



Universidade de Aveiro  
2021

**ELEANDRO MILAGRE  
LIMA DI JUCA**

**ESTUDO DO PROCESSO ADITIVO BINDER JETTING  
NO FABRICO DE PEÇAS METÁLICAS**



Universidade de Aveiro  
2021

**ELEANDRO MILAGRE  
LIMA DI JUCA**

**ESTUDO DO PROCESSO ADITIVO BINDER JETTING  
NO FABRICO DE PEÇAS METÁLICAS**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos e do Professor Doutor Carlos Alberto Moura Relvas, Professores Auxiliares do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

À Deus toda a Glória

## **o júri**

Presidente

**Prof. Doutor Rui António da Silva Moreira**  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Arguente

**Prof. Doutor Henrique de Amorim Almeida**  
Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria

Orientador

**Prof. Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos**  
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

## **agradecimentos**

Ao meu orientador, Professor Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos pela disposição que demonstrou para ajudar-me durante este trabalho, por todo apoio que sempre que pôde me deu e pela dedicação que pude sentir e da qual certamente me beneficieei. Ao meu coorientador Professor Doutor Carlos Alberto Moura Relvas por todos os esclarecimentos prestados e pelos esforços empreendidos para que se cumprisse o preconizado

À Jade Groupe e particularmente ao Eng<sup>o</sup>. Pedro Dominguez e ao Eng<sup>o</sup>. João Abrantes por terem assumido a responsabilidade da produção e por terem dado e se terem comprometido de uma forma que considero ter sido corajosa.

À minha família pela imensurável força que me deu e por me ter sustentando em orações e súplicas durante todo o tempo.

## palavras-chave

Fabrico Aditivo de Metal, GD&T, Precisão Dimensional, Sinterização, Simulação de Fabrico Aditivo

## resumo

Considerado um dos pilares da Indústria 4.0, o fabrico aditivo está certamente evoluindo muito rapidamente, com cada vez mais tecnologias desenvolvidas e mais materiais aplicados à esta área de produção, de maneira que já é possível se ter equipamentos (máquinas) de “secretária” inclusive.

Porém com este crescimento e pela capacidade associada a este tipo de processos torna-se extremamente importante melhorar estes processos para que possam responder quantitativamente e qualitativamente as necessidades do mercado.

O presente trabalho pretendeu contribuir para a melhoria do processo de binder jetting de metal por meio da simulação do processo de fabrico de uma peça proposta, usando o software *Simufact* e pelo fabrico da peça, sua inspeção metrológica e posterior análise dos resultados.

Fizeram-se simulações para diferentes valores de tamanho do pó e de densidade da peça verde para avaliar o impacto destes sobre a qualidade da peça final.

As peças foram produzidas em aço 17 – 4PH usando uma máquina *Shop System*. As medições para a análise dimensional foram feitas com um paquímetro digital, já para análise geométrica foram efetuadas medições numa CMM.

As simulações revelaram erros menores para maiores tamanhos de grânulos e para também maiores densidades da peça verde.

Já a inspeção da peça produzida expôs uma maior imprecisão dimensional em X e menor em Z. Mostrou ainda existir, para um mesmo elemento da peça, uma relação entre a razão das dimensões medidas e a razão dos desvios obtidos.

Os resultados também mostraram que as peças A e C são as que tiveram melhor qualidade final, estas apresentaram menores desvios dimensionais e geométricos em relação ao modelo proposto. Os graus de tolerâncias mais altos destas peças foram de IT15 e IT14 para a peça C e a peça A respetivamente.

**keywords**

Metal Additive Manufacturing, GD&T, Dimensional Accuracy, Sintering, Additive Manufacturing Simulation

**abstract**

Stated as one of the pillars of Industry 4.0, additive manufacturing is certainly evolving very quickly, with more and more technologies being developed and more materials being applied to this production area, and it is already possible to have “desk” equipment (machines) included.

However, with this growth and the capacity associated with this type of processes, it is extremely important to improve these processes so that they can respond quantitatively and qualitatively to market needs.

The present work intended to contribute to the improvement of the metal binder jetting process by simulating the manufacturing process of a proposed part, using the Simufact software and by manufacturing the part, its metrological inspection and subsequent analysis of the results.

Simulations were carried out for different values of powder size and density of the green part to assess their impact on the quality of the final part.

The parts were produced in 17 – 4PH steel using a Shop System machine. The measurements for the dimensional analysis were made with a digital pachymeter, while for the geometric analysis, measurements were made on a CMM.

The simulations revealed smaller errors for larger granule sizes and also for larger green part densities.

The inspection of the produced part, on the other hand, exposed greater dimensional inaccuracy in X and less in Z. It also showed that, for the same element of the part, there is still a relationship between the ratio of the measured dimensions and the ratio of the deviations obtained.

The results also showed that parts A and C are the ones with the best final quality, they presented smaller dimensional and geometric deviations in relation to the proposed model. The highest tolerance grades of these parts were IT15 and IT14 for part C and part A respectively.





## Índice

Lista de Figuras .....	iii
Lista de Tabelas .....	v
1 Introdução .....	6
1.1 Enquadramento .....	6
1.1 Objetivos .....	6
1.2 Estrutura da dissertação .....	7
2 Revisão Bibliográfica .....	9
2.1 Fabrico aditivo vs Fabrico tradicional .....	11
2.2 Processos de fabrico aditivo .....	12
2.2.1 Fusão em cama de pó (PBF) .....	12
2.2.2 Deposição direcionada de energia (DED) .....	13
2.2.3 Pulverização de Cola (BJ) .....	14
2.2.4 Laminação de Folhas (SL) .....	15
2.2.5 Fotopolimerização em tanque (VATP).....	16
2.2.6 Extrusão de Material .....	16
2.2.7 Pulverização de Material (Material Jetting).....	17
2.3 Deposição direcionada de energia (DED).....	20
2.3.1 Parâmetros .....	21
2.3.2 Materiais .....	21
2.4 Sintering laser melting (SLM).....	21
2.4.1 Parâmetros .....	23
2.4.2 Materiais .....	23
2.5 Binder jetting.....	25
2.5.1 Sinterização .....	26
2.5.2 Parâmetros .....	27
2.5.2.1 Espessura da camada .....	27
2.5.2.2 Tamanho da gota e configuração do nível de saturação da cola .....	28
2.5.2.3 Orientação de construção.....	29
2.5.2.4 Tamanho do pó .....	29
2.5.2.5 Misturas bimodais.....	29
2.5.2.6 Distribuição do tamanho do pó (Powder size distribution).....	30
2.5.3 Defeitos.....	30
2.5.4 Materiais .....	30
2.6 Shop System .....	31
2.7 Simulação de fabrico aditivo .....	32

2.7.1	Softwares e plataformas.....	33
2.8	Controlo Dimensional e Geométrico para Fabrico Aditivo .....	34
3	Materiais e metodologia .....	37
3.1	Material.....	38
3.2	Artefactos ou peças de teste .....	39
3.3	Peça de estudo.....	45
3.4	Impressão.....	48
3.5	Simulação.....	48
4	Análise de Resultados.....	50
4.1	Simulação.....	50
4.1.1	Densidade da peça verde .....	51
4.1.2	Tamanho do grânulo .....	53
4.2	Medições experimentais .....	55
4.2.1	Densidade sinterizada e densificação .....	59
4.2.2	Peças verdes vs peças sinterizadas.....	59
4.2.3	Peças compensadas .....	61
4.2.4	Peças sinterizadas B, C e E.....	63
4.3	Graus de tolerância IT .....	67
4.4	Toleranciamento Geométrico.....	69
5	Conclusões .....	71
5.1	Estudos futuros.....	72
	Referências Bibliográficas .....	73

## Lista de Figuras

FIGURA 1 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DOS FLUXOS DE TRABALHO FÍSICO E DIGITAL NUM PROCESSO DE FA. ADAPTADO DE (THOMPSON ET AL., 2016).....	10
FIGURA 2 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DE PROCESSOS DE PBF (NIKHIL. A, 2017A).....	13
FIGURA 3 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DE PROCESSOS DE DED COM FEIXE LASER COMO FONTE DE ENERGIA. ....	14
FIGURA 4- ESQUEMA REPRESENTATIVO DE PROCESSOS DE DED COM FEIXE DE ELETRÕES COMO FONTE DE ENERGIA.....	14
FIGURA 5 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DE PROCESSOS DE BJ (PROKOP, 2017). ....	15
FIGURA 6 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DE PROCESSOS DE SL (PORTELA, 2019). ....	15
FIGURA 7 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DE PROCESSOS DE VATP (NIKHIL. A, 2017B). ....	16
FIGURA 8 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DE PROCESSOS DE ME (SAGACIOUS IP - EDITORIAL TEAM, 2021). ....	17
FIGURA 9 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DE PROCESSOS DE MJ (SIREESHA ET AL., 2018).....	17
FIGURA 10 - FLUXO DO PROCESSO BJ. ....	26
FIGURA 11 - PERFIL DE TEMPERATURA USADO NAS SIMULAÇÕES. ....	38
FIGURA 12 - PEÇA DE BENCHMARKING PROPOSTA POR KRUTH. ADAPTADO DE (REBAIOLI & FASSI, 2017). ....	40
FIGURA 13 – VISTA ISOMÉTRICA DAS PEÇAS PROPOSTAS PELA IMS. DIMENSÕES GERAIS 152,4MM X 101,6MM (AUBIN, 1994). ....	40
FIGURA 14 - PEÇA DE TESTE PROPOSTA POR BYUN E LEE DE 150MM X 150MM X 25MM DE DIMENSÕES GERAIS (BYUN & LEE, 2003). ....	41
FIGURA 15 - ARTEFACTOS DE TESTE PROPOSTOS EM DIMITROV. ET AL. DIMENSÕES GERAIS DE A 190MM X 190MM X 190MM (REBAIOLI & FASSI, 2017).....	42
FIGURA 16 - ARTEFACTO DE TESTE PROPOSTO POR CASTILLO (DIMENSÕES GERAIS EM MILIMETROS) RETIRADO DE (REBAIOLI & FASSI, 2017). ....	42
FIGURA 17 - PEÇAS DE COMPARAÇÃO PROPOSTAS POR G. D. KIM E Y. T. OH PARA ESTUDO DA FACTIBILIDADE DE ELEMENTOS PEQUENOS E DA RUGOSIDADE (KIM & OH, 2008). ....	43
FIGURA 18 - PEÇAS PROPOSTAS POR G. D. KIM E Y. T. OH PARA ANÁLISE DA PRECISÃO GEOMÉTRICA E DIMENSIONAL (A) E DA VELOCIDADE DE PRODUÇÃO E CUSTO DO MATERIAL (KIM & OH, 2008).....	43
FIGURA 19 - PEÇA DE TESTE CONSTRUÍDA EM AÇO INOXIDÁVEL POR DMLS (S.MOYLAN, J. SLOTWINSKI, A. COOKE, K. JURRENS, 2012). ....	44
FIGURA 20 - PEÇA DE TESTE PROPOSTA POR ISLAM, BOSWELL E PRAMANIK (ISLAM ET AL., 2013). ....	45
FIGURA 21 - PEÇA DE TESTE PROPOSTA POR ISLAM E SACKS EM 2016 (ISLAM & SACKS, 2016). ....	45
FIGURA 22 - PEÇA E DESIGNAÇÃO DOS RESPECTIVOS ATRIBUTOS. ....	46
FIGURA 23 - DESENHO ILUSTRANDO AS TOLERÂNCIAS GEOMÉTRICAS QUE SE PRETENDE ANALISAR.....	46
FIGURA 24 - RAZÃO ALTURA-ESPESSURA DE PILARES (SHOP SYSTEM DESIGN GUIDE).....	47
FIGURA 25 - BOLEAMENTO DE ÂNGULOS INTERNOS (SHOP SYSTEM DESIGN GUIDE). ....	47
FIGURA 26 - PEÇAS OBTIDAS. AS PEÇAS VERDES ABAIXO E AS PEÇAS SINTERIZADAS ACIMA. ..	48
FIGURA 27 - DEMOSTRAÇÃO DA CONCAVIDADE ADQUIRIDA PELAS PEÇAS SINTERIZADAS. À ESQUERDA A CONFIGURAÇÃO 6 E À DIREITA A CONFIGURAÇÃO 3. ....	51
FIGURA 28 - DESVIOS DE SUPERFÍCIE DAS PEÇAS, A) CONFIGURAÇÃO 5, B) CONFIGURAÇÃO 7, C) CONFIGURAÇÃO 9 E D) CONFIGURAÇÃO 1.....	52
FIGURA 29 - DESVIOS TOTAIS DAS PEÇAS, A) CONFIGURAÇÃO 5, B) CONFIGURAÇÃO 7, C) CONFIGURAÇÃO 9 E D) CONFIGURAÇÃO 1.....	52
FIGURA 30 - DESVIOS MÁXIMOS E MÍNIMOS PARA CADA CONFIGURAÇÃO E ATRIBUTO DA PEÇA. ....	53

FIGURA 31 - DESVIOS TOTAIS DAS PEÇAS, A) CONFIGURAÇÃO 4, B) CONFIGURAÇÃO 8, C) CONFIGURAÇÃO 10, D) CONFIGURAÇÃO 2, E) CONFIGURAÇÃO 11 E F) CONFIGURAÇÃO 12. .....	54
FIGURA 32 - MÓDULO DOS DESVIOS OCORRIDOS NAS CONFIGURAÇÕES, 4, 8, 10, 2, 11 E 12 PARA AS DIREÇÕES X, Y E Z.....	55
FIGURA 33 - DESVIOS SOFRIDOS PELA PEÇA A, B E C. ....	60
FIGURA 34 - DESVIOS OCORRIDOS NAS PEÇAS D E E. ....	61
FIGURA 35 - COMPARAÇÃO ENTRE AS PEÇAS SINTERIZADAS A E B.....	62
FIGURA 36 - DESVIOS ENTRE A PEÇA D SINTERIZADA E O MODELO PROPOSTO.....	63
FIGURA 37 - DESVIOS OCORRIDOS NAS PEÇAS B E C SINTERIZADAS EM RELAÇÃO AO MODELO PROPOSTO. ....	64
FIGURA 38 - DESVIOS OCORRIDOS NA PEÇA E SINTERIZADA EM RELAÇÃO AO MODELO MENOR. .....	65
FIGURA 39 - DESVIOS OCORRIDOS NA PEÇA C SINTERIZADA EM CADA DIREÇÃO. ....	66
FIGURA 40 - DESVIOS OCORRIDOS NA PEÇA B SINTERIZADA EM CADA DIREÇÃO. ....	66
FIGURA 41 - DESVIOS OCORRIDOS NA PEÇA E SINTERIZADA EM CADA DIREÇÃO. ....	67
FIGURA 42 - CLASSIFICAÇÃO IT DOS TAMANHOS BÁSICOS USANDO O PERCENTIL 95 DO NÚMERO DE UNIDADES DE TOLERÂNCIA. ....	68
FIGURA 43 - GRAU IT DE CADA UM DOS ATRIBUTOS DAS PEÇAS. ....	69
FIGURA 44 - ELEMENTOS MEDIDOS NA CMM. ....	69

## Lista de Tabelas

TABELA 1- RESUMO DOS SETE PROCESSOS DE FA, BREVE DESCRIÇÃO, VANTAGENS, DESVANTAGENS, EXEMPLOS DE MATERIAIS USADOS E ALGUMAS EMPRESAS. ADAPTADO DE (SRINIVASULU REDDY & DUFERA, 2016; TOFAIL ET AL., 2018).....	18
TABELA 2 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DO SLM (ADDISPACE, 2021; MATERIALS USED IN SELECTIVE LASER MELTING (SLM), 2021; YAP ET AL., 2015). ....	22
TABELA 3- MATERIAIS, PROPRIEDADES E APLICAÇÕES (ADDISPACE, 2021; MATERIALS USED IN SELECTIVE LASER MELTING (SLM), 2021).....	24
TABELA 4 – PESQUISAS RELACIONADAS À PRECISÃO DIMENSIONAL E/OU GEOMÉTRICA ENVOLVENDO BJ E ASPETOS COBERTOS.....	35
TABELA 5 - EXEMPLOS DE GEOMETRIAS SIMPLES USADAS PARA AVALIAR AS PRINCIPAIS TOLERÂNCIAS GEOMÉTRICAS (REBAIOLI & FASSI, 2017). ....	36
TABELA 6 - GRANULOMETRIA DO PÓ.....	38
TABELA 7 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO 17 - 4PH USADO (MATERIAL DATA SHEET, DESKTOP METAL). ....	39
TABELA 8 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO 17 - 4PH USADO (MATERIAL DATA SHEET, DESKTOP METAL). ....	39
TABELA 9 - CONFIGURAÇÕES USADAS PARA AS SIMULAÇÕES.....	50
TABELA 10 - VALORES MÉDIOS OBTIDOS PELAS MEDIÇÕES DAS PEÇAS VERDES E AS DIMENSÕES DO MODELO. ....	55
TABELA 11 - VALORES MÉDIOS OBTIDOS PELAS MEDIÇÕES DAS PEÇAS SINTERIZADAS.....	56
TABELA 12 - VALORES DE DESVIO PADRÃO PARA CADA ATRIBUTO DAS PEÇAS VERDES.....	57
TABELA 13 - VALORES DE DESVIO PADRÃO PARA CADA ATRIBUTO DAS PEÇAS SINTERIZADAS..	58
TABELA 14 - VALORES ESTIMADOS DE DENSIDADE E DENSIFICAÇÃO DAS PEÇAS.....	59
TABELA 15 - GRAUS IT DE ACORDO COM A ISO 286-1:1988 (MINETOLA ET AL., 2020).....	68
TABELA 16 - VALORES DE DESVIOS GEOMÉTRICOS OBTIDOS.....	70

# 1 Introdução

## 1.1 Enquadramento

O fabrico aditivo de componentes é o caminho a seguir a curto prazo no fabrico de mais variados componentes, especialmente quando estamos perante peças de geometria complexa, a necessidade de poucas unidades de fabrico e tendo como requisito a leveza de uma peça. Sectores como a indústria aeroespacial, biomecânica, médica, automóvel e inclusive a da moda têm tirado todo proveito que podem do fabrico aditivo e têm demonstrado como este método de fabrico consegue responder com certa eficácia e qualidade as necessidades que vêm surgindo neste e outros sectores, fazendo com que as expectativas sobre este “novo” modo de fabricar peças sejam altas, e muito mais agora, ao se pensar em todos fatores atrelados à indústria 4.0.

As tecnologias de fabrico aditivo têm apresentado grandes desenvolvimentos, com cada vez mais agentes surgindo neste sector, mas ainda apresentam limitações, especialmente quando temos necessidade de peças com tolerâncias finas e objetivos funcionais muito restritivos. Sendo normal que este tipo de componentes funcionais seja sujeito a processos de pós-processamento e maquinagem como forma de garantir a sua função, e as exigências de toleranciamento dimensional e geométrico. Contudo a forma não funcional não sofre processos de acabamento.

O fabrico aditivo já não é considerado simplesmente como um método de produção de protótipos, como era nos seus primórdios e tendo em vista que os processos de fabrico aditivo serão cada vez mais requisitados por suas vantagens em comparação aos processos de produção tradicionais. Deste modo, torna-se então necessário que estes processos sejam aprimorados, para serem capazes de produzir peças que respondam satisfatoriamente aos requisitos funcionais a elas associadas e abranger também a produção de peças para setores em que são exigidos um alto grau de precisão dimensional e geométrica. Isto passa por pesquisas e estudos para aferir quais os fatores que impactam a qualidade final de uma peça, como se relacionam, quais são os valores ótimos destes fatores. Estudos verificando a capacidade dos equipamentos ou processos no que se refere a precisão dimensional e geométrica atingida na produção de uma peça.

## 1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral o estudo do processo aditivo binder jetting de metal e dos parâmetros deste processo que exercem maior influência sobre a capacidade de precisão dimensional e geométrica do processo e, portanto, sobre a peça final. Tem ainda por objetivo analisar os efeitos dos parâmetros estritamente ligados a sinterização.

Esta dissertação possui os seguintes objetivos específicos:

- Conceber o estado da arte referente ao Fabrico Aditivo.
- Escolha e conceção do modelo CAD da peça a ser produzida.
- Simulação numérica do processo de fabrico da peça com o software simufact.
- Produção da peça por *Binder Jetting*.
- Aferição do toleranciamento dimensional e geométrico.
- Classificação IT das peças

## 1.2 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, uma introdução, revisão bibliográfica, materiais e metodologia, análise dos resultados e conclusões. Os dois primeiros capítulos onde são abordados os conceitos teóricos e as pesquisas que já foram desenvolvidas nesta área. Os restantes capítulos fazem referência ao trabalho prático que foi realizado e às conclusões decorrentes deste. A seguir é apresentada uma breve descrição de cada um destes capítulos.

**Introdução** – Nesta parte apresentam-se os aspetos introdutórios relacionados ao fabrico aditivo, faz-se um breve enquadramento do tema e se apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos da realização desta dissertação.

**Revisão bibliográfica** – Neste capítulo faz-se primeiramente uma exposição dos conceitos básicos do fabrico aditivo, seus processos e vantagens. Posteriormente faz-se uma revisão da literatura existente, abordando alguns dos principais processos (tecnologias) de fabrico aditivo usadas para a produção de peças metálicas (DED, SLM e BJ), apresentando-se então as suas vantagens e desvantagens, os materiais metálicos usados, os que estão sendo estudados e as características principais intrinsecamente ligadas ao processo de construção das peças.

**Materiais e metodologia** – Pretende-se nesta fase apresentar ou explicar que materiais, equipamentos e(ou) técnicas foram usados no decorrer de todo trabalho, tal como também o procedimento para que se alcançassem os objetivos preconizados para este trabalho. Os passos levados à cabo para; a obtenção do modelo proposto durante; as simulações do processo, do fabrico da peça e a análise dimensional sobre a peça física.

**Análise de resultados** – É neste capítulo que os resultados obtidos das simulações do processo de fabrico da peça e também da metrologia aplicada sobre a mesma, são apresentados e analisados.

**Conclusão** – Este capítulo destina-se às inferências intrínsecas aos resultados, ao tema e ao trabalho proposto e propõem-se trabalhos que podem ser de alguma relevância para o futuro.





## 2 Revisão Bibliográfica

Fabrico Aditivo (FA) é o nome dado à um conjunto de processos de fabrico de peças que se baseia na adição de material, camada por camada, diferentemente dos processos de fabrico convencionais cujo pilar é construção da peça por meio da remoção (ou subtração) de material. O setor de produção de peças por fabrico aditivo tem sido alvo de grande desenvolvimento e inovação, sendo este um dos que mais tem a crescer com a revolução industrial, também conhecida por Indústria 4.0.

O fabrico aditivo é muitas vezes chamado por impressão 3D porém muitos dos processos de fabrico aditivo seguem passos com significativa diferença dos da impressão 3D, sendo esta uma das tecnologias de fabrico aditivo.

O termo Prototipagem rápida e todo o processo em si é o alvo de um outro equívoco, muito comum por sinal, relacionado ao fabrico aditivo, uma vez que é comum que as pessoas tenham ambos por sinónimos e isto deve-se ao facto de que nos primórdios do fabrico aditivo, por suas várias limitações, quer seja em relação ao material à usar, quer seja tecnológica, espacial ou dimensional, etc., este tipo de fabrico de peças era considerado como uma espécie de ferramenta para a obtenção de protótipos (de aspeto ou funcionais) de forma célere (rápida). A prototipagem rápida abrange dois processos de fabrico: Os subtrativos e os aditivos, sendo este último cada vez mais de maior preferência.

Considera-se o FA como sendo uma das tecnologias fundamentais da quarta revolução industrial e peça chave para o futuro da produção. É uma tecnologia revolucionária e alternativa que possui um enorme potencial de crescimento no atendimento a nichos específicos de mercado e às tendências de customização de produtos.

As primeiras ideias de FA surgiram por volta de 1890 com Joseph Blather que sugeriu um método de camadas sucessivas para fazer um molde para mapas de relevo topográfico. No seu método, as linhas de contorno topográficas foram impressas em placas de cera, que foram cortadas ao longo destas mesmas linhas de contorno, posteriormente empilharam-se as placas umas às outras e suavizaram-se cada uma das camadas, resultando numa superfície tridimensional como reprodução do terreno.

Como o passar dos anos novos processos iam sendo criados até que por volta de 1991 começou-se também a focar-se na melhoria dos processos até então existentes. Estas melhorias cingiam-se principalmente no aumento da velocidade do fabrico das peças e no aumento e diversificação dos materiais utilizados no fabrico das peças (Carreira, 2017).

Para a fabricação de uma peça por FA é necessário que se tenha um modelo tridimensional virtual da peça, que pode ser obtido por *Computer Aided Design* (CAD) ou por reengenharia, isto é, por meio do scaneamento de uma peça já existente. Este ficheiro é de seguida convertido num ficheiro de formato STL (*stereolithography*) que guarda a informação contida no ficheiro CAD na forma de superfícies triangularizadas. Geralmente o ficheiro anterior é transformado num outro ficheiro que contém a informação peça sobre forma de camadas, ou seja, neste ficheiro (SLI) a peça é fatiada (ou laminada) em várias secções bidimensionais de uma determinada espessura. E é a partir deste ficheiro que as máquinas de FA constroem as peças, camada a camada. Após a conclusão da construção por parte da máquina, pode ainda, em algumas vezes, ser necessário um processo de acabamento.

Num processo de FA existe um fluxo de trabalho digital (fluxo de dados), apresentado anteriormente, responsável por gerar as instruções para a máquina de FA, seguido de um fluxo de trabalho físico cuja finalidade é transformar a matéria-prima no produto final. Uma representação de ambos os fluxos, pode ser vista na Figura 1. Novos formatos de ficheiros de softwares têm sido desenvolvidos e padronizados de maneira a dar suporte à preparação de dados e ao fluxo de dados no FA. Um exemplo do trabalho feito neste sentido é o formato AMF que dispõe de um suporte nativo para cores, materiais, treliças (redes ou grades) e constelações, foi padronizado e tem por objetivo a substituição do formato STL (Thompson et al., 2016).

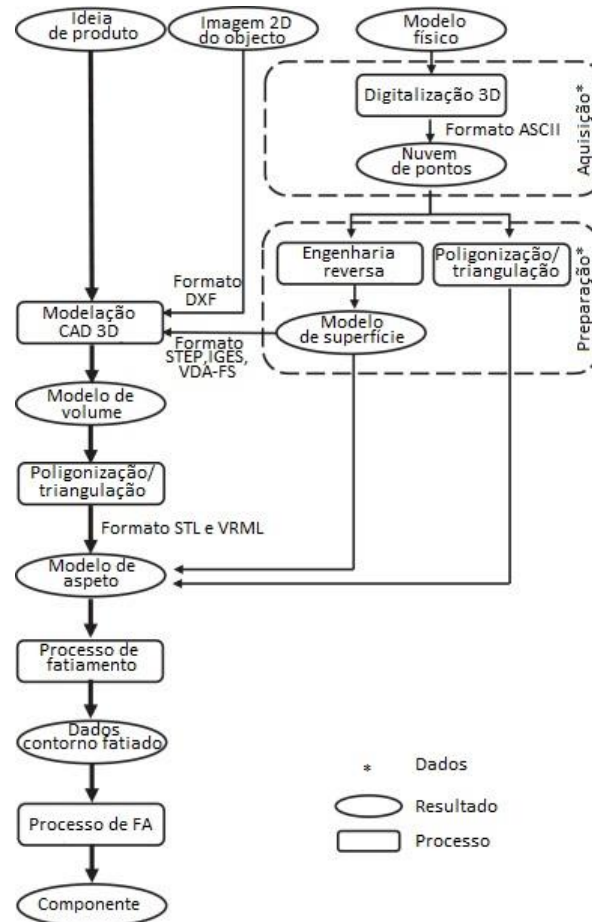


Figura 1 - Esquema representativo dos fluxos de trabalho físico e digital num processo de FA. Adaptado de (Thompson et al., 2016).

