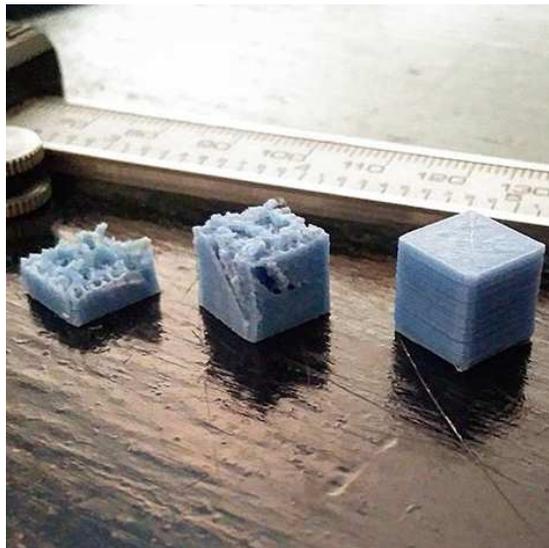


MATEUS CANHÃO
DA COSTA SERRA

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO IMPRESSÃO 3D POR FFF



Trabalho de Projeto Final III
Mestrado em Engenharia de Produção

ORIENTADORES

Prof. Doutor Paulo Moita

Prof. Doutor Ricardo Cláudio

fevereiro 2021

JÚRI

Presidente: Doutor José Filipe Castanheira Pereira
Antunes Simões, ESTSetúbal/IPS

Orientador: Doutor Paulo Jorge Pires Moita,
ESTSetúbal/IPS

Arguente: Doutor Aníbal Jorge de Jesus Valido,
ESTSetúbal/IPS

fevereiro 2021

Aproveito dito espaço para dedicar este tema de estudo em primeiro lugar à minha família, que me educou e me ajudou a ser uma pessoa que busca o conhecimento científico, ao invés de acreditar cegamente no vago e infundamentado. Em segundo lugar a todos os meus professores, que me abriram a mente e me fizeram questionar até o mais banal acontecimento quotidiano. E por fim, aos meus amigos, em especial aos do curso de Licenciatura em Eng. Mecânica da ESTS/IPS, do Núcleo de Curso da mesma e aos da ESTuna – Tuna de Engenharia de Setúbal, que nunca me deixaram desistir e me mostraram por A+B que a vida não é só trabalho nem só folia, mas sim um misto bem equilibrado, que se leva melhor quando bem acompanhado.

Resumo

A maioria dos processos de impressão 3D, incluindo o FFF, envolve a transferência de calor para a peça que está a ser construída, provocando variações dimensionais, geométricas e tensões residuais. Pretende-se com esta dissertação estudar o empeno inerente da produção de peças funcionais impressas por FFF, utilizando um software de simulação numérica, Digimat-AM™, a fim de rever esses defeitos e proceder à correção nas fases antecedentes à produção. Com foco em aumentar a precisão geométrica das peças impressas em 3D por FFF em materiais poliméricos de alta resistência. Os ensaios realizados em ABS e Nylon com espessuras de camadas de 0,1/0,125/0,15/0,2mm e preenchimentos de 30/50/100% demonstram que existe uma relação entre estes parâmetros e os níveis de empeno na peça impressa.

Palavras-chave: Precisão, controlo geométrico, simulação numérica, FFF.

Abstract

Most 3D printing processes, including FFF, involve transferring heat to the part being built, causing dimensional, geometric variations and residual stresses. This dissertation intends to study the inherent commitment of the production of functional parts printed by FFF, using a numerical process simulation software, Digimat-AM™, in order to correct these defects in the phases prior to production. The aim of this study is to increase the geometric precision of 3D printed parts by FFF in highly resistant polymeric materials. Tests carried out on ABS and Nylon with layer thicknesses of 0.1 / 0.125 / 0.15 / 0.2mm and fillings of 30/50/100% demonstrate that there is a relationship between these parameters and the levels of warping in the printed part.

Key words: Precision, geometric control, numerical simulation, FFF.

Índice

Resumo	v
Abstract.....	vi
Índice	vii
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
Lista de Siglas e Acrónimos	xiii
Capítulo 1.....	1
Introdução e Objetivos	1
1.1 Introdução	2
1.2 Objetivos	2
Capítulo 2.....	3
Utilização de Impressão 3D na Indústria.....	3
2.1 Medicina e Indústria Biomédica	4
2.2 Indústria Aeroespacial.....	6
2.3 Indústria Automóvel.....	6
2.4 Construção Civil e Arquitetura	7
2.5 Ferramentas de Estampagem.....	7
2.6 Fabrico de Compósitos em Autoclave	8
2.7 Indústria Retalhista.....	9
2.8 Tecnologias de Impressão	9
Capítulo 3.....	11
Materiais Poliméricos de Alta Resistência	11
3.1 Tipos de Materiais Poliméricos de Alta Resistência.....	12
3.1.1 PEEK	12

3.1.2	Propriedades do PEEK.....	13
3.1.3	PEKK	14
3.1.4	Propriedades do PEKK	14
3.1.5	PEI.....	15
3.1.6	Propriedades do PEI.....	16
3.1.7	TPU	16
3.1.8	Propriedades do TPU	17
Capítulo 4.....		18
	Simulação Numérica do Processo de Impressão 3D por FFF	18
4.1	Toleranciamento Geométrico em Impressão por FFF.....	19
4.1.1	Introdução	19
4.1.2	Parâmetros que Influenciam a Acuidade Geométrica.....	20
Capítulo 5.....		22
	Software Digimat-AM	22
5.1	Utilização e Objetivo.....	23
5.2	Processo de Simulação do Software.....	23
5.3	Testes Realizados ao Software	24
5.3.1	Parâmetros de Teste Utilizados.....	26
5.3.2	Simulações Realizadas para Teste do Software.....	32
5.3.3	Análise dos Resultados dos Testes ao Software	34
5.4	Estudo das Deformações de uma Peça	37
5.4.1	Peça Utilizada no Estudo	37
5.4.2	Parâmetros de Impressão	38
5.4.3	Testes Realizados e Análise de Resultados.....	41
Capítulo 6.....		53
	Conclusões.....	54

Propostas de Trabalhos Futuros.....	55
Bibliografia	56

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Modelos impressos de um coração.....	4
Figura 2.2 - Aplicações 3D-printing na medicina.....	5
Figura 2.3 - Prótese de dedo em SLA	5
Figura 2.4 - Processo produtivo de uma ferramenta de molde de compósitos	8
Figura 2.5 - Tecnologias de impressão, os seus materiais e metodologias de fabrico..	10
Figura 3.1 – Prótese dentária em PEEK.....	12
Figura 3.2 - Conjunto de palhetas guia	15
Figura 4.1 - Variáveis que influenciam a acuidade geométrica.....	20
Figura 4.2 - Erros cordais da passagem de CAD para STL	21
Figura 4.3 - Erros de impressão associados aos erros cordais	21
Figura 5.1 - Fluxograma de funcionamento do Digimat AM	24
Figura 5.2 - Peça simples de teste do software	25
Figura 5.3 - Visualização das camadas no software de corte.....	25
Figura 5.4 – Ambiente do software Digimat-AM.....	27
Figura 5.5 - Escolha de material no software Digimat-AM.....	28
Figura 5.6 - Ambiente de produção do Digimat-AM.....	29
Figura 5.7 - Ambiente de elementos finitos do Digimat-AM	30
Figura 5.8 - Ambiente de submissão do Digimat-AM.....	31
Figura 5.9 - Demonstração de resultados do software Digimat-AM	32
Figura 5.10 - Deslocamentos máximos de cada iteração [mm]	35
Figura 5.11 - Esquema das peças deformada e compensada	36
Figura 5.12 - Círculo-diamante-quadrado com cone invertido: (a) vista isométrica, (b) vista superior;	37

Figura 5.13 - Vistas cotadas geometria complexa	38
Figura 5.14 - Modelos STL de alta e baixa resolução	41
Figura 5.15 - 1ª Iteração alta resolução.....	42
Figura 5.16 - 1ª Iteração baixa resolução.....	42
Figura 5.17 - 2ª Iteração alta resolução.....	43
Figura 5.18 - 2ª Iteração baixa resolução.....	43
Figura 5.19 - Peça complexa deformada vista lateral e lateral superior	44
Figura 5.20 - Peça complexa compensada vista lateral e lateral superior	45
Figura 5.21 - Comparação de padrões de preenchimento.....	45
Figura 5.22 - Deslocamentos das simulações realizadas [mm]	46
Figura 5.23 - Relação entre deformação e preenchimento, 1ª iteração.....	47
Figura 5.24 - Relação entre deformação e preenchimento sem preenchimento a 100%, 1ª iteração.....	47
Figura 5.25 - Relação entre deformação e altura da camada, 1ª iteração	48
Figura 5.26 - Relação entre deformação e altura da camada em ABS, 1ª iteração.....	49
Figura 5.27 - Relação entre deformação e preenchimento, 2ª iteração.....	50
Figura 5.28 - Relação entre deformação e altura da camada em nylon, 2ª iteração	51
Figura 5.29 - Relação entre deformação e altura da camada em ABS preenchimento de 20%, 2ª iteração	51

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Propriedades do PEEK.....	13
Tabela 3.2 - Propriedades do PEKK	14
Tabela 3.3 - Propriedades do PEI.....	16
Tabela 3.4 - Propriedades do TPU	17
Tabela 5.1 - Parâmetros de Impressão para Peça Simples de Teste	26
Tabela 5.2 - Simulações realizadas para teste do software	33
Tabela 5.3 - Resultados dos testes ao software	34
Tabela 5.4 - Parâmetros de Impressão dos Provetes	38
Tabela 5.5 - Parâmetros de impressão para peça de geometria complexa.....	39
Tabela 5.6 - Parâmetros de simulação Digimat-AM.....	40
Tabela 5.7 – Simulações e resultados efetuadas no Digimat-AM	44
Tabela 5.8 – Parâmetros e resultados do ensaio da variação da altura da camada, 1ª iteração	49
Tabela 5.9 - Resultados para o nível de confiança de 95% para cada altura de camada do erro de tolerância (valores em mm)	52

Lista de Siglas e Acrónimos

3D	Tridimensional
AM	Fabrico Aditivo (<i>Additive Manufacturing</i>)
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
CAD	Desenho Assistido por Computador
CJP	Impressão a Jato de Tinta Colorido (<i>Color Jet Printing</i>)
DLP	Processamento Digital de Luz (<i>Direct Light Processing</i>)
EEI	Estação Espacial Internacional
FFF	Fabrico de Filamentos Fundidos
HIPS	Poliestireno de Alto Impacto
PEEK	Poliéter Éter Ketone
PEI	Polieterimida
PEKK	Poliéter Éter Ketone Ketone
PLA	Ácido Polilático
SLA	Estereolitografia
SLM	Fusão Seletiva a Laser
SLS	Sinterização Seletiva a Laser
STL	Tipo de Ficheiro Nativo da Estereolitografia
TPU	Poliuretano Termoplástico

Capítulo 1

Introdução e Objetivos

1.1 Introdução

Uma das maiores considerações a ter em conta aquando se projeta um produto é o seu método de fabrico. Um artigo pode ser produzido de inúmeras maneiras, utilizando várias técnicas diferentes, tendo cada uma delas os seus próprios prós e contras. (Redwood, Schöffner e Garret, 2017, p. 6)

A impressão 3D é um processo de manufatura aditiva (AM) que permite fabricar uma panóplia de artigos de complexa geometria a partir de modelos tridimensionais. Este processo consiste na impressão sobreposta de camadas sucessivas de um determinado material. Esta tecnologia tem sido desenvolvida desde 1986, num processo conhecido como estilografia (SLA), subsequentemente seguida por outros processos similares como a deposição de material fundido (FFF) tornando-se esta uma das mais utilizadas. Somente dentro desta última técnica de impressão, são inúmeros os métodos de produção assim como os materiais utilizados e equipamentos variados, que vão sendo desenvolvidos a todo o momento fazendo evoluir os processos de produção e logística envolvidos nos mais vastos tecidos empresariais. (Ngo *et al.*, 2018, pp. 172–173)

1.2 Objetivos

Pretende-se estudar o empeno inerente da produção de peças funcionais impressas por FFF, utilizando um software de simulação numérica, Digimat-AM™, a fim de corrigir esses defeitos nas fases precedentes à produção. Com foco em aumentar a precisão geométrica das peças impressas em 3D por FFF em materiais poliméricos de alta resistência. Este processo passa por comparar os resultados obtidos no software em epigrafe, com os resultados do estudo “*A Study on the Effect of Layer Thickness and Infill Density on Geometric Tolerance in FDM*” (Pombinha *et al.*, 2018).

