



**Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP**  
**Escola de Minas**  
**Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais**  
**Campus Morro do Cruzeiro**  
**Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil**



**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO**  
**EM ENGENHARIA METALÚRGICA**

**“IMPRESSÃO 3D DE LIGAS METÁLICAS – REVISÃO DA  
LITERATURA”**

**Caio Alexandre Fonseca Rodrigues**

**Ouro Preto, Março de 2023**

**Caio Alexandre Fonseca Rodrigues**

**“Impressão 3D de Ligas Metálicas – Revisão da Literatura”**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalurgista.

**Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Aparecida Pinto**

**Ouro Preto, Março de 2023.**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R696i Rodrigues, Caio Alexandre Fonseca.  
Impressão 3D de ligas metálicas - revisão da literatura. [manuscrito] /  
Caio Alexandre Fonseca Rodrigues. - 2023.  
47 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Maria Aparecida Pinto.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Impressão. 2. Impressão - Impressão 3D. 3. Metalurgia do pó. 4.  
Metais pulverizados. 5. Sinterização. I. Pinto, Maria Aparecida. II.  
Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 669

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Caio Alexandre Fonseca Rodrigues**

**Impressão 3D de ligas metálicas - revisão da literatura**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalurgista

Aprovada em 29 de Março de 2023

### Membros da banca

Dr.<sup>a</sup> Maria Aparecida Pinto - Orientadora - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dr. Cláudio Batista Vieira - Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dr. Daniel Fraga Pinto - Instituto Federal de Minas Gerais - Campus Ouro Preto

Maria Aparecida Pinto, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/04/2023



Documento assinado eletronicamente por **Maria Aparecida Pinto, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/04/2023, às 16:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0503388** e o código CRC **281A3DA0**.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais por todo suporte e apoio durante toda a minha formação, tanto pessoal quanto profissional, que não mediram esforços para que eu tivesse as melhores condições para concluir essa graduação. Sem eles, com certeza, a tarefa seria muito mais árdua.

A minha irmã Thais, Família Marques e amigos que me incentivaram a chegar à conclusão do meu curso e começo de uma nova carreira, desempenhando um papel significativo no meu crescimento.

A Bárbara, por todo apoio e incentivo nessa fase final da minha graduação, por estar comigo nas horas mais difíceis me dando todo suporte.

Aos professores da Escola de Minas que me ajudaram no progresso acadêmico, principalmente a minha orientadora Maria Aparecida, pela orientação, apoio e confiança. Nesse tempo reduzido, sua confiança, correções e estar sempre presente foi o que possibilitou a realização deste trabalho.

A UFOP, Escola de Minas, Fundação Gorceix e o DEMET, por possibilitarem a oportunidade de concluir este curso, uma formação acadêmica reconhecida e de excelência.

A RHI Magnesita, pela oportunidade de realizar estágio, podendo atuar e vivenciar como é o ambiente industrial.

## RESUMO

O processo de manufatura aditiva está em evidência no mercado industrial, tornando-se objeto de estudos e análises, especialmente para a criação e desenvolvimento de peças e protótipos com geometrias complexas. Nesse trabalho foi realizada uma pesquisa bibliográfica, abordando as técnicas de impressão 3D de ligas metálicas, descrevendo seus princípios básicos de produção e parâmetros de processo, com foco nos processos que envolvem a sinterização a laser de pó metálico. Foram realizadas análises de estudos de caso com aplicações práticas dessa técnica, para entender como funciona o processo, as suas principais características e as diferenças entre esses processos. Foram escolhidas duas ligas (Ti6Al4V e AlSi10Mg), processadas via manufatura aditiva, para avaliar como os parâmetros de processo afetam as características dessas ligas. As condições de processamento proporcionam a formação de estruturas muito refinadas que afetam as propriedades mecânicas do material. Concluiu-se que as técnicas de manufatura aditiva são muito promissoras para a fabricação de componentes metálicos, podendo-se obter melhorias significativas nas propriedades mecânicas dos materiais e produção de peças muito complexas.

Palavras-chave: Laser. Impressão 3D. Metal. Pó metálico. Sinterização.

## **ABSTRACT**

Additive manufacturing process is in evidence in the industrial market, becoming object of studies and analysis, especially for the creation and development of parts and prototypes with complex geometries. In this work, bibliographical research was carried out, approaching 3D printing techniques of metallic alloys, describing their basic principles of production and process parameters, focusing on processes that involve laser sintering of metallic powder. Analyzes of case studies were carried out with practical applications of this technique, to understand how the process works, its main characteristics and the difference between these processes. Then, two alloys were chosen (Ti6Al4V and AlSi10Mg), processed via additive manufacturing, to evaluate how process parameters performed according to the characteristics of these alloys. Processing conditions provided the formation of very refined structures that produced the mechanical properties of the material. It was concluded that additive manufacturing techniques are very promising for manufacture of metallic components, allowing significant improvements in the mechanical properties of materials and production of very complex parts.

Keywords: Laser. 3D printing. Metal. Metallic powder. Sintering.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 - Cadeia de Produção da Manufatura Aditiva .....	17
Figura 4.2 - Gráfico Custo e precisão de produção x Complexidade do produto .....	18
Figura 4.3 - Classificação da MA segundo a ISO/ASTM 52900 .....	19
Figura 4.4 – Modelo Geral do Processo PBF .....	21
Figura 4.5 - Portfólio Tecnologia DMLS da empresa EOS .....	25
Figura 4.6 – Imagens de MEV que mostram o efeito bola e a formação do pescoço de sinterização e da microestrutura no processo DMLS para valores distintos de potência do laser: (a) 350W; (b) 400W .....	29
Figura 4.7 - (a) Imagem do MEV de poro formado (b) esquema de formação de poros durante a técnica DMLS. ....	30
Figura 5.1 - Microestrutura da Liga Ti6Al4V (a) inicialmente; após 1 hora de tratamento térmico à 1040°C (b) resfriamento no forno e (c) resfriamento em água.....	34
Figura 5.2 - Microscopia óptica da liga Ti6Al4V produzida via DMLS (a e c) amostras como produzidas; (b e d) amostras após tratamento térmico de alívio de tensões nos sentidos transversal e longitudinal de varredura do laser .....	35
Figura 5.3 - Ensaio Mecânico de corpos de prova da técnica DMLS. ....	35
Figura 5.4 - Gráfico de ensaios de tração de amostras produzidas via DMLS .....	36
Figura 5.5 - Variação da microdureza Vickers da liga Ti6Al4V produzidos via DMLS com a adição de TiB <sub>2</sub> .....	37
Figura 5.6 - Valores de dureza de engrenagens produzidas com diferentes técnicas de manufatura. ....	37
Figura 5.7 - Microestrutura da liga AlSi10Mg: a) No plano x-y, b) ao longo do eixo z, c) MEV do plano x-y, d) plano x-z, mostrando cristais de silício muito refinados nos contornos das dendritas. ....	39
Figura 5.8 – (a) Visão esquemática da amostra produzida via DMLS, mostrando a orientação da amostra observada por microscopia óptica. (b) Vista superior face b (c) Vista frontal (face c) ao longo do eixo z.....	40

Figura 5.9 - Visão esquemática da amostra de AlSi10Mg produzida via DMLS, mostrando a orientação da amostra via microscopia óptica. (a) horizontal (b) vertical e (c) MEV após ataque químico com reagente Keller. ....	41
Figura 5.10 - Curvas Típicas de tensão-deformação para amostras de liga de alumínio AlSi10Mg produzidas via DMLS ao longo de 4 orientações .....	41
Figura 5.11 - Microdureza da liga AlSi10Mg .....	42

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 4.1 - Classificação dos Processos de MA para metais.....	19
Tabela 4.2 - Tecnologias PBF utilizando pó .....	20
Tabela 4.3 - Fontes de energia dos processos PBF .....	21

## LISTA DE SIGLAS

3DP – Powder Bed and Inkjet 3D Printing

ASTM – American Society for Testing and Materials

BJ – Binder Jetting

CAD – Desenho Assistido por Computador (Computer-Aided Design)

CAM – Computador Assistindo/Ajudando à Manufatura (Computer-Aided Manufacturing)

DED – Directed Energy Deposition

DMLS – Direct Metal Laser Sintering

EBF – Electron Beam Freeform Fabrication

EBM – Electron Beam Melting

FDMm – Fused Deposition modelling of Metals

LENS – Laser Engineered Net Shaping

LOM – Laminated Object Manufacturing

MA – Manufatura Aditiva (Additive Manufacturing)

ME – Material Extrusion

MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

MJ – Material Jetting

PBF – Powder Bed Fusion

SL – Sheet Lamination

STL - Standard Tecellation Language

SLM – Selective Laser Melting

SLS – Selective Laser Sintering

UC – Ultrasonic Consolidation

VP – Photopolymerization

WAAM – Wire and Arc Additive Manufacturing

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
2	OBJETIVO.....	14
2.1	Objetivo Geral .....	14
2.2	Objetivos Específicos .....	14
3	METODOLOGIA .....	15
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
4.1	Manufatura Aditiva.....	16
4.1.1	Importância da manufatura aditiva.....	17
4.1.2	Classificação da manufatura aditiva.....	18
4.2	<i>Powder Bed Fusion</i> .....	19
4.2.1	Selective Laser Sintering.....	21
4.2.2	Selective Laser Melting.....	22
4.2.3	Direct Metal Laser Sintering .....	22
4.3	Tecnologia DMLS .....	23
4.3.1	Princípios da técnica DMLS .....	25
4.3.2	Fenômenos físicos na técnica DMLS.....	28
4.3.3	Análise Microestrutural.....	31
4.3.4	Avaliação das propriedades mecânicas .....	31
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	33
5.1	Liga de Titânio (Ti6Al4V) .....	33
5.1.1	Análise microestrutural da liga Ti6Al4V .....	33
5.1.2	Comportamento mecânico da liga Ti6Al4V .....	35
5.1.3	Dureza da liga Ti6Al4V .....	36
5.2	Liga de Alumínio (AlSi10Mg) .....	38
5.2.1	Análise microestrutural da liga AlSi10Mg.....	38

5.2.2	Comportamento mecânico da liga AlSi10Mg.....	40
5.2.3	Microdureza da liga AlSi10Mg.....	42
6	CONCLUSÕES.....	43
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	44

# 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, processos de manufatura aditiva (MA) começaram a ganhar uma atenção especial, tornando-se objeto de estudos e análises, especialmente para a criação e desenvolvimento de peças e protótipos e, assim, ganhando cada vez mais destaque no mercado industrial. Uma técnica original de manufatura aditiva conhecida é a impressão 3D, que teve seu foco de pesquisa ampliado para a possibilidade de fabricação de componentes metálicos com formatos complexos em algumas ligas, visando a viabilidade econômica de produção de alguns componentes em ligas como as de titânio e níquel, visto que, muitas vezes a produção, em pequena escala, desses componentes não é viável utilizando métodos convencionais (DING *et al.*, 2015).

Sendo assim, com o surgimento dessa tecnologia de impressão 3D de metais, abriu-se um leque de possibilidades de desenvolvimento de produtos industriais, devido a sua capacidade de fornecer ferramentas para a fabricação de modelos com projeto e estruturas mais complexas, numa velocidade de fabricação significativa. A técnica é bastante promissora com vantagens expressivas sobre as tecnologias de fabricação tradicional, mas com limitações, já que é uma técnica recente, que possui muitos fatores a serem analisados para a sua aplicação, que vão dos programas de controle até a preparação do pó (LV *et al.*, 2017).

Com isso, houve um crescimento na busca e necessidade de pesquisa e aprimoramento da técnica de manufatura aditiva de metais, pois essa técnica despertou o interesse de várias áreas relevantes da sociedade, devido a sua aplicabilidade, como nos setores aeroespacial, automotivo e até em setores da saúde, como na medicina e na odontologia. Além disso, é um processo em que o aproveitamento da matéria-prima pode ser um fator relevante e até ser um diferencial importante para viabilizar, economicamente, a aplicação dessa técnica no âmbito comercial e industrial (BARABASZOVÁ *et al.*, 2022).

Por isso, a impressão 3D, no geral, possui um potencial para ser a próxima revolução industrial, pois, com a utilização dessa tecnologia, uma grande quantidade de produtos de alta complexidade poderá ser fabricada em grande escala e com alta precisão, suprimindo demandas críticas que a fabricação subtrativa tradicional tem dificuldade em atender. Já que peças são fabricadas com a técnica de camada por camada, elas podem ser produzidas em uma única etapa, sendo projetadas via programas de computação, *Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing* (CAD/CAM), de forma personalizada, em uma velocidade de produção acelerada, com um peso reduzido e com aproveitamento do pó metálico (KORIUM *et al.*, 2021).