A MA engloba um variadíssimo leque de processos e tecnologias que pelos aspetos ligados a peça, se diferenciam umas das outras pelos materiais que podem ser usados, geometrias aplicáveis, precisão geométrica e dimensional e a qualidade final. Os benefícios do FA vão desde a capacidade de produzir protótipos funcionais em tempo reduzido, produção de peças com materiais combinados, maior flexibilidade geométrica das peças, facilidade de customização, é amigo do ambiente, redução de desperdícios. Apesar dos benefícios advindos da MA já citados, existem ainda algumas limitações para este processo produtivo.

## 2.1 Fabrico aditivo vs Fabrico tradicional

Flexibilidade da peça: quando necessário, a MA requer o mínimo de pós processamento e não existem constrangimentos devido a ferramentas, sendo possível obter peças com formas geométricas complexas diferentemente do fabrico tradicional que tende a “sacrificar” a funcionalidade da peça em razão de uma facilidade durante a fabricação da peça. Em MA o custo de peças com complexidade aumentada se mantém, mas aumenta para os processos tradicionais.

Prevenção de resíduos: Pelo facto da peça ser construída por adição de material, os resíduos resultantes deste processo são menores quando comparados aos processos tradicionais em que é necessário a remoção de uma grande quantidade de material durante a maquinagem e também exige o consumo de fluidos de corte ou fluidos de maquinagem que embora seja possível reciclá-los parcialmente, geram desperdícios.

Flexibilidade de produção: O FA requerer um *set-up* menos dispendioso então necessita de ferramental nem acessórios e por esta razão as tecnologias a ele associado são mais económicas e adequadas para produção de pequenos lotes. As propriedades de uma peça não dependem das habilidades do operador, mas sim do processo e da matéria-prima.

Custo de execução do processo: O fabrico tradicional, em sua maioria, precisa de dinheiro e tempo para a preparação de ferramentas, acessórios, moldes, configurar a máquina e mais, o que faz com que o custo de execução por produto seja alto. A ausência de maquinagem e a existência de um ciclo de desenvolvimento de produto mais curto, torna por outro lado, o custo de execução por produto menor num processo de FA.

Probabilidade (chance) de mudança: O desenvolvimento de um novo produto pelos meios tradicionais requer muitos experimentos e conseqüentemente consumo de tempo, o que o torna dispendioso. Contrariamente, o FA garante a possibilidade de design a custo muito reduzido.

Investimento Inicial: O investimento inicial é maior para uma máquina de MA, por causa do alto custo das máquinas e da complexidade de configuração durante a instalação. Porém as máquinas de fabrico tradicional podem ser adquiridas e configuradas a um preço mais reduzido em comparação às de MA.

Produção em massa: O custo inicial para a fabricação de um produto é menor para o FA e quase permanece constante com o aumento do volume de produção. Por outro lado, o custo inicial por via tradicional é muito alto, mas reduz com o aumento do volume de produção atingindo valores inferiores aos do FA. Para uma produção em massa os processos de FA acabam sendo menos eficientes.

Matéria-prima: Embora muitos avanços têm sido alcançados na MA e tem se tornado possível fabricar peças com diversos materiais, incluindo componentes metálicos, ainda existem ligas com as quais não se consegue trabalhar e/ou que resultam em péssimas características (propriedades) (*Additive Manufacturing: Fundamentals and Advancements - Manu Srivastava, Sandeep Rathee, Sachin Maheshwari, TK Kundra - Google Livros, 2019*).

As tecnologias de fabrico aditivo foram maioritariamente desenvolvidas por empresas e a grande aceleração da exploração e do desenvolvimento e o próprio crescimento dos últimos anos deve-se em muito a expiração de patentes que possibilitaram o posicionamento de novos agentes no mercado.

## 2.2 Processos de fabrico aditivo

Segundo a *American Society for Testing and Materials* (ASTM), na norma ASTM F2792-12<sup>a</sup>, o fabrico aditivo pode ser dividido em sete categorias ou processos que são: Fusão em Cama de Pó (PBF – Powder Bed Fusion), Deposição Direta de Energia (DED – Direct Energy Deposition), Pulverização de Cola (BJ - Binder Jetting), Laminação de Folhas (SL - Sheet Lamination), Fotopolimerização em tanque (Vat Photo Polymerisation), Extrusão de Material (Material Extrusion) e Pulverização de Material (Material Jetting).

Alguns dos processos acima citados reúnem diferentes tecnologias de produção de peças, diferenciando-se umas das outras por algumas das técnicas usadas durante o fabrico e (ou) pelo material a usar.

Passa-se a explicar abaixo os aspetos gerais de cada um dos processos acima citados.

### 2.2.1 Fusão em cama de pó (PBF)

O processo de fusão em cama de pó, é um processo que maturou por um longo período de pesquisa e desenvolvimento industrial, este processo baseia-se no varrimento de um feixe laser ou de eletrões em uma cama de pó fino do material a usar de forma a fundi-lo nas zonas pretendidas. O feixe realiza varrimentos sucessivos correspondentes às várias camadas necessárias à produção do objeto ou peça.

Neste tipo de processo usam-se duas plataformas distintas, uma para o material com o qual se pretende criar a peça, uma espécie de banco ou reservatório de onde é tirado o material que vai sendo passado para a outra plataforma, onde se dá de facto a construção da peça. As novas camadas de material são aplicadas por um rolo ou uma lâmina. Geralmente a altura da camada é inferior à 1mm, este valor é determinado com base nos requisitos de fabrico. Após a conclusão da última camada o pó restante na câmara de construção é removido e a peça é deixada na máquina por um período de tempo a fim de arrefecer e solidificar completamente para uma boa qualidade final da peça.

Algumas máquinas que usam este processo requerem condições de vácuo ou quase vácuo devido a sua fonte de energia térmica (feixe de eletrões). Duas fontes de energia térmica são utilizadas em PBF, o feixe de eletrões e o feixe laser, esta última fonte pode ser usada para sinterizar apenas, como por exemplo, é caso das tecnologias *Selective Laser Sintering* (SLS) e o *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) ou para fundir o material como ocorre na tecnologia *Selective Laser Melting* (SLM). No caso da aplicação de raio laser, é necessário a criação de um ambiente inerte, geralmente preenchendo a câmara de construção com gás argónio. São diversos os materiais que podem ser usados para a construção de peças usando o processo de PBF. Uma figura ilustrativa deste processo pode ser vista abaixo.

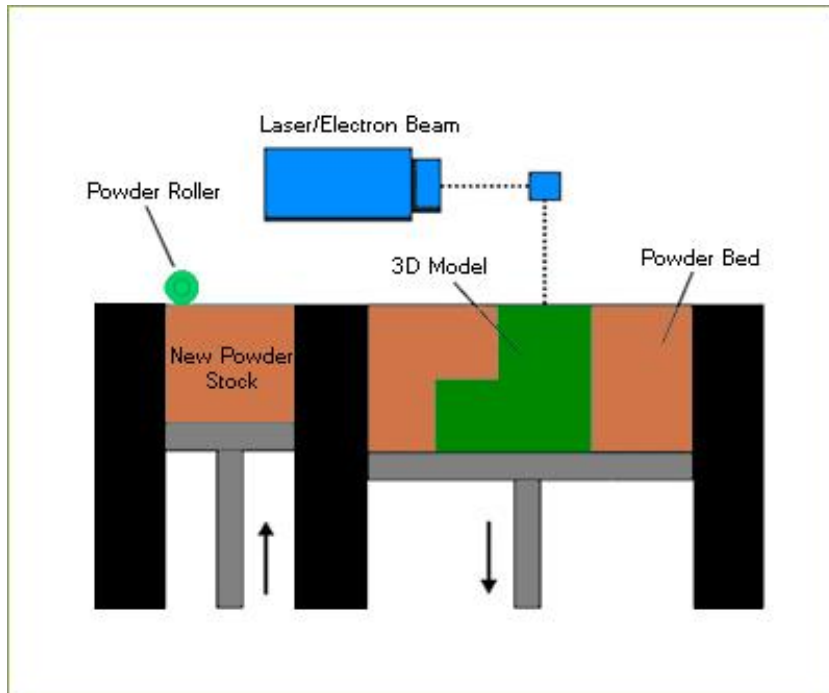


Figura 2 - Esquema representativo de processos de PBF (Nikhil. A, 2017a).

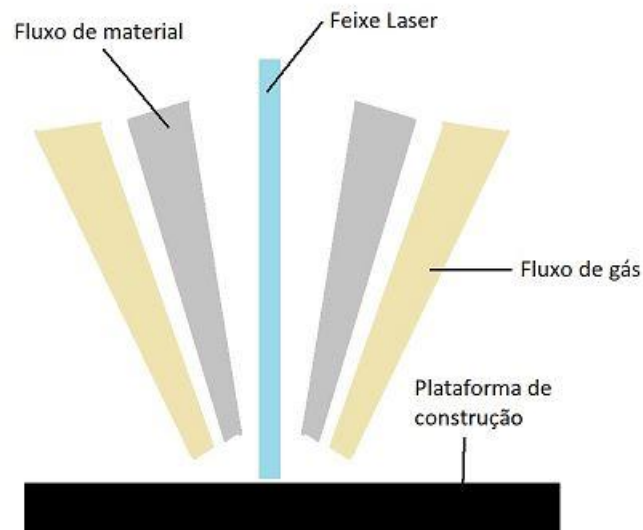
### 2.2.2 Deposição direcionada de energia (DED)

Na deposição direta de energia, diferentemente do processo anteriormente mencionado o material vai sendo depositado a medida que a peça é construída. Neste processo a deposição do material é feita por meio de um ou mais bocais e o mesmo é derretido à medida que é depositado na plataforma em que a peça é construída.

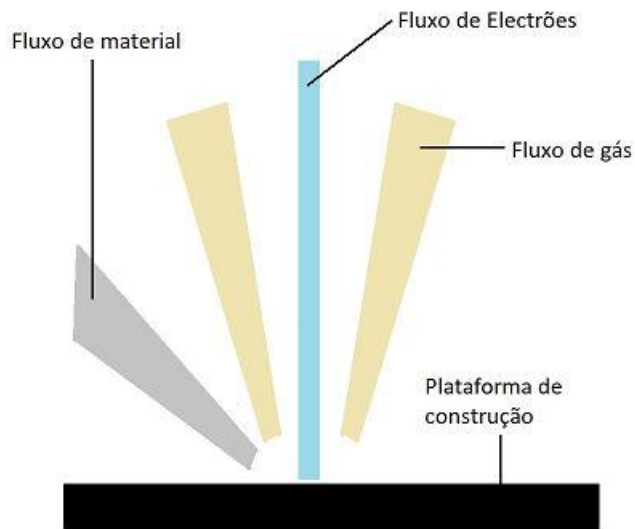
O processo de derretimento do material pode ser feito por meio de um raio laser, feixe de elétrons ou ainda arco de plasma e o material pode ser usado em pó ou em fio.

A incidência do feixe ou arco é feita simultaneamente à um jato de gás inerte que tem a finalidade de cobrir a zona em que o material é fundido, reduzindo assim a taxa de oxidação.

Para além do fabrico de peças novas, uma aplicação muito comum da DED é o reparo de peças e agregação de detalhes em peças. Abaixo apresentam-se figuras que mostram os princípios de funcionamento da DED.



*Figura 3 - Esquema representativo de processos de DED com feixe Laser como fonte de energia.*



*Figura 4- Esquema representativo de processos de DED com feixe de elétrons como fonte de energia.*

### **2.2.3 Pulverização de Cola (BJ)**

Criado na década de 90 por E. Sachs, M. Cima e J. Cornie, no Massachusetts Institute of Technology (MIT) com o nome “Impressão Tridimensional” e tendo por objectivo o fabrico de ferramentas e protótipos funcionais a partir de modelos de computador.

Neste processo são usadas duas plataformas (como nos processos de fusão em cama de pó) a matéria-prima fica num reservatório, que possui uma plataforma com movimento ascendente e é passada camada à camada para a plataforma de construção, onde à medida que cada camada de pó é adicionada um agente ligante, isto é, uma cola é

projetada sobre a camada e este processo é repetido camada por camada até que a peça é (concretizada ou concluída) como se pode ver pela figura abaixo.

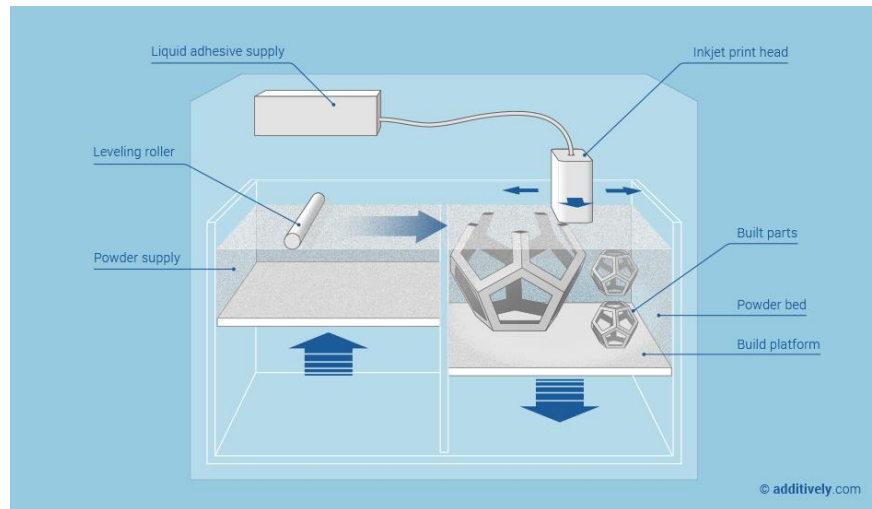


Figura 5 - Esquema representativo de processos de BJ (Prokop, 2017).

## 2.2.4 Laminação de Folhas (SL)

Inventado na década de noventa por M. Feygin, A. Shkolnik, M. Diamond e E. Dvorkiy pela actual Cubic Technologies Inc. o que o torna um dos processos mais antigos de fabrico aditivo. Neste processo folhas da matéria-prima são depositadas numa plataforma onde são posteriormente cortadas para o formato pretendido usando uma lâmina, um feixe laser ou uma tremóia. Um exemplo deste tipo de processo pode ser visto na figura abaixo.

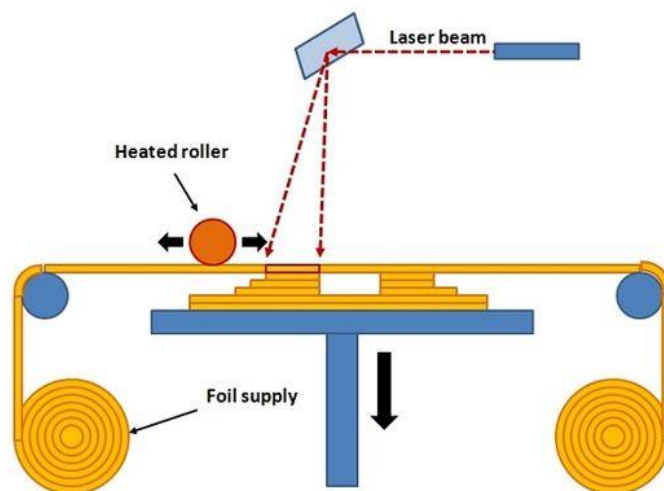


Figura 6 - Esquema representativo de processos de SL (Portela, 2019).

### 2.2.5 Fotopolimerização em tanque (VATP)

Este processo baseia-se na reacção apresentada por alguns polímeros quando expostos à luz, geralmente na faixa visível ou ultravioleta do espectro electromagnético.

Como o nome do processo indica, há um tanque, onde é posta uma resina fotopolimérica, uma plataforma com liberdade de deslocação vertical fica mergulhada nesta resina e sobre esta constrói-se a peça à medida que um feixe de luz é emitido seletivamente sobre a resina que está sobre a plataforma de construção como pode ser observado na figura abaixo. Este processo é comumente denominado estereolitografia (SLA) ou fabrico óptico, porém parte da literatura considera o SLA como uma tecnologia e não um processo. Outra tecnologia de VATP é a *digital light processing* (DLP) que diferente da SLA, não faz um varrimento com feixe laser sobre a resina para construir a camada, mas sim por meio da projecção de luz (visível ou ultravioleta) procede-se a cura de toda a camada de uma só vez, o que o torna mais rápido que o SLA.

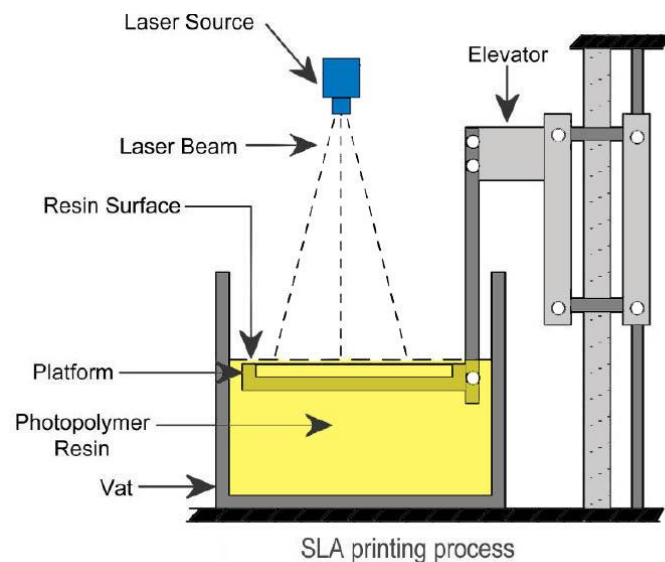


Figura 7 - Esquema representativo de processos de VATP (Nikhil. A, 2017b).

### 2.2.6 Extrusão de Material

O material principal e o material de suporte (quando necessário), são extrudidos por bocais aquecidos e são depositados conforme pretendido na plataforma de produção.

Desenvolvido na década de 80 e comercializado pela Stratasys, este processo é por vezes denominado *Fused Deposition Modeling* (FDM), designação esta que se refere à extrusão de um fundido termoplástico, razão pela qual adota-se muitas vezes a denominação *Fused Filament Fabrication* que é mais genérica, não se restringindo ao processo usando um material específico.

Como mencionado anteriormente, a expiração de várias patentes de tecnologias de AM propiciou o crescimento deste sector de fabrico, isto pôde ver-se na década de 2010 em que as primeiras patentes de tecnologia FDM expiraram impactando fortemente o universo do fabrico aditivo, surgindo um grande número de vendedores e sistemas de extrusão de material.



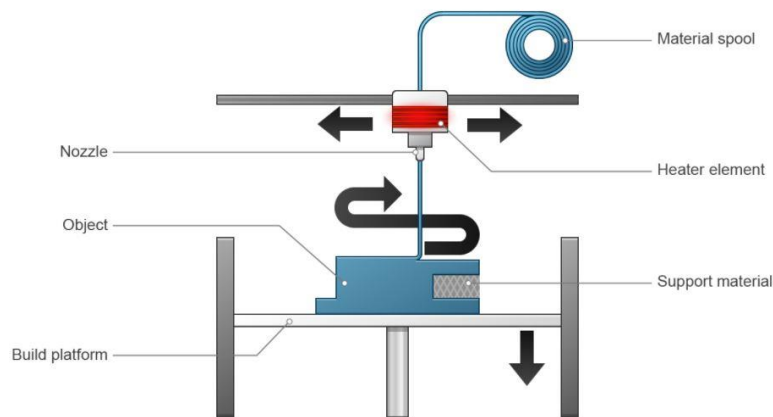


Figura 8 - Esquema representativo de processos de ME (Sagacious IP - Editorial team, 2021).

### 2.2.7 Pulverização de Material (Material Jetting)

Baseado no processo de impressão 2D e muito similar ao processo de pulverização de cola, neste processo são usadas cabeças impressoras para depositar, sobre uma mesa, gotículas de um material líquido foto-curável segundo o padrão desejado e repetidas vezes, camada a camada de forma a obter a peça final. As máquinas de pulverização de material possuem no mínimo duas cabeças impressoras (ou dispensadoras), uma para o material da peça e outra para o material de suporte, podendo possuir mais bocais, e assim sendo, mais de um material podem ser usados neste processo e o material pode ser trocado durante o processo de construção da peça. Uma máquina com várias dispensadoras permite que sejam obtidas peças compostas por mais de um material. A pulverização de material começou a ser comercializada pela introdução da máquina Polyjet.

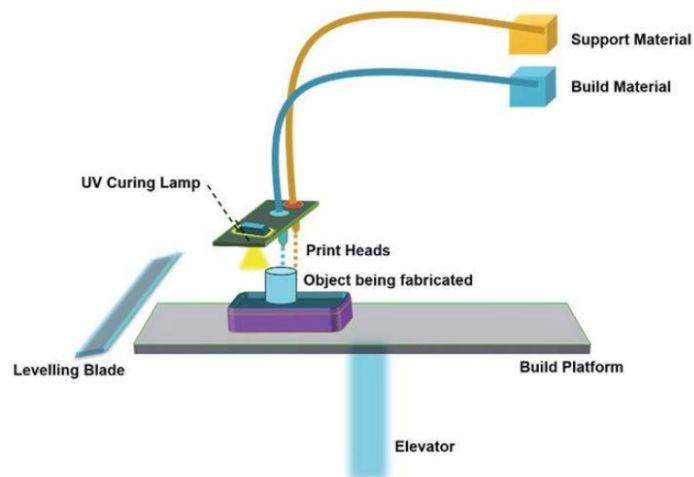


Figura 9 - Esquema representativo de processos de MJ (Sireesha et al., 2018).

A seguir apresenta-se a Tabela 1 com um resumo dos processos de fabrico descritos acima relacionando-os à respetivas matérias-primas, tecnologias de fabrico, vantagens e desvantagens.

*Tabela 1- Resumo dos sete processos de FA, breve descrição, vantagens, desvantagens, exemplos de materiais usados e algumas empresas. Adaptado de (Srinivasulu Reddy & Dufera, 2016; Tofail et al., 2018).*

Processo	Breve descrição	Tecnologia	Material	Vantagens	Desvantagens	Empresas criadoras (surgimento)
PBF	Faz-se uso de energia térmica para a fusão selectiva de determinadas regiões da cama de pó	Selective laser sintering (SLS); Direct metal laser sintering (DMLS); Selective heat sintering (SHS); Selective laser melting (SLM); Electron beam melting (EBM)	Metais; Polímeros; Cerâmicos; Compósitos; Híbridos	Custo relativamente baixo; Baixo impacto ecológico; Cama de pó funciona como estrutura de suporte; Vasto leque de opções de material	Processo relativamente lento; Falta de integridade estrutural; Limitações de tamanho; Necessidade de alta potência; Acabamento dependente do tamanho do pó	EOS (DEU); 3DSystems (USA); Arcam (SWE)
DED	Faz-se uso da energia térmica para fundir o material a medida que o mesmo é depositado sobre a plataforma	Laser deposition (LD); Laser engineered netshaping (LENS); Electron beam; Plasma arc melting	Metais; Híbridos; Polímeros; Cerâmicos	Alto controlo da estrutura do granulado; Peças de alta qualidade; Excelente para reparações de peças	Necessário equilíbrio entre a qualidade de superfície e velocidade de impressão; Limitado para metais e híbridos à base de metal	Optomec (USA); POM (USA)
BJ	Faz-se uso da pulverização de um elemento ligante em determinadas regiões e da ssobreposição de pó do material	Powder bed and inkjet Head (PBIH); 3D inkjet	Metais; Polímeros; Cerâmicos; Compósitos; Híbridos	Não necessita de substrato; Liberdade de design; Grande volume de construção; Alta velocidade de impressão; Custo relativamente baixo	Peças frágeis com propriedades mecânicas limitadas; Pode necessitar de pós-processamento	3DSystems (USA); ExOne (USA); PolyPico(IREL) ; Z-Corporation (USA)

SL	Faz-se uso da aplicação de um elemento ligante e da sobreposição de folhas do material	Laminated object manufacturing (LOM); Ultrasonic additive manufacturing (UAM); Ultrasonic consolidation (UC)	Metais; Polímeros; Cerâmicos; Híbridos	Alta cadência de produção; Baixo custo; Facilidade de manuseio dos materiais	Robustez e integridade das peças dependentes do adesivo utilizado; Pode ser necessário pós-processamento para o acabamento; Uso limitado de materiais	Fabrisonic (USA); Mcor (IRL)
VAT P	Faz-se uso de uma luz de forma a curar, em tanque, uma resina fotossensível	Stereo lithography (SL); Digital light processing (DLP);	Polímeros; Cerâmicos	Fabrico de peças grandes; Excelente precisão; Excelente acabamento superficial e detalhes	Limitado aos fotopolímeros; Reduzida vida útil; Baixas propriedades mecânicas dos fotopolímeros; Precursores onerosos; Processo de construção lento	Lithoz (AUT); 3D Ceram (FRA)
ME	Faz-se a extrusão selectiva de um filamento do material	Fused deposition modeling (FDM); Fused filament fabrication (FFF); Fused layer modeling (FLM)	Polímeros; Compósitos	Uso generalizado; Económico; Escalável; Permite a construção de peças totalmente funcionais	Anisotropia vertical; Superfície estruturada em degraus; Desfavorável à finos detalhes	Stratasys (ISR); Bits from Bytes (GBR)
MJ	Faz-se uso de uma cabeça de impressão para depositar gotículas do material sobre a plataforma	3D inkjet technology; Direct ink writing (DIW); Multi-jet modelling (MJM)	Polímeros; Cerâmicos; Compósitos; Híbridos; Biológicos	Alta precisão ao depositar a gotícula; Desperdício reduzido; Permite obter peça multi-material; Permite peças multicolor	Requer frequentemente material de suporte; Podem ser usados maioritariamente fotopolímeros e resinas termofixas	Objet (Israel); 3DSystems (USA); Stratasys (USA); Polypico (IRL); 3Dinks (USA); WASP (ITA)

Com base na tabela acima é possível concluir que apenas os processos PBF, DED, BJ e SL, podem ser, ou então, são usados para o FA de peças em metal que é o material de excelência do trabalho em curso. Dentre os processos acima citados, far-se-á a revisão bibliográfica dos processos DED, PBF e BJ.

No presente trabalho pretende fazer-se o estudo do processo binder jetting (BJ) aplicado a construção de peças metálicas. A aplicação do BJ na produção de peças metálicas é um tanto quanto recente e por isso este estudo visa avaliar as capacidades do mesmo.

### 2.3 Deposição direcionada de energia (DED)

Desenvolvida em 1997 na *Johns Hopkins University* por Frank Arcella (Molitch-Hou, 2018). A deposição direta de energia é o nome dado ao grupo que compreende as tecnologias de FA que fazem a adição ou deposição de material juntamente com uma fonte de calor, podendo a fonte de calor ser um feixe laser, um feixe de elétrons ou um arco de plasma. A matéria-prima pode ser usada em pó ou fio (Sing et al., 2019). A DED permite a criação de peças por meio da fundição do material, esteja este em forma de pó ou em forma de fio, usando uma fonte de energia focada à medida que este é depositado sobre a superfície por meio de um bocal.

Apesar de ser possível a construção de peças completas usando tecnologias de DED e destas terem revelado um grande potencial para a construção de peças de grande dimensão, este uso não é tão comum, estas tecnologias são aplicadas principalmente para melhorar a resistência ao desgaste, ao impacto e à corrosão de componentes mecânicos. São também, geralmente aplicadas para a reparação de componentes de alto-valor desgastados ou danificados e para adição de material sobre peças já existentes. Quando combinado com a maquinagem CNC em uma única máquina, a DED se torna numa tecnologia poderosa para obter peças com acabamentos precisos (Palmero & Bollero, 2020; Yusuf & Gao, 2017).