Capítulo 2

Utilização de Impressão 3D na Indústria

2.1 Medicina e Indústria Biomédica

A impressão tridimensional é uma tecnologia emergente que afeta os cuidados de saúde: na investigação, na educação, na formação de profissionais, na interação entre equipas médicas e na interação paciente-cuidador.

Na figura 2.1 podem ser visualizados dois modelos de um coração impressos por prototipagem rápida, o modelo da esquerda é flexível e oco, imitando os próprios tecidos do órgão, o modelo da direita é rígido e multicolor, para se poderem diferenciar os vários componentes do mesmo.

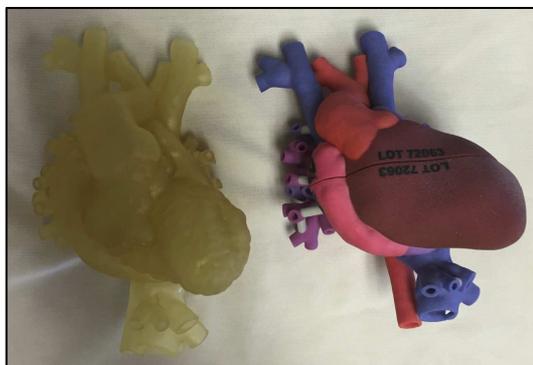


Figura 2.1 - Modelos impressos de um coração

(Anwar et al., 2018)

A Figura 2.2 mostra as aplicações da impressão 3D na medicina, vagamente caracterizadas. Dado que um modelo tridimensional é uma réplica da anatomia de um paciente, estes modelos podem ser utilizados para planeamento e simulação pré-cirúrgica. Estes procedimentos podem reduzir drasticamente o tempo gasto no bloco operatório e por consequente reduzir complicações. Assim sendo pode potencialmente reduzir também o tempo de estadia pós-operatória, menores taxas de re-intervenções e menores custos associados. (Anwar et al., 2018, pp. 295–296)

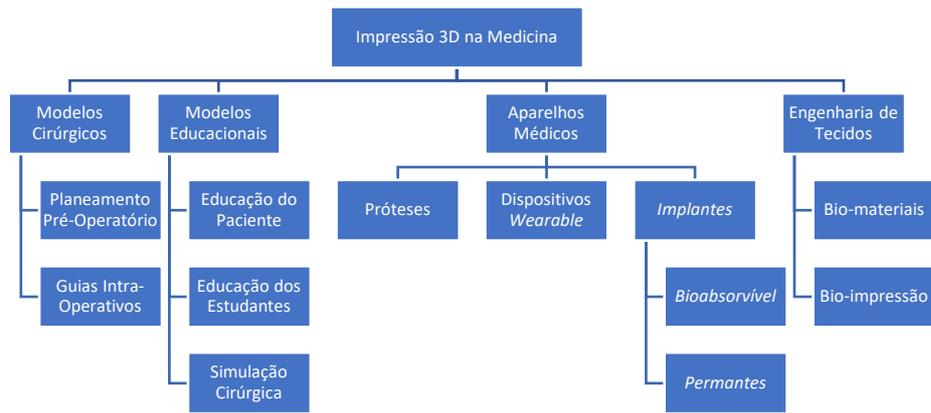


Figura 2.2 - Aplicações 3D-printing na medicina

(Anwar *et al.*, 2018)

O alto custo de próteses de qualidade, aliado à falta de profissionais treinados, torna difícil a obtenção de dispositivos protéticos em países em desenvolvimento. No entanto as técnicas modernas de digitalização 3D e tecnologias de fabrico aditivo (AM) vêm ganhando popularidade na indústria biomédica e, no caso da produção de próteses, reduzem a necessidade de um protesista com experiência. O objetivo desta pesquisa de Hagedorn-Hansen foi desenvolver uma nova cadeia de processo com eficiência de recursos para o fabrico de dedos protéticos usando tecnologias de AM e compará-la com a cadeia de processo tradicional (Escultor). FFF, FFF de código aberto (open-source), impressão tridimensional (3DP) e estereolitografia (SLA) foram avaliadas em termos de custos, tempo, uso de material e qualidade estética. As qualidades de superfície produzidas com as diferentes tecnologias de manufatura aditiva foram também comparadas. Os resultados mostraram que o 3DP foi a tecnologia preferida e a melhor candidata para produzir próteses em termos de custo, qualidade e tempo para comunidades em desenvolvimento. A SLA produzia a prótese da mais alta qualidade estética, mas era a mais cara. Concluiu-se que a utilização da cadeia de processos da tecnologia de AM para a produção de próteses de dedos é mais rápida e econômica do que o método tradicional. (Hagedorn-Hansen, Oosthuizen e Gerhold, 2016, p. 75)



Figura 2.3 - Prótese de dedo em SLA

(Hagedorn-Hansen, Oosthuizen e Gerhold, 2016)

2.2 Indústria Aeroespacial

A AM foi desenvolvida para além do domínio da prototipagem e tornou-se um meio eficaz de avançar o modo como peças e ferramentas são produzidas na indústria aeroespacial. Esta possibilita a impressão de objetos em locais remotos, pois a entrega de matéria-prima não é mais uma restrição. Este benefício da AM possibilita o uso da impressão 3D no espaço. A NASA tem testado em gravidade zero esta tecnologia na esperança de estabelecer meios de produção face às necessidades dos astronautas. Isso permitiria que componentes para manutenção e reparo da estação espacial internacional fossem fabricados no espaço, diminuindo a necessidade de o veículo espacial fazer viagens para a EEI para entregar peças, reduzindo assim muito o tempo de espera das peças de reposição. (Attaran, 2017)

2.3 Indústria Automóvel

Uma das primeiras aplicações da impressão 3D foi aplicada na indústria automóvel. A General Motors utiliza-a para fabricar protótipos há mais de 20 anos, a fim de acelerar o tempo de comercialização e reduzir os custos envolvidos no desenvolvimento de produtos. Em 2011, a Kor Ecologic apresentou o Urbee. O Urbee é o primeiro carro com exterior e interior completamente impresso, eliminando assim as partes em excesso que causam arraste e adicionam peso. Enquanto o carro é atualmente um protótipo para desenvolver veículos eficientes, a empresa espera lançar o Urbee 2 para uso do consumidor. O uso da Produção Aditiva para a fabricação de automóveis poderia efetivamente mudar a maneira como os carros parecerão e funcionarão no futuro. O fabrico de ferramentas e peças também é outro benefício aplicável à indústria automóvel. A BMW utiliza a tecnologia para imprimir ferramentas portáteis que são usadas para prender amortecedores e matrículas. (Attaran, 2017)

2.4 Construção Civil e Arquitetura

De entre todas as aplicações da Impressão 3D a construção civil e arquitetura constituem uma pequena percentagem da sua total utilização. No entanto, este setor está em pleno crescimento, uma vez que começou a ser usado para estruturas residenciais somente a partir de 2014 e mostrou grande potencial desde então.(Ngo *et al.*, 2018)

A construção civil automatizada com tecnologia de impressão 3D ganhou atenção crescente nos últimos anos, por poder potencialmente revolucionar a indústria da construção principalmente quando falamos em construções noutros planetas ou satélites naturais. A aplicação da AM oferece uma redução significativa no tempo de construção e mão de obra. As técnicas tradicionais utilizadas na indústria da construção são fundição, moldagem e extrusão. O uso de impressão 3D na indústria da construção civil pode ser utilizado em áreas onde existem restrições, como complexidades geométricas e estruturas ocas. Assim, sua confiabilidade é devido à sua capacidade de fabricar com alta precisão abre várias possibilidades de design. Khoshnevis desenvolveu a tecnologia de contorno (CC) para a construção automatizada de edifícios e infraestrutura, e para aplicações espaciais. Devido à sua capacidade de utilizar materiais especiais, pode ser prontamente utilizado para a construção de habitações de baixa densidade e para a construção de abrigos na Lua.(Ngo *et al.*, 2018)

2.5 Ferramentas de Estampagem

Num projeto de uma ferramenta de estampagem ou matriz, as propriedades e desempenho do material selecionado mesma, como resistência, facilidade de produção, tratamento térmico, soldabilidade e resistência contra o desgaste abrasivo e adesivo, facilidade de formação de fissuras, são de grande importância. Convencionalmente, no entanto, os blocos ou segmentos destas ferramentas são peças sólidas. (A impressão 3D permite a fabricação de peças ocas, com estruturas em ninho de abelha ou estruturas otimizada de topologia variada. A ferramenta ou matriz pode ser feita de formas diferentes utilizando a impressão 3D, usando esta tecnologia para formar moldes através

de impressão em metal evitando a necessidade de utilização de fresadoras CNC e/ou vários blocos. (Asnafi *et al.*, 2019)

2.6 Fabrico de Compósitos em Autoclave

O uso de produção aditiva fornece a oportunidade de fabricar moldes para ferramentas compostas rápida e economicamente. A utilização de cerâmicas infiltradas à base de polímeros, produzidas por jato aglutinador (*binder jetting*), para a produção de moldes compósitos de ferramenta é feita à base de areia de sílica e areia de zircônio.

Estes materiais são impressos e posteriormente impregnados com um adesivo específico para produzir moldes funcionais utilizados a temperaturas de autoclave, em torno de 150-177 ° C. As propriedades mecânicas foram investigadas e observou-se que estes materiais impregnados com polímero apresentam uma resistência à compressão e à flexão com ordens de grandeza maior do que o material cerâmico impresso não impregnado, mas apresentam também maior expansão térmica. Foram produzidas várias peças em compósito com fibra de carbono nestes moldes provando assim que estes são viáveis. (Maravola *et al.*, 2019)

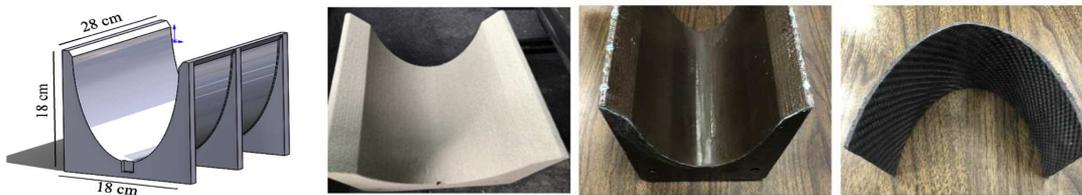


Figura 2.4 - Processo produtivo de uma ferramenta de molde de compósitos

(Maravola *et al.*, 2019, pp. 60–62)

2.7 Indústria Retalhista

A indústria retalhista também se rendeu à impressão 3D com produtos variados como Sapatos impressos em 3D e mesmo roupas dos mais variados estilos. Este tipo de indústria ganhou algumas vantagens importantes com inovações na impressão 3D. De acordo com John Hauer, cofundador e CEO da 3-DLT, as capacidades de prototipagem rápida da impressão 3D irão criar produção localizada, reduzindo assim os custos da cadeia de fornecimento e criando melhores produtos no geral. Hauer afirmou: “Os produtos chegam ao mercado mais rapidamente, bem projetados, com mais feedback do utilizador final, porque eles são capazes de interagir com um modelo funcional do produto”. O tempo e o dinheiro investidos na previsão do que os consumidores podem querer comprar no futuro e quanto do produto deve ser feito podem custar milhões às empresas. As impressoras 3-D podem permitir que os retalhistas criem e entreguem produtos em pequenas quantidades em tempo real, fornecendo uma visão acionável sobre quais produtos realmente impulsionarão a procura. Por exemplo, se um modelo 3D é bem recebido, ele pode ser produzido em massa através de canais tradicionais de fabrico para atender a uma procura mais alta. (Attaran, 2017)

2.8 Tecnologias de Impressão

O mundo da impressão 3D engloba uma ampla gama de tecnologias como podemos comprovar pela figura 2.4. A produção de peças 3D pode ser classificada em três categorias principais – fabrico aditivo, subtrativo ou por estampagem. A última envolve a reformulação de uma peça de trabalho sem reduzir ou adicionar material. O fabrico subtrativo geralmente envolve o uso de ferramentas de corte para remover material indesejado. E por fim como o nome indica, fabrico aditivo envolve adicionar material ao invés de removê-lo para formar o item acabado. Existe uma clara vantagem para processos aditivos quando são necessárias estruturas complexas. O termo impressão 3D foi originalmente associado a uma técnica específica de processamento de aditivos, mas agora é sinónimo da designação geral mais ampla de produção aditiva.

