



# EFEITO METALÚRGICO E MECÂNICO DA MULTIDEPOSIÇÃO POR CAMADAS NA PRODUÇÃO DE COMPONENTES METÁLICOS

DIOGO VIEIRA DA SILVA

julho de 2023

# EFEITO METALÚRGICO E MECÂNICO DA MULTIDEPOSIÇÃO POR CAMADAS NA PRODUÇÃO DE COMPONENTES METÁLICOS

Diogo Vieira da Silva

**2022/2023**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

# EFEITO METALÚRGICO E MECÂNICO DA MULTIDEPOSIÇÃO POR CAMADAS NA PRODUÇÃO DE COMPONENTES METÁLICOS

Diogo Vieira da Silva

1181063

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor António Gonçalves Magalhães.

**2023**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer às pessoas que causaram um maior impacto na minha vida, a minha família que me apoiou incondicionalmente durante todo o percurso realizado até à finalização da dissertação.

Gostaria também de fazer um agradecimento especial ao meu orientador, Doutor António Gonçalves Magalhães, que aceitou de bom grado o cargo, mostrando-se sempre disponível, e me forneceu a ajuda e informação necessária para a realização de um trabalho com sucesso.

Agradeço também a toda a comunidade do Departamento de Engenharia Mecânica, com maior destaque aos professores e técnicos de laboratório que prestaram a ajuda necessária., nomeadamente o Doutor João Francisco Silva e o Doutor Púria Esfandiari, e os Engenheiros, Vítor Ribeiro, Vítor Moreira e Fátima Andrade.

Agradeço a todos os profissionais do Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentado de Produto (CDRSP), por tornarem possível a realização do trabalho prático e pela oportunidade de trabalho conjunta.

Gostaria também de agradecer à Agência Nacional de Inovação (ANI) pelo projeto Metal.BOT que permitiu o apoio financeiro para a realização do trabalho prático.

Finalmente, quero agradecer aos meus colegas de trabalho, que acompanharam todo este percurso, mostrando-se sempre disponíveis a auxiliar no necessário.

página propositadamente em branco

## RESUMO

Esta dissertação tem como objetivo o estudo do efeito da deposição multicamada e dos parâmetros de processo nas características metalúrgicas e mecânicas de componentes metálicos produzidos com recurso a métodos de fabrico aditivo, nomeadamente o 3DPMD.

O 3DPMD é um método de fabrico aditivo de metais bastante recente que tem por base o processo clássico de arco plasma, combinando-o com um braço robótico de CNC. Tal como os restantes processos de deposição direta de energia (DED), o 3DPMD permite a criação de geometrias complexas, sem grandes desperdícios, por deposição de material metálico fundido camada-a-camada. No entanto, a falta de apoios na produção de componentes e a existência de ciclos térmicos aplicados nas diversas camadas tornam este método complexo, sendo necessária a correta escolha dos parâmetros de impressão para a produção de componentes de elevada qualidade.

De forma a fazer uma correta caracterização do processo, foram produzidas deposições de paredes finas e deposições em degrau, aplicando três conjuntos de parâmetros distintos. Pela análise da microestrutura, pesquisa de defeitos por radiografia, medição da microdureza e avaliação da componente geométrica e estrutural, foi possível definir a condição 66 como a combinação de parâmetros ótima para o controlo do processo e produção de geometrias.

## PALAVRAS-CHAVE

3DPMD; Deposição multicamada; Microestrutura; Fabrico Aditivo

página propositadamente em branco

## ABSTRACT

This dissertation aims to study the effect of multilayer deposition and process parameters on the metallurgical and mechanical characteristics of metallic components produced using additive manufacturing methods, namely 3DPMD.

3DPMD is a recent metal additive manufacturing method that is based on the classical plasma arc process, combining it with a CNC robotic arm. Like the remaining direct energy deposition (DED) processes, 3DPMD allows the creation of complex geometries, without much waste, by deposition of layer-by-layer molten metal material. However, the lack of support in the production of components and the existence of thermal cycles applied in the various layers make this method complex, requiring the correct choice of printing parameters to produce high quality components. To make a correct characterization of the process, thin-wall deposition and step deposition were produced, applying three different sets of parameters. By analyzing the microstructure, searching for defects by radiography, measuring the microhardness and evaluating the geometrical and structural component, it was possible to define condition 66 as the optimal parameter combination for process control and geometry production.

## KEYWORDS

3DPMD; Multilayer deposition; Microstructure; Additive Manufacturing

página propositadamente em branco

# ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABELAS .....	XI
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS .....	XIII
1. INTRODUÇÃO .....	15
1.1. Contextualização .....	15
1.2. Objetivos .....	15
1.3. Estrutura da tese .....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1. Fabrico Aditivo com Metais .....	17
2.1.1. Definição de Fabrico Aditivo .....	17
2.1.2. Fabrico Aditivo vs Fabrico Convencional .....	18
2.1.3. Vantagens e desvantagens da utilização do Fabrico Aditivo .....	19
2.1.4. Classificação dos métodos existentes no Fabrico Aditivo .....	20
2.2. Materiais metálicos mais comuns no FA.....	22
2.3. 3DPMD (Deposição 3D de Metal por Plasma) .....	24
2.4. Deposição e microestrutura .....	25
2.4.1. Processo de deposição .....	26
2.4.2. Influência da deposição multicamada a nível mecânico e geométrico .....	29
2.4.3. Influência da deposição multicamada a nível térmico e microestrutural .....	36
3. MÉTODOS E APLICAÇÃO .....	45
3.1. Estudo Preliminar .....	46
3.1.1. Ensaio prévios .....	46
3.1.2. Condições a estudar .....	46
3.1.3. Preparação das amostras.....	48
3.1.4. Análise da microestrutura e da microdureza .....	49
3.2. Deposições Multicamada .....	50
3.2.1. Equipamento e material .....	51
3.2.2. Definição de parâmetros .....	51
3.2.3. Produção de geometrias.....	52
3.2.4. Preparação das amostras.....	54
3.2.5. Métodos de análise .....	56
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	59
4.1. Microestrutura .....	59
4.1.1. Deposição Singular .....	59
4.1.2. Deposição Multicamada .....	60
4.2. Microdureza.....	66
4.3. Estabilidade do processo .....	70

---

4.4. Radiografia .....	73
5. CONCLUSÕES .....	77
5.1. Conclusões finais .....	77
5.2. Limitações e trabalhos futuros .....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
APÊNDICE A .....	85
APÊNDICE B - Condição 39 .....	87
APÊNDICE C - Condição 66 .....	92
APÊNDICE D - Condição 70.....	97
ANEXO A.....	103
ANEXO B.....	105

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação entre Design de fabrico Tradicional e Aditivo .....	18
Figura 2 – Comparação entre o impacto de tecnologias CNC (Azul) e tecnologias LENS (Laranja) (Adaptado de [5]) .....	19
Figura 3 – Categorias e processos contidos no fabrico aditivo de metais (Adaptado de [11]) .....	21
Figura 4 – Representação esquemática do processo PBF (Adaptado de [14]) .....	21
Figura 5 – Métodos de alimentação por pó (a) alimentação coaxial, (b) alimentação não axial; e métodos de alimentação por fio (c) alimentação coaxial, (d) alimentação não axial (Adaptado de [22]) .....	22
Figura 6 – Esquema do processo 3DPMD (Adaptado de [35]) .....	24
Figura 7 – Fluxograma demonstrativo dos diversos parâmetros de influência ao processo PTA (Adaptado de [35]) .....	25
Figura 8 – Representação esquemática de uma deposição multicamada .....	26
Figura 9 – Cordões realizados por Perez-Soriano et al. testando diversas configurações de parâmetros (Adaptado de [36]) .....	27
Figura 10 – Morfologia macroscópica de cordões produzidos por CMT, variando a taxa de material depositado a-f (3,4,5,6,7 e 8 m/min respetivamente) e mantendo o valor de velocidade de deposição. (a) velocidade de deposição = 20 cm/min; (b) velocidade de deposição = 30 cm/min; (c) velocidade de deposição = 40 cm/min (Adaptado de [40]) .....	28
Figura 11 – Diagrama da formação de <i>Keyhole</i> através do processo de soldadura a laser .....	29
Figura 12 – Diagrama representativo do processo DED (Adaptado de [38]) .....	29
Figura 13 – Esquemas representativos sobre mecanismos de contração e expansão de deposições multicamada (Adaptado de [46]) .....	30
Figura 14 – Más formações na produção de uma deposição multicamada mantendo os parâmetros de impressão fixos (Adaptado de [47]) .....	31
Figura 15 – Deposições de 8, 31 e 48 camadas e gráficos correspondentes demonstrando as alturas atingidas em cada parede após estabilização de parâmetros de impressão (Adaptado de [47]) .....	31
Figura 16 – Esquema sobre possíveis gradientes de deposição utilizando ligas dispareas ou variando as suas composições (Adaptado de [48], [49]) .....	32
Figura 17 – Produção de um componente por deposição multicamada com variação de composições para ligas de titânio (Adaptado de [50]) .....	33
Figura 18 – Representação esquemática de processos híbridos de fabrico aditivo com metais (Adaptado de [52]) .....	33
Figura 19 – Apresentação visual do efeito de aplicação de processos híbridos em paredes de deposição multicamada (Adaptado de [51]) .....	34
Figura 20 – Defeitos comuns no Fabrico Aditivo de Metais (a) Poros de elevada dimensão (20 $\mu\text{m}$ ); (b) Micro poros em 316L (200 $\mu\text{m}$ ); (c) Falha na fusão entre camadas depositadas (Adaptado de [32]) .....	35
Figura 21 – Representação esquemática das estruturas formadas ao longo da deposição multicamada de paredes finas (Adaptado de [56]) .....	36
Figura 22 – Esquema da evolução do grão ao longo da deposição multicamada (Adaptado de [2]) .....	37

Figura 23 – Representação esquemática do desenvolvimento e orientação das estruturas cristalinas formadas durante o processo de soldadura semelhante ao método FA (Adaptado de [32]) .....	37
Figura 24 – Esquema da formação de estruturas em função do gradiente de temperatura e taxa de crescimento (Adaptado de [44]) .....	38
Figura 25 – Secção transversal de uma parede de NiTi realizada por CMT e apresentação das microestruturas nas zonas inferior, intermédia e superior da mesma (Adaptado de [40]) .....	39
Figura 26 – Comparação da microestrutura formada nas zonas superior, intermédia, inferior e material de base, numa construção de deposição multicamada em titânio puro recorrendo ao método 3DPMD (Adaptado de [35]) .....	40
Figura 27 – Apresentação da microestrutura formada, para Ti-6Al-4V, por influência da espessura da camada depositada (Adaptado de [4]) .....	41
Figura 28 – Mapa do tamanho de grão formado e disposto para paredes de deposição simples quando submetidas a processos híbridos (a) e (b) com apenas uma passagem do rolo na penúltima camada com cargas de 50 kN e 75 kN respetivamente; (c) e (d) com passagem do rolo em todas as camadas com cargas de 50 kN e 75 kN respetivamente (Adaptado de [57]) .....	42
Figura 29 – Evolução da microdureza ao longo da parede criada por deposição multicamada em NiTi por CMT (Adaptado de [40]) .....	43
Figura 30 – Fluxograma representativo da metodologia desenvolvida .....	45
Figura 31 – Exemplar de uma das amostras produzidas no âmbito do projeto, previamente ao trabalho realizado .....	46
Figura 32 – Representação esquemática da seleção das três condições a estudar .....	46
Figura 33 – Representação dos provetes utilizados na seleção de amostras pela análise visual; (a) cordão completo e (b) secção transversal do mesmo .....	48
Figura 34 – Struers Rotopol-1 .....	48
Figura 35 – Demonstração do ataque químico realizado no cordão e no material base .....	49
Figura 36 – Microscópio Olympus D22 .....	49
Figura 37 – Representação esquemática das zonas de estudo na análise da microestrutura .....	50
Figura 38 – Microdurometro Duramin .....	50
Figura 39 – <i>Setup</i> do equipamento utilizado durante o processo 3DPMD .....	51
Figura 40 – Representação esquemática da deposição em degrau .....	53
Figura 41 – Distância ótima de posicionamento do ânodo em relação à camada depositada .....	53
Figura 42 – Disposição das geometrias produzidas na chapa de base .....	54
Figura 43 – Jato de água TCI cutting BP-C 4020 .....	55
Figura 44 – Montagem final das secções transversais das deposições de paredes finas nos respetivos moldes .....	55
Figura 45 – Predopress Struers .....	56
Figura 46 – Medição da altura efetiva da parede fina .....	57
Figura 47 – Representação esquemática das zonas de estudo na análise da microestrutura às paredes finas .....	58
Figura 48 – Evolução da microestrutura de deposições simples para as três condições estudadas (ampliação 50X); (a) material base; (b) transição entre o material base e a ZTA; (c) transição entre a ZTA e a zona inferior do cordão; (d) zona central do cordão; (e) zona superior do cordão .....	59
Figura 49 – Evolução da microestrutura encontrada na chapa de aço DIN Ck45 (ampliação 200X) .....	60

Figura 50 – Geometrias planares localizadas na zona inferior da parede fina para as três condições em estudo (ampliação 200X) .....	61
Figura 51 – Geometrias celulares localizadas na zona intermédia da parede fina para as três condições em estudo (Ampliação 200X) .....	62
Figura 52 – Geometrias celulares localizadas nas fronteiras de camada; (a) e (b) representação de fronteira de camada para condição 70 (ampliação 200X); (c) representação de diversas camadas consecutivas para condição 70 (ampliação 50X) .....	63
Figura 53 – Geometrias colunares dendríticas localizadas na zona intermédia da parede fina para as três condições em estudo (ampliação 200X).....	64
Figura 54 – Geometrias equiaxiais dendríticas localizadas na zona superior da parede fina para as três condições em estudo (ampliação 200X).....	65
Figura 55 – Evolução da dureza para as deposições em degrau referentes à condição 39; (a) Dureza registada no material de base; (b) Dureza registada na ZTA; (c) Dureza registada ao longo da deposição.....	66
Figura 56 – Evolução da dureza para as deposições em degrau referentes à condição 66; (a) dureza registada no material de base; (b) dureza registada na ZTA; (c) dureza registada ao longo da deposição.....	67
Figura 57 – Evolução da dureza para as deposições em degrau referentes à condição 70; (a) dureza registada no material de base; (b) dureza registada na ZTA; (c) dureza registada ao longo da deposição.....	68
Figura 58 – Evolução da dureza para as deposições de paredes finas; (a) dureza registada no material de base; (b) dureza registada na ZTA; (c) dureza registada ao longo da deposição .....	69
Figura 59 – Evolução da altura efetiva das paredes finas face à altura teórica expectável .....	70
Figura 60 – Evolução da largura face à altura das paredes finas .....	71
Figura 61 – Taxa de crescimento do processo de deposição das paredes finas para as três condições .....	72
Figura 62 – Secção transversal das paredes finas produzidas; (a) condição 39; (b) condição 66; (c) condição 70 .....	73
Figura 63 – Radiografia da parede fina referente à condição 39 .....	74
Figura 64 – Radiografia da parede fina referente à condição 66 .....	74
Figura 65 – Radiografia da parede fina referente à condição 70 .....	74

página propositadamente em branco

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens da utilização do Fabrico Aditivo (Adaptado de [11], [12], [14] – [20]).....	20
Tabela 2 – Descrição dos parâmetros de influência nos processos DED (Adaptado de [35] – [38])	26
Tabela 3 – Resumo dos parâmetros utilizados na deposição dos cordões singulares no estudo de Perez-Soriano et al. (Adaptado de [35]) .....	27
Tabela 4 – Resultados da primeira seleção das condições a estudar .....	47
Tabela 5 – Composição do EuTroLoy 16604 .....	51
Tabela 6 – Parâmetros fixos do processo .....	52
Tabela 7 – Combinações de parâmetros a estudar.....	52
Tabela 8 – Parâmetros da radiografia .....	58

página propositadamente em branco

## LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

### Lista de Siglas

3D	Três Dimensões
3DPMD	<i>3D Plasma Metal Deposition</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i>
CNC	<i>Computerized Numerical Control</i>
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
DED	<i>Direct Energy Deposition</i>
EBM	<i>Electron Beam Melting</i>
FA	Fabrico Aditivo
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
LENS	<i>Laser Engineered Net Shaping</i>
P.Porto	Instituto Politécnico do Porto
PBF	<i>Power Bed Fusion</i>
PTA	<i>Plasma Transferred Arc</i>
WAAM	<i>Wire Arc Additive Manufacturing</i>

### Lista de Símbolos

$\alpha$	Alfa	Estrutura Monofásica
$\beta$	Beta	Estrutura Metaestável

página propositadamente em branco

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Contextualização

O fabrico aditivo de metais é um processo que tem vindo a ganhar elevada relevância devido às suas vantagens intrínsecas quando comparadas com métodos mais convencionais, como a maquinação e a conformação. Como consequência, este processo tem atraído bastante atenção de diversas indústrias permitindo a criação de novos métodos e processos. Este processo baseia-se na deposição camada a camada de material até que o componente pretendido esteja finalizado ou reparado, se for o caso. Para isto, recorre-se a softwares 3D que permitem a divisão do componente em camadas e a programação da impressão. Contudo, devido ao crescimento exponencial de aplicações e metodologias de produção, o processo de fabrico aditivo de metais apresenta inúmeras variantes, sendo focadas duas categorias: a PBF (*Power Bed Fusion*), onde um feixe de energia vai fundir o material que se encontra numa cama de pó, e o DED (*Direct Energy Deposition*), onde se realiza a deposição de material fundido diretamente da extrusora. Com recurso a estes métodos é possível obter componentes de geometrias complexas, utilizando diversos materiais e ligas e conseguindo obter boas propriedades mecânicas. Estas vantagens tornam o FA (fabrico aditivo) um processo apelativo para diversas áreas industriais, como a aeronáutica e a biomédica, permitindo uma produção com quantidades muito reduzidas de desperdícios metálicos.

## 1.2. Objetivos

Ao processo 3DPMD (Deposição 3D de metal por plasma), que é uma variante da categoria DED, foi dado especial enfoque ao longo da dissertação. Os aspetos ligados à qualidade final dos componentes produzidos e o conjunto de parâmetros relevantes que a determinam são diversos, mas a intensidade de corrente, a velocidade de impressão e o fluxo de deposição de pó são os três mais influentes na qualidade superficial e na microestrutura das deposições e mereceram especial destaque no tratamento, quer de revisão, quer experimental. Com a finalização da dissertação pretende-se obter uma melhor compreensão da influência dos parâmetros na qualidade e propriedades dos componentes produzidos, assim como concluir qual a melhor combinação de parâmetros a aplicar no contexto.

## 1.3. Estrutura da tese

A estrutura do texto que descreve toda a atividade decorrente dos objetivos propostos, desenvolve-se em cinco capítulos. No primeiro capítulo é feita a introdução do tema do fabrico aditivo com materiais metálicos e definidas as linhas orientadoras para o programa experimental. No segundo capítulo é iniciado o trabalho de revisão da literatura, com destaque na identificação dos parâmetros mais relevantes e respetivo controlo para possibilitar a definição das condições adequadas de deposição, quer do ponto de vista geométrico, quer do ponto de vista da tipologia da microestrutura alcançada.

O capítulo três refere-se a métodos e aplicação, onde se descrevem ensaios complementares ao estudo e a forma de realização das deposições, dos ensaios e da preparação das amostras.

No quarto capítulo apresentam-se os resultados dos ensaios realizados, bem como a sua discussão.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões finais, as limitações encontradas e indicadas algumas sugestões para trabalhos futuros.

Por último, de forma a finalizar o documento, são apresentadas as referências bibliográficas que se encontram organizadas segundo a forma de referenciação IEEE, bem como os apêndices e anexos necessários.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O fabrico aditivo de metais e os seus processos derivados são tecnologias recentes e, por consequência, ainda em desenvolvimento. Novos métodos, materiais e aplicações estão a surgir, sendo imperativo conhecer devidamente os processos e os parâmetros envolvidos no sentido de obter as melhores condições de deposição e o fabrico de componentes com boas propriedades mecânicas. Desta forma, neste capítulo é realizado um estudo sobre fabrico aditivo e os processos derivados, focando posteriormente no método 3DPMD. A influência das variáveis predominantes no aspeto geométrico dos cordões depositados, a análise da microestrutura, sobretudo em deposições múltiplas, e as propriedades conseguidas através da filiação de durezas, são os principais tópicos a tratar neste capítulo.

### 2.1. Fabrico Aditivo com Metais

#### 2.1.1. Definição de Fabrico Aditivo

O termo Fabrico Aditivo emprega-se de forma genérica para as tecnologias que fundem material sucessivamente para criar componentes físicos, tal como especificado nos dados do modelo 3D, [1]. Este processo foca-se na rápida criação de peças, com baixos desperdícios de material, que permitem a utilização desta tecnologia na produção de protótipos e peças base aplicáveis em diversos projetos e situações.

As tecnologias mais relevantes de FA utilizando metais, por norma, têm por base material de adição sob a forma de pó ou filamento que será seletivamente fundido por uma fonte de calor focada, permitindo a deposição do mesmo em camadas, seguindo-se a posterior ligação e arrefecimento.

Os modelos impressos recorrem ao apoio de softwares 3D assistidos por computador (3D CAD). Com a evolução deste processo é possível verificar a produção de peças com excelente qualidade e propriedades, sendo assim possível de verificar a construção de peças para a aplicação direta e não só protótipos.

Uma vez que este método permite obter peças com boa integridade, reduzindo o desperdício de material e permitindo a criação de produtos de geometria mais complexa (Figura 1), é de notar uma mudança de perceção do fabrico convencional, tornando-se cada vez mais visível este tipo de fabrico em diversas áreas industriais, como a biomédica e a aeronáutica, [2] – [4].

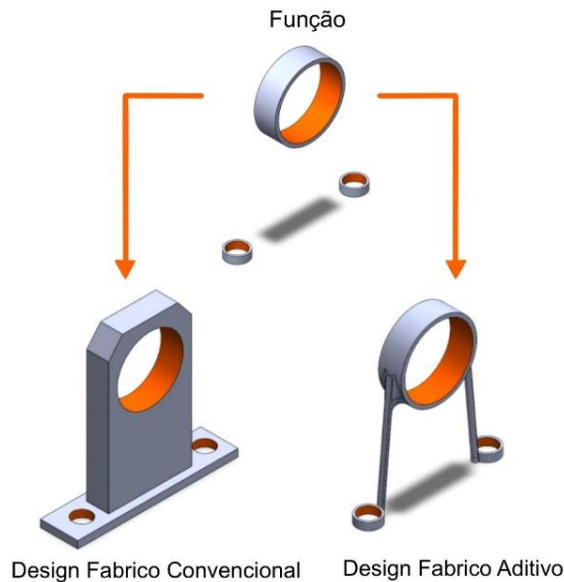


Figura 1 – Comparação entre Design de fabrico Tradicional e Aditivo

### 2.1.2. Fabrico Aditivo vs Fabrico Convencional

Nos últimos anos a sustentabilidade ambiental tornou-se um fator de elevada importância na indústria, resultando na necessidade de um paradigma de mudança, influenciando os processos e ciclos de vida dos produtos.

O surgimento de novas tecnologias permitiu a evolução dos processos, tornando cada vez mais relevante o fabrico aditivo em oposição a técnicas mais convencionais como os métodos de fabrico subtrativo ou por deformação do material, [5].

A digitalização do processo e a fase de simulação e prototipagem são de elevada vantagem à investigação, mas, para além disso, a possibilidade de se trabalhar com diversos materiais e diversas aplicações, tornam o fabrico aditivo muito relevante na indústria, focando o uso desta técnica na produção com metais, [6]. Desta forma, a utilização do fabrico aditivo, em oposição a técnicas mais convencionais, revela o aparecimento de resultados tanto económicos, como sociais e ambientais, tornando este método uma mais-valia em diversas indústrias.

Além da produção de geometrias mais complexas, o FA permite a criação de peças mais leves, a diminuição de custos na produção e redução no consumo de material e nos desperdícios adjacentes.

Para além destas vantagens no processo de produção, a possibilidade de este ser realizado localmente, tem influência nas cadeias de fornecimento e transporte, reduzindo o consumo de combustível e, conseqüentemente, as emissões de CO<sub>2</sub>, [7].

Para as tecnologias aditivas são também necessárias ferramentas de corte, fluidos ou materiais auxiliares durante o processo de produção, embora estes recursos devam ser considerados em processos de pós-processamento, [8].

Verificadas algumas diferenças mecânicas, económicas e sociais, é ainda possível verificar algumas diferenças entre o processo de fabrico aditivo e os processos tradicionais.

Lunetto et al. [9] aquando da comparação entre FA e maquinagem, verificaram a elevada influência do consumo energético do laser no processo EBM (*Electron Beam Melting*). Em adição, Ingarau et al. [10] avaliaram a sustentabilidade ambiental na comparação dos métodos, suportando que o EBM apresenta uma eficiência energética superior devido à pequena produção de desperdícios.

Caniele Landi et al. [5] analisaram o impacto ambiental em diversos aspetos, das tecnologias CNC e tecnologias LENS (*Laser Engineered Net Shaping*) obtendo o gráfico de barras da figura 2.

Por fim, Kellers et al. [11] mostraram que os valores de energia por unidade de produto são superiores no fabrico aditivo, implicando assim que apenas algumas áreas como a aeroespacial ou ferroviária justifiquem o dispêndio energético em contrapartida à performance necessária dos componentes.

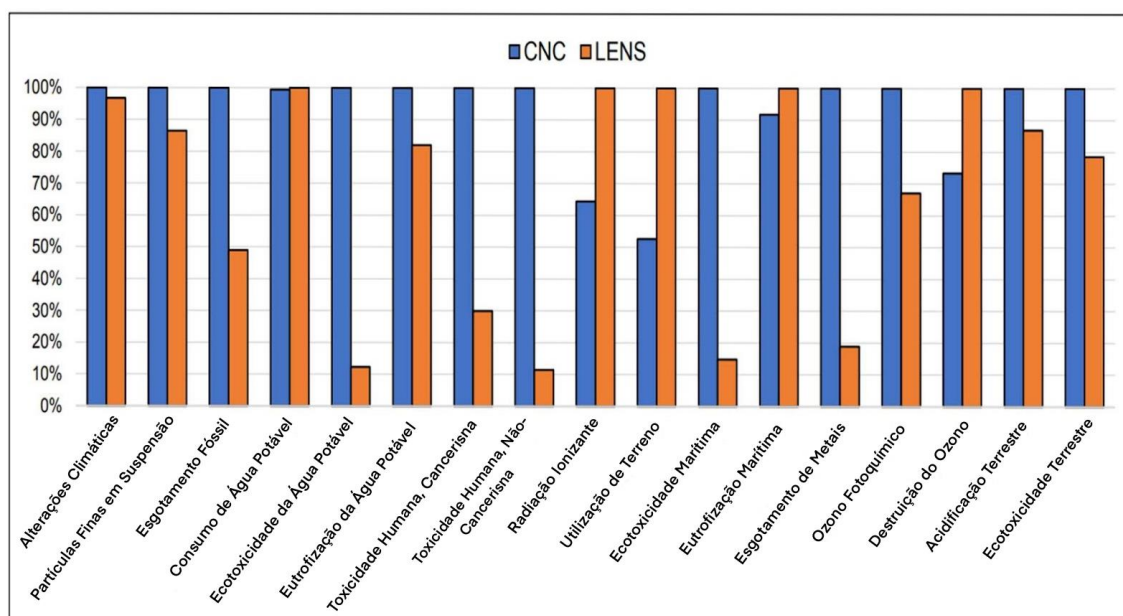


Figura 2 – Comparação entre o impacto de tecnologias CNC (Azul) e tecnologias LENS (Laranja) (Adaptado de [5])

Embora se verifique uma elevada relevância do fabrico aditivo na indústria e uma crescente na tecnologia envolvida, é necessário balancear os privilégios destes métodos com as desvantagens, uma vez que este processo ainda é dispendioso e está em evolução, não se mostrando preparado para sobrepor métodos tradicionais em muitas das indústrias, focalizando-se atualmente na prototipagem e, como mencionado por Kellers et al., em algumas áreas seletivas e individualizadas.

### 2.1.3. Vantagens e desvantagens da utilização do Fabrico Aditivo

As vantagens e as desvantagens do fabrico aditivo são enunciadas na bibliografia por diversos autores, ([11] – [19]). Na tabela 1 podemos encontrar uma listagem dessas vantagens e

desvantagens, sendo que, tratando-se de uma técnica emergente, a sua evolução é extremamente rápida e algumas desvantagens ou desafios acabam por ser superados pelo desenvolvimento meteórico de equipamentos e técnicas.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens da utilização do Fabrico Aditivo (Adaptado de [11], [12], [14] – [20])

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens/ Desafios</b>
Lotes pequenos de produtos customizados são atrativos a nível económico quando comparados a métodos tradicionais	Alteração da forma de pensamento dos designers e da forma como é abordado o uso do FA
Produção direta de ficheiros CAD evitam o uso de ferramentas e moldes	Custo e velocidade da produção
Designs digitais são facilmente partilhados e alterados, permitindo a customização de componentes ou produtos	A utilização do FA para a produção de componentes finalizadas e não só para a prototipagem
A natureza aditiva do processo permite a poupança do material assim como a reutilização de desperdícios	Desenvolvimento e normalização de novos materiais
É possível obter estruturas de geometria complexa	Validação das propriedades mecânicas e térmicas dos materiais existentes
Produção após procura reduz a acumulação de stocks	Necessidade de pós processamento
É possível combinar diversos componentes num só, reduzindo riscos de falha em juntas ou ligações, aumentando assim o tempo de vida dos componentes	Desenvolvimento de deposição multimaterial e multicor
	Existência de material de suporte que não pode ser reutilizado
	Falta de designers e engenheiros especializados na área

#### **2.1.4. Classificação dos métodos existentes no Fabrico Aditivo**

Os processos do Fabrico Aditivo de metais podem ser classificados de diversas formas. No entanto, tal como referem Kellers et al., o método de divisão utilizado depende do tipo de fonte de energia térmica empregue. Assim existem duas categorias que se sobrepõem, sendo estas o PBF (*Powder Bed Fusion*) e DED (*Direct Energy Deposition*). Estas categorias vão então abranger diversos processos que podem ser observados na figura 3.

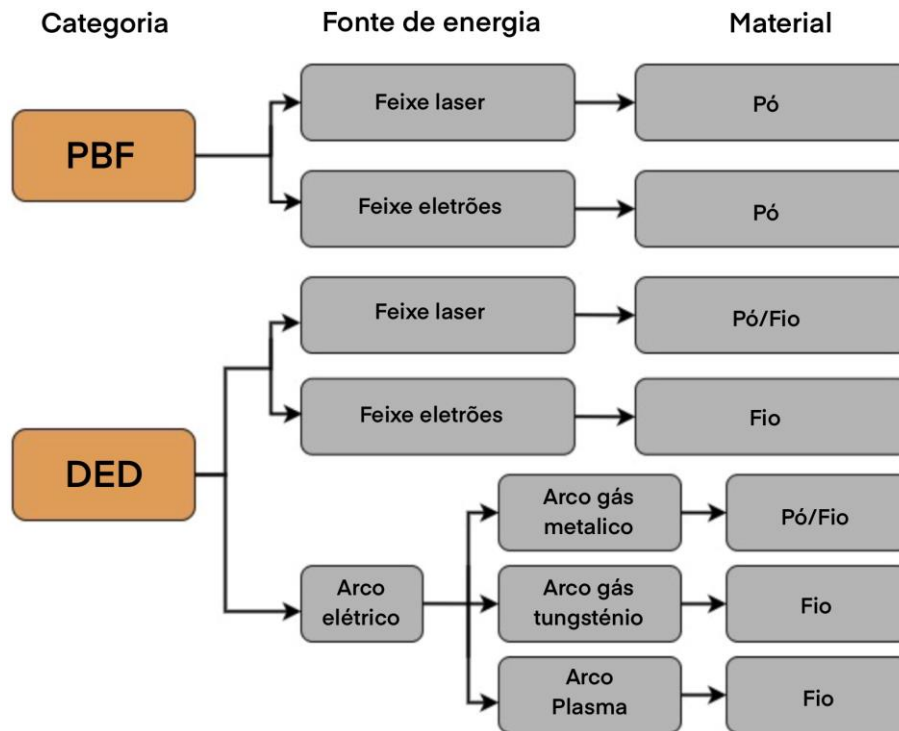


Figura 3 – Categorias e processos contidos no fabrico aditivo de metais (Adaptado de [11])

No processo PBF camadas de pó são aplicadas na base com recurso a um rolo e um feixe focado de energia vai fundir seletivamente o material depositado. Em seguida, a base move-se e uma nova camada de material é aplicada. Este processo pode ser visualizado na figura 4, [14].