A importância de se estudar e aprimorar essa técnica de impressão 3D se dá pelo potencial enorme que esse método possui, podendo transformar o projeto de engenharia e fabricação de peças, com auxílio de programas modeladores, que têm aplicações e diferentes tipos de técnicas sendo estudadas, abrangendo diversos tipos de materiais (ROBERTS e TEIN, 2017). Além disso, tem-se outros fatores relevantes para o processo de MA, como a economia de matéria-prima, já que o produto não precisará passar por processos de conformação a partir de um bloco bruto, pois o produto já será produzido camada por camada em uma única etapa. A MA torna-se um tópico importante e relevante a ser trabalhado, pela sua adequação aos processos da indústria 4.0, podendo usufruir de recursos computacionais que podem otimizar e auxiliar na criação dessa nova metodologia de trabalho (SKA, 2022).

Nesse trabalho será apresentada uma revisão bibliográfica sobre o estado da arte dos processos de manufatura aditiva, com destaque para a técnica *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS).

## **2 OBJETIVO**

São objetivos desta monografia:

### **2.1 Objetivo Geral**

Realizar uma revisão bibliográfica sobre o estado da arte da técnica de manufatura aditiva, via tecnologia de impressão 3D, envolvendo ligas metálicas.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Descrever os princípios básicos do processo de manufatura aditiva;
- Descrever as principais técnicas de manufatura aditiva;
- Analisar a influência dos parâmetros de processo;
- Analisar a aplicação da técnica *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) para as ligas Ti6Al4V e AlSi10Mg.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia para realização desse trabalho foi uma pesquisa bibliográfica sobre a tecnologia de impressão 3D de ligas metálicas, buscando informações em trabalhos científicos que abordam o assunto, sendo realizada da seguinte forma:

- Fazer o levantamento de publicações que abordam o tema na literatura, em artigos, livros, monografias, teses e dissertações;
- Realizar a seleção desse material, organizando o que for de interesse para o trabalho, fazendo a leitura e selecionando as informações e dados relevantes, além de registrar todas as fontes e referências;
- Fazer a análise das informações e dados levantados, realizando uma discussão de acordo com os argumentos citados pela literatura e, assim, elaborar uma monografia baseada nas informações coletadas.

A pesquisa foi realizada por meio do portal periódicos CAPES, utilizando o acervo da lista de base de dados *Web of Science e Springer Book Archives*, que possuem o acesso disponível para a UFOP.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica envolvendo os principais tópicos relacionados as técnicas de manufatura aditiva, com foco na impressão 3D de ligas metálicas por meio de processos utilizando laser e pó metálico (DMLS), que apresenta uma tecnologia muito promissora para vários setores, como aeroespacial, automotivo, naval, biomédico, entre outros.

### 4.1 Manufatura Aditiva

Segundo a ISO/ASTM 52900 (2015), a manufatura aditiva (MA) é o termo geral para tecnologias baseadas na produção de objetos geométricos por sucessivas adições de materiais. Esse novo processo de junção de materiais utilizado para gerar um modelo 3D, realizado camada por camada, vem na contramão dos processos convencionais de fabricação subtrativa, como usinagem, fundição, entre outros.

A técnica de MA é um processo em que a fabricação do objeto 3D é realizada em uma única etapa, seguindo um modelo de projeto programado por computadores que, por meio de programas de projeto e fabricação assistidas via computador, são utilizados para a fabricação e projeto de protótipos e modelos de produto, sendo eles metálicos, plásticos, cerâmicos ou de compostos biológicos (HUANG *et al.*, 2015).

Todo processo de MA envolve certas etapas para se conseguir a impressão 3D do objeto, são elas:

1. Utilização de um programa CAD para construir o modelo 3D que será impresso;
2. A conversão desse modelo CAD para o formato de estereolitografia (STL), que é a implementação industrial padrão nas indústrias de MA, em que o arquivo é no formato do modelo CAD 3D;
3. Esse modelo criado na segunda etapa é recortado transversalmente em diversas camadas finas, utilizando um programa CAM para o corte, em que a orientação da produção desse material é definida;
4. Na sequência ocorre a impressão do objeto pela máquina, utilizando os dados do programa, baseados no arquivo recortado;
5. Etapas pós-processamento como tratamento de superfície, sinterização, ou acabamento podem ser realizadas, se necessário (ISHFAQ *et al.*, 2021).

Essas etapas citadas anteriormente, estão resumidas na Figura 4.1.

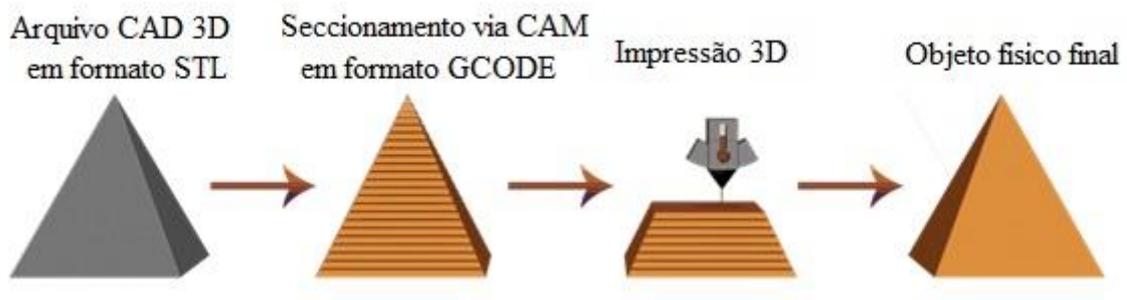


Figura 4.1 - Cadeia de Produção da Manufatura Aditiva  
 Fonte: Adaptado de 3D CONCEPTS (2017).

#### 4.1.1 Importância da manufatura aditiva

A MA está cada vez mais relevante, pois ela pode reduzir o custo e o tempo necessários para a produção de uma peça. Além disso, nesse processo, a identificação de possíveis erros no produto podem ser analisada com mais facilidade e a correção pode ser feita de maneira mais eficaz, evitando que essa correção seja feita em etapas posteriores da produção. Além disso, esse processo permite a produção de peças e modelos com formatos mais complexos, a partir dos dados gerados pelo programa controlado pelo computador, deixando o processo cada vez mais automatizado. Nesse processo, o produto é construído em camadas, uma sobre a outra, sequenciadas, fazendo com que a criação do produto seja feita de modo aditivo (GODEC *et al.*, 2022).

A aplicação dessa técnica pode ser bastante interessante em várias categorias de processos de desenvolvimento e de produção, como: 1) Desenvolvimento de Produtos: haverá mais possibilidades de desenvolvimento de produtos com projeto e geometrias mais complexas, podendo-se prever dificuldades e possíveis erros que serão mais fáceis de serem detectados, a facilidade no planejamento, a checagem de propriedades com antecedência e com um tempo menor de produção; 2) Qualidade do Produto: as dificuldades que possam aparecer no processo, já podem ser eliminadas do produto, no molde ou ferramentas, já no estágio de desenvolvimento do produto; 3) Produção: é possível antecipar problemas e otimizar o processo, tanto o projeto das ferramentas quanto dos moldes, que podem ter propriedades melhoradas, e o processo de fabricação torna-se mais uniforme. 4) Empresa e Mercado: o tempo para o lançamento do produto pode ser encurtado de maneira confiável, estes podem ser preparados de maneira preventiva e com antecedência (GODEC *et al.*, 2022).

Porém, como todo processo produtivo, existem limitações nessa área, pelo fato que os programas de modelagem CAD não suportam, ainda, o desenvolvimento de produtos não homogêneos, e o custo dos produtos sofrem com a influência de alguns fatores relevantes, como o tempo de fabricação, custo da máquina, preço da manutenção e dos insumos para a produção, entre outros. Por isso, ainda é preciso analisar para decidir quando aplicar essa técnica, buscando sempre maximizar seus benefícios, como exemplificado na Figura 4.2, que mostra, graficamente, a relação entre o custo e a complexidade do produto, para auxiliar na decisão de aplicação ou não da técnica (GODEC *et al.*, 2022).

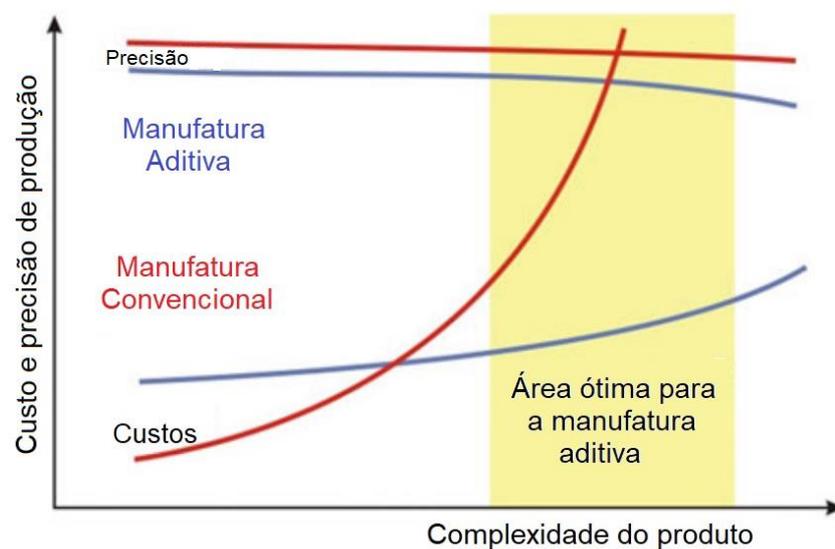


Figura 4.2 - Gráfico Custo e precisão de produção x Complexidade do produto  
 Fonte: Adaptado de Godec *et al.* (2022).

#### 4.1.2 Classificação da manufatura aditiva

Segundo a ISO/ASTM 52900 (2015), existem 7 tipos de classes para as tecnologias de manufatura aditiva. São elas: *Photopolymerization* (VP), *Material Jetting* (MJ), *Sheet Lamination* (SL), *Material Extrusion* (ME), *Binder Jetting* (BJ), *Powder Bed Fusion* (PBF) e *Directed Energy Deposition* (DED). Cada uma dessas tecnologias possui particularidades e ramificações para diversas aplicações, como esquematizado na Figura 4.3. Porém, apenas 5 dessas tecnologias podem ser aplicadas para materiais metálicos, sendo que cada uma dessas classes possui seus tipos de processos, utilizando tipos de materiais diferentes, como mostrado na Tabela 4.1 (SILVA, 2017).

Como o foco do estudo está voltado para os produtos metálicos, especialmente a classificação PBF e seus processos, será apresentado como é desenvolvida essa tecnologia, que tipo de equipamentos utiliza e como é seu funcionamento.

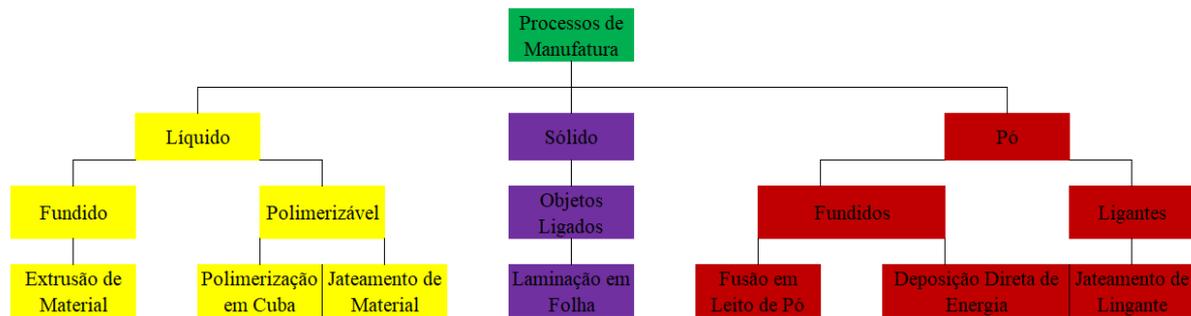


Figura 4.3 - Classificação da MA segundo a ISO/ASTM 52900  
 Fonte: Adaptado de Godec *et al.* (2022).

Tabela 4.1 - Classificação dos Processos de MA para metais

Classificação	Processos	Material
<i>Sheet Lamination</i>	<i>Laminated Object Manufacturing (LOM)</i>	Folha
	<i>Ultrasonic Consolidation (UC)</i>	Folha
<i>Material Extrusion</i>	<i>Fused Deposition Modelling of Metals (FDMm)</i>	Fio
<i>Binder Jetting</i>	<i>Powder Bed and Inkjet 3D Printing (3DP)</i>	Pó
<i>Powder Bed Fusion</i>	<i>Selective Laser Sintering (SLS)</i>	Pó
	<i>Selective Laser Melting (SLM)</i>	Pó
	<i>Electron Beam Melting (EBM)</i>	Pó
<i>Directed Energy Deposition</i>	<i>Laser Engineered Net Shaping (LENS)</i>	Pó
	<i>Electron Beam Freeform Fabrication (EBF<sup>3</sup>)</i>	Fio
	<i>Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)</i>	Fio

Fonte: (SILVA, 2017)

## 4.2 *Powder Bed Fusion*

Os processos *Powder Bed Fusion* (PBF) foram uma das primeiras tecnologias da MA a serem comercializadas. Desenvolvida na universidade do Texas, em Austin, EUA, o primeiro processo criado com base nessa tecnologia foi a *Selective Laser Sintering* (SLS). Essa tecnologia serviu como base para o surgimento dos processos seguintes de PBF, sendo modificada a partir da primeira abordagem básica que a SLS trouxe, com o objetivo de aumentar a produtividade da máquina, aumentar a gama de materiais no processo e/ou evitar algumas características específicas (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015).