A prototipagem rápida possibilitada pelo fabrico assistido por computador foi concebida como uma técnica para permitir que engenheiros convertessem, de maneira eficiente e confiável, conceitos virtuais em modelos físicos e partes prototípicas. A rápida produção de modelos físicos continua a ser um fator-chave para o mercado de impressão 3D, enquanto as melhorias no processamento e os avanços dos materiais levam a uma transição para a impressão 3D, para produzir peças de uso final prontamente personalizáveis. (Stansbury e Idacavage, 2015)

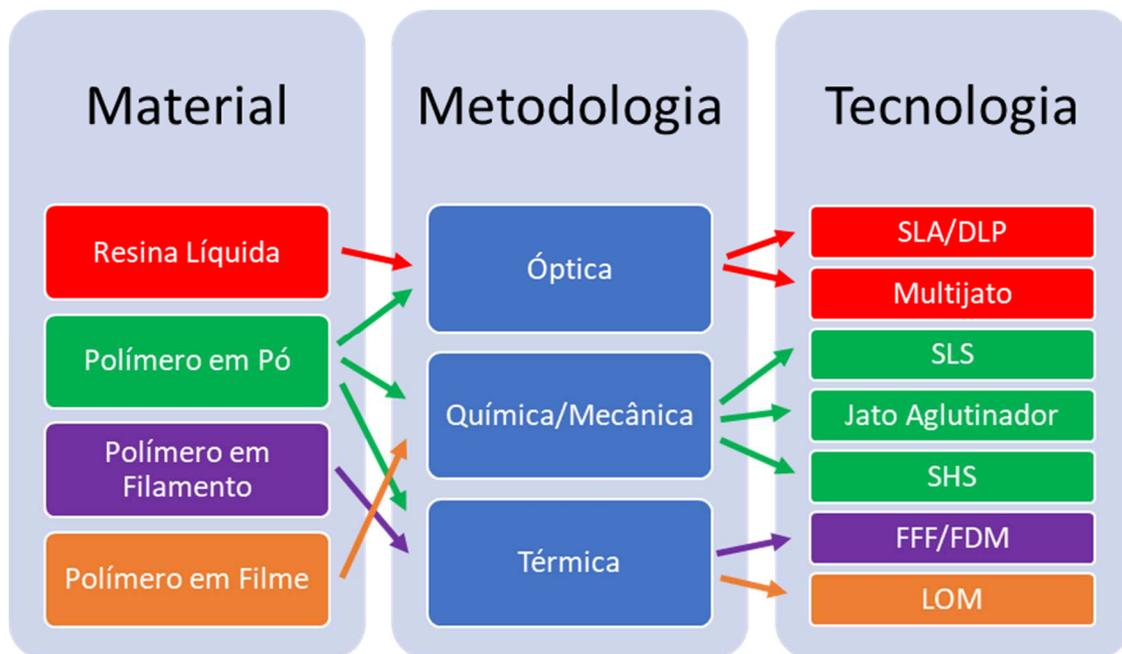


Figura 2.5 - Tecnologias de impressão, os seus materiais e metodologias de fabrico

(Stansbury e Idacavage, 2015)

Capítulo 3

Materiais Poliméricos de Alta Resistência

3.1 Tipos de Materiais Poliméricos de Alta Resistência

Existem vários materiais poliméricos de alta resistência. Para a realização deste relatório foram selecionados os quatro mais utilizados na indústria, a fim de ter uma percepção de quais as suas características e propriedades.

3.1.1 PEEK

Poliéter Éter Ketone ou PEEK é um termoplástico de topo com excelentes propriedades mecânicas mesmo a temperaturas relativamente altas, de resistência química e ao fogo.

O PEEK é visto como um dos termoplásticos com melhores propriedades no geral, apresentando elevada resistência mecânica e química. É utilizado atualmente para fabricar produtos muito exigentes de aplicação aeronáutica, automóvel, ou até mesmo na indústria médica e petrolífera. (Polyfluor Plastics, 2011)

Um dos exemplos da sua utilização na indústria médica é o fabrico de próteses dentárias como podemos observar na Figura 3.1, uma prótese com revestimento e coroas em PEEK.



Figura 3.1 – Prótese dentária em PEEK

(Sadek, 2019, p. 1194)

3.1.2 Propriedades do PEEK

Tabela 3.1 - Propriedades do PEEK

(Aardema, 2018; Polyfluor Plastics, 2011)

Propriedades Físicas		
Descrição	Valor	Teste Realizado
Massa Específica	1,26 g/cm ³	ISO 1183

Propriedades Mecânicas		
Descrição	Valor	Teste Realizado
Módulo de Tração	3700 MPa	ISO 527-2
Módulo de Flexão	4300 MPa	ISO 178
Resistência ao Impacto	5,0 KJ/m ²	ISO 180
Resistência à Tração	105 MPa	ISO 527
Dureza Shore D	85	ISSO 868

Parâmetros de Impressão	
Descrição	Valor
Temperatura do Extrusor	335 - 390°C
Temperatura da Plataforma	120°C

3.1.3 PEKK

O Poliéter Ketone Ketone ou PEKK é um termoplástico semi-cristalino com uma enorme resistência ao calor e resistência química testado pela norma ASTM D543. É ainda capaz de aguentar cargas mecânicas muito elevadas como mostrado na tabela Tabela 3.2.(Dworak e Błażewicz, 2016)

O Antero 840CN03 é um produto Stratasys feito a partir de PEKK para utilização em impressoras 3D de tecnologia FFF. Este material devido às suas propriedades químicas e mecânicas é apropriado para utilização automóvel e aeronáutica em peças que estejam em contato com combustíveis ou fluidos hidráulicos, assim como outras peças industriais que estejam expostas a variados produtos químicos. (Stratasys, 2019)

3.1.4 Propriedades do PEKK

Tabela 3.2 - Propriedades do PEKK

(Stratasys, 2019)

Propriedades Físicas		
Descrição	Valor	Teste Realizado
Densidade	1,28 g/cm ³	ASTM D792

Propriedades Mecânicas		
Descrição	Valor	Teste Realizado
Módulo de tração	2920 ± 100 MPa	ASTM D638
Módulo de Flexão	3070 ± 60 Mpa	ASTM D790
Resistência ao Impacto	44 ± 4 J/m	ASTM D256
Resistência à Tração	95 MPa	ASTM D638

Parâmetros de Impressão	
Descrição	Valor
Temperatura do Extrusor	370 - 400°C
Temperatura da plataforma	150°C

3.1.5 PEI

A Polieterimida ou PEI é um termoplástico amorfo com alta resistência e rigidez mecânica. A Polieterimida é comercializada também sob o nome de ULTEM, sendo que o ULTEM1010 é 100% PEI.(Cicala *et al.*, 2018) Este termoplástico oferece uma excelente resistência mecânica, química e elétrica. É também uma excelente opção para aplicações relacionadas com a indústria alimentar e indústria médica. Devido às suas propriedades mecânicas e bom isolamento elétrico pode também ser utilizado na indústria automóvel e aeronáutica. (Stratasys, 2014)

No entanto, mais utilizado neste tipo de indústria é a derivante ULTEM9085, um copolímero de PEI e Policarbonato altamente resistente com propriedades retardantes de chama. Este polímero devido à sua elevada resistência em relação à sua baixa densidade, faz dele um material de excelência na indústria aeronáutica. (Stratasys, 2013) Podemos ver na Figura 3.2 um conjunto de palhetas guia de entrada de ar impressas em ULTEM9085 em fase de teste aerodinâmico.(Chuang *et al.*, 2015)



Figura 3.2 - Conjunto de palhetas guia

(Chuang *et al.*, 2015)

3.1.6 Propriedades do PEI

Tabela 3.3 - Propriedades do PEI

(Stratasys, 2014)

Propriedades Físicas		
Descrição	Valor	Teste Realizado
Densidade	1,27 g/cm ³	ASTM D792

Propriedades Mecânicas		
Descrição	Valor	Teste Realizado
Módulo de tração	2770 ± 100 MPa	ASTM D638
Módulo de Flexão	2820 ± 60 Mpa	ASTM D790
Resistência ao Impacto	41 ± 1 J/m	ASTM D256
Resistência à Tração	81 MPa	ASTM D638
Dureza Hardwell	109	ASTM D785

Parâmetros de Impressão	
Descrição	Valor
Temperatura do Extrusor	350 - 380°C
Temperatura da plataforma	140 – 160°C

3.1.7 TPU

O Poliuretano Termoplástico ou TPU é um material de resistência superior grande flexibilidade, durabilidade e resistência ao desgaste superior à da maioria dos termoplásticos. Este material polimérico de alta resistência é utilizado na sua forma de filamento próprio para impressão 3D por FFF em aplicações como mangueiras, tubos flexíveis, condutas de ar e inclusive sistemas de proteção de vibrações e ruído. (Stratasys, 2018)

3.1.8 Propriedades do TPU

Tabela 3.4 - Propriedades do TPU

(Stratasys, 2018)

Propriedades Físicas		
Descrição	Valor	Teste Realizado
Densidade	1,14 g/cm ³	ASTM D792

Propriedades Mecânicas		
Descrição	Valor	Teste Realizado
Módulo de tração	2070 MPa	ASTM D412
Módulo de Flexão	2560 Mpa	ASTM D790
Resistência ao Impacto	101 J/m	n.a.
Resistência à Tração	16 MPa	ASTM D412
Dureza Shore A	92	ASTM D785

Parâmetros de Impressão	
Descrição	Valor
Temperatura do Extrusor	240 - 260°C
Temperatura da plataforma	40 - 60°C

Capítulo 4

Simulação Numérica do Processo de Impressão 3D por FFF

4.1 Toleranciamento Geométrico em Impressão por FFF

4.1.1 Introdução

À medida que as tecnologias de impressão 3D por FFF se desenvolvem e as peças obtidas por esse método se aproximam do produto final, a tolerância dimensional e geométrica adquire um significado de maior importância.

A impressão 3D inicia o seu processo de fabricação com um modelo CAD 3D da peça que é convertido no formato de arquivo STL (Estereolitografia) antes da sua impressão física. Depois, após passar por um software que prepara a peça em camadas (slicing software), a peça é impressa, camada por camada, de acordo com as especificações predeterminadas do software, como espessura da camada, densidade de preenchimento, velocidade de impressão ou espessura da parede, entre outras. Paralelamente à evolução da impressão 3D, surgiu a necessidade de fabricar peças cada vez mais precisas, uma vez que as peças fabricadas agora são, em muitos casos, funcionais.

Dada a multiplicidade de fatores que podem variar em todas as peças fabricadas através da AM - parâmetros, materiais, máquinas e técnicas de impressão - os desvios geométricos e dimensionais não serão os mesmos para todas as impressões. (Pombinha *et al.*, 2018)

4.1.2 Parâmetros que Influenciam a Acuidade Geométrica

Para que se perceba o nível de entropia de que se trata quando se tenta controlar a acuidade geométrica de uma peça impressa por FFF é necessário entender todas as variáveis possíveis que se podem ter em conta que influenciam dimensional e geometricamente a peça a ser impressa. (García Plaza *et al.*, 2019) Estas variáveis podem ser observadas de uma forma simples através da figura 4.1.