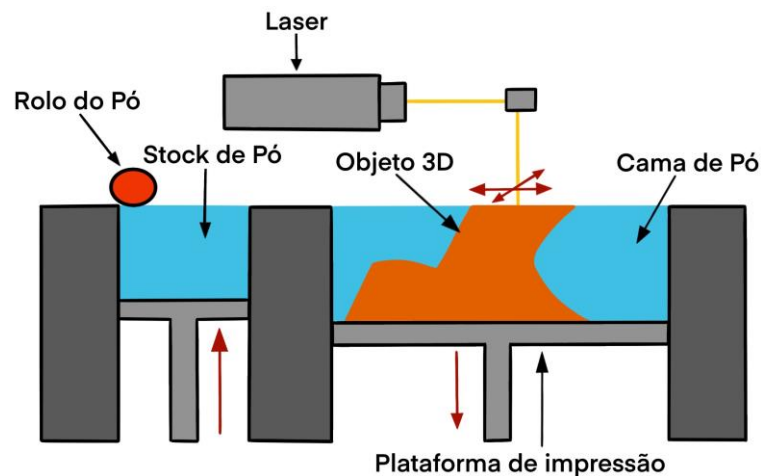


Figura 4 – Representação esquemática do processo PBF (Adaptado de [14])

Neste tipo de processo, é necessário um extenso estudo prévio para determinar os parâmetros ótimos para processar o material. Entre estes podemos referir o tamanho das partículas de pó, a velocidade de digitalização, a temperatura da cama, a espessura de camada depositada, a intensidade do feixe, o tipo de feixe, o rácio de misturas no pó, a velocidade de translação do feixe, entre outros, [22].

Na prática, os parâmetros definidos devem ser mantidos durante todo o processo, no entanto, devido à complexidade dos processos PBF, esta metodologia pode não ser apropriada, levando à necessidade de um ajustamento dinâmico dos parâmetros ao longo do processo, de forma a garantir a qualidade do fabrico das peças, [23].

O processo DED consegue criar uma forma arbitrária utilizando a deposição camada a camada de material metálico. Em oposição ao PBF, este método deposita o material por um extrusor em par com o feixe, fundindo o material. Esta deposição varia no material utilizado, que pode ser em pó ou em fio, e a extrusão pode ser coaxial ou não axial, como pode ser observado na figura 5, [22].

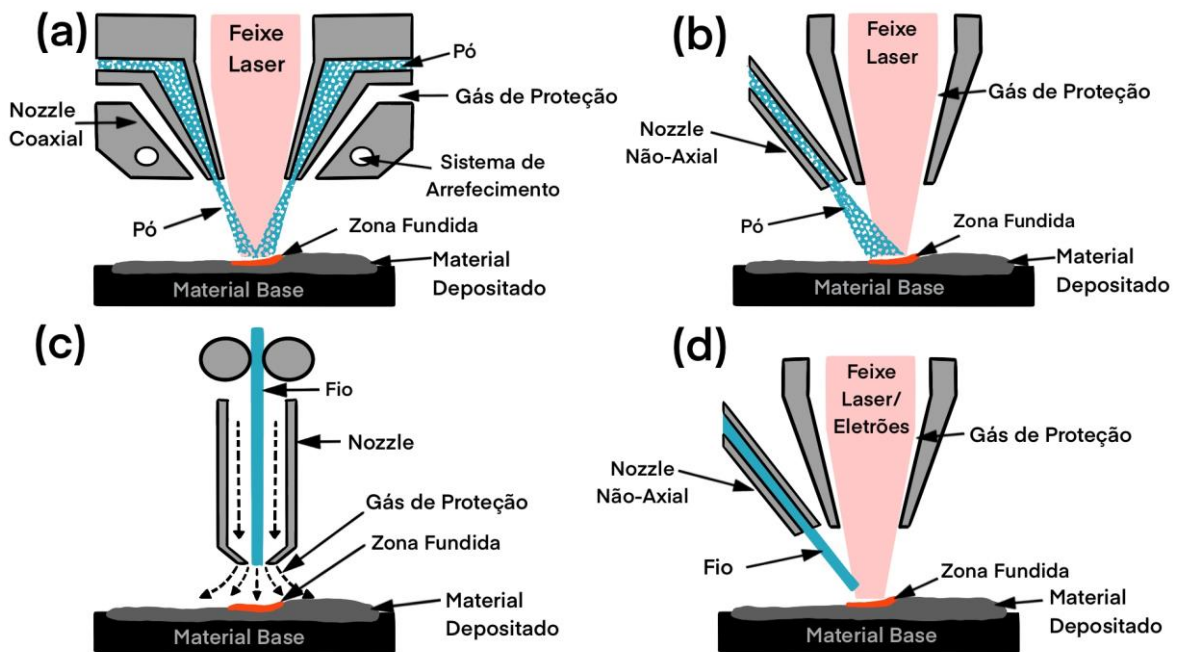


Figura 5 – Métodos de alimentação por pó (a) alimentação coaxial, (b) alimentação não axial; e métodos de alimentação por fio (c) alimentação coaxial, (d) alimentação não axial (Adaptado de [22])

## 2.2. Materiais metálicos mais comuns no FA

Existem vários tipos de materiais e ligas metálicas que podem ser utilizadas no fabrico aditivo. A sua escolha está condicionada pelas aplicações previstas para os componentes e a sua adaptabilidade ao processo de deposição.

A quantidade de materiais a utilizar no FA, atualmente, é bastante reduzida, contudo, devido ao elevado potencial destes processos, cada vez mais materiais são estudados e combinados de forma a serem adaptáveis a este método.

### **i) Metais Puros**

O Fabrico Aditivo com metais puros é muito complexo uma vez que estes apresentam propriedades mecânicas fracas, [24]. A literatura refere a utilização de alguns elementos como o titânio, o ouro e o cobre puro com algum realce, embora destacando alguns pontos negativos associados à utilização de alguns deles. O titânio apresenta uma boa resistência específica, sendo bastante utilizado sobretudo na indústria biomédica, [25]. Já o ouro apresenta um elevado nível de porosidade, o que dificulta a adesão entre camadas, [26]. Relativamente à utilização do cobre é referida a formação de peças de baixa densidade devido à sua elevada condutividade térmica e elétrica, [27].

Outros estudos demonstram que a utilização de elementos como o Ferro ou o Nióbio apresentam irregularidades quando os componentes são fabricados por processos de FA, o que não se verifica em métodos convencionais, [28].

### **ii) Ligas Metálicas (Pre-alloyed metals)**

Comercialmente existem algumas ligas mais comuns para a utilização em métodos de FA. Entre elas destacam-se as ligas de Ferro, Alumínio, Titânio, Cobalto e Níquel.

Até à data, as ligas de ferro são as ligas mais comuns na área da engenharia, apresentando, no entanto, apenas uma pequena fração das ligas utilizadas em métodos de FA, [4].

As Ligas de níquel apresentam um elevado limite elástico, elevada resistência à corrosão e elevadas temperaturas de operação. Desta forma são muito utilizadas na indústria marítima, nuclear e aeroespacial, representando uma elevada importância nos avanços das tecnologias de FA, [24].

Tal como as ligas de níquel, as ligas de cobalto apresentam boas propriedades, entre elas elevada resistência à fadiga, permitindo a aplicação na indústria aeroespacial e nuclear. Apresentam, também, excelente biocompatibilidade, sendo muito aplicadas na área dentária e ortopédica, [29], [30].

As ligas de alumínio são muito utilizadas nos processos de FA, quando combinadas com Mg, Si ou Cu. No entanto, ligas mais comuns como a 7075 e a 6061 são mais suscetíveis à formação de fissuração a quente, devido à existência de estruturas de grão colunares de elevada dimensão, nas zonas intercolunares, [31].

Assim sendo, embora as ligas de alumínio apresentem alguns problemas de implementação nos processos de FA, é possível arranjar soluções que tornam estas ligas elegíveis para o processo, [32].

As ligas de titânio apresentam uma extrema relevância na indústria aeroespacial, sendo capazes de suportar cargas elevadas. No entanto, este material apresenta diversos desafios no seu processamento por métodos convencionais, revelando o seu potencial quando aplicado em processos de FA, o que resulta em componentes complexos e excepcionalmente resistentes, [33].

A liga de titânio mais comum nos processos de FA é a liga Ti6-Al-4V que apresenta estruturas bifásicas do tipo  $\alpha+\beta$ . Esta liga apresenta uma elevada resistência à corrosão e elevada resistência mecânica, sendo ideal para aplicações biomédicas, [34].

### 2.3. 3DPMD (Deposição 3D de Metal por Plasma)

O processo de deposição 3DPMD é um processo recente que tem por base o processo clássico de arco de plasma, conhecido por PTA, sendo capaz de criar objetos a 3 dimensões, possibilitando a produção de peças ou a reparação de componentes e moldes metálicos.

Este método combina o PTA (Plasma transfer arc) com um suporte robótico, como por exemplo uma máquina CNC, juntando assim um processo clássico a uma tecnologia recente.

O desenvolvimento de componentes inicia-se com recurso a um software CAD que efetua o *slicing* do componente em camadas sobrepostas. Em seguida, e ainda durante o processamento, o pó vai ser extrudido, podendo ser uma mistura de até quatro materiais, formando o cordão. Esta facilidade na mistura de componentes, permite variar os seus rácios em função do local e da camada depositada, levando a um ajuste e controlo das propriedades ou microestrutura se necessário, [35].

Na figura 6 podemos observar um esquema do processo em questão.

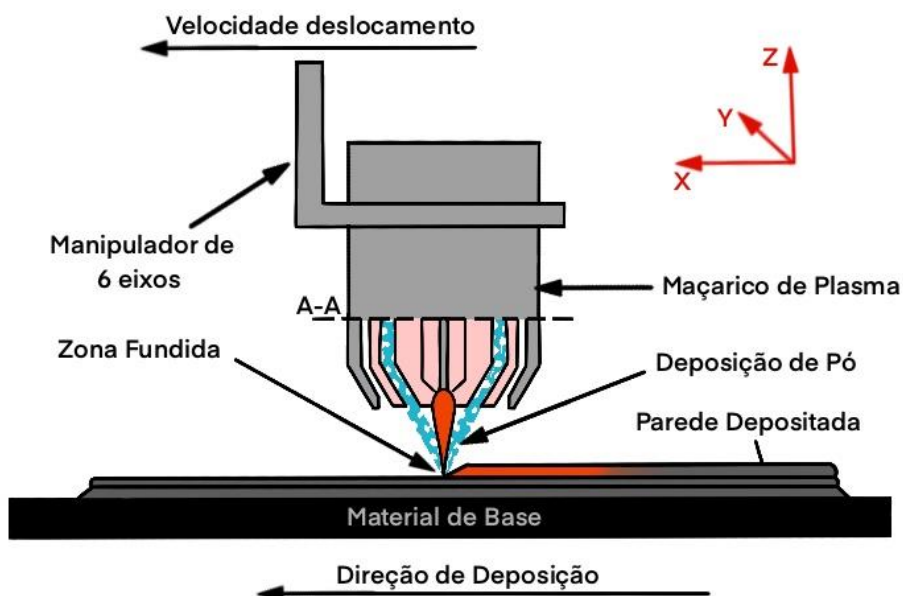


Figura 6 – Esquema do processo 3DPMD (Adaptado de [35])

Uma vez que este método utiliza como base o processo PTA, é possível verificar os parâmetros de influência do mesmo, como sendo, também, os parâmetros para o processo 3DPMD.

Em oposição a outros processos de fabrico aditivo, o PTA recorre a um elevado número de parâmetros que podem ser ajustados independentemente uns dos outros, resultando numa elevada flexibilidade nos resultados possíveis de obter com este método. Assim, com o objetivo de facilitar a visualização dos diversos parâmetros, e as subcategorias em que se encontram, é apresentada na figura 7 um fluxograma demonstrativo.

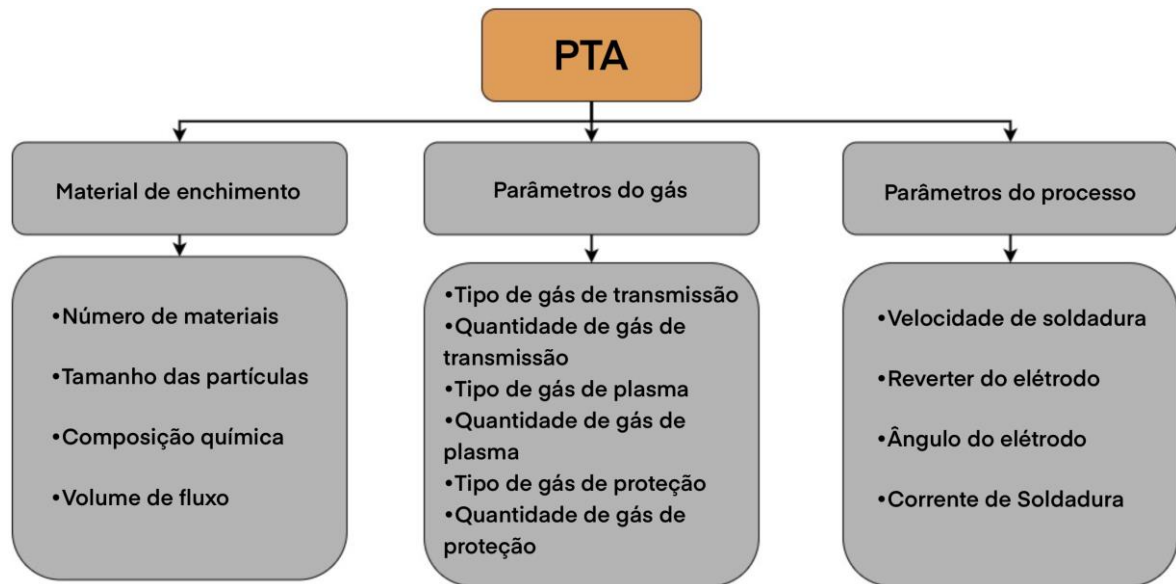


Figura 7 – Fluxograma demonstrativo dos diversos parâmetros de influência ao processo PTA (Adaptado de [35])

## 2.4. Deposição e microestrutura

Para que seja possível caracterizar corretamente o processo de deposição e os componentes fabricados pelo processo FA, é necessário estudar o processo de deposição simples e o processo de deposição multicamada, analisando como estas deposições são influenciadas e como é que estas vão influenciar todo o processo de desenvolvimento das geometrias desejadas.

Primeiramente é necessário fazer a distinção entre o que se designa de deposição simples e aquilo que se designa de deposição multicamada.

A deposição simples é o processo onde nos métodos FA, o material é extrudido e depositado sobre um material de base, num estado fundido, permitindo a sua adesão ao mesmo, sendo semelhante a um processo de soldadura.

Quando o processo de deposição simples é repetido ciclicamente variando na direção do eixo Z, é obtida uma deposição multicamada, onde as camadas são depositadas umas sobre as outras, transferindo calor entre elas e permitindo a sua adesão, formando a geometria pretendida como pode ser observado na figura 8.

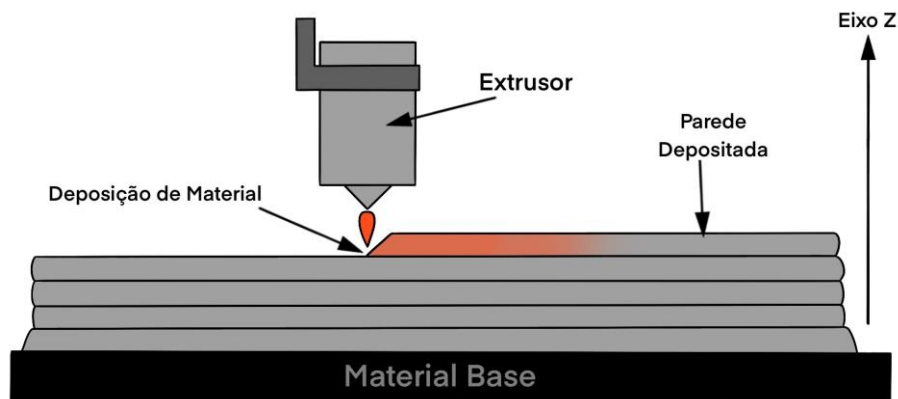


Figura 8 – Representação esquemática de uma deposição multicamada

Desta forma, será primeiro descrita a deposição simples e o comportamento da mesma, seguindo-se a deposição multicamada e como esta influencia o processo a nível mecânico, geométrico, térmico e microestrutural.

### 2.4.1. Processo de deposição

Como previamente mencionado, os diversos processos DED, incluindo o 3DPMD, funcionam depositando consecutivas camadas de material metálico. Este material encontra-se fundido, permitindo a sua deposição e ligação com o material de base ou com o material previamente depositado. No entanto, para que a deposição ocorra corretamente, diversos parâmetros devem ser tomados em consideração, uma vez que estes vão influenciar ativamente os cordões singulares depositados e as deposições multicamada. Para os processos DED, os parâmetros mais importantes são descritos na tabela 2.

Tabela 2 – Descrição dos parâmetros de influência nos processos DED (Adaptado de [35] – [38])

Parâmetros	Unidades
Intensidade de corrente	A
Velocidade de translação	(mm/s)
Fluxo de deposição de pó	(g/min)

O estudo realizado por Perez-Soriano et al. [36], analisa experimentalmente diversas configurações de valores dos parâmetros descritos, realizando diversas deposições singulares. A observação e a comparação dos efeitos das variações desses parâmetros podem ser realizados na figura 9, assim como o resumo dos parâmetros utilizados na tabela 3.

Tabela 3 – Resumo dos parâmetros utilizados na deposição dos cordões singulares no estudo de Perez-Soriano et al. (Adaptado de [35])

Parâmetros	Cordões											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Intensidade de Corrente [A]	120	140	180	220	120	120	140	160	140	180	220	250
Velocidade de Translação [mm/min]	200	200	200	200	200	100	100	100	300	300	300	400
Fluxo de deposição do pó [g/min]	13,5	13,5	13,5	13,5	11,0	11,0	11,0	11,0	29,0	29,0	29,0	43,5



Figura 9 – Cordões realizados por Perez-Soriano et al. testando diversas configurações de parâmetros (Adaptado de [36])

Este estudo permitiu, recorrendo a uma análise visual, verificar que os cordões que apresentam uma melhor geometria, qualidade superficial e homogeneidade são os cordões 6,7 e 10.

Este comportamento foi também estudado por G. Liu et al., recorrendo a um processo CMT (*Cold Metal Transfer*), no entanto, a escolha das condições de impressão foi realizada mantendo o valor da velocidade de deposição constante (20; 30 e 40 cm/min) e variando o fluxo de deposição em 6 valores diferentes (3; 4; 5; 6; 7 e 8 cm/min). Na figura 10 pode ser observada a qualidade superficial e a estabilidade dos cordões obtidos.

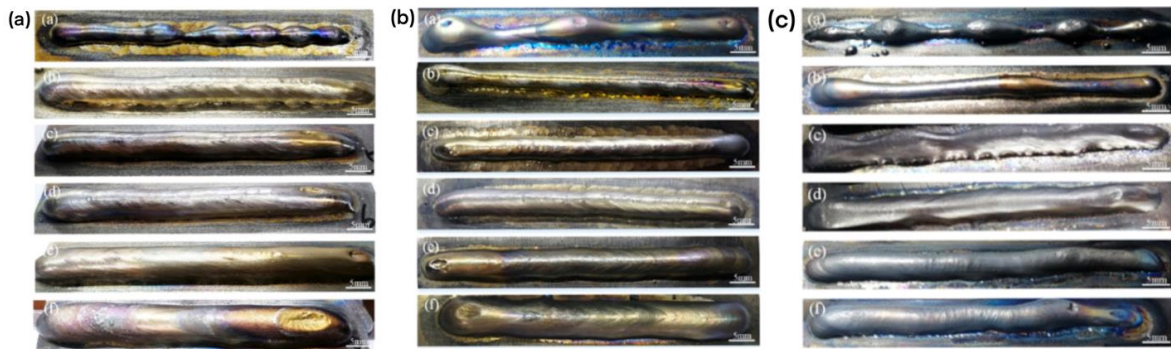


Figura 10 – Morfologia macroscópica de cordões produzidos por CMT, variando a taxa de material depositado a-f (3,4,5,6,7 e 8 m/min respectivamente) e mantendo o valor de velocidade de deposição. (a) velocidade de deposição = 20 cm/min; (b) velocidade de deposição = 30 cm/min; (c) velocidade de deposição = 40 cm/min (Adaptado de [40])

Desta forma é possível verificar que estes parâmetros não devem ser estudados individualmente uma vez que a influência resulta da combinação dos mesmos. Para além disso, os resultados que estes estudos permitem é a verificação de que existem condições mais adequadas que outras, tornando necessário um estudo das parametrizações e possível otimização das mesmas, para os diversos métodos e materiais a aplicar.

Para além da qualidade e homogeneidade dos cordões, os diversos parâmetros mencionados, em junção com alguns fenómenos físicos, vão afetar o banho líquido (*melt pool*) formado. Esta *melt pool* formada nos processos FA é muito semelhante à verificada no processo de soldadura por laser, sendo extremamente importante na qualidade global dos cordões e das peças a produzir, [41].

Alguns dos fenómenos físicos mencionados são a pressão de ablação, efeito de plumas de vapor, tensão superficial, gravidade, efeito de Marangoni<sup>1</sup>, pressão de contração. Estes vão definir o tipo de “melt pool” que se forma, fazendo variar as dimensões do cordão e a diluição que este apresenta. Na formação da “melt pool” podem ser verificados dois fenómenos:

- i) A condução, onde o material é fundido localmente formando um banho de material fundido, sendo caracterizado por uma elipse longa e superficial que atenua os seus efeitos, [42].
- ii) A formação de um *keyhole*, que se verifica quando a energia fornecida é muito elevada, formando um banho de material fundido profundo, onde o material vai evaporar, formando-se porosidades, como pode ser observado na figura 11, [42], [43].

<sup>1</sup> O efeito de Marangoni (efeito de Gibbs-Marangoni) caracteriza-se pela transferência de massa ao longo de uma interface entre dois fluidos devido ao gradiente de tensão superficial. Se houver dependência com a temperatura, chamamos a esse efeito convecção termocapilar.

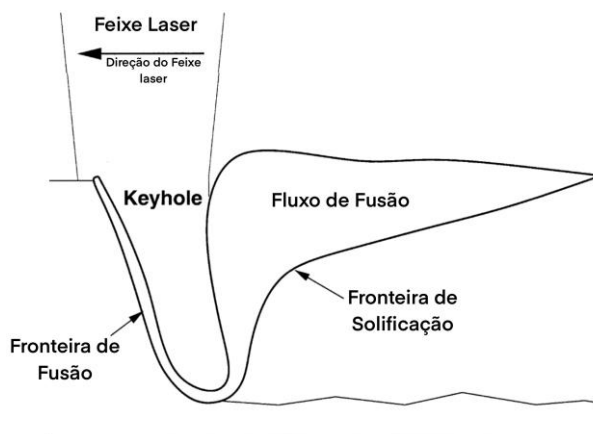


Figura 11 – Diagrama da formação de *Keyhole* através do processo de soldadura a laser

### 2.4.2. Influência da deposição multicamada a nível mecânico e geométrico

Os efeitos estudados para deposições singulares, quando transpostos para deposições multicamada, vão ser exponenciados e representar um impacto muito superior.

Nos processos DED, a formação das geometrias baseia-se na deposição de material sobre uma superfície, ao contrário de outros processos onde o material já se encontra numa cama de pó. Assim sendo, o material depositado não vai apresentar qualquer tipo de suporte lateral, sendo apenas suportado pela camada previamente depositada, como pode ser observado no esquema da figura 12.

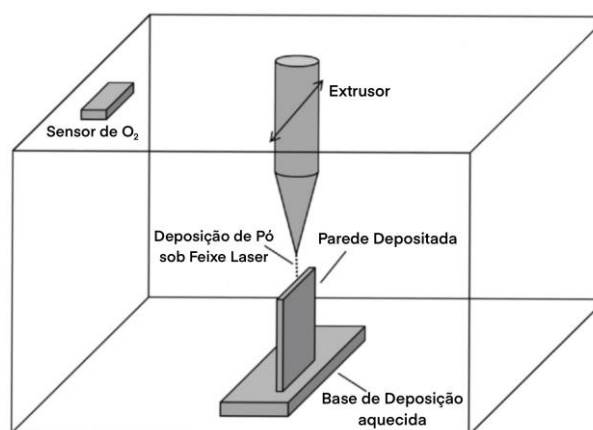


Figura 12 – Diagrama representativo do processo DED (Adaptado de [38])

Esta característica particular leva a uma dificuldade no fabrico de geometrias como, por exemplo, a formação de uma parede de espessura fina ou com uma altura elevada (figura 12) [44], tornando necessário um controlo elevado da deposição e dos parâmetros utilizados, uma vez que estes serão os grandes aliados na produção das geometrias pretendidas.

Para o processo FA de componentes metálicos, as ligas utilizadas são sujeitas a variações de aquecimento, de fusão e de ciclos de aquecimento e arrefecimento bruscos, que são responsáveis pela deformação das peças a desenvolver. Assim sendo, os materiais a utilizar devem ser selecionados com atenção para que, em junção com os parâmetros de impressão, seja atingido um bom aspeto geométrico e uma boa adesão entre camadas, [45].

### i) Aspeto geométrico

A não conformidade geométrica das peças produzidas por processos FA, induzida por distorções térmicas, pode ser causada pela expansão e contração não uniforme de diferentes regiões da deposição. A distorção térmica pode depender de diversos fatores como, as propriedades das ligas, o calor a que o material é submetido, o tempo de deposição, as dimensões dos substratos, a geometria do componente, o tempo entre deposições, entre outros, [45].

É importante saber que as variações térmicas advêm do facto de, ao depositar camadas sucessivamente, o calor da camada depositada ser transferido para as camadas inferiores, tendo sempre em conta que as camadas inferiores podem, ou não, apresentar uma temperatura elevada proveniente ainda da sua própria deposição. Desta forma, o tempo entre o qual as camadas são depositadas tem de ser estudado e otimizado.

Na imagem da figura 13, é possível observar como os mecanismos de aquecimento e arrefecimento vão afetar o material depositado, bem como influenciar nas deposições multicamada.

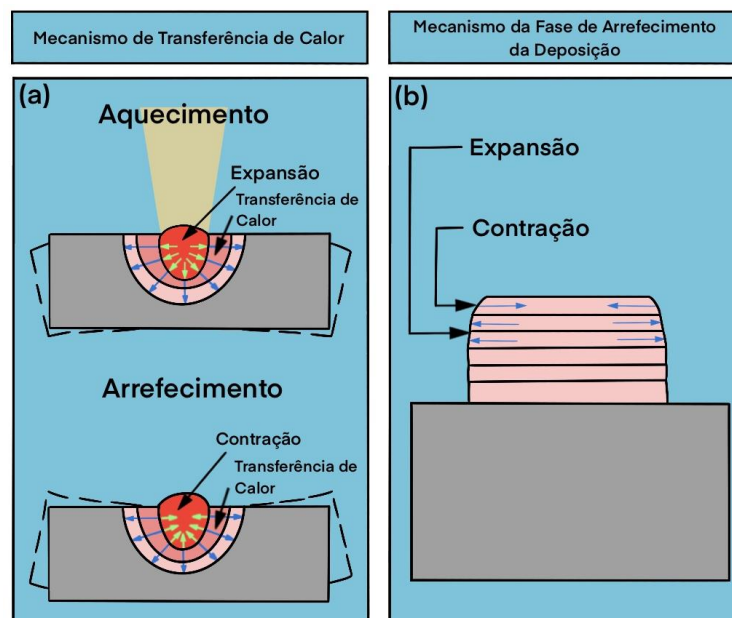


Figura 13 – Esquemas representativos sobre mecanismos de contração e expansão de deposições multicamada (Adaptado de [46])

Como se pode verificar na figura 13 (b), as temperaturas existentes no processo de deposição, bem como o seu arrefecimento, vão afetar a qualidade geométrica das sobreposições. Assim, o

estudo levado a cabo por A. Waqas et al. [47], incide sobre a forma como é possível controlar a deposição variando os parâmetros do processo. Para a componente experimental os autores recorreram ao GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) para realizar sobreposições de diversas camadas. Inicialmente foram realizadas paredes de espessura reduzida mantendo os parâmetros constantes, verificando-se que este método é pouco efetivo, uma vez que ocorria o abatimento das paredes como observado na figura 14.



Figura 14 – Más formações na produção de uma deposição multicamada mantendo os parâmetros de impressão fixos (Adaptado de [47])

De forma a resolver este problema, foram analisados diversos parâmetros, entre eles a intensidade de corrente, a voltagem, a energia para soldadura e a velocidade de avanço. Estes parâmetros foram variando entre camadas, compensando o efeito da transferência de energia para as camadas previamente depositadas. Os valores de intensidade de corrente, de voltagem e de velocidade foram reduzidos gradualmente ao longo de seis camadas depositadas, apenas sendo mantida a energia. Assim, foi encontrado um equilíbrio e uma estabilidade que permitiram a formação de paredes com 8, 31 e 48 camadas. A ilustração do resultado conseguido e os gráficos respectivos com a variação das alturas obtidas podem ser observados na figura 15.

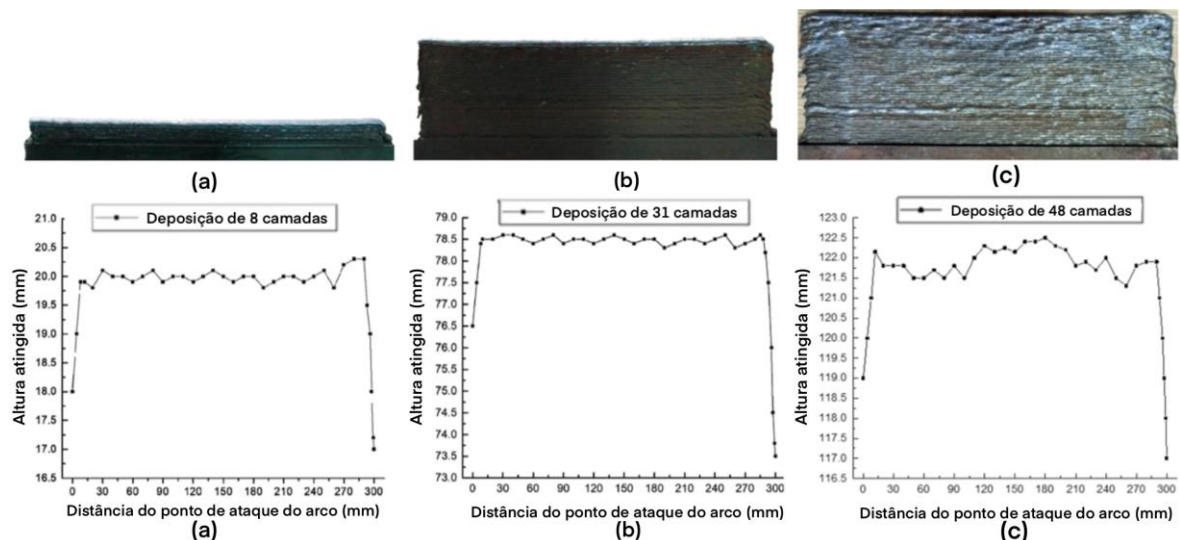


Figura 15 – Deposições de 8, 31 e 48 camadas e gráficos correspondentes demonstrando as alturas atingidas em cada parede após estabilização de parâmetros de impressão (Adaptado de [47])

É possível perceber que a variação de parâmetros do processo é uma forma de controlar e otimizar as deposições multicamada, quando se pretende a formação de geometrias utilizando o

mesmo material. É também possível verificar que a redução dos valores dos parâmetros permitiu estabilizar de forma eficiente a deposição, contrariando a formação de distorções devidas aos ciclos térmicos.

