tração em provetes longitudinais comparativamente com provetes normais.

**Tabela 4.9** – Tamanho, medidas verticais, horizontais e rácio de forma dos grãos das amostras produzidas sem e com vibração no plano yy.

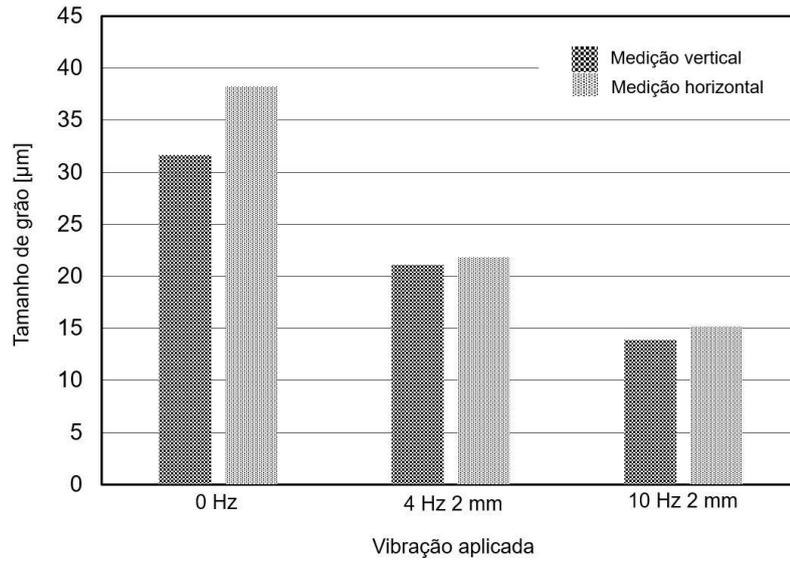
Nome da amostra	Tamanho de grão [ $\mu\text{m}$ ]	Medida vertical [ $\mu\text{m}$ ]	Medida horizontal [ $\mu\text{m}$ ]	Rácio [ $\mu\text{m}$ ]
P0 (0 Hz)	47,34	31	35,78	0,87
P5 (4 Hz 2 mm)	34,56	22,92	25,86	0,89
P6 (10 Hz 2 mm)	26,61	17,38	20,15	0,86



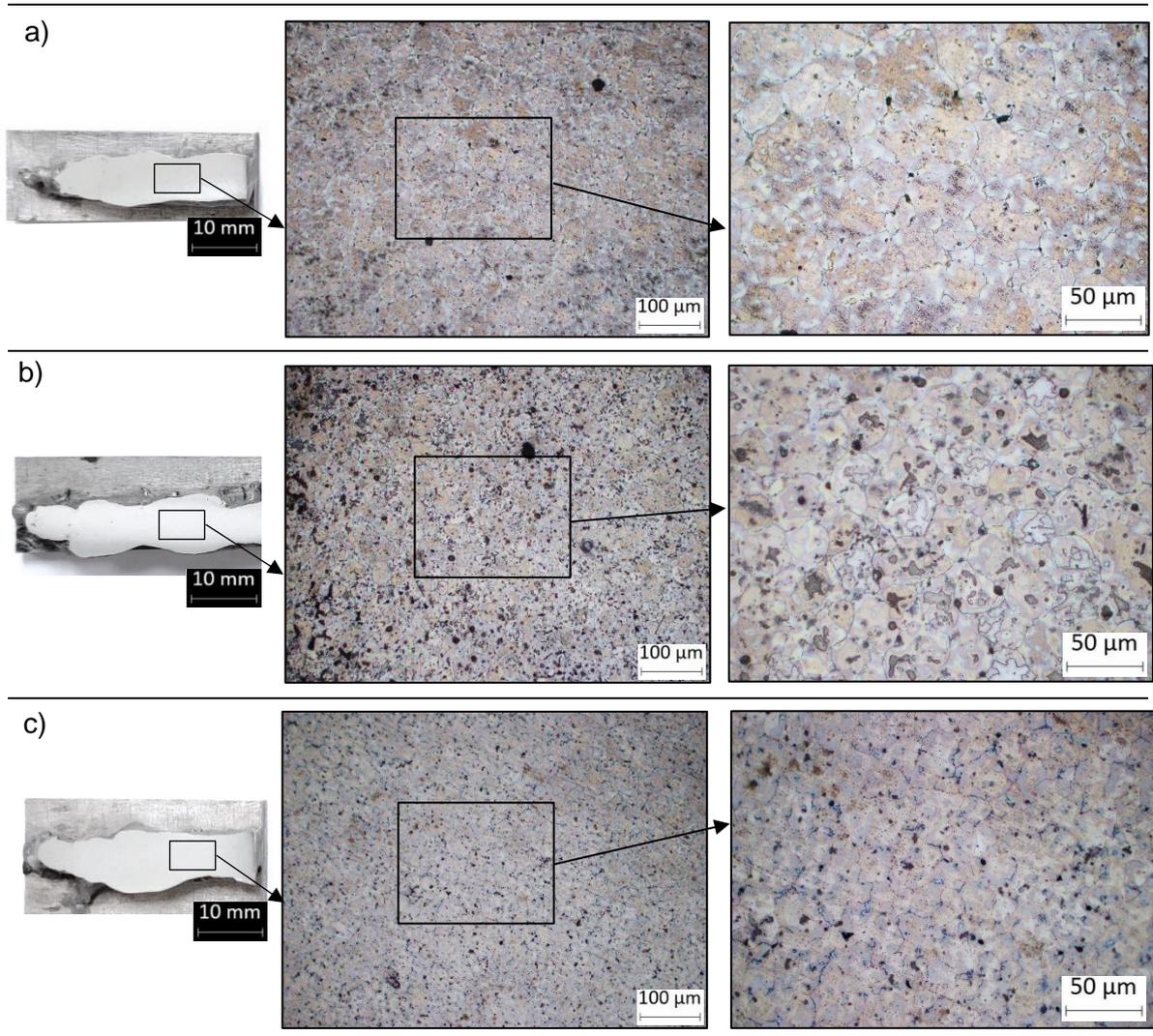
**Figura 4.15** – Tamanho vertical e horizontal de grão no plano yy das amostras produzidas sem e com vibração.