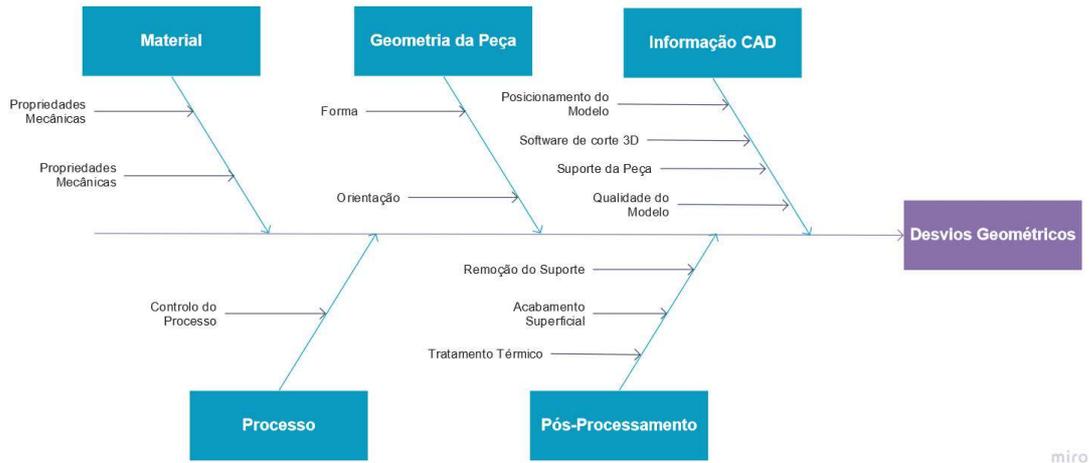


Figura 4.1 - Variáveis que influenciam a acuidade geométrica

(Zhu, Anwer e Mathieu, 2018)

Exemplos tão simples como a forma da peça e o seu tamanho são rapidamente identificadas como obstáculos ao toleranciamento geométrico apertado. Já outros como a geometria do filamento, derivado da sua velocidade de deposição ou temperatura podem estar mais ocultos à noção de acuidade geométrica, mas representam da mesma maneira um papel importante. (Hebda *et al.*, 2019)

Possivelmente os dois fatores mais importantes a este tipo de constrangimentos, são a passagem do modelo CAD para formato STL, assim como, o aquecimento e arrefecimento provocado pelo bico de impressão ao se aproximar e se afastar da peça. No primeiro caso, ao transformar o modelo CAD para um modelo STL, onde o corpo é transformado em vários triângulos que aproximam a geometria da peça, há perdas de informação especialmente nas zonas circulares ou esféricas chamados erros cordais como podemos ver na figura 4.2 e 4.3.(Zha e Anand, 2015)

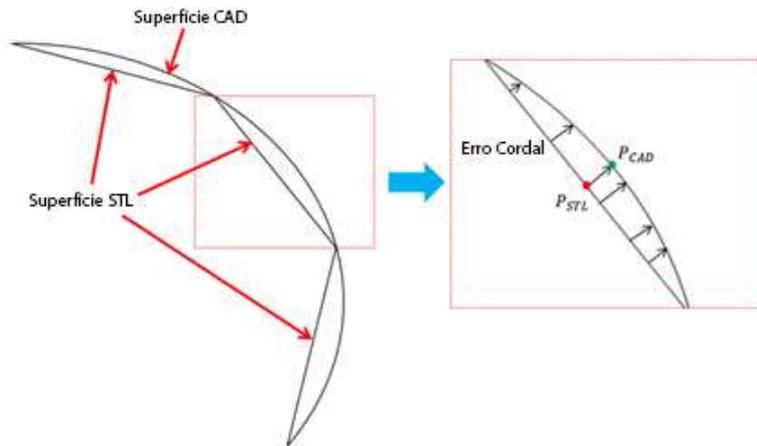


Figura 4.2 - Erros cordais da passagem de CAD para STL

(Zha e Anand, 2015)

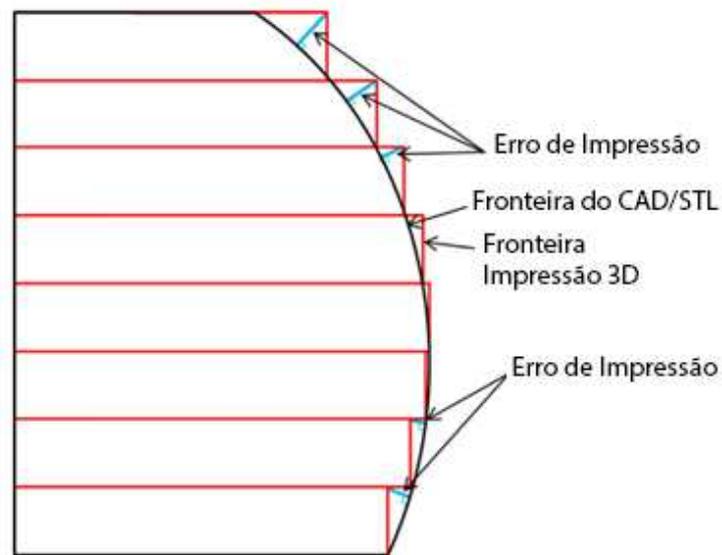


Figura 4.3 - Erros de impressão associados aos erros cordais

(Zha e Anand, 2015)

Já o aquecimento e arrefecimento incitado pelo bico de impressão provoca um defeito a nível do empeno dos materiais já impressos, pois estes têm a tendência de dilatar e reduzir consoante o calor que lhes é transmitido durante a impressão. (Ravoori *et al.*, 2019)

O empeno é muito maior no exterior da peça impressa do que no interior, o que faz todo o sentido se pensarmos que as extremidades estão mais suscetíveis a grandes diferenças de temperatura. (Dilberoglu, Simsek e Yaman, 2019)

Capítulo 5

Software Digimat-AM

5.1 Utilização e Objetivo

Para que se possam evitar empenos e defeitos dimensionais nas peças impressas em 3D por FFF, existem softwares de simulação numérica que simulam o processo produtivo tendo em conta uma grande variedade de inputs, e assim tendo em conta as variâncias geométricas que se esperam que aconteçam, compensam de maneira a corrigi-las antes da impressão. (Hébert *et al.*, 2016)

O Digimat-AM é uma ferramenta de simulação numérica adaptada especificamente para a Impressão 3D que inclui materiais poliméricos. O Digimat oferece uma plataforma holística de simulação para impressão 3D, oferecendo uma combinação de soluções de engenharia de materiais, simulação de processos e análise estrutural. Com a tecnologia desenvolvida com base na experiência reconhecida da e-Xstream com modelação tendo em conta os múltiplos parâmetros de impressão de polímeros reforçados, o Digimat for Additive Manufacturing permite a redução do nº de iterações de impressões físicas até se conseguir a precisão dimensional e geométrica pretendidas, usando todo o potencial deste método de fabrico. (E-Xstream, 2019)

5.2 Processo de Simulação do Software

O Digimat simula o processo de impressão e ajuda os fabricantes de impressoras e os utilizadores finais a identificar problemas de fabricação. Também otimiza os parâmetros de impressão para produtividade e desempenho da peça final. Por exemplo, minimizando a deformação da peça e as tensões residuais em função dos parâmetros do material e do processo. (E-Xstream, 2019)

O processo de funcionamento do software é simples e bastante intuitivo, principalmente para um utilizador avançado em impressão 3D e os problemas inerentes da produção de peças por FFF. O Digimat-AM replica a impressão 3D de uma peça e gera não só a peça com as suas imprecisões dimensionais, geométricos e tensões residuais acumuladas, mas também gera um modelo de geometria com deformações simétricas às simuladas. Este processo está esquematizado na Figura 5.1 como um

fluxograma, para que se perceba os passos necessários para minimizar os defeitos dimensionais e geométricos do processo de impressão 3D por FFF.

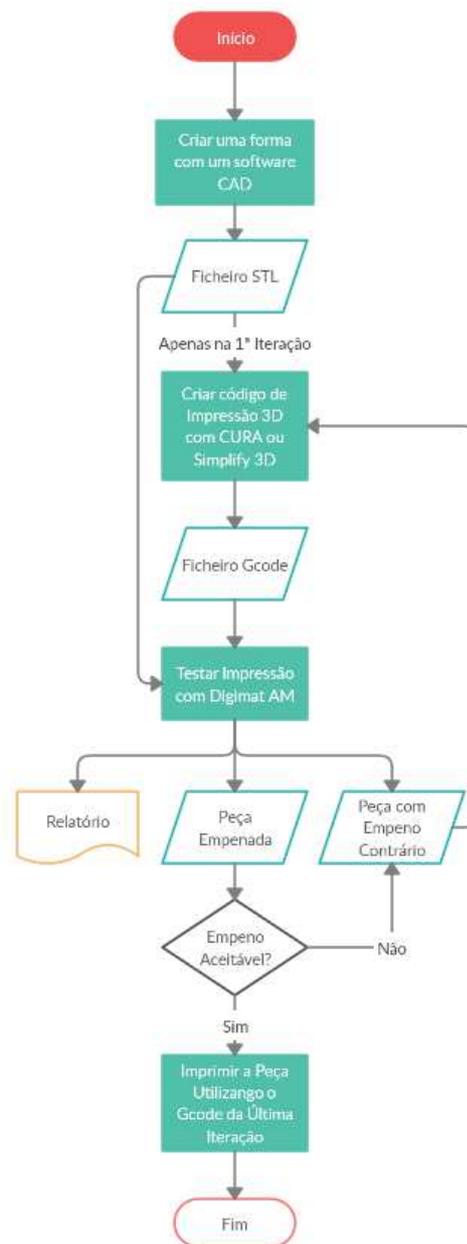


Figura 5.1 - Fluxograma de funcionamento do Digimat AM

5.3 Testes Realizados ao Software

Foram realizados vários ensaios a fim de testar os resultados obtidos pelo software. Estes ensaios tiveram como peça modelo um paralelepípedo mostrado na Figura 5.2 com dimensões 20x10x20mm, com um furo central de diâmetro 5mm.

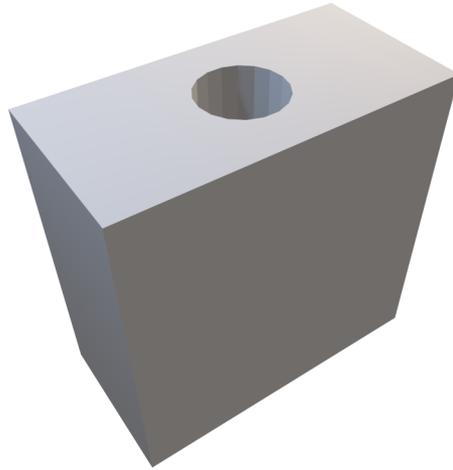


Figura 5.2 - Peça simples de teste do software

Este ficheiro da peça realizado num Software CAD foi exportado para STL, a uma resolução média de 88 triângulos. Por sua vez o ficheiro STL foi então colocado num software de corte: Ultimaker Cura v4.7.1 onde foi gerado um código G para ser impresso.

O código G é um ficheiro de texto simples, que contém pequenos programas formados por linhas de código que são lidas de cima para baixo por controladores CNC. (Champlain e Woodcock, 2015) A visualização do código assim como o seu resultado podem ser vistos na Figura 5.3.

Os parâmetros de impressão deste software de corte podem ser observados na Tabela 5.1 e tiveram como base os parâmetros de impressão standard para ABS disponíveis no programa.

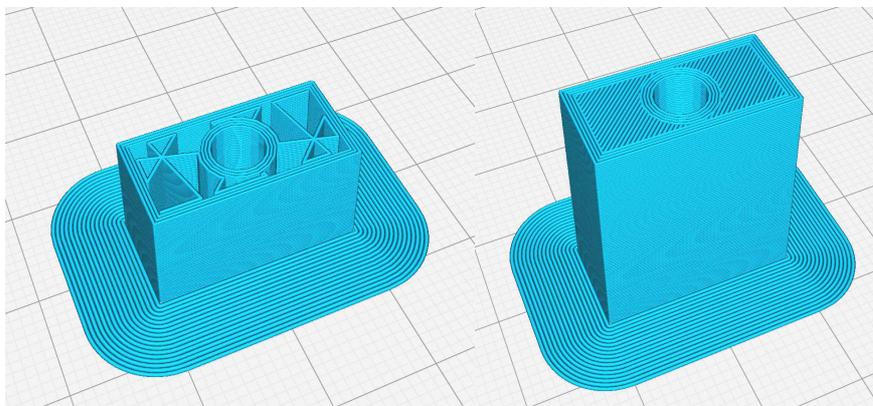


Figura 5.3 - Visualização das camadas no software de corte

Tabela 5.1 - Parâmetros de Impressão para Peça Simples de Teste

Parâmetro	Valor
Altura da Camada	0,2mm
Espessura da Linha	0,35mm
Espessura da Parede	1,3mm
Número de Linhas de Parede	4
Espessura da Base e do Topo	1,2mm
Número de Camadas da Base e do Topo	8
Porcentagem de Preenchimento	20%
Padrão de Preenchimento	Triangular
Direção do Preenchimento	0°
Material	ABS
Temperatura da Câmara	100°C
Temperatura de Impressão	250°C
Temperatura da Mesa de Impressão	85°
Velocidade de Impressão	60mm/s
Velocidade de Impressão do Preenchimento	45mm/s

5.3.1 Parâmetros de Teste Utilizados

O Digimat-AM permite uma customização bastante ampla que assenta em seis pilares principais:

1. Projeto a Imprimir
2. Componente
3. Produção
4. Malha
5. Submissão
6. Pós-Processamento

5.3.1.1 Projeto a Imprimir

Neste primeiro passo mostrado na Figura 5.4 é definido o processo de impressão assim como o tipo de análise. Este software permite três tipos de processos de impressão:

- FFF – para impressão por filamento fundido
- FDM – para impressão por filamento fundido de impressoras Stratasys
- SLS – para impressão por sinterização seletiva a laser.