Contudo, existem outros métodos de controlo das deposições multicamada, nomeadamente variando os materiais ao longo da deposição ou recorrendo a processos híbridos.

Como mencionado, é possível combater distorções e más formações nas deposições multicamada recorrendo a métodos onde não se variam os parâmetros do processo, mas sim os materiais aplicados, podendo utilizar-se ligas diferentes ou utilizar o mesmo material, variando as concentrações dos elementos constituintes. Desta forma, diversos métodos de deposição, citados por [48], [49], podem ser utilizados para a obtenção dos resultados pretendidos, como pode ser observado na figura 16.

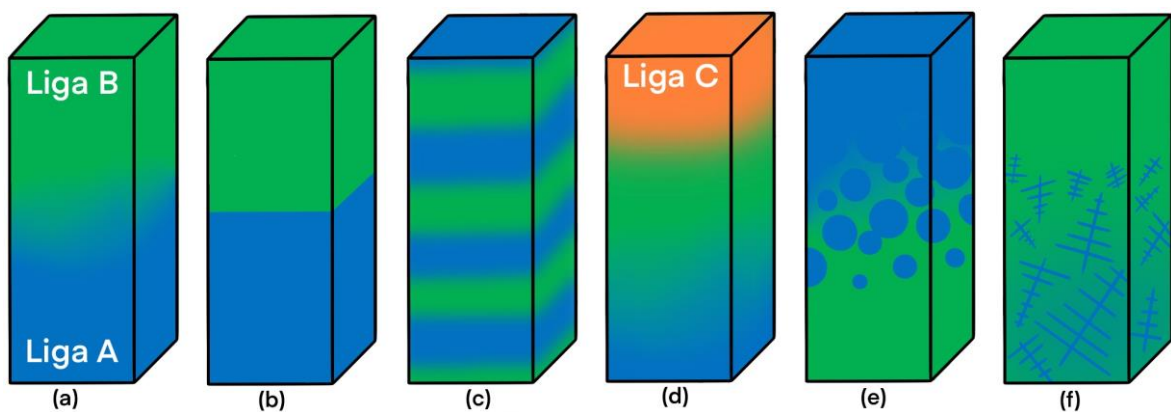


Figura 16 – Esquema sobre possíveis gradientes de deposição utilizando ligas dispaes ou variando as suas composições (Adaptado de [48], [49])

Este processo permite o controlo da micromecânica das diversas composições obtidas, permitindo não só a realização de deposições estáveis como o estudo microscópico e microestrutural apenas fabricando uma amostra em vez de produzir diversas amostras que apresentam somente uma composição, [49]. Este método é citado no estudo de D. D. Lima et al. [50], onde, recorrendo a um método de LENS (*Laser Engineered Net Shaping*), é realizada uma sobreposição multicamada com 55 mm. Esta deposição foi dividida em três regiões, variando as composições da liga utilizada em cada uma delas. Na figura 17, é possível observar a sobreposição realizada, a peça resultante da maquinação efetuada posteriormente e o diagrama representativo que ilustra as cinco regiões de deposição bem como as composições correspondentes.

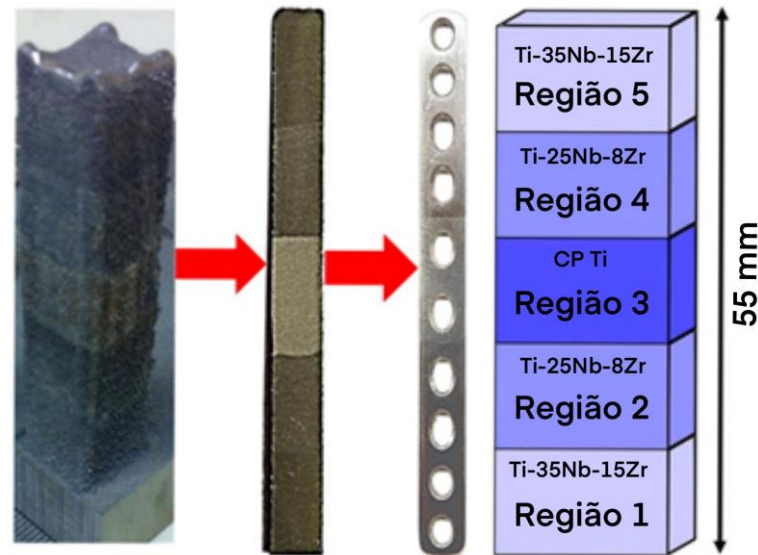


Figura 17 – Produção de um componente por deposição multicamada com variação de composições para ligas de titânio (Adaptado de [50])

Como se pode verificar, a produção de deposições multicamada, utilizando um gradiente de diversas composições de uma liga à escolha, é também uma alternativa para o controlo da deposição, uma vez que a variação das composições ajuda a combater as distorções e transições energéticas entre camadas, formando uma deposição estável, como observado na figura 17.

Estudos realizados por [51] e [52] apresentam um processo híbrido para o fabrico estável de deposições multicamada. Uma vez que a produção de componentes por FA apresenta muitas vezes poros, impurezas e problemas na adesão, [52], são expostas duas soluções para melhorar este comportamento, centrando-se na junção do processo FA com um processo de conformação, formando assim o que se designa por método híbrido.

Este método resulta da compressão dos cordões depositados, por ação de um rolo ou de um martelo de conformação. A ação destas cargas é realizada logo após a deposição do cordão, favorecendo assim a adesão da camada. Os dois mecanismos descritos podem ser visualizados na figura 18.

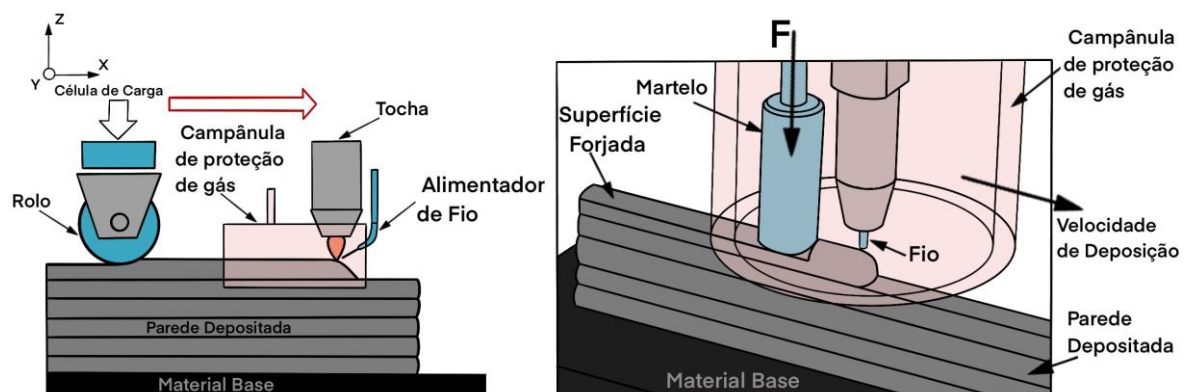


Figura 18 – Representação esquemática de processos híbridos de fabrico aditivo com metais (Adaptado de [52])

Estes métodos têm um efeito positivo na adesão entre camadas, reduzindo os defeitos mais comuns dos processos FA de metais. De acordo com E. Maleki et al. [51], é também possível verificar que, se os parâmetros de impressão já estiverem devidamente otimizados, os processos híbridos podem levar ao refinamento do grão.

Comprovando estes resultados, E. Maleki et al. realizaram o processo híbrido com rolos, na superfície da deposição e nas superfícies laterais das paredes formadas, aplicando diferentes cargas, como se pode verificar na figura 19.

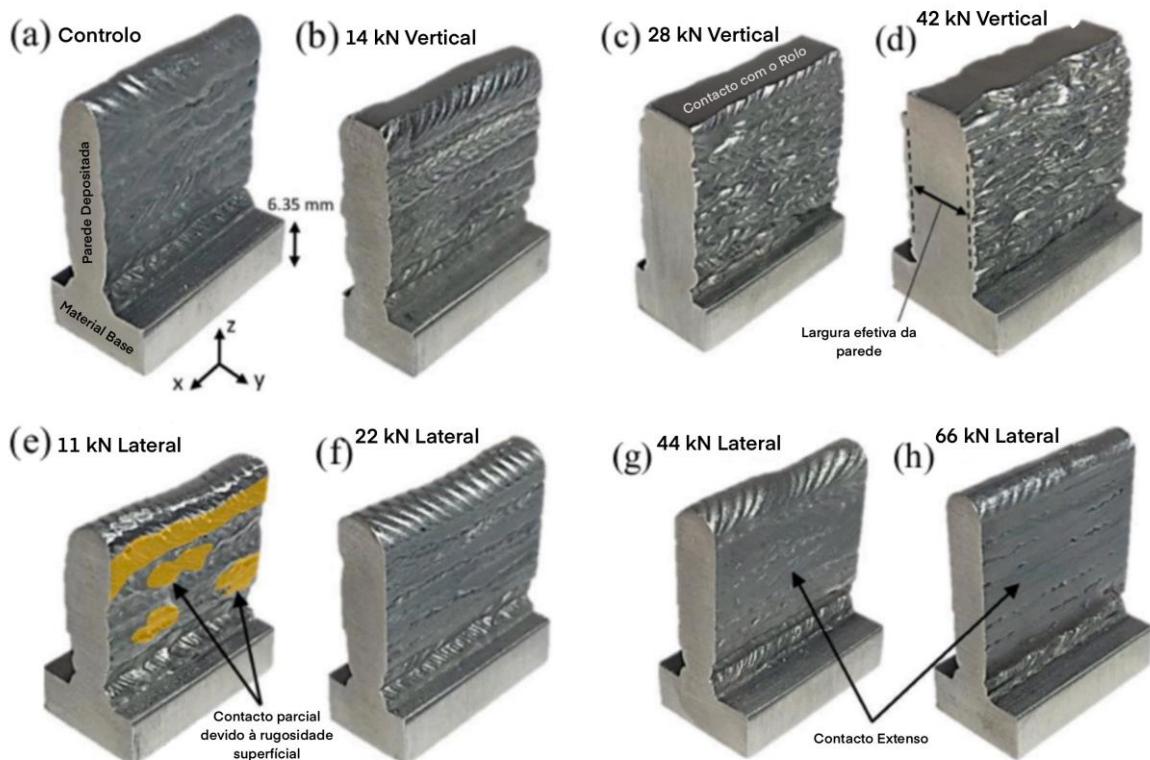


Figura 19 – Apresentação visual do efeito de aplicação de processos híbridos em paredes de deposição multicamada (Adaptado de [51])

Com o aumento da carga aplicada aquando da compressão superior da parede, a espessura da parede vai aumentando, fazendo com que a largura efetiva aumente também (largura que se obtém após maquinação das superfícies). É também possível verificar que com o aumento da carga aplicada nas superfícies laterais, se obtém um melhor acabamento superficial e geométrico.

## ii) Adesão entre camadas

A falha da adesão é causada maioritariamente pela incorreta penetração do material fundido ao material de base ou à camada previamente depositada, [45]. Esta incorreta penetração vai ser verificada quando a escolha de parâmetros levar a uma formação exagerada da *melt pool*, o que vai diminuir as propriedades superficiais e degradá-las.

Se as ligas utilizadas apresentarem uma baixa resistência à oxidação e a deposição for lenta, é possível verificar a formação de filmes de óxidos na superfície dos cordões depositados, o que vai reduzir bastante a adesão entre as camadas a depositar, uma vez que não permite que o material flua, [32], [53].

A porosidade é outro defeito bastante comum que afeta ativamente a adesão entre camadas e prejudica as propriedades mecânicas dos componentes a desenvolver. Este defeito desenvolve-se normalmente por má escolha de parâmetros de impressão, já que estes vão levar a uma *melt pool* inconveniente que, evoluindo para um *keyhole*, combinado com arrefecimentos rápidos leva à formação de vazios e porosidades nos cordões.

Para além deste defeito, os métodos DED utilizam gases de proteção que podem ficar retidos no material fundido sem possibilidade de se libertarem. De acordo com [52] – [54], a deposição de material fundido a altas temperaturas leva também ao superaquecimento do material, fazendo com este expanda e solidifique formando porosidades. A formação de poros de grande e pequena dimensões e fendas é apresentada na figura 20.

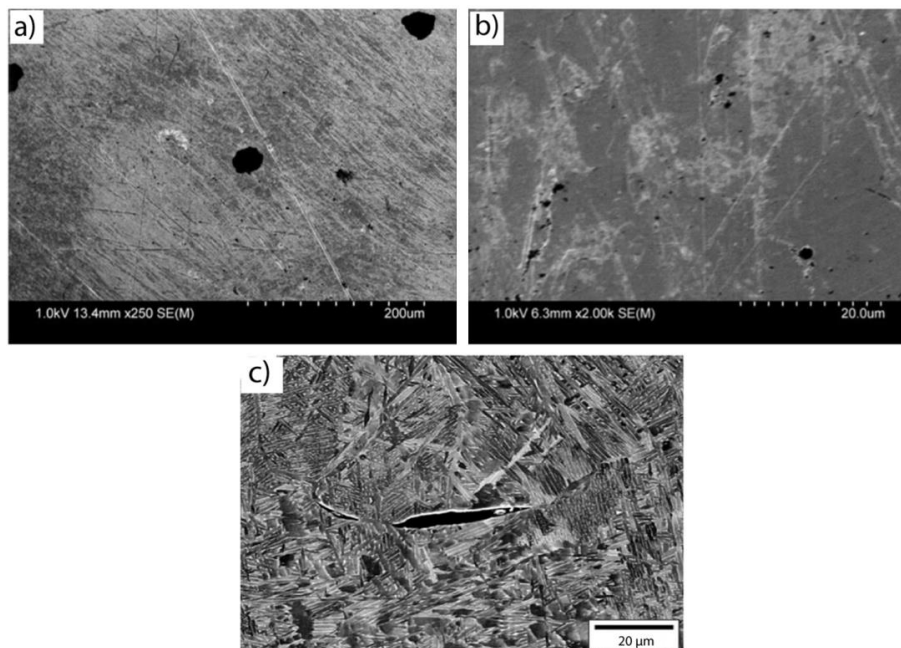


Figura 20 – Defeitos comuns no Fabrico Aditivo de Metais (a) Poros de elevada dimensão (20  $\mu\text{m}$ ); (b) Micro poros em 316L (200  $\mu\text{m}$ ); (c) Falha na fusão entre camadas depositadas (Adaptado de [32])

Na figura 20 (c), verificamos que, quando existe acumulação de porosidades nas zonas de ligação entre camadas, pode ocorrer a formação de fendas que diminuem a adesão entre camadas.

Para além dos efeitos geométricos e mecânicos que se verificam nos comportamentos estudados, como a formação da *melt pool*, os ciclos térmicos elevados, a escolha dos parâmetros, as porosidades, os métodos de deposição e possíveis tratamentos, vão afetar as deposições a nível microscópico, alterando a microestrutura, as composições químicas, as microdurezas, entre outros, como será abordado no subcapítulo seguinte.

### 2.4.3. Influência da deposição multicamada a nível térmico e microestrutural

#### i) Microestrutura

Durante o processo FA, as camadas depositadas são submetidas a ciclos térmicos complexos, envolvendo aquecimentos rápidos acima da temperatura de fusão e solidificação do material fundido, levando a que as diversas camadas da geometria sejam submetidas a diversos ciclos sempre que a nova deposição ocorre. Este comportamento, para além de levar aos macroproblemas verificados anteriormente, vão levar a microestruturas metaestáveis e sem equilíbrio na sua composição, podendo ser verificada esta variação entre as diversas camadas, [4]. No estudo realizado por [56], é possível estabelecer uma dependência entre as estruturas formadas e a posição da camada na estrutura a produzir, como é possível observar na figura 21.

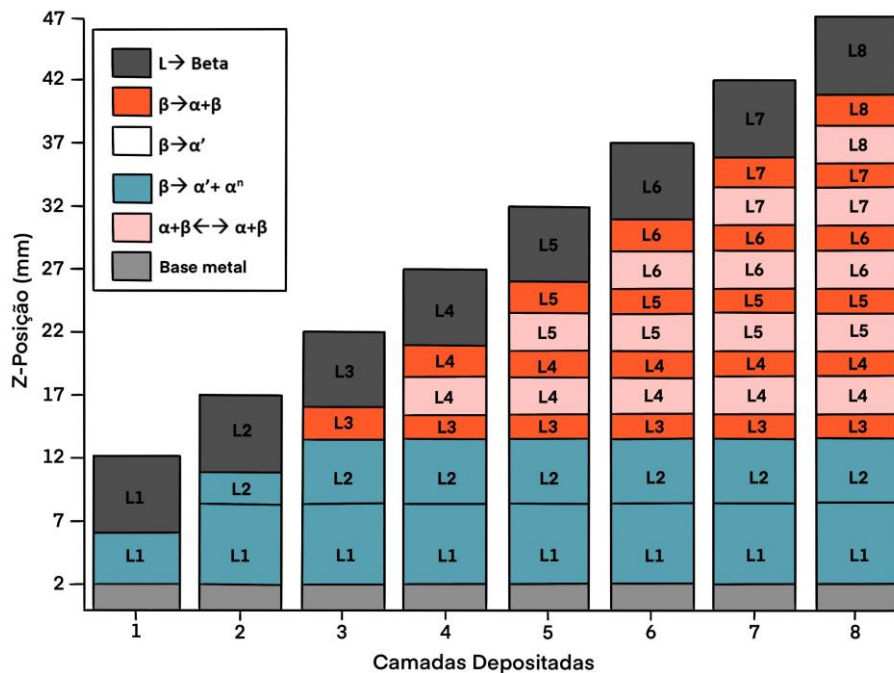


Figura 21 – Representação esquemática das estruturas formadas ao longo da deposição multicamada de paredes finas (Adaptado de [56])

É também possível verificar que a microestrutura obtida em cada camada varia dentro da mesma, o que significa que, para além do posicionamento da camada, existem outros fenómenos capazes de influenciar a microestrutura formada. Normalmente, e como observado na figura 21, as geometrias e composições da microestrutura variam de uma forma semelhante nas camadas intermédias, uma vez que nestas zonas os ciclos térmicos aplicados vão ser semelhantes.

Para melhor entendimento, é apresentada a figura 22 onde se observa, de forma esquemática e mais aproximada, a evolução da geometria do grão pelas camadas depositadas.

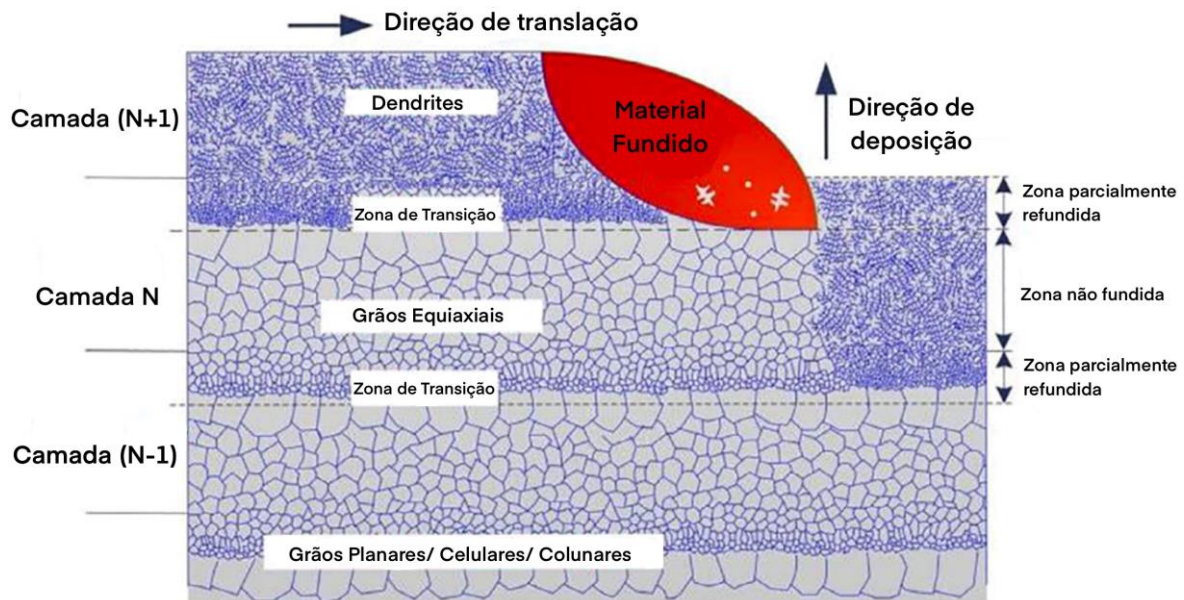


Figura 22 – Esquema da evolução do grão ao longo da deposição multicamada (Adaptado de [2])

Como se pode observar, e comprovando o comportamento descrito na figura 22, existe uma consistência na formação de grão nas camadas intermédias, sendo que nas zonas de junção entre camadas se verifica uma geometria e no cordão se verifica outra. Para além deste fenómeno, é também possível verificar que a última camada depositada apresenta uma geometria distinta.

O crescimento do grão pode ser celular, planar ou dendrítico, dividindo esta última geometria em colunar ou equiaxial, sendo que em circunstâncias especiais podem ser amorfos ou apresentar morfologias cristalinas singulares. Estas geometrias dependem da velocidade da solidificação e da composição do material, [32].

Na figura 23 é ainda possível observar como ocorre a formação destas geometrias junto da zona fundida.

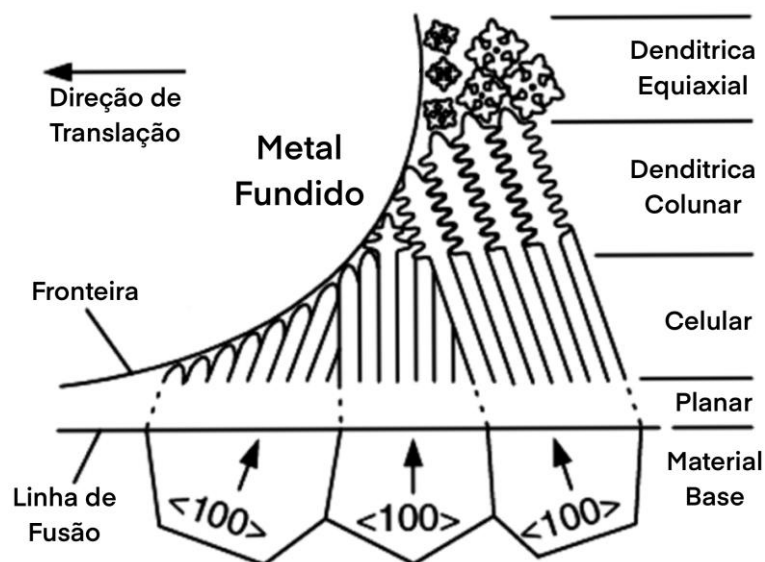


Figura 23 – Representação esquemática do desenvolvimento e orientação das estruturas cristalinas formadas durante o processo de soldadura semelhante ao método FA (Adaptado de [32])

A formação das geometrias planares, celulares e dendríticas colunares verificadas constituem a zona de transição entre camadas na figura 22, enquanto as dendrites iniciais evoluem para dendrites equiaxiais quando submetidas a diversos ciclos térmicos.

O desenvolvimento destas geometrias pode ser também descrito em função do gradiente de temperatura e da taxa de crescimento, como pode ser observado na figura 24.

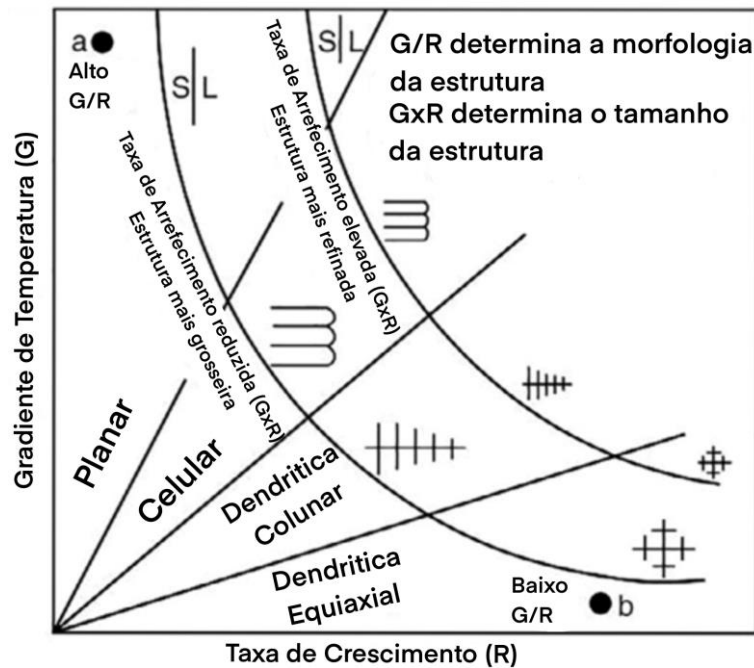


Figura 24 – Esquema da formação de estruturas em função do gradiente de temperatura e taxa de crescimento (Adaptado de [44])

Quanto maior o gradiente de temperatura mais estruturas planares e celulares se vão formar, o que pode ser verificado nas figuras 21, 22 e 23, onde se verifica que estas estruturas são formadas na zona limite entre camadas, onde a transferência de calor é mais elevada.

G. Liu et al. [40], recorrendo a *transferência de metal a frio* (CMT), produziu uma parede de NiTi, e analisou a microestrutura da mesma, numa secção transversal preparada para o estudo em questão. Desta forma, apresenta, como pode ser observada na figura 25, a secção transversal identificando as zonas estudadas e respetivas microestruturas.

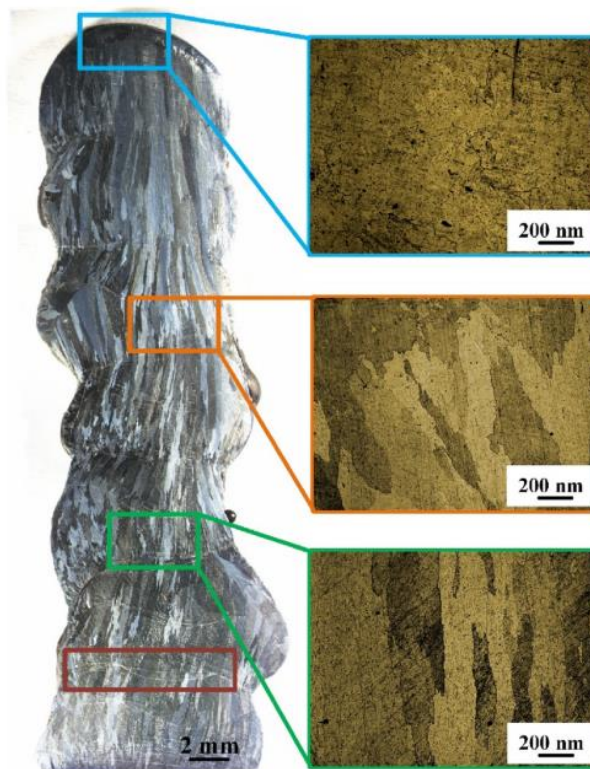


Figura 25 – Secção transversal de uma parede de NiTi realizada por CMT e apresentação das microestruturas nas zonas inferior, intermédia e superior da mesma (Adaptado de [40])

As microestruturas no topo e meio da parede apresentam a mesma ampliação (200 nm), podendo ser comparadas diretamente. A partir desta comparação é possível verificar que o grão é muito mais reduzido no topo da parede, uma vez que o gradiente térmico, por falta de ciclos térmicos, é mais reduzido, enquanto o tamanho do grão é superior nas microestruturas das zonas intermédias da parede, que são semelhantes entre elas.

Já K. Hofer et al. [35] produziram um bloco de titânio puro, recorrendo ao método 3DPMP, e analisaram a microestrutura em 4 zonas distintas, como observado na figura 26.

Com esta análise, é possível verificar que a microestrutura do material de base é muito diferente da microestrutura do material depositado, como seria de esperar. É também concluído que as camadas mais próximas da base apresentam uma maior concentração de estruturas  $\alpha^2$ , o que pode ser explicado por tempos de arrefecimento mais lentos e posteriores ciclos térmicos aplicados.

---

<sup>2</sup> Estruturas  $\alpha$  - São estruturas monofásicas que possuem elementos que inibem a transformação de fase e aumentam a temperatura de transformação.

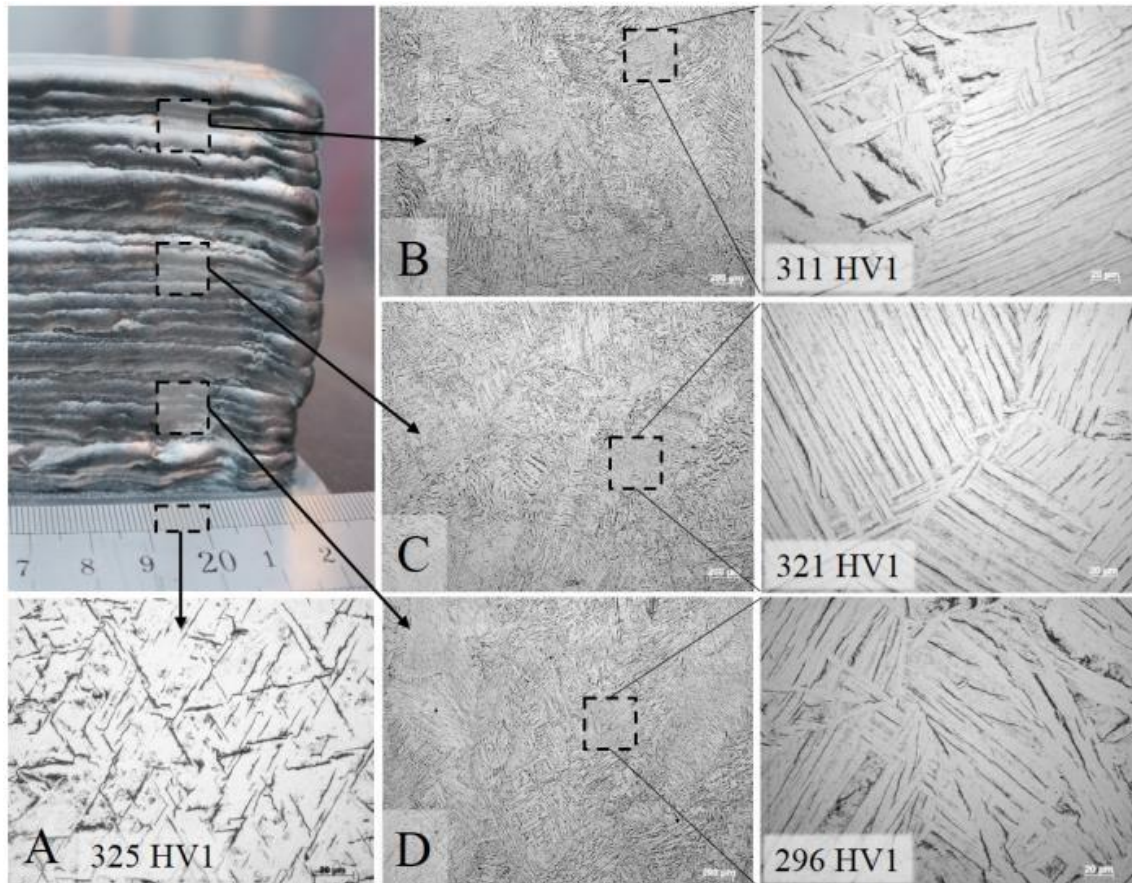


Figura 26 – Comparação da microestrutura formada nas zonas superior, intermédia, inferior e material de base, numa construção de deposição multicamada em titânio puro recorrendo ao método 3DPMD (Adaptado de [35])

No estudo realizado por D. Herzog et al. [4], é analisada a microestrutura de quatro paredes de deposição multicamada, recorrendo a um processo LBM e a uma liga de titânio (Ti-6Al-4V), sendo feita a comparação das mesmas, verificando a correlação da microestrutura formada com a largura do cordão. As microestruturas obtidas podem ser observadas na figura 27.