**Figura 4.16** – Vista do plano yy das amostras produzidas pelo processo WAAM. a) amostra sem vibração. b) amostra com vibração de 4 Hz e 2 mm. c) amostra com vibração de 10 Hz e 2 mm de amplitude.



**Figura 4.17** - Tamanho vertical e horizontal de grão da no plano zz das amostras produzidas sem e com vibração.

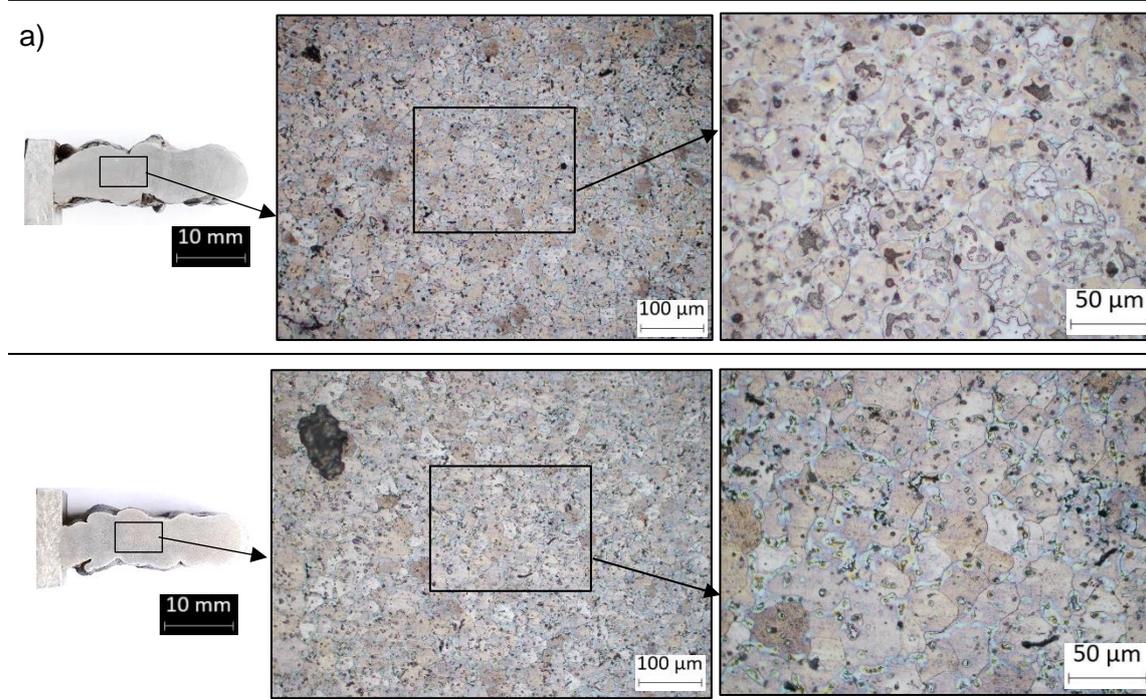


**Figura 4.18** – Vista do plano zz das amostras produzidas pelo processo WAAM. a) amostra sem vibração. b) amostra com vibração de 4 Hz e 2 mm. c) amostra com vibração de 10 Hz e 2 mm de amplitude.

**Tabela 4.10** – Tamanho, medidas verticais, horizontais e rácio de forma dos grãos das amostras produzidas sem e com vibração no plano zz.

Nome da amostra	Tamanho de grão [μm]	Medida vertical [μm]	Medida horizontal [μm]	Rácio [μm]
P0 (0 Hz)	49,64	31,67	38,22	0,83
P5 (4 Hz 2 mm)	30,39	21,14	21,87	0,97
P6 (10 Hz 2 mm)	20,57	13,87	15,19	0,9

Para confirmar os resultados obtidos anteriormente, foi efetuada a medição do tamanho de grão nas micrografias no plano zz (Figura 4.18). Constatou-se novamente que a amostra P6 apresentou a maior diminuição do tamanho de grão, com uma diminuição de 59%. Como pode observar-se na Figura 4.17, sem vibração no processo o tamanho de grão é cerca de 49,64 μm, a 4 Hz diminuiu para 30,39 μm e a 10 Hz diminuiu para 20,57 μm. O rácio de forma obtido nas amostras com vibração ficou mais próximo de 1, pelo que a aplicação de vibração poderá contribuir para reduzir a anisotropia do material. O tamanho de grão, medidas verticais, horizontais e rácios de forma encontram-se representados na Tabela 4.10.



**Figura 4.19** – Vista do plano yy das amostras produzidas. a) amostra com vibração de 4 Hz e 2 mm de vibração perpendicular e b) amostra com vibração de 4 Hz e 2 mm de vibração coincidente.