Todos os processos de PBF possuem o mesmo esquema básico de características, sendo elas: a utilização de uma ou mais fontes térmicas para a indução da fusão entre as partículas do pó, o método para controlar a fusão do pó em uma região específica de cada camada e os mecanismos para adicionar as camadas de pó. A fonte mais comum de calor utilizada nesse processo é o laser, conhecida como sinterização a laser, tanto de polímeros, quanto de metais, apesar de haver uma diferença significativa no maquinário desses dois processos. Além do laser, tem-se o feixe de elétrons como outra fonte térmica, que requer um maquinário bem diferente dos dois processos citados anteriormente (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015).

Na Tabela 4.2 são apresentadas as tecnologias PBF que utilizam o pó metálico como fonte de matéria-prima.

Tabela 4.2 - Tecnologias PBF utilizando pó

Processo	Fonte de calor	Terminologia utilizada
PBF (Power Bed Fusion)	Laser	SLM (Selective Laser Melting) SLS (Selective Laser Sintering) LMF (Laser Metal Fusion) DMLS (Direct Metal Laser Sintering)
	Feixe de elétrons	SEBM (Selective Electron Beam Melting) EBM (Electron Beam Melting)

Fonte: Adaptado de Herzog *et al.* (2016).

Os processos de sinterização a laser inicialmente foram desenvolvidos para produzir protótipos de plástico, utilizando uma técnica de varredura ponto a ponto, com o laser. Com o tempo, o processo foi expandido para materiais metálicos e cerâmicos, adicionando fontes térmicas e usando a fusão de camada por camada do material em pó. E, assim, como os resultados foram satisfatórios, esses processos começaram a ser aplicados em todo o mundo, para uma gama muito maior de materiais, com a possibilidade de fabricação já do produto acabado, com propriedades comparáveis aos métodos convencionais (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015).

Os processos PBF usam uma plataforma de construção contendo material em pó. Nesse processo, um feixe de laser ou elétrons é usado para fundir e sinterizar seletivamente as partículas em pontos específicos e, uma vez que uma camada do objeto é concluída, a plataforma abaixa e mais pó é adicionado (Figura 4.4). O processo começa novamente até que a estrutura 3D seja concluída e, em seguida, uma etapa de pós-processamento é necessária para

remover todo o pó não ligado restante. Este pó não ligado sustenta a estrutura durante o processo de fabricação, portanto, não há necessidade de estruturas de suporte, entretanto o pó não ligado possa ser difícil de remover, especialmente em geometrias complexas (VYAS *et al.*, 2017)

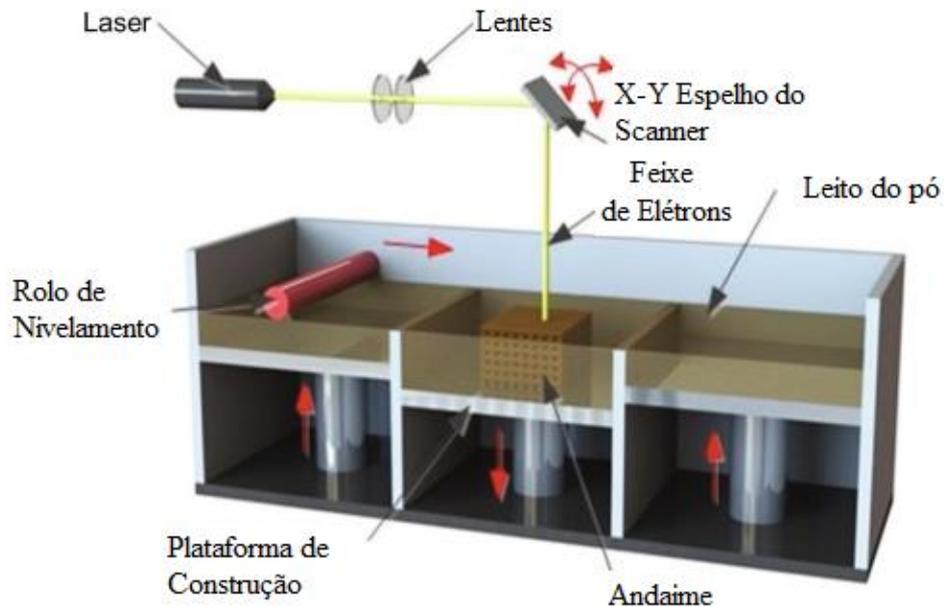


Figura 4.4 – Modelo Geral do Processo PBF  
Fonte: (VYAS *et al.*, 2017).

Um fator que diferencia as tecnologias é a fonte de energia utilizada em cada processo. Algumas fontes de energia são apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Fontes de energia dos processos PBF

Processo	EBM	SLM	SLS	DMLS
Fonte de Energia	Feixe de elétrons	Raio laser (fibra)	Raio laser	Raio laser

Fonte: Adaptado de Godec *et al.* (2022).

#### 4.2.1 *Selective Laser Sintering*

A *Selective Laser Sintering* (SLS) foi a primeira técnica de PBF desenvolvida, sendo uma técnica de prototipagem rápida com um custo-benefício viável para uma série de aplicações. É um método bem eficaz na fabricação de peças com formatos complexos, pois ela não necessita de uma estrutura de suporte, já que o pó dá a sustentação suficiente para a fabricação. É um processo que consiste na fundição de partículas no leito de pó por um feixe de laser de alta potência. A sua aplicação apresenta vários benefícios comparados à produção convencional,

porém também existem desvantagens, como a baixa qualidade superficial da peça produzida nesse método (KIM *et al.*, 2017).

Por terminologia, essa técnica é atribuída para materiais poliméricos, pois com o avanço da tecnologia e das técnicas de PBF, surgiu outra técnica mais eficaz para a produção de produtos metálicos, que será explicada a seguir.

#### **4.2.2 *Selective Laser Melting***

A *Selective Laser Melting* (SLM) é outra técnica que possui princípios semelhantes a técnica de *Electron Beam Melting* (EBM), pois em ambas, a camada de pó é fundida seletivamente e a peça é construída camada por camada. Porém, existem algumas diferenças nessa tecnologia quando é aplicada em metais. E uma dessas diferenças é o tamanho das partículas do pó que, nesse caso, é mais fino, por isso, o parâmetro espessura de camada sofre uma alteração, sendo mais fino que no processo EBM. Assim, as peças produzidas por essa técnica apresentam uma superfície com melhor acabamento superficial do que outras tecnologias a laser, porém sua produção é mais lenta e os custos com matérias-primas são mais elevados, já que utiliza o pó com granulometria bem menor (GODEC *et al.*, 2022).

Por fim, é uma tecnologia que trabalha sob uma atmosfera protetora, normalmente de argônio ou nitrogênio, em temperatura ambiente ou com pré-aquecimento até 400°C, podendo causar tensões internas nas peças, exigindo tratamentos térmicos posteriores. Em contrapartida, o processamento à temperatura ambiente traz benefícios sendo que os pós não sinterizados, nas proximidades das partes fundidas, são mais facilmente retirados, favorecendo a produção de geometrias internas mais complexas (GODEC *et al.*, 2022).

#### **4.2.3 *Direct Metal Laser Sintering***

*Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) é uma técnica baseada na fabricação aditiva de metais. Ela permite que peças metálicas possam ser produzidas diretamente a partir dos dados fornecidos por um programa CAD 3D, por meio da impressão 3D, sem a necessidade de qualquer tipo de ferramenta especial, o que reduz consideravelmente os custos. Então, quanto mais complexa for a geometria desejada, mais economicamente viável esse processo será. As peças metálicas produzidas pela tecnologia DMLS são comparáveis com peças produzidas por processos convencionais como peças usinadas e fundidas. A base de produção para a tecnologia

DMLS são os dados do CAD 3D, que são convertidos para o formato STL, em que o programa da impressora projeta e prepara os dados de produção, para selecionar a espessura mais apropriada de cada camada para a produção. Quanto mais camadas, mais precisa será a geometria da peça (SEDLÁK *et al.*, 2013).

A principal diferença entre as técnicas DMLS e SLM está na temperatura utilizada para fundir o pó metálico. Na SLM, a temperatura é mais elevada, pois o pó é completamente fundido, e na DMLS o pó não funde completamente, sendo que calor fornecido sinteriza as partículas do pó, unindo-as ao invés de fundir completamente. Outra diferença do processo é na utilização da matéria-prima, pois a DMLS trabalha com ligas metálicas, enquanto a SLM é mais indicada para metais puros, além do fato que a DMLS não utiliza aglutinantes poliméricos (ISHFAQ *et al.*, 2021).

A DMLS permite que peças de vários formatos sejam produzidos simultaneamente, utilizando configurações de modelos computacionais, oferecendo uma gama de propriedades muito ampla e com um controle melhor sobre a porosidade do material. As peças produzidas apresentam uma estrutura mais homogênea, podendo até alcançar resistências maiores do que as peças fundidas ou forjadas. É uma técnica que oferece um equilíbrio entre diversos parâmetros que são cruciais para produção de peças, como o custo do investimento, a variedade de materiais e a qualidade da peça, além do fato de possibilitar a produção de peças que técnicas tradicionais não conseguem produzir, reduzindo o custo de produção e de ferramentas. Porém, a qualidade da superfície geral da peça fabricada por esse processo ainda é um dos problemas a ser estudado (ISHFAQ *et al.*, 2021).

### **4.3 Tecnologia DMLS**

A DMLS é uma tecnologia que foi aplicada pela primeira vez em 1995, por uma empresa alemã chamada EOS GmbH que, até os dias de hoje, atua fortemente nesse processo, desenvolvendo tecnologias cada vez mais avançadas para ampliar o portfólio de aplicação e utilização para diferentes materiais. O primeiro produto produzido foi a partir de um pó de bronze que passou pelo processo de sinterização a laser de CO<sub>2</sub>, com 100W, gerando uma peça de formato complexo e maciço, com alta precisão e com uma superfície de qualidade, tornando-se rapidamente um sucesso comercial (ANAND e DAS, 2021).

Com isso, a empresa EOS foi crescendo no mercado, aprimorando sua tecnologia e, hoje, conta com um portfólio com mais de 70 processos validados com a DMLS, envolvendo mais de 20 ligas, sendo elas alumínio, aços inoxidáveis, ligas de titânio, entre outras, como mostrado na Figura 4.5:

Com base nessa tecnologia, estudos têm sido feitos com diversas ligas, utilizando diversos parâmetros e modos de produção para a manufatura aditiva, analisando cada fator que pode alterar a qualidade e viabilidade do processo.

# Compatibilidade de Materiais Metálicos e Sistemas



	Product name Layer thickness		
 EOS M 100	<ul style="list-style-type: none"> <li>EOS CobaltChrome MPI 30 µm</li> <li>EOS StainlessSteel 316L 20 µm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>EOS Titanium Ti64 20 µm</li> <li>EOS Tungsten W1 20 µm</li> </ul>	
* for AMCM M 290 1WV			
 EOS M 290	<ul style="list-style-type: none"> <li>EOS Aluminium AlF357 30 µm</li> <li>EOS Aluminium AlSi10Mg 30   60 µm</li> <li>EOS Aluminium Al2139 AM 60 µm</li> <li>EOS CaseHardeningSteel 20MnCrZr 40 µm</li> <li>EOS CobaltChrome MPI 20   40   50 µm</li> <li>EOS Copper Cu 20 µm</li> <li>EOS Copper CuCP 40 µm*</li> <li>EOS CopperAlloy CuZrCr 80 µm*</li> <li>EOS MaragingSteel MS1 20   40   50 µm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>EOS NickelAlloy HX 20   40 µm</li> <li>EOS NickelAlloy HAYNES® 282® 40   80 µm</li> <li>EOS NickelAlloy IN625 20   40 µm</li> <li>EOS NickelAlloy IN718 20   40 µm</li> <li>EOS NickelAlloy IN939 40 µm</li> <li>EOS StainlessSteel 17-4PH 20   40 µm</li> <li>EOS StainlessSteel 254 40   80 µm</li> <li>EOS StainlessSteel 316L 20   40   80 µm</li> <li>EOS StainlessSteel 316L VPro 60 µm</li> <li>EOS StainlessSteel CX 30 µm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>EOS StainlessSteel PH1 20 µm</li> <li>EOS StainlessSteel SuperDuplex 40   80 µm</li> <li>EOS Titanium Ti64 30   60 µm</li> <li>EOS Titanium Ti64ELI 30 µm</li> <li>EOS Titanium Ti64 Grade 23 40   80 µm</li> <li>EOS Titanium Ti64 Grade 5 40   80 µm</li> <li>EOS Titanium TiCP Grade 2 30 µm</li> <li>EOS ToolSteel 1.2709 40 µm</li> <li>EOS ToolSteel CM55 80 µm</li> </ul>
 EOS M 300-4	<ul style="list-style-type: none"> <li>EOS Aluminium AlSi10Mg 60 µm</li> <li>EOS MaragingSteel MS1 50 µm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>EOS NickelAlloy IN718 40 µm</li> <li>EOS NickelAlloy IN625 40 µm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>EOS StainlessSteel 17-4PH 40</li> <li>EOS StainlessSteel 316L 40   80 µm</li> <li>EOS Titanium Ti64 60 µm</li> </ul>
 EOS M 400	<ul style="list-style-type: none"> <li>EOS Aluminium AlF357 60 µm</li> <li>EOS Aluminium AlSi10Mg 90 µm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>EOS CopperAlloy CuCrZr 80 µm</li> <li>EOS MaragingSteel MS1 50 µm</li> <li>EOS NickelAlloy IN718 40 µm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>EOS Titanium Ti64 30 µm</li> <li>EOS Titanium Ti64ELI 30 µm</li> </ul>
 EOS M 400-4	<ul style="list-style-type: none"> <li>EOS Aluminium AlSi10Mg 40   80 µm</li> <li>EOS CaseHardeningSteel 20MnCrZr 40 µm</li> <li>EOS MaragingSteel MS1 40 µm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>EOS NickelAlloy Haynes® 282® 40   80 µm</li> <li>EOS NickelAlloy HX 40 µm</li> <li>EOS NickelAlloy IN718 40   80 µm</li> <li>EOS NickelAlloy IN939 40 µm</li> <li>EOS StainlessSteel 316L 40   80 µm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>EOS Titanium Ti64 60 µm</li> <li>EOS Titanium Ti64 Grade 23 80 µm</li> <li>EOS Titanium Ti64 Grade 5 80 µm</li> <li>EOS Titanium TiCP Grade 2 30 µm</li> </ul>