Esta análise permite perceber que a formação da microestrutura vai ser, também, dependente da largura do cordão, sendo que certas larguras permitem obter um melhor refinamento e homogeneidade do grão.

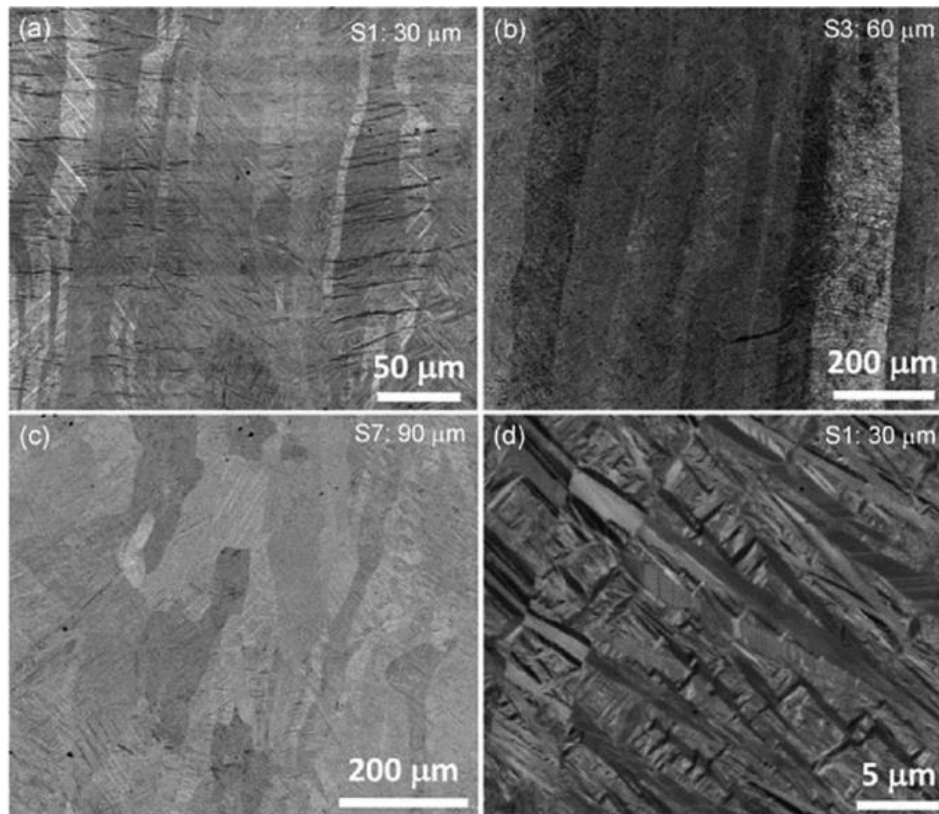


Figura 27 – Apresentação da microestrutura formada, para Ti-6Al-4V, por influência da espessura da camada depositada (Adaptado de [4])

Como previamente mencionado, existem processos híbridos que vão combinar os métodos FA, com forjamento direto das camadas depositadas, sendo interessante perceber a influência deste processo na microestrutura final.

No estudo realizado por J. Doroghur et al. [57], é apresentado um mapa do tamanho do grão  $\beta^3$ , para paredes submetidas a compressão, em uma ou mais camadas, como se pode observar na figura 28.

Com a realização destes testes, é possível verificar que, para a situação c) e d), onde a carga é aplicada em todas as camadas, existe um refinamento do grão no centro do cordão e uma formação de grãos de maior dimensão na periferia. Para além disto, para qualquer das situações (carga nas últimas camadas ou carga em todas as camadas), a utilização de uma carga mais elevada aumenta o efeito de refinamento e diferenciação do grão.

---

<sup>3</sup> Grão  $\beta$  – São estruturas metaestáveis que tendem, em condições de equilíbrio termodinâmico, a transformarem-se em ligas bifásicas. Apresentam elevada conformidade, maior densidade, maior fragilidade a baixas temperaturas e menor resistência à fluência.

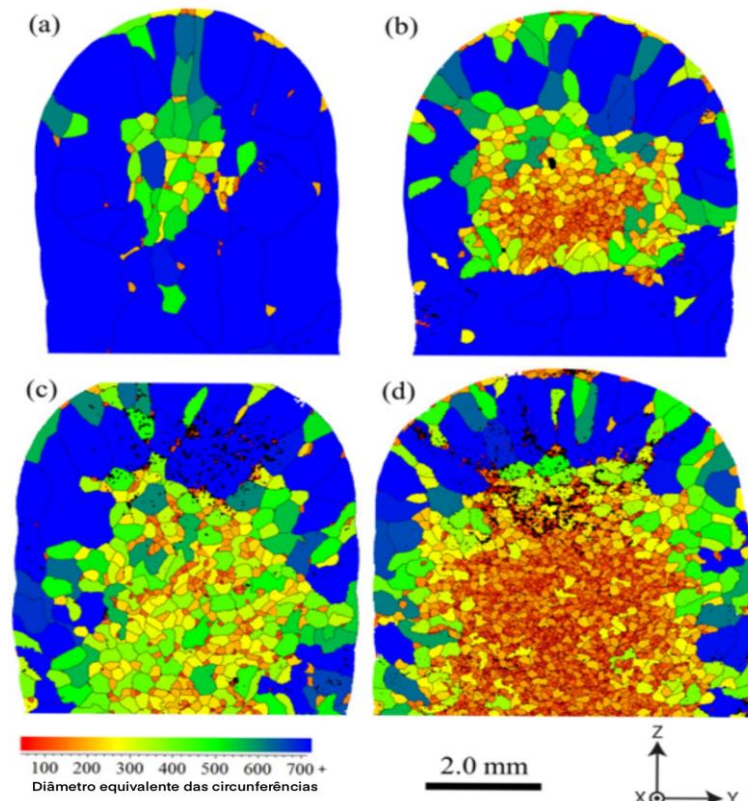


Figura 28 – Mapa do tamanho de grão formado e disposto para paredes de deposição simples quando submetidas a processos híbridos (a) e (b) com apenas uma passagem do rolo na penúltima camada com cargas de 50 kN e 75 kN respetivamente; (c) e (d) com passagem do rolo em todas as camadas com cargas de 50 kN e 75 kN respetivamente (Adaptado de [57])

## ii) Microdureza

A dureza é caracterizada pela resistência do material à deformação plástica por aplicação de uma carga, sendo assim uma propriedade intrínseca do material. É bastante útil na avaliação e identificação de diferentes camadas de uma estrutura, assim como a avaliação das diferentes fases ou componentes de um material, [58].

Como foi possível observar no subcapítulo anterior, durante os diversos processos FA, a microestrutura dos vários materiais vai sofrer inúmeras alterações, sendo formadas várias fases e composições. Desta forma, o recurso a um estudo de filiação de microdurezas permite compreender de forma mais extensa a qualidade da deposição e das estruturas formadas.

O estudo da microdureza na zona superior, intermédia e inferior da parede fina realizada por G. Liu et al. e cuja estrutura da secção transversal foi indicada na figura 25, pode ser observado na figura 29.

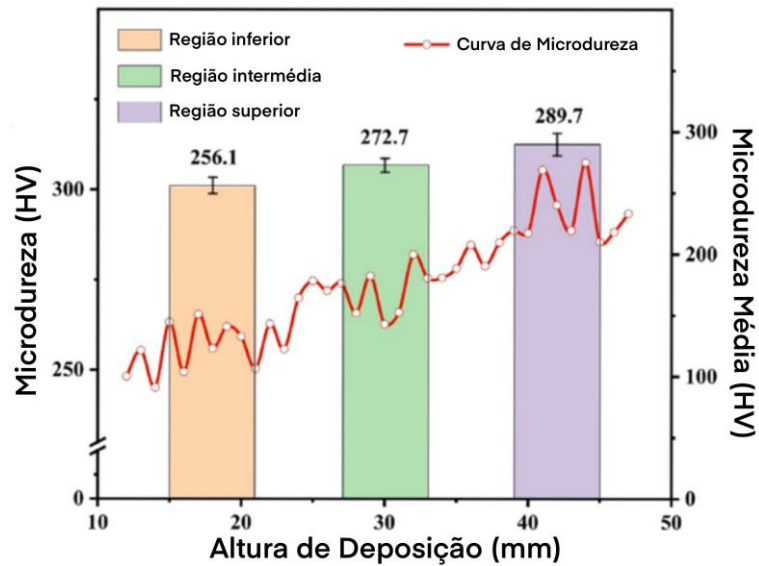


Figura 29 – Evolução da microdureza ao longo da parede criada por deposição multicamada em NiTi por CMT (Adaptado de [40])

Pela análise da evolução da microdureza, é perceptível que, com o aumento da altura da camada, se verifica um valor de microdureza mais elevado. Esta evolução pode ser explicada pela existência de grãos de tamanho mais reduzido nas camadas superiores, uma vez que estes apresentam maiores fronteiras de grão, apresentando uma maior resistência mecânica, [40].

O aumento da microdureza ao longo da deposição pode também ser verificado no estudo de K. Hofer et al. [35], onde é apresentada a microestrutura e respetiva microdureza nas diversas zonas de deposição (figura 26).



### 3. MÉTODOS E APLICAÇÃO

No capítulo seguinte é descrita a metodologia aplicada, descrevendo os materiais, equipamentos, processos, parâmetros e análises que foram realizadas, desde a produção das amostras até aos resultados obtidos. Assim, é possível dividir a metodologia em dois subcapítulos distintos, que são descritos em detalhe no fluxograma representado na figura 30.

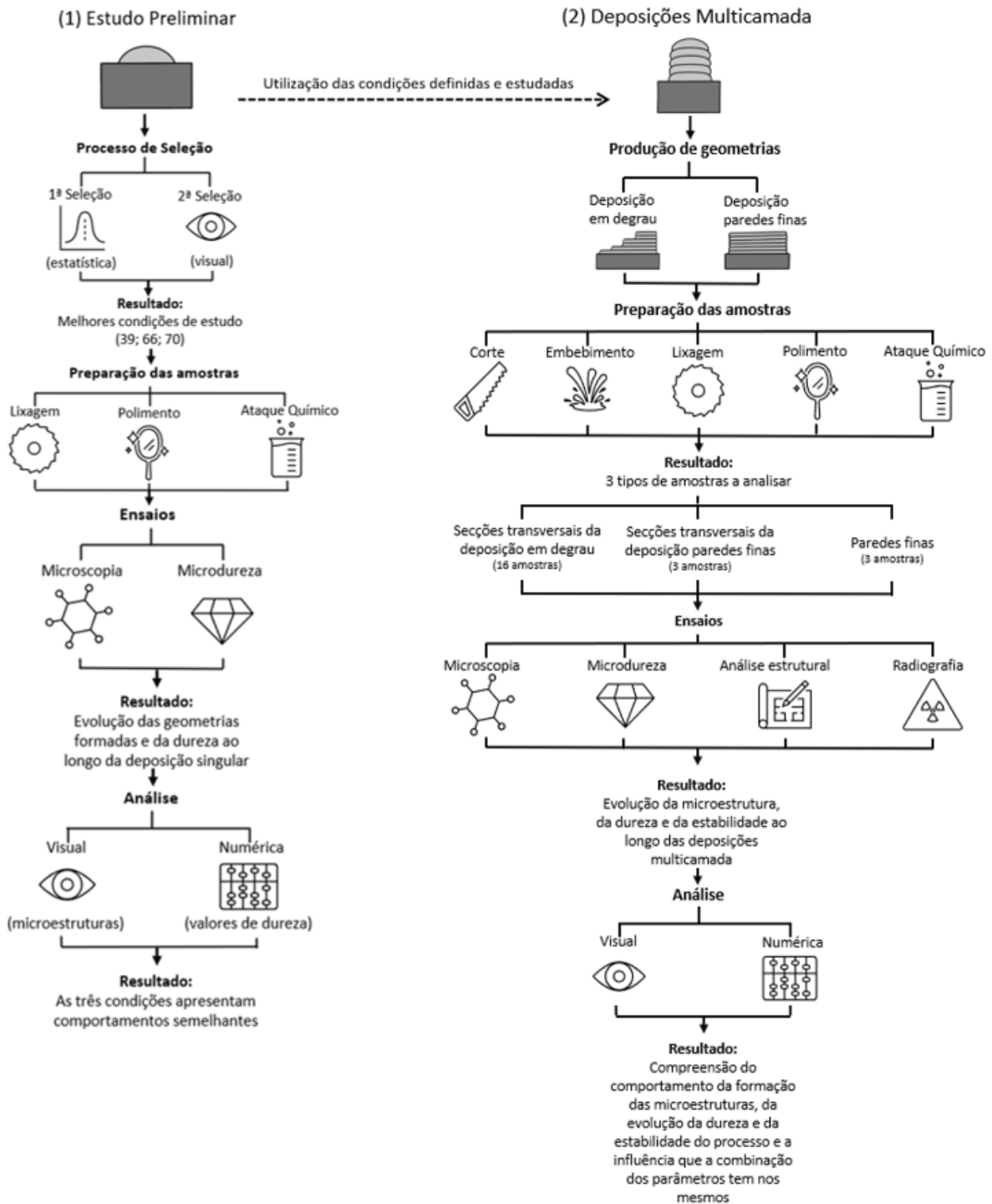


Figura 30 – Fluxograma representativo da metodologia desenvolvida

### 3.1. Estudo Preliminar

#### 3.1.1. Ensaios prévios

O trabalho experimental teve por base estudos prévios desenvolvidos no âmbito do projeto Metal.BOT.

Os objetivos a alcançar foram definidos no sentido de caracterizar a influência dos parâmetros do processo com as propriedades mecânicas e geométricas cordões singulares produzidos.

Na sequência do trabalho prévio, foram produzidas e analisadas 72 condições que se encontram descritas no Apêndice A.

Para além das condições, os resultados das análises desenvolvidas nas amostras produzidas (figura 31), são também apresentados, contendo a largura, espessura e dureza ao longo dos cordões, bem como os valores correspondentes da diluição.

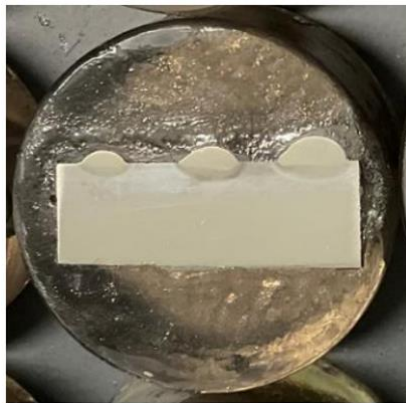


Figura 31 – Exemplar de uma das amostras produzidas no âmbito do projeto, previamente ao trabalho realizado

#### 3.1.2. Condições a estudar

Para o estudo da deposição multicamada, foi necessária a escolha de um menor número de condições, uma vez que o processo é complexo e extenso.

Assim sendo, foi realizada uma seleção dos parâmetros a estudar, composta por duas análises distintas, como representado na figura 32.

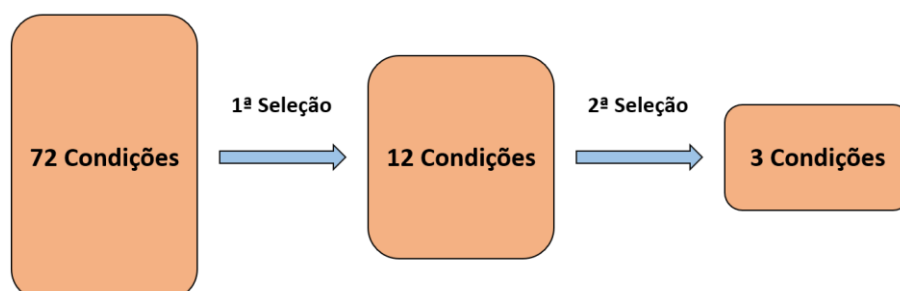


Figura 32 – Representação esquemática da seleção das três condições a estudar

Para a primeira seleção, foi realizada uma análise numérica, focando os valores do desvio padrão relativos à espessura, largura e dureza ao longo do cordão, obtidos nos estudos prévios. Esta análise tem por base a escolha das condições cujos valores de desvio padrão são inferiores à média dos mesmos.

Assim sendo, da primeira inspeção, 12 condições foram selecionadas, sendo os seus parâmetros e respetivos resultados resumidos na tabela 4.

Tabela 4 – Resultados da primeira seleção das condições a estudar

Condição	Fluxo de deposição de pó [g/min]	Intensidade de Corrente [A]	Velocidade de translação [mm/min]	Espessura [mm]	Largura [mm]	Dureza [HV]	Diluição [%]
11	10,4	90	500	3,10	1,24	657	35,4
22	10,4	130	400	6,26	0,56	506	38,6
25	10,4	150	100	11,98	1,46	642	43,0
31	10,4	170	100	13,59	1,38	643	30,5
38	20	130	200	8,13	2,38	653	30,7
39	20	130	300	7,47	1,88	584	22,5
47	20	150	500	5,51	1,83	573	45,7
51	20	170	300	8,25	1,67	587	43,4
53	20	170	500	6,65	0,88	569	48,8
63	20	90	300	4,17	1,74	540	25,2
66	20	90	600	3,07	1,04	533	12,9
70	20	110	400	6,27	1,29	558	10,9

Posteriormente à análise quantitativa, as doze amostras selecionadas foram submetidas a uma segunda seleção, focada na análise visual, observando tanto a homogeneidade da deposição dos cordões (Figura 33-a), como a secção transversal dos mesmos (Figura 33-b).

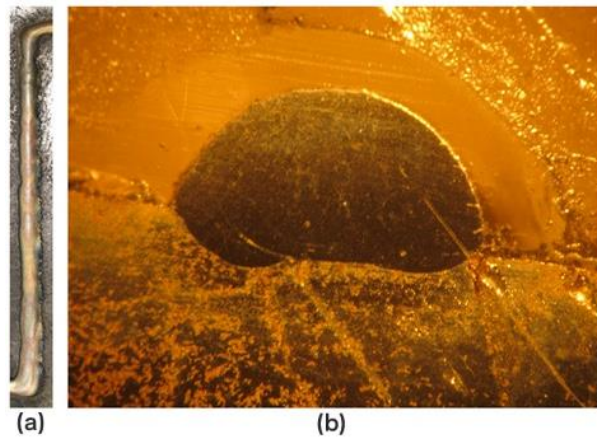


Figura 33 – Representação dos provetes utilizados na seleção de amostras pela análise visual; (a) cordão completo e (b) secção transversal do mesmo

Esta análise visual permite a finalização do processo de seleção. No entanto, uma vez que os 12 cordões selecionados apresentam resultados favoráveis, foi necessário um estudo dos valores de diluição de forma a identificar corretamente as melhores condições a selecionar.

Considerando que os valores de diluição ideais são os que se aproximam mais de 0%, podemos reduzir o estudo aos três cordões com os menores valores, sendo estas as condições 39, 66 e 70.

### 3.1.3. Preparação das amostras

O polimento das três amostras foi realizado utilizando uma máquina Struers Rotopol-1, figura 34, em duas etapas. A primeira aplicando um abrasivo de diamante de 3  $\mu\text{m}$  e a segunda com abrasivo de diamante de 1  $\mu\text{m}$ , aplicando em ambas uma velocidade de rotação de 300 rpm.

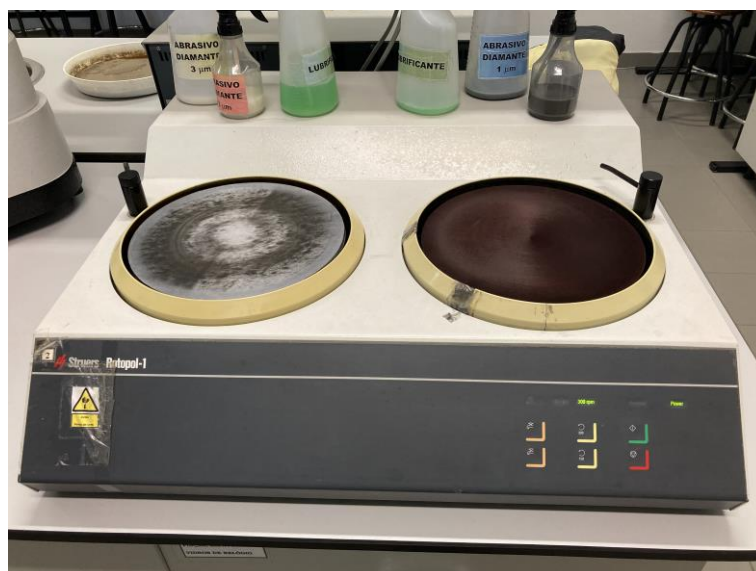


Figura 34 –Struers Rotopol-1

Após o polimento foi realizado o ataque químico, como observado na figura 35.



Figura 35 – Demonstração do ataque químico realizado no cordão e no material base

Para o efeito foram utilizados dois reagentes distintos uma vez que o material de base e o material dos cordões é diferente. Para o material de base foi usado o Nital a 4%, enquanto para o cordão foi utilizada uma solução preparada, contendo 2g de percloro de Cu, 40 ml de ácido clorídrico e 60 ml de álcool etílico.

#### **3.1.4. Análise da microestrutura e da microdureza**

O estudo da microestrutura foi efetuado num microscópio Olympus D22 (Figura 36) ligado ao programa Olympus Stream Basic. Para esta operação foi utilizada uma ampliação de 100 vezes.



Figura 36 – Microscópio Olympus D22

Para os cordões singulares foram analisadas cinco zonas distintas, como pode ser observado no esquema da figura 37. Com uma ordem de "baixo para cima", identificam-se o material de base, a transição entre o material de base e a zona termicamente afetada, a transição entre a chapa e o cordão, a zona central do cordão e, por fim, a zona superior do cordão.

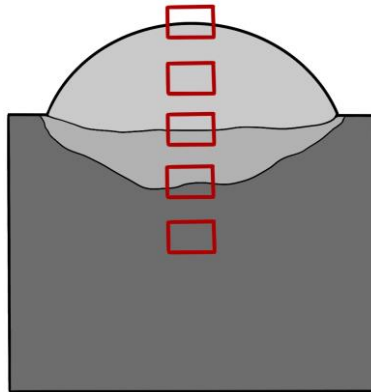


Figura 37 – Representação esquemática das zonas de estudo na análise da microestrutura

Para efetuar a filiação da dureza, foi utilizado o microdurometro da Duramin (Figura 38), com um penetrador Vickers, uma carga de 10 kgf e uma ampliação de 50 vezes.



Figura 38 – Microdurometro Duramin

### 3.2. Deposições Multicamada

Como previamente mencionado, para uma melhor compreensão do processo e das estruturas formadas, foi necessário proceder ao estudo das deposições multicamada, aplicando os mesmos parâmetros e materiais.

### 3.2.1. Equipamento e material

As deposições realizaram-se utilizando o método 3DPMD, tal como nas deposições singulares, recorrendo ao *setup* que pode ser observado na figura 39.

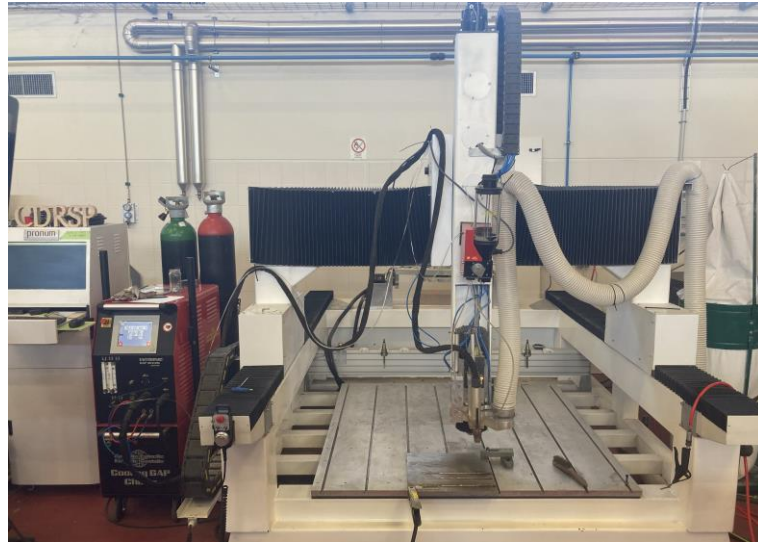


Figura 39 – *Setup* do equipamento utilizado durante o processo 3DPMD

O equipamento é composto por uma fonte de energia *Eutronic GAP 3511 DC Synergic*, contendo os respetivos acessórios, uma máquina de soldar destinada a ser adaptada na CNC de 3-eixos e uma máquina PTA com controlo remoto RC-H. Para completar, no *setup* foi aplicado o Colling GAP Chiller, usado para arrefecer o equipamento, o Powder Feeder EP2, encarregado de armazenar o pó, tendo uma capacidade de 2 litros e, por fim, um extrusor anódico de diâmetro igual a 2,4 mm. As especificações relativas ao *setup* descrito são relatadas no Anexo A. O pó utilizado para a produção das deposições foi o EuTroLoy 16604, cuja composição é descrita na tabela 5, sendo que este apresenta uma excelente resistência térmica, excelente resistência ao choque térmico, à corrosão e à formação de fissuras. No Anexo B é são apresentadas algumas propriedades desta liga, assim como a dureza média obtida nas deposições. Já a chapa de base para a deposição foi em aço DIN Ck45, com dimensões de 400x400x20 (mm).

Tabela 5 – Composição do EuTroLoy 16604

C	Cr	Co	Mo	Fe
0,20	15	15	2.5	Base

### 3.2.2. Definição de parâmetros

Os parâmetros de deposição podem ser divididos em dois grupos: os parâmetros fixos do processo, que se mantiveram durante todas as deposições e os parâmetros variáveis,

responsáveis pela criação das condições do estudo. Estes valores são representados nas tabelas 6 e 7.

Tabela 6 – Parâmetros fixos do processo

Parâmetro	Valor
Recuo do ânodo	2,5 mm
Angulo do ânodo	90°
Caudal do gás de proteção	14,5 l/min (Argon)
Caudal de transporte	3,1 l/min (Argon-Hidrogénio)

Tabela 7 – Combinações de parâmetros a estudar

Condição	Parâmetros		
	Fluxo de deposição de pó [g/min]	Intensidade de Corrente [A]	Velocidade de translação [mm/min]
39	20	130	300
66	20	90	600
70	20	110	400

As três condições descritas na tabela 7 são o resultado da segunda seleção de condições realizada no subcapítulo 3.1.2. Estas condições descrevem o melhor comportamento e propriedades mecânicas quando aplicadas a cordões singulares.

### 3.2.3. Produção de geometrias

A produção das deposições multicamada pode ser dividida em duas geometrias de forma, a ser possível realizar diferentes estudos, e permitiu a compreensão da influência dos parâmetros nos resultados obtidos, assim como na estabilidade geométrica.

#### i) Deposição em degrau

A deposição em degrau teve como objetivo a percepção da evolução da microestrutura com o aumento do número de camadas depositadas. Para o efeito foi definida uma geometria em escada, onde o número de camadas depositadas vai aumentando, começando com uma e acabando com seis. Para isto, foi definido que a deposição seria realizada em linha de forma a facilitar a programação e o processo de deposição de material, seguindo a geometria que pode ser observada na figura 40.

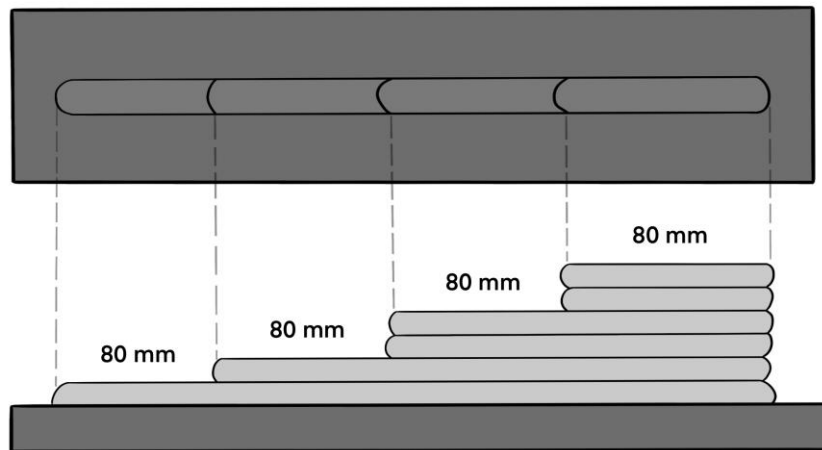


Figura 40 – Representação esquemática da deposição em degrau

Para além de permitir uma maior facilidade na produção, a geometria foi pensada de forma a facilitar o corte das diversas secções transversais a estudar, criando assim uma largura de 80 mm para cada degrau depositado.

#### ii) Deposição de paredes finas

O foco das paredes finas é o estudo da estabilidade das deposições, verificando se, com a aplicação das condições estudadas, é possível realizar autonomamente a deposição dos cordões. Desta forma, foi definido um percurso linear com 200 mm que foi posteriormente programado na CNC de forma a testar a autonomia do processo.

Para dar início à deposição, o extrusor foi posicionado a 2,5 mm da chapa de aço, como pode ser observado na figura 41, estando programado para subir 1 mm por camada. No entanto, uma vez que os cordões estão submetidos a elevadas temperaturas e diversos ciclos térmicos, existe um abatimento dos mesmos, verificando-se ao fim de algumas deposições um aumento da distância entre o extrusor e os cordões depositados.

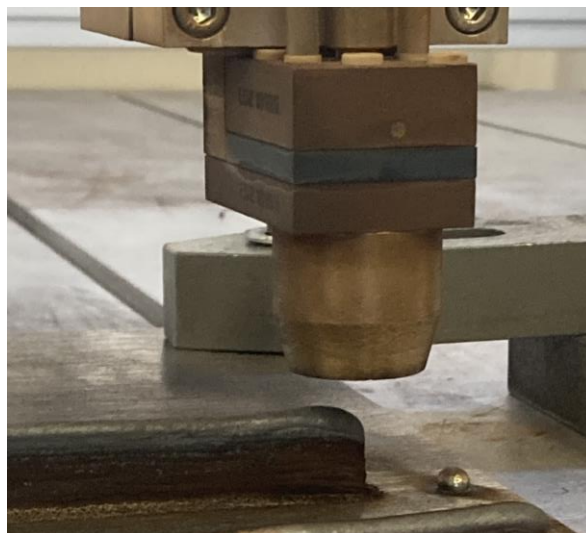


Figura 41 – Distância ótima de posicionamento do ânodo em relação à camada depositada

Foram depositadas vinte camadas, sendo posteriormente realizada a correção da distância e a verificação da altura efetiva da parede antes de depositar novamente outras vinte camadas e repetir o processo de ajuste, até atingir o total de 60 camadas.

### 3.2.4. Preparação das amostras

Concluídas as deposições e tendo em consideração os objetivos definidos, foi necessário proceder à preparação das amostras.

#### i) Corte das amostras

Uma vez que todas as deposições se encontram na mesma chapa e apresentam elevadas dimensões, foi necessário proceder ao corte de algumas secções definidas, de forma a garantir o fácil manuseamento das mesmas, assim como ganhar acesso às secções transversais das deposições a estudar.