Para este teste foi utilizado o parâmetro FFF por ser o único que se adequa ao tema de estudo. Foi escolhida uma impressora genérica de FFF com uma área de impressão por defeito (400x400x400mm) e de plataforma fixa.

O Software ainda permite três tipos diferentes de análise:

- Deformação – Tensão Inerente (denominada IS)
- Deformação – Termomecânica (denominada TM)
- Térmica

Foram testados os dois tipos de análise referentes à deformação.

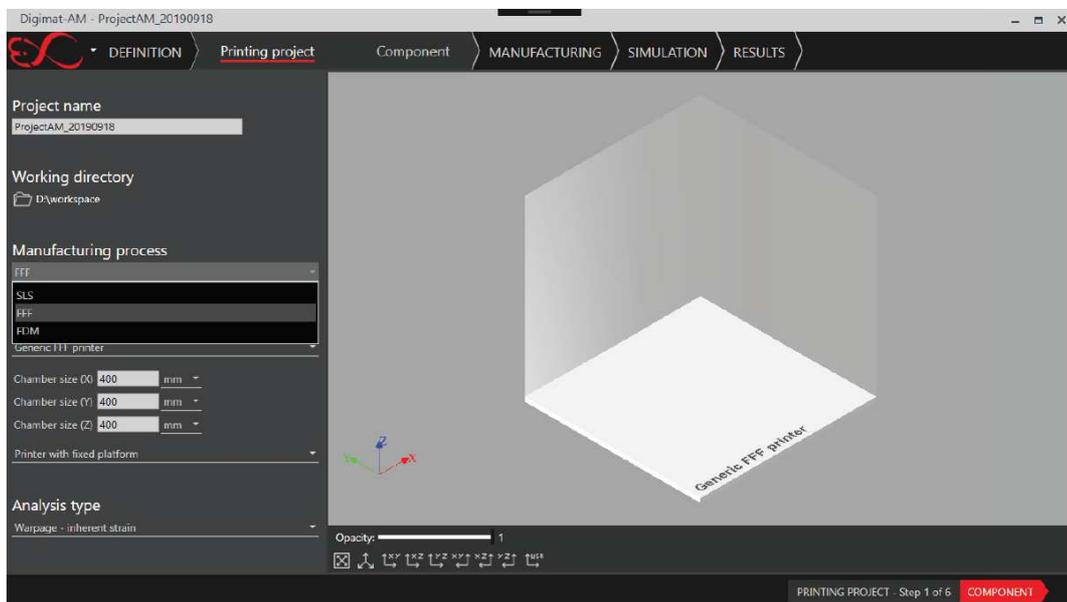


Figura 5.4 – Ambiente do software Digimat-AM

(E-Xstream, 2017)

5.3.1.2 Componente

Nesta secção carrega-se o modelo STL para o software e é escolhido o material da peça a imprimir, como mostrado na Figura 5.5. Para este teste foi escolhido ABS genérico, por ser um dos materiais mais usados na impressão de peças 3D por FFF.

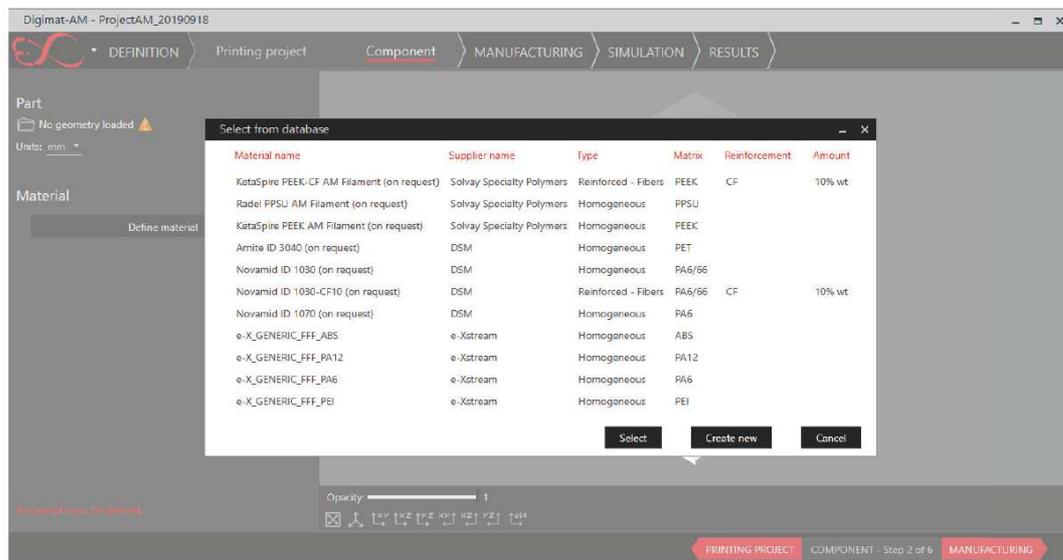


Figura 5.5 - Escolha de material no software Digimat-AM

(E-Xstream, 2017)

5.3.1.3 Produção

Neste terceiro painel mostrado na Figura 5.6 é definido a ordem de produção, a compensação da deformação para uma segunda iteração e seguintes, o tamanho da malha de produção, o posicionamento, assim como os parâmetros de impressão.

Definiu-se para este teste que o arrefecimento é feito antes da remoção do material de suporte. Foram realizados testes com tamanho de malha entre 2mm e 0,5mm e definiram-se os parâmetros de impressão de acordo com a Tabela 5.1 e Tabela 5.2.

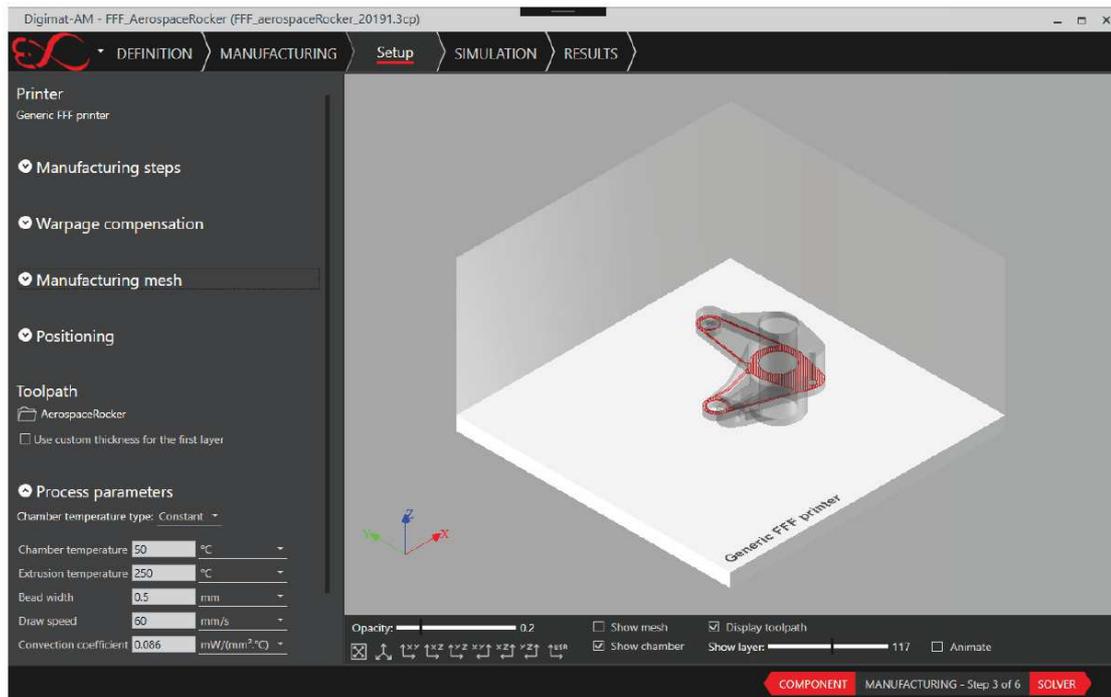


Figura 5.6 - Ambiente de produção do Digimat-AM

(E-Xstream, 2017)

5.3.1.4 Elementos Finitos

Nesta fase do processo mostrado na Figura 5.7 é definido o tamanho do elemento, assim como é feita a discretização da peça em elementos finitos. Os testes realizados contam com elementos cúbicos entre os 2mm e os 0,5mm de aresta. É também nesta fase que se define o tipo de simulação discreta:

- Camada-a-camada: Em que a simulação é realizada por camadas impressas umas sobre as outras.
- Filamento: Em que é simulado o percurso da impressão em intervalos de tempo previamente definidos.

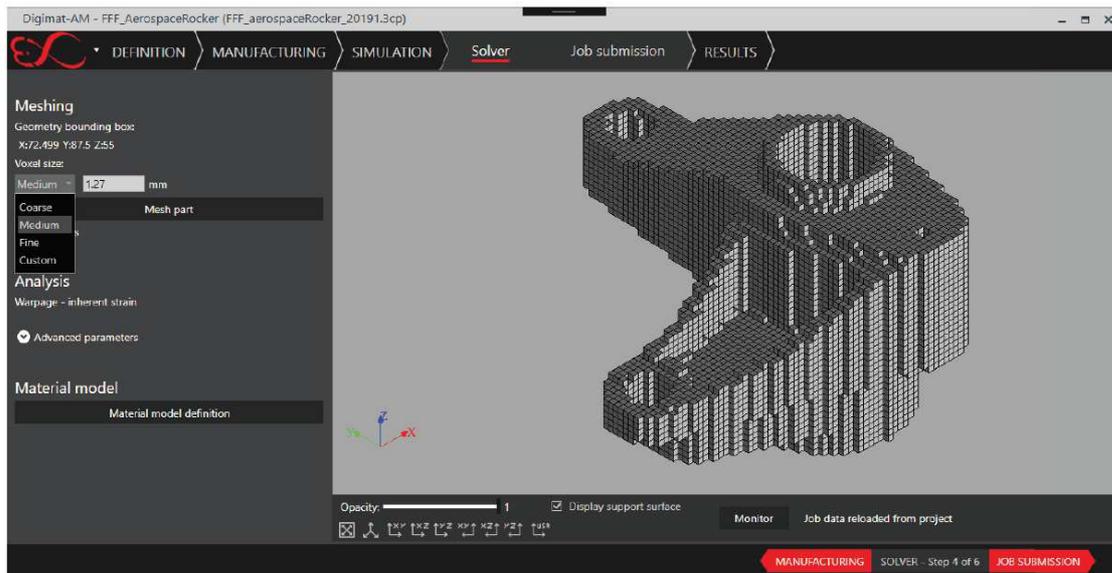


Figura 5.7 - Ambiente de elementos finitos do Digimat-AM

(E-Xstream, 2017)

5.3.1.5 Submissão

Por fim é realizada a submissão do processo como mostrado na Figura 5.8 onde o software simula o processo de impressão. Este processo pode demorar algum tempo dependendo principalmente da geometria da peça, da qualidade do ficheiro STL e do tamanho dos elementos finitos.

Nos testes realizados este processo demorou entre alguns segundos até 5 horas. Esta diferença de duração foi um dos fatores com grande peso na escolha dos parâmetros de teste, uma vez que seria incomportável realizar vários testes cada um com duração de 5 horas.