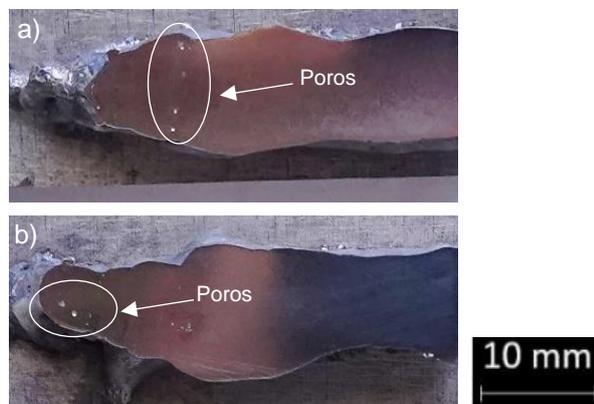
**Tabela 4.11** – Tamanho e medidas verticais, horizontais e rácio de forma dos grãos das amostras P5 e P5-V2 no plano yy.

Nome da amostra	Tamanho de grão [μm]	Medida vertical [μm]	Medida horizontal [μm]	Rácio [μm]
P5	34,56	22,92	25,86	0,89
P5-V2	34,83	23,78	25,45	0,93

Foi efetuada a medição do tamanho de grão da amostra P5 V2. Na Figura 4.19 estão representadas as micrografias das amostras com os dois movimentos de vibração. Foi verificado que na aplicação de vibração coincidente com a direção de deposição o tamanho de grão permaneceu constante comparativamente com o tamanho de grão da amostra P5 anteriormente medida. O grão da mostra P5 V2 apresentou um comprimento vertical de 24,78 μm e horizontal de 25,45 μm, que corresponde a um rácio de forma de 0,93 (Tabela 4.11).

Não é evidente a existência de fissuras ou falta de fusão na parede depositada ou na interface do substrato com a parede, no entanto, foram encontrados poros na extremidade das paredes das amostras P0 e P6 como se pode observar na Figura 4.20.

Para a frequência de vibração de 10 Hz o reaquecimento induzido pela vibração durante a solidificação permitiu refundir e fragmentar as dendrites provocando o refinamento do grão de AZ61A. Para vibrações inferiores a 10 Hz a vibração não foi eficaz no refinamento de grão. Como será aprofundado no subcapítulo seguinte, sem oscilação do arco a temperatura do banho de fusão diminui continuamente durante o arrefecimento enquanto que, com oscilação a temperatura tem crescimentos periódicos durante o arrefecimento [21].



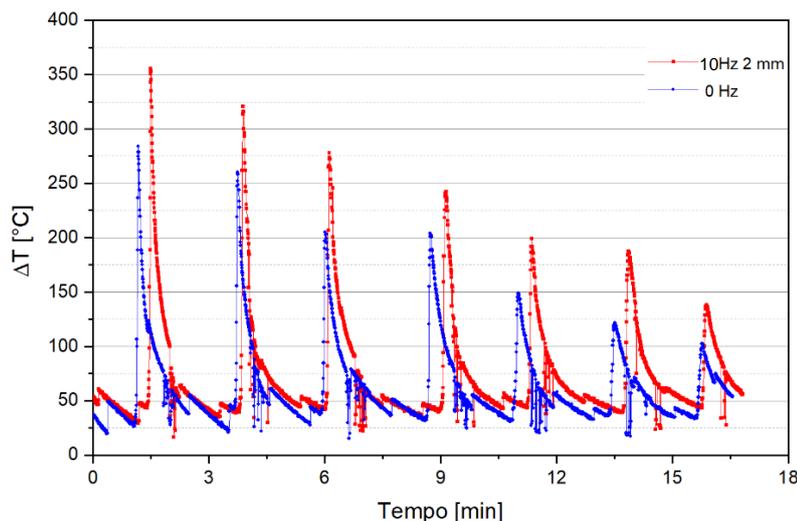
**Figura 4.20** – Presença de poros das amostras. a) P0 (0 Hz) e b) P6 (10 Hz 2 mm).

### 4.3.2 – Medição de temperatura com termografia

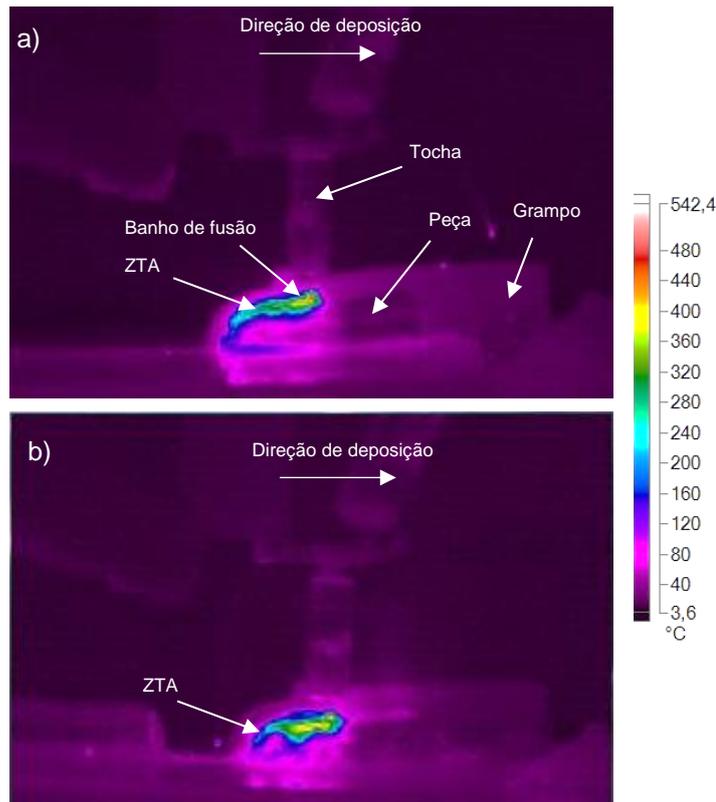
O substrato facilita a dissipação de calor por condução nas camadas iniciais. À medida que o número de camadas aumenta, a dissipação de calor é dificultada afetando as taxas de arrefecimento e os ciclos térmicos. Para avaliar a taxa de arrefecimento ao longo das deposições com e sem vibração, foram registadas as temperaturas da 3ª à 10ª camada durante a produção das amostras P0 e P6. Na Figura 4.21 é visível o aumento da temperatura dos ciclos térmicos com a aplicação de vibração, resultando numa diminuição da taxa de arrefecimento e gradiente térmico.