Assim sendo, e com base na disposição das geometrias, como pode ser observado na figura 42, foi definido o local e as dimensões das amostras a cortar.



Figura 42 – Disposição das geometrias produzidas na chapa de base

Para as deposições em degrau, foi realizado o corte de uma amostra para cada degrau existente nas três condições estudadas, resultando assim em doze amostras. Já para as paredes finas, estas foram inicialmente cortadas como um todo, isolando cada uma das paredes para estudos futuros, e, em seguida, foi realizado o corte de uma secção da parede de forma a ter acesso à secção

transversal da mesma, resultando assim em três amostras para estudo da secção e três amostras para o estudo das paredes.

Os cortes em questão foram realizados numa máquina de jato de água TCI cutting BP-C 4020 (figura 43). Todos os cortes foram realizados aplicando uma micro união de forma a garantir que as amostras não eram perdidas durante o processo de corte.



Figura 43 – Jato de água TCI cutting BP-C 4020

Com a realização dos cortes por *outsourcing*, obtiveram-se 15 amostras para análise das secções transversais.

#### ii) Embutimento das amostras

As amostras a analisar foram divididas em três grupos distintos. O primeiro grupo, constituído pelas paredes finas na sua totalidade, não necessitaram de nenhum tratamento ou preparação específica.

O segundo grupo, constituído pelas três amostras das secções transversais das paredes finas, foram embutidas em resina, de forma a homogeneizar a superfície a analisar.

Devido à elevada dimensão das amostras, foram desenvolvidos três moldes à medida, recorrendo a métodos de impressão 3D, de forma a criar uma geometria final mais ergonómica, conforme ilustrado na figura 44.



Figura 44 – Montagem final das secções transversais das deposições de paredes finas nos respetivos moldes

No terceiro grupo, as 12 amostras foram embutidas em resina, com recurso à Predopress, apresentada na figura 45, por apresentarem dimensões mais pequenas e compatíveis com a utilização deste equipamento.



Figura 45 – Predopress Struers

Para a produção dos embutimentos, foi aplicada uma força de 20 kN, um tempo de aquecimento de 8 min, um tempo de arrefecimento de 4 min e uma temperatura de montagem de 180°C.

### iii) Polimento e ataque químico

As amostras foram polidas e o ataque químico foi realizado nos moldes referidos para as deposições multicamada, seguindo o procedimento descrito no subcapítulo 3.1.3.

## 3.2.5. Métodos de análise

### i) Análise Estrutural e Geométrica

Para o estudo da estabilidade das paredes finas, foram realizadas duas medições, em momentos distintos do processo.

Inicialmente, e como previamente mencionado, a produção das paredes finas foi realizada em três etapas, depositando vinte camadas em cada uma. Assim, no fim de cada deposição, foi realizada a medição da altura efetiva da parede, como pode ser observado na figura 46, de forma a permitir a comparação destes valores com os valores teóricos que se pretendiam obter.

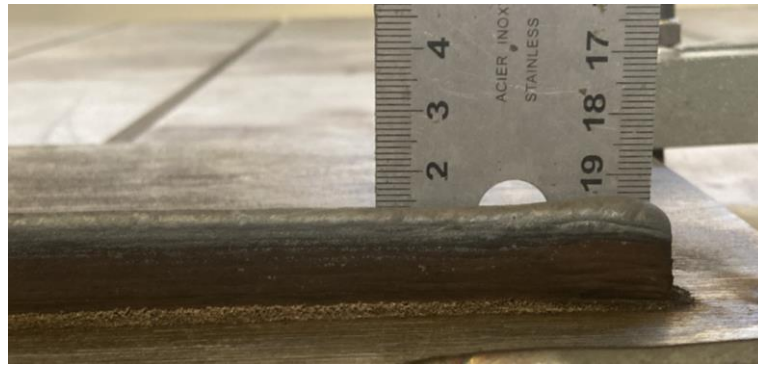


Figura 46 – Medição da altura efetiva da parede fina

A segunda medição foi efetuada após a completa deposição das paredes finas e após a realização dos cortes dos provetes para ser possível ter acesso à secção transversal dos cordões. A medição da largura efetiva do cordão, foi realizada com recurso a um paquímetro digital Mitutoyo.

Com o intuito de verificar a evolução da largura ao longo da deposição multicamada, foram realizadas nove medições, com espaçamento de 2mm, começando na base do cordão e acabando no topo do mesmo.

#### ii) **Análise da Microestrutura e da Microdureza**

A análise da microestrutura formada ao longo das deposições multicamada, foram analisadas as secções transversais tanto das paredes finas como das deposições em degrau, dando maior relevância às deposições de parede fina, uma vez que estas apresentam um maior número de camadas abrangendo assim o comportamento característico das geometrias formadas.

Recorrendo ao mesmo equipamento e metodologia descritos no subcapítulo 3.1.4, foi analisada a microestrutura em cinco zonas de foco, como pode ser observado na figura 47. É de notar que a zona c) engloba todas as camadas intermédias das deposições realizadas.

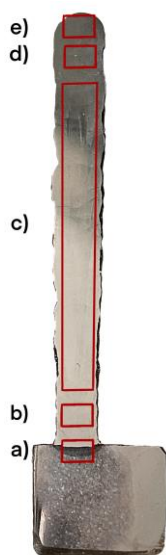


Figura 47 – Representação esquemática das zonas de estudo na análise da microestrutura às paredes finas

O estudo da microdureza, assim como a análise da microestrutura, foi realizado seguindo a metodologia descrita no subcapítulo 3.1.4, recorrendo ao mesmo equipamento. As medições foram realizadas ao longo das deposições de paredes finas de forma a compreender em grande escala como esta propriedade evoluiu. No entanto, foram também realizadas para as 12 amostras das deposições em degrau, permitindo assim verificar se o comportamento é constante ou se varia consoante o número de camadas depositadas.

### iii) Radiografia

Por último, foi realizada uma radiografia às paredes finas, de forma a observar a existência de porosidades ou vazios no interior das mesmas, uma vez que a análise das secções transversais não é suficiente para garantir a homogeneidade das paredes.

A radiografia foi efetuada através de uma fonte de Selénio (Se-75), com uma atividade de 12,0 Curies. As restantes informações são indicadas na tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros da radiografia

<b>Tipo de filme</b>	D7
<b>Distância fonte-peça</b>	350 mm
<b>Tempo de exposição</b>	6 min: 40 s
<b>Espessura do aço</b>	10 mm
<b>Densidade do alvo</b>	3,0

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a finalização da realização da componente prática do estudo, é então necessário fazer a apresentação dos resultados obtidos, assim como discutir e analisar os mesmos. Desta forma, estes resultados podem ser divididos em quatro tópicos distintos, sendo eles, a análise da microestrutura, a análise da microdurezas, o estudo da estabilidade geométrica das deposições e por último a radiografia das amostras.

### 4.1. Microestrutura

#### 4.1.1. Deposição Singular

Como mencionado, neste subcapítulo são apresentados os resultados referentes à formação das microestruturas no processo de deposição 3DPMD, abordando a evolução das geometrias formadas, tanto para deposições singulares como para deposições multicamada.

Na figura 48, pode ser observada a evolução da microestrutura de três cordões singulares, correspondentes às três condições em estudo.

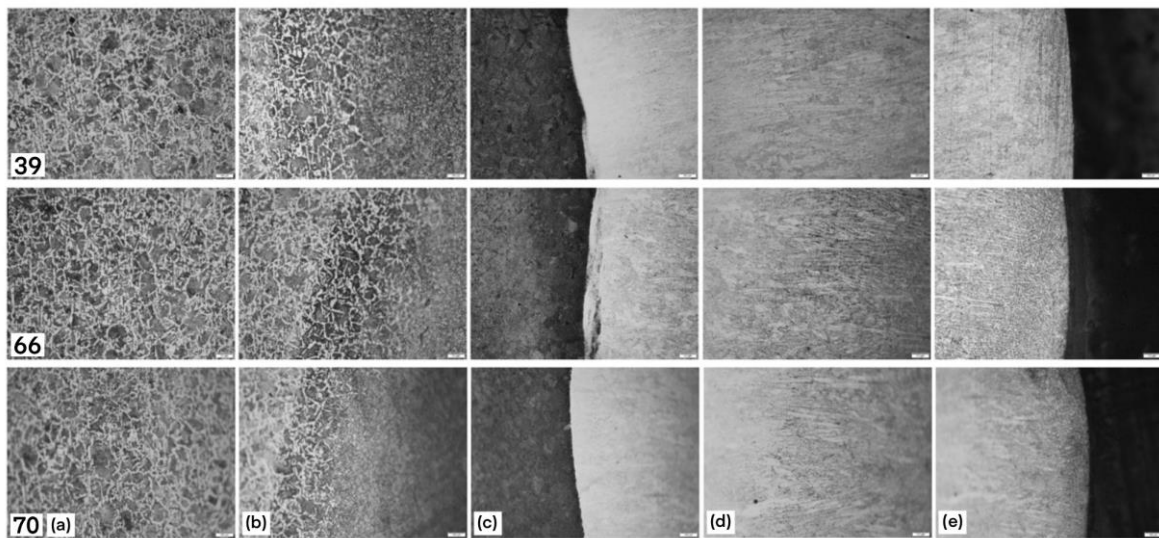


Figura 48 – Evolução da microestrutura de deposições simples para as três condições estudadas (ampliação 50X); (a) material base; (b) transição entre o material base e a ZTA; (c) transição entre a ZTA e a zona inferior do cordão; (d) zona central do cordão; (e) zona superior do cordão

Como pode ser observado, cada condição é constituída por cinco zonas distintas, que se encontram representadas na figura 37.

As geometrias formadas seguem a evolução comum de um processo de soldadura, uma vez que a deposição singular no processo 3DPMD assemelha-se à deposição comum de um cordão de

soldadura. Assim, e como descrito por S. Cooke et al. [32] na figura 23, podemos observar um comportamento constante para as três condições no que remete para a evolução e orientação das estruturas cristalinas formadas.

Inicialmente, e focando o cordão depositado na zona (c), encontram-se geometrias planares, evoluindo para a zona (d), referente ao centro do cordão, encontram-se geometrias celulares, que se seguem às planares e geometrias dendríticas colunares. Por fim, na zona (e) referente ao topo do cordão, é possível observar a formação de estruturas dendríticas equiaxiais.

Perante estes resultados, é possível verificar que estes se apresentam em congruência com a bibliografia.

#### 4.1.2. Deposição Multicamada

Face à análise a realizar, são apresentadas as microestruturas formadas para deposições multicamada. A localização das zonas de análise pode ser observada na figura 47.

Uma vez estudadas todas as amostras existentes, entre elas, as doze amostras das deposições em degrau e as três amostras das deposições de paredes finas, foi possível verificar que o comportamento era semelhante entre elas, já que a formação da microestrutura segue a mesma sequência, independentemente do número de camadas depositadas. Assim, e uma vez que já foi descrito o processo para a deposição de apenas uma camada, são apresentados os resultados para a deposição de 60 camadas, descrevendo desta forma um caso extremo que permite concluir a estabilidade na evolução das microestruturas encontradas.

Com o intuito de facilitar a descrição da evolução da microestrutura nas paredes finas, são apenas apresentadas neste subcapítulo apenas as figuras mais relevantes para este estudo. Posteriormente e nos Apêndices B, C e D, são apresentadas todas as figuras referentes às condições 39, 66 e 70, respetivamente.

Na figura 49 observa-se a estrutura desde o material de base até à deposição da primeira camada. Esta estrutura apresenta-se apenas para uma das condições, uma vez que se verificou que esta evolução é constante e permanente para todas as amostras, não se observando distinções ao nível da microestrutura.

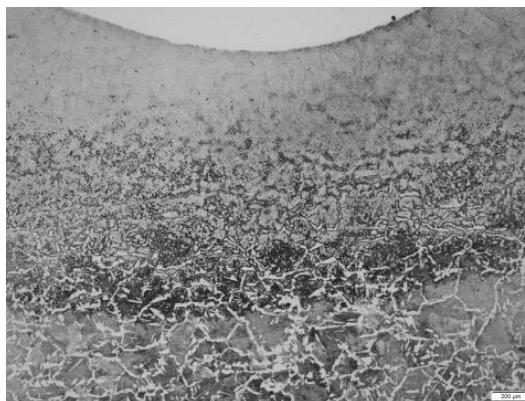


Figura 49 – Evolução da microestrutura encontrada na chapa de aço DIN Ck45 (ampliação 200X)

O material base é constituído por uma estrutura de ferrite e perlite característica do aço DIN Ck45, com um tamanho de grão alto.

O tamanho do grão tende a diminuir no sentido ascendente sendo acompanhado de uma alteração morfológica das estruturas, potencializada pelo efeito da diluição.

A diluição mencionada, pode ser também responsável pelo aparecimento de carbonetos de crómio, na zona mais próxima do material depositado. A possível formação destes carbonetos deve-se à elevada quantidade de crómio na liga depositada, e à afinidade que este elemento tem com o carbono que se encontra no material de base.

Na figura 50, encontram-se as microestruturas formadas nas primeiras camadas depositadas. Nesta zona predominam geometrias planares muito semelhantes para as três condições, mesmo em tamanho.

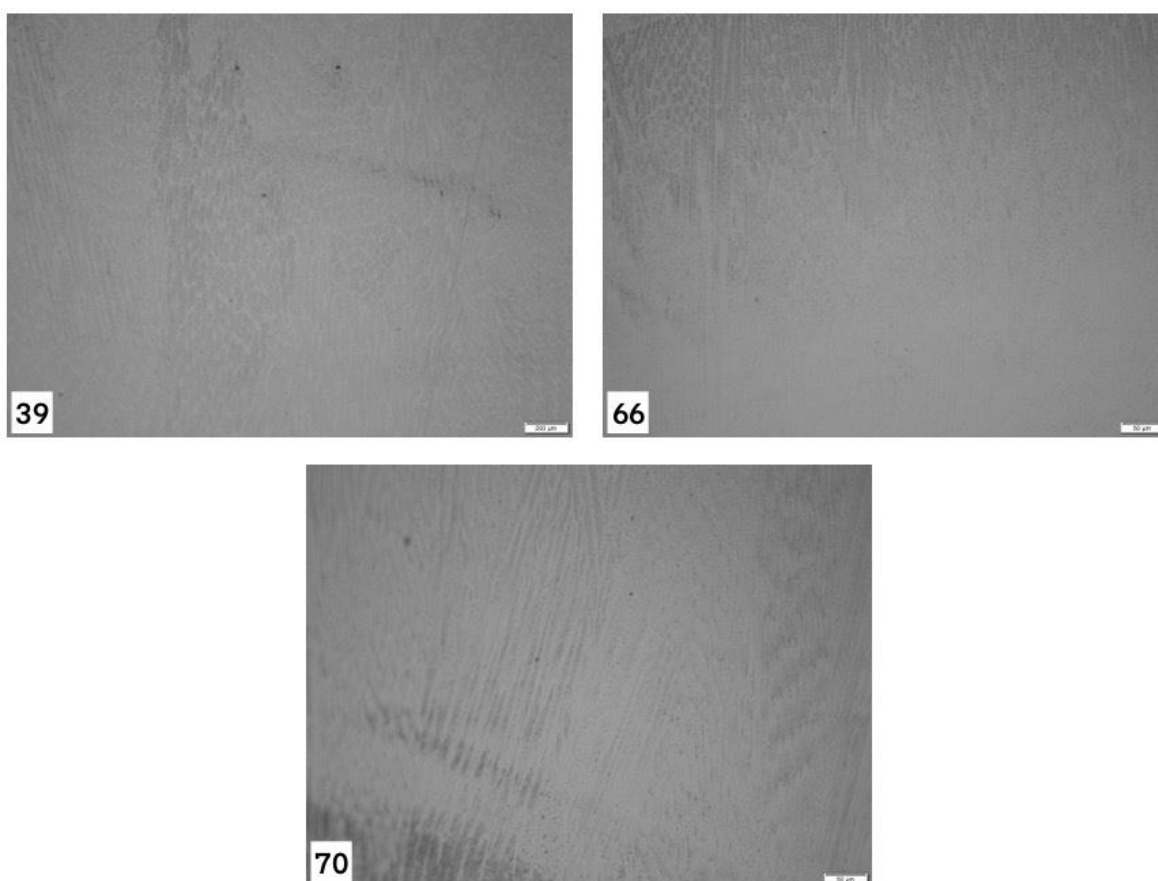


Figura 50 – Geometrias planares localizadas na zona inferior da parede fina para as três condições em estudo (ampliação 200X)

Uma vez que o material de base se encontra à temperatura ambiente, aquando da deposição das primeiras camadas, o gradiente térmico vai ser muito elevado, sendo desta forma o calor dissipado de forma mais eficiente, resultando assim no desenvolvimento destas geometrias.

Na figura 51 observam-se as estruturas correspondentes à zona intermédia da parede fina, para as três condições em estudo. Esta zona é constituída pela grande maioria das camadas que

constituem a parede, no entanto, devido à fusão irregular das mesmas, não é possível quantificar o número de camadas existentes nesta zona.

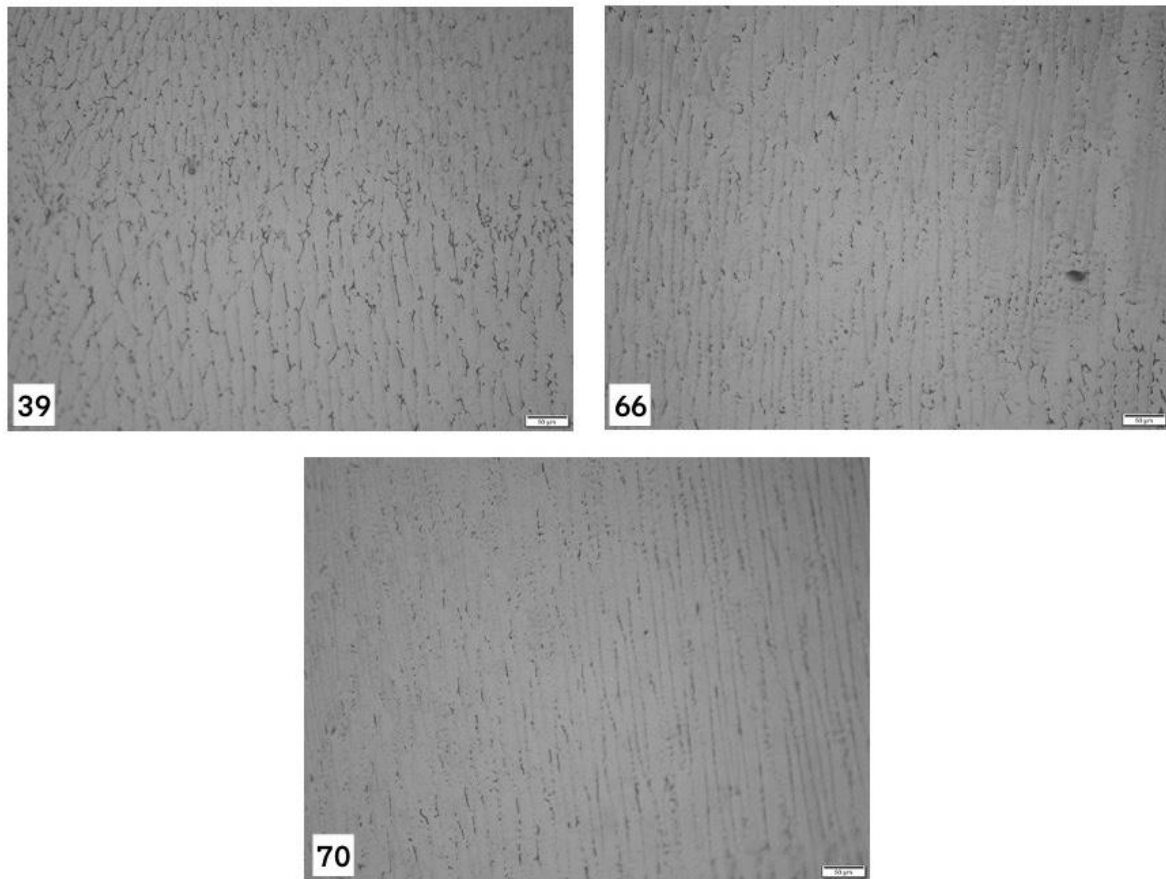


Figura 51 – Geometrias celulares localizadas na zona intermédia da parede fina para as três condições em estudo (Ampliação 200X)

Como é possível observar, embora a zona de estudo seja de maior dimensão em comparação com as restantes, as geometrias existentes são as mesmas, sendo possível caracterizar esta zona intermédia pela formação de estruturas celulares. Estas são comuns nas zonas intermédias da deposição multicamada uma vez que a deposição consecutiva de material sujeita o mesmo a diversos ciclos térmicos, favorecendo assim um arrefecimento mais lento e a um desenvolvimento do grão. Como estudado por S. Cooke et al., quando existe uma propensão para o crescimento do grão e um reaquecimento do material, inicia-se a formação de três geometrias distintas com a aproximação do topo da deposição, sendo a primeira do tipo celular.

É relevante mencionar que em oposição às geometrias planares verificadas, existem distinções entre as geometrias celulares das três condições. A condição 39 apresenta, por comparação, os grãos de maior dimensão o que pode ser justificado pelo facto de esta condição apresentar a menor velocidade de deposição e a maior intensidade de corrente, favorecendo assim o crescimento do grão. Já a condição 66 apresenta uma estrutura mais refinada, uma vez que os parâmetros aplicados são os opostos da condição 39. Por último, a condição 70, que apresenta

valores intermédios de intensidade de corrente e velocidade de deposição, apresenta uma estrutura intermédia.

Contudo, a estrutura celular que se verifica não é homogénea, uma vez que o tamanho do grão formado vai variando devido à existência de diversas camadas.

Este fenómeno pode ser então observado na figura 52.

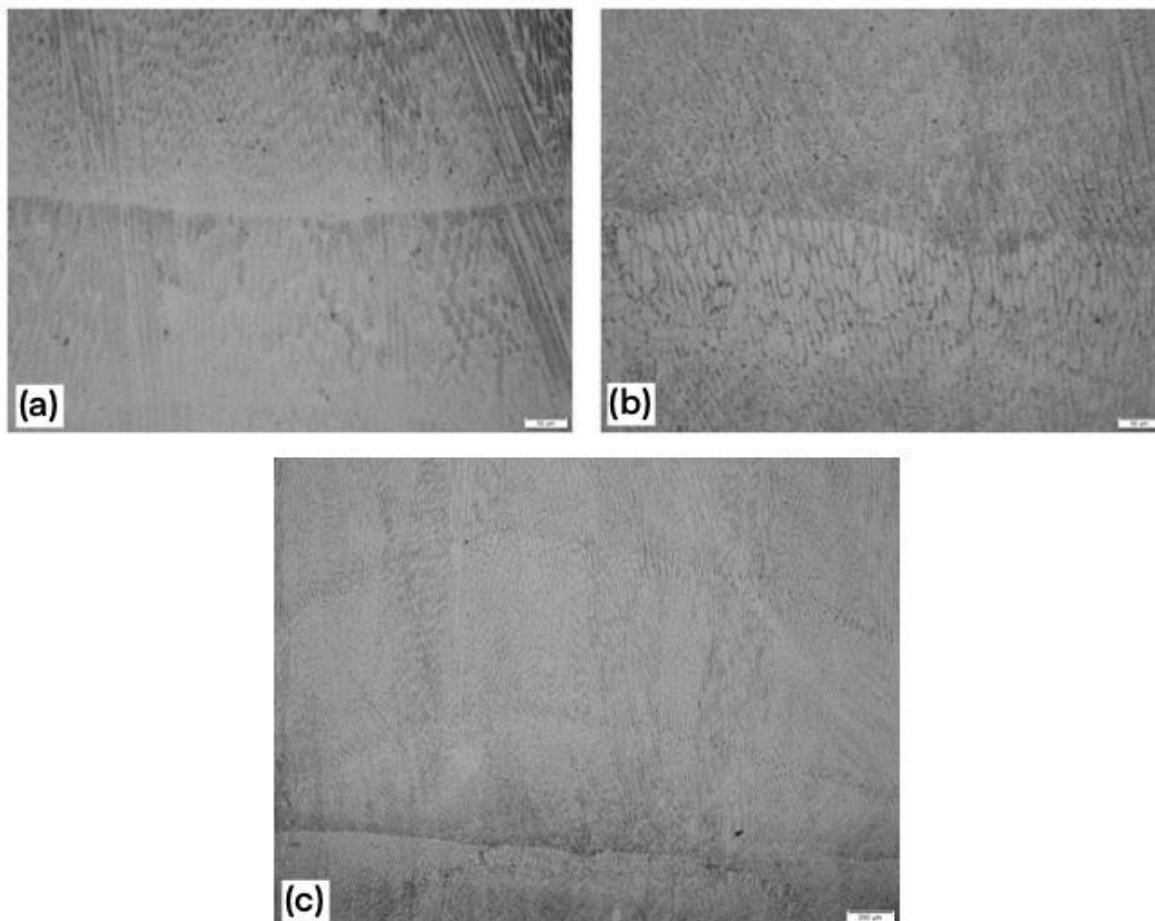


Figura 52 – Geometrias celulares localizadas nas fronteiras de camada; (a) e (b) representação de fronteira de camada para condição 70 (ampliação 200X); (c) representação de diversas camadas consecutivas para condição 70 (ampliação 50X)

Como é possível observar na figura 52 (c), ocorre uma variação no tamanho grão entre as diversas camadas dispostas, no entanto, contrariamente ao descrito por P. Durai Murugan *et al.* [2], esta variação não é repetitiva, apresentando-se de forma irregular, sendo possível observar na figura 52 (a) e (b) dois casos em que o tamanho de grão se mantém constante. Este comportamento pode ter como causa o facto do percurso de deposição de cada camada ser reduzido, diminuindo o tempo de arrefecimento de cada camada e tornando assim menos visível o efeito da repetição dos ciclos térmicos.

Com a continuação da deposição, e com a aproximação do topo do cordão, é possível descrever uma terceira zona, que se encontra representada na figura 47 como zona d). Esta é caracterizada

por ser a zona de transição entre as geometrias celulares e as geometrias formadas no topo da deposição e é constituída por um número muito inferior de camadas quando comparada à zona c).

Na figura 53, pode ser observada a geometria colunar dendrítica para as diversas condições em estudo.

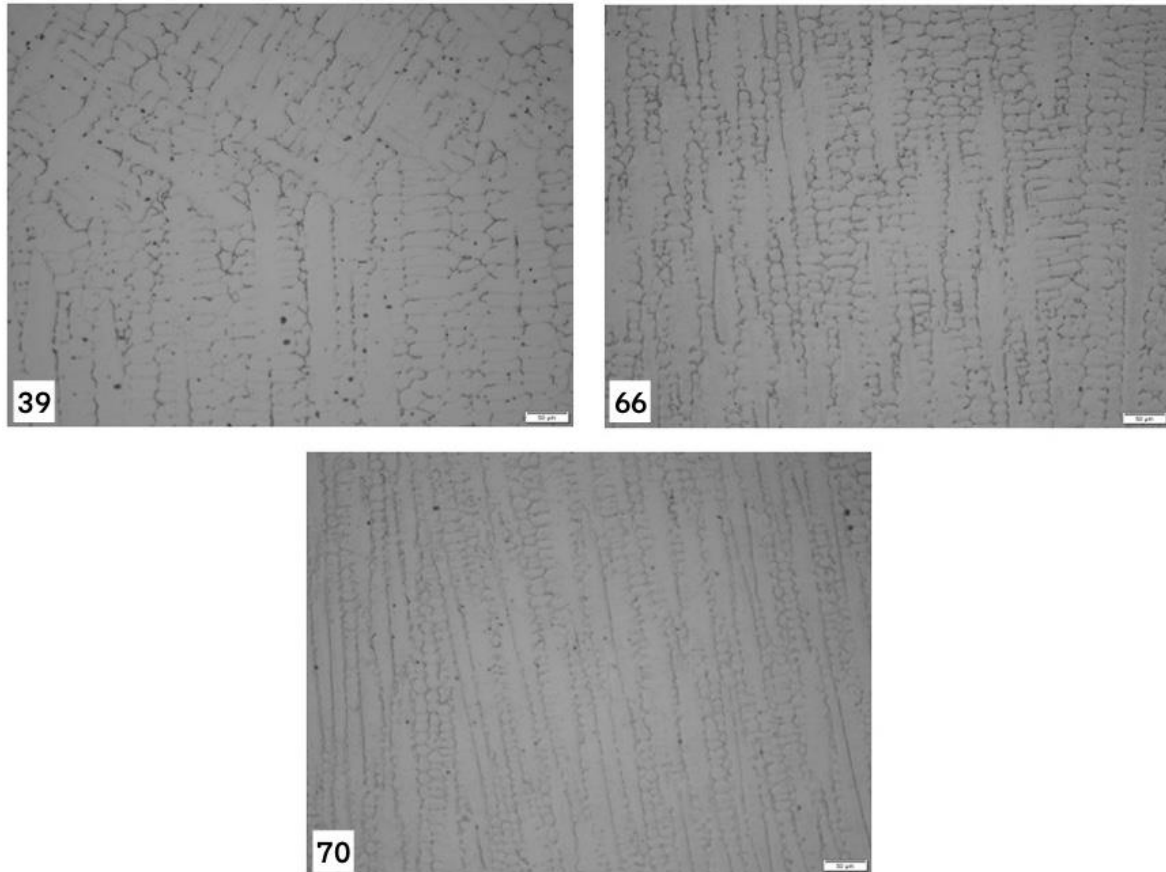


Figura 53 – Geometrias colunares dendríticas localizadas na zona intermédia da parede fina para as três condições em estudo (ampliação 200X)

Esta geometria forma-se na sequência das geometrias celulares, seguindo a sua orientação, e servem de transição com a geometria equiaxial dendrítica. Apresenta uma estrutura que se desenvolve sob as mesmas condições de crescimento de grão, de arrefecimento lento e de submissão a diversos ciclos térmicos.

Tal como a geometria celular, é possível observar que, para a condição 39, a estrutura é pouco refinada, sendo este comportamento efeito dos parâmetros aplicados.

No entanto, e contrariamente ao esperado, na figura 53, a estrutura mais refinada verifica-se para a condição 70, enquanto a condição 66 apresenta uma evolução intermédia do tamanho do grão.

Por último, e de forma a finalizar o estudo da evolução da microestrutura, é possível observar na figura 54 a geometria formada na zona correspondente ao topo das paredes finas depositadas.