A DED é baseada na tecnologia de soldadura convencional. Segundo o formato do material utilizado a DED pode ser dividida em tecnologias alimentadas por:

- Pó – Laser Engineered Net Shaping (LENS), Laser Metal Deposition (LMD), Direct Metal Deposition (DMD), Laser Direct Metal Deposition (LDMD), Shaped Metal Deposition (SMD).
- Fio – Wire and Arc Additive Manufacturing WAAM.

Quanto ao tipo de fonte de energia à ser usada, embora seja mais comum o uso de fonte de calor, compreendendo o feixe laser, plasma, feixe de elétrons e arco elétrico; também é usada energia cinética, frequentemente referido como *Cold Spray* onde se faz o uso de um bocal convergente-divergente para acelerar partículas micrométricas para velocidades supersônicas fazendo-as aderir adesivamente ao substrato e acumular o material na forma de um revestimento (Dass & Moridi, 2019).

Para evitar a oxidação do material fundido, torna-se necessário a criação de um ambiente adequado para a DED. Três tipos de ambiente são geralmente usados na DED, estes ambientes são: o vácuo, proteção local e gás inerte.

Numa máquina de DED o substrato pode ser montado em uma de duas configurações possíveis, sendo estas:

- Sistema de 3 eixos – O substrato é montado e permanece estacionário nesta posição.

- Sistema de 5 ou 6 eixos – Esta configuração de montagem permite movimentar o substrato enquanto a matéria-prima é depositada. Esta configuração possibilita a produção de geometrias mais complexas.

### **2.3.1 Parâmetros**

Segundo Dass & Moridi, 2019, em seus trabalhos em que se objetivava a criação de mapas de processos eficientes para o processo DED, capazes de fornecer uma visão geral dos parâmetros do processo os parâmetros mais relevantes num processo de DED à laser (L\_DED) são os seguintes: A potência do laser, o tamanho do ponto do raio laser, taxa de alimentação da matéria-prima, velocidade de scaneamento, taxa de fluxo do gás transportador, ângulo da “ligação”, propriedades da matéria-prima e a dimensão da camada.

### **2.3.2 Materiais**

Embora a DED possa ser usada para materiais, não metálicos, é predominantemente usada para trabalhar com uma grande variedade de metais e de ligas metálicas. Os materiais mais frequentemente usados na DED são o titânio, alumínio, aço inoxidável e cobre (Palmero & Bollero, 2020).

## **2.4 Sintering laser melting (SLM)**

Desenvolvida por Dr. M. Fockelee o Dr. D. Schwarze da F&S Stereolithographietechnik GmbH, com os Doutores W. Meiners, K. Wissenbach e G. Andres da Fraunhofer ILT para a produção de componentes metálicos a partir do pó metálico (Yap et al., 2015).

Esta tecnologia consiste numa câmara de construção que deve ser preenchida com os grânulos do material a usar e uma unidade de scaneamento à laser por cima desta, que serve para dar forma a peça. O fundo da câmara é feito como um pistão móvel de forma a permitir o ajuste da sua altura. O topo da cama de pó sobre a câmara de construção representa a área de construção sobre qual a camada é construída ou feita. A câmara de construção é pré aquecida objetivando a minimização da potência laser necessária e ainda envolvida por um escudo de gás, geralmente argônio ou nitrogênio, para prevenir a oxidação do material.

O SLM foi desenvolvido particularmente para a obtenção de peças metálicas de elevada densidade (>99%). A produção de uma peça por SLM cumpre um conjunto de etapas desde a elaboração de ficheiro CAD à remoção da peça da plataforma de construção. Antes do ficheiro CAD ser submetido na máquina para que se dê início à construção, devem ser gerados dados de fatias (slice), para o scaneamento laser de cada camada, e estruturas de suportes, por meio de softwares próprios para este fim (SLM materials and applications). Camada à camada o feixe laser faz os contornos da peça. O pó é localmente, isto é, seletivamente fundido. A geometria do ponto de fusão é definida pelo diâmetro do feixe e a sua velocidade. O material fundido solidifica-se por condução térmica para o pó ao redor e assim é alcançada uma camada sólida.

Após a solidificação de uma camada, faz-se descer a plataforma de construção o equivalente à espessura de uma camada e o espaço que emerge decorrente da deslocação da plataforma é preenchido com pó retirado da câmara de alimentação. Para fazer passar o pó de uma câmara para outra usa-se geralmente um rolo que roda no

sentido anti-horário ao seu movimento linear de modo a distribuir uniformemente o pó. este processo denomina-se recobrimento.

Após o recobrimento reinicia-se o processo de construção e faz-se a nova camada e desta forma dá-se camada à camada a construção da peça na sua totalidade. Na maioria das vezes a camada do topo da peça é feita por um método de scaneamento diferente visando o melhoramento da sua solidez.

Após a construção do topo, toda peça e o pó ao redor é coberto por algumas camadas de pó para arrefecer toda a zona envolvendo a peça, também denominada *powder cake* antes de removê-la da plataforma. Este arrefecimento pode ser feito na câmara de construção ou em outra câmara, esta última hipótese concede celeridade numa cadência de produção por permitir que se inicie (na câmara de construção) a construção de uma nova peça enquanto a outra arrefece.

Geralmente é necessária remoção mecânica para extrair a peça da base (plataforma) e também para a extração dos suportes usados para a construção da peça, o que demanda tempo e habilidades manuais. Em alguns casos a remoção também pode ser feita usando EDM ( *electrical discharge machining*).

O SLM também é denominado em algumas bibliografias por *Selective Laser Cusing* – SLC, sendo *cusing* um acrônimo de *cladding* e *fusing* (Ghehardt et al).

Segundo a literatura o SLM é capaz de derreter completamente o material (em pó), produzindo assim componentes ou peças *near net-shape* (NNS), não necessitando de pós-processamento senão para remoção da peça e dos suportes. A tecnologia SLM atual proporciona melhorias, na qualidade do produto, no tempo de processamento e na confiabilidade de fabrico quando comparado às tecnologias de AM de sinterização a laser à base de ligantes. Na Tabela 2 apresentam-se algumas das vantagens e desvantagens (ou limitações) do SLM.

*Tabela 2 - Vantagens e desvantagens do SLM (ADDISPACE, 2021; Materials Used in Selective Laser Melting (SLM), 2021; Yap et al., 2015).*

Vantagens	Desvantagens
Alta precisão	Maior precisão implica necessidade de processo mais demorado
Funcionalidade da peça	Alto grau de rugosidade superficial e alto grau de estresse residual
Mínimo pós-processamento (quando necessário)	Propriedades anisotrópicas
Variedade de materiais (alguns em desenvolvimento)	Deficiência de controlo de qualidade on-line
Criação de peças complexas	Custo elevado dos materiais e equipamentos
Estruturação de superfície (incluindo micro e nano-estruturação)	Necessidade de suprimento de gás inerte
Alta reciclabilidade da matéria-prima	Dificuldade de remoção do pó de canais pequenos

### 2.4.1 Parâmetros

Existem mais de 50 parâmetros diferentes de processo na tecnologia SLM que impactam, isto é, influenciam a qualidade última da peça final, causando assim um desafio significativo na compreensão da física do processo e no desenvolvimento de uma estratégia efetiva de controle do processo. Em termos gerais, estes parâmetros podem ser agrupados em quatro categorias, sendo estas: 1 – Parâmetros do laser e scaneamento, 2 – Propriedades do material (pó), 3 – Parâmetros das propriedades da cama de pó e do recobrimento e 4 – Parâmetros do ambiente de construção (Spears & Gold, 2016).

Segundo Rehme, 2010, cento e cinquenta e sete diferentes parâmetros de influência sobre o processo de obtenção de uma peça por SLM foram distinguidos levando em conta a influência do(a):

- Operador;
- Preparação do processo;
- Geometria da peça;
- Representação de dados da geometria;
- Propriedade da matéria-prima;
- Sistema LFF (máquina de SLM neste diagrama);
- Processo
- Pós-processamento.

Juntos, estes 157 parâmetros influenciam tanto na qualidade final da peça quanto no tempo e no custo de fabrico.

A qualidade de uma peça produzida por SLM depende fortemente da matéria-prima, envolvendo as propriedades físicas e geométricas (distribuição na dimensão das partículas) e dos parâmetros do processo de fabricação, que envolvem potência do laser, velocidade de varrimento, trajetórias do laser, distância entre varrimento, a temperatura da plataforma e a composição da atmosfera de construção (Machado & Vieira, 2014; Marques et al., 2015).

Os parâmetros deste processo, tais como a potência do feixe laser, a velocidade de scaneamento, distância entre feixes e a espessura da camada são ajustados de forma que um vetor de fusão possa fundir completamente com os vetores de fusão vizinhos e com a camada anterior.

A espessura da camada varia normalmente entre 20 e 100  $\mu\text{m}$ , neste intervalo é possível balancear entre a obtenção de uma boa resolução e a obtenção da boa fluidez do pó. Os pós com grânulos maiores resultam em baixa resolução e baixa tolerância de construção enquanto grânulos menores tendem a aglomerar-se com maior facilidade devido a força de Van der Waals o que resulta em baixa fluidez.

### 2.4.2 Materiais

Uma vasta gama de materiais metálicos está disponível para uso como matéria-prima de construção de peças quando se trata da tecnologia SLM, aço carbono, aço inoxidável, titânio, alumínio, tungstênio, cobre, cobalto, ouro e ligas são alguns exemplos. Os materiais mais usados em SLM são (*Materials Used in Selective Laser Melting (SLM)*, 2021):

- Ligas de aço;
- Ligas ferrosas;
- Ligas de titânio;

- Ligas de alumínio;
- Alumina;
- Carboneto de silício;
- Zircônio estabilizada com ítria.

A seguir, na Tabela 3 apresenta-se uma visão geral dos pós metálicos mais comuns usados em SLM e algumas das suas aplicações.

*Tabela 3- Materiais, propriedades e aplicações (ADDISPACE, 2021; Materials Used in Selective Laser Melting (SLM), 2021).*

Material	Propriedades	Aplicações
Ligas de aço e ligas ferrosas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta resistência à corrosão</li> <li>• Elevada resistência (menor maleabilidade)</li> <li>• Rugosidade superficial</li> <li>• densidade relativa acima de (&gt;90%)</li> <li>• Microdureza</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Médica e biomédica (implantes e produtos ortodônticos)</li> <li>• Permutadores de calor</li> <li>• Estruturas leves (estruturas favo de mel ou ninhos de abelha)</li> <li>• Elementos de filtro</li> </ul>
Ligas de titânio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta densidade relativa (&gt;98%)</li> <li>• Força de corte superior</li> <li>• Rugosidade superficial</li> <li>• Baixa porosidade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Médica (implantes dentários e próteses)</li> <li>• Estruturas leves</li> </ul>
Ligas de níquel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistência à altas temperaturas</li> <li>• Resistência à fadiga</li> <li>• Excelente resistência à corrosão</li> <li>• Resistência ao desgaste</li> <li>• Boa soldabilidade</li> <li>• Densidade relativa (<math>\approx</math>100%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Motores de aeronaves</li> <li>• Câmaras de combustão</li> <li>• Matriz de moldes para engrenagens cónicas</li> <li>• Meios de filtração porosos</li> </ul>
Ligas de alumínio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propriedades mecânicas atrativas</li> <li>• Estruturas leves</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automotiva</li> <li>• Aeroespacial</li> <li>• Bens de consumo</li> </ul>
Ligas crômio-cobalto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta dureza</li> <li>• Alta resistência ao desgaste</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biomédica (implantes)</li> <li>• Odontologia</li> </ul>



	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Boa resistência à corrosão</li> <li>• Propriedades mecânicas adequadas</li> <li>• Biocompatível</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicações sobre alta temperatura</li> </ul>
Outros metais (alumínio, cobre, magnésio, tungstênio, prata, ouro, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta densidade relativa do alumínio (&gt;96%) e outros metais (82%-85%)</li> <li>• Elevada resistência do alumínio</li> <li>• Aumento da dureza com a adição de pó de cobre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biomédica e odontológica (coroas e pontes)</li> <li>• Permutadores de calor</li> <li>• Peças de automóveis</li> <li>• Jóias</li> </ul>

## 2.5 Binder jetting

O processo BJ foi desenvolvido e registado pelo MIT em 1993, também denominado *Powder Binder Bonding* e originalmente *Three-Dimensional Printing* – 3DP, este processo pertence à família de processos Gota sobre Pó (Drop on Powder). Hoje existem disponíveis tecnologias de BJ para trabalhar com plásticos, metais e cerâmicos. Boa parte delas são tecnologias de dois passos, necessitando um procedimento de infiltração depois da construção da peça. Geralmente as que trabalham com metais produzem uma espécie de peça verde que deve passar por um processo térmico de descolagem (*debinding*) e sinterização para que esta atinja as suas propriedades finais.

A máquina de BJ possui uma estrutura parcialmente semelhante à de máquinas de PBF, por exemplo à da máquina SLM, possuindo uma câmara de construção, uma câmara de armazenamento de pó, um rolo para o recobrimento e possui um pistão ligado as plataformas localizadas nas câmaras que serve para movê-las na direção do eixo z durante a construção da peça. A tecnologia de BJ possui uma plotadora semelhante as que já eram usadas nas impressoras 2D comuns, que são montadas por cima da área de construção e que se movem sobre esta mesma área enquanto projeta a cola no pó de acordo com o contorno da peça que deve ser feito sobre a camada (Gebhardt, 2011). As partículas da matéria-prima sobre as quais se projeta a cola, são ligadas enquanto o pó solto suporta a peça. Diferente das tecnologias de PBF esta não requer nem pré-aquecimento nem escudo de gás.

Tal como se dá com a maior parte dos processos de MA a medida que uma camada da peça é concluída, isto é, quando o contorno da peça de uma camada se solidifica, o pistão baixa e conseqüentemente a plataforma de construção, na medida da altura de uma camada e faz-se o recobrimento da plataforma de construção com o pó da câmara de alimentação ou armazenamento por meio de uma lâmina ou rolo.

Ainda nos primeiros anos do surgimento deste processo, três empresas sendo estas a Z-Corporation, a Prometal e a Voxeljet, desenvolveram as suas tecnologias abarcando materiais diferentes.

Quando o BJ é usado para a produção de peças metálicas, estas geralmente têm de passar por algumas etapas, de pós-processamento, uma vez que após a “impressão” as peças estão “verdes”, isto é, não se encontram no seu estado final, possuindo baixas propriedades mecânicas e são normalmente pouco resistentes e frágeis. A fase de pós-processamento dá-se após a impressão da peça, ou seja, é o conjunto de etapas por qual a peça verde passa até culminar na peça final. Esta fase visa fortalecer a peça e compreende, entre outras, a fase da cura, sinterização, infiltração, acabamento. Na figura abaixo é apresentado um esquema do fluxo característico do BJ.

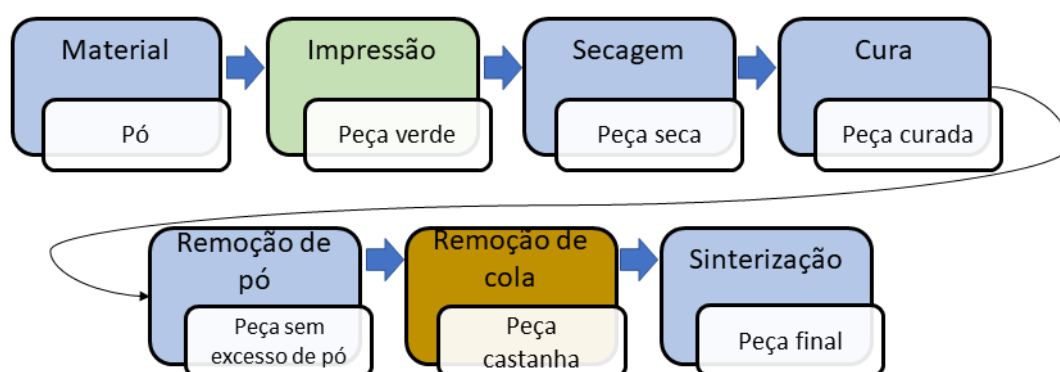


Figura 10 - Fluxo do processo BJ.

### 2.5.1 Sinterização

A peça resultante da impressão é geralmente de baixa densidade e baixa resistência mecânica, sendo necessário proceder à sua densificação e o aperfeiçoamento das suas propriedades mecânicas.

A sinterização é um processo térmico que visa exatamente densificar e fortalecer a peça verde pela transformação de pontes químicas em ligações mecânicas.

Os mecanismos de sinterização são divididos em dois grupos, sendo estes os não-densificantes e os densificantes. Os mecanismos densificantes são dominantes para altas temperaturas enquanto à baixas temperaturas as não-densificantes predominam.

A sinterização é dividida em três fases, inicial, intermédia e final. A inicial, dá-se à baixas temperaturas e portanto, é predominantemente composta por mecanismos não-densificantes. A fase intermédia ocorre à uma temperatura mais elevada em relação à fase anterior, aumenta-se a temperatura até um limite que depende do material. Nesta fase os poros maiores da peça unem-se à outros ganhando uma forma tubular ao passo que os poros menores são gradativamente eliminados. A fase final é onde se pode alcançar a maior densificação possível da peça, onde os poros são isolados e eliminados, caso as condições de sinterização permitam, esta fase se inicia num intervalo de temperatura similar ao da fase intermédia. Ao elevar a temperatura do material até o ponto da coexistência das fases sólida e líquida (mistura bifásica) ocorre a chamada sinterização de fase líquida super-sólida (*SLPS – Supersolidus Liquidus Phase Sintering*) que pode favorecer a densificação, contudo propiciar distorções na peça (Li et al., 2020).

Durante a sinterização, além da densificação, ocorre na peça um encolhimento que varia entre 15% a 20% da peça, valor este que depende da densidade da peça verde. Teoricamente para se obter uma densificação efetiva, a peça verde deveria possuir densidade superior a 50% (Ziaee & Crane, 2019) porém a maior parte da matéria prima usada em MBJ afasta-se do modelo ideal, não sendo esférico nem de tamanho único. Partículas menores apresentam geralmente melhor densificação, podendo-se, para partículas suficientemente pequenas atingir a densidade total, isto é, 99% da teórica.

Segundo Li et al., (2020), os parâmetros de sinterização são pó-dependentes e os mesmos são definidos pela composição e granulometria do material e também pela compactação do pó. Os parâmetros críticos de sinterização são a temperatura e o tempo de sinterização, sendo a temperatura o parâmetro mais relevante.

Frequentemente as etapas de remoção de cola (*debinding*) e sinterização são unificadas de forma que em apenas um tratamento térmico faz-se a extração da cola e densifica-se a peça.

Tanto a sinterização quanto o *debinding* são feitos em ambiente controlado (vácuo) ou em atmosfera protetora (argônio ou uma mistura de hidrogênio e argônio) para evitar a oxidação do material.

A sinterização é uma das etapas mais relevantes no que concerne a conferir robustez à peça, porém também é uma das que mais influência têm sobre a qualidade dimensional e geométrica da peça final.

## **2.5.2 Parâmetros**

São vários os parâmetros e variáveis do processo de binder jetting que afetam a qualidade e as propriedades das peças finais. Estes parâmetros são divididos em quatro categorias que são: Projeto da peça, propriedades do material (inclui o pó e a cola), a capacidade da máquina e parâmetros de processo. Estas categorias não são completamente independentes, uma vez que alguns dos parâmetros podem pertencer a mais de uma categoria.

Os parâmetros relacionados ao material de construção da peça são: A compressão das partículas, a resistência do material cru, distribuição de tamanho das partículas, capacidade de fluxo do pó e a capacidade de molhar (umedecer) o pó.

Os parâmetros referentes ao elemento aglutinante são: Número de *Ohnesorge*, saturação de impressão e o tamanho dos poros.

Em relação à máquina, os seguintes parâmetros são conhecidos: Espessura da camada, configuração do nível de saturação da cola, orientação (direção) de construção, método de geração da gota (Dini et al., 2019).

### **2.5.2.1 Espessura da camada**

A espessura da camada é considerada com sendo a altura da cama de pó onde se efetua a construção ao longo do eixo Z. A espessura aplicável pode variar de uma máquina para outra, depende das características e limitações de cada uma, mas depende ainda do tamanho do grânulo da matéria-prima. Melhores resoluções são atingidas para espessura de camada menores, porém uma espessura de camada menor resulta na necessidade de mais fatias, no aumento do volume de dados, aumenta o tempo de processamento de dados e por consequência o tempo de construção.

Segundo Vaezi & Chua, 2011, dos vários fatores que influenciam quer sejam as propriedades mecânicas da peça quer seja a sua qualidade final, a espessura da camada é um dos que maior efeito tem sobre a peça e que facilmente pode ser ajustado e controlado. A espessura da camada é um dos principais fatores que exercem influência sobre a densidade da cama de pó (PBD), que por meio de simulações de método de elementos discretos (DEM) se verificou que a redução da espessura da camada resulta numa cama de pó mais macia (lisa) e mais densa (Li et al., 2020).

### 2.5.2.2 Tamanho da gota e configuração do nível de saturação da cola

Como já foi mencionado, na construção de peças pelo processo de BJ usam-se dois tipos de matéria-prima, uma matéria sólida em pó com que se pretende fazer a peça e uma matéria líquida, o aglutinante, com que se pretende ligar os grânulos de modo a dar a forma desejada à peça. Esta última deve possuir baixa viscosidade e a tensão superficial que for necessária.

O tamanho da gota (da cola) também exerce considerável efeito sobre a qualidade superficial, precisão, todavia refere-se em Vaezi & Chua (2011) que gotas menores são mais sensíveis a perturbações e que por esta razão a qualidade e precisão do BJ não seria melhorado pelo emprego de gotas de menor tamanho. Contudo uma maior velocidade de gotejamento melhora o processo de pulverização da cola sobre a superfície do pó. Estudos indicam que uma combinação entre o nível de saturação da cola e a já mencionada espessura da camada desempenham um papel significativo no processo de BJ, especialmente para propriedades da peça como resistência, integridade e também na precisão dimensional.

O nível de saturação da cola é uma medida da infiltração da cola quando esta está filtrando. A configuração padrão é cem por cento. O nível de saturação da cola, tal como a espessura da camada, é um dos parâmetros que mais influência tem sobre a resistência e a qualidade final da peça, e do mesmo modo é possível facilmente ajustar e controlar este parâmetro. Estes dois parâmetros combinados têm um efeito significativo na resistência mecânica, integridade, qualidade superficial e precisão dimensional.

Estudos do efeito destes dois parâmetros mostraram que para uma mesma espessura de camada, o aumento do nível de saturação resultaria no aumento da resistência à tração e à flexão e na diminuição da precisão dimensional e da uniformidade superficial da peça. O mesmo estudo mostrou que para um mesmo nível de saturação da cola, um aumento da espessura da camada culminaria na redução da resistência à tração, porém no aumento da resistência à flexão e melhoria da uniformidade superficial (Vaezi & Chua, 2011). Variações na resistência à tração de 34,7% para uma espessura de camada de 0,1mm e 36% para 0,087mm foram alcançadas ao aumentar-se o nível de saturação da cola de 90% para 125% respetivamente.

Ao trabalhar com uma liga TiNiHf, Lu & Reynolds (2008) observaram que para uma mesma espessura de camada, a espessura do fio construído era cada vez mais grosso, o que se atribui ao efeito que o nível de saturação da cola tem sobre a distância de espalhamento da cola. Quanto maior é o nível de saturação da cola, maior é a distância de espalhamento da mesma.

No concernente aos métodos de geração da gota, atualmente existem pelo menos três mecanismos usados pelos geradores de gotas comerciais necessários para as impressoras, sendo estes o *continuous inkjet printing* (CIJ), *drop-on-demand inkjet printing* (DOD) e *electrostatic inkjet* (EIJ). Cada uma destas técnicas possui requisitos específicos para as propriedades físicas da gota e uma gama de valores para o tamanho das gotas (Dini et al., 2019).

### **2.5.2.3 Orientação de construção**

A orientação de construção influencia a precisão do formato da peça final. Durante esforços empreendidos para elevar a resolução da “impressão” verificou-se que quando a plataforma de construção está paralela à “impressão”, há a possibilidade de se criar canais longos e a precisão da forma da peça final aumenta (Dini et al., 2019), porém muito pesquisa ainda é necessária a fim de se chegar a conclusões da real influência da orientação de construção sobre a peça final.

Os fatores associados a matéria-prima como o tamanho do grânulo, composição do material, e distribuição de tamanho do pó são de extrema importância. Estudos já foram feitos com intuito de avaliar a influência destes sobre a qualidade final da peça. Foi possível, por meio destes estudos, perceber que alguns destes parâmetros se sobrepõem à outros, sendo necessário atentar-se especialmente à estes.

### **2.5.2.4 Tamanho do pó**

Ao analisar o impacto do tamanho do pó sobre a qualidade da peça final Miyajima et al., demonstra que o uso de pós finos apresentam aspectos positivos como: 1 – Melhoria em relação a rugosidade da peça; 2 – Superfície da cama de pó mais lisa; 3 – A possibilidade do uso de camadas de espessuras menores, porém admite também ser trabalhoso o recobrimento e espalhamento de pós finos uma vez que partículas finas apresentam maior força de coesão resultando em menor capacidade de fluxo e absorvem umidade muito fácil e rapidamente favorecendo o surgimento de aglomerações e impedindo assim o espalhamento e cobertura uniforme da camada seguinte, reduzindo ainda a compactação da cama de pó. Algumas das constatações feitas por análise comparativa das peças produzidas em cobre puro usando diferentes gamas de pós, foram as seguintes: Peças produzidas com pó fino tiveram a sua densidade sinterizada melhorada em relação à peça construída com pó grosseiro; O uso de pó fino resultou em valores superiores de tensão de ruptura; O uso de pó fino resultou em peças com propriedades melhores do que as peças produzidas usando pó bimodal.

Os desafios inerentes a utilização de pós finos, como os já mencionados e o seu custo tornam o emprego de pós bimodais para a construção de peças por BJ uma opção bastante boa. Diferente dos pós finos, os pós bimodais permitem uma maior compactação da cama de pó ocasionando peças verdes mais densas.

### **2.5.2.5 Misturas bimodais**

Uma teoria muito bem estabelecida para aumentar a compactação do pó e a densidade da peça verde em técnicas de processamento de pó é o uso de misturas bimodais. Pressupunha-se que para o BJ as misturas bimodais de pó tenham um grande potencial para elevar a densidade sinterizada comparando aos pós grosseiros e finos, no entanto a literatura ainda não tinha comprovado a efetividade das misturas bimodais no que concerne a melhoria da densidade sinterizada. Com os pós bimodais é exequível a produção de peças verdes densas, contendo partículas pequenas de alta tensão de sinterização que podem então levar à uma melhor densidade sinterizada (Bai et al., 2017).

Alguns anos depois, em Bai et al., foi possível observar para o cobre, o impacto positivo que as misturas bimodais de pó podem ter sobre a densidade sinterizada. Neste experimento constatou-se que com a aplicação de misturas bimodais alcançou-se: um aumento de 15% na capacidade de fluxo do pó, atingiu-se um aumento na densidade da cama de pó de 16,2% e observou-se um incremento na ordem dos 13% em relação a

densidade sinterizada. O acréscimo na densidade sinterizada mostrou-se dependente das condições de sinterização e alcançável quando a distribuição da mistura não altera o tamanho médio das partículas, verificou-se também que este incremento não está diretamente ligado à densidade da cama de pó, visto que embora se tenha auferido certa melhoria referente a densidade da cama de pó para as misturas bimodais que inserem partículas extragrandes, esta melhoria não se refletiu na densidade sinterizada. Outros benefícios advindos da utilização destas misturas é a redução de distorções de forma e a geração de melhor controlo dimensional do que é produzido (Dini et al., 2019).

Embora existam estudos que apresentam guias de configurações ótimas de compactação do pó, estes baseiam-se no pó ideal, porém a maior parte da matéria-prima usada em BJ afasta-se da ideal, raramente apresentando grânulos de um único tamanho e dificilmente sendo esféricos e lisos (Ziaee & Crane, 2019).