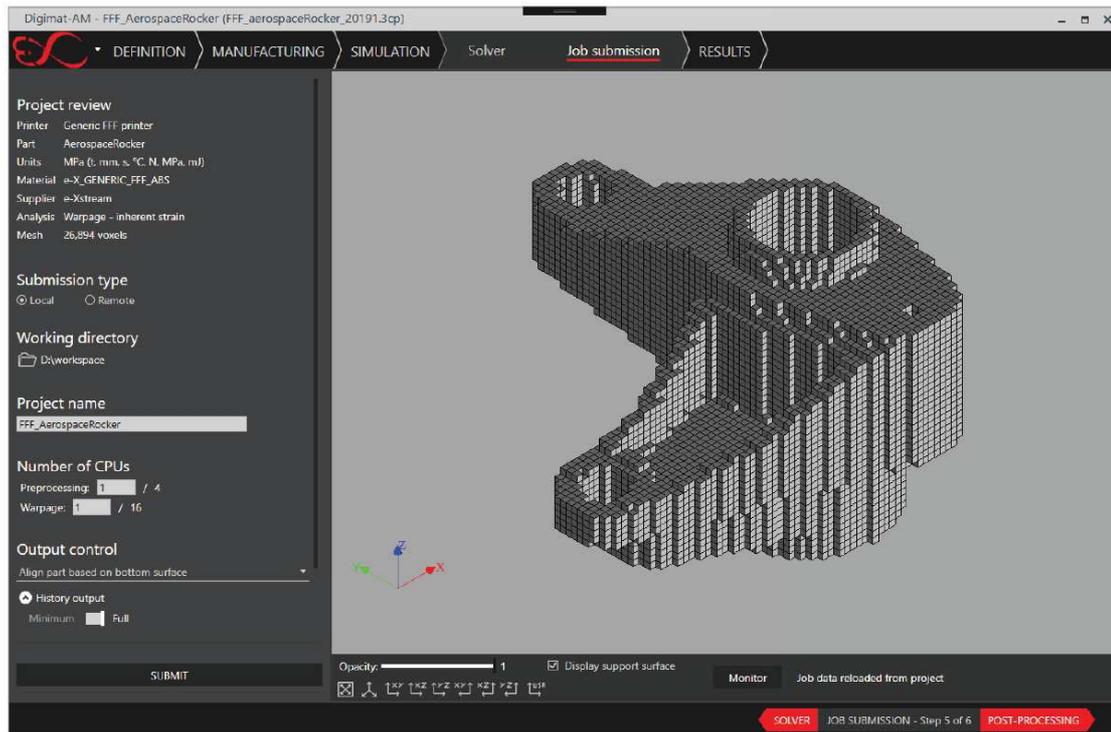


Figura 5.8 - Ambiente de submissão do Digimat-AM

(E-Xstream, 2017)

5.3.1.6 Pós-Processamento e Resultados

Esta quarta etapa fornece todas as funcionalidades necessárias para pós-processar os resultados da simulação, tais como visualização de campo de deslocamento e tensões, análise do indicador de empenamento, visualização de formatos deformados e modelos de corte, gráfico de histórico, planos de referência personalizados e exportação de resultados de simulação, mostrado na Figura 5.9.

É também nesta etapa que podemos exportar os ficheiros STL das geometrias empenadas ou contra empenadas, assim como todos os outros resultados do teste.

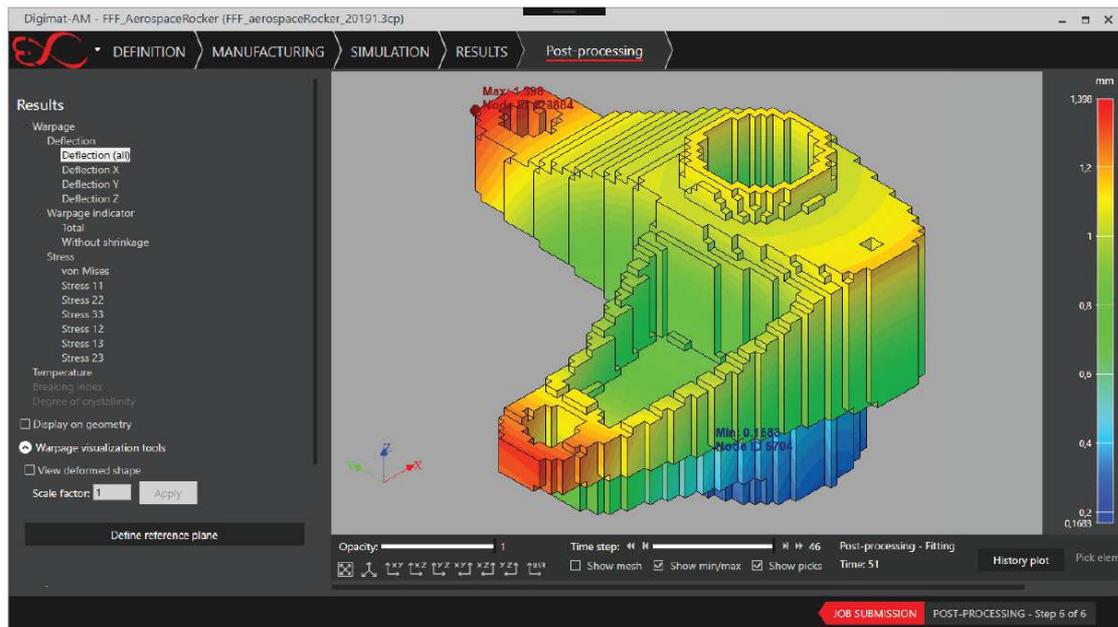


Figura 5.9 - Demonstração de resultados do software Digimat-AM

(E-Xstream, 2017)

5.3.2 Simulações Realizadas para Teste do Software

Foram realizados 14 testes cada um com 2 iterações onde foram alterados um a um os parâmetros como descrito na Tabela 5.2. Estes testes induziram a maior diversidade possível dentro dos parâmetros a estudar a fim de compreender os outputs do software aquando a alteração de cada parâmetro. Por existir a possibilidade de realizar todos os testes como aqueles que se quisessem, não foi necessário aplicar metodologias de desenho de experiências como o método de Taguchi ou outros semelhantes.

Dos testes realizados foram desconsiderados os testes 1.1 e 1.2 (teste 1, primeira e segunda iterações) por não se ter obtido resultados corretos. Esta falha na obtenção de resultados resultou na inexperiência do utilizador ao parametrizar o teste assim como a sua iteração.

Tabela 5.2 - Simulações realizadas para teste do software

Test Núm	Tipo de Análise	Malha [mm]	Elem. [mm]	Tipo de Simulação	Δt [s]	Tempo de Teste [min]
2.1	IS	1,00	1	Camada	n.a.	50
2.2	IS	1,00	1	Camada	n.a.	50
3.1	TM	1,00	1	Camada	n.a.	1
3.2	TM	1,00	1	Camada	n.a.	1
4.1	TM	0,50	1	Camada	n.a.	1
4.2	TM	0,50	1	Camada	n.a.	1
5.1	TM	0,50	0,5	Camada	n.a.	5
5.2	TM	0,50	0,5	Camada	n.a.	5
6.1	TM	0,20	0,5	Camada	n.a.	6
6.2	TM	0,20	0,5	Camada	n.a.	6
7.1	TM	0,10	0,5	Camada	n.a.	6
7.2	TM	0,10	0,5	Camada	n.a.	6
8.1	TM	0,10	0,2	Camada	n.a.	110
8.2	TM	0,10	0,2	Camada	n.a.	155
9.1	IS	0,10	0,5	Camada	n.a.	47
9.2	IS	0,10	0,5	Camada	n.a.	63
10.1	IS	0,10	0,2	Camada	n.a.	240
10.2	IS	0,10	0,2	Camada	n.a.	300
11.1	TM	0,20	0,2	Camada	n.a.	130
11.2	TM	0,20	0,2	Camada	n.a.	136
12.1	TM	2,00	2	Camada	n.a.	0
12.2	TM	2,00	2	Camada	n.a.	0
13.1	TM	0,20	0,2	Filamento	10	120
13.2	TM	0,20	0,2	Filamento	10	131
14.1	TM	0,20	0,2	Filamento	5	220
14.2	TM	0,20	0,2	Filamento	5	224

5.3.3 Análise dos Resultados dos Testes ao Software

Os resultados dos testes realizados apresentados na Tabela 5.3 foram bastante satisfatórios, a Figura 5.10 apresenta os deslocamentos máximos de cada iteração.

Tabela 5.3 - Resultados dos testes ao software

Test Núm	Tipo de Análise	Malha [mm]	Elem. [mm]	Tipo de Simulação	Δt [s]	Tempo de Teste [min]	Deslocamento Max [mm]
2.1	IS	1,00	1	Camada	n.a.	50	0,3203
2.2	IS	1,00	1	Camada	n.a.	50	0,007269
3.1	TM	1,00	1	Camada	n.a.	1	0,3426
3.2	TM	1,00	1	Camada	n.a.	1	0,04219
4.1	TM	0,50	1	Camada	n.a.	1	0,3705
4.2	TM	0,50	1	Camada	n.a.	1	0,04218
5.1	TM	0,50	0,5	Camada	n.a.	5	0,381
5.2	TM	0,50	0,5	Camada	n.a.	5	0,02578
6.1	TM	0,20	0,5	Camada	n.a.	6	0,3748
6.2	TM	0,20	0,5	Camada	n.a.	6	0,02586
7.1	TM	0,10	0,5	Camada	n.a.	6	0,3748
7.2	TM	0,10	0,5	Camada	n.a.	6	0,02583
8.1	TM	0,10	0,2	Camada	n.a.	110	0,3779
8.2	TM	0,10	0,2	Camada	n.a.	155	0,0222
9.1	IS	0,10	0,5	Camada	n.a.	47	0,3132
9.2	IS	0,10	0,5	Camada	n.a.	63	0,006794
10.1	IS	0,10	0,2	Camada	n.a.	240	0,3134
10.2	IS	0,10	0,2	Camada	n.a.	300	0,006711
11.1	TM	0,20	0,2	Camada	n.a.	130	0,3779
11.2	TM	0,20	0,2	Camada	n.a.	136	0,02442
12.1	TM	2,00	2	Camada	n.a.	0	0,3574
12.2	TM	2,00	2	Camada	n.a.	0	0,05095
13.1	TM	0,20	0,2	Filamento	10	120	0,3713
13.2	TM	0,20	0,2	Filamento	10	131	0,03872
14.1	TM	0,20	0,2	Filamento	5	220	0,3754
14.2	TM	0,20	0,2	Filamento	5	224	0,03228

Obtendo então resultados tão significativos, onde podemos verificar uma redução do deslocamento da primeira iteração para a segunda muito acentuada. Esta redução chega a ser nalguns casos 98%, o que tornaria a peça praticamente perfeita dependendo apenas da resolução da impressora 3D.

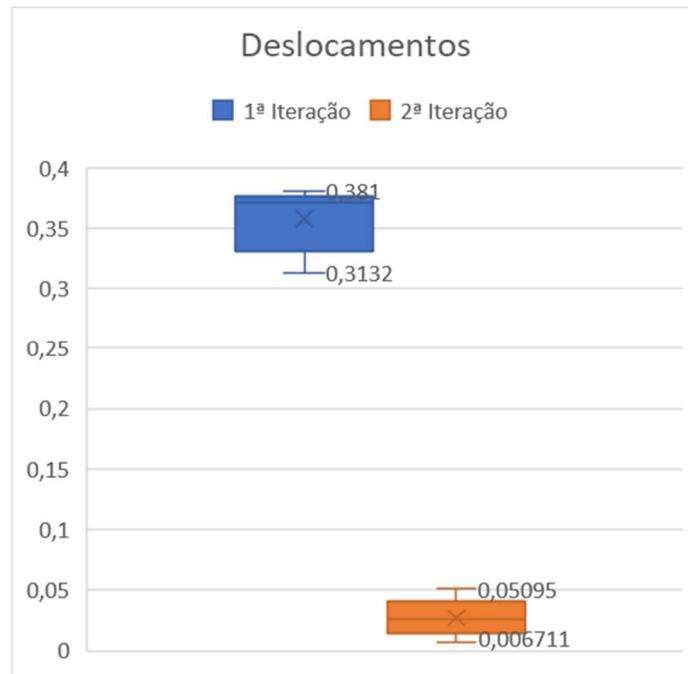


Figura 5.10 - Deslocamentos máximos de cada iteração [mm]

Pode-se supor que estes resultados tão favoráveis sejam derivados da geometria simples da peça assim como da temperatura da câmara que faz com que a retração do material seja menor do que um ambiente com menor temperatura.

Uma das vantagens do software é o seu *output* dos modelos STL da peça deformada e contra-deformada (compensada) que se podem analisar em qualquer software de visualização de modelos 3D. Apesar da deformação ser de difícil observação por serem valores baixos, a Figura 5.11 mostra esquematicamente as diferenças entre os modelos deformado e compensado.