Figura 4.5 - Portfólio Tecnologia DMLS da empresa EOS (EOS, 2020)

### 4.3.1 Princípios da técnica DMLS

A DMLS é uma técnica do processo PBF para a produção de componentes metálicos sólidos por meio da utilização de um laser de intensidade moderadamente baixa visando a sinterização do pó metálico, que é abastecido de acordo com a técnica de camada por camada. É uma técnica que ocorre de maneira mais acelerada em altas temperaturas, por isso tem-se o

laser como fonte de calor para o aquecimento do pó. Esse processo para a produção da peça metálica se inicia com a colocação de uma camada de pó sobre uma plataforma que, em seguida, é atingida por um feixe de laser sobre toda a superfície da camada de pó referente à geometria da peça a ser produzida, fazendo com que esse pó comece a fundir parcialmente e solidifique formando um componente denso. Assim, a plataforma é deslocada para baixo a uma distância igual à espessura da camada, para que outra camada de pó seja colocada para repetir todo o processo, até que se obtenha o produto final. Após todo esse processo, depois da varredura do feixe de laser, o pó sobressalente pode ser removido do produto manualmente ou, se precisar, por alguma operação tradicional, como a usinagem (ANAND e DAS, 2021).

O feixe de laser utilizado, de comprimento de onda  $\lambda$ , se propaga através de uma fibra óptica da fonte do laser até um extensor do feixe. A lente plano-convexa é usada para focar esse feixe expandido para obter a energia necessária para gerar a densidade de potência adequada. O diâmetro do ponto do feixe de laser ( $d$ ) pode ser calculado a partir da Equação 4.1 (ANAND e DAS, 2021):

$$d = \frac{(1.27 \times \lambda \times f \times M^2)}{D} \quad (4.1)$$

em que  $\lambda$  é o comprimento de onda,  $f$  é distância focal da lente,  $M^2$  é a qualidade do feixe e o  $D$  é o diâmetro do feixe de laser.

As peças feitas via DMLS possuem uma alta densidade com excelentes propriedades mecânicas. A DMLS pode ser considerada como uma técnica de prototipagem rápida pela sua capacidade de fabricação de peças a partir do pó metálico, utilizando inserções no molde 3D, que podem ser aplicados em outros processos de prototipagem rápida, sem a necessidade do uso de aglutinantes, força mecânica e técnicas de pós-processamento. Por fim, a DMLS tem diversas vantagens em relação aos processos convencionais, como a flexibilidade de formatos e tamanho de peças, a capacidade de fabricação altamente precisa de componentes, ciclos menores de produção, controle de porosidade, menos etapas de processamento, não utilização de aglutinantes, sem exigência de esforços mecânicos, entre outros (ANAND e DAS, 2021).

Para a técnica DMLS existem 4 parâmetros cruciais para o processo produtivo. São eles:

- Potência do laser
- Velocidade de Varredura
- Espessura da camada

- Espaçamento entre as trilhas

#### 4.3.1.1 Seleção do pó metálico

A seleção dos pós metálicos no processo DMLS é extremamente importante, pois é um processo que envolve uma mistura de dois ou mais pós metálicos com diferentes pontos de fusão. Por isso, esse pó utilizado varia de acordo com sua origem e, em termos de qualidade, tem um efeito considerável nas propriedades mecânicas. Além disso, a composição química do pó tem um grande impacto, seja no ponto de fusão, na condutividade térmica e na soldabilidade. O tamanho das partículas também é um item a ser considerado, pois afeta a fluidez e a densidade do pó. Assim, garantindo a seleção do pó com boa qualidade, pode-se produzir peças sem defeitos e com boas propriedades físicas e mecânicas (CHANDRASEKARA *et al.*, 2017).

#### 4.3.1.2 Controle dos parâmetros do processo

Para a produção de peças de alta qualidade com a técnica DMLS, existem parâmetros de processo que devem ser controlados. Esses parâmetros são interligados e afetam diretamente a qualidade, as propriedades mecânicas, microestruturais e a densidade do material processado. Esses parâmetros são: a velocidade de varredura, a potência do laser e a espessura da camada. A partir da Equação 4.2 pode-se determinar a densidade de energia volumétrica, que é a energia média por unidade de volume. Portanto, é fundamental otimizar os parâmetros de processo para obter peças densas por meio do processo DMLS.

$$E = \frac{P}{h \times S \times t} \quad (4.2)$$

em que  $E$  é a densidade de energia,  $P$  é a potência do laser,  $S$  é a velocidade de varredura,  $t$  é a espessura da camada e  $h$  é o espaçamento entre trilhas (CHANDRASEKARA *et al.*, 2017).

Essa técnica exige muitos cuidados, desde a fusão, resolidificação, transferência de calor e a contração volumétrica, o que a torna mais desafiadora. Além disso, defeitos advindos do processo, como porosidade, trincas, altas tensões residuais e outros efeitos microestruturais, podem ser observados no procedimento. A distribuição não uniforme do campo de temperatura e as altas tensões residuais podem causar descontinuidades que podem afetar as propriedades mecânicas. A expansão ou contração não uniforme pode acontecer devido à alta temperatura na

sobreposição das trilhas do feixe do laser, gerando trincas que podem surgir juntamente com a formação de poros na amostra sinterizada. A oxidação do material, devido as altas temperaturas, reduz a molhabilidade entre as camadas. A rugosidade da superfície da peça pode afetar sua precisão dimensional e, portanto, deve ser menor para evitar a operação de pós-processamento (ANAND e DAS, 2021).

Por isso, a técnica DMLS oferece muitas vantagens, mas ainda existem várias questões e desafios a serem abordados e analisados. Entre eles, defeitos físicos, como a porosidade, o efeito bola e a delaminação, que podem afetar e deteriorar as propriedades mecânicas e o comportamento microestrutural dos componentes produzidos pela técnica DMLS (ANAND e DAS, 2021).

### **4.3.2 Fenômenos físicos na técnica DMLS**

Os defeitos mais comuns encontrados no processo DMLS são a formação de bolas, a porosidade e a delaminação e distorção.

#### **4.3.2.1 Efeito Bola**

O Efeito Bola é a situação mais significativa desse processo, pois falhas na velocidade e no espaçamento da varredura do laser podem levar à formação do efeito bola. A incidência desse efeito impede que a deposição do pó metálico seja realizada de maneira homogênea, acarretando o surgimento de defeitos no produto, como porosidade e a delaminação, já que esse efeito enfraquece as ligações entre camadas devido às tensões térmicas induzidas. Isso pode ser causado por contaminação de óxidos na superfície da camada de fusão. Assim, é um efeito que não é desejável durante o processo, já que ele está associado a uma série de desvantagens, como o aumento da rugosidade na superfície, a formação de poros, a deterioração das propriedades mecânicas, entre outros (OYAR, 2018).

Na Figura 4.6, pode-se observar o início da formação do efeito bola (a) e a formação do pescoço de sinterização (b), em um pó de aço inoxidável SS 316L, para diferentes valores de potência do laser:

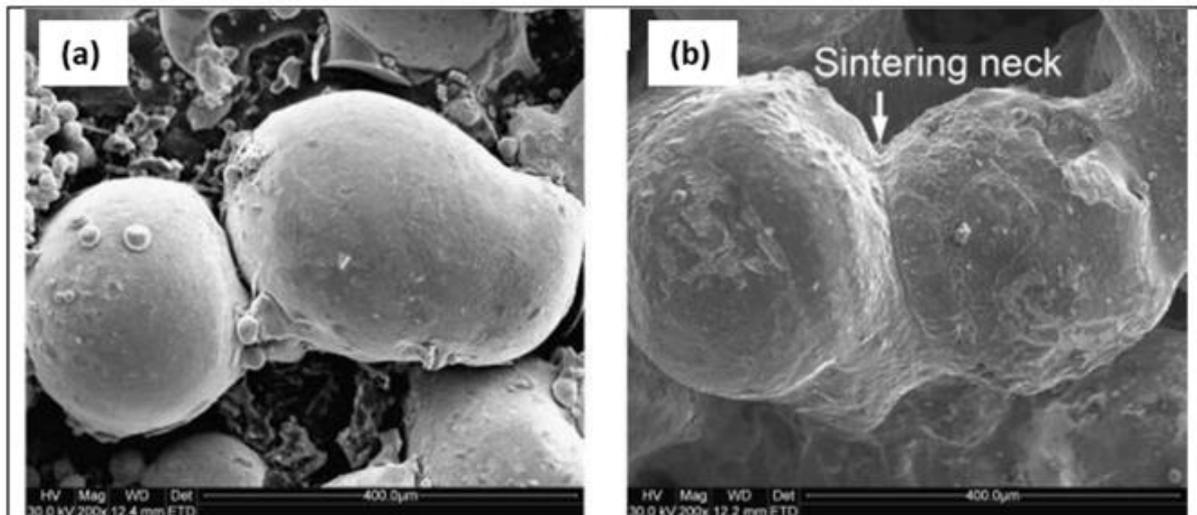


Figura 4.6 – Imagens de MEV que mostram o efeito bola e a formação do pescoço de sinterização e da microestrutura no processo DMLS para valores distintos de potência do laser: (a) 350W; (b) 400W (GU e SHEN, 2009).

Como a ocorrência desse efeito bola é prejudicial e indesejável para as peças produzidas pela técnica DMLS, é necessário investigar o impacto dos parâmetros nesse efeito e as correlações entre eles, para reduzir sua incidência (ANAND e DAS, 2021). São estes os parâmetros:

- Potência do laser
- Velocidade de Varredura
- Espessura da camada
- Espaçamento entre as trilhas

#### 4.3.2.2 Porosidade

A porosidade é uma descontinuidade presente no processo DMLS, porém, poucos estudos têm se concentrado em entender o mecanismo de formação de poros durante a técnica DMLS. No entanto, sabe-se que existem fatores que influenciam diretamente no surgimento de poros, o efeito bola é um deles, além de alguns parâmetros de processo, como a potência do laser, a velocidade de varredura, espaçamento entre as trilhas e a espessura da camada de pó (GU e SHEN, 2009).

Na Figura 4.7, pode-se observar que a formação de aglomerados por meio de pescoços de sinterização resultou na formação de poros residuais entre os aglomerados (Figura 4.7a). Na Figura 4.7b está a representação esquemática da formação de poros durante a técnica de DMLS

em que o raio laser percorre o leito de pó solto, com uma velocidade constante, irradiando simultaneamente várias partículas, devido ao grande diâmetro do feixe de laser (300 $\mu\text{m}$ ) em relação ao pequeno tamanho das partículas (20 $\mu\text{m}$ ) (Estágio 1). A energia do laser é absorvida pela camada superficial de pó, elevando a temperatura da superfície das partículas durante a interação, e o calor flui em direção ao centro da partícula. Com isso, a superfície das partículas funde, formando a fase líquida, enquanto o núcleo permanece sólido, acarretando a formação de ‘pontes’ líquidas entre os núcleos sólidos das partículas (Estágio 2). Com o afastamento do feixe de laser, as partículas fundidas na superfície se combinam pelos pescoços de sinterização, formando os poros residuais no metal solidificado (Estágio 3) (GU e SHEN, 2008).