No processo WAAM a taxa de arrefecimento diminui de baixo para cima numa camada depositada. Isto promove uma microestrutura mais fina na parte inferior, devido ao tempo insuficiente para formar dendrites com braços secundários e uma microestrutura mais grossa no topo da camada [24], no entanto o topo de cada camada é refinada pela camada subsequente. De modo a entender como é que a frequência de vibração pode afetar o gradiente térmico, é necessário entender conceitos como o pico e base da corrente.

Durante a deposição, o pico de corrente fornece calor para fundir o fio, enquanto a corrente base mantém o arco. Durante a corrente base, a entrada de calor é reduzida repentinamente, portanto, a taxa de arrefecimento do banho de fusão é alta. Quando é aplicada frequência de vibração, a entrada de calor total permanece constante, contudo, com o aumento da frequência, a duração da corrente de base torna-se mais curta e o tempo para dissipação de calor é reduzido resultando numa entrada de calor efetiva maior, com temperaturas mais elevadas e taxas de arrefecimento menores [21].



**Figura 4.21** – Sequência de ciclos térmicos obtidos durante a deposição das amostras P0 (0 Hz) e P6 (10 Hz 2 mm).



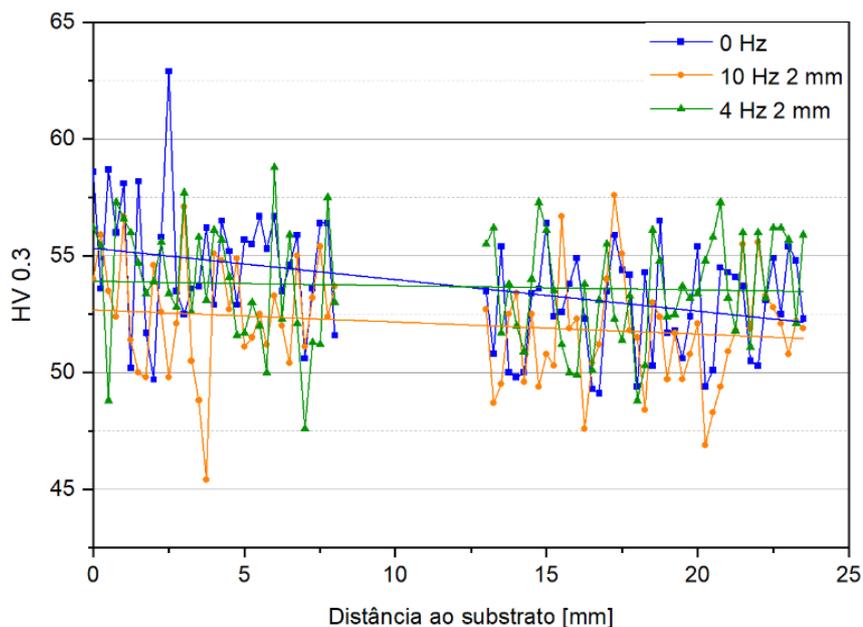
**Figura 4.22** – Comparação entre ZTA das amostras: a) P0 (0 Hz) e b) P6 (10 Hz 2 mm).

A diminuição do gradiente térmico pode levar à nucleação heterogénea onde a formação de novos grãos equiaxiais bloqueia a formação de grãos colunares durante a solidificação refinando a microestrutura, conforme ilustrado na Figura 4.16 c) [24,26]. A diminuição do gradiente térmico também pode ser justificada por crescimentos periódicos da temperatura durante o arrefecimento provocado pela vibração resultando num aumento da temperatura de pré-aquecimento [23]. Uma vez que a taxa de arrefecimento e gradiente térmico são proporcionais a  $(T - T_0)^3$ , diminuem com o aumento da temperatura de pré-aquecimento,  $T_0$ . Embora a parede não seja pré-aquecida na sua totalidade, é localmente pré-aquecida a temperaturas muito altas, perto do ponto de fusão [21]. A Figura 4.22 mostra a área da ZTA durante a deposição da última camada das amostras P0 e P6 no mesmo instante e utilizando a mesma escala de temperatura. Constatou-se que a aplicação de vibração contribui para o aumento da ZTA.