### **2.5.2.6 Distribuição do tamanho do pó (Powder size distribution)**

Pelo facto de ser difícil ter um pó cujas partículas tenham todas o mesmo tamanho faz-se necessário perceber a influência da distribuição do tamanho dos grânulos constituintes do pó sobre a qualidade final do que é produzido por BJ. É comum identificar um pó como sendo de um determinado tamanho, porém este é geralmente o tamanho médio dos grânulos que compõem a matéria-prima, de modo que, dentre outros aspetos, a distribuição de tamanhos do pó (*Powder Size Distribution – PSD*) é uma informação relevante para uma melhor caracterização do material.

### **2.5.3 Defeitos**

Os defeitos que podem ocorrer na produção de uma peça por meio do BJ podem ser divididos em defeitos anteriores a sinterização, a secagem da gota – defeito “mancha de café” e defeitos posteriores a sinterização, sendo o mais proeminente o encolhimento.

Mancha de café ou anel de café é o nome que se dá à um depósito em forma de anel perto da linha de contato inicial da gota séssil. Esta mancha surge quando gotas isoladas suspensas secam e levam à criação de depósitos não homogéneos.

O encolhimento da peça resultante da sinterização é considerado a grande desvantagem do BJ. Mais solidificação e conseqüentemente maior taxa de encolhimento são resultados de um tempo de secagem mais longo, no entanto, um tempo de secagem menor deixa a peça “verde” mais porosa o que leva a maior encolhimento durante a sinterização (Dini et al., 2019).

### **2.5.4 Materiais**

Como existem elementos aglutinantes para qualquer pó, a gama de materiais que podem ser usados é quase infinita, incluindo aplicações em alimentos e medicamentos; no entanto apenas uma pequena fração é comercializada.

Uma grande percentagem da atual produção industrial com BJ é em metal. Muito do trabalho que tem sido feito foca-se em ligas de metalurgia de pós tradicional como aços inoxidáveis. A maioria das aplicações industriais demandam ligas padrão de alta densidade e embora este nível tenha sido atingido para uma variedade de materiais, continua sendo um desafio reduzir os defeitos e garantir precisão geométrica. O valor mais alto de densidade alcançado para pós de aço com sinterização de atmosfera de gás esteve entre 92% e 95% devido o aprisionamento do gás residual (Ziaee & Crane, 2019).

Alguns exemplos dos materiais metálicos usados para a produção de peças com o BJ são:

- Liga 17-4PH SS
- Liga 304L SS
- Liga 316L SS
- Liga M2 Aço Ferramenta
- Liga de cobre
- Liga de titânio
- Liga cobalto-crômio
- Inconel 718
- Inconel 625
- Compósito 316 SS i/w Bronze
- Compósito 420 SS i/w Bronze
- Compósito Tungsten i/w Bronze

## 2.6 Shop System

Até novembro de 2018 dois sistemas de fabrico haviam sido lançados pela empresa Desktop Metal. O *Studio System* em setembro de 2017, para trabalhos menores e pontuais, o *Full Production System* lançado em 2018 para parceiros seletos, incluindo a BMW e a Caterpillar, este sistema foi criado para volumes maiores. Hoje a empresa conta com mais dois sistemas liberados, o *Fiber* e o *Shop System*, sendo este último um sistema de BJ projetado para um volume médio de produção em oficinas de máquinas.

Shop System é o primeiro sistema de BJ desenhado para oficinas de máquinas, é capaz de construir peças metálicas complexas com todos os benefícios que se esperam das oficinas de máquinas tradicionais como: produtividade incomparável com melhor qualidade de “impressão”, mantendo altos níveis de acessibilidade durante todo o processo. A tecnologia de BJ que este sistema possui oferece uma série de vantagens para os fabricantes abrangendo as inovações de processo e de produto.

Tal como os outros processos de MA, o BJ não requer maquinagem, permitindo que as peças sejam produzidas de forma mais rápida e económica do que nos processos de fabrico tradicionais. Diferentemente de tecnologias como DMLS, SLS, SLM e EBM, BJ permite um maior volume de produção das peças. A construção da peça pode ser iniciada logo que se tenha finalizado o desenho (modelo virtual) da peça.

Uma vez que o processo de fabrico não está vinculado a uma ferramenta em particular, a mudança do *design* de uma peça é significativamente simplificada, sendo suficiente a atualização do ficheiro CAD da peça e o seu envio à máquina. A possibilidade de mudar o *design* da peça conforme necessário, habilita uma liberdade de *design* sem precedentes e permite o desenvolvimento de produtos com melhores performances e *designs* especializados que podem ser personalizados de forma a atender de facto as necessidades dos usuários finais.

Tendo a capacidade de produzir peças de alta qualidade, totalmente densas, NNS, a alta produtividade e flexibilidade do *Shop System* torna-o uma boa escolha para baixo, médio e alto volume de produção para aplicações finais.

O *Shop System* possui um mecanismo de passagem única (*single Pass Jetting*) inovador que possibilita a rápida produção das peças. A barra de impressão atravessa toda a

largura da plataforma de construção e, portanto, camadas inteiras de várias peças podem ser construídas em apenas alguns segundos.

## 2.7 Simulação de fabrico aditivo

A medida que o FA foi crescendo, sendo cada vez mais estudado, usado, desenvolvido e mais tecnologias foram surgindo, resultando na ampliação do campo de aplicação deste método de fabrico, tornou-se necessário a melhoria dos resultados obtidos na fabricação de peças por MA. Como em todos os processos tecnológicos, a otimização também tomou se mostrou relevante para a MA, a obtenção de peças de maior precisão geométrica e dimensional, com melhores propriedades mecânicas e com maior qualidade superficial incitou a criação de métodos de otimização destes processos, incluindo o desenvolvimento de softwares de simulação de processos de FA que podem contribuir em muito para um processo mais eficiente e efetivo.

Segundo Gibson, Ian; Rosen, David; Stucker, 2018 os softwares de assistência ao FA existentes no mercado, incluem normalmente uma ou mais das seguintes funções:

**Simulação** – Permite a simulação do modo de operação da máquina durante o processo de construção e do modo como as camadas são formadas passo a passo, permitindo a detecção de erros no ficheiro de fatias (STL) e a averiguação da possibilidade de construção de aspetos críticos da peça.

**Estimativa do tempo de construção** – Os processos de FA são altamente programados e as tecnologias mais recentes são muito confiáveis e podem funcionar sem supervisão por longos períodos de tempo, por isso, para um bom planeamento é importante saber quando é que a construção de uma peça termina. Isto pode ser de grande proveito, por exemplo para escalonar construções quando se operam várias máquinas, otimizando o trabalho manual necessário. Os primeiros softwares eram pouco confiáveis, estes calculavam continuamente tempos médios de construção por camada. Versões atuais apresentam estimativas muito mais precisas.

**Configuração da máquina** – As máquinas de FA geralmente possuem um sistema operacional que permite configurar a construção de uma peça, porém estes sistemas podem ser, por vezes, muito básicos.

**Monitorização** – Os sistemas de monitorização mais simples fornecem informações básicas sobre o estado da construção e do tempo que falta para a finalização. No entanto os sistemas mais complexos podem fornecer dados como a quantidade de material que ainda resta, a situação corrente de parâmetros como a temperatura, a potência, etc. e se há necessidade de intervenção manual. Alguns admitem ainda um *feedback* de vídeo da construção.

**Planeamento** – Ter a simulação de um processo de FA correndo num computador separado pode ser de grande utilidade para o planeamento do processo. Os planeadores de processos podem ser capazes de “prever” a aparência final da peça.



## 2.7.1 Softwares e plataformas

Existem diferentes formas de modelar um processo de FA de uma peça usando softwares de simulação diferentes. Algumas destas formas são apresentadas abaixo (ADDISPACE, 2021).

- Toyserkani, que determinou equações analíticas de diferentes fenômenos envolvidos no processo e posteriormente usou o MATLAB e o FEMLAB para resolvê-las. Usou uma malha tetraédrica com ajustes passo à passo.
- Cho usou o software Abaqus, focando-se no calor latente e o seu efeito da MA. Cho desenvolveu um modelo completo para MA.
- Foroozmehr e Fallah usaram o software Ansys APDL para resolver os modelos numéricos. O princípio “aditivo” do fabrico é representado pela adição/remoção de elementos de malha. O comportamento termo-mecânico é levado em consideração.
- Alimardani usou o software COMSOL Multiphysics 3.2a para desenvolver o seu próprio modelo numérico acoplado com os códigos MATLAB.

Os softwares mais comuns para simulação mecânica como o Abaqus, MATLAB, Ansys, COMSOL, CodAser, etc., não foram desenvolvidas para a simulação de processos de FA. Por isso têm sido desenvolvidos softwares que possam atender as especificações de simulações do FA. Alguns destes softwares são:

- Virfac AM – Desenvolvido pela GeonX, baseado na sua competência em modelação de processos e operações de fabrico por meio de elementos finitos. Todas as etapas do processo podem facilmente ser configuradas e simuladas. Dados como tensões e deformações na peça podem ser previstas. Permite ao utilizador estudar o efeito dos parâmetros do processo. Este software é capaz de simular o fabrico por SLM e LMD.
- Simufact Additive – Criado pela Simufact, é capaz de simular todo o processo aditivo, permitindo a determinação de tensões e deformações na peça e possibilitando ainda a compensação de distorções, a minimização de tensões residuais, a otimização de estruturas de suporte e do posicionamento e aninhamento da peça. A Simufact Additive possibilita a simulação de PBF (SLM, DMLS e Laser CUSING), DED (DMD, Laser Cladding) e Metal Binder Jetting.
- Altair Inspire Print3D – Anteriormente SolidThinking Inspire, é um software criado pela Altair. Acelera a criação, otimização e o estudo de peças inovadoras e estruturalmente eficientes, fornecendo um rápido e preciso conjunto de ferramentas para o projecto e simulação do processo de fabrico de peças por SLM.
- 3DSIM – Com os clientes incluindo OEMs da indústria aeroespacial e automotiva, Produtores de peças por FA e Produtores de máquinas de FA, universidades e laboratórios, a 3DSIM inclui:
  - exaSIM – uma ferramenta de fácil uso, desenvolvida especialmente para operadores de máquinas e *designers* do setor de MA. Habilita a previsão do formato final da peça, distorções, tensões e também a previsão automática das estruturas de suporte ideais e de ficheiros STL de compensação de distorções, reduzindo a necessidade de experimentos físicos de tentativa e erro.
  - FLEX – Desenvolvida para que analistas de engenharia, pesquisadores de materiais, OEMs de máquinas e fornecedores de pó possam indicar os melhores valores para os parâmetros de processo para uma determinada máquina ou combinação de materiais de forma a alcançar o mais alto

nível de integridade da peça e de forma a prever a microestrutura e as propriedades desta antes da sua construção.

- Project Pan – Esta ferramenta foca-se nos processos de cama de pó e processos alimentados por fio ou alimentados por pó e concede um módulo capaz de fornecer os parâmetros de processo que limitam as distorções inerentes do produto final.

Além dos softwares mencionados acima existem ainda outros softwares e plataformas online promissoras no que se refere à simulação e o apoio, de um modo geral, aos processos de FA como:

- Oqton;
- Ansys Additive Solutions;
- Additive Works;
- Octopuz;
- Shapr3D;
- Nota3D;
- Digimat-AM;
- 3DXpert.

## 2.8 Controlo Dimensional e Geométrico para Fabrico Aditivo

Existem vários processos para a produção de peças quer sejam eles industriais ou não. Muitas, senão todas estas técnicas industriais já foram e continuam sendo alvo de melhorias e constante desenvolvimento o que faz com que sejam obtidos melhores resultados hoje do que era obtido nos primórdios destes mesmos processos, contudo estes apresentam sempre uma margem de erro.

Processos já muito bem conhecidos e estabelecidos na indústria como são os conhecidos métodos tradicionais de produção também possuem limitações que fazem com que as peças obtidas por meio destes processos apresentem desvios dimensionais e (ou) geométricos quando comparados ao *design* inicial ou de referência e estes desvios ou erros variam entre os diversos métodos de fabrico.

Quando se pretende construir uma peça, além de atentar-se para aspetos como o tipo de material que pode ser utilizado, capacidade de obtenção da geometria, tempo e custo de produção, é necessário que se tenha conhecimento do nível de precisão dimensional e geométrica dos métodos de fabrico que se tem à disposição para que se possa fazer uma escolha mais acertada da tecnologia à usar para o fabrico da peça e também é relevante, para caso seja necessário, escolher-se o processo de acabamento por qual a peça terá de passar por forma a satisfazer os requisitos de funcionamento. Não considerar este importante aspeto pode resultar numa peça completamente disfuncional.

Muitos trabalhos nesta área já foram desenvolvidos para os processos tradicionais de fabrico de modo que processos como por exemplo o forjamento, fundição, torneamento, moldação por injeção têm os seus graus de toleranciamento já bem conhecidos e inclusive tabelados, possibilitando assim que se faça a escolha mais acertada para a tecnologia de fabrico e acabamento de uma determinada peça, baseando-se nos seus requisitos e (ou) especificações do produto, porém a realidade é diferente quando se tratam de processos de FA. Segundo Kruth et al., além da lentidão, a imprecisão dos processos foi a razão para que no princípio da década de noventa, muitos especialistas não confiassem no FA para outro fim senão o de produção de protótipos de aspeto e ainda que o maior desafio para o futuro seria o aprimoramento da precisão dimensional.

Os processos de fabrico aditivo de metais têm crescido muito e têm se tornado um expoente para o fabrico de peças metálicas de geometrias complexas, porém para que as peças produzidas por qualquer tipo de processo fabril, incluindo os de FA tenham a devida aplicação e exerçam a sua função é necessário que estas satisfaçam os requisitos funcionais, dentre eles o toleranciamento dimensional e geométrico. Com o crescimento dos métodos de MA e após décadas de pesquisas voltadas ao desenvolvimento de novos métodos e aprimoramento dos já existentes, houve então a necessidade de se olhar para a qualidade das peças produzidas, isto é, de se estudar formas de controlar a qualidade das peças e de avaliar a precisão das diversas tecnologias em função dos seus parâmetros de processo. Estudos mais recentes passaram a avaliar também o efeito que os atributos das peças, suas dimensões e geometrias têm sobre a qualidade final da peça. Em Rebaioli & Fassi (2017) apresenta-se uma tabela mostrando pesquisas feitas até 2017, associando a cada uma delas os respectivos materiais e máquinas usadas e ainda as tecnologias analisadas. Embora já tenham sido feitas pesquisas avaliando a precisão dimensional e geométrica dos métodos de MA, estas, inicialmente, abordaram o FA de peças plásticas e posteriormente o FA em metal, tendo sido feitas análises da precisão dimensional de tecnologias como L-PBF, E-PBF e LMD. Existe muito pouca pesquisa feita sobre a precisão dimensional e geométrica do binder jetting de metal (MBJ). Dimitrov et al., indica que dentre os vários parâmetros ligados ao processo de BJ, os que mais influenciam a precisão dimensional são os seguintes: o material usado, a orientação da construção (o eixo de construção) e a dimensão nominal (magnitude), os atributos geométricos e suas topologias, a espessuras da peça (sólido ou casca), agentes infiltrantes e pós-processamento.

Como já foi referido, poucas são as pesquisas ligadas ao MBJ que visavam o controle dimensional e (ou) geométrico das peças produzidas. Na Tabela 4 são apontados alguns destes estudos.

*Tabela 4 – Pesquisas relacionadas à precisão dimensional e/ou geométrica envolvendo BJ e aspetos cobertos.*

Pesquisa	ano	material	Precisão dimensional	Precisão geométrica	ISO IT	Repetibilidade
Islam & Sacks	2016	Z150	✓		✓	
Dimitrov et al.,	2003	ZP14 ZP100	✓	✓	✓	✓
Islam et al.,	2013	ZP150	✓		✓	
Byun & Lee,	2003	ZP100	✓	✓		
Dimitrov et al.,	2006	ZP14 ZP100	✓	✓	✓	
Lee et al.,	1993	Alumina	✓			

Para aferir o desempenho de uma máquina ou processo, usam-se duas principais metodologias, uma delas é por meio de medições diretas de características ou parâmetros da máquina e do processo; esta metodologia requer o posicionamento e controle de componentes da máquina e a montagem de instrumentos de medição na área de trabalho da máquina para medir a posição, orientação e a velocidade dos

componentes, algo difícil de ser realizado em uma máquina de MA. A outra metodologia é a realização de medições sobre uma peça de teste, que desempenham um maior papel no diagnóstico e na caracterização de processos e de máquinas de MA (S.Moylan, J. Slotwinski, A. Cooke, K. Jurrens, 2012).

Lee et al., apresenta o impacto da carga e compressibilidade sobre a estabilidade posicional de uma camada de pó de matéria-prima, onde se observa que estes tendem a gerar erros na posição vertical da camada e, portanto, podem afetar verticalmente a precisão dimensional da peça, alvitando assim que a precisão dimensional de peças obtidas por FA por meio de processos de cama de pó, seja um resultado da interação entre as camadas contíguas e da geometria dos grânulos que compõem a matéria-prima. Observou-se ainda que a posição vertical das camadas segue um perfil parabólico, isto é, os erros de posição são maiores para as camadas mais ao centro e diminuem para camadas que distam do centro, para qualquer um dos extremos, quer seja para cima quer seja para baixo.

É importante ressaltar que a maior parte dos estudos feitos no âmbito da precisão dimensional alcançada pelas tecnologias de FA não se baseiam nos sistemas *ISO* para este fim.

Num estudo (Minetola et al., 2020) feito considerando os sistemas *ISO* que regulam o toleranciamento dimensional e geométrico de formas elementares é usada uma peça referência que possui vários atributos geométricos cobrindo os oito primeiros intervalos de tamanhos básicos da *ISO*, a peça possuía atributos de geometrias simples de tamanhos diferentes de modo a se encaixarem nos intervalos como acima mencionado.

Na Tabela abaixo são apresentadas algumas das formas simples que mais têm sido usadas nos estudos.

*Tabela 5 - Exemplos de geometrias simples usadas para avaliar as principais tolerâncias geométricas (Rebaioli & Fassi, 2017).*

Tolerância geométrica	Forma/geometria
Planeza	Cubos, ranhuras, saliências retangulares, paredes finas, superfície da base da peça
Rectitude	Cubos, ranhuras, saliências retangulares, paredes finas, superfície da base da peça
Circularidade	Furos circulares e cilindros
Paralelismo	Cubos, furos e saliências retangulares, paredes finas e furos quadrangulares
Perpendicularidade	Cubos, saliências e furos circulares, furos quadrangulares
Cilindricidade	Furos circulares, cilindros ocos e maciços
Angularidade	Superfícies inclinadas
Localização	Furos e cilindros
Perfil	Esferas e hemisferas

Por interesse da *American Society for Precision Engineering (ASPE)* em Ameta et al., 2015 apresentam-se os desafios relacionados com a transferência de toleranciamento para o fabrico aditivo. Estes desafios são apresentados em três categorias que são os desafios ligados a construção de (a) peças únicas, (b) acoplamentos ou conjuntos e (c) várias peças numa única produção. Em Ameta, Lipman, et al., 2015, assume-se que a

atribuição de toleranciamento final para as peças baseia-se na troca entre tolerâncias apertadas que geralmente resultam numa melhor performance e acoplamento e toleranciamento mais livres que resultam em custos mais baixos mais também em baixos índices de ajustamento e funcionamento devido.

O toleranciamento geométrico e dimensional (*GD&T*) é regulado por normas da *International Standardization Organization (ISO)* e da *American Society of Mechanical Engineering (ASME)*, sendo estas a norma *ISO 1101:2017* e *ASME Y14.5:2018*. Para a produção aditiva especificamente existe a norma *ISO 17296:2014* que apresenta um modo de se assegurar atributos geométricos como o comprimento, ângulo, toleranciamento dimensional e toleranciamento geométrico de peças aditivamente fabricadas, no que concerne às especificações geométricas do produto (*GPS*) existe a norma *ISO 286:2010* que propõe um sistema de toleranciamento de dimensões lineares e apresenta tabelas de graus de toleranciamento e limite de desvios para furos e veios.

### 3 Materiais e metodologia

De forma a se concretizar os objetivos preconizados para esta dissertação delineou-se a seguinte metodologia:

A determinação da peça a ser produzida. A escolha da peça é feita de forma a ter, principalmente, características dimensionais e geométricas que possam ser analisadas e verificadas pelos meios de medição a disposição e também tendo em consideração as possíveis limitações do processo e da tecnologia (máquina) sendo usada.

A modelação da peça escolhida por meio de um software de modelação 3D (CAD) por forma a ter-se um modelo virtual da peça a ser utilizada nas fases seguintes. A modelação da peça é feita respeitando os critérios do *Design for Additive Manufacturing (DfAM)*.

A simulação do processo de fabrico da peça por Binder Jetting utilizando o software Simufact additive criado pela MSC Software, tendo em conta os parâmetros do processo de modo a garantir que a esta se dê da forma mais eficiente possível e se obtenha uma peça com a melhor qualidade possível. Foram feitas diversas simulações, variando aspetos distintos do processo com o intuito de averiguar impacto destes sobre o processo de sinterização e se possível, otimizar a qualidade da peça final. Na Figura 11 é apresentado o perfil de temperatura de sinterização utilizado nas simulações.

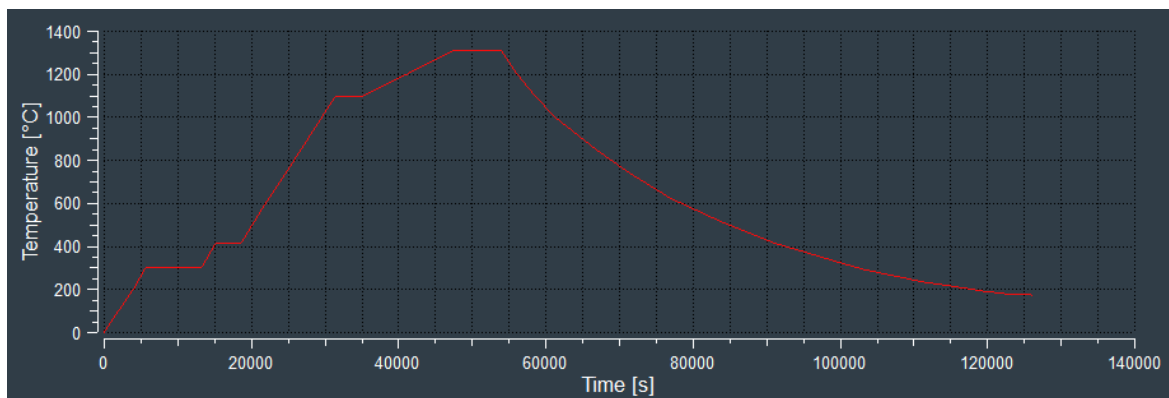


Figura 11 - Perfil de temperatura usado nas simulações.

A análise dos resultados obtidos pelas simulações. Verificação de distorções na peça, variações dimensionais e geométricas. Averiguação de possíveis soluções e aplicação das mesmas.

A produção da peça seguindo o melhor procedimento obtido pelas simulações anteriormente efetuadas e verificação da consistência da simulação por comparação com o resultado real, isto é, o componente físico produzido.

Propôs-se o fabrico de três peças, uma de 60x60x35, uma escala menor da anterior e outra que é uma versão de compensação de distorções que foi obtida no software *Simufact*.

As peças foram produzidas pela Jade Groupe, nas suas instalações em Águeda recorrendo a tecnologia *Shop System* da *Desktop Metal*, já mencionada.

A verificação da peça, por meio de medições, de modo a constatar se os requisitos dimensionais e geométricos foram cumpridos, aferindo inclusive os níveis de toleranciamento atingidos pela tecnologia de FA.

### 3.1 Material

A matéria-prima utilizada para a construção das peças foi o aço 17 – 4PH de fornecimento da *Desktop Metal*, cuja composição química é apresentada na Tabela 7 que segundo informação da empresa teria a sua granulometria variando entre 45 $\mu$ m-90 $\mu$ m, porém foi feita uma análise granulométrica à uma amostra do material, tendo-se chegado aos resultados apresentados na Tabela 6. As propriedades mecânicas deste aço são exibidas na Tabela 8.

Tabela 6 - Granulometria do pó.

Volume [%]	Tamanho [ $\mu$ m]
D10	9,70
D25	25,01
D50	35,39
D75	42,67
D90	53,32

Tabela 7 - Composição química do aço 17 - 4PH usado (Material Data Sheet, Desktop Metal).

Elemento	C	Cr	Ni	Cu	Mn	Si	Nb+Ta	Fe
% de massa	0,07 (max)	15,5 – 17,5	3 – 5	3 – 5	1,0 (max)	1,0 (max)	0,15 – 0,45	Balanço

Tabela 8 – Propriedades mecânicas do aço 17 - 4PH usado (Material Data Sheet, Desktop Metal).

Tensão de cedência [MPa]	660±40
Tensão de rutura [MPa]	912±35
Deformação na rutura [%]	5,9±2
Módulo de Young [GPa]	178±30
Dureza [HRC]	26,4±1
Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	7500 – 7660

### 3.2 Artefactos ou peças de teste

Com o crescimento e expansão do fabrico aditivo entre as décadas de 80 e 90, surgiram vários processos de FA e para tornar-se possível e(ou) mais fácil a escolha do processo mais apropriado para a produção de uma determinada peça com base nas características e especificidades de cada processo propuseram-se peças de teste.

A primeira menção de uma peça de teste, também comumente chamada de peça de análise comparativa (*Benchmarking part – BMT*) para a comparação de processos de fabrico aditivo, foi de JP Kruth em 1992, citando uma peça em forma de U (Figura 12) composta por vários elementos geométricos com o propósito de avaliar a performance geral de processos de MA como SL, SLS e LOM. Com base neste artefacto de teste, outros foram desenvolvidos, por adição de diferentes elementos e de diferentes geometrias e alguns incluindo geometrias de forma livre para demonstração de alguma das vantagens do FA (S.Moylan, J. Slotwinski, A. Cooke, K. Jurrens, 2012).

As peças propostas geralmente dividem-se em três categorias que são: Peças para comparação de processos para tomada de decisão; Peças para avaliação de um processo específico; Peças para avaliação de processos baseados em metal e peças para outros usos.

Geralmente, quando da construção das peças de teste cumprem-se as seguintes regras (Byun & Lee, 2003; S.Moylan, J. Slotwinski, A. Cooke, K. Jurrens, 2012):

- Ter o tamanho suficiente para testar o desempenho da máquina perto das bordas da plataforma de construção como perto do centro da mesma;
- Incluir atributos pequenos, médios e grandes;
- Incluir elementos interiores e exteriores;
- Não durar muito tempo para a construção;
- Não requerer muito material para a construção;
- Ser fácil e rápido de medir por uma CMM;
- Incluir vários elementos reais (cubo, furo, parede, superfície plana, cilindro, etc.)

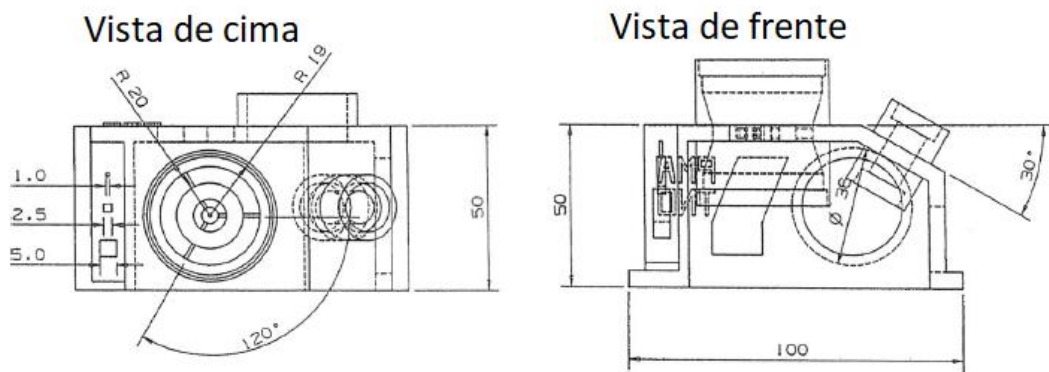


Figura 12 - peça de benchmarking proposta por Kruth. Adaptado de (Rebaioli & Fassi, 2017).