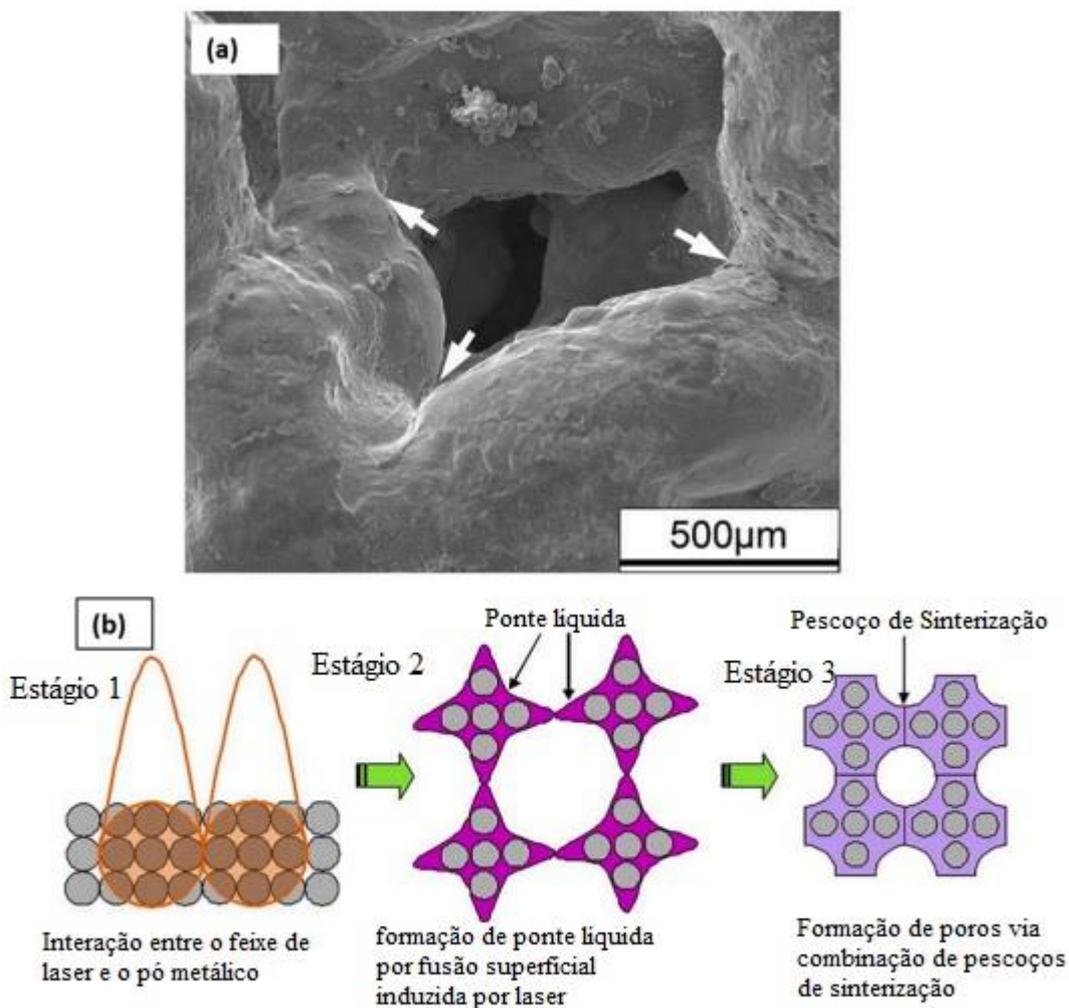


Figura 4.7 - (a) Imagem do MEV de poro formado (b) esquema de formação de poros durante a técnica DMLS. (GU e SHEN, 2008)

### 4.3.2.3 Delaminação

A delaminação é a descontinuidade menos crítica e menos relatada na técnica DMLS. Os relatos estudados, que possivelmente ajudam na sua formação, são o desenvolvimento de

tensões residuais em baixas velocidades de varredura e um aporte de energia muito rápido em camadas do pó metálico. Essas tensões são responsáveis pela delaminação nas camadas da peça, causando danos e empenamento no produto (SIMCHI e ASGHARZADEH, 2004).

### **4.3.3 Análise Microestrutural**

A análise da microestrutura é essencial para que as peças produzidas pela técnica DMLS possam alcançar a microestrutura e propriedades mecânicas desejadas. Por se tratar de peças que passam por um processo termodinâmico, elas podem desenvolver diferentes microestruturas e, assim, apresentar diferentes propriedades mecânicas. Por isso, é importante realizar a análise microestrutural, já que a microestrutura e propriedades adquiridas no processo devem atender a aplicação desejada para aquele componente como, por exemplo, as peças aeroespaciais que exigem estruturas com alta resistência mecânica e um peso reduzido (ANAND e DAS, 2021).

Com base na literatura relatada nessa monografia, pode-se dizer que o controle da microestrutura das peças fabricadas via DMLS é a principal preocupação para que a peça possa alcançar as propriedades mecânicas desejadas. A microestrutura final é influenciada pelo tratamento térmico, processamento termomecânico e a temperatura. No entanto, a atuação conjunta desses parâmetros de produção pode influenciar a microestrutura da peça e, conseqüentemente, melhorar as propriedades mecânicas para determinadas peças e aplicações (ANAND e DAS, 2021).

### **4.3.4 Avaliação das propriedades mecânicas**

Na avaliação das propriedades mecânicas do produto produzido pela DMLS, todos os parâmetros são avaliados para mostrar o impacto de cada um deles nas propriedades mecânicas do material, fazendo o estudo detalhado da influência e o efeito de cada um. As propriedades normalmente avaliadas no processo DMLS são:

- Tensão residual
- Resistência à tração e compressão
- Microdureza
- Resistência ao desgaste

- Resistência à fadiga
- Rugosidade superficial

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados das análises realizadas em trabalhos da literatura para amostras de 2 tipos de ligas muito utilizadas na técnica DMLS: a liga de titânio (Ti6Al4V) e a de alumínio (AlSi10Mg), seguindo toda a metodologia citada anteriormente.

### 5.1 Liga de Titânio (Ti6Al4V)

O titânio e suas ligas são amplamente utilizados no processo de fabricação industrial para diversos produtos. Ele é mais leve e possui uma alta resistência, o que o torna extremamente útil para aplicações automotivas, aeroespaciais e até odontológicas. A liga Ti6Al4V é comumente utilizada pois apresenta uma alta resistência e por sua característica de biocompatibilidade. A combinação de várias características, como alta resistência, alta tenacidade, resistência à corrosão, baixa densidade, facilidade de fabricação, baixo módulo de elasticidade e o baixo custo, faz com que a liga Ti6Al4V seja uma excelente escolha para a aplicação da técnica DMLS (ISHFAQ *et al.*, 2021).

#### 5.1.1 Análise microestrutural da liga Ti6Al4V

As propriedades de uma peça estão diretamente ligadas à sua microestrutura, no caso da manufatura aditiva, principalmente, dentro das camadas depositadas. A microestrutura do material é afetada diretamente pela taxa de solidificação. Sendo assim, a otimização dos parâmetros de processo tem um papel essencial para a evolução e análise da microestrutura da peça (ISHFAQ *et al.*, 2021).

Por se tratar de uma revisão bibliográfica, para comentar sobre as análises já realizadas para a liga Ti6Al4V, utilizou-se como base os estudos e experimentos de diversos artigos para exemplificar as aplicações da técnica DMLS, em que cada autor realizou um estudo sobre determinado parâmetro do processo e sua influência na microestrutura da peça.

Chandramohan *et al.* (2018) estudaram os efeitos na liga Ti6Al4V relacionados à orientação de construção da microestrutura. Foi observado que horizontalmente a fase  $\alpha$  apresenta morfologia acicular finamente dispersa na matriz da fase  $\beta$ , enquanto verticalmente foi possível observar agulhas de martensita. A microestrutura sinterizada do material mostrou muitas descontinuidades, principalmente poros.

Novotný *et al.* (2019) realizaram estudos de análise térmica e de transformação de fases da liga Ti6Al4V. Na Figura 5.1 pode-se observar a microestrutura antes (Figura 5.1a) e depois do tratamento térmico a 1040°C por 1h e resfriamento no forno (Figura 5.1b) e em água (Figura 5.1c), em que as trilhas foram submetidas aos seguintes parâmetros: 30µm de espessura da trilha, potência do laser de 170W, velocidade de varredura de 1250mm/s e 100µm de sobreposição de trilhas. A microestrutura da amostra tratada e resfriada no forno apresentou uma estrutura constituída de fase  $\alpha$  (CFC de alta temperatura) contornada pela fase  $\beta$  (HC de baixa temperatura) (Figura 5.1b). No caso da amostra tratada e resfriada em água a estrutura é constituída de martensita refinada (Figura 5.1c).

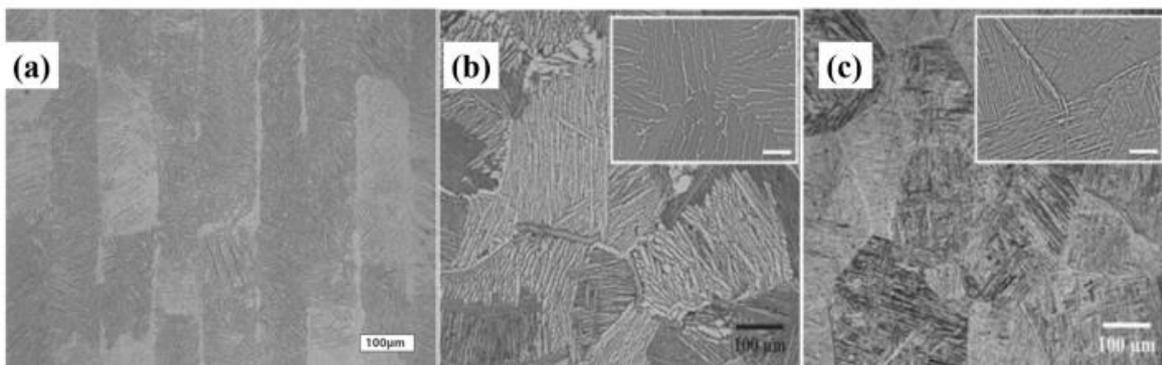


Figura 5.1 - Microestrutura da Liga Ti6Al4V (a) inicialmente; após 1 hora de tratamento térmico à 1040°C (b) resfriamento no forno e (c) resfriamento em água (NOVOTNÝ *et al.*, 2019)

Muiruri *et al.* (2020) relataram que, quando a amostra de Ti6Al4V foi analisada no sentido longitudinal, grãos da fase  $\beta$  foram encontrados paralelamente à direção de varredura do laser. Esses resultados foram obtidos utilizando os seguintes parâmetros: potência do laser de 175W, sobreposição de trilhas de 100µm e 30µm de espessura da trilha. Na Figura 5.2, verifica-se a presença de grãos de fase  $\beta$  de morfologia quase equiaxiais na seção transversal de varredura do laser, tanto para a amostra como produzida, quanto na amostra submetida a um tratamento de alívio de tensões. Na seção longitudinal de varredura do laser, verifica-se que a estrutura consiste de uma estrutura do tipo acicular nomeada como martensita- $\alpha'$  (Figura 5.2 c e d).

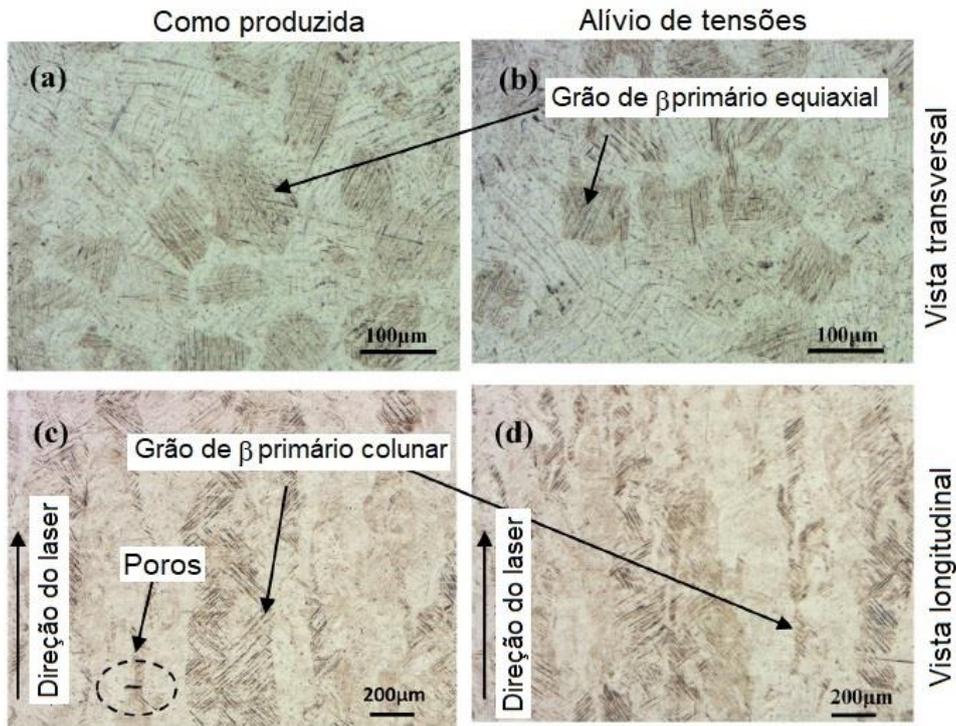


Figura 5.2 - Microscopia óptica da liga Ti6Al4V produzida via DMLS (a e c) amostras como produzidas; (b e d) amostras após tratamento térmico de alívio de tensões nos sentidos transversal e longitudinal de varredura do laser (MUIRURI *et al.*, 2020)

### 5.1.2 Comportamento mecânico da liga Ti6Al4V

Kim *et al.* (2020) estudaram as propriedades físicas, mecânicas e biológicas da liga Ti6Al4V, para impressões 3D, visando sua aplicação na área odontológica. O módulo de elasticidade e a resistência foram avaliados de acordo com o espaçamento entre trilhas do laser, sendo de 30µm, 50µm, 70µm e 90µm. Observou-se que o módulo de elasticidade foi reduzindo de acordo com o aumento do espaçamento entre trilhas do laser. Foram observadas trincas para os valores de 70µm e 90µm e também a presença de muitos poros. Os resultados são apresentados na Figura 5.3.