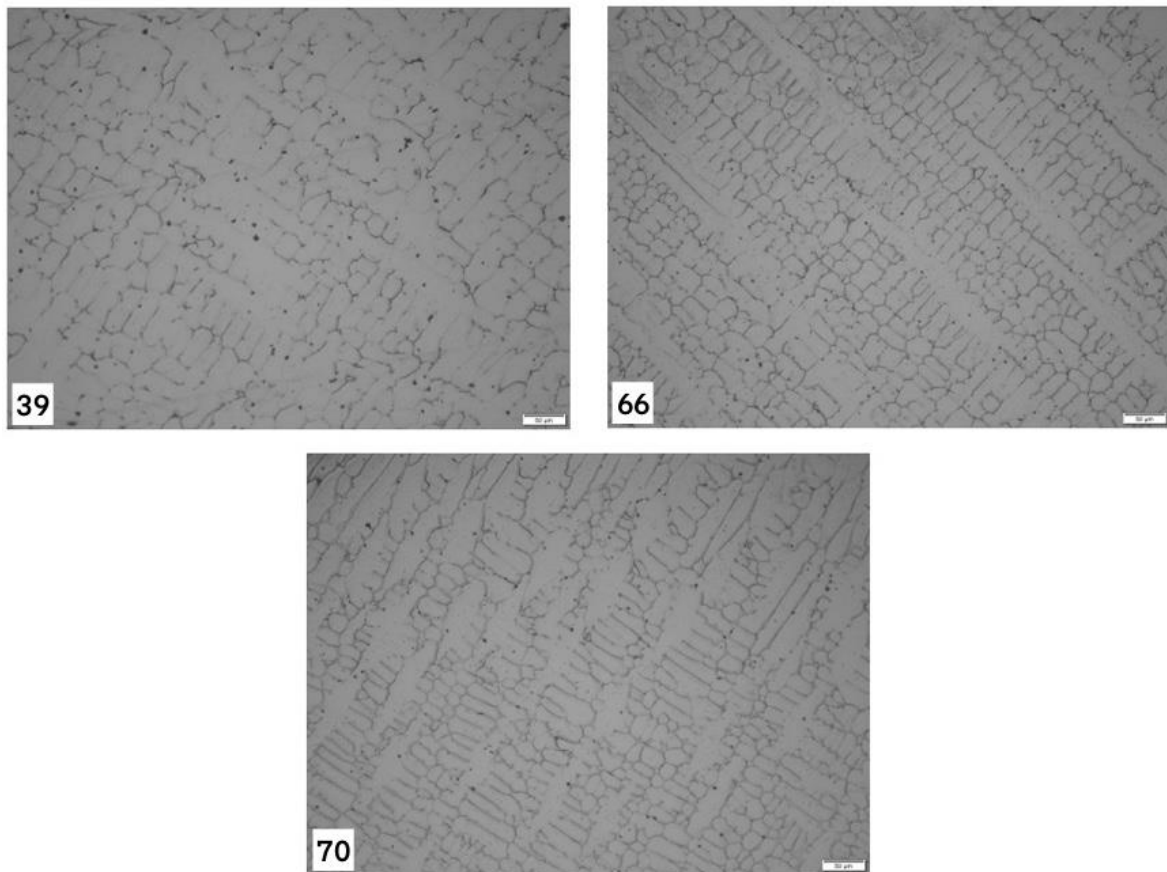


Figura 54 – Geometrias equiaxiais dendríticas localizadas na zona superior da parede fina para as três condições em estudo (ampliação 200X)

A estrutura equiaxial dendrítica que pode ser observada é comum às três condições e é característica da zona superior de deposições multicamada.

A sua pequena dimensão e organização deve-se ao facto de ter um tempo de arrefecimento inferior às restantes camadas, uma vez que as camadas onde estas geometrias se encontram, apresentam uma área de contacto com o meio ambiente muito superior. Não existindo novas deposições, nem novos ciclos térmicos, o arrefecimento é mais rápido e o crescimento do grão é mais reduzido.

Pela comparação dos tamanhos de grão entre as três condições, podemos observar um comportamento semelhante ao das geometrias celulares, sendo que uma maior intensidade de corrente e menor velocidade levam a uma geometria menos refinada.

Com base nos resultados apresentados referentes à microestrutura, é possível observar que as condições estudadas expõem uma evolução idêntica, sendo que a ordem de formação das diferentes estruturas ao longo da deposição é mantida de forma constante, tanto para deposições simples como geometrias complexas.

Este comportamento é uma surpresa uma vez que as condições estudadas apresentam parâmetros distintos, sendo esperado um comportamento distinto. Com base somente na análise da microestrutura é possível assumir que os parâmetros em estudo, quando combinados eficientemente, permitem produzir resultados semelhantes.

## 4.2. Microdureza

Finalizada a verificação da evolução da microestrutura e a influência que os parâmetros de processo e a deposição multicamada têm na mesma, são agora apresentados os resultados referentes à microdureza e à sua evolução, quando influenciados pelos mesmos fenômenos.

Assim, e de forma a permitir uma leitura dos resultados mais clara, é feita a divisão dos mesmos entre as deposições em degrau e as deposições das paredes finas.

Nas figuras 55, 56 e 57 é possível observar evolução da microdureza desde o material de base até ao topo das deposições. De forma a comparar os resultados obtidos, já que estas deposições são constituídas por doze amostras, cada gráfico resume o comportamento de cada condição, descrevendo a evolução verificada para a deposição de 1, 2, 4 e 6 camadas.

Na figura 55 é possível observar os resultados obtidos referentes à condição 39. De notar que, para a medição das durezas desta condição, foi possível efetuar cinco medições por camada, uma vez que estas deposições apresentavam uma maior dimensão, como irá ser posteriormente descrito.

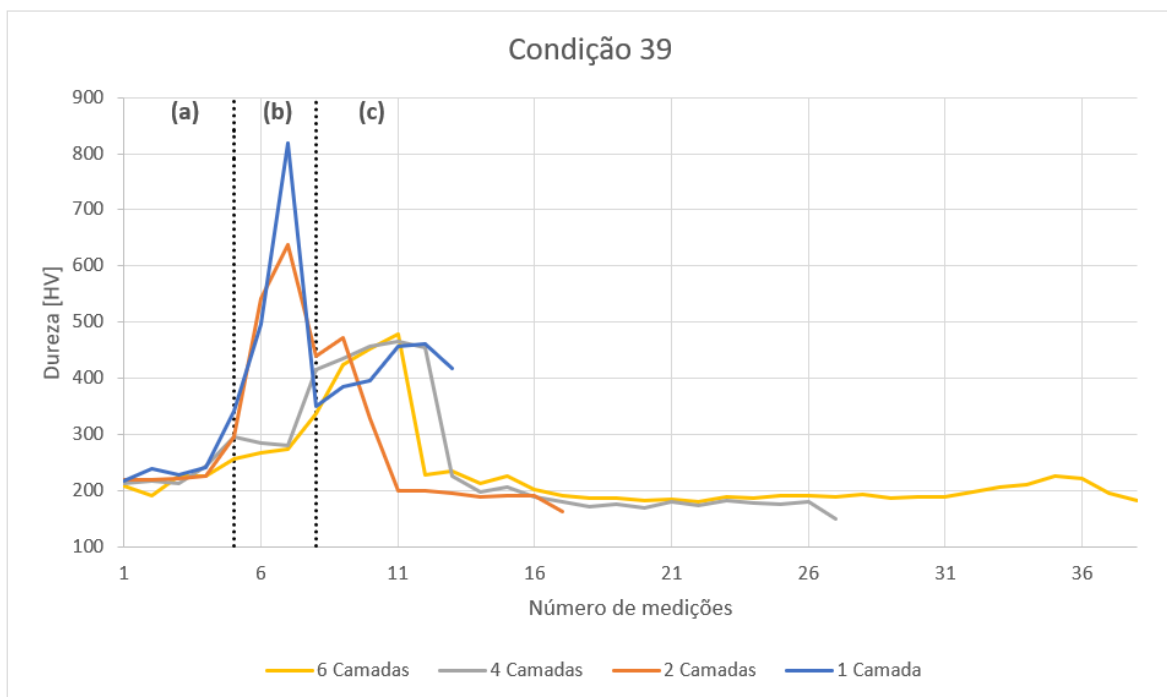


Figura 55 – Evolução da dureza para as deposições em degrau referentes à condição 39; (a) Dureza registada no material de base; (b) Dureza registada na ZTA; (c) Dureza registada ao longo da deposição

Pela análise do gráfico é possível observar que para a zona (a), referente ao material de base, a dureza obtida para as diferentes deposições é muito semelhante, uma vez que esta zona não é afetada termicamente. No entanto, pela análise das zonas (b) e (c), verifica-se uma discrepância maior nos resultados obtidos.

Como descrito previamente aquando da análise da evolução da microestrutura para a chapa de aço, existe a possibilidade de formação de carbonetos de crómio devido a mecanismos de difusão

durante o processo de deposição. Desta forma, e uma vez que a zona (b) corresponde ao local onde previsivelmente se encontra a formação destes carbonetos, seria de esperar encontrar os valores de dureza mais elevados para as diversas deposições, o que não se verifica para todos os casos.

Na deposição de uma e duas camadas, verifica-se um comportamento congruente com o expectável. No entanto, para as deposições de quatro e seis cordões, verifica-se que os maiores valores de dureza se encontram na zona (c), ou seja, no material depositado. É também possível verificar que, com o aumento do número de camadas depositadas, e independentemente do local onde se registam, os valores de dureza máxima diminuem, comprovando assim uma relação entre a dureza obtida com o número de camadas depositadas. Por último, após atingida a dureza máxima verifica-se que os valores de dureza se mantêm constantes e reduzidos até atingirem o topo da deposição. Já na figura 56 e 57 podemos observar os gráficos correspondentes às condições 66 e 70, respetivamente, que, devido à proximidade que apresentam na sua evolução, serão analisados em conjunto. De notar que, devido às dimensões das deposições, foi possível realizar três medições por camada para a condição 66 e quatro medições para a condição 70.

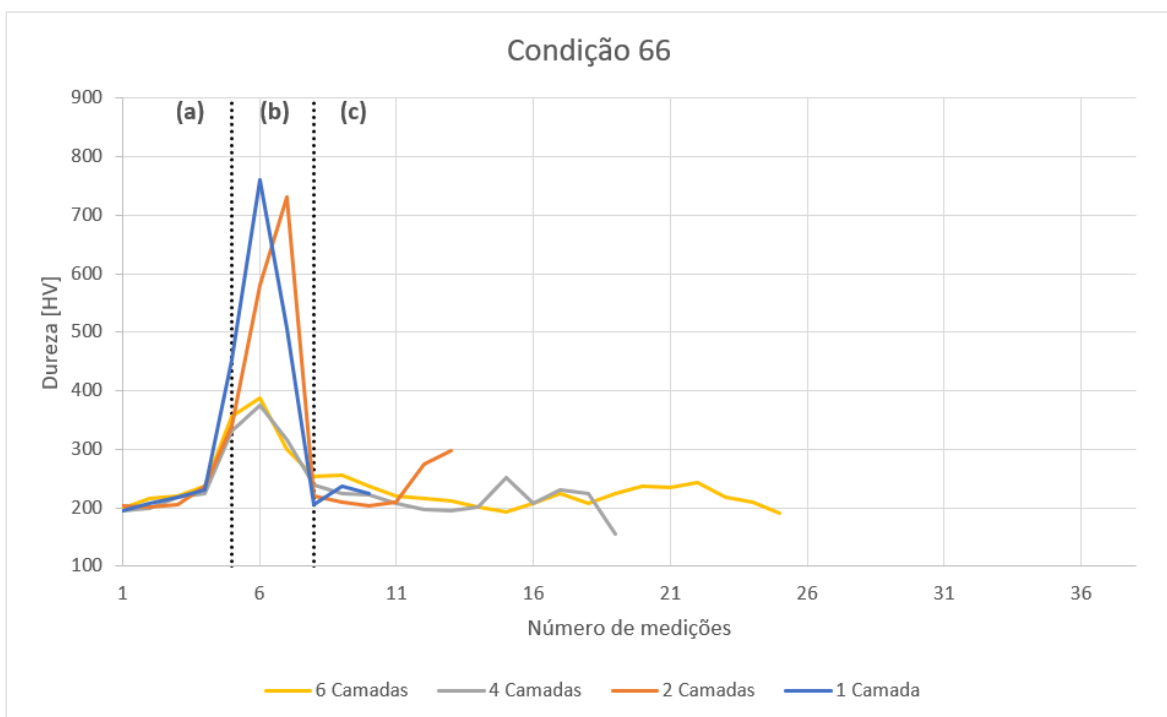


Figura 56 – Evolução da dureza para as deposições em degrau referentes à condição 66; (a) dureza registada no material de base; (b) dureza registada na ZTA; (c) dureza registada ao longo da deposição

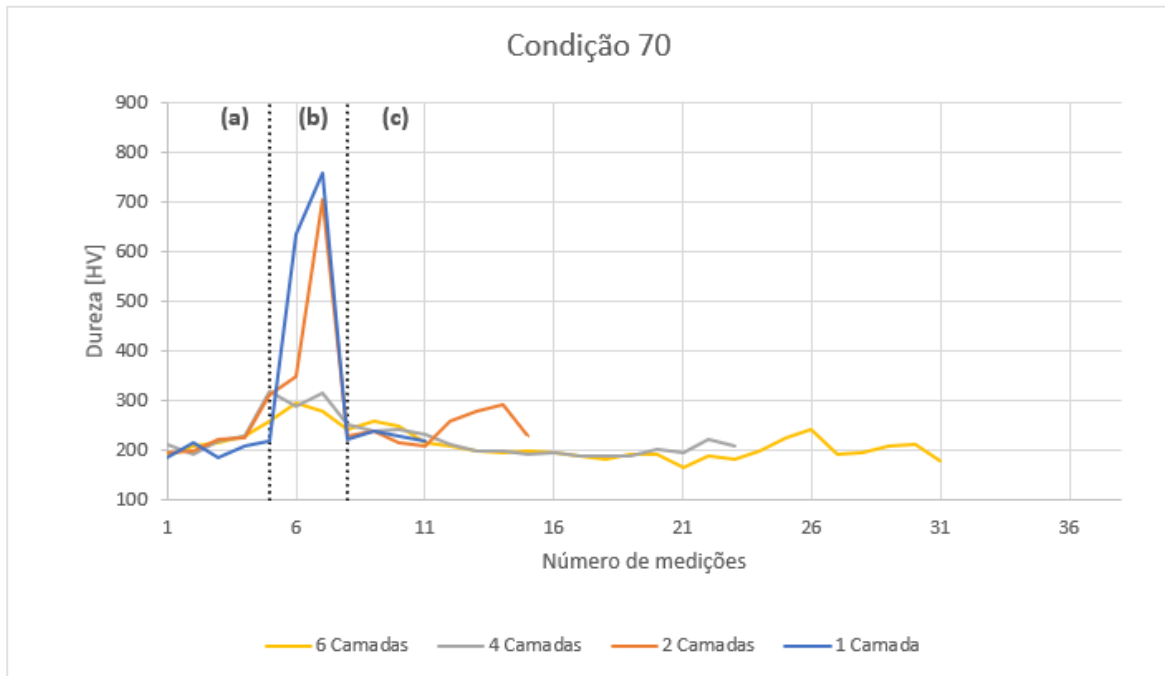


Figura 57 – Evolução da dureza para as deposições em degrau referentes à condição 70; (a) dureza registada no material de base; (b) dureza registada na ZTA; (c) dureza registada ao longo da deposição

Para as diferentes condições, é possível verificar um comportamento semelhante ao estudado para a condição 39. Contudo, nas condições 66 e 70 os valores máximos de dureza podem ser sempre verificados na ZTA, para todas as deposições. Assim, é possível concluir que para estas condições, que apresentam valores de intensidade de corrente mais reduzidos e velocidades de deposição mais elevadas, a possível formação de carbonetos de crómico ocorre na zona termicamente afetada, próximo do material depositado. No entanto, o mesmo não pode ser dito para a condição 39, uma vez que para as deposições de quatro e seis camadas, a dureza máxima verificada ocorre já no material depositado.

Um comportamento comum para as três condições é a diminuição dos valores máximos de dureza com o aumento das camadas depositadas. Este fenómeno deve-se ao facto de, aquando da deposição de uma nova camada, se formar um novo ciclo térmico que vai ter um efeito de amaciamento das camadas já depositadas assim como do material de base.

Com a análise das durezas somente para o material depositado, é possível correlacionar os valores obtidos com as microestruturas existentes nas zonas em questão. Assim, é possível concluir que as geometrias planares e celulares vão apresentar valores de dureza próximos, mas reduzidos, verificando-se um ligeiro aumento aquando da formação de geometrias colunares dendríticas. Os valores de dureza mais reduzidos descrevem as últimas camadas depositadas onde se podem observar as geometrias equiaxiais dendríticas.

É também possível, pela análise do Anexo B, verificar que a dureza comum obtida quando a liga é depositada, apresenta valores aproximados de 400 HV. No entanto, apenas na deposição de uma camada para a condição 39 é que se verificam estes valores, enquanto que nas outras condições os valores são próximos dos 200 HV. Este fenómeno deve-se à geometria em degrau desenvolvida, onde a deposição de uma camada está muito próxima das deposições múltiplas, sendo indiretamente submetida a um reaquecimento, que leva ao amaciamento do material e

consequentemente à diminuição dos valores de dureza. Para a condição 39 este amaciamento não é notório para a deposição de uma camada, pois a velocidade de deposição é reduzida, permitindo o correto arrefecimento do material, o que vai manter os valores de dureza tabelados.

Por fim, após uma análise realizada nas deposições em degrau, onde é possível compreender a influência das deposições sucessivas nas propriedades mecânicas das paredes desenvolvidas para o início do processo de deposição, é importante compreender se os fenómenos observados se registam de forma constante perante o decorrer de uma deposição multicamada em grande escala.

Para isso, foi realizado um estudo semelhante aos previamente descritos para as deposições de paredes finas, como pode ser observado na figura 58. Nesta, é possível observar os valores de dureza medidos para as 60 camadas que constituem a parede fina, assim como a comparação das três condições em estudo.

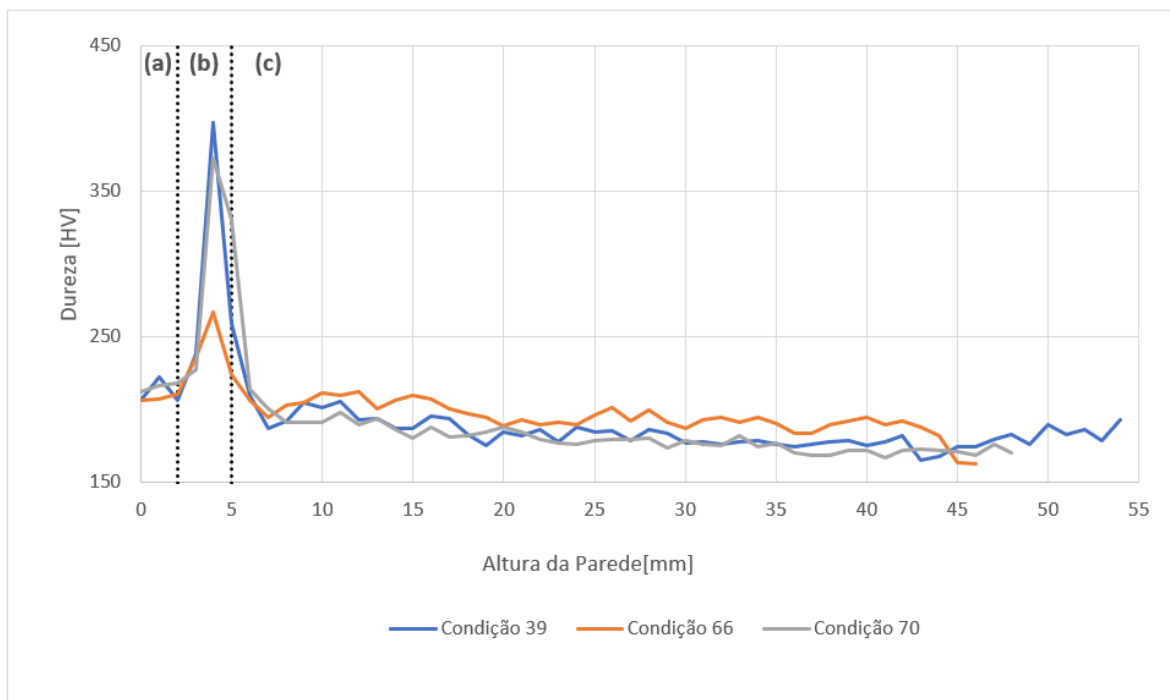


Figura 58 – Evolução da dureza para as deposições de paredes finas; (a) dureza registada no material de base; (b) dureza registada na ZTA; (c) dureza registada ao longo da deposição

Podemos concluir que a evolução da dureza para as três condições segue a mesma tendência tanto para um número reduzido, como para um número elevado de camadas, sendo, no entanto, possível observar ligeiras diferenças no processo.

Primeiro, os valores máximos de dureza localizam-se todos na zona (b), sendo assim possível concluir que com o aumento do número de camadas depositadas, e um aumento dos ciclos térmicos, os carbonetos não se vão formar no material depositado, aproximando mais os resultados entre as três condições.

Aquando do corte das amostras das paredes finas para as condições 39 e 70, foi notória uma fragilidade na zona de ligação entre a chapa e o material depositado, uma vez que durante o mesmo houve uma quebra das amostras neste local. Este comportamento frágil pode então ser justificado pelos elevados valores de dureza na zona (b).

É também possível verificar na zona (c) que os valores de dureza obtidos são menores que os registados nas deposições de seis camadas, dando a entender que embora seja uma redução pequena, esta ainda existe ao longo da deposição multicamada.

Por fim, e como pode ser verificado nos gráficos da figura 59 e 60, a condição 66 apresenta os resultados mais homogêneos ao longo da deposição multicamada, o que pode ser relacionado com os resultados da microdureza, onde se observa que a condição 66 apresenta a estrutura mais fina entre as três condições.

### 4.3. Estabilidade do processo

Como as amostras das paredes finas apresentam um elevado número de camadas depositadas, e tendo em consideração o ajuste necessário a realizar à distância entre o ânodo e a camada depositada, descrito no subcapítulo 3.2.5, é possível verificar na figura 59, a comparação entre os valores teóricos e reais referentes à evolução das alturas da parede depositada.

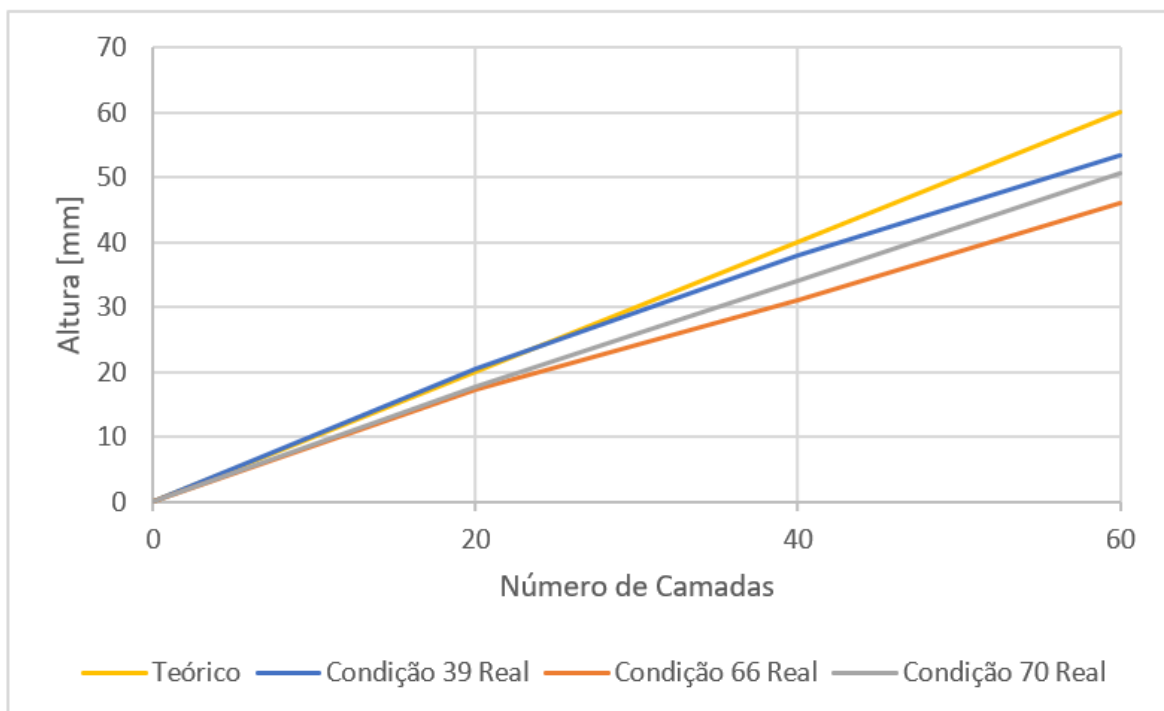


Figura 59 – Evolução da altura efetiva das paredes finas face à altura teórica expectável

Durante o processo de deposição, a subida do ânodo entre cada camada é definida para 1mm, sendo desta forma esperado que ao fim de sessenta camadas a parede apresente uma altura de

60mm, como pode ser observado pela linha de tendência no gráfico referente aos valores teóricos a atingir.

No entanto, uma vez que cada condição apresenta parâmetros distintos, vão ocorrer variações acentuadas nas dimensões reais atingidas, sendo que a condição que apresenta valores mais próximos dos teóricos é a 39 e a que apresenta valores mais dispares é a 66.

Este comportamento pode ser diretamente relacionado com a velocidade de deposição aplicada em cada condição, uma vez que quanto maior a velocidade, menos tempo tem o material para arrefecer, logo o material é depositado sobre uma camada parcialmente fundida, aumentando a diluição do material, reduzindo a altura atingida de camada para camada. Este comportamento pode ser observado para a condição 66, enquanto que o fenómeno contrário pode ser verificado na condição 39.

Já a condição 70, uma vez que apresenta valores de velocidade intermédios, vai descrever um comportamento transitório entre as condições descritas previamente.

De forma a dar continuidade ao estudo, é necessário estudar a largura das paredes finas obtidas, sendo que estas não vão ser comparadas com um valor teórico uma vez que as larguras não são definidas, sendo dependentes dos parâmetros definidos.

Assim, na figura 60 é representado um gráfico de comparação entre a evolução das larguras obtidas para cada condição estudada.

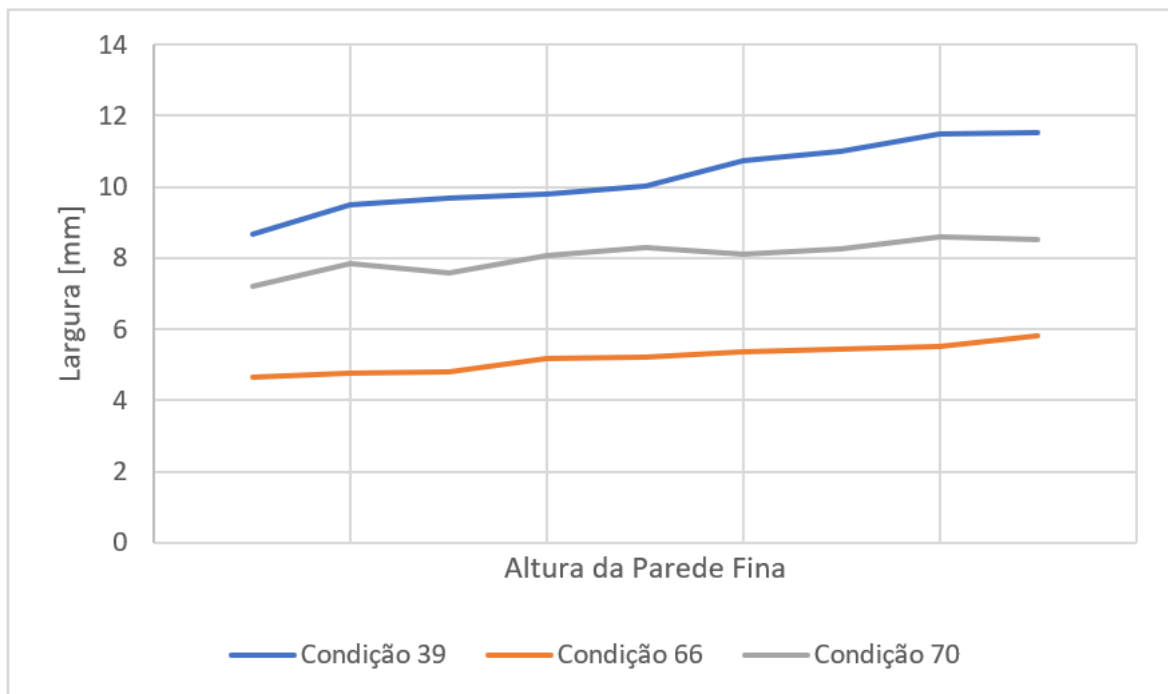


Figura 60 – Evolução da largura face à altura das paredes finas

Como se pode verificar, a condição 39 apresenta os valores de largura mais elevados, seguindo-se a condição 70 e, por fim, com os valores mais reduzidos, a condição 66.

Este fenómeno pode ser justificado pela análise dos parâmetros do processo, uma vez que para as condições descritas, os valores de intensidade de corrente são máximos na condição 39 e mínimos na condição 66. Assim, é possível confirmar a ligação da intensidade de corrente com as larguras obtidas, uma vez que com valores mais elevados, se vai verificar uma maior fluidez do material, levando a um maior espalhamento da camada e, por sua vez, a larguras mais elevadas.

No entanto, a largura não é constante ao longo da deposição, apresentando um aumento da largura com o aumento da altura da parede, como se pode verificar pela inclinação das linhas do gráfico da figura 60.

O crescimento descrito é resultado do acumular de ciclos térmicos durante o processo e consequentemente um aumento da temperatura do material, que vai levar a uma maior fluidez das camadas superiores.

Contudo, de forma a completar o estudo das larguras obtidas, foi calculada a taxa de crescimento da largura para as três condições, sendo esta apresentada no gráfico de barras da figura 61.

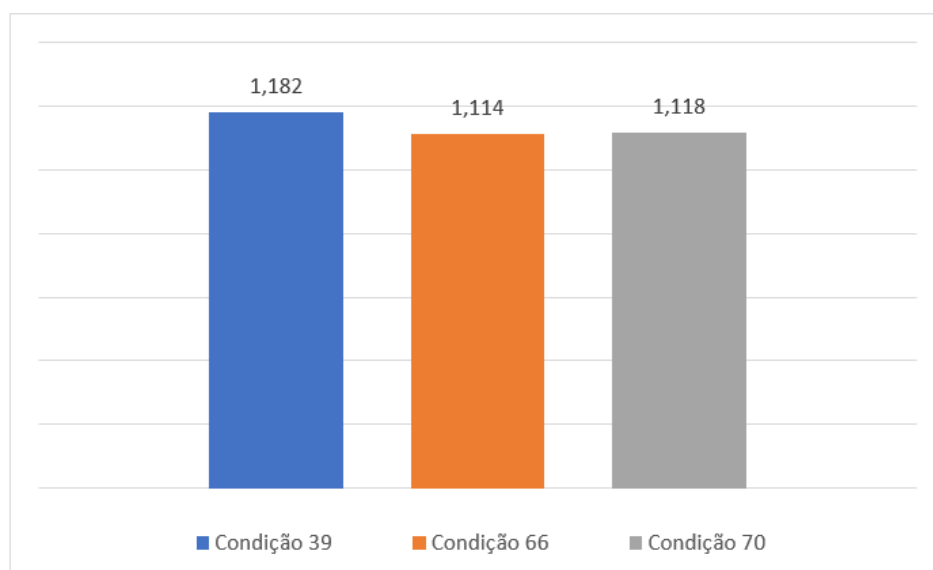


Figura 61 – Taxa de crescimento do processo de deposição das paredes finas para as três condições

Ao contrário do esperado, embora as paredes apresentem um acabamento superficial muito distinto, as taxas de crescimento são muito semelhantes para as três condições, permitindo concluir que a influência dos ciclos térmicos descrita previamente, é quase independente dos parâmetros do processo.

Por fim, na figura 62, são apresentadas as secções transversais das paredes finas estudadas, tornando-se assim possível verificar as variações das dimensões entre as mesmas.

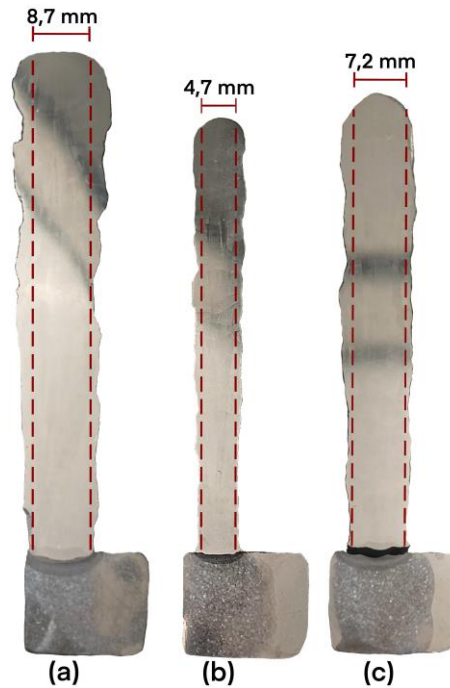


Figura 62 – Secção transversal das paredes finas produzidas; (a) condição 39; (b) condição 66; (c) condição 70

Acompanhando as secções transversais, é também representado para cada deposição, a largura efetiva do cordão, ou seja, a largura aproveitada da parede fina, após a maquinagem da mesma.