Várias peças foram sendo propostas, cada uma com a finalidade de avaliar um ou mais aspectos dos processos de fabrico aditivo e das peças obtidas usando o FA. Abaixo apresentar-se-ão algumas das peças de teste que já foram desenvolvidas por vários pesquisadores em estudos anteriores em que o processo BJ também foi alvo de análise. Aubin, (1994), faz uma pesquisa com intuito de fazer uma avaliação à nível mundial das tecnologias de MA (na altura, de prototipagem rápida). Com objetivo de; caracterizar as tecnologias disponíveis pela identificação das sua capacidades técnicas e fatores económicos; avaliar o tempo de pré-processamento, de construção e de pós-processamento necessário para produção de uma peça comum; prover documentação acerca das tecnologias comercialmente disponíveis e; proporcionar um resumo das pesquisas e avanços em prototipagem rápida feitas ou dirigidas por universidades, Aubin propôs duas peças (Figura 13). Esta pesquisa foi desenvolvida com a parceria da *Intelligent Manufacturing Systems – IMS*.

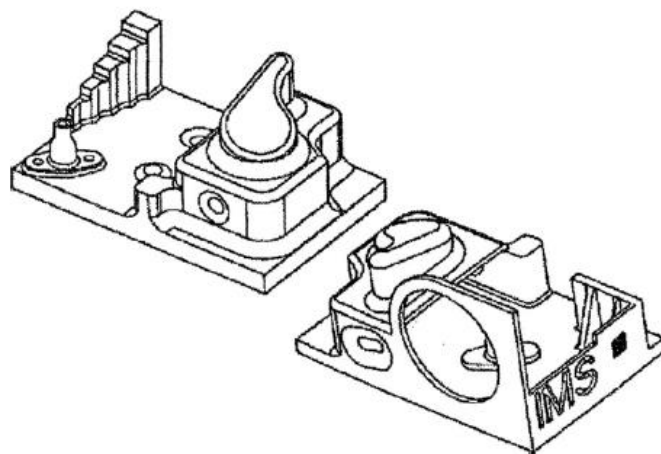


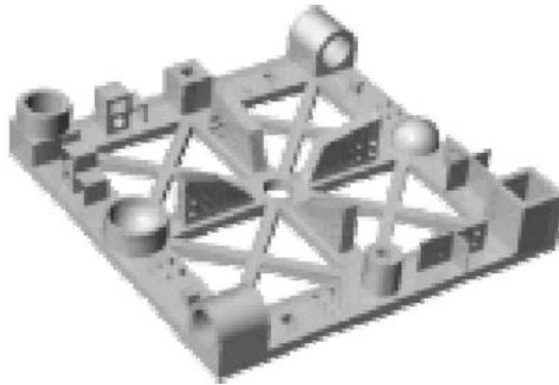
Figura 13 – Vista isométrica das peças propostas pela IMS. Dimensões gerais 152,4mm x 101,6mm (Aubin, 1994).



Byun & Lee, (2003) analisaram as peças que já existiam e perceberam que as mesmas:

- Eram ou muito grande ou muito pequenas, resultando, para o primeiro caso, num consumo excessivo de material e possivelmente no empeno da peça, ou para o segundo caso a dificuldade de medição e falta de diferentes atributos;
- Tinham elementos alinhados em uma única direção, x, y ou z;
- Algumas eram redundantes nos elementos que continham, resultando no consumo desnecessário de tempo;
- Apresentavam atributos de forma livre, sendo difíceis de medir.

Com base nestas observações, HS. Byun e K. H. Lee propuseram uma peça (Figura 14) para aferir a precisão dimensional, a capacidade de produção de elementos finos e a rugosidade de processos como SL, FDM, SLS, LOM e BJ que superasse estas desvantagens (Rebaioli & Fassi, 2017).



*Figura 14 - Peça de teste proposta por Byun e Lee de 150mm x 150mm x 25mm de dimensões gerais (Byun & Lee, 2003).*

Em seus trabalhos (Dimitrov et al., 2003, 2006), com base numa análise feita dos artefactos de teste anteriores, desenvolve um procedimento para a avaliação da precisão do processo de BJ que estivesse de acordo com os padrões internacionais. Neste estudo foi relatado que uma única peça não é suficiente para a investigação tanto da precisão dimensional quanto da precisão geométrica e foram então propostas duas peças distintas. Uma das peças (Figura 15a) era um cubo com várias ranhuras e saliências de diferentes dimensões para avaliar a precisão dimensional e a outra peça (Figura 15b) era uma caixa de diferencial que possibilitava testar a precisão geométrica de diversos elementos e conseqüentemente a precisão geométrica do processo ou máquina, mais especificamente.

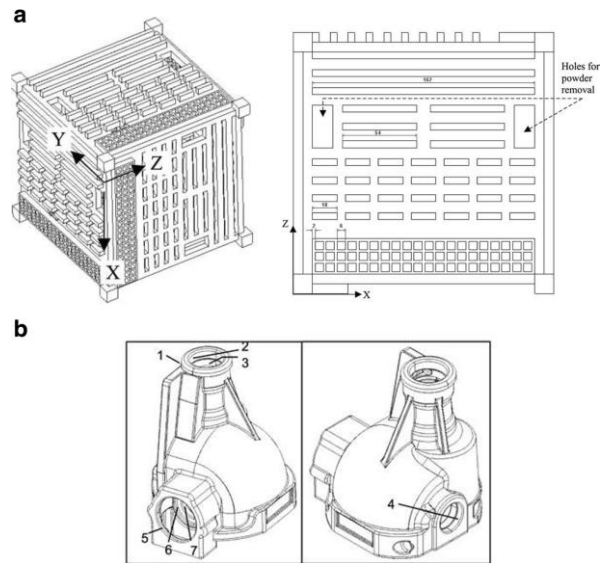


Figura 15 - Artefactos de teste propostos em Dimitrov. et al. Dimensões gerais de a 190mm x 190mm x 190mm (Rebaioli & Fassi, 2017).

Num estudo realizado em 2005, cujo foco era o FA com materiais metálicos, L. Castillo desenvolveu uma peça de teste (Figura 16) para investigar o desempenho dimensional e geométrico de várias tecnologias de BJ e SLM, possibilitando também verificar a capacidade de serem produzidas elementos salientes, superfícies inclinadas, paredes finas (0,5mm – 2mm de espessura), pinos de alta razão de aspecto (0,5mm – 5mm de diâmetro e 2,5 – 30mm de altura) e furos de 0,5mm – 10mm de diâmetro e superfícies encurvadas (Rebaioli & Fassi, 2017).

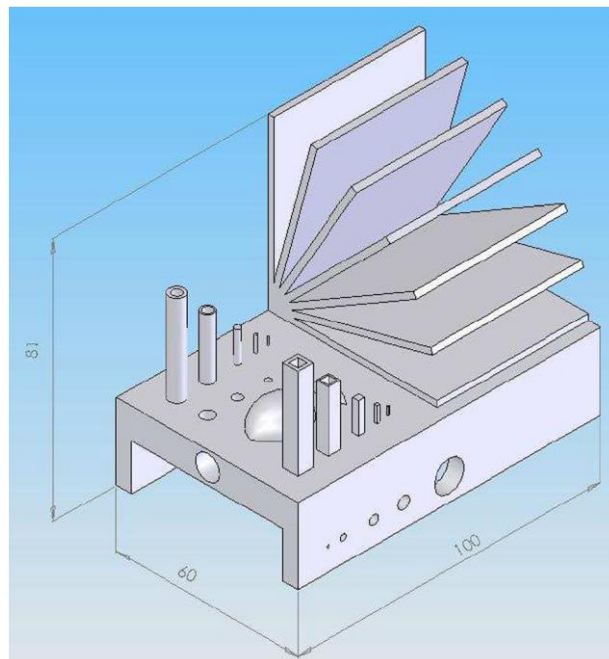


Figura 16 - Artefacto de teste proposto por Castillo (dimensões gerais em milímetros) retirado de (Rebaioli & Fassi, 2017).

Em 2007, Kim e Oh, realizaram um estudo exaustivo de vários processos de MA, sendo estes o SL, FDM, SLS, 3DP (BJ), LOM e também da tecnologia Poly-jet, com a finalidade de quantificar e comparar as suas características e usando diversos materiais. Propuseram-se oito artefactos de testes (Figuras 17 e 18) para a observação de propriedades mecânicas como, resistência à tração, resistência à compressão, dureza, resistência ao impacto, resistência térmica (ao aquecimento), rugosidade superficial, precisão dimensional e geométrica, velocidade de produção e custo do material. Duas peças (Figura 16a) foram usadas para investigar exequibilidade de elementos pequenos, uma peça (Figura 16b) para medir a rugosidade de superfícies inclinadas. Para o teste das propriedades mecânicas foram usadas outras quatro peças.

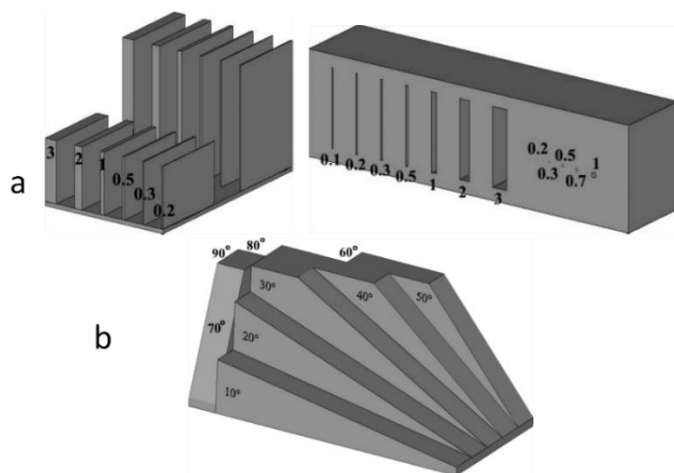


Figura 17 - Peças de comparação propostas por G. D. Kim e Y. T. Oh para estudo da factibilidade de elementos pequenos e da rugosidade (Kim & Oh, 2008).

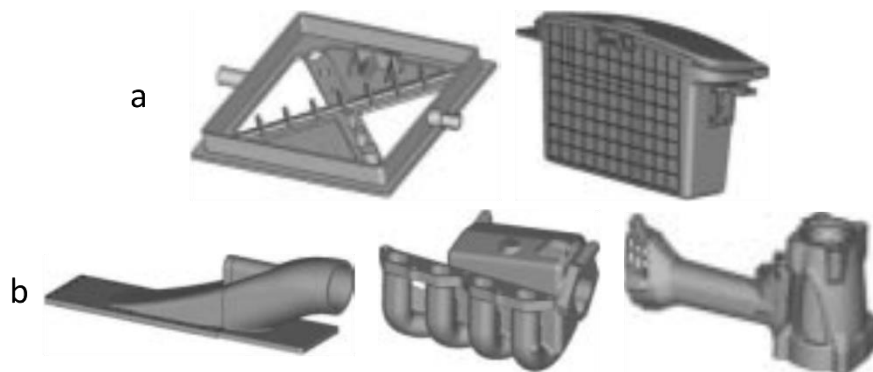
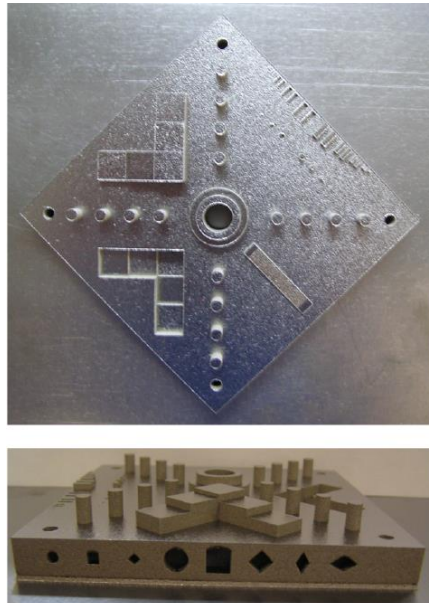


Figura 18 - Peças propostas por G. D. Kim e Y. T. Oh para análise da precisão geométrica e dimensional (a) e da velocidade de produção e custo do material (Kim & Oh, 2008).

(S.Moylan, J. Slotwinski, A. Cooke, K. Jurrens, 2012) constatando a necessidade de desenvolvimento de novas peças de análise comparativa, avaliaram os artefactos que existiam, discutindo os propósitos de estudo e descrevendo características e

especificidades de cada um destes artefactos. Com base na revisão dos artefactos anteriores, uma peça nova (Figura 19) foi sugerida pretendendo a padronização dos artefactos, composta pelos elementos mais úteis dos artefactos anteriores.



*Figura 19 - Peça de teste construída em aço inoxidável por DMLS (S.Moylan, J. Slotwinski, A. Cooke, K. Jurrens, 2012).*

Focando simplesmente na averiguação da precisão do processo de BJ e atentando para dimensões lineares e diâmetros de furos em Islam et al., (2013) desenvolveu-se uma peça simples em forma de U (Figura 20) com um furo cilíndrico. Em 2016 M. Islam e S. Sacks prouseram outro artefacto (Figura 21) para uma investigação experimental dos erros dimensionais decorrentes do BJ e que posteriormente foi aplicado para um estudo de comparação entre os processos BJ e SL (Islam & Sacks, 2016; Rebaioli & Fassi, 2017).

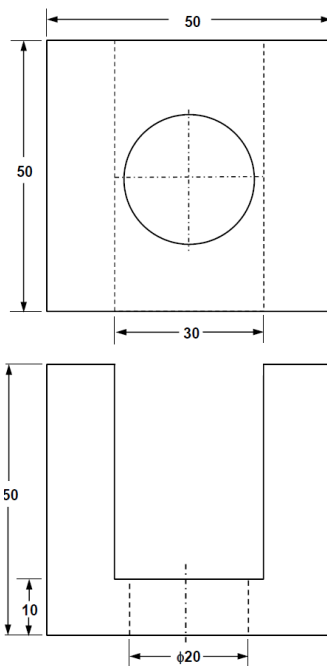


Figura 20 - Peça de teste proposta por Islam, Boswell e Pramanik (Islam et al., 2013).

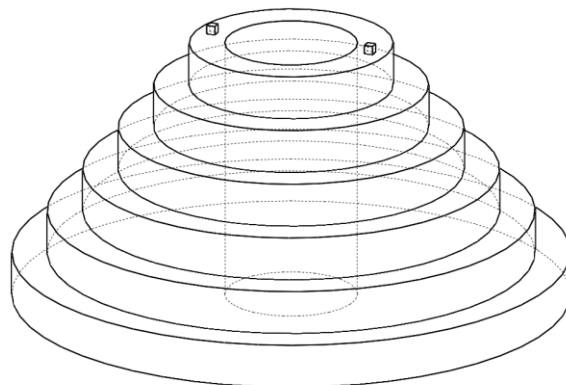


Figura 21 - Peça de teste proposta por Islam e Sacks em 2016 (Islam & Sacks, 2016).

### 3.3 Peça de estudo

Para esta pesquisa optou-se por usar uma peça meramente teórica. A peça é simples, de base retangular oca e tendo 60x60x50 (mm) de dimensões gerais. Modelou-se, portanto, uma peça (Figura 22) com atributos que favorecessem as análises e as observações perspeticadas. Para a modelação da peça considerou-se ainda o volume máximo de construção que a máquina a ser usada permite.

Pretende-se examinar as distorções presentes na peça final e com estes dados verificar a precisão dimensional e geométrica do processo de construção utilizado, mais especificamente da tecnologia *Shop System*. A coaxialidade, cilindridade, paralelismo, planeza e angularidade são algumas das tolerâncias geométricas à serem verificadas. Na Figura 23 são apresentados alguns dos toleranciamentos a serem verificados e com

identificação dos atributos nos quais cada tolerância será aferida, onde ND significa não definida.

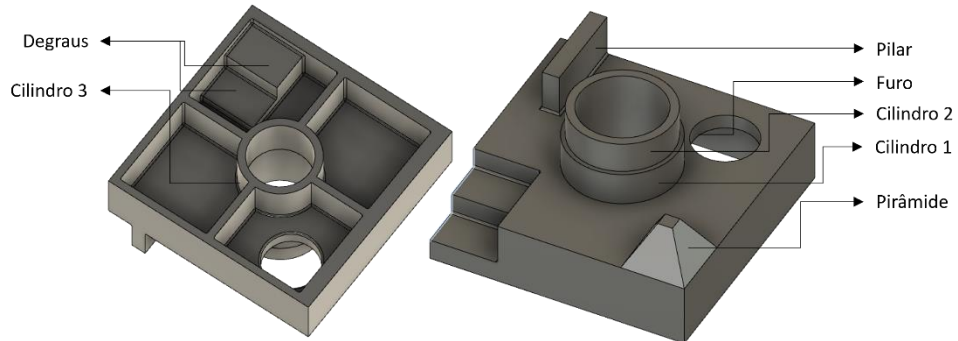


Figura 22 - Peça e designação dos respectivos atributos.

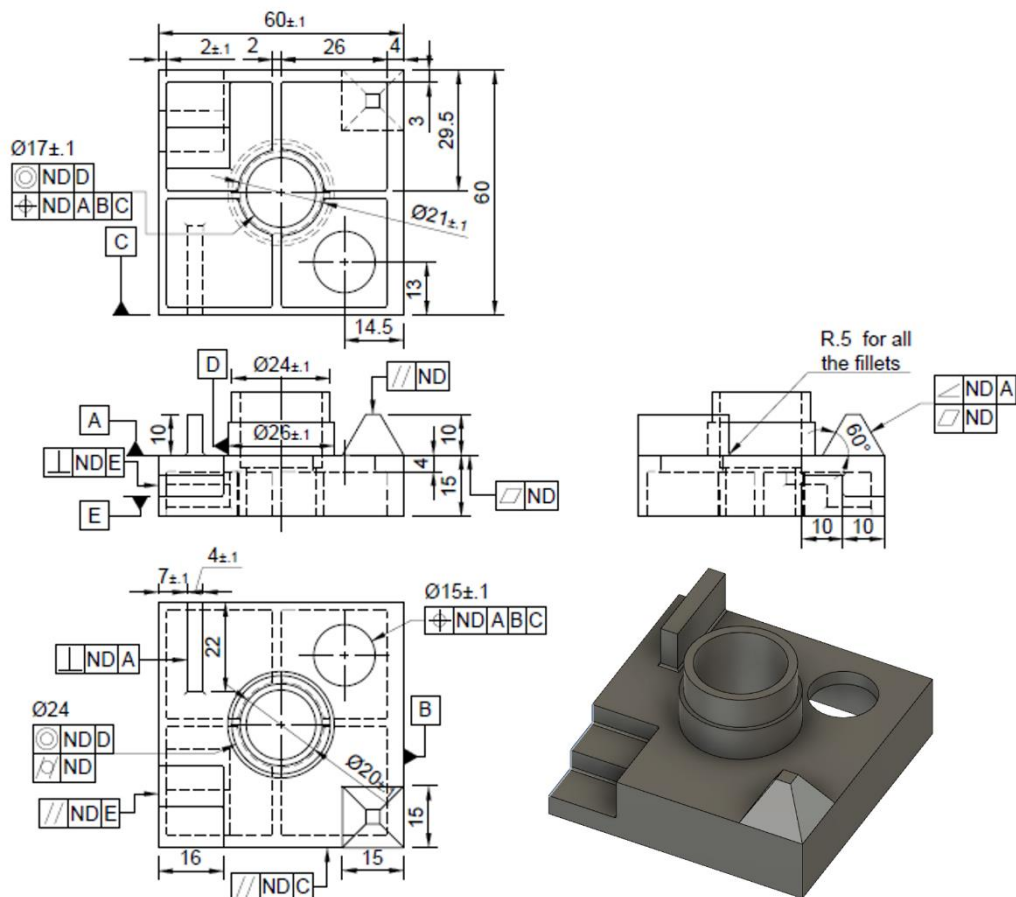


Figura 23 - Desenho ilustrando as tolerâncias geométricas que se pretende analisar.

A modelação da peça foi feita visando propiciar as examinações já mencionadas, porém considerando e respeitando os critérios ou regras de Desenho para Fabrico Aditivo (DfAM), especificamente seguindo o guia de *Design* da máquina *Shop System* que para melhores resultados de impressão e sinterização orienta um limite dimensional da peça em 150x100x50 mm (X, Y, Z). As inculcações, como as de alturas de paredes com base nas suas espessuras (Figura 24) foram cumpridas, como também foram, por exemplo, as relativas aos cantos ou ângulos internos (Figura 25).

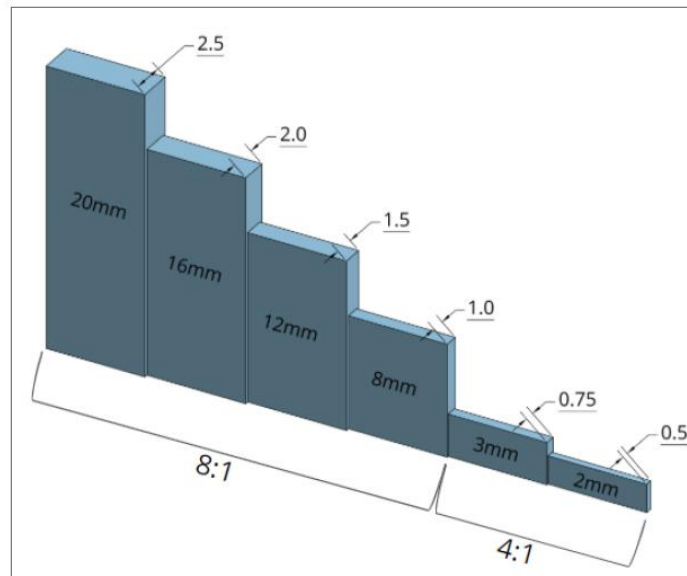


Figura 24 - Razão altura-espessura de pilares (Shop System Design Guide).

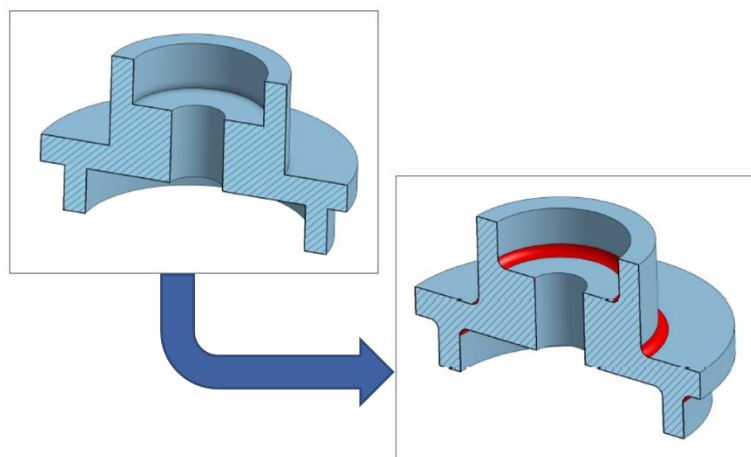


Figura 25 - Boleamento de ângulos internos (Shop System Design Guide).

### 3.4 Impressão

O fabrico da peça foi feito pela empresa *Jade Group* que usou a já mencionada tecnologia *Shop System* da *Desktop Metal*.

Foram construídas um total de dez peças (cinco peças e uma réplica de cada), como mostra a Figura 26 sendo metade destas, levada ao processo de sinterização e a outra metade reservada em estado verde, permitindo que se fizesse uma análise dimensional comparativa entre cada peça, a variação dimensional que ocorre após a sinterização da peça.

As cinco peças replicadas são: A – Modelo compensado pelo software da *Desktop Metal*, B – Modelo compensado pelo software *Simufact Additive* com escala, C – Modelo com escala, D – modelo compensado pelo software *Simufact Additive*, E – Modelo menor com escala.

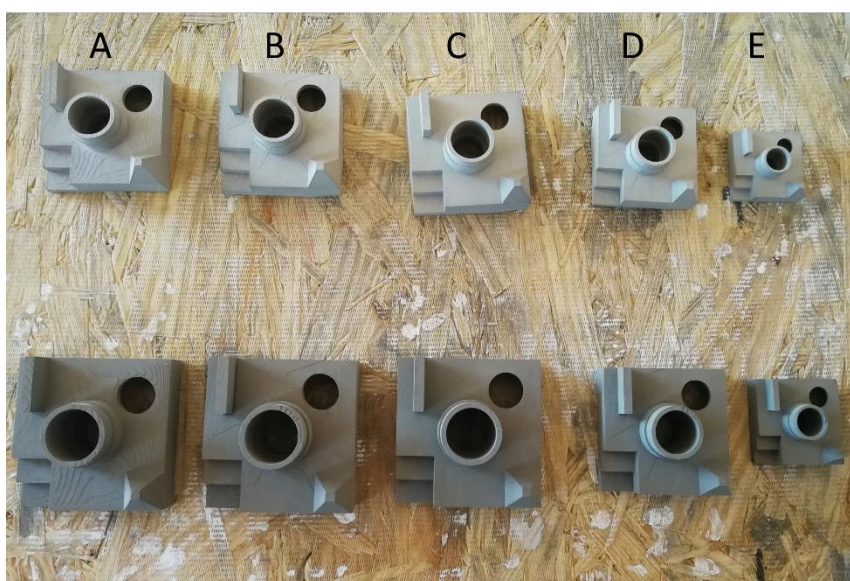


Figura 26 - Peças obtidas. As peças verdes abaixo e as peças sinterizadas acima.

### 3.5 Simulação

Para o presente trabalho, as simulações do processo de sinterização foram feitas usando o software *Simufact Additive* na versão de 2021. Este software permite a simulação de processos de fusão em cama de pó e de binder jetting de metais que é o processo de eleição deste estudo.

Para cada simulação feita as configurações mais relevantes a fazer-se são: a escolha e(ou) caracterização de um material, a definição de um perfil de temperatura, isto é, de uma curva de sinterização, a especificação da densidade relativa da peça verde e determinação do *solver* da matriz.

De modo a estudar o impacto de algumas propriedades da matéria-prima sobre a sinterização e por conseguinte sobre a qualidade final da peça. Variaram-se algumas das características do material como o tamanho do grânulo e também se variou a densidade relativa da peça verde.



As peças foram simuladas considerando que as mesmas não sofrem nenhum tipo de distorção em sua forma e dimensão, ou seja, a peça verde é tida como uma réplica fidedigna do modelo virtual, não apresentando nenhum tipo de deformidade. Com o pressuposto de que a peça sinterizada não apresenta previamente erros dimensionais e geométricos, pode-se então concluir que as imprecisões verificadas são resultantes apenas do processo de sinterização.

## 4 Análise de Resultados

### 4.1 Simulação

A fim de se poder avaliar alguns dos parâmetros que afetam a qualidade final da peça e impactam na precisão dimensional e geométrica da mesma durante o processo de sinterização, como a densidade da peça verde, o tamanho do grânulo, a temperatura e o tempo de sinterização, atribuíram-se diferentes especificações ao pó e propriedades da peça verde para cada simulação, atentando o que se pretendia examinar. À combinação das especificações do pó e da peça verde foi denominada configuração e as configurações usadas neste trabalho são apresentadas na tabela abaixo.