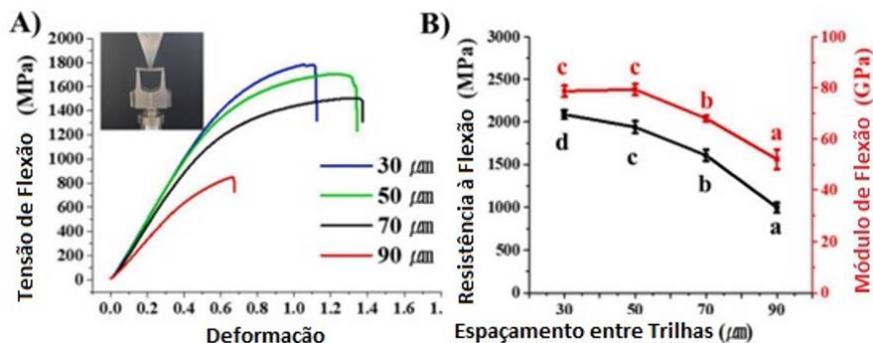


Figura 5.3 - Ensaio Mecânicos de corpos de prova da técnica DMLS. (KIM *et al.*, 2020)

Keresztes e Pammer (2017) estudaram as propriedades mecânicas de amostras da liga Ti6Al4V, produzida via DMLS, em camadas muito finas e utilizando pó blendado. Os resultados dos ensaios de tração das amostras retiradas, tanto na direção longitudinal quanto transversal de varredura do laser, podem ser observados na Figura 5.4. Observa-se que a maioria das amostras apresentou a mesma tensão máxima, enquanto apenas algumas amostras apresentaram menor deformação. Comparando as amostras produzidas via DMLS com amostras produzidas por processos tradicionais, verificou-se que a tensão máxima das amostras da liga Ti6Al4V, produzidas por métodos tradicionais, variou de 900MPa a 1220MPa enquanto que as amostras produzidas via DMLS apresentaram valores acima de 1100Mpa. Isso é muito importante quando se considera o processo de fabricação, uma vez que a direção de fabricação pode ser escolhida apenas com base em parâmetros de tempo e custo e não apenas em propriedades mecânicas.

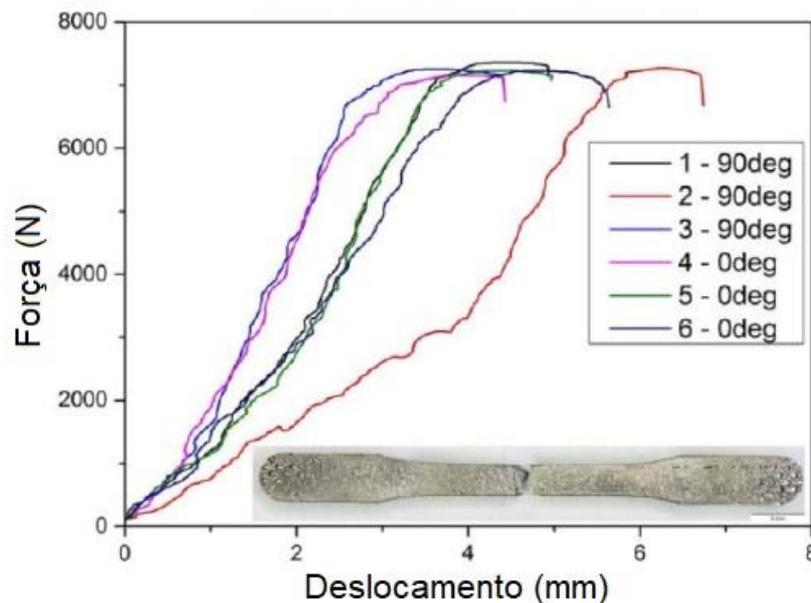


Figura 5.4 - Gráfico de ensaios de tração de amostras produzidas via DMLS (KERESZTES e PAMMER, 2017)

### 5.1.3 Dureza da liga Ti6Al4V

Patil *et al.* (2019) estudaram o efeito da adição de TiB<sub>2</sub>, como partícula de reforço, na microestrutura de amostras da liga Ti6Al4V processadas por DMLS. Os resultados encontrados mostraram um aumento gradativo dos valores de dureza do material com o aumento do teor de TiB<sub>2</sub>. Esses resultados são mostrados na Figura 5.6. O aumento da dureza era esperado por dois motivos: primeiro, os *whiskers* de TiB precipitados são descontínuos, orientados aleatoriamente e dispersos causando o endurecimento da liga Ti6Al4V, e segundo, como ocorre o refinamento

da estrutura, os valores de dureza são inversamente proporcionais ao tamanho do grão da liga, que é conhecida como a relação Hall-Petch.

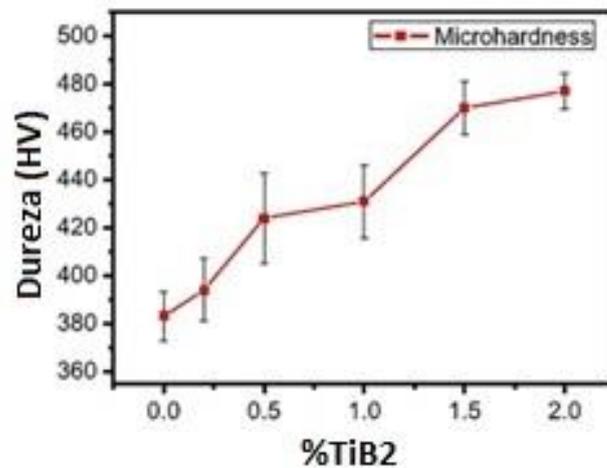


Figura 5.5 - Variação da microdureza Vickers da liga Ti6Al4V produzidos via DMLS com a adição de TiB<sub>2</sub> (PATIL *et al.*, 2019)

Tezel, Topal e Kovan (2019) fizeram um estudo sobre o comportamento em desgaste de engrenagens fabricadas por diversos tipos de materiais, utilizando diferentes processos incluindo a técnica DMLS, em que foi analisada a dureza do material. Na Figura 5.7 pode-se observar os resultados da dureza em cada processo. O resultado mostra que os materiais produzidos via DMLS não apresentaram os maiores valores de dureza em todos os casos, porém, dependendo da aplicação, pode se tornar viável.

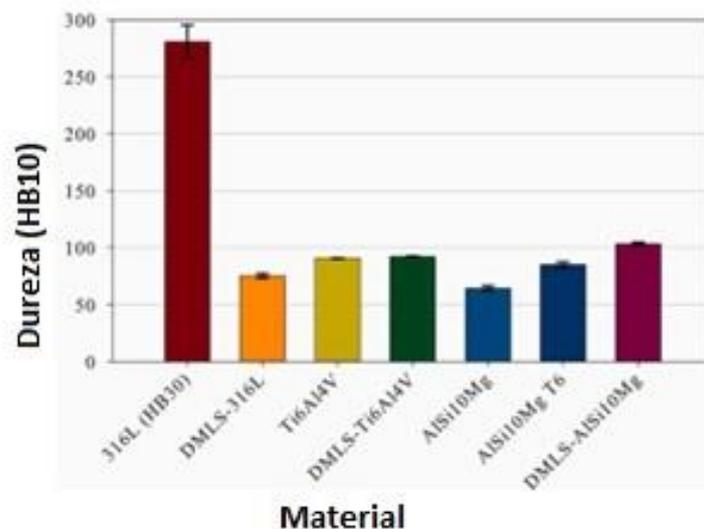


Figura 5.6 - Valores de dureza de engrenagens produzidas com diferentes técnicas de manufatura. (TEZEL, TOPAL e KOVAN, 2019)

## 5.2 Liga de Alumínio (AlSi10Mg)

A liga de alumínio AlSi10Mg atualmente é a liga mais utilizada na técnica DMLS, devido a sua alta fluidez e a sua facilidade de fabricação. Sua principal aplicação está no mercado automotivo, nos equipamentos onde ocorrem trocas de calor. Além disso, por sua alta resistência mecânica e baixo peso possibilitam várias outras aplicações, como no setor aeroespacial e biomédico. Essa liga tem alta refletividade, condutividade térmica e uma boa relação resistência/peso (ISHFAQ *et al.*, 2021).

### 5.2.1 Análise microestrutural da liga AlSi10Mg

Para comentar sobre as análises já realizadas para a liga AlSi10Mg, utilizou-se como base os estudos e experimentos de diversos autores para exemplificar as aplicações da técnica DMLS, em que cada autor realizou um estudo sobre determinado parâmetro do processo e sua influência na microestrutura da peça.

Segundo Cabrini *et al.* (2016a), foi feito um estudo sobre o efeito do tratamento térmico da liga AlSi10Mg na resistência à corrosão dos materiais produzidos pela técnica DMLS e chegaram à conclusão que o feixe de laser resultou em pequenas poças de fusão que solidificaram com alta taxa de resfriamento, resultando em uma microestrutura que atingiu uma característica de crescimento muito fora do equilíbrio. As linhas de contorno das poças fundidas criaram contornos com geometria irregular no plano de deposição. Cabrini *et al.* (2016b) registaram o efeito da sobreposição de trilhas na microestrutura. Verificou-se que as poças de fusão apresentam formato semicilíndrico com dimensões que dependem da potência do laser e da sobreposição de trilhas. A análise por microscopia mostrou grãos celulares refinados de fase  $\alpha$ -Al e partículas de Si com tamanhos inferiores a 500nm, e nos contornos das poças de fusão, poros irregulares foram encontrados com dimensões de 30 $\mu$ m, como apresentado na Figura 5.8 da microestrutura do material produzido.

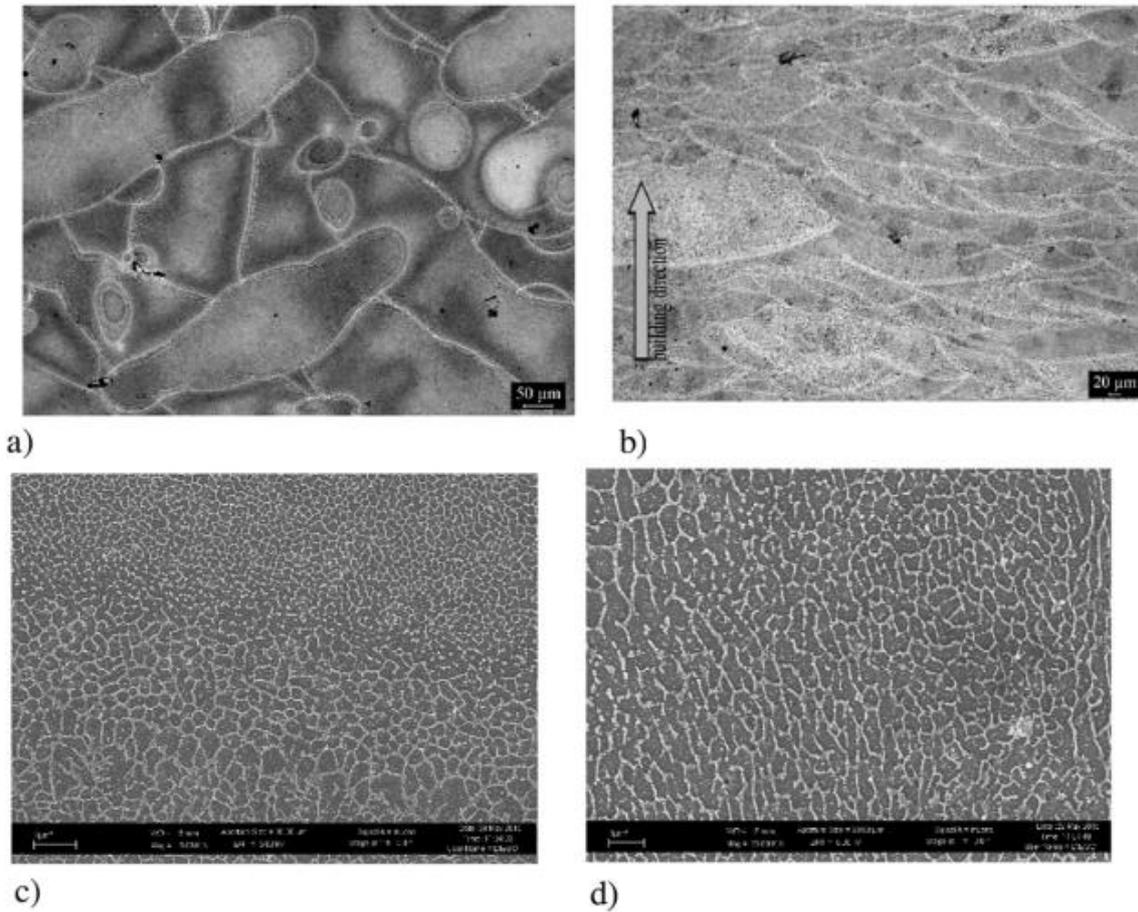


Figura 5.7 - Microestrutura da liga AlSi10Mg: a) No plano x-y, b) ao longo do eixo z, c) MEV do plano x-y, d) plano x-z, mostrando cristais de silício muito refinados nos contornos das dendritas. (CABRINI *et al.*, 2016b)