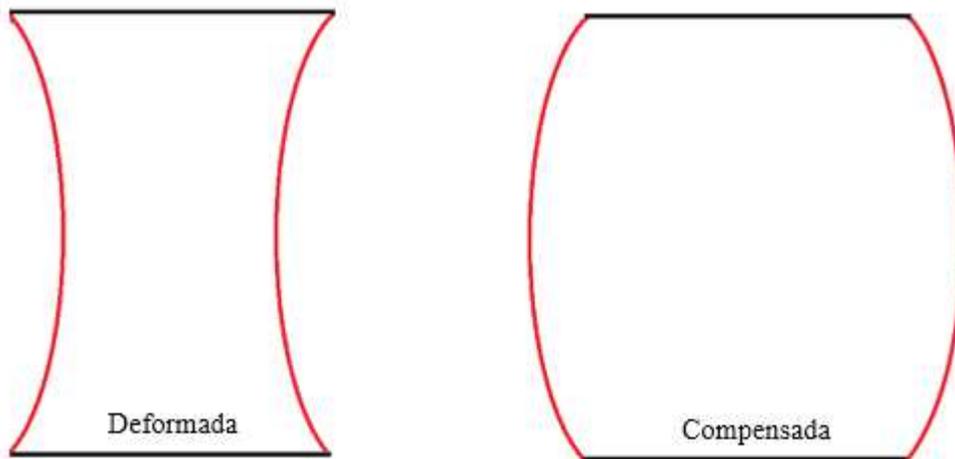


Figura 5.11 - Esquema das peças deformada e compensada

Como seria de esperar, o material contrai após a impressão o que faz com que deforme onde existe maior concentração de material. Esta contração faz também com que o perímetro da peça junto à base levante da cama aquecida, provocando muitas vezes falhas de impressão ou peças com geometria defeituosa.

A peça compensada ao ser impressa, irá contrair de igual forma, mas ao contrair, irá ficar de acordo com a geometria da peça pretendida, validando assim o objetivo do software Digimat-AM.

Tendo em conta os resultados dos testes assim como objetivo de testar uma peça funcional, ou mais complexa; os parâmetros que foram considerados para o fazer têm como base o teste n.º 5:

- Tipo de Análise: Termomecânica
- Malha: 0,5mm
- Elemento: 0,5mm
- Tipo de Simulação: Por Camada

Isto porque é o teste mais rápido que não compromete a resolução normal de uma impressora 3D, sendo que os resultados estão dentro do esperado que é na ordem dos 50 μm .

5.4 Estudo das Deformações de uma Peça

Tendo sido o software testado através do estudo de uma peça simples, o próximo passo é o teste de uma peça funcional ou complexa. Este teste, comparado com resultados experimentais, será a confirmação que o software é apto para a sua aplicação em desafios reais e que pode ser aplicado na indústria.

5.4.1 Peça Utilizada no Estudo

A peça utilizada neste estudo será uma peça de geometria complexa que pudesse ser utilizada para verificar a tolerância geométrica alcançada com cada conjunto de parâmetros de impressão. Para isso foi utilizada a mesma peça do estudo “Um Estudo Sobre o Efeito da Espessura da Camada e da Densidade de Enchimento na Tolerância Geométrica em FDM” (Pombinha *et al.*, 2018). Esta peça desenvolvida foi inspirada não por um *benchmark* projetado especificamente para AM, mas sim pelo modelo comumente conhecido como círculo-diamante-quadrado, representado na Figura 5.12, projetado como um padrão para caracterização de desempenho de ferramentas CNC de metal, definido em 1969 no padrão AIA-NAS 979. O círculo-diamante-quadrado permite a medição de diversos elementos geométricos, como retilismo, circularidade, angularidade ou concentricidade, enquanto sua forma simples facilita a medição por meio de uma Máquina de Medição por Coordenadas (CMM).

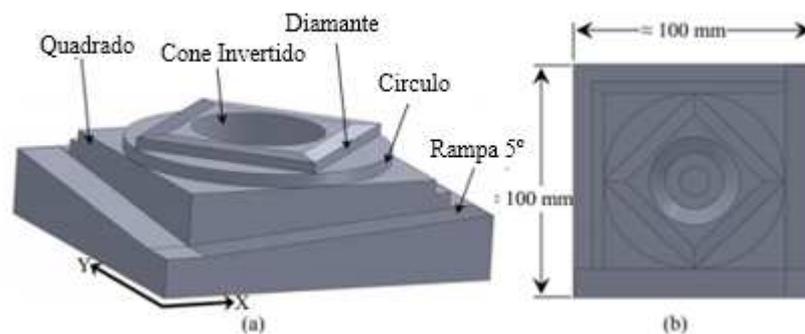


Figura 5.12 - Círculo-diamante-quadrado com cone invertido: (a) vista isométrica, (b) vista superior;

(Cooke e Soons, 2010)

A peça utilizada no estudo referido, provém desta anterior e é mais simples retendo a sua forma original, sem a componente de diamante, um círculo mais alto e um

furo passante circular no topo e quadrado no fundo, como pode ser visionado na Figura 5.13 assim como as suas medidas em milímetros.

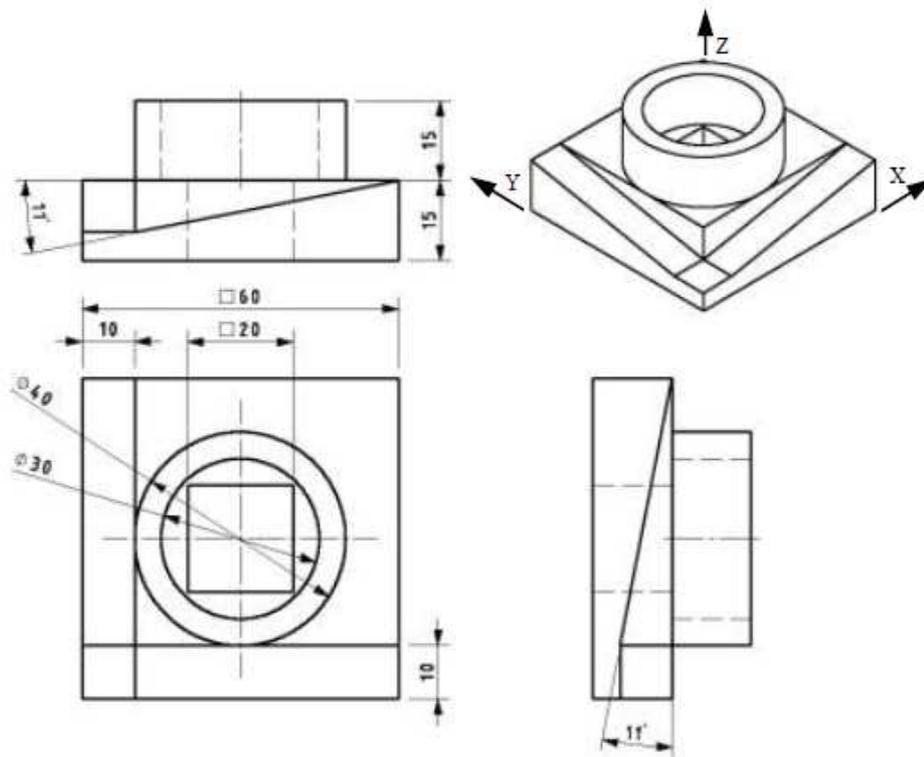


Figura 5.13 - Vistas cotadas geometria complexa

(Pombinha *et al.*, 2018)

5.4.2 Parâmetros de Impressão

Os parâmetros de impressão utilizados foram também eles de acordo com o estudo “Um Estudo Sobre o Efeito da Espessura da Camada e da Densidade de Enchimento na Tolerância Geométrica em FDM” (Pombinha *et al.*, 2018), para que os resultados possam ser comparáveis e válidos. Estes parâmetros foram divididos em cinco provetes (SPECs) com diferentes parâmetros de impressão descritos na Tabela 5.4, todos os outros parâmetros se mantiveram iguais aos presentes na Tabela 5.5, para que os diferentes ensaios fossem comparáveis.

Tabela 5.4 - Parâmetros de Impressão dos Provetes

	Altura da Camada [mm]	Densidade[%]
SPEC1	0,1	50
SPEC2	0,1	30
SPEC3	0,125	50
SPEC4	0,125	30
SPEC5	0,2	50
SPEC6	0,2	30
SPEC7	0,1	100

Tabela 5.5 - Parâmetros de impressão para peça de geometria complexa

Parâmetro	Valor
Altura da Camada	Tabela 5.4
Espessura da Linha	0,5mm
Espessura da Parede	1mm
Número de Linhas de Parede	2
Espessura da Base e do Topo	1mm
Número de Camadas da Base e do Topo	Variável conforme Tabela 5.4
Porcentagem de Preenchimento	Tabela 5.4
Padrão de Preenchimento	Triangular
Direção do Preenchimento	0°
Material	Nylon (PA6)
Temperatura da Câmara	23°C
Temperatura de Impressão	235°C
Temperatura da Mesa de Impressão	Mesa Não Aquecida
Velocidade de Impressão	60mm/s
Velocidade de Impressão do Preenchimento	45mm/s

Os parâmetros do Software também foram alterados e são apresentados na Tabela 5.6. Estes parâmetros vão de encontro ao estudo que se quer replicar assim como a impressora utilizada, a impressora Mark Two (Gen 2) da Markforged com impressão em Nylon PA6. (Markforged, 2020)

Tabela 5.6 - Parâmetros de simulação Digimat-AM

Parâmetro	Valor
Nome do Projeto	SPEC1_1*
Processo de Impressão	FFF
Área de Impressão	320x132x154 [mm]
Plataforma de Impressão	Amovível
Tipo de Análise	Termomecânica
Material	Nylon (PA6)
Ordem de Produção	Impressão; Arrefecimento; Remoção do Suporte
Tamanho da Malha	0,5 mm
Temperatura da Câmara	23°C
Temperatura de Impressão	235°C
Temperatura da Mesa	Não Aquecida
Espessura da Linha	0,5 mm
Tamanho do Elemento	0,5 mm
Tipo de Simulação	Camada a Camada
Número de Iterações	2

*O primeiro número do nome do projeto é referente ao provete, já o segundo número é referente à iteração. O projeto SPEC3_2 refere-se ao provete 3 na sua segunda iteração.

5.4.3 Testes Realizados e Análise de Resultados

Devido à geometria complexa da peça o ficheiro STL gerado contava com 64200 faces, Figura 5.14 (direita), o que provocou uma grande carga na memória de computação enquanto os testes corriam, fazendo com que o programa bloqueasse várias vezes, impedindo a gravação do teste assim como a obtenção de resultados. Após um teste concluído com sucesso, foi realizado outro com um STL de baixa qualidade de 204 faces, Figura 5.14 (esquerda), realizando-se o mesmo teste com os mesmos parâmetros a fim de comparar os dois. Os testes tiveram resultados semelhantes apresentados nas Figura 5.15/18 que diferiram em torno de 0,1%, no entanto, o software não bloqueava com este novo ficheiro STL, tornando-se também um processo muito mais rápido devido à diminuição de memória requerida para renderizar a peça.

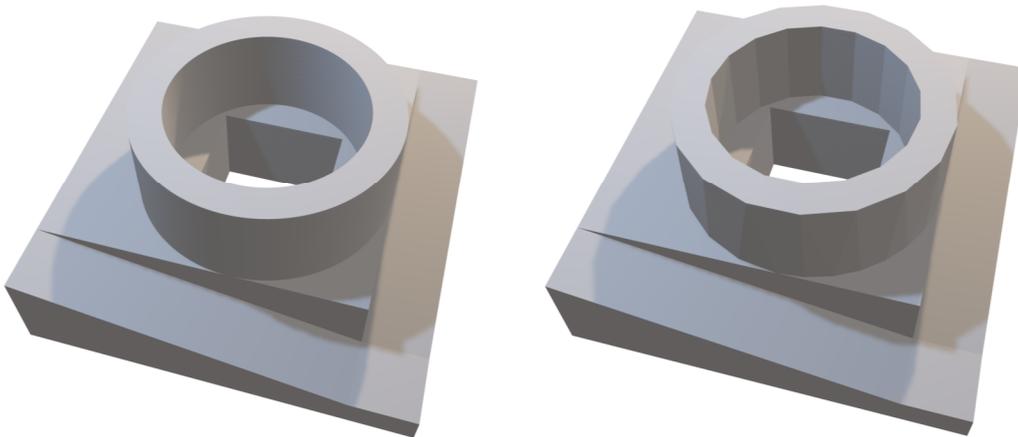


Figura 5.14 - Modelos STL de alta e baixa resolução

É possível comprovar que para a primeira iteração, Figura 5.15 e Figura 5.16 que os resultados são similares, assim como na segunda iteração Figura 5.17 e Figura 5.18.