Esta análise é importante, uma vez que se pretende aplicar esta tecnologia na reparação de moldes, onde, não só é importante preencher as zonas danificadas, como corrigir com um bom acabamento dimensional, as zonas funcionais do molde.

#### 4.4. Radiografia

Foi realizada a radiografia correspondente às três paredes finas. Estas foram realizadas com o intuito de compreender se durante o processo de deposição multicamada, se formam inclusões ou porosidades, devido aos parâmetros aplicados, uma vez que esta conclusão não pode ser retirada pelo estudo das secções transversais estudadas, nem por um processo de líquidos penetrantes, uma vez que os defeitos procurados se encontram no interior das deposições.

Nas figuras 63, 64 e 65 são apresentadas as radiografias das paredes finas das condições 39, 66 e 70 respetivamente.

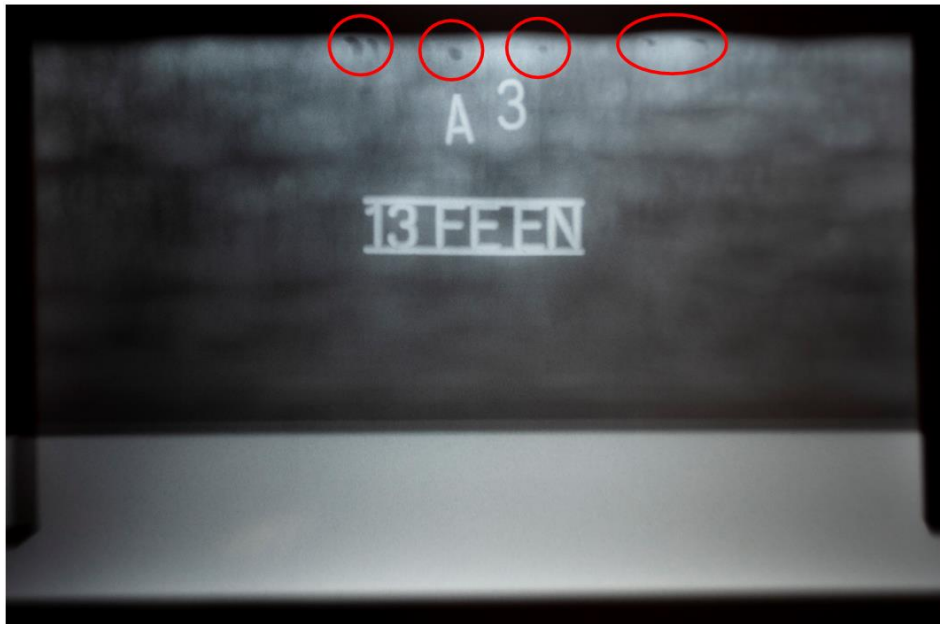


Figura 63 – Radiografia da parede fina referente à condição 39



Figura 64 – Radiografia da parede fina referente à condição 66

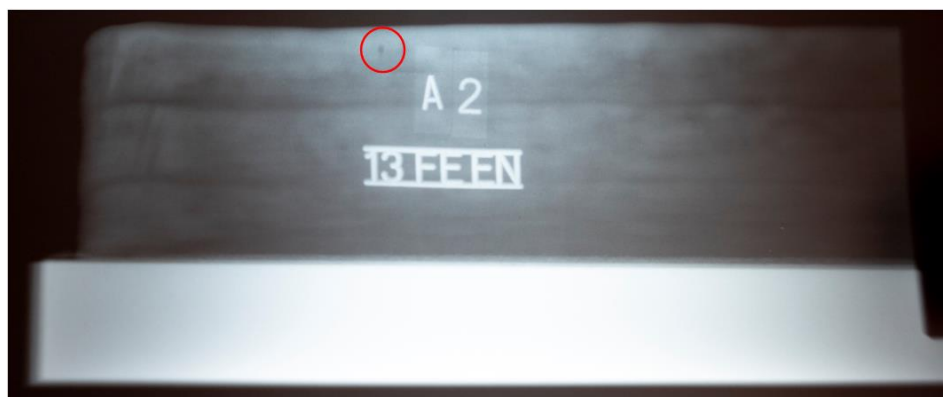


Figura 65 – Radiografia da parede fina referente à condição 70

Através de uma primeira análise ao conjunto das três imagens, é possível observar a linha de separação entre as três etapas de deposição que constituem as paredes finas. Isto deve-se ao facto de que, aquando da interrupção do processo para correção do ânodo, a camada depositada imediatamente antes, vai ser submetida a um tempo de arrefecimento mais elevado, apresentando-se de forma notória nas radiografias em questão.

Como se pode verificar, para a condição 39 (figura 63), existe um grande número de vazios e porosidades macroscópicas localizados no topo da parede. Estes vazios podem ser originados pela evolução da *melt pool* num *keyhole*, ou pelo sobreaquecimento do material que leva à sua expansão e conseqüente formação de poros após a solidificação, como descreve B. Zhang et al. [53]. Ambos os fenómenos descritos se devem à elevada intensidade de corrente utilizada nesta condição.

A formação de vazios pode ser verificada para a condição 70 (figura 65), mas apenas num único ponto, demonstrando assim que os parâmetros utilizados podem ser propensos à formação de irregularidades, não sendo, no entanto, um acontecimento regular.

Já na condição 66 (figura 64) não se verifica a formação de vazios nem porosidades, uma vez que a intensidade de corrente nesta condição apresenta valores mais reduzidos.



## 5. CONCLUSÕES

No presente capítulo encontram-se descritas as principais conclusões retiradas após o desenvolvimento do trabalho prático e da análise dos resultados obtidos, bem como as limitações existentes e sugestões para a continuação do trabalho.

### 5.1. Conclusões finais

Perante o trabalho realizado, e após a análise e discussão de resultados, é possível tirar algumas conclusões relevantes e em congruência com os objetivos do trabalho.

Inicialmente, e pela observação dos resultados provenientes do projeto, foi possível realizar uma seleção de condições para o estudo, que foi constituída por duas fases. E embora, apenas três condições tenham sido definidas para estudo, as doze condições consideradas após a primeira seleção apresentavam valores bastante positivos e dentro dos limites existentes, tornando a totalidade das 12 condições candidata a ser submetida aos estudos realizados, de forma a aumentar a compreensão do processo.

Pela observação dos resultados obtidos, e pela semelhança dos mesmos para as três condições estudadas, principalmente a nível microscópico, podemos validar o processo de seleção efetuado, uma vez que deste surgem condições com resultados bastante positivos.

Embora, de forma global, os resultados aparentem ser semelhantes, é possível, após uma análise cuidada, verificar que as variações dos valores dos parâmetros em estudo, vão ter consequências reais nas deposições, afetando assim a qualidade final do produto produzido.

Segundo o estudo da microestrutura, é possível concluir que as estruturas mais finas são registadas para a condição 66. No entanto, não é notória a discrepância entre as diversas condições. Já no estudo da microdureza, embora os valores e comportamentos obtidos sejam muito semelhantes, já foi possível fazer uma maior distinção entre as condições, uma vez que esta análise permitiu justificar o comportamento frágil das condições 39 e 70, na ligação entre a chapa de aço e o material depositado.

A grande variação entre as condições foi verificada no estudo da estabilidade do processo, onde foi possível observar que a condição 66, apresentava a melhor qualidade e aspeto geométrico, falhando apenas na altura da parede fina.

Assim sendo, e tendo em mente o objetivo de restaurar moldes, a condição mais indicada para o processo é a condição 66, uma vez que em termos mecânicos rivaliza com as duas restantes condições, e que geometricamente supera os restantes resultados, sendo necessário, no entanto, ter em consideração a compensação da altura da deposição aquando da programação da deposição.

Considerando que a condição 70 apresenta resultados semelhantes e satisfatórios para todos os estudos, e apresenta uma largura de camada superior à da condição 66, é possível ponderar a utilização desta condição para realizar o enchimento das peças a desenvolver, criando assim uma

deposição híbrida, onde os limites da peça são feitos utilizando a condição 66 e o interior com a condição 70, reduzindo assim o número de passagens e o tempo global do processo de deposição.

Para finalizar, os objetivos definidos foram atingidos com sucesso, terminando assim o estudo com uma compreensão profunda da influência dos parâmetros do processo e da deposição multicamada, na evolução das estruturas e da dureza, assim como na estabilidade do processo 3DPMD.

## 5.2. Limitações e trabalhos futuros

Devido ao elevado número de estudos realizados e à complexidade no desenvolvimento dos mesmos, foi necessário selecionar um pequeno número de condições em estudo, face ao número inicial existente. Desta forma, e como proposta de trabalho futuro, sugere-se a introdução de novas combinações de parâmetros, mesmo que fora do processo de seleção, de forma a validar a otimização efetuada neste trabalho.

Para além de aumentar o número de condições de estudo, seria também interessante uma análise da composição química das diversas camadas depositadas, no sentido de a correlacionar com a filiação de durezas. Este facto pode permite confirmar a ligação dos carbonetos de crómio à maior dureza na zona de transição metal base – material depositado, conforme referido no texto.

Por último, e uma vez que a produção das deposições foi realizada numa faculdade parceira, limitando assim o trabalho desenvolvido, sugere-se a continua aplicação da condição definida como ótima, produzindo geometrias complexas e possivelmente a tentativa de reparação de um molde, assim como o continuo desenvolvimento do programa de *slicing* dos ficheiros CAD, levando a uma otimização do processo e aproximação deste a outros métodos de fabrico aditivo rivais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] International Organization for Standardization (ISO), "Additive manufacturing-General principles-Fundamentals and vocabulary Fabrication additive-Principes généraux-Fondamentaux et vocabulaire INTERNATIONAL STANDARD ISO/ASTM 52900 ISO/ASTM 52900:2021(E) COPYRIGHT PROTECTED DOCUMENT," vol. 2021, 2021.
- [2] P. Durai Murugan *et al.*, "A current state of metal additive manufacturing methods: A review," *Mater. Today Proc.*, vol. 59, pp. 1277–1283, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.11.503.
- [3] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, *3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. 2015. [Online]. Available: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4939-2113-3>
- [4] D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, and C. Emmelmann, "Additive manufacturing of metals," *Acta Mater.*, vol. 117, pp. 371–392, 2016, doi: 10.1016/j.actamat.2016.07.019.
- [5] D. Landi, F. C. Zefinetti, C. Spreafico, and D. Regazzoni, "Comparative life cycle assessment of two different manufacturing technologies: Laser additive manufacturing and traditional technique," *Procedia CIRP*, vol. 105, pp. 700–705, 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.02.117.
- [6] J. I. Arrizubieta, O. Ukar, M. Ostolaza, and A. Mugica, "Study of the Environmental Implications of Using Its Handling," *Metals (Basel)*, vol. 10, p. 261, 2020.
- [7] C. Fredriksson, "Sustainability of metal powder additive manufacturing," *Procedia Manuf.*, vol. 33, pp. 139–144, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.04.018.
- [8] L. Yi, S. Ehmsen, M. Glatt, and J. C. Aurich, "A case study on the part optimization using eco-design for additive manufacturing based on energy performance assessment," *Procedia CIRP*, vol. 96, pp. 91–96, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2021.01.058.
- [9] V. Lunetto, P. C. Priarone, S. Kara, and L. Settineri, "A comparative LCA method for environmentally friendly manufacturing: Additive manufacturing versus Machining case," *Procedia CIRP*, vol. 98, pp. 406–411, 2021, doi: 10.1016/j.procir.2021.01.125.
- [10] G. Ingarao and P. C. Priarone, "A comparative assessment of energy demand and life cycle costs for additive- and subtractive-based manufacturing approaches," *J. Manuf. Process.*, 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.06.009.
- [11] K. Kellens, R. Mertens, D. Paraskevas, W. Dewulf, and J. R. Dufloy, "Environmental Impact of Additive Manufacturing Processes: Does AM Contribute to a More Sustainable Way of Part Manufacturing?," *Procedia CIRP*, vol. 61, no. Section 3, pp. 582–587, 2017, doi: 10.1016/j.procir.2016.11.153.
- [12] J. Kranz, D. Herzog, and C. Emmelmann, "Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in TiAl6V4," *J. Laser Appl.*, vol. 27, no. S1, p. S14001, 2015, doi: 10.2351/1.4885235.
- [13] F. Kerstens, A. Cervone, and P. Gradl, "End to end process evaluation for additively manufactured liquid rocket engine thrust chambers," *Acta Astronaut.*, vol. 182, no. March, pp. 454–465, 2021, doi: 10.1016/j.actaastro.2021.02.034.
- [14] B. Barroqueiro, R. A. F. Valente, and V. Neto, "Metal Additive Manufacturing Cycle in Aerospace Industry: A Comprehensive Review," pp. 1–21, 2019, doi: 10.3390/jmmp3030052.
- [15] S. Ford and M. Despeisse, "Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study

- of the advantages and challenges,” *J. Clean. Prod.*, vol. 137, pp. 1573–1587, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.150.
- [16] B. Berman, “3-D printing: The new industrial revolution,” *Bus. Horiz.*, vol. 55, no. 2, pp. 155–162, 2012, doi: 10.1016/j.bushor.2011.11.003.
- [17] D. Chen, S. Heyer, S. Ibbotson, K. Salonitis, J. G. Steingrímsson, and S. Thiede, “Direct digital manufacturing: Definition, evolution, and sustainability implications,” *J. Clean. Prod.*, vol. 107, pp. 615–625, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.05.009.
- [18] S. H. Huang, P. Liu, A. Mokasdar, and L. Hou, “Additive manufacturing and its societal impact: A literature review,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 67, no. 5–8, pp. 1191–1203, 2013, doi: 10.1007/s00170-012-4558-5.
- [19] I. J. Petrick and T. W. Simpson, “3D printing disrupts manufacturing,” *Res. Technol. Manag.*, vol. 56, no. 6, pp. 12–16, 2013, doi: 10.5437/08956308X5606193.
- [20] V. Petrovic, J. Vicente Haro Gonzalez, O. Jordá Ferrando, J. Delgado Gordillo, J. Ramon Blasco Puchades, and L. Portoles Grinan, “Additive layered manufacturing: Sectors of industrial application shown through case studies,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 49, no. 4, pp. 1061–1079, 2011, doi: 10.1080/00207540903479786.
- [21] B. Blakey-Milner *et al.*, “Metal additive manufacturing in aerospace: A review,” *Mater. Des.*, vol. 209, p. 110008, 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2021.110008.
- [22] D. G. Ahn, *Directed Energy Deposition (DED) Process: State of the Art*. Korean Society for Precision Engineering, 2021. doi: 10.1007/s40684-020-00302-7.
- [23] G. Tapia, “A Review on Process Monitoring and Control in Metal-Based Additive Manufacturing,” vol. 136, no. December, 2014, doi: 10.1115/1.4028540.
- [24] A. Basak and S. Das, “Epitaxy and Microstructure Evolution in Metal Additive Manufacturing,” no. March, pp. 1–25, 2016, doi: 10.1146/annurev-matsci-070115-031728.
- [25] W. Xue, B. V. Krishna, A. Bandyopadhyay, and S. Bose, “Processing and biocompatibility evaluation of laser processed porous titanium,” vol. 3, pp. 1007–1018, 2007, doi: 10.1016/j.actbio.2007.05.009.
- [26] M. Khan and P. Dickens, “Selective Laser Melting (SLM) of pure gold,” vol. 43, no. 2, pp. 114–121, 2010.
- [27] P. A. Lykov, E. V. Safonov, and A. M. Akhmedjanov, “Selective Laser Melting of Copper,” vol. 843, pp. 284–288, 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.843.284.
- [28] L. E. Murr, “Metallurgy of additive manufacturing: Examples from electron beam melting,” *Addit. Manuf.*, vol. 5, pp. 40–53, 2015, doi: 10.1016/j.addma.2014.12.002.
- [29] L. E. Murr *et al.*, “Microstructures and Properties of 17-4 PH Stainless Steel Fabricated by Selective Laser Melting,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 1, no. 3, pp. 167–177, 2012, doi: 10.1016/S2238-7854(12)70029-7.
- [30] T. Koutsoukis, S. Zinelis, G. Eliades, K. Al-wazzan, M. Al Rifaiy, and Y. S. Al Jabbari, “Selective Laser Melting Technique of Co-Cr Dental Alloys: A Review of Structure and Properties and Comparative Analysis with Other Available Techniques,” vol. 24, pp. 303–312, 2015, doi: 10.1111/jopr.12268.
- [31] J. H. Martin, B. D. Yahata, J. M. Hundley, J. A. Mayer, T. A. Schaedler, and T. M. Pollock, “3D printing of high-strength aluminium alloys,” *Nat. Publ. Gr.*, 2017, doi: 10.1038/nature23894.
- [32] S. Cooke, K. Ahmadi, S. Willerth, and R. Herring, “Metal additive manufacturing:

- Technology, metallurgy and modelling,” *J. Manuf. Process.*, vol. 57, no. April, pp. 978–1003, 2020, doi: 10.1016/j.jmapro.2020.07.025.
- [33] T. Wang, Y. Y. Zhu, S. Q. Zhang, H. B. Tang, and H. M. Wang, “Grain morphology evolution behavior of titanium alloy components during laser melting deposition additive manufacturing,” *J. Alloys Compd.*, vol. 632, pp. 505–513, 2015, doi: 10.1016/j.jallcom.2015.01.256.
- [34] R. Shrinivas *et al.*, “Materials Today: Proceedings Processes and applications of metal additive manufacturing,” *Mater. Today Proc.*, vol. 54, pp. 228–233, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.08.298.
- [35] K. Hoefer and P. Mayr, “Additive manufacturing of titanium parts using 3d plasma metal deposition,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 941 MSF, pp. 2137–2141, 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.941.2137.
- [36] E. M. Perez-Soriano, E. Ariza, C. Arevalo, I. Montealegre-Melendez, M. Kitzmantel, and E. Neubauer, “Processing by additive manufacturing based on plasma transferred arc of hastelloy in air and argon atmosphere,” *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 2, 2020, doi: 10.3390/met10020200.
- [37] A. Saboori, A. Aversa, G. Marchese, S. Biamino, M. Lombardi, and P. Fino, “Microstructure and mechanical properties of AISI 316L produced by directed energy deposition-based additive manufacturing: A review,” *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 9, 2020, doi: 10.3390/app10093310.
- [38] Z. Wang, T. A. Palmer, and A. M. Beese, “Effect of processing parameters on microstructure and tensile properties of austenitic stainless steel 304L made by directed energy deposition additive manufacturing,” *Acta Mater.*, vol. 110, pp. 226–235, 2016, doi: 10.1016/j.actamat.2016.03.019.
- [39] J. Hensel, A. Przyklenk, J. Müller, M. Köhler, and K. Dilger, “Surface quality parameters for structural components manufactured by DED-arc processes,” *Mater. Des.*, vol. 215, p. 110438, 2022, doi: 10.1016/j.matdes.2022.110438.
- [40] G. Liu *et al.*, “Analysis of microstructure, mechanical properties, and wear performance of NiTi alloy fabricated by cold metal transfer based wire arc additive manufacturing,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 20, pp. 246–259, 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.07.068.
- [41] T. Qi, H. Zhu, H. Zhang, J. Yin, L. Ke, and X. Zeng, “Selective laser melting of Al7050 powder: Melting mode transition and comparison of the characteristics between the keyhole and conduction mode,” *Mater. Des.*, vol. 135, pp. 257–266, 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2017.09.014.
- [42] R. Fabbro, “Melt pool and keyhole behaviour analysis for deep penetration laser welding,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 43, no. 44, 2010, doi: 10.1088/0022-3727/43/44/445501.
- [43] H. Ki, P. S. Mohanty, and J. Mazumder, “Modeling of laser keyhole welding: Part I. Mathematical modeling, numerical methodology, role of recoil pressure, multiple reflections, and free surface evolution,” *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 33, no. 6, pp. 1817–1830, 2002, doi: 10.1007/s11661-002-0190-6.
- [44] J. Fu, H. Li, X. Song, and M. W. Fu, “Multi-scale defects in powder-based additively manufactured metals and alloys,” *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 122, pp. 165–199, 2022, doi: 10.1016/j.jmst.2022.02.015.
- [45] T. Mukherjee, J. S. Zuback, A. De, and T. DebRoy, “Printability of alloys for additive manufacturing,” *Sci. Rep.*, vol. 6, pp. 1–8, 2016, doi: 10.1038/srep19717.

- [46] S. Chen, H. Gao, Y. Zhang, Q. Wu, Z. Gao, and X. Zhou, "Review on residual stresses in metal additive manufacturing: formation mechanisms, parameter dependencies, prediction and control approaches," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 17, pp. 2950–2974, 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.02.054.
- [47] A. Waqas, X. Qin, J. Xiong, H. Wang, and C. Zheng, "Optimization of process parameters to improve the effective area of deposition in GMAW-based additive manufacturing and its mechanical and microstructural analysis," *Metals (Basel)*, vol. 9, no. 7, 2019, doi: 10.3390/met9070775.
- [48] R. Ghanavati and H. Naffakh-moosavy, "Additive manufacturing of functionally graded metallic materials: A review of experimental and numerical studies," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 13, pp. 1628–1664, 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.05.022.
- [49] D. C. Hofmann and S. Roberts, "Compositionally graded metals: A new frontier of additive manufacturing," vol. 29, no. 17, pp. 1899–1910, 2014, doi: 10.1557/jmr.2014.208.
- [50] D. D. Lima *et al.*, "Materials & Design Laser additive processing of a functionally graded internal fracture fixation plate," *Mater. Des.*, vol. 130, no. March, pp. 8–15, 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2017.05.034.
- [51] E. Maleki, S. Bagherifard, M. Bandini, and M. Guagliano, "Surface post-treatments for metal additive manufacturing: Progress, challenges, and opportunities," *Addit. Manuf.*, vol. 37, no. May 2020, p. 101619, 2021, doi: 10.1016/j.addma.2020.101619.
- [52] S. I. Shakil *et al.*, "Post fabrication thermomechanical processing of additive manufactured metals: A review," *J. Manuf. Process.*, vol. 73, no. October 2021, pp. 757–790, 2022, doi: 10.1016/j.jmapro.2021.11.047.
- [53] B. Zhang, Y. Li, and Q. Bai, "Defect Formation Mechanisms in Selective Laser Melting: A Review," *Chinese J. Mech. Eng. (English Ed.)*, vol. 30, no. 3, pp. 515–527, 2017, doi: 10.1007/s10033-017-0121-5.
- [54] Y. Kok *et al.*, "Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: A critical review," *Mater. Des.*, vol. 139, pp. 565–586, 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2017.11.021.
- [55] J. P. Kruth, M. Badrossamay, E. Yasa, J. Deckers, L. Thijs, and J. Van Humbeeck, "Part and material properties in selective laser melting of metals," *16th Int. Symp. Electromachining, ISEM 2010*, pp. 3–14, 2010.
- [56] S. M. Kelly and S. L. Kampe, "Microstructural evolution in laser-deposited multilayer Ti-6Al-4V builds: Part II. Thermal Modeling," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 35 A, no. 6, pp. 1869–1879, 2004, doi: 10.1007/s11661-004-0095-7.
- [57] J. Donoghue, A. A. Antony, F. Martina, P. A. Colegrove, S. W. Williams, and P. B. Prangnell, "The effectiveness of combining rolling deformation with Wire-Arc Additive Manufacture on  $\beta$ -grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V," *Mater. Charact.*, vol. 114, pp. 103–114, 2016, doi: 10.1016/j.matchar.2016.02.001.
- [58] I. I. 17025, "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories," 2017

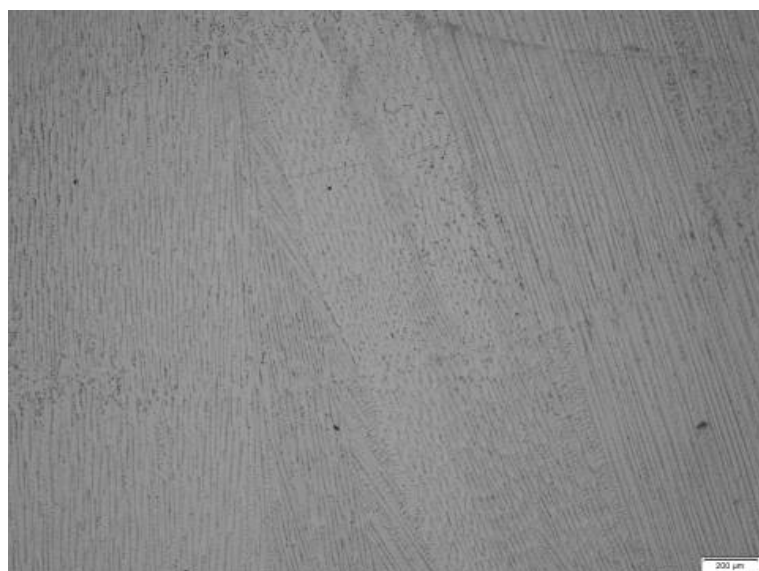
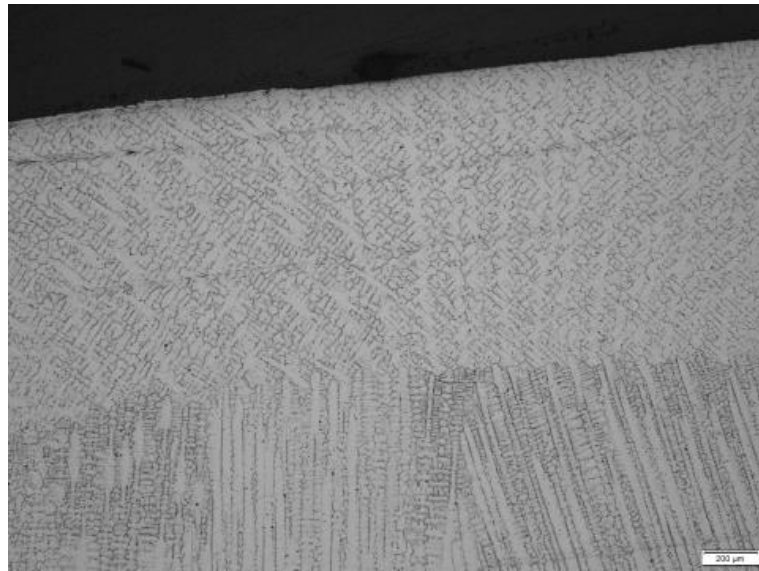




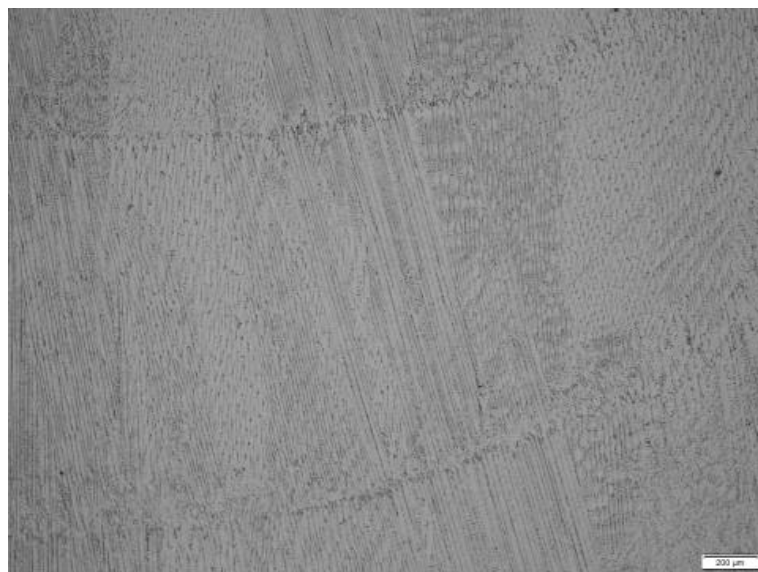
## APÊNDICE A

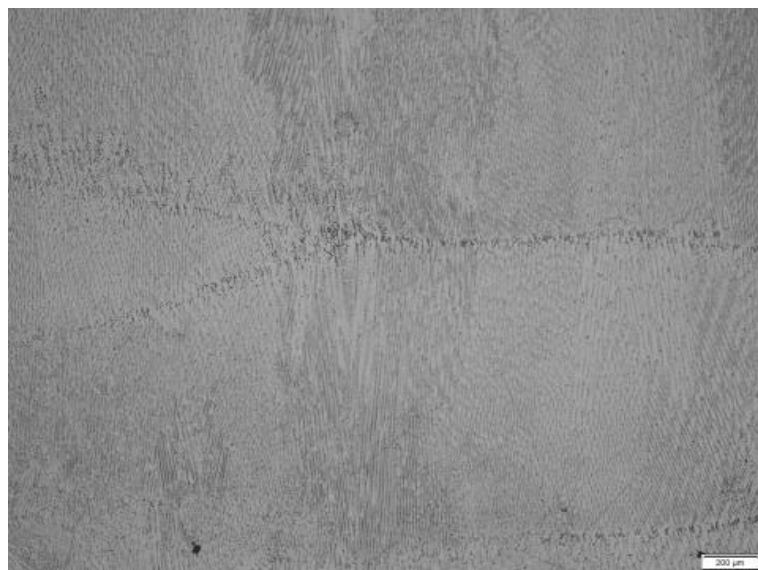
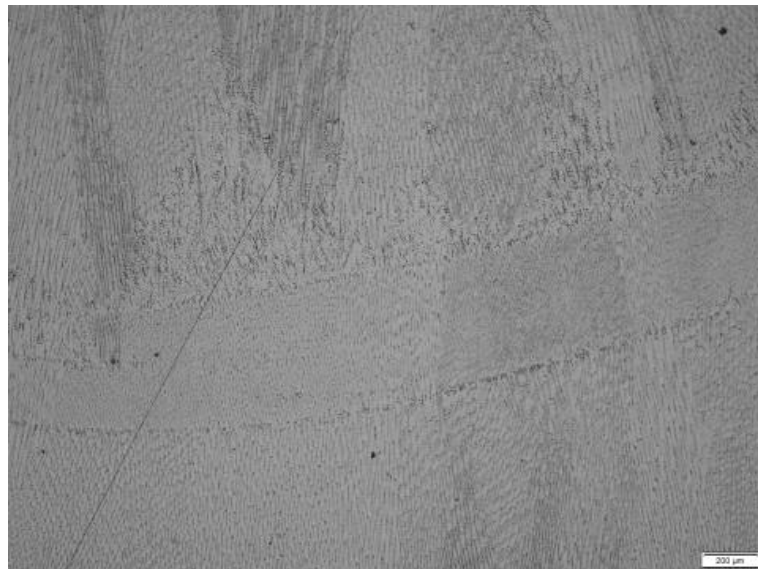
Fluxo de deposição de pó: 10,4 g/min									
	Intensidade de Corrente [A]	Velocidade de Deposição [mm/min]	Largura Cordão [mm]	Desvio Padrão	Espessura do Cordão [mm]	Desvio Padrão	Dureza [HV]	Desvio Padrão	Diluição [%]
1	70	100	4,68	0,29	3,05	0,22	618	6,25	25,4
2		200	4,36	0,26	2,68	0,15	613	10,14	23,7
3		300	3,46	0,25	1,64	0,2	526	0	26,8
4		400	3,16	0,29	1,58	0,12	659	11,39	20,4
5		500	2	0,23	1,36	0,24	659	1,85	26,5
6		600	2,85	0,25	1,27	0,16	615	10,92	13,3
7	90	100	7,75	0,21	3	0	609	9,02	21,2
8		200	5,3	0,46	2,12	0,1	588	0	23,5
9		300	4,11	0,49	1,66	0,12	654	11,1	35,1
10		400	3,88	0,28	1,41	0,14	686	10,89	29,9
11		500	3,1	0,23	1,24	0,15	657	5,59	35,4
12		600	3,2	0,4	1,24	0,15	606	12,1	19,7
13	110	100	8,93	0,37	2,78	0,24	673	1,72	38,1
14		200	7,84	0,44	2,1	0,32	674	5,04	41,7
15		300	6,25	0,47	1,34	0,15	664	0	49,3
16		400	5,49	0,26	0,81	0,08	645	1,58	44,2
17		500	4,81	0,45	0,68	0,1	618	4,41	40,7
18		600	4,25	0,5	0,58	0,04	601	14,28	38,4
19	130	100	10,19	0,24	1,66	0,19	651	8,45	38,9
20		200	8,23	0,44	1,2	0,18	630	4,57	46,9
21		300	7,69	0,36	0,84	0,04	625	1,49	-
22		400	6,26	0,15	0,56	0,07	506	3,91	38,6
23		500	5,66	0,28	0,49	0,06	555	10,77	40,9
24		600	4,95	0,29	0,41	0,03	582	10,08	48,0
25	150	100	11,98	0,17	1,46	0,03	642	3,11	43,0
26		200	9,76	0,37	1,04	0,09	627	3,20	29,5
27		300	8,04	0,39	0,8	0,08	571	11,88	38,0
28		400	6,09	0,43	0,87	0,13	502	7,56	20,0
29		500	5,11	0,25	0,77	0,08	563	0,00	27,6
30		600	4,49	0,19	0,75	0,09	536	7,55	30,4
31	170	100	13,59	0,18	1,38	0,06	642	4,70	30,5
32		200	10,57	0,5	1,04	0,11	623	11,65	23,4
33		300	8,32	0,33	1,02	0,08	616	7,87	38,3
34		400	6,38	0,21	1	0,24	649	9,65	29,6
35		500	5,22	0,09	0,77	0,11	672	12,16	27,9
36		600	2,57	0	0,27	0	691	4,23	-