Fathi *et al.* (2018, apud ISHFAQ *et al.*, 2021) relataram que os contornos das poças de fusão ficaram bem evidentes na vista superior (b) e frontal (c) da amostra, como apresentado na Figura 5.9. Na Figura 5.9 pode-se observar que a mudança de  $67^\circ$  entre as camadas no plano x-y resultaram em contornos de grãos irregulares, fazendo com que a microestrutura encontrada apresentasse um crescimento direcional devido a solidificação acelerada.

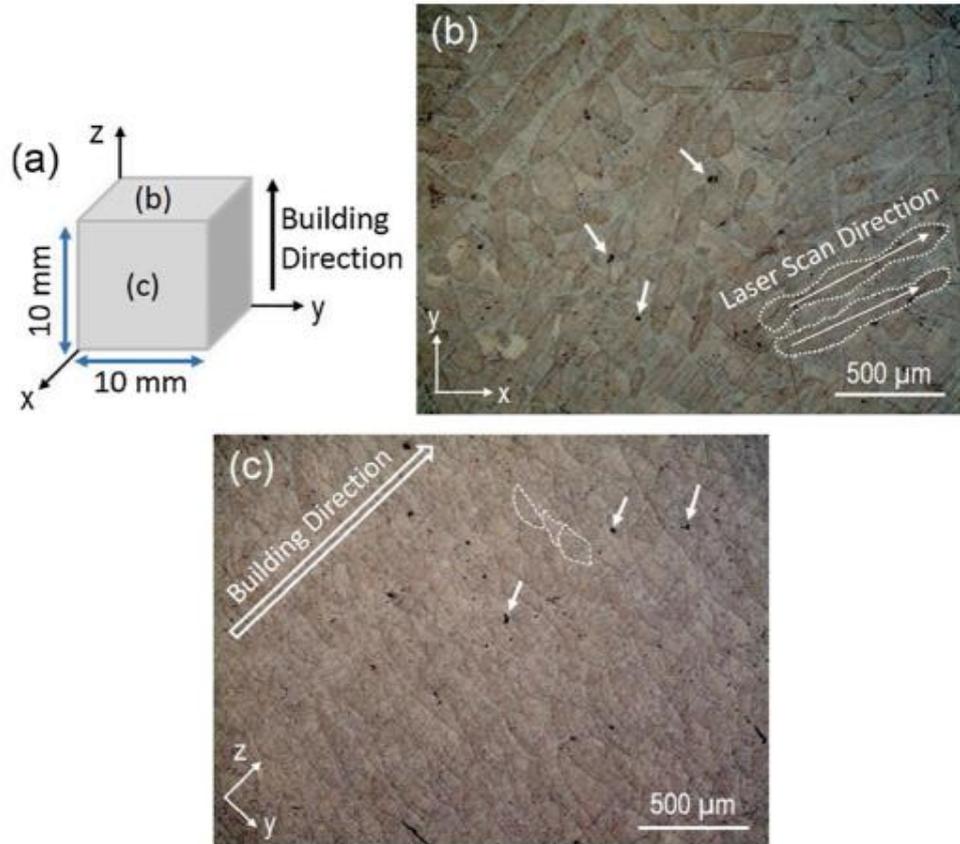


Figura 5.8 – (a) Visão esquemática da amostra produzida via DMLS, mostrando a orientação da amostra observada por microscopia óptica. (b) Vista superior face b (c) Vista frontal (face c) ao longo do eixo z. (FATHI *et al.*, 2018)

## 5.2.2 Comportamento mecânico da liga AlSi10Mg

Pola *et al.* (2019) estudaram o comportamento em fadiga da liga AlSi10Mg fabricada via DMLS com e sem a aplicação de *shot peening*. Eles verificaram que o *shot peening* aumentou a resistência à fadiga consideravelmente. As microestruturas resultantes são apresentadas na Figura 5.10. As poças de fusão apresentaram-se alongadas no plano de deposição e também revelaram camadas inferiores formadas a diferentes orientações como consequência do processo de deposição (Figura 5.10a). Na Figura 5.10b as poças de fusão são claramente visíveis com formato semicilíndrico típico. Na Figura 5.10c, pode-se observar a estrutura de grãos celulares da fase  $\alpha$ -Al (áreas escuras) com partículas de Si muito refinadas em seu contorno (áreas claras).

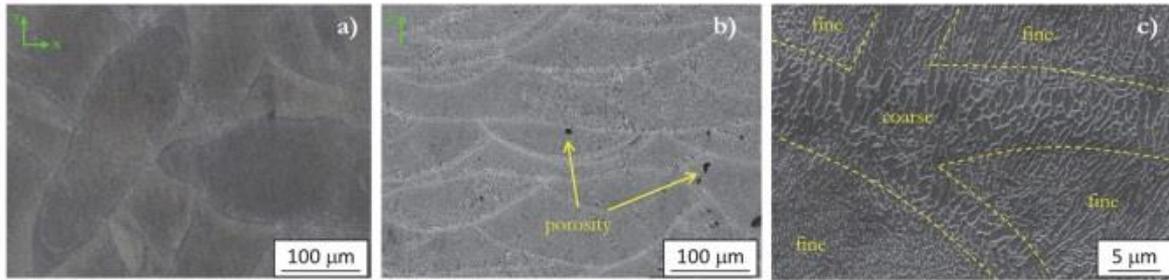


Figura 5.9 - Visão esquemática da amostra de AlSi10Mg produzida via DMLS, mostrando a orientação da amostra via microscopia óptica. (a) horizontal (b) vertical e (c) MEV após ataque químico com reagente Keller. (POLA *et al.*, 2019)

Manfredi *et al.* (2013) avaliaram o comportamento mecânico da liga AlSi10Mg via curva tensão-deformação em amostras retiradas em diferentes direções. As orientações consideradas foram ao longo do eixo z, chamado de “direção de construção”, e ao longo de três direções na plataforma de construção (plano xy): paralela à direção de deposição do pó ( $0^\circ$ ), ao longo do eixo normal a ele ( $90^\circ$ ) e a  $45^\circ$  entre eles. Os resultados são mostrados na Figura 5.11, em que pode-se observar que a direção de crescimento dos grãos não afetou significativamente o módulo de Young. Os valores foram quase os mesmos em todas as amostras analisadas em diferentes orientações. O mesmo comportamento foi observado com relação à microdureza.

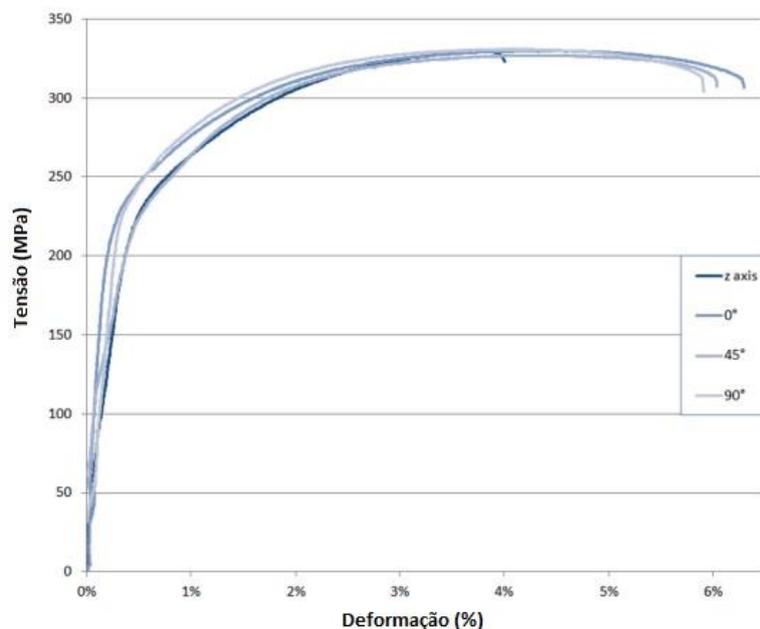


Figura 5.10 - Curvas Típicas de tensão-deformação para amostras de liga de alumínio AlSi10Mg produzidas via DMLS ao longo de 4 orientações (MANFREDI *et al.*, 2013)

### 5.2.3 Microdureza da liga AlSi10Mg

Ghasri-Khouzani *et al.* (2019) estudaram a dureza da liga AlSi10Mg e analisaram duas seções diferentes do mesmo material (horizontal e vertical com relação ao plano de construção). Os valores de microdureza obtidos em ambos os casos não variou muito, permanecendo com valores próximos do valor inicial. A presença de poros, de materiais que não fundiram no processo e de pequenas trincas não tiveram um efeito significativo nos valores de microdureza obtidos nas amostras. Os parâmetros de processo (como potência do laser, velocidade de varredura, espaçamento entre trilhas, etc.) não afetaram os valores de microdureza da liga. A Figura 5.12 mostra os valores de microdureza da liga AlSi10Mg e nela observa-se que os valores de microdureza não apresentaram variação significativa. Na direção horizontal, apresentou um valor médio de microdureza de 130HV, enquanto na seção vertical apresentou um valor médio de microdureza de 125HV.

A microdureza média da liga AlSi10Mg fabricada em DMLS foi aproximadamente 24% maior do que a liga fundida sob pressão (95HV–105HV (LUMLEY, 2008)). A taxa de solidificação extremamente alta durante os processos MA resulta em estrutura de grão mais fina do que a obtida pela fundição convencional. Dado que a dureza do material é aproximadamente proporcional à sua tensão de escoamento, a relação Hall-Petch (OKAYASU *et al.*, 2009) pode ser empregada para justificar o aumento da dureza das peças MA aos seus tamanhos de grão menores (GHASRI-KHOUZANI *et al.*, 2019).

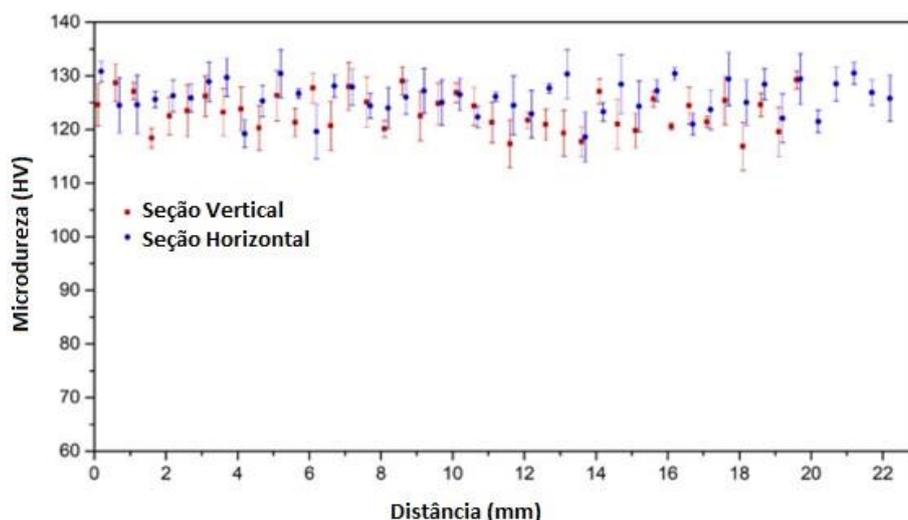


Figura 5.11 - Microdureza da liga AlSi10Mg (GHASRI-KHOUZANI *et al.*, 2019)

## 6 CONCLUSÕES

Nesse trabalho, foi realizada uma revisão bibliográfica abordando técnicas de impressão 3D de ligas metálicas, a fim de descrever seus princípios de produção e parâmetros de processo, realizando análises de estudos de caso envolvendo duas ligas (Ti6Al4V e AlSi10Mg) processadas via manufatura aditiva, principalmente em relação ao processo DMLS, em que foi analisada a influência dos parâmetros de processo nas características dessas ligas.