*Tabela 9 - Configurações usadas para as simulações.*

Configurações	Tamanho de sinterização [mm]	Gama do pó [mm]	Tamanho médio [mm]	Densidade da PV [%]
Conf.1	0,0675	0,045 - 0,09	0,0675	70
Conf.2	0,05	0,002 - 0,2	0,05	70
Conf.3	0,1	0,002 - 0,2	0,101	70
Conf.4	0,008	0,002 - 0,2	0,05	70
Conf.5	0,0675	0,045 - 0,09	0,0675	55
Conf.6	0,0675	0,045 - 0,09	0,0675	59
Conf.7	0,0675	0,045 - 0,09	0,0675	60
Conf.8	0,01	0,002 - 0,2	0,05	70
Conf.9	0,0675	0,045 - 0,09	0,0675	65
Conf.10	0,03	0,002 - 0,2	0,05	70
Conf.11	0,06	0,002 - 0,2	0,05	70
Conf.12	0,1	0,002 - 0,2	0,05	70

As simulações que foram realizadas permitiram observar que todas as peças sofrem distorções que as levam a adquirir uma forma côncava, isto é, após a sinterização todas as paredes ou faces laterais (verticais) da peça dobram-se em direção ao centro da mesma, fazendo as superfícies superiores das peças dobrarem-se. Todas as peças sofrem um encolhimento quando comparadas ao modelo virtual como se pode ver na figura abaixo.

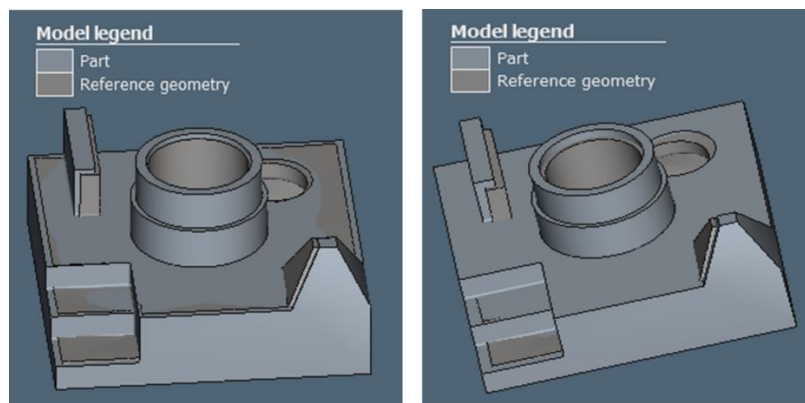


Figura 27 - Demonstração da concavidade adquirida pelas peças sinterizadas. À esquerda a configuração 6 e à direita a configuração 3.

#### 4.1.1 Densidade da peça verde

Observou-se que a densidade da peça verde tem grande influência sobre a qualidade da peça sinterizada. Como pode ser visto na Figura 28 as peças que possuem maior densidade relativa em sua fase verde apresentam menos defeitos, ou seja, menor distorção.

O desvio superficial existente entre as peças sinterizadas e a peça original (modelo virtual) tem uma relação inversa ao valor da densidade da peça verde, isto é, com o aumento da densidade da peça verde tem-se uma redução do desvio superficial na peça final, quer seja o desvio positivo ou negativo.

A peça apresenta para cada configuração, desvios maiores no topo de cada elemento em relação à sua base, com exceção da pirâmide que exibe uma peculiaridade. Os elementos têm os valores de desvio reduzindo do topo para baixo e a geometria base (GB) da peça revela desvios maiores nos cantos ou arestas (zonas de interseção entre faces) externos, que decrescem para todos os lados, ao afastar-se dos vértices (Figura 29), já os cantos internos e área da geometria base próxima ao cilindro 1 apresentam desvios menores, sendo estes superiores apenas aos desvios que ocorrem no cilindro 3 e em grande parte das nervuras existentes na GB da peça, onde se chegam a registrar valores de desvios nulos.

O atributo piramidal da peça é o mais impactado, apresentando os maiores valores de deslocamento para todas as configurações atingindo valores mais altos de desvio para conf.5. O vértice da peça imediatamente abaixo da pirâmide sofre desvios superiores aos dos restantes vértices da peça, os desvios neste vértice são geralmente iguais ao que ocorrem na pirâmide, ou seja, a pirâmide exerce um efeito sobre este vértice. Do mesmo modo que as nervuras, que apresentam desvios muito baixos, contribuem para uma menor distorção do cilindro 3.

Percebe-se também, no vértice próximo ao furo uma acentuação do desvio, que embora seja menor ao do canto abaixo da pirâmide, é superior aos demais cantos, presumindo-se então ser consequência da existência do furo.

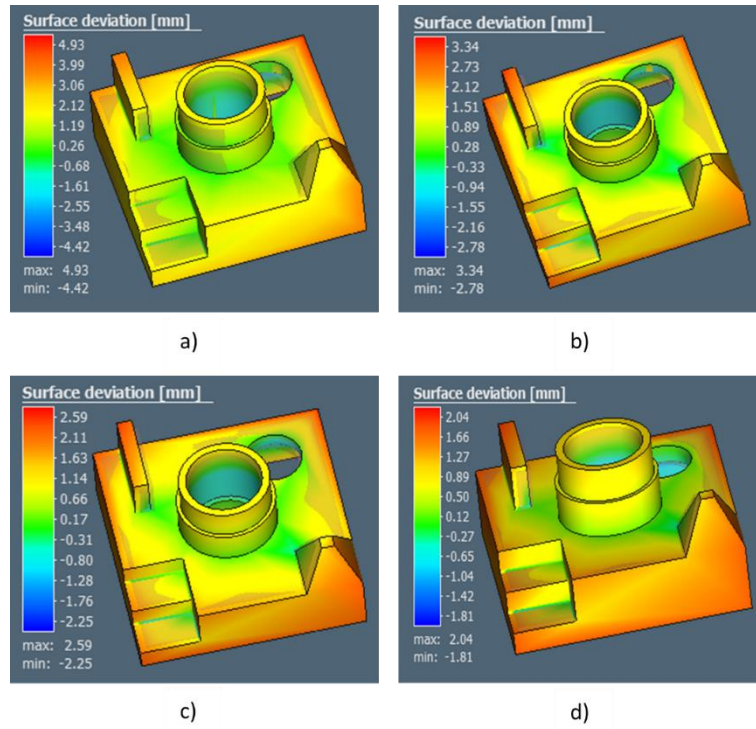


Figura 28 - Desvios de superfície das peças, a) Configuração 5, b) Configuração 7, c) Configuração 9 e d) Configuração 1.

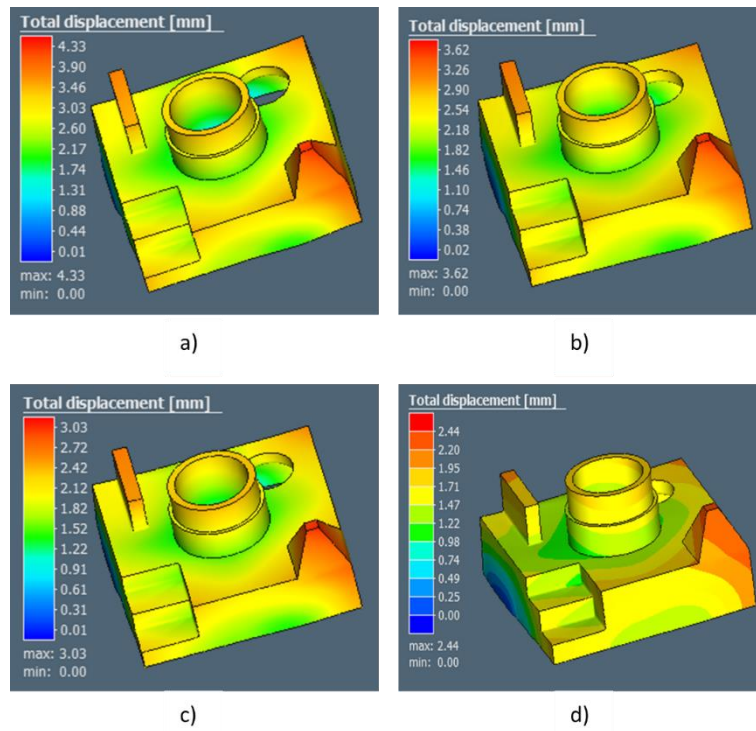


Figura 29 - Desvios totais das peças, a) Configuração 5, b) Configuração 7, c) Configuração 9 e d) Configuração 1.

Para todas as peças ou configurações alvo de análises nesta fase, percebeu-se que dentre os atributos das peças, observaram-se maiores desvios máximos para a pirâmide. Dentre as configurações estudadas, para a pirâmide, foram registados desvios mínimos (1,70mm) para a conf.1 e máximos (4,33mm) para a conf.5. Uma das razões para este elemento sofrer estes deslocamentos em relação à peça original pode ser a sua forma que apresenta ângulos opostos. Os menores desvios em toda a peça são ocorrem para a configuração 1, cuja densidade relativa é maior de entre as demais configurações. A peça sofreu um encolhimento de cerca de 13%, 16%, 19% e 23% para as configurações 1, 9, 7 e 5 respetivamente, atestando a importância de se ter peças verdes mais densas uma vez que as mesmas experimentam menos encolhimento, e também, menores deslocamentos, como se pode perceber pela Figura 31. O cilindro 3 tem quase toda sua base fiel ao modelo virtual, isto pode ter por base as nervuras que se ligam à este elemento e também a espessura do cilindro.

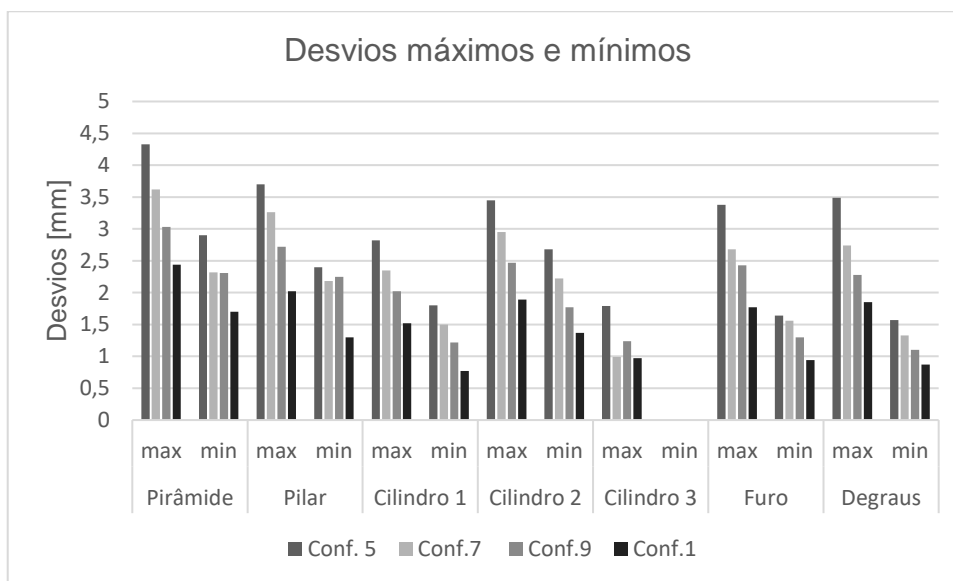


Figura 30 - Desvios máximos e mínimos para cada configuração e atributo da peça.

#### 4.1.2 Tamanho do grânulo

Notou-se que os resultados obtidos nesta análise apresentaram um comportamento da peça, durante a sinterização, diferente do apresentado em estudos já feitos e mencionados, em que os melhores resultados foram obtidos quando se usavam pós mais finos, no estudo presente constatou-se, em simulação, um comportamento totalmente oposto, isto é, as peças de pós mais finos apresentam maiores deslocamentos em comparação às de pós mais grosseiros. Ao construírem-se peças com um mesmo material, ao usarem-se granulometrias diferentes, assumindo que se alcançam peças verdes de densidades iguais e considerando todos os restantes parâmetros de impressão similares, a peça construída com o material de maior granulometria, quando sinterizada, exibe menor desvio dimensional quando comparada à peça fabricada em material de menor granulometria, como se pode ver na Figura 31.

Para mais da observação de um incremento de desvio em função de um aumento no tamanho médio considerado para a sinterização, não se pode confirmar uma relação de proporção entre este parâmetro (o tamanho de grão) e o desvio que ocorre em cada uma das peças.

Ao se fazer o módulo dos deslocamentos que ocorrem em cada direção (X, Y, Z), detetou-se que os maiores defeitos ocorrem em Y, sem qualquer diferença para quatro das configurações apresentadas (configurações 4, 8, 10 e 2), tendo menor deslocamento a configuração de 100 $\mu$ m de tamanho de grânulo. Embora o maior deslocamento (em módulo), de 1,82mm (Figura 32) ocorra para quatro das configurações, ao olhar para os deslocamentos que sofridos nas outras direções percebe-se uma tendência decrescente de desvio à medida que se aumenta o tamanho do pó. Pode ver-se claramente que para a configuração 10 à configuração o desvio decresce.

Também se observa que o elemento que sofre maiores desvios continua sendo a pirâmide e é seguida da aresta vertical do canto frontal direito da GB, do topo do pilar, do topo do cilindro 2 e das demais zonas de interseção entre faces da GB. As configurações exibem maiores desvios em Z e menores em X.

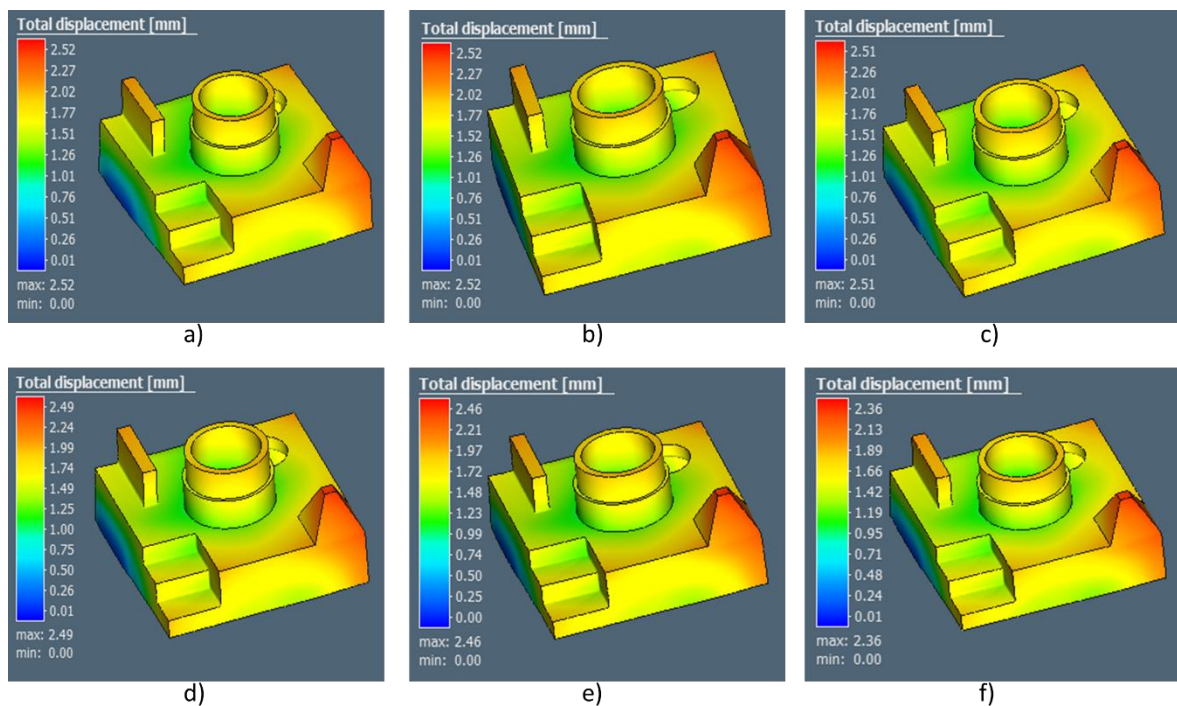


Figura 31 - Desvios totais das peças, a) Configuração 4, b) Configuração 8, c) Configuração 10, d) Configuração 2, e) Configuração 11 e f) Configuração 12.

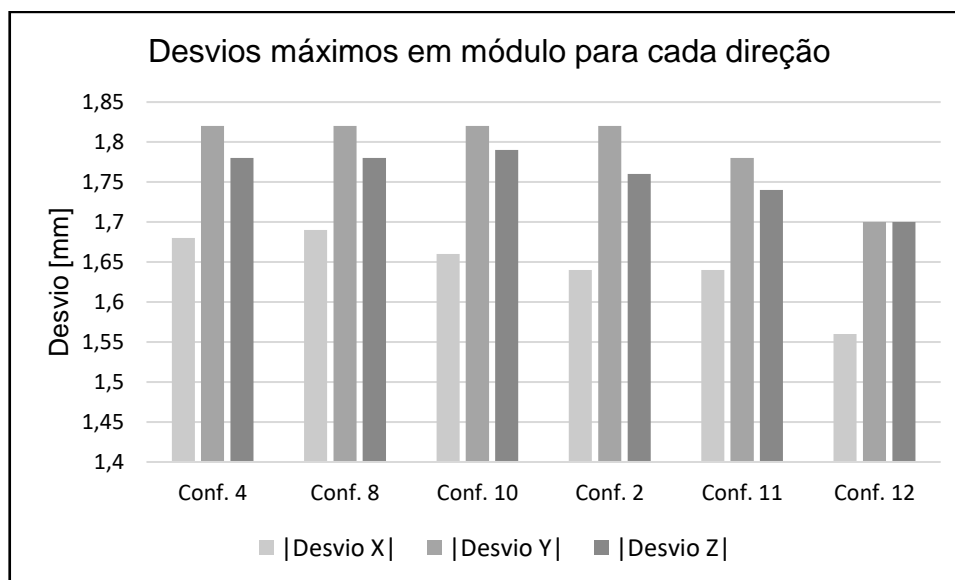


Figura 32 - Módulo dos desvios ocorridos nas configurações, 4, 8, 10, 2, 11 e 12 para as direções X, Y e Z.

## 4.2 Medições experimentais

Após a construção das peças e sinterização de parte delas prosseguiu-se para as medições. Foram feitas medições das dimensões gerais da peça, isto é, da GB da peça e também dos seus atributos. Embora se pretende-se à princípio, que a medição fosse feita por meio de uma CMM, procedeu-se a medição com um paquímetro eletrónico. Os resultados obtidos nestas medições são apresentados nas Tabelas 10 e 11.

Para cada elemento da peça efetuaram-se oito medições considerando-se como a medida de cada um deles a média resultante, sendo também calculado o desvio padrão das medições realizadas para cada um dos atributos.

Tabela 10 - Valores médios obtidos pelas medições das peças verdes e as dimensões do modelo.

Elementos	A verde	B verde	C verde	D verde	E verde	Modelo
DE Cilindro 1	30,45	31,15	30,53	26,64	18,33	26,00
Altura Cilindro 1	9,82	9,90	9,75	8,21	5,93	8,00
DI Cilindro2	23,27	23,94	23,34	20,39	13,89	20,00
DE Cilindro 2	28,14	28,80	28,17	24,72	16,91	24,00
Altura Cilindro 2	18,90	19,33	18,92	15,99	11,35	15,50
DI Cilindro 3	19,29	20,18	19,85	17,04	11,85	17,00
DE Cilindro 3	24,01	25,12	24,62	21,60	14,75	21,00
Altura Cilindro 3	13,57	13,99	13,40	11,47	7,87	11,00
Diâmetro Furo	17,53	17,80	17,50	15,09	10,48	15,00
Largura Pilar	4,88	4,91	4,83	4,24	2,85	4,00
Comp. Pilar	25,77	26,53	25,93	22,64	15,55	22,00

DPE Pilar	8,18	8,19	8,01	6,92	4,93	7,00
Altura Pilar	12,03	12,28	12,09	10,15	7,26	10,00
Largura Pirâmide	17,61	18,17	17,57	15,50	10,52	15,00
Comp. Pirâmide	17,67	18,21	17,56	15,44	10,51	15,00
Comp. Degrau inferior	11,67	11,91	11,64	10,16	7,03	10,00
Altura Degrau inferior	6,02	6,31	6,06	5,31	3,58	5,00
Comp. Degrau médio	11,80	11,82	11,69	10,14	7,00	10,00
Altura Degrau médio	5,93	6,27	5,94	5,15	3,59	5,00
Altura Degrau superior	6,01	6,13	6,04	5,16	3,57	5,00
Largura Degraus	18,70	18,85	18,54	16,17	11,15	16,00
Largura Nervuras	2,39	2,46	2,36	2,11	1,42	2,00
Altura Nervuras	13,45	14,02	13,28	11,57	7,94	11,00
Largura PE	2,42	2,73	2,32	2,41	1,42	2,00
Largura PD	4,61	4,90	4,69	4,40	2,89	4,00
Largura PFu	2,36	2,73	2,38	2,43	1,41	2,00
Largura PFr	3,51	3,83	3,54	3,30	2,14	3,00
Largura GB	70,41	71,26	70,26	61,21	42,25	60
Comp. GB	70,34	71,61	70,60	61,13	42,40	60
Altura GB	18,15	18,65	18,20	15,45	10,89	15

As abreviações nas Tabelas têm os seguintes significados: DE – Diâmetro externo, DI – Diâmetro interno, DPE – Distância à parede esquerda, Comp – Comprimento, PE – Parede esquerda, PD – Parede direita, PFu – Parede do fundo, PFr – Parede da Frente e GB – Geometria base.

*Tabela 11 - Valores médios obtidos pelas medições das peças sinterizadas.*

Elementos	A sinterizada	B sinterizada	C sinterizada	D sinterizada	E sinterizada
DE Cilindro 1	26,04	26,49	25,99	22,64	15,63
Altura Cilindro 1	7,88	8,07	7,98	6,64	4,83
DI Cilindro2	19,60	19,94	19,43	14,87	11,88
DE Cilindro 2	23,97	24,34	23,84	20,85	14,46
Altura Cilindro 2	15,34	15,66	15,42	12,95	9,32
DI Cilindro 3	16,80	17,69	17,34	14,86	10,16
DE Cilindro 3	21,19	22,09	21,75	18,54	12,83
Altura Cilindro 3	10,68	10,98	10,59	9,17	6,32
Diâmetro Furo	14,75	14,86	14,62	12,42	8,74
Largura Pilar	4,14	4,20	4,17	3,69	2,47
Comp. Pilar	21,88	22,19	21,82	19,00	13,25
DPE Pilar	6,94	6,77	7,10	5,89	4,13
Altura Pilar	9,85	10,02	9,98	8,26	5,93
Largura Pirâmide	15,07	15,48	14,97	13,22	9,03
Comp. Pirâmide	15,01	15,45	14,92	13,17	9,02
Comp. Degrau inferior	10,01	10,17	9,91	8,58	6,08
Altura Degrau inferior	5,17	5,29	5,04	4,43	3,01



Comp. Degrau médio	9,84	9,94	9,82	8,49	6,05
Altura Degrau médio	4,89	5,12	4,90	4,15	2,94
Altura Degrau superior	4,96	5,03	5,03	4,14	2,94
Largura Degraus	16,22	16,33	16,10	13,83	9,53
Largura Nervuras	2,07	2,14	2,08	1,88	1,26
Altura Nervuras	10,82	11,23	10,60	0,00	6,44
Largura PE	2,10	2,40	2,10	2,09	1,38
Largura PD	4,01	4,19	4,01	3,65	2,50
Largura PFu	2,08	2,41	2,12	2,08	1,37
Largura PFr	3,06	3,22	3,07	2,78	1,87
Largura GB	60,10	61,14	60,43	52,40	36,12
Comp. GB	59,89	61,04	60,11	51,71	36,08
Altura GB	15,01	15,39	14,91	12,72	9,00

Foi também calculado o desvio padrão respectivo das medições realizadas para cada atributo. Estes valores são apresentados nas Tabelas 12 e 13.

*Tabela 12 - Valores de desvio padrão para cada atributo das peças verdes.*

Elementos	A verde	B verde	C verde	D verde	E verde
DE Cilindro 1	0,06	0,06	0,03	0,03	0,02
Altura Cilindro 1	0,11	0,08	0,08	0,07	0,08
DI Cilindro2	0,15	0,07	0,05	0,06	0,12
DE Cilindro 2	0,10	0,05	0,03	0,03	0,05
Altura Cilindro 2	0,07	0,09	0,04	0,10	0,05
DI Cilindro 3	0,15	0,07	0,05	0,16	0,07
DE Cilindro 3	0,10	0,07	0,03	0,04	0,03
Altura Cilindro 3	0,09	0,14	0,06	0,13	0,05
Diâmetro Furo	0,08	0,21	0,05	0,25	0,04
Largura Pilar	0,06	0,05	0,05	0,07	0,02
Comp. Pilar	0,12	0,08	0,03	0,04	0,02
DPE Pilar	0,03	0,16	0,04	0,06	0,03
Altura Pilar	0,13	0,03	0,03	0,06	0,02
Largura Pirâmide	0,10	0,04	0,05	0,03	0,06
Comp. Pirâmide	0,07	0,05	0,04	0,09	0,05
Comp. Degrau inferior	0,06	0,05	0,08	0,09	0,06
Altura Degrau inferior	0,04	0,04	0,03	0,04	0,05
Comp. Degrau médio	0,10	0,03	0,03	0,09	0,06
Altura Degrau médio	0,07	0,13	0,05	0,11	0,03
Altura Degrau superior	0,12	0,06	0,03	0,10	0,04
Largura Degraus	0,07	0,05	0,03	0,10	0,02
Largura Nervuras	0,06	0,05	0,05	0,03	0,05
Altura Nervuras	0,06	0,15	0,04	0,12	0,03

Largura PE	0,06	0,05	0,01	0,04	0,01
Largura PD	0,06	0,02	0,02	0,03	0,04
Largura PFu	0,04	0,06	0,04	0,05	0,01
Largura PFr	0,04	0,06	0,03	0,05	0,03
Largura GB	0,32	0,17	0,04	0,16	0,10
Comp. GB	0,44	0,11	0,06	0,12	0,04
Altura GB	0,11	0,06	0,05	0,08	0,01

*Tabela 13 - Valores de desvio padrão para cada atributo das peças sinterizadas.*

Elementos	A sinterizada	B sinterizada	C sinterizada	D sinterizada	E sinterizada
DE Cilindro 1	0,04	0,08	0,07	0,11	0,05
Altura Cilindro 1	0,27	0,07	0,08	0,08	0,10
DI Cilindro2	0,25	0,11	0,06	0,33	0,04
DE Cilindro 2	0,12	0,11	0,10	0,11	0,07
Altura Cilindro 2	0,15	0,04	0,13	0,06	0,06
DI Cilindro 3	0,17	0,19	0,17	0,23	0,08
DE Cilindro 3	0,13	0,21	0,19	0,13	0,17
Altura Cilindro 3	0,08	0,08	0,10	0,09	0,09
Diâmetro Furo	0,20	0,25	0,12	0,27	0,02
Largura Pilar	0,11	0,07	0,06	0,06	0,02
Comp. Pilar	0,04	0,11	0,07	0,10	0,05
DPE Pilar	0,13	0,06	0,14	0,06	0,04
Altura Pilar	0,10	0,12	0,08	0,06	0,05
Largura Pirâmide	0,09	0,03	0,08	0,05	0,02
Comp. Pirâmide	0,06	0,03	0,04	0,03	0,03
Comp. Degrau inferior	0,10	0,06	0,10	0,13	0,03
Altura Degrau inferior	0,04	0,05	0,02	0,05	0,02
Comp. Degrau médio	0,05	0,08	0,12	0,09	0,07
Altura Degrau médio	0,05	0,04	0,05	0,06	0,05
Altura Degrau superior	0,06	0,09	0,03	0,25	0,05
Largura Degraus	0,09	0,06	0,21	0,08	0,11
Largura Nervuras	0,01	0,04	0,04	0,04	0,04
Altura Nervuras	0,08	0,11	0,10	0,00	0,05
Largura PE	0,04	0,05	0,02	0,06	0,05
Largura PD	0,07	0,02	0,02	0,04	0,02
Largura PF	0,03	0,06	0,03	0,05	0,12
Largura PF	0,04	0,05	0,03	0,05	0,02
Largura GB	0,73	0,84	0,81	0,22	0,17
Comp. GB	0,27	0,83	0,67	0,17	0,16
Altura GB	0,13	0,34	0,07	0,14	0,09

#### 4.2.1 Densidade sinterizada e densificação

Procedeu-se a pesagem das peças (sinterizadas e verdes) e calculou-se ainda um volume aproximado de cada uma, atentando-se para as dimensões da geometria base, do pilar e dos cilindros, não contabilizando o volume da pirâmide e das nervuras. Com estes valores obtiveram-se valores aproximados de densidade das peças e assim foi possível realizar uma análise sobre a densificação alcançada durante o processo de sinterização das peças. Os valores obtidos nesta são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 14 - Valores estimados de densidade e densificação das peças.