### 4.3.3 – Medições de microdureza

Na Figura 4.23 pode observar-se a distribuição das microdurezas em 2 zonas distintas (junto ao substrato e no topo da secção da parede) das amostras P0, P5 e P6. Para a amostra P0, os valores de dureza variam entre 58,6 e 51,6 HV na primeira zona e na segunda zona variam entre 53,5 e 52,3 HV. Para a amostra P5 os valores de dureza variam de 56,2 a 53 HV na primeira zona e de 51,7 a 52,1 HV na segunda zona. Por último, na amostra P6, os valores na primeira zona variam de 54 a 53,7 e na segunda de 52,7 a 51,9. À semelhança da deposição de ER316L, observou-se uma diminuição da dureza ao longo da altura das paredes, no entanto, com o aumento de vibração a tendência das durezas diminuiu apenas 3% demonstrando que a dureza é independente da frequência de vibração.

Após comparar as microdurezas das amostras produzidas com diferentes frequências de vibração, comparou-se a variação do sentido da vibração aplicando a mesma frequência. Assim obteve-se a Figura 4.24 onde, a verde estão representadas as durezas da amostra com vibração perpendicular à direção de deposição e a vermelho as durezas da amostra com vibração coincidente com a direção de deposição. Para a nova amostra os valores de dureza variam de 52,7 a 49,6 na primeira zona e 50,8 a 48,5 na segunda zona. Constatou-se que o segundo tipo de vibração contribuiu para a diminuição da dureza em apenas 1% pelo que pode ser desprezada.



**Figura 4.23** – Perfil de microdurezas ao longo da altura das amostras P0 (0 Hz), P5 (4 Hz 2 mm) e P6 (10 Hz 2 mm).

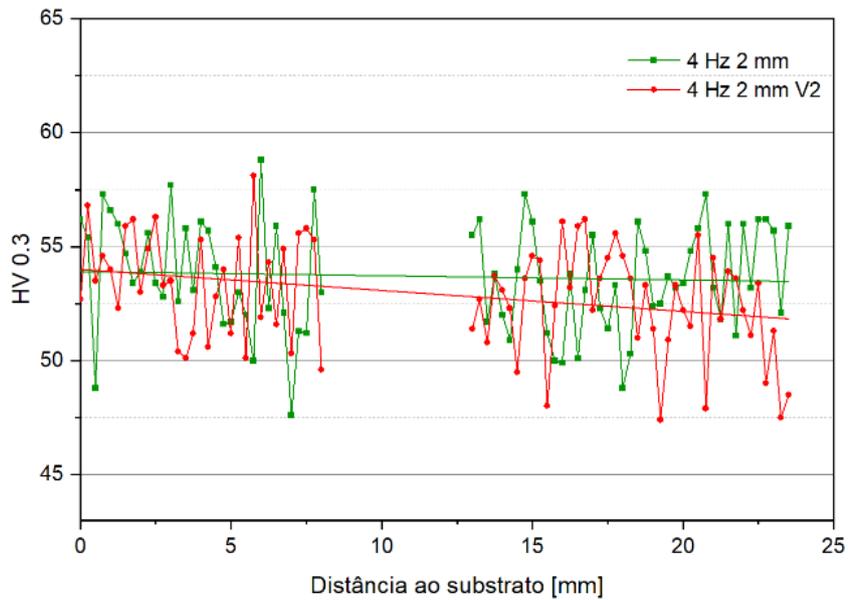


Figura 4.24 – Perfil de microdurezas ao longo da altura das amostras P5, P5-V2.

#### 4.3.4 – Medição de condutividade elétrica

Na Figura 4.25 estão representados os perfis de condutividade das amostras P0, P5 e P6. Para as amostras P0, P5 e P6 a média de valores registados foi 12,56, 12,81 e 12,72 %IACS, respetivamente. Assim, pode afirmar-se que, à semelhança da dureza, a condutividade eléctrica não varia significativamente com a aplicação de vibração durante o processo. A redução do tamanho de grão não é suficiente para provocar a diminuição da condutividade elétrica nas amostras produzidas com AZ61A.