As principais classes para as tecnologias de manufatura aditiva são: *Photopolymerization*, *Material Jetting*, *Sheet Lamination*, *Material Extrusion*, *Binder Jetting*, *Powder Bed Fusion* e *Directed Energy Deposition*. A técnica DMLS, que pertence a classe PBF, mostra-se como a mais promissora para a fabricação de componentes metálicos.

A partir das análises dos estudos de caso, conclui-se os parâmetros de processamento no processo DMLS como: potência do laser, velocidade de varredura, espessura da camada e a sobreposição de trilhas podem influenciar na microestrutura e nas propriedades das ligas estudadas. A solidificação que ocorre de forma muito rápida e em condições muito fora do equilíbrio possibilita a formação de fases metaestáveis e um refino intenso da microestrutura.

A aplicação da técnica DMLS nas ligas de titânio (Ti6Al4V) e de alumínio (AlSi10Mg) mostrou-se relevante e muito promissora, pois são duas ligas em que os parâmetros da técnica possibilitaram o refino da microestrutura e a melhoria das propriedades mecânicas nos estudos realizados, podendo ser utilizadas como referência para um possível estudo de viabilidade de aplicação dessa técnica em outras ligas metálicas.

Sobre as técnicas de manufatura aditiva, pode-se concluir que são técnicas muito promissoras para a fabricação de componentes metálicos, podendo-se obter melhorias nas propriedades mecânicas dos materiais, abrindo um leque de possibilidades de desenvolvimento de produtos industriais, com economia de tempo e investimento, quando comparadas com os processos de fabricação tradicionais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3D CONCEPTS. **How 3D Printing Works**. 2017. Disponível em: < How 3D Printing Works. (my3dconcepts.com)>. Acessado em: 10 set. 2022

ANAND, M.; DAS, A. K. Issues in fabrication of 3D components through DMLS Technique: A review. **Optics & Laser Technology**, v. 139, p. 1-39, 2021.

BARABASZOVÁ, K. Č.; SLÍVA, A.; KRATOŠOVÁ, G.; HOLEŠOVÁ, S.; VOLODARSKAJA, A.; CETINKAYA, T.; BROŽOVÁ, S.; KOZUBEK, L.; MARTYNKOVÁ, G. S. Phase Transformation after Heat Treatment of Cr-Ni Stainless Steel Powder for 3D Printing. **Materials**, v. 15, n. 15, p. 1-13, 2022.

CABRINI, M.; LORENZI, S.; PASTORE, T.; PELLEGRINI, S.; AMBROSIO, E. P.; CALIGNANO, F.; MANFREDI, D.; PAVESE, M.; FINO, P. Effect of heat treatment on corrosion resistance of DMLS AlSi10Mg alloy. **Electrochimica Acta**, v. 206, p. 346-355, 2016 (a).

CABRINI, M.; LORENZI, S.; PASTORE, T.; PELLEGRINI, S.; MANFREDI, D.; FINO, P.; BIAMINO, S.; BADINI, C. Evaluation of corrosion resistance of Al-10Si-Mg alloy obtained by means of Direct Metal Laser Sintering. **Journal of Material Processing and Technology**. v. 231, p. 326–335, 2016 (b).

CHANDRAMOHAN, P.; BHERO, S.; OBADELE, B. A.; OLUMBAMBI, P. A.; RAVISANKAR, B. Effect of built orientation on direct metal laser sintering of Ti-6Al-4V. **Indian Journal of Engineering & Materials Sciences**, v. 25, p. 69-77, 2018.

CHANDRASEKARA, S.K.R.; REDDY, A.S.; SRINIVASAN, D.; ANANTHANARAYANAN, D. Study of Process Parameter and Powder Variability on the Properties and Recrystallization Behavior of Direct Metal Laser Sintered CoCrMo. In: Gas Turbine India Conference. The American Society of Mechanical Engineers, v. 2, 2017, Bangalore, India. **Proceedings** [...]. Bangalore: ASME, 2017. p. 1-10, Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/GTINDIA/proceedings-abstract/GTINDIA2017/58516/V002T10A004/243848>. Acesso em: 10 set. 2022.

DING, D.; PAN, Z.; CUIURI, D.; LI, H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 81, n. 1, p. 465-481, 2015.

EOS. **Impressão 3D DMLS para metais – Guia definitivo**. 2020. Disponível em: <https://amsbrasil.com.br/impresao-3d-dmls-para-metais-guia-definitivo/>. Acessado em: 25 set. 2022.

FATHI, P.; MAHAMMADI, M.; DUAN, X.; NASIRI, A. M. A comparative study on corrosion and microstructure of direct metal laser sintered AlSi10Mg\_200C and die cast A360.1 aluminum. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 259, p. 1-14, 2018.

GHASRI-KHOUZANI, M.; PENG, H.; ATTARDO, R.; OSTIGUY, P.; NEIDIG, J.; BILLO, R.; HOELZLE, D.; SHANKAR, M. R. Comparing microstructure and hardness of direct metal laser sintered AlSi10Mg alloy between different planes. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 37, p. 274-280, 2019.

GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing**. Nova York: Springer Cham, v.2. 2015. 509p.

GODEC, D.; GONZALEZ-GUTIERREZ, J.; NORDIN, A.; PEI, E.; ALCÁZAR, J. U. **A Guide to Additive Manufacturing**. Nova York: Spinger Cham, 2022. 344p. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-05863-9>. Acessado em: 22 set. 2022.

GU, D.; SHEN, Y. Balling phenomena in direct laser sintering of stainless-steel powder: Metallurgical mechanisms and control methods. **Materials & Design**, v. 30, n. 8, p. 2903-2910, 2009.

GU, D.; SHEN, Y. Processing conditions and microstructural features of porous 316L stainless steel components by DMLS. **Applied Surface Science**, v. 255, n. 5, p. 1880-1887, 2008.

HERZOG, D.; SEYDA, V.; WYCISK, E.; EMMELMANN, C. Additive manufacturing of metals. **Acta Materialia**, v. 117, p. 371-392, 2016.

HUANG, Y.; LEU, M. C.; MAZUMDER, J.; DONMEZ, A. Additive manufacturing: current state, future potential, gaps and needs, and recommendations. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 137, n. 1, p.1-10, 2015.

ISHFAQ, K.; ABDULLAH, M.; MAHMOOD, A. M. A state-of-the-art direct metal laser sintering of Ti6Al4V and AlSi10Mg alloys: Surface roughness, tensile strength, fatigue strength and microstructure. **Optics & Laser Technology**, v. 143, p. 1-23, 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION/ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ISO/ASTM **52900:2015: Additive manufacturing — General principles — Terminology**. West Conshohocken: ISO/ASTM, 2015. 19p.

KERESZTES, Z.; PAMMER, D. Mechanical properties of Ti-6Al-4V samples produced with additive technology. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 13, p. 26558-26565, 2018.

KIM, J. H.; KIM, M. Y.; KNOWLES, J. C.; CHOI, S.; KANG, H.; PARK, S. H.; PARK, S. M.; KIM, H. W.; PARK, J. T.; LEE, J. H.; LEE, H. H. Mechanophysical and biological properties of a 3D-printed titanium alloy for dental applications. **Dental Materials**, v. 36, n. 7, p. 945-958, 2020.

KIM, W. J.; NGUYEN, H. H.; KIM, H. Y.; NGUYEN, M. T.; PARK, H. S.; KIM, J. C. Sintering and microstructures of SUS 316L powder produced by 3D printing process. **Archives of Metallurgy and Materials**, v. 62, p. 1215-1218, 2017.

KORIUM, M. S.; ROOZBAHANI, H.; ALIZADEH, M.; PEREPELKINA, S.; HANDROSS, H. Direct Metal Laser Sintering of Precious Metals for Jewelry Applications: Process Parameter Selection and Microstructure Analysis. **IEEE Access**, v. 9, p. 126530-126540, 2021.

LUMLEY, R.N. **Technical Data Sheets for Heat-Treated Aluminium High-Pressure Die Castings**, 2008. Disponível em: [https://mastersonics.com/documents/mmm\\_applications/](https://mastersonics.com/documents/mmm_applications/)

ultrasonic\_metallurgy/pio2-hpdc-aluminum.pdf. Acessado em: 22 set. 2022.

LV, J.; JIA, C.; YANG, J.; ZHANG, Y. Status of 3D Printing Technology for Metal Materials. In: International Conference on Manufacturing Science and Engineering (ICMSE 2017), 7<sup>th</sup>. 2017. **Proceedings** [...] Zhuhai, China: Atlantis Press, 2017. p. 256-259.

MANFREDI, D.; CALIGNANO, F.; KRISHNAN, M.; CANALI, R.; AMBROSIO, E. P.; ATZENI, E. From powders to dense metal parts: Characterization of a commercial AlSiMg alloy processed through direct metal laser sintering. **Materials**, v. 6, n. 3, p. 856-869, 2013.

MUIRURI, A.; MARINGA, M.; PREEZ, W. D.; MASU, L. Effect of stress-relieving heat treatment on the high strain rate dynamic compressive properties of additively manufactured Ti6Al4V (ELI). **Metals**, v. 10, n. 5, p. 653-658, 2020.

NOVOTNÝ, L.; BÉRES, M.; ABREU, H. F. G.; ZAJAC, J.; BLECK, W. Thermal analysis and phase transformation behaviour during additive manufacturing of Ti-6Al-4V alloy. **Materials Science and Technology**, v. 35, n. 7, p. 846-855, 2019.

OKAYASU, M.; YOSHIFUJI, S.; MIZUNO, M.; HITOMI, M.; YAMAZAKI, H. Comparison of mechanical properties of die cast aluminium alloys: cold v. hot chamber die casting and high v. low speed filling die casting. **International Journal of Cast Metal Research**, v. 22, p. 374-381, 2009.

OYAR, P. Laser sintering technology and balling phenomenon. **Photomedicine and laser surgery**, v. 36, n. 2, p. 72-77, 2018.

PATIL, A. S.; HIWARKAR, V. D.; VERMA, P. K.; JHATIRKAR, R. K. Effect of TiB<sub>2</sub> addition on the microstructure and wear resistance of Ti-6Al-4V alloy fabricated through direct metal laser sintering (DMLS). **Journal of Alloys and Compounds**, v. 777, p. 165-173, 2019.

POLA, A.; BATTINI, D.; TOCCI, M.; AVANZINI, A.; GIRELLI, L.; PETROGALLI, C.; GELFI, M. Evaluation on the fatigue behavior of sand-blasted AlSi10Mg obtained by DMLS. **Frattura ed Integrità Strutturale**, v. 13, n. 49, p. 775-790, 2019.

RAMESH, C. S.; SRINIVAS, C. K.; SRINIVAS, K. Friction and wear behaviour of rapid prototype parts by direct metal laser sintering. **Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces**, v. 1, n. 2, p. 73-79, 2007.

ROBERTS, R. C.; TIEN, N. C. 3D printed stainless steel microelectrode arrays. In: International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS), 19<sup>th</sup>, 2017, Kaohsiung, Taiwan. **Proceedings [...]** Taiwan: IEEE, 2017. p. 1233-1236.

SEDLÁK, J.; PTÁČKOVÁ, M.; NEJEDLÝ, J.; MADAJ, M.; DVOŘÁČEK, J.; ZOUHAR, J.; CHARVÁT, O.; PÍŠKA, M.; ROZKOŠNÝ, L. Material analysis of titanium alloy produced by Direct Metal Laser Sintering. **International Journal of Metalcasting**, v. 7, n. 2, p. 43-50, 2013.

SILVA, J. M. H. **Impressora 3D para fabrico de peças de grandes dimensões em metal**. 2017. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Faculdade de Engenharia do Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, 2017.

SIMCHI, A.; ASGHARZADEH, H. Densification and microstructural evaluation during laser sintering of M2 high speed steel powder. **Materials Science and Technology**, v. 20, n. 11, p. 1462-1468, 2004

SKA. Manufatura aditiva: como criar design de produtos a partir de recursos computacionais. **Indústria 4.0**. 2022. Disponível em: <<https://www.industria40.ind.br/artigo/22927-manufatura-aditiva-criar-design-produtos-recursos-computacionais#.Y-JqqIhyBN8.twitter>>. Acessado em: 17 set. 2022.

TEZEL, T.; TOPAL, E. S.; KOVAN, V. Characterizing the wear behaviour of DMLS-manufactured gears under certain operating conditions. **Wear**, v. 440, p. 1-10, 2019.

VYAS, C.; POOLOGASUNDARAMPILLAI, G.; HOYLAND, J.; BARTOLO, P. 3D printing of biocomposites for osteochondral tissue engineering. In: **Biomedical Composites**. 2<sup>nd</sup>. Woodhead Publishing Series in Biomaterials, 2017. p. 261-302.