Peça	Peso [g]	Volume [mm <sup>3</sup> ]	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	vs Modelo [%]	Densificação [%]
Averde	195	35950,64	5424,10	40,17	59,09
Asint	193	22365,58	8629,33	4,81	
Bverde	199	39670,45	5016,33	44,66	60,51
Bsint	197	24466,75	8051,74	11,18	
Cverde	192	36382,87	5277,21	41,79	60,48
Csint	191	22553,07	8468,91	6,58	
Dverde	121	25370,32	4769,35	47,39	60,46
Dsint	119	15549,55	7652,96	15,58	
Everde	41	8006,63	5120,76	43,51	63,31
Esint	42	5022,19	8362,89	7,75	

Por meio da sinterização foi possível alcançar densificação entre 59% e 63% da peça verde. A maior densificação ocorreu na menor peça e a menor densificação deu-se na peça compensada em software *Desktop Metal*. As peças B, C e D sofreram uma densificação de aproximadamente 61%.

Na coluna “vs Modelo” são apresentadas, em termos percentuais, a diferença entre a densidade das peças e a densidade do modelo virtual e constatou-se que a peça A que apresentou a menor densificação, teve a densidade mais próxima à do modelo. A peça C, quando comparada à peça D, revelou maior densificação e também densidade mais próxima à densidade do modelo. Esperava-se que as peças com altas densidades na sua fase verde experimentassem menor densificação, porém os resultados não permitiram atestar tal conjectura. Foi possível constatar, no entanto, que maiores densidades de peça verde resultaram em maiores densidades de peça sinterizada.

#### 4.2.2 Peças verdes vs peças sinterizadas

A análise de desvios que as peças sofrem, decorrentes do processo de sinterização foi feita com base nas médias obtidas durante as medições dos elementos das peças. Desta forma os tamanhos de cada elemento foram aproximados às médias calculadas das medições efetuadas sobre cada um dos elementos, tanto para as peças verdes e sinterizadas.

Os resultados das medições foram comparados, entre cada dimensão de cada peça verde e a sua respetiva sinterizada. Os valores dos desvios sofridos pelas peças A, B e C são apresentados na Figura 33 e os desvios das peças D e E na Figura 34.

Foi possível observar que todas as peças apresentaram maior desvio na sua GB, quer seja na sua largura e no seu comprimento. Um dos maiores desvios ocorreu na altura total da peça, que resulta da soma das alturas do cilindro 2 e da GB. Na verdade, a largura, o comprimento e a altura da GB apresentaram sempre os maiores erros dimensionais e ao observar-se detalhadamente as dimensões gerais das peças verificou-se que o processo de sinterização gerou nas peças, uma contração maior no plano OXY e menor na direção do eixo Z. No plano a GB das peças sofreu desvios maiores na direção do eixo Y com 10,45mm, 10,57mm e 10,48mm para as peças A, B e C respetivamente.

Os desvios mínimos foram observados nas larguras da parede do fundo, da parede esquerda e largura das nervuras. Estes são os menores tamanhos atribuídos a peça, com todos correspondendo à 2mm (tamanho nominal). As peças não sofreram o menor desvio sempre no mesmo elemento, mas o quarto menor erro sucedeu estritamente na largura da parede de frente que detém o quarto menor tamanho nominal.

No comprimento da GB das peças D e E foram registados 9,42mm e 6,32mm respetivamente como os maiores desvios ocorridos, ou seja, também sofreram os maiores desvios na direção de Y. Tal como aconteceu com as peças A, B e C, as peças D e E também experimentaram menos desvio na sua altura total comparado com o desvio observado na sua largura e comprimento.

Em relação aos desvios mínimos, estes ocorrem na largura das nervuras para a peça D (0,24mm) e na largura da parede do fundo para a peça E (0,04mm).

Com exceção das dimensões gerais, todas as dimensões sofreram desvios inferiores à 5mm, mas isso aconteceu com as peças A, B, C e E. Já a peça D apresentou um desvio de 5,53mm no diâmetro interior do cilindro 2.

De um modo geral o distanciamento dimensional que ocorre na peça demonstra ter uma relação direta ao tamanho do elemento.

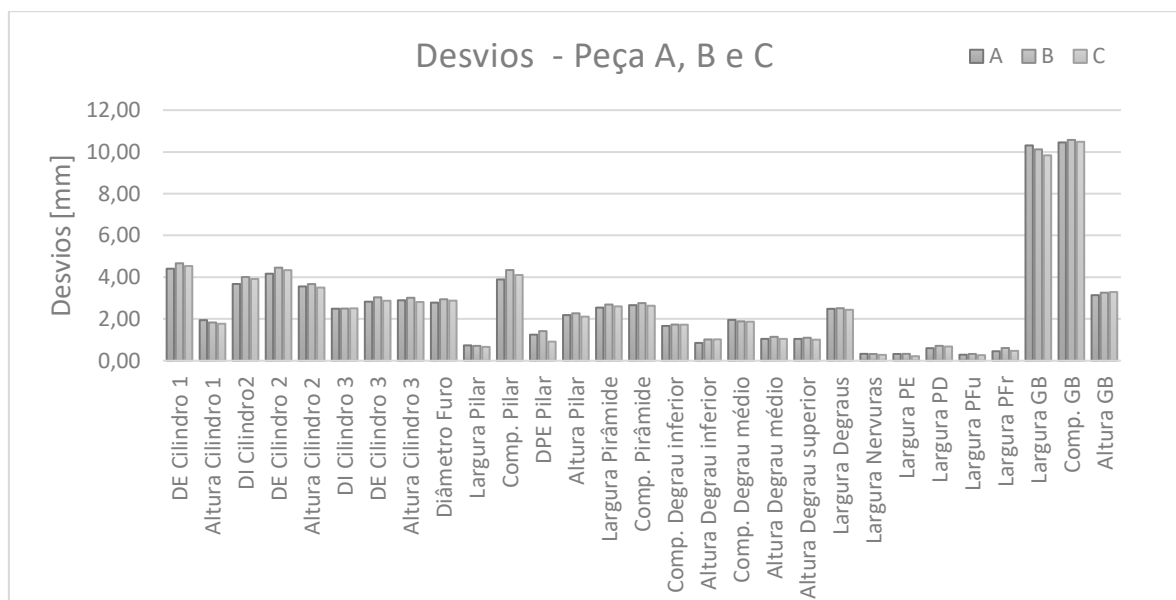


Figura 33 - Desvios sofridos pela peça A, B e C.

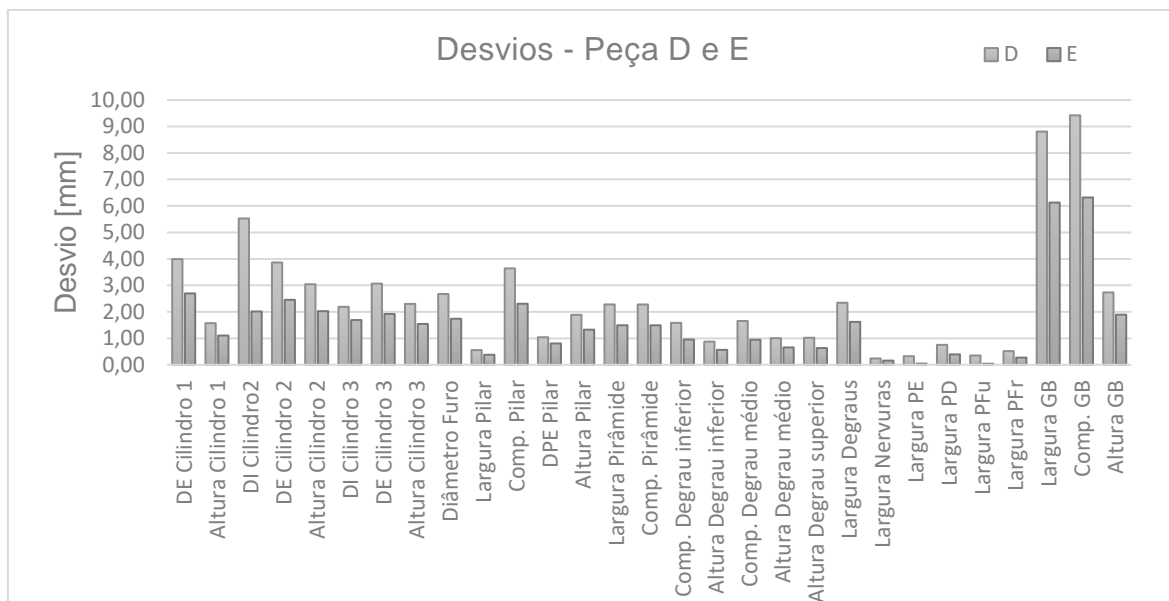


Figura 34 - Desvios ocorridos nas peças D e E.

#### 4.2.3 Peças compensadas

Ao comparar-se os resultados obtidos para as peças sinterizadas A (compensada em software *Desktop Metal*) e B (compensada em *Simufact Additive*), observou-se que dimensionalmente, a peça B apresenta melhores resultados, exibindo desvios inferiores aos que se dão na peça A para todos os elementos com exceção da distância do pilar à parede esquerda onde a Peça A apresenta melhor resultado. Abaixo está a Figura 35 que apresenta os desvios dimensionais existentes entre o modelo e as peças A e B sinterizadas.

Para a peça A sinterizada registou-se desvio nulo em relação ao comprimento do degrau inferior e o maior desvio observado nesta peça foi de 0,41mm ocorrido no diâmetro interior do cilindro 2. Entre as larguras das paredes, o melhor resultado foi observado na parede direita (0,01mm) e o maior erro sucedeu na parede esquerda (0,10mm) que tem a metade da espessura da parede direita. A geometria base (GB) sofreu maior desvio no seu comprimento (0,11mm) e menor na sua altura (0,01mm).

Das trinta cotas que foram medidas, a peça A mostrou ser a que mais se aproxima do modelo em 73% delas. Os valores de desvios que ocorreram na peça A sinterizada revelaram que esta compensação foi menos eficiente que a compensação da peça D apenas na largura da parede esquerda em que se registou 0,09mm de desvio na peça D (Figura 36). A comparação entre as peças A, B e D sinterizadas, mostrou que esta última tem os maiores desvios em aproximadamente 87% das cotas medidas, com um desvio máximo de 8,29mm.

Em diante ao citar-se a peça apenas pela letra, estará se referindo a peça na sua fase sinterizada.

O desvio máximo da peça B foi de 1,14mm, na largura da GB e o desvio no diâmetro exterior do cilindro 3 foi maior do que o sucedido no comprimento da GB (1,04mm). Os menores desvios de cotas de alturas dos atributos das peças, foram registados na peça B com exceção apenas da altura da GB, que sofreu menor desvio na peça A.

Estes resultados levam a inferir que entre as duas compensações feitas, a compensação em Simufact foi menos eficaz no que concerne a redução dos desvios dimensionais na peça. Apresentando os menores desvios em 70% das cotas, a peça A foi a que mais se aproximou do modelo e, portanto, a melhor compensação foi a compensação feita em software *Desktop Metal*.

Verificou-se ainda que, com exceção da peça B, a GB das peças sofreu sempre um desvio no seu comprimento superior ao desvio ocorrido na sua largura que por sua vez, foi superior ao erro na altura, como este efeito é constatado para a maior parte das peças, então pôde deduzir-se que durante o processo de sinterização a peça sofreu maior contração no plano OXY e menor na direção do eixo Z.

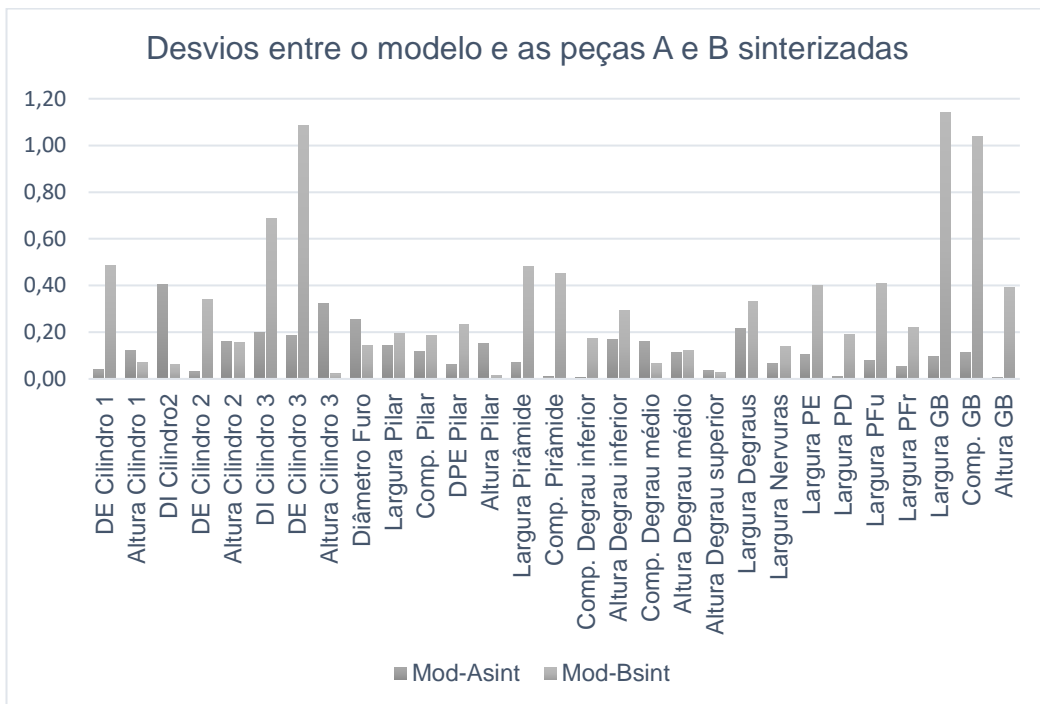


Figura 35 - Comparação entre as peças sinterizadas A e B.

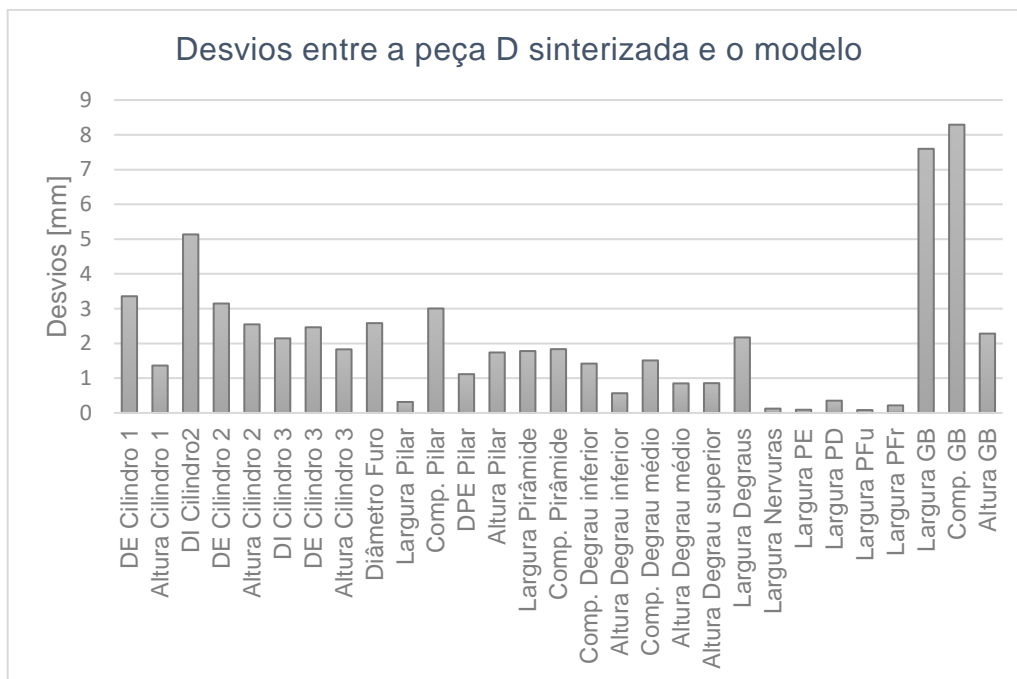


Figura 36 - Devios entre a peça D sinterizada e o modelo proposto.

#### 4.2.4 Peças sinterizadas B, C e E

As peças sinterizadas B e C apresentaram resultados imprevistos, pois como se pode ver na Figura 37, a peça B sinterizada, que corresponde a peça compensada em simufact e ainda com aplicação de uma escala para compensar o encolhimento da peça, sofre desvios maiores aos desvios ocorridos sobre a peça C que é uma versão do modelo sobre o qual apenas se aplicou uma escala, também para a compensação do encolhimento resultante da sinterização. Esperava-se, portanto que a peça compensada apresentasse melhores resultados, exibindo menos desvios dimensionais e de forma, aproximando-se, deste modo, mais do modelo virtual proposto para este estudo.

O erro máximo na peça C ocorreu na dimensão do diâmetro externo do cilindro 3 e o mesmo corresponde à aproximadamente 65% do maior desvio que a peça B sofreu, este desvio (1,14mm) dá-se na largura da GB. Os três maiores desvios da peça B são superiores à 1mm e dão-se na largura da GB, diâmetro externo do cilindro 3 (1,09mm) e no comprimento da GB (1,04mm), enquanto os três maiores erros na peça C, sucedem no DE Cilindro 3, DI Cilindro 2 (0,57mm) e na largura da GB (0,43mm). Por outro lado, os erros mínimos para as duas peças são iguais (0,01mm), sendo verificados no DE cilindro 1 e na largura da parede direita para a peça C e na altura do pilar para a peça B e ambas apresentam o mesmo erro (0,03mm) na altura do degrau superior. Importa aqui salientar que embora a o DE cilindro 1, seja aproximadamente 6,5mm maior do que a largura da parede direita, sofre um desvio aproximadamente igual.

Embora de uma forma geral, em relação aos erros dimensionais, a peça C tenha um resultado melhor, ela experimenta desvios maiores do que a peça B em cinco dimensões, no DI cilindro 2, altura do cilindro 3, diâmetro do furo, altura do pilar e no comprimento do degrau médio.

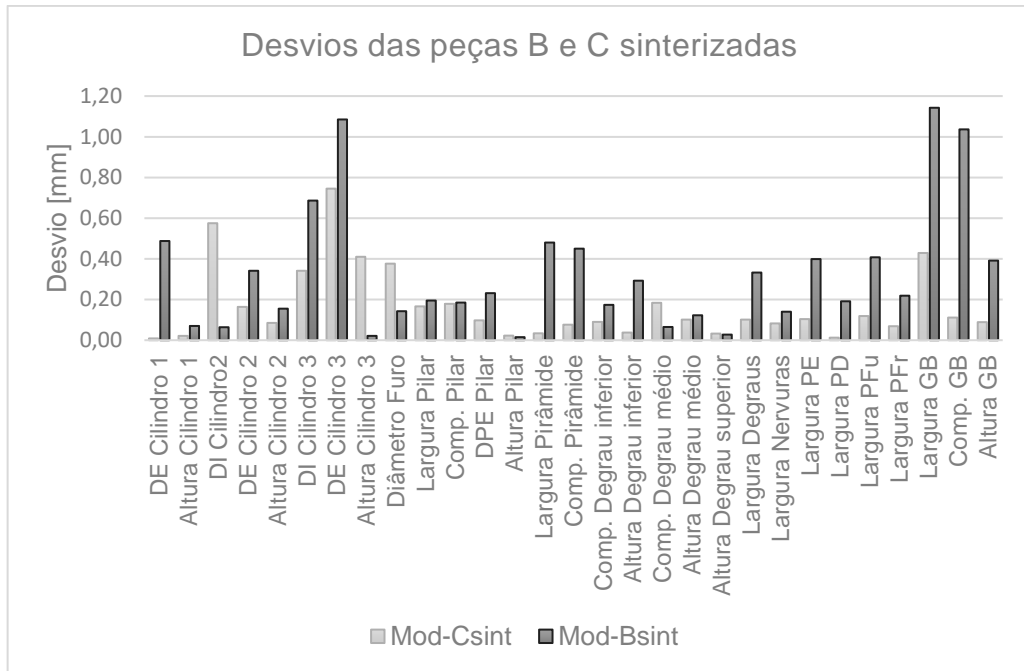


Figura 37 - Desvios ocorridos nas peças B e C sinterizadas em relação ao modelo proposto.

Tal como registado quando se analisou a diferença entre as peças verdes e as peças sinterizadas, a peça E sinterizada tem como menores valores de desvio em relação ao modelo virtual, os desvios observados nas menores dimensões (Figura 38). Em ordem crescente do valor de erro registado, os sete menores desvios deram-se nas seguintes medições: largura da parede esquerda (0,06mm), largura da parede do fundo (0,07mm), largura das nervuras (0,18mm), largura da parede de frente (0,29mm), largura da parede direita (0,38mm), largura do pilar (0,41mm) e altura do degrau inferior (0,59mm).

O erro na largura do pilar é de aproximadamente 6 vezes inferior ao do seu comprimento, esta relação é aproximadamente a mesma entre a largura do pilar (4mm) e o seu comprimento (22mm). Esta relação pôde ser observada para as dimensões de um mesmo elemento, e não em todas as comparações efetuadas para dimensões de elementos diferentes. A relação entre as larguras da PD e PE, por exemplo é de 2, porém o desvio que se dá na PD é de aproximadamente 6 vezes superior ao que sofre a PE.

Para as dimensões ou tamanhos iguais obtiveram-se erros cuja razão era aproximadamente um, como é o caso da pirâmide que possui uma base quadrada e a razão do erro do seu comprimento e a sua largura é de 1,004mm. Diferente do que acontece com a relação entre tamanhos diferentes, a proximidade entre a relação de erros e a relação de tamanhos verificou-se para todas as medições.





Figura 38 - Desvios ocorridos na peça E sinterizada em relação ao modelo menor.

Por observação e análise dos resultados que foram extraídos das medições efetuadas sobre as peças B e C, foi possível verificar que existe uma direção em que o processo demonstra ser mais suscetível a erros, como se pode ver pelas Figuras 39, 40 e 41.

Para analisar os erros com base nas suas direções foram considerados os atributos nos quais foi possível fazerem-se medições em todas as direções (X, Y e Z) e fazer a distinção destas, por esta razão não foram usados nem cilindros nem furos.

Na peça C, viu-se que dos quatro elementos avaliados, metade sofre maior desvio em X e outra metade em Y, sendo que o maior de todos os desvios ocorre em X, especificamente na largura da geometria base.

A peça E, embora apresente um resultado semelhante ao da peça C, tendo metade dos maiores erros em X e outra metade Y, os mesmos não se dão nos mesmos elementos em que sucedem na peça C, com exceção do pilar, onde para os dois se verificou maior erro em Y. Tal como na peça C e como já era esperado pelas análises anteriores efetuadas, o maior erro na peça E, dá-se também na GB, porém na direção Y, isto é, no comprimento da GB, mas este difere apenas 0,04mm do desvio ocorrido em X.

Já na peça B, diferente das demais, todos atributos experimentaram maior afastamento dimensional em X. Considerando estes valores e os valores que se obtiveram nas outras peças, percebe-se que o eixo X parece ser mais sensível à erros dimensionais.

Os resultados também mostram que as dimensões em Z, são menos afetadas pelo processo, pelo menos dimensionalmente, tendo no pior dos casos (para a peça B), apresentado o menor erro apenas em um dos elementos (pilar). Para a peça E, registou-se apenas um elemento (pilar) no qual o menor desvio não foi em Z.

Já na peça C, a direção Z é a que apresenta menos desvios dimensionais em todos os atributos analisados.

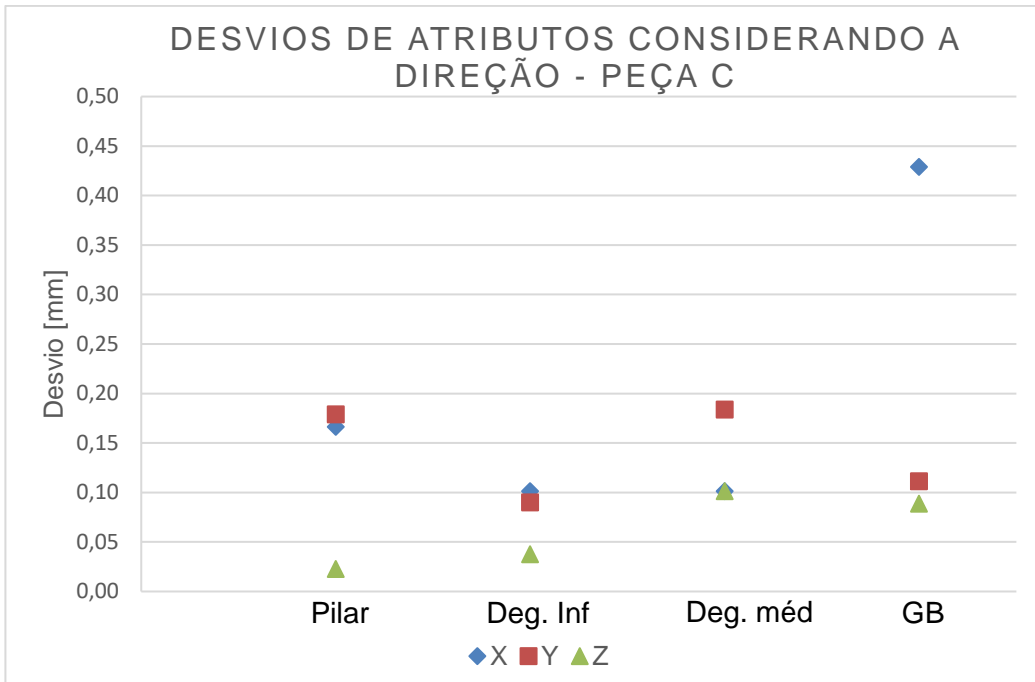


Figura 39 - Desvios ocorridos na peça C sinterizada em cada direção.

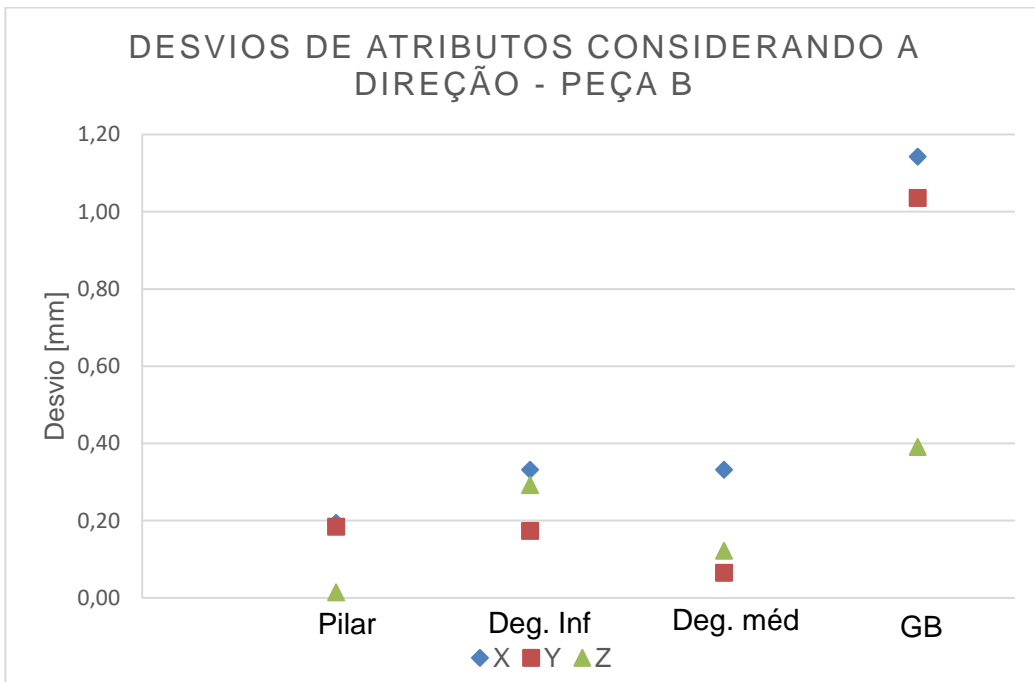


Figura 40 - Desvios ocorridos na peça B sinterizada em cada direção.