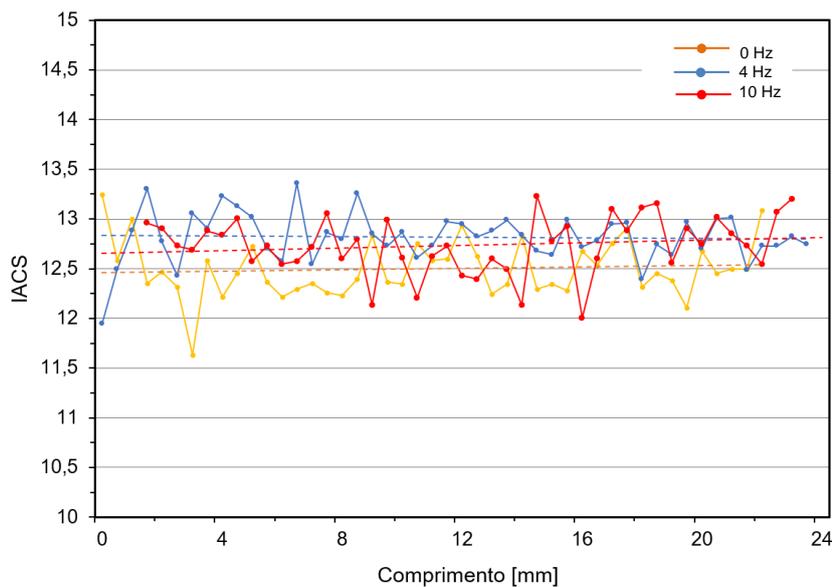
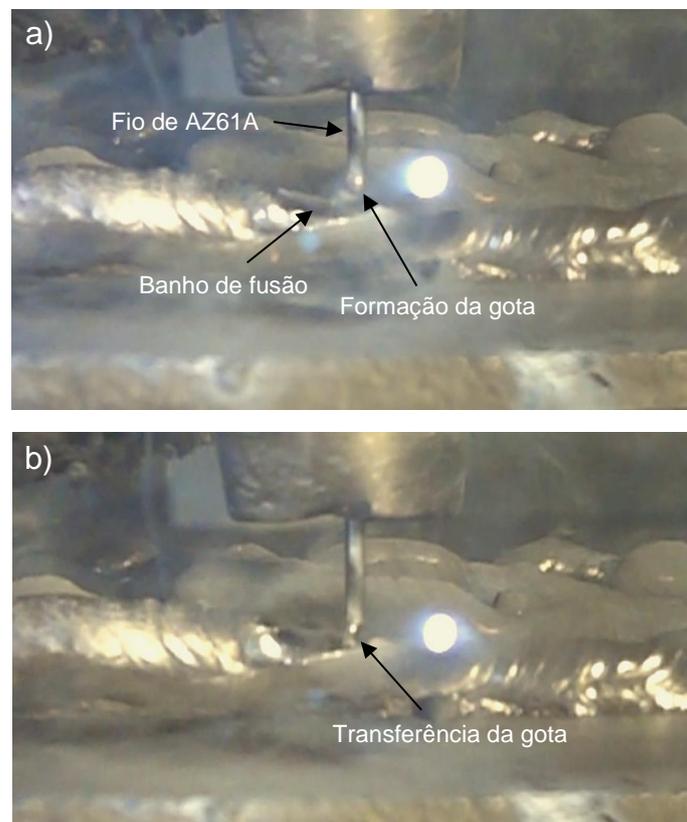


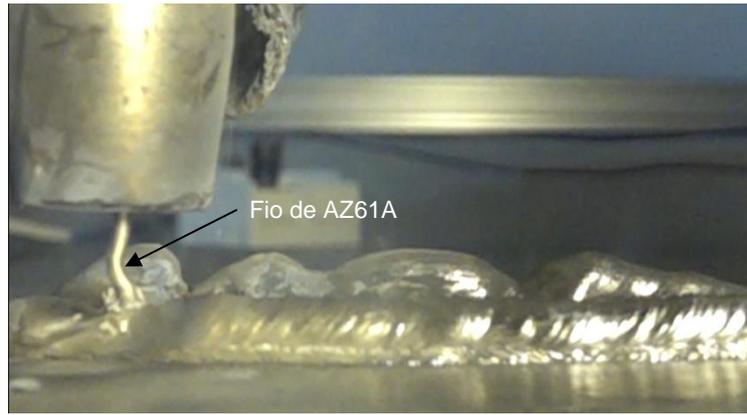
Figura 4.25 – Perfil de condutividades ao longo da altura das amostras P0 (0 Hz), P5 (4 Hz 2 mm) e P6 (10 Hz 2 mm).

#### 4.3.5 – Captação de vídeo

Através de um interruptor acionado por um mecanismo pneumático automatizado, foi possível extinguir o arco elétrico ao interromper o circuito elétrico durante 0,3 segundos, permitindo a visualização do banho nesse intervalo de tempo. As imagens foram captadas em intervalos de 0,001 segundos durante 3 segundos da deposição. Como se pode observar na Figura 4.26 foi possível captar a transferência de gotas para o banho de fusão onde a distância do arco elétrico era muito reduzida. A solidificação do banho foi quase instantânea, uma oscilação da tocha correspondeu apenas numa onda de vibração no banho até este solidificar, no entanto, este resultado deve alterar se não existir interrupção do arco. Ao extinguir o arco durante 0,3 segundos observou-se que o banho de fusão tem tempo de solidificar antes de ser perturbado pelo segundo período de oscilação da tocha e que, com a alimentação contínua de fio e extinção de arco, o fio adere na deposição não permitindo o movimento oscilatório do fio (Figura 4.27). Contudo, com este teste foi possível comprovar que a vibração da tocha WAAM provoca turbulência no banho de fusão. As imagens obtidas podem ser observadas no link: <https://drive.google.com/file/d/1RM8Tr6tQDuQ3OCsMSba7Um7lec5pQlcz/view?usp=sharing>



**Figura 4.26** – Movimento de queda da gota durante a deposição com AZ61A. a) Formação da gota e b) Transferência da gota.