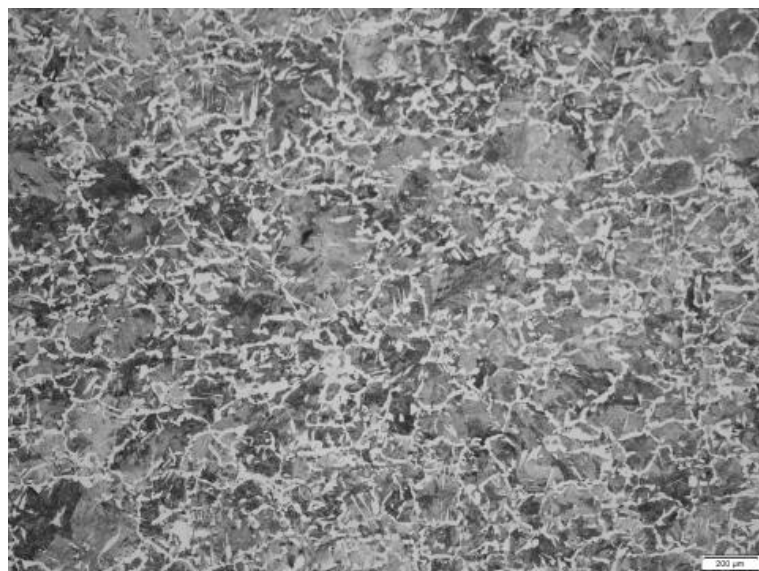
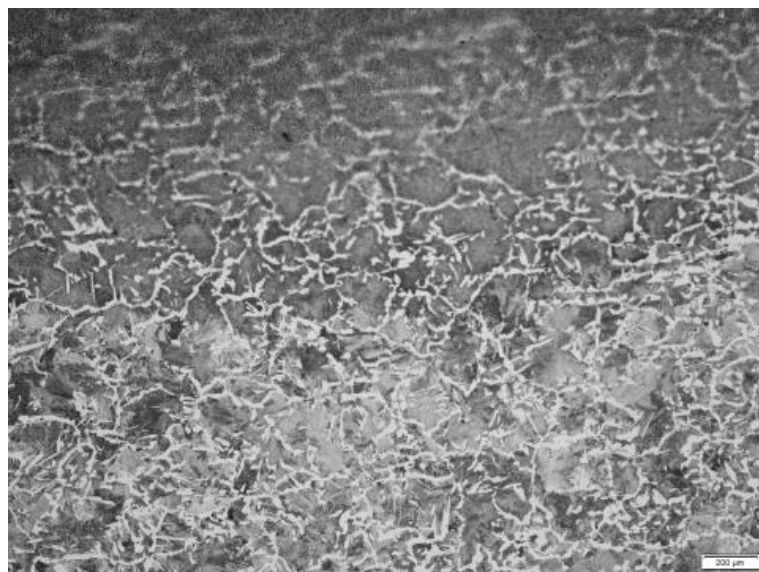
Fluxo de deposição de pó: 20 g/min									
	Intensidade de Corrente [A]	Velocidade de Deposição	Largura Cordão [mm]	Desvio Padrão	Espessura do Cordão [mm]	Desvio Padrão	Dureza [HV]	Desvio Padrão	Diluição [%]
37	130	100	9,42	0,56	3,53	0,18	642	4,95	17,3
38		200	8,13	0,19	2,38	0,11	653	5,75	30,7
39		300	7,47	0,19	1,88	0,11	584	5,37	22,5
40		400	5,68	0,06	2,27	0,06	559	12,05	30,7
41		500	5,34	0,16	1,19	0,04	585	0,00	29,2
42		600	5,26	0,29	1,14	0,06	587	15,85	27,0
43	150	100	12,05	0,59	4,10	0,16	570	10,74	27,2
44		200	9,78	0,56	2,85	0,06	606	2,83	38,5
45		300	7,09	0,42	2,20	0,06	582	11,24	40,6
46		400	6,22	0,31	2,10	0,11	555	11,94	36,6
47		500	5,51	0,11	1,83	0,05	573	5,71	45,7
48		600	5,37	0,19	1,60	0,03	682	7,73	-
49	170	100	13,36	0,41	4,28	0,00	567	3,41	36,1
50		200	9,79	0,40	2,27	0,04	563	4,59	15,9
51		300	8,25	0,04	1,67	0,07	587	5,95	43,4
52		400	7,17	0,22	1,37	0,05	558	13,72	20,7
53		500	6,25	0,12	0,88	0,02	569	6,90	48,8
54		600	5,69	0,40	0,88	0,43	659	18,85	49,4
55	70	100	5,57	0,16	3,48	0,25	525	5,66	2,2
56		200	3,97	0,21	2,10	0,03	537	10,20	8,0
57		300	3,53	0,23	1,60	0,12	525	8,27	10,8
58		400	3,52	0,24	1,40	0,14	561	8,30	27,2
59		500	3,32	0,29	1,17	0,04	547	0,00	32,5
60		600	2,92	0,32	1,07	0,24	541	2,55	30,4
61	90	100	6,61	0,08	2,95	0,10	597	11,07	5,2
62		200	5,10	0,10	2,02	0,05	586	14,75	27,4
63		300	4,17	0,24	1,74	0,20	540	5,99	25,2
64		400	3,85	0,36	1,44	0,29	627	11,45	9,0
65		500	3,65	0,22	1,23	0,20	547	10,61	17,2
66		600	3,07	0,09	1,04	0,16	533	6,50	12,9
67	110	100	8,87	0,09	2,90	0,10	574	11,15	12,0
68		200	7,13	0,41	1,99	0,19	618	0,10	11,2
69		300	7,03	0,33	1,44	0,09	569	7,91	9,5
70		400	6,27	0,25	1,29	0,05	558	5,47	10,9
71		500	6,20	0,33	1,14	0,08	560	2,20	14,2
72		600	5,33	0,47	0,96	0,08	583	8,02	-

**APÊNDICE B - CONDIÇÃO 39**

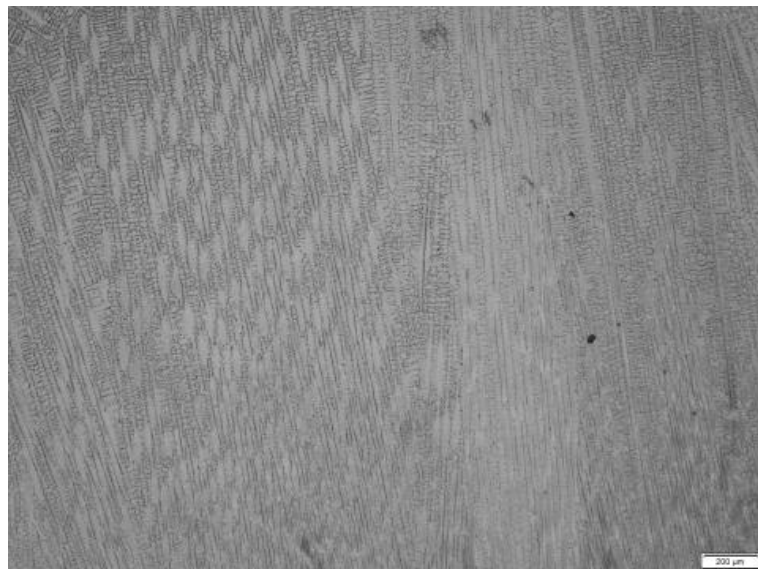
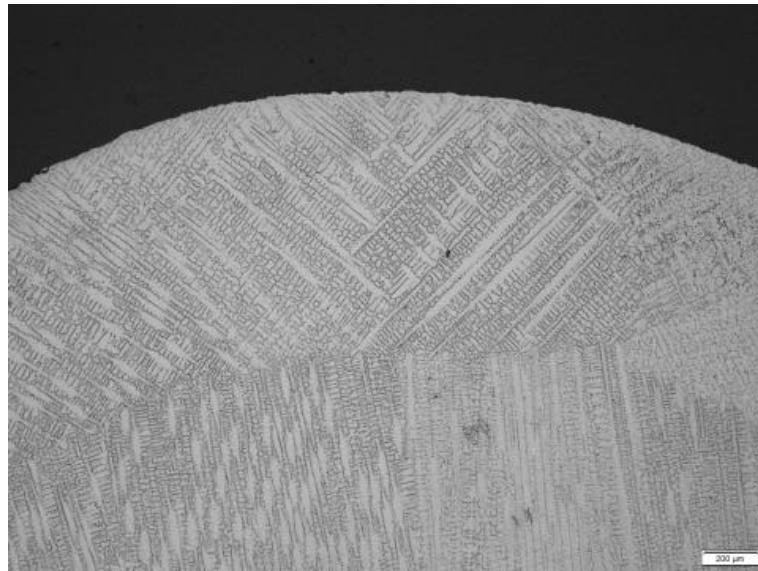


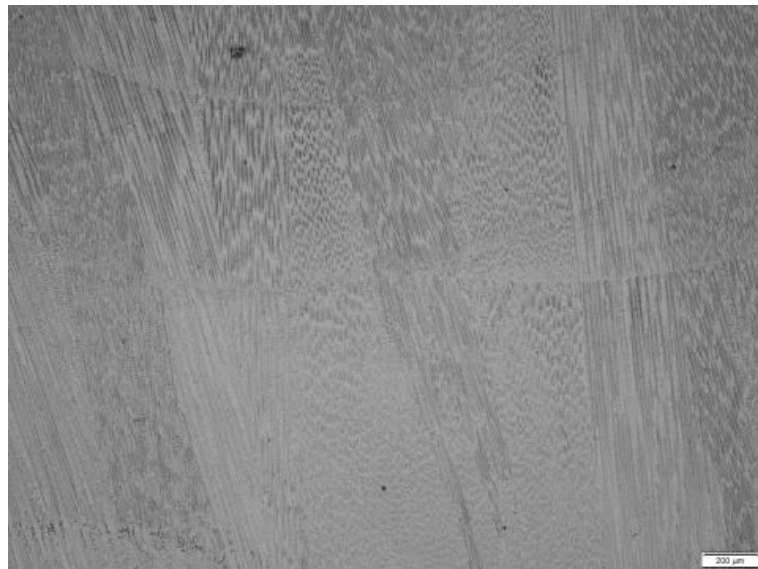


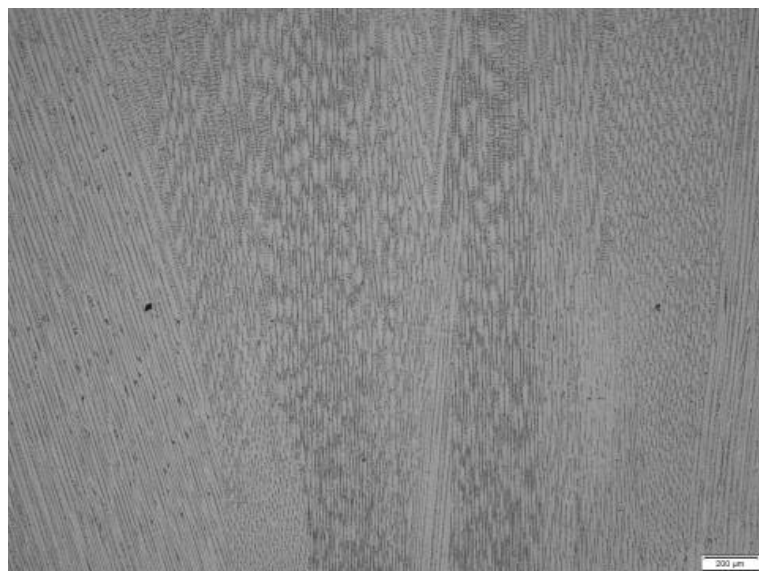
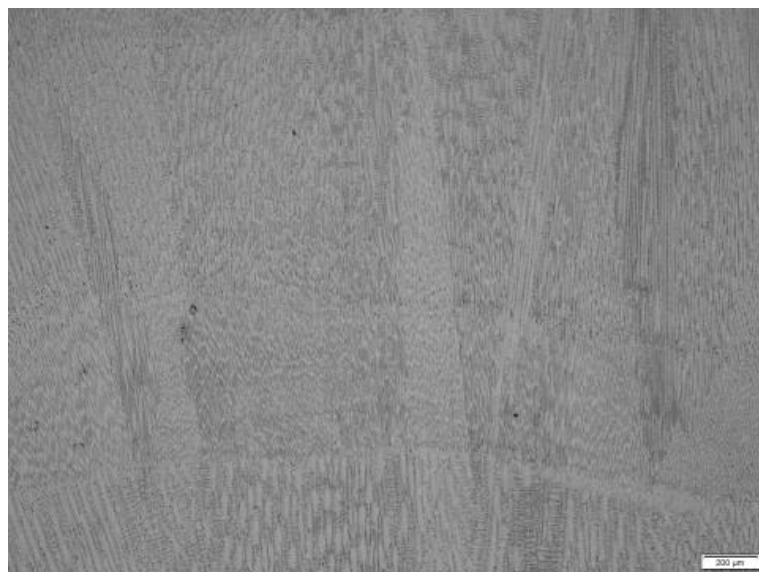
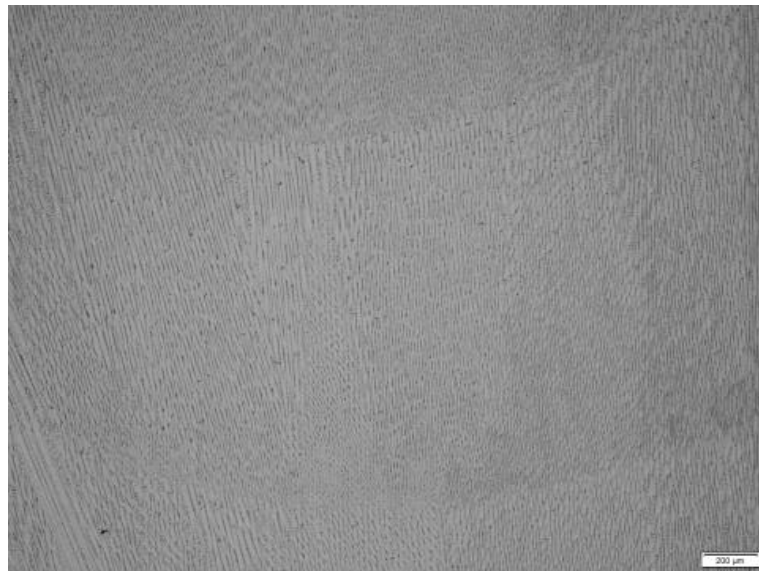


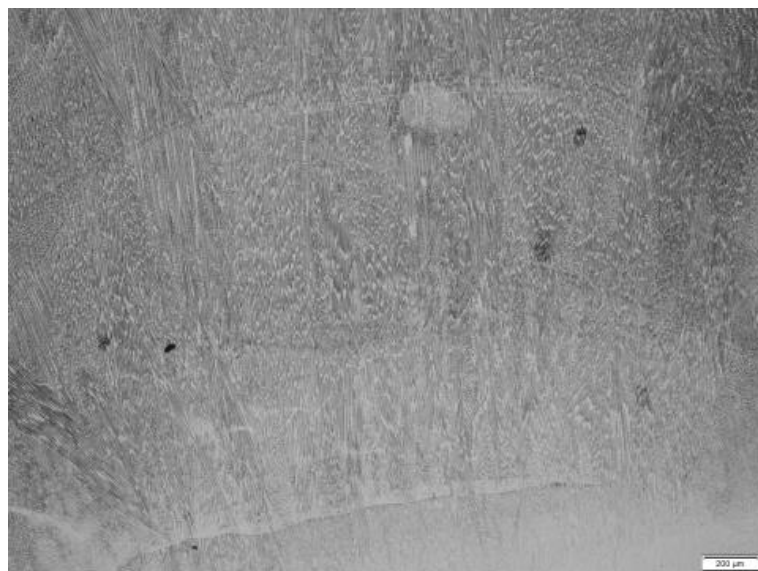
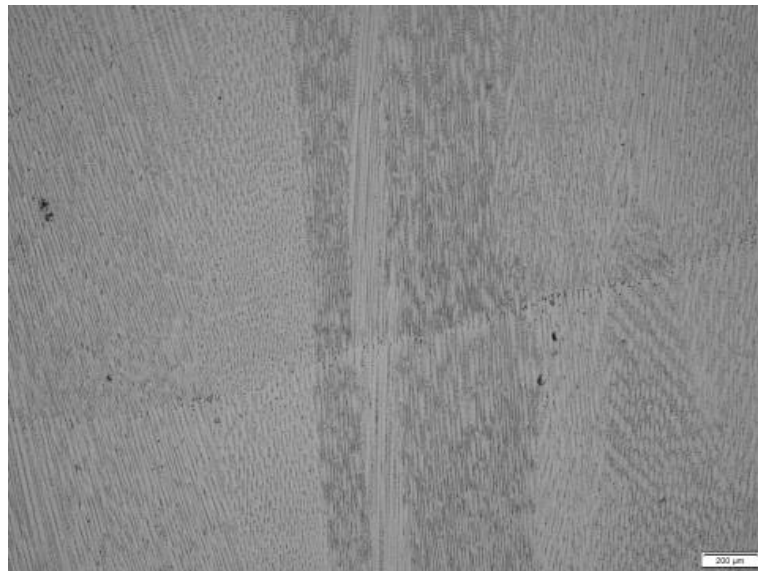


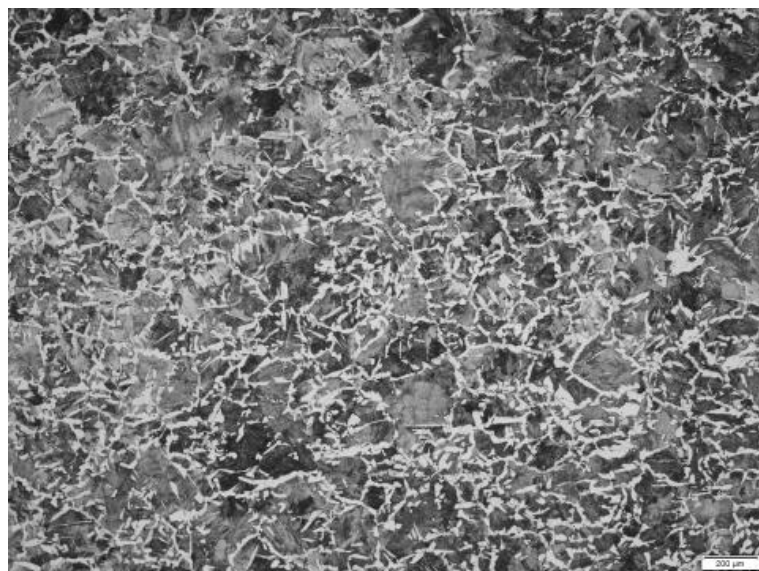
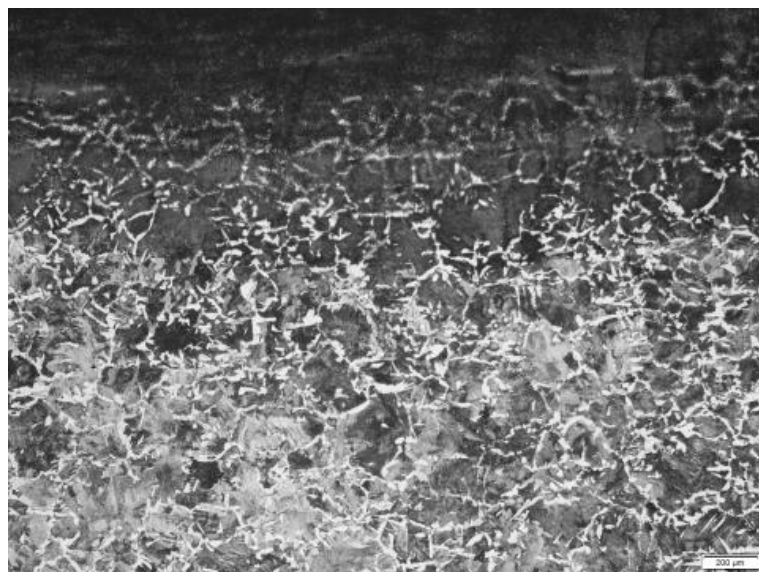
## APÊNDICE C - CONDIÇÃO 66

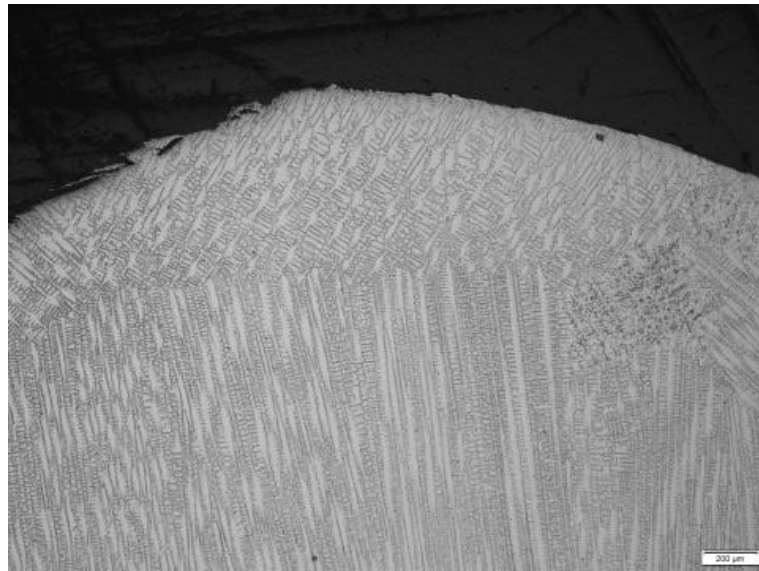






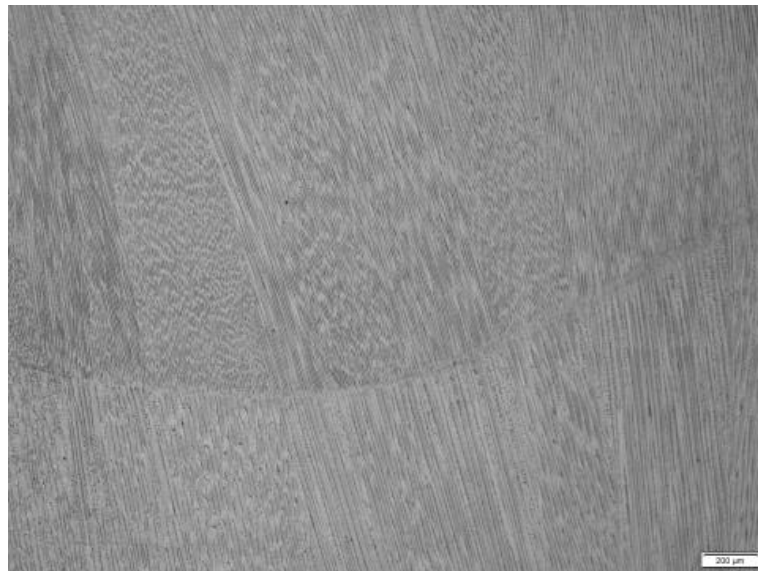


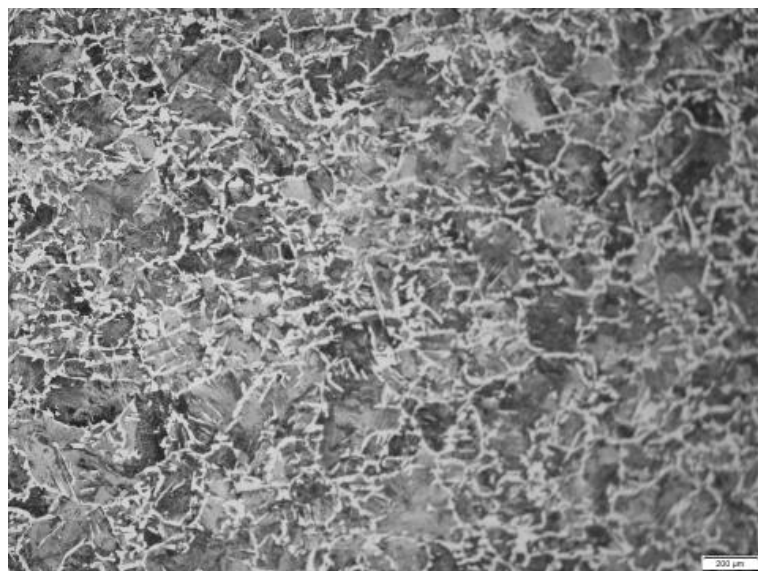
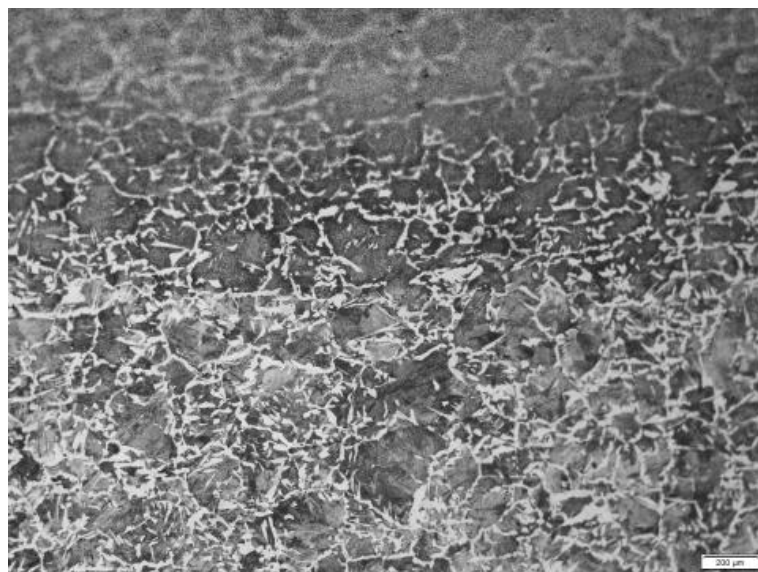
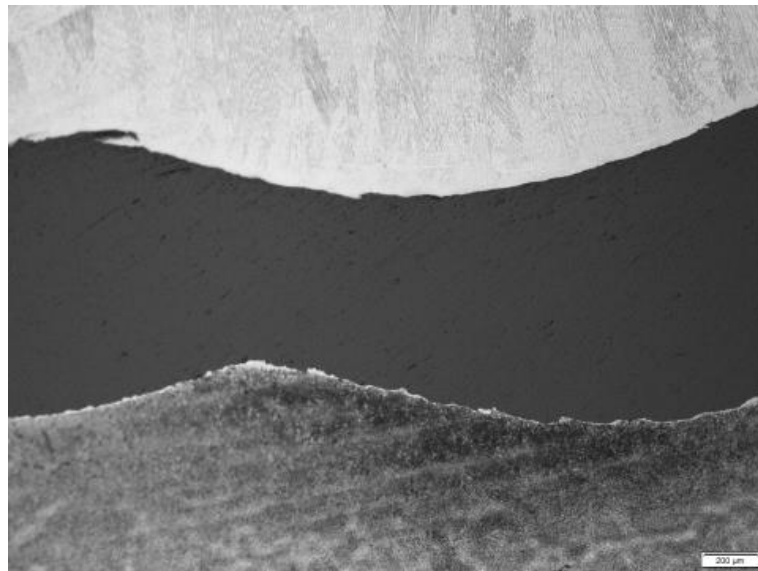


**APÊNDICE D - CONDIÇÃO 70**











## ANEXO A

### Eutronic GAP® 3511 Synergic



<b>Eutronic GAP® 3511 Synergic</b>	<b>ESC: 763890</b>
Supply voltage:	3x 400V ±10% 3x 460V ±5%
Supply frequency:	50/60 Hz
Supply fuse:	32 A
Max. power consumption:	20 kVA
Maximum rated value of the power supply current	32 A
Effective value of the maximum power supply current	25 A
Cos phi:	0.99
Max. welding current (35% ED):	350 A
Max. welding current (60% ED):	280 A
Max. welding current (100% ED):	250 A
Pilot current (100% ED):	30 A
Amperage range for plasma and TIG welding	10 A ÷ 350 A
Amperage range for electrode welding	10 A ÷ 280 A
Amperage range for pilot current	2 A ÷ 50 A
Open Circuit Voltage - pilot inverter:	95 V DC
Open Circuit Voltage - main inverter:	95 V DC
Dimensions (L x W x H):	815 x 445 x 635 mm
Weight:	105 kg

### Controlo Remoto Manual RC-H

**RC-H manual remote control**

**ESC: 260231**

including 8 metres connecting cable.

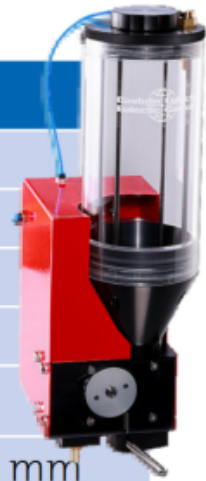


## Cooling GAP Chiller



<b>Cooling GAP® Chiller</b>	<b>ESC: 754273</b>
Weight:	50 kg
Dimensions (L x W x H):	915 x 445 x 400 mm
Cooling with integrated chiller.	

## Powder Feeder EP2



<b>Powder Feeder EP2</b>	<b>ESC: 260229</b>
Carrier gas:	Ar, Ar-H2
Carrier gas flow rate:	0 - 4 l/min
Powder reservoir:	2 l capacity
Protection class:	IP 23
Weight (without powder):	7,5 kg
Dimensions (L x W x H):	200 x 170 x 470 mm
Powder feed rate 3 - 120 g/min, depending on feeding wheel configuration, torch, anode and powder density.	

## ANEXO B

<b>EuTroLoy® 16604</b> <b>202863</b> 4kg	Alloy Fe-Co-Cr-Mo	Tools for hot and cold metal shaping: clipping bed, rolling mills, bending machines Gate components. Sealing joints. Buttering layer before coating with cobalt based alloys.	~45 HRC Work-hardening deposit with very fine martensitic structure. Excellent resistance to heat, thermal shock and corrosion. Good resistance to cracking.
---	----------------------	---	---