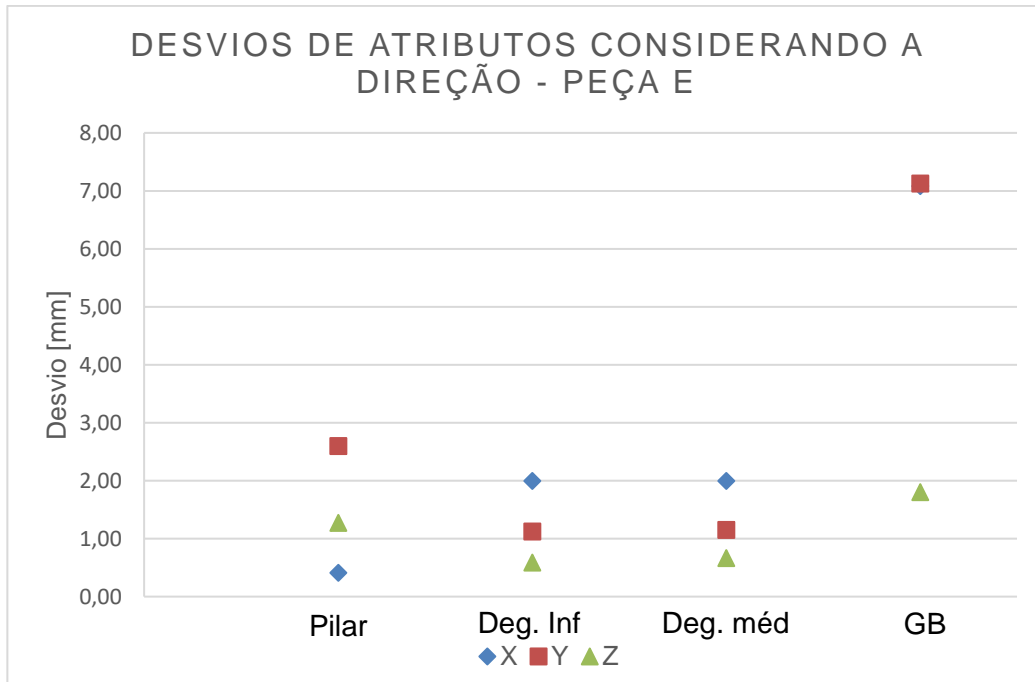


Figura 41 - Desvios ocorridos na peça E sinterizada em cada direção.

### 4.3 Graus de tolerância IT

Após as medições das peças e obtenção dos desvios ocorridos em cada uma delas, considerou-se necessário enquadrar a peça D sinterizada nos graus de toleranciamento IT, com base nos resultados obtidos. Desta forma pode fazer-se uma caracterização mais específica da peça e também que permite que se tenha uma boa percepção de quais são as capacidades do processo usado de acordo com um sistema de toleranciamento que já é reconhecido e amplamente usado em vários estudos de GD&T, todavia não é muito aplicado nas pesquisas em MA. Este tipo de caracterização é de grande importância, permitindo rapidamente aos potenciais compradores e ou usuários a saberem qual é a precisão do processo (ou máquina).

Para cada dimensão medida, calculou-se o erro e dividiu-se pelo fator de tolerância  $i$ , que varia para os diferentes intervalos de tamanhos básicos da ISO e igual para todos os tamanhos pertencentes ao mesmo intervalo, desta divisão resulta o valor  $n$ , da equação abaixo e que corresponde ao número de vezes que o fator de tolerância  $i$ , cabe no erro de cada dimensão medida.

$$n = \frac{1000 \cdot |D_m - D_n|}{i} \quad (1)$$

A classificação do grau de tolerância IT fez-se observando os valores de  $n$  que estão expostos na Tabela 14 e os valores do fator de tolerância  $i$ , calculados pela equação (2). A equação (3) foi usada para calcular o valor de  $D$ , em que  $D_1$  e  $D_2$  representam os extremos de cada intervalo de tamanhos.

$$i = 0,45 \cdot \sqrt[3]{D} + 0,001 \cdot D \quad (2)$$

Com: 
$$D = \sqrt{D_1 \cdot D_2} \quad (3)$$

Tabela 15 - Graus IT de acordo com a ISO 286-1:1988 (Minetola et al., 2020).

Range		Standard tolerance grades													
Above	Up to	IT 5	IT 6	IT 7	IT 8	IT 9	IT 10	IT 11	IT 12	IT 13	IT 14	IT 15	IT 16	IT 17	IT 18
1 mm	500 mm	7i	10i	16i	25i	40i	64i	100i	160i	250i	400i	640i	1000i	1600i	2500i

Com os resultados dos cálculos fez-se primeiramente uma análise geral da peça D. Nesta análise se observou que para as medidas da peça D que se enquadram no segundo intervalo de tamanhos básicos da ISO (>1 a 3mm) são de grau IT14 como mostra a Figura 42. Já para os intervalos >18 à 30mm e >50 à 80mm, os desvios são superiores à tolerância exigida para o grau IT18.

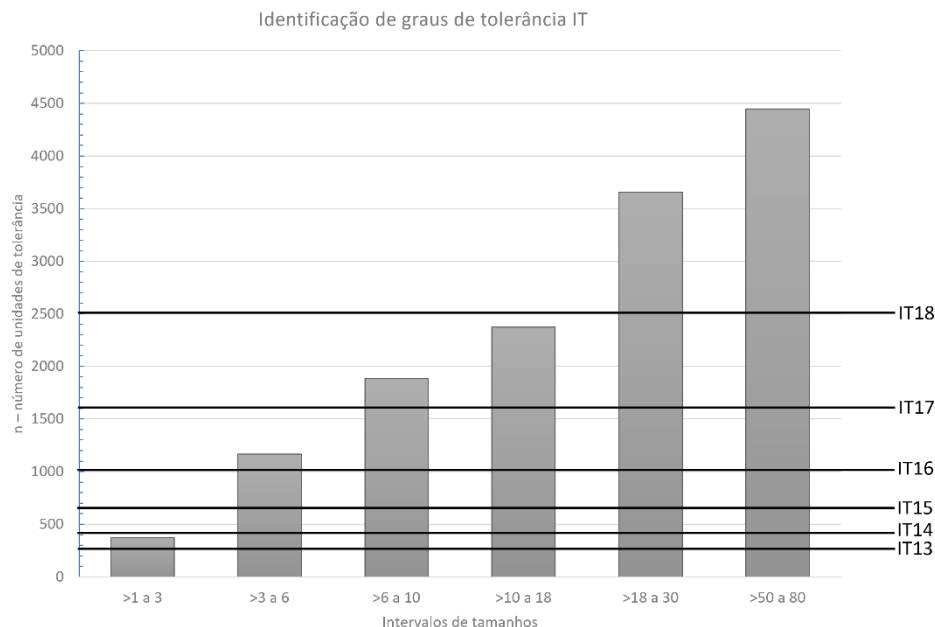


Figura 42 - Classificação IT dos tamanhos básicos usando o percentil 95 do número de unidades de tolerância.

Fez-se ainda uma análise sobre todas as peças, se atentando para cada um dos elementos individualmente. Desta análise fizeram-se as seguintes observações: As peças D e E apresentaram as piores classificações IT, ambas tiveram os seus atributos enquadrados em graus superiores ao IT17. As demais peças não tiveram nenhum atributo classificado com grau superior ao IT15. As peças que apresentaram melhores resultados foram as peças A e C como pode ser visto na Figura 43, onde o número 19 foi para representar os desvios que foram superiores às tolerâncias IT18 para cada gama de tamanhos básicos.

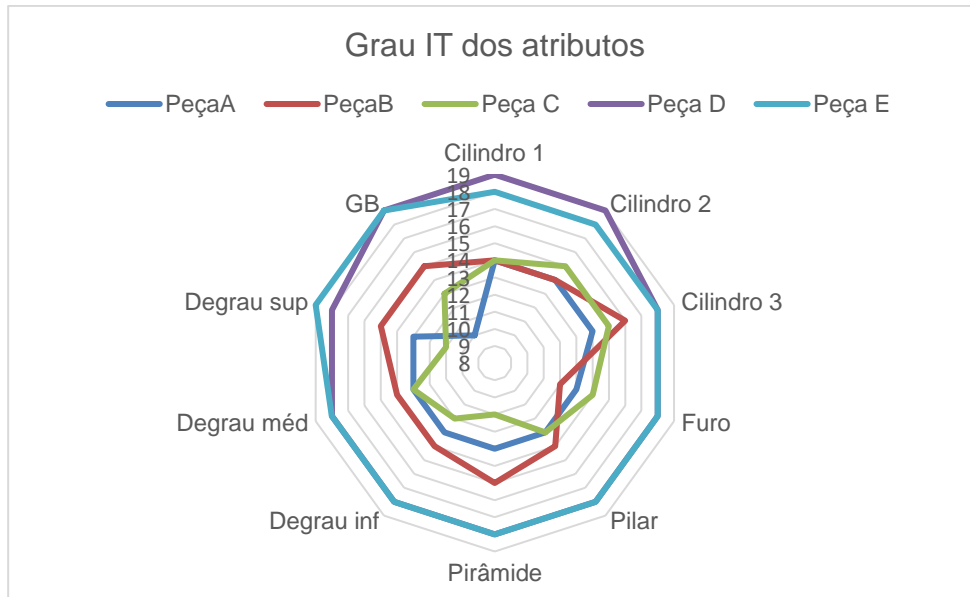


Figura 43 - Grau IT de cada um dos atributos das peças.

#### 4.4 Toleranciamento Geométrico

Tal como a classificação dos graus de tolerância IT a análise geométrica efectou-se sobre elementos da peça D sinterizada que podem ser vistos na Figura 44. As medições para esta análise foram feitas por meio de uma CMM com recurso ao software *Autodesk PowerInspect*.

Os resultados desta inspeção são apresentados na tabela abaixo, onde PIncD e PIncFr fazem referência aos planos inclinados da pirâmide que possuem uma aresta comum com a parede direita e com a parede frontal da GB respetivamente.

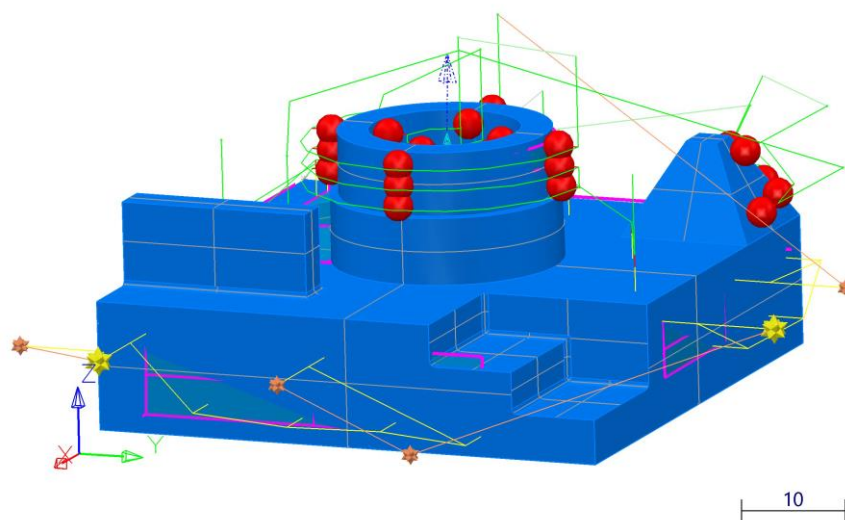


Figura 44 - Elementos medidos na CMM.

*Tabela 16 - Valores de desvios geométricos obtidos.*

Dado/ Elemento	Número de Pontos	Tipologia	Desvio
FPE	6	Planeza	0,402
FPFr	5	Planeza	0,115
Cilindro 2 Plano	12+12	Cilindricidade	0,165
GB	8	Planeza	0.078
PlncD	3	Angularidade	2,824°
PlncFr	3	Angularidade	2,558°

Pelos resultados apresentados na Tabela 15, pode dizer-se que com exceção da face da parede frontal (FPFr) que apresenta uma planeza de 0,115mm, correspondente ao grau médio de tolerâncias individuais, todos os outros elementos exibem desvios que os colocam acima das tolerâncias de grau médio, isto para cada uma das tipologias de toleranciamento geométrico examinados. Por exemplo, o valor para a tolerância individual de planeza de grau médio é 0,1mm/m e para cilindridade 0,04mm/m.

## 5 Conclusões

Por meio do trabalho realizado, foi possível constatar pelas simulações feitas que existe uma relação inversa entre a densidade da peça verde e a contração sofrida pela peça produzida corroborando com os resultados de estudos já feitos sobre os efeitos da densidade da PV sobre a qualidade da peça final. Peças verdes de maior densidade resultam em peças com menos defeitos dimensionais.

Pela simulação também se observou uma relação direta entre o tamanho do pó e o desvio dimensional que a peça sofre.

Tendo, o presente trabalho como propósito específico o controlo dimensional de uma peça metálica construída por BJ, ou seja, análise dimensional de uma peça produzida por MBJ, por meio da simulação do processo e também por aplicação da metrologia sobre a peça produzida pôde-se fazer as observações abaixo.

Na análise comparativa das peças verdes e as peças sinterizadas constatou-se uma grande variação do tamanho da geometria base, especialmente no que concerne a sua largura e comprimento. Isto mostra que as peças produzidas em MBJ experimentaram maior encolhimento nas direções X e Y. O que pode ter ocorrido pelo facto da altura da GB da peça ser inferior as demais dimensões, pois se constatou a existência de uma relação direta entre os tamanho e os desvios medidos.

Durante a inspeção das peças B e C sinterizadas, foi registado que dois dos três maiores desvios ocorridos em ambas as peças se deram na largura da GB e no DE do cilindro 3, sendo que se verificou que a peça B experimenta maiores deslocamentos. Este resultado era inesperado, uma vez que com a compensação da peça em *Simufact* se pretendia obter reduzir os erros dimensionais e geométricos da peça.

Examinando a peça E observou-se, para um mesmo atributo uma relação entre razão de tamanhos e a razão de desvios, ou seja, o desvio mostra ser proporcional à variação de tamanho, como se viu por exemplo para o caso do pilar em que a razão comprimento-altura é de aproximadamente seis tal como acontece com a razão de desvios de comprimento e largura. Esta relação não é muito verificada nas restantes peças e não se atesta em todos elementos da peça E.

Além do mais olhando para as peças B, C e E reparou-se que o eixo X parece apresentar uma maior suscetibilidade aos erros, ocorrendo-se nesta direção os maiores desvios da B para os elementos averiguados.

Houve uma considerável diferença entre os resultados alcançados durante as simulações e os alcançados durante as medições feitas sobre as peças finais. Não se constatou um alinhamento que fosse suficiente para se considerar que as simulações, para este estudo, tenham simulado de forma credível o processo de sinterização usado na produção das peças. Embora as peças construídas não tenham o tamanho médio do grânulo nem a densidade da peça verde iguais aos modelos simulados, esperava-se que mesmo apresentando desvios em certa medida diferentes, fosse possível prever com alguma certeza as zonas em que a peça apresentaria mais defeitos. Por outro lado, as zonas de menor deslocamento observados durante a simulação, foram também as zonas de menor erro registados durante as medições.

Segundo os resultados obtidos, o melhor grau IT que o processo foi capaz de atingir na peça D foi o IT14 e este apenas para a gama de tamanhos básicos até 3mm inclusive. Com quatro outras gamas alcançando grau acima de IT17, o processo revela ser pouco preciso, como também revelam os resultados da análise geométrica. As duas melhores classificações foram verificadas nas peças A e C.

## 5.1 Estudos futuros

Visto que, como já foi mencionada anteriormente, diversos parâmetros do processo de BJ exercem algum efeito sobre a sua precisão dimensional e geométrica e, portanto, sobre a qualidade final das peças produzidas, seria importante que se fizesse um estudo sobre cada um destes parâmetros, especialmente os que mais impacto têm sobre a precisão do processo. Como por exemplo a perfil de sinterização.

Um estudo semelhante a este, podendo ser com o mesmo modelo, porém se usando uma CMM para efetuar as medições e com maior incidência sobre os defeitos geométricos sofridos pela peça.

Também se considera importante um estudo sobre uma peça com mais elementos e de formas simples como cubos e retângulos (quer sejam saliências quer sejam furos), seria de extrema importância para analisar melhor que relação existe entre a precisão dimensional e geométrica e as direções (X, Y e Z) e a relação entre os tamanhos de um mesmo elemento e os desvios que nele ocorrem.

Com o uso de uma peça como a mencionada acima propor-se-ia ainda um estudo que averiguasse a classificação do grau IT de cada um dos atributos da peça e não da peça de um modo geral, por forma a compreender-se se existe alguma forma em que o processo de MBJ seja mais preciso (geometricamente) do que as outras.

Realizar um estudo similar com a construção de *setters* para averiguar o impacto deste na sinterização da peça e conseqüentemente sobre a precisão dimensional e geométrica da peça final.



## Referências Bibliográficas

- ADDISPACE. (2021). *State of the Art of additive Manufacturing Technologies: Technologies, Trends, opportunities, Challenges and Applications to the Aerospace Sector*.
- Additive Manufacturing: Fundamentals and Advancements* - Manu Srivastava, Sandeep Rathee, Sachin Maheshwari, TK Kundra - Google Livros. (2019). [https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=9YavDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT20&dq=The+3D+opportunity+primer:+The+basics+of+additive+manufacturing&ots=le1Bfz-OGp&sig=o0oaY8V65mXYawCUqE7QBBajn3k&redir\\_esc=y#v=onepage&q=The 3D opportunity primer%3A The basics of](https://books.google.pt/books?hl=pt-PT&lr=&id=9YavDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT20&dq=The+3D+opportunity+primer:+The+basics+of+additive+manufacturing&ots=le1Bfz-OGp&sig=o0oaY8V65mXYawCUqE7QBBajn3k&redir_esc=y#v=onepage&q=The+3D+opportunity+primer%3A+The+basics+of)
- Ameta, G., Lipman, R., Moylan, S., & Witherell, P. (2015). Investigating the Role of Geometric Dimensioning and Tolerancing in Additive Manufacturing. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 137(11). <https://doi.org/10.1115/1.4031296>
- Ameta, G., Moylan, S., Witherell, P., & Lipman, R. (2015). Challenges in tolerance transfer for additive manufacturing. *Proceedings - ASPE 2015 Spring Topical Meeting: Achieving Precision Tolerances in Additive Manufacturing, January*, 129–135.
- Aubin, R. (1994). A world wide assessment of rapid prototyping technologies. *Proc., Solid Freeform Fabrication Symposium*. <http://utwired.engr.utexas.edu/lff/symposium/proceedingsArchive/pubs/Manuscripts/1994/1994-15-Aubin.pdf>
- Bai, Y., Wagner, G., & Williams, C. B. (2017). Effect of particle size distribution on powder packing and sintering in binder jetting additive manufacturing of metals. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 139(8), 1–6. <https://doi.org/10.1115/1.4036640>
- Bai, Y., Wagner, G., & Williams, C. B. (2020). Effect of bimodal powder mixture on powder packing density and sintered density in binder jetting of metals. *Proceedings - 26th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2015*, 758–771.
- Byun, H. S., & Lee, K. H. (2003). Design of a new test part for benchmarking the accuracy and surface finish of rapid prototyping processes. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2669, 731–740. [https://doi.org/10.1007/3-540-44842-x\\_74](https://doi.org/10.1007/3-540-44842-x_74)
- Carreira, A. A. (2017). *Design e otimização de peças estruturais metálicas para processos de fabricação aditiva*.
- Dass, A., & Moridi, A. (2019). State of the Art in Directed Energy Deposition: From Coatings. <https://doi.org/10.3390/coatings9070418>
- Dimitrov, D., Van Wijck, W., Schreve, K., & De Beer, N. (2006). Investigating the achievable accuracy of three dimensional printing. *Rapid Prototyping Journal*, 12(1), 42–52. <https://doi.org/10.1108/13552540610637264>
- Dimitrov, D., Van Wijck, W., Schreve, K., De Beer, N., & Meijer, J. (2003). An investigation of the capability profile of the three dimensional printing process with an emphasis on the achievable accuracy. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52(1), 189–192. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60562-9](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60562-9)
- Dini, F., Ghaffari, S. A., Jafar, J., Hamidreza, R., & Marjan, S. (2019). A review of binder jet process parameters; powder, binder, printing and sintering condition. *Metal Powder Report*, 75(2), 95–100. <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2019.05.001>
- Gebhardt, A. (2011). Understanding Additive Manufacturing. In *Understanding Additive Manufacturing*. HANSER. <https://doi.org/10.3139/9783446431621>
- Gibson, Ian; Rosen, David; Stucker, B. (2018). *Additive manufacturing technologies*. In

- Springer (Second, Vol. 100, Issue 2). <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2112-6>
- Islam, M. N., Boswell, B., & Pramanik, A. (2013). An investigation of dimensional accuracy of parts produced by three-dimensional printing. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, 1 LNECS(July), 522–525.
- Islam, M. N., & Sacks, S. (2016). An experimental investigation into the dimensional error of powder-binder three-dimensional printing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82(5–8), 1371–1380. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7482-7>
- Kim, G. D., & Oh, Y. T. (2008). A benchmark study on rapid prototyping processes and machines: Quantitative comparisons of mechanical properties, accuracy, roughness, speed, and material cost. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 222(2), 201–215. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM724>
- Kruth, J. P., Leu, M. C., & Nakagawa, T. (1998). Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 47(2), 525–540. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63240-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63240-5)
- Lee, S.-J. J., Sachs, E., & Cima, M. (1993). *Powder Layer Position Accuracy in Powder-Based Rapid Prototyping*.
- Li, M., Du, W., Elwany, A., Pei, Z., & Ma, C. (2020). Metal binder jetting additive manufacturing: A literature review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 142(9). <https://doi.org/10.1115/1.4047430>
- Lu, K., & Reynolds, W. T. (2008). 3DP process for fine mesh structure printing. *Powder Technology*, 187(1), 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.12.017>
- Machado, A. C., & Vieira, T. (2014). *Influência das condições de processamento da fusão seletiva por laser ( SLM ) nas propriedades mecânicas do aço 316 L*. Universidade de Coimbra.
- Marques, S., Santos, E. C., & Souza, A. F. de. (2015). *Fusão seletiva a laser para fabricação de peças metálicas com geometrias*. July. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1106.8001>
- Materials Used in Selective Laser Melting (SLM)*. (2021). <https://matmatch.com/learn/material/materials-used-in-selective-laser-melting-slm>
- Minetola, P., Galati, M., Calignano, F., Iuliano, L., Rizza, G., & Fontana, L. (2020). Comparison of dimensional tolerance grades for metal AM processes. *Procedia CIRP*, 88, 399–404. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.069>
- Miyajima, H., Rahman, K. M., Da, M., & Williams, C. B. (2020). Effect of fine powder particles on quality of binder jetting parts. *Additive Manufacturing*, 36, 101587. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101587>
- Molitch-Hou, M. (2018). Overview of additive manufacturing process. In *Additive Manufacturing: Materials, Processes, Quantifications and Applications* (pp. 1–38). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812155-9.00001-3>
- Nikhil. A. (2017a). *3D Printing Processes - Powder Bed Fusion*. EngineersGarage. [https://www.engineersgarage.com/article\\_page/3d-printing-processes-powder-bed-fusion-part-5-8/](https://www.engineersgarage.com/article_page/3d-printing-processes-powder-bed-fusion-part-5-8/)
- Nikhil. A. (2017b). *Vat PPStereolithography-3D-Printing-Machine-03*. <https://www.engineersgarage.com/3d-printing-processes-vat-photo-polymerisation-part-3-8/>
- Palmero, E. M., & Bollero, A. (2020). 3D and 4D Printing of Functional and Smart Composite Materials. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819724-0.00008-2>
- Portela, S. (2019). *Sheet Lamination*. Additive Manufacturing Technologies. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7_9)
- Prokop, S. (2017). *Binder Jetting 3D-Druck-Verfahren*. <https://www.protiq.com/3d-druck/verfahren/binder-jetting/>

- Rebaioli, L., & Fassi, I. (2017). A review on benchmark artifacts for evaluating the geometrical performance of additive manufacturing processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(5–8), 2571–2598. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0570-0>
- Rehme, O. (2010). *Cellular Design for Laser Freeform Fabrication*. <https://cuvillier.de/de/shop/publications/824>
- S.Moylan, J. Slotwinski, A. Cooke, K. Jurrens, M. A. D. (2012). Proposal for a Standardized Test Artifact for Additive. *Solid Freeform Fabrication Symposium*, 902–920. [https://ws680.nist.gov/publication/get\\_pdf.cfm?pub\\_id=911953](https://ws680.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=911953)
- Sagacious IP - Editorial team. (2021). *Material Extrusion*. The Evolution of Aerospace 3D Printing – Methods, Materials & Patents. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7_6)
- Sing, S. L., Tey, C. F., Tan, J. H. K., Huang, S., & Yeong, W. Y. (2019). 3D printing of metals in rapid prototyping of biomaterials: Techniques in additive manufacturing. In *Rapid Prototyping of Biomaterials: Techniques in Additive Manufacturing* (pp. 17–40). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102663-2.00002-2>
- Sireesha, M., Lee, J., Kiran, A., Babu, V., Kee, B., & Ramakrishna, S. (2018). A review on additive manufacturing and its way into the oil and gas industry. <https://doi.org/https://doi.org/10.1039/C8RA03194K>
- Spears, T. G., & Gold, S. A. (2016). In-process sensing in selective laser melting (SLM) additive manufacturing. *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, 5(1), 16–40. <https://doi.org/10.1186/s40192-016-0045-4>
- Srinivasulu Reddy, K., & Dufera, S. (2016). ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES. *BEST*, 4(7), 89–112. [www.bestjournals.in](http://www.bestjournals.in)
- Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., Bernard, A., Schulz, J., Graf, P., Ahuja, B., & Martina, F. (2016). Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65(2), 737–760. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>
- Tofail, S. A. M., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. (2018). Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, 21(1), 22–37. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>
- Vaezi, M., & Chua, C. K. (2011). Effects of layer thickness and binder saturation level parameters on 3D printing process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(1–4), 275–284. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2821-1>
- Yap, C. Y., Chua, C. K., Dong, Z. L., Liu, Z. H., Zhang, D. Q., Loh, L. E., & Sing, S. L. (2015). Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews*, 2(4). <https://doi.org/10.1063/1.4935926>
- Yusuf, S. M., & Gao, N. (2017). Influence of energy density on metallurgy and properties in metal additive manufacturing. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, 33(11), 1269–1289. <https://doi.org/10.1080/02670836.2017.1289444>
- Ziaee, M., & Crane, N. B. (2019). Binder jetting: A review of process, materials, and methods. *Additive Manufacturing*, 28(May), 781–801. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.05.031>