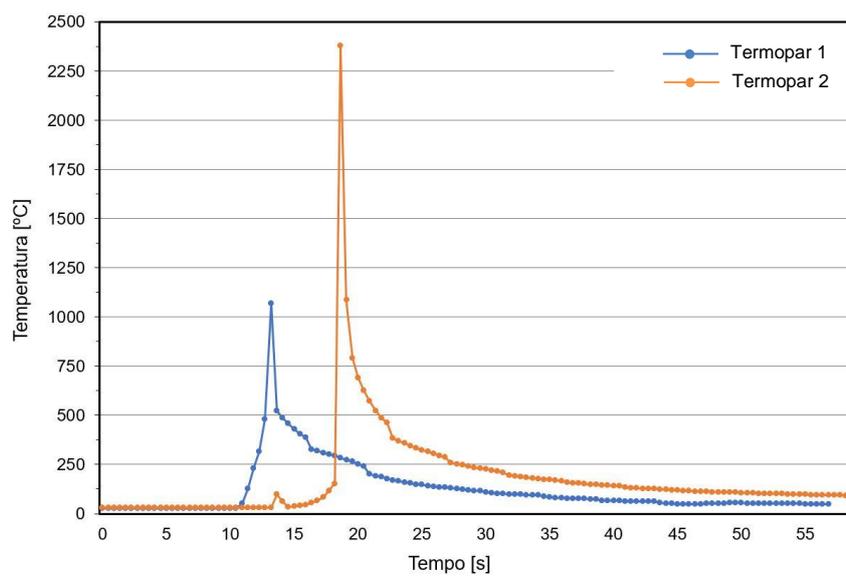
**Figura 4.27** – Aderência do fio AZ61A ao material base durante a extinção do arco elétrico.

#### 4.3.6 – Aquisição de temperatura no banho de fusão com termopares

Foram utilizados 2 termopares para registrar a temperatura durante uma deposição de AZ61A com uma frequência de aquisição de 2,3 Hz. Na Figura 4.28 a) pode observar-se a posição dos termopares antes da deposição. O Termopar 1 foi colocado à face da camada depositada anteriormente e o termopar 2 enterrado no interior da camada. Após a deposição os termopares ficaram embutidos na parede de AZ61A (Figura 4.28 b)). O termopar colocado em contacto com a superfície da camada atingiu uma temperatura muito superior relativamente à temperatura do termopar inserido no interior da mesma (Figura 4.29). O termopar 1 atingiu uma temperatura máxima de 1125 °C enquanto o termopar 2 atingiu 2375 °C. Este aumento é justificado pela diminuição da distância ao arco elétrico pelo termopar posicionado na superfície da camada.



**Figura 4.28** – Aquisição de temperatura com termopares. a) antes da deposição e b) depois da deposição



**Figura 4.29** – Perfil de temperaturas adquiridas pelos termopares.

## **5 – CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**

Este trabalho teve como objetivo desenvolver e validar a aplicação de vibração mecânica ao processo WAAM no fabrico de componentes metálicos. Os objetivos propostos foram alcançados e pode-se concluir o seguinte:

Para amostras produzidas com fio de ER316L

1. Tanto a frequência como a amplitude não afetaram significativamente a altura e largura da parede, no entanto, com o aumento da amplitude de vibração para 4 mm, surgiu um aumento da formação de salpicos. A ondulação superficial diminuiu com o aumento da frequência de vibração.
2. A vibração do arco elétrico a 10 Hz e 2 mm provocou o aumento da nucleação em 47% e a diminuição do comprimento das dendrites em 44%.

Para as amostras produzidas com fio de AZ61A

1. A aplicação de 1 e 2 mm de amplitude não provocou diferenças significativas na altura e na largura da peça, contudo, com o aumento da frequência de

vibração até 10 Hz, as ondulações periódicas superficiais tornaram-se 20% menores.

2. A aplicação de vibração a 10 Hz contribuiu para a diminuição de 59% do tamanho de grão. Sem vibração no processo o tamanho de grão foi de 49,6  $\mu\text{m}$ , a 4 Hz diminuiu para 30,4  $\mu\text{m}$  e a 10 Hz diminuiu para 20,6  $\mu\text{m}$ . O rácio de forma obtido nas amostras com vibração ficou mais próximo de 1.
3. A vibração perpendicular com a direção de deposição e a vibração coincidente com a direção de deposição não apresentaram diferenças evidentes na geometria das paredes nem no tamanho de grão.
4. Constatou-se que a aplicação de vibração contribuiu para o aumento da ZTA.
5. Observou-se uma diminuição da dureza ao longo da altura das paredes, no entanto, com o aumento de vibração a tendência das durezas diminuiu apenas 3% demonstrando que a dureza é independente da frequência de vibração.
6. A redução do tamanho de grão não foi suficiente para provocar a diminuição da condutividade elétrica nas amostras produzidas com AZ61A.
7. Através da interrupção do arco elétrico e captação de vídeo a 1000 fps foi possível observar a vibração do banho de fusão.

O equipamento desenvolvido está totalmente operacional e para mostrar o potencial desta variante e mitigar algumas das suas desvantagens são sugeridas algumas melhorias tais como:

1. Efetuar ensaios de tração uniaxial em provetes produzidos com diferentes direções para avaliar as propriedades isotrópicas das paredes depositadas com e sem vibração.
2. Realizar ensaios de fadiga de modo a estudar a vida útil das peças produzidas por WAAM com e sem vibração.
3. Produzir peças com geometrias mais complexas.
4. Substituir a junta universal dupla de latão e plástico por uma mais resistente na utilização de frequências de vibração mais elevadas.

# BIBLIOGRAFIA

- [1] J. P. Oliveira, T. G. Santos, and R. M. Miranda, "Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: From theory to practice," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 107, no. July 2019, p. 100590, 2020.
- [2] 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.
- [3] P. M. Sequeira Almeida and S. Williams, "Innovative process model of Ti-6Al-4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT)," *21st Annu. Int. Solid Free. Fabr. Symp. - An Addit. Manuf. Conf. SFF 2010*, no. January 2010, pp. 25–36, 2010.
- [4] Ivántabernero, A. Paskual, P. Álvarez, and A. Suárez, "Study on Arc Welding Processes for High Deposition Rate Additive Manufacturing," *Procedia CIRP*, vol. 68, no. April, pp. 358–362, 2018.
- [5] M. Dinovitzer, X. Chen, J. Laliberte, X. Huang, and H. Frei, "Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure," *Addit. Manuf.*, vol. 26, no. August 2018, pp. 138–146, 2019.
- [6] D. Deng and H. Murakawa, "Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements," *Comput. Mater. Sci.*, vol. 37, no. 3, pp. 269–277, 2006.
- [7] S. Murugan, P. V. Kumar, B. Raj, and M. S. C. Bose, "Temperature distribution during multipass welding of plates," *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 75, no. 12, pp. 891–905, 1998.
- [8] A. Wronkowicz, K. Dragan, and K. Lis, "Assessment of uncertainty in damage evaluation by ultrasonic testing of composite structures," *Compos. Struct.*, vol. 203, no. June, pp. 71–84, 2018.
- [9] T. Yuan, Z. Luo, and S. Kou, "Mechanism of grain refining in AZ91 Mg welds by arc oscillation," *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 22, no. 2, pp. 97–103, 2017.
- [10] R. Zong, J. Chen, C. Wu, and G. K. Padhy, "Influence of shielding gas on undercutting formation in gas metal arc welding," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 234, pp. 169–176, 2016.
- [11] S. R. K. Rao, G. M. Reddy, M. Kamaraj, and K. P. Rao, "Grain refinement through arc manipulation techniques in Al-Cu alloy GTA welds," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 404, no. 1–2, pp. 227–234, 2005.
- [12] Q. Yao, Z. Luo, Y. Li, F. Y. Yan, and R. Duan, "Effect of electromagnetic stirring on the microstructures and mechanical properties of magnesium alloy resistance spot weld," *Mater. Des.*, vol. 63, pp. 200–207, 2014.
- [13] Y. Li, Y. Zhang, J. Bi, and Z. Luo, "Impact of electromagnetic stirring upon weld quality of Al/Ti dissimilar materials resistance spot welding," *Mater. Des.*, vol. 83, pp. 577–586, 2015.
- [14] G. Den Ouden and W. J. P. Vink, "Effect of electromagnetic stirring on GTA welds in

- austenitic stainless steel," *Weld. J.*, vol. 2, no. 2, pp. 52s-59s, 1990.
- [15] M. G. Mousavi, M. J. M. Hermans, I. M. Richardson, and G. Den Ouden, "Grain refinement due to grain detachment in electromagnetically stirred AA7020 welds," *Sci. Technol. Weld. Join.*, vol. 8, no. 4, pp. 309–312, 2003.
- [16] A. Fritzsche, K. Hilgenberg, F. Teichmann, H. Pries, K. Dilger, and M. Rethmeier, "Improved degassing in laser beam welding of aluminum die casting by an electromagnetic field," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 253, no. October 2017, pp. 51–56, 2018.
- [17] F. Liu *et al.*, "Control of microstructure and mechanical properties of laser solid formed Inconel 718 superalloy by electromagnetic stirring," *Opt. Laser Technol.*, vol. 99, pp. 342–350, 2018.
- [18] B. Lu *et al.*, "Influence of electromagnetic stirring on microstructure and wear resistance of plasma arc deposited shape memory alloy," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 359, no. July 2018, pp. 125–131, 2019.
- [19] C. Zhang, M. Gao, and X. Zeng, "Workpiece vibration augmented wire arc additive manufacturing of high strength aluminum alloy," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 271, no. March, pp. 85–92, 2019.
- [20] C. W. Kuo, C. M. Lin, G. H. Lai, Y. C. Chen, Y. T. Chang, and W. Wu, "Characterization and mechanism of 304 stainless steel vibration welding," *Mater. Trans.*, vol. 48, no. 9, pp. 2319–2323, 2007.
- [21] T. Yuan, Z. Luo, and S. Kou, "Grain refining of magnesium welds by arc oscillation," *Acta Mater.*, vol. 116, pp. 166–176, 2016.
- [22] G. Liang and S. Yuan, "Study on the temperature measurement of AZ31B magnesium alloy in gas tungsten arc welding," *Mater. Lett.*, vol. 62, no. 15, pp. 2282–2284, 2008.
- [23] D. Samantaray, S. Mandal, A. K. Bhaduri, S. Venugopal, and P. V. Sivaprasad, "Analysis and mathematical modelling of elevated temperature flow behaviour of austenitic stainless steels," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 528, no. 4–5, pp. 1937–1943, 2011.
- [24] V. R. Duarte, T. A. Rodrigues, N. Schell, R. M. Miranda, J. P. Oliveira, and T. G. Santos, "Hot forging wire and arc additive manufacturing (HF-WAAM)," *Addit. Manuf.*, vol. 35, no. March, p. 101193, 2020.
- [25] J. Guo, Y. Zhou, C. Liu, Q. Wu, X. Chen, and J. Lu, "Wire arc additive manufacturing of AZ31 magnesium alloy: Grain refinement by adjusting pulse frequency," *Materials (Basel)*, vol. 9, no. 10, 2016.
- [26] V. Subravel, G. Padmanaban, and V. Balasubramanian, "Effect of Pulse Frequency on Tensile Properties and Microstructural Characteristics of Gas Tungsten Arc Welded AZ31B Magnesium Alloy," *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 68, no. 3, pp. 353–362, 2015.