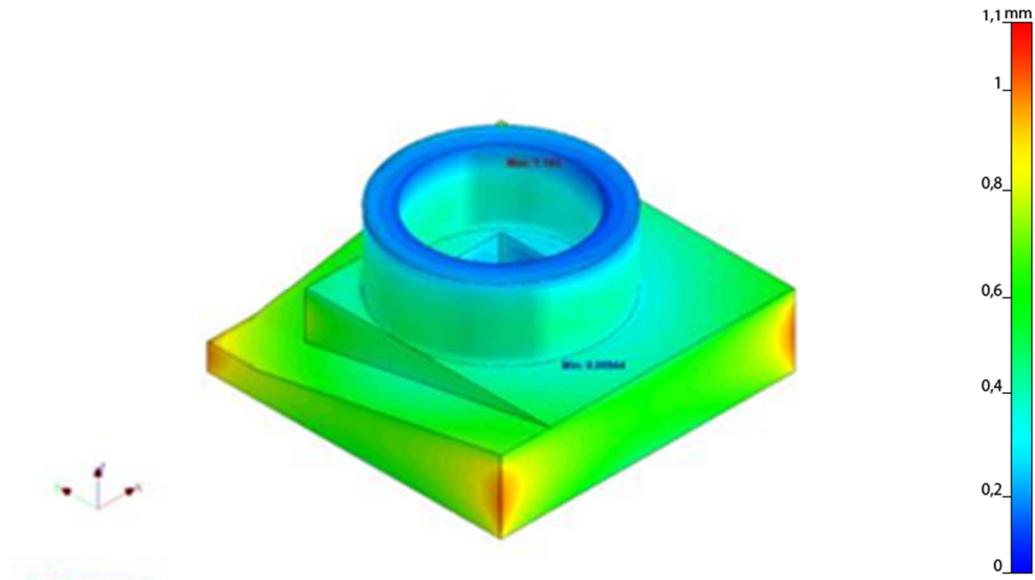


Figura 5.15 - 1ª Iteração alta resolução

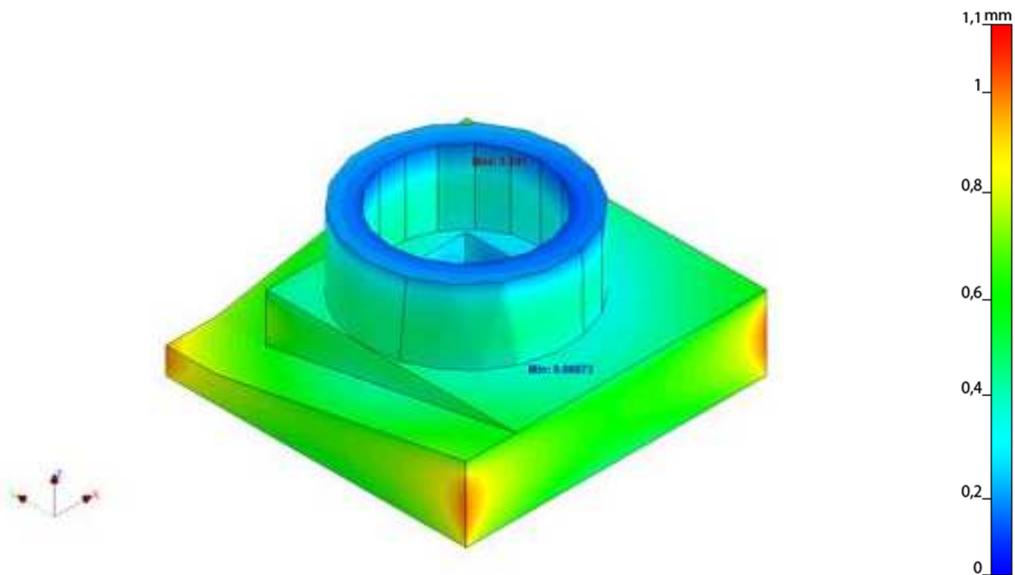


Figura 5.16 - 1ª Iteração baixa resolução

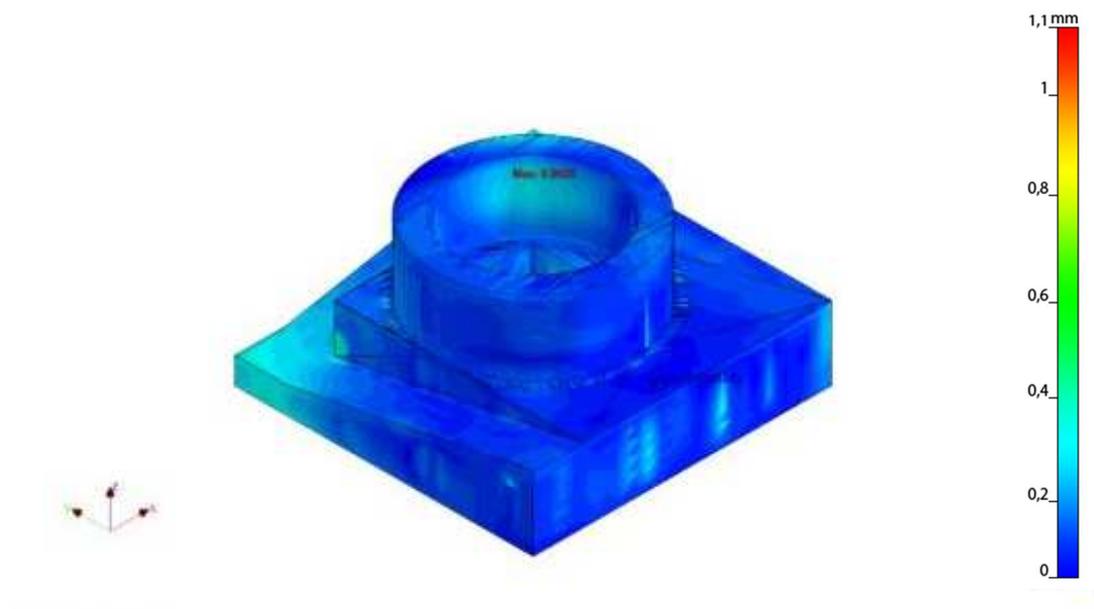


Figura 5.17 - 2ª Iteração alta resolução

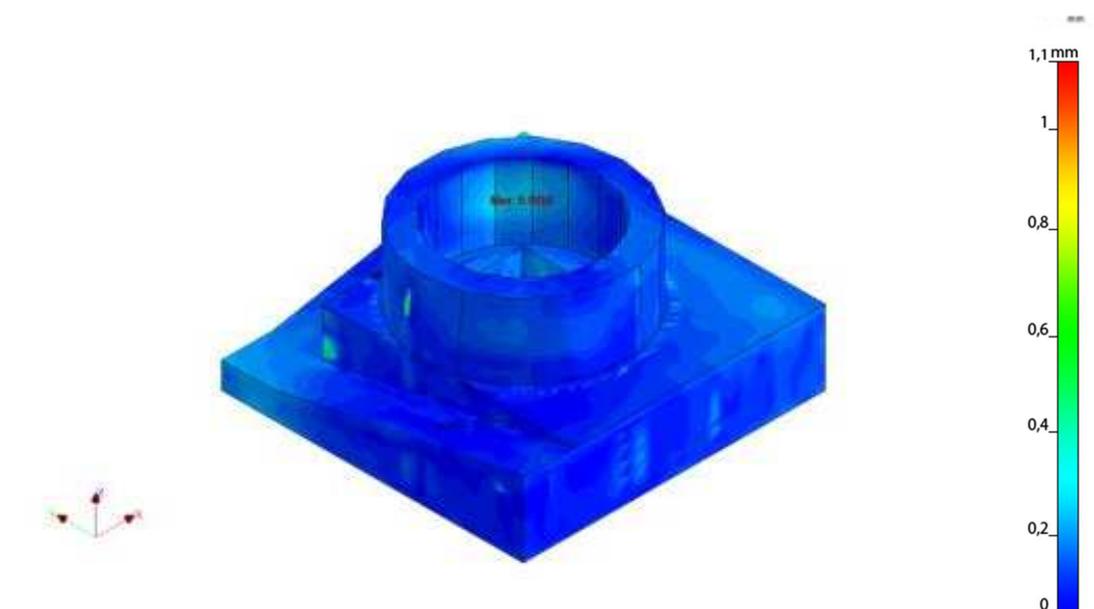


Figura 5.18 - 2ª Iteração baixa resolução

Ficou assim comprovado que a resolução do ficheiro STL é desprezável para o estudo realizado e assim, todos os testes foram efetuados com o ficheiro de menor resolução, por ser mais rápido, passando de 1h para 15min nos testes com elementos de maior dimensão e de 4h para 2h nos testes com elementos de menor dimensão, e também por utilizar menos memória, não fazendo com que o software bloqueie.

5.4.3.1 - Análise aos resultados da 1ª iteração

Na Tabela 5.7, são apresentadas as simulações efetuadas assim como os parâmetros em que diferenciam e os resultados obtidos dos deslocamentos máximos dessas simulações.

Tabela 5.7 – Simulações e resultados efetuados no Digimat-AM

Teste	Altura Camada [mm]	Densidade	Tempo de Teste [min]	Deslocamento Max [mm]	Obs.
SPEC1_1	0,1	50%	180	2,746	
SPEC1_2	0,1	50%	240	1,959	Erro: Programa bloqueou
SPEC2_1	0,1	30%	180	2,713	
SPEC2_2	0,1	30%	240	0,3604	
SPEC3_1	0,125	50%	180	2,719	
SPEC3_2	0,125	50%	240	1,925	Erro: Programa bloqueou
SPEC4_1	0,125	30%	180	2,711	
SPEC4_2	0,125	30%	240	0,3753	
SPEC5_1	0,2	50%	180	2,815	
SPEC5_2	0,2	50%	240	0,4598	
SPEC6_1	0,2	30%	180	2,649	
SPEC6_2	0,2	30%	240	0,366	
SPEC7_1	0,1	100%	180	2,612	
SPEC7_2	0,1	100%	240	0,615	

Os deslocamentos obtidos são em todas as simulações similares visualmente e estão representados nas Figura 5.19 e Figura 5.20. A única exceção cabe à segunda iteração dos provetes 1 e 3 onde ocorreram erros no software.

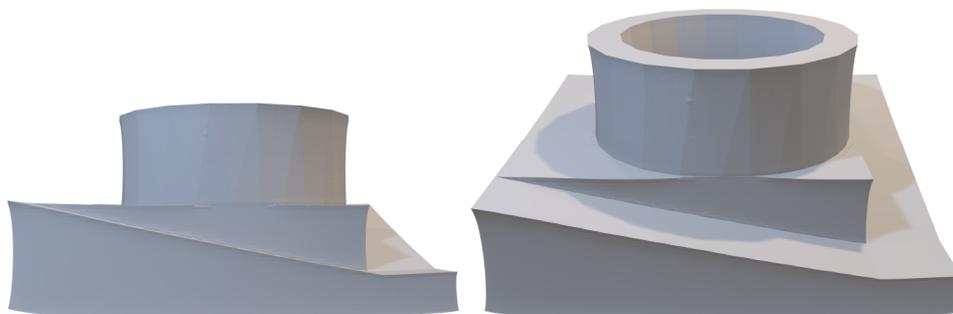


Figura 5.19 - Peça complexa deformada vista lateral e lateral superior

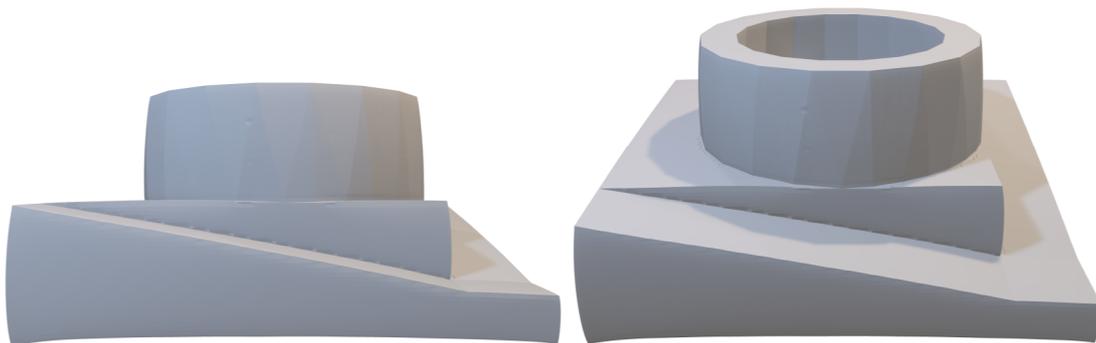


Figura 5.20 - Peça complexa compensada vista lateral e lateral superior

Na segunda iteração dos provetes 1 e 3 a simulação bloqueou entre os 80 e os 90% de conclusão. Após repetição dos mesmos, voltaram a bloquear na mesma percentagem. Este bloqueio deve-se a uma possível acumulação de tensões num ponto da peça a imprimir sendo que o problema foi ultrapassado alterando o padrão de preenchimento de triangular Figura 5.21 (esquerda), para quadrangular Figura 5.21 (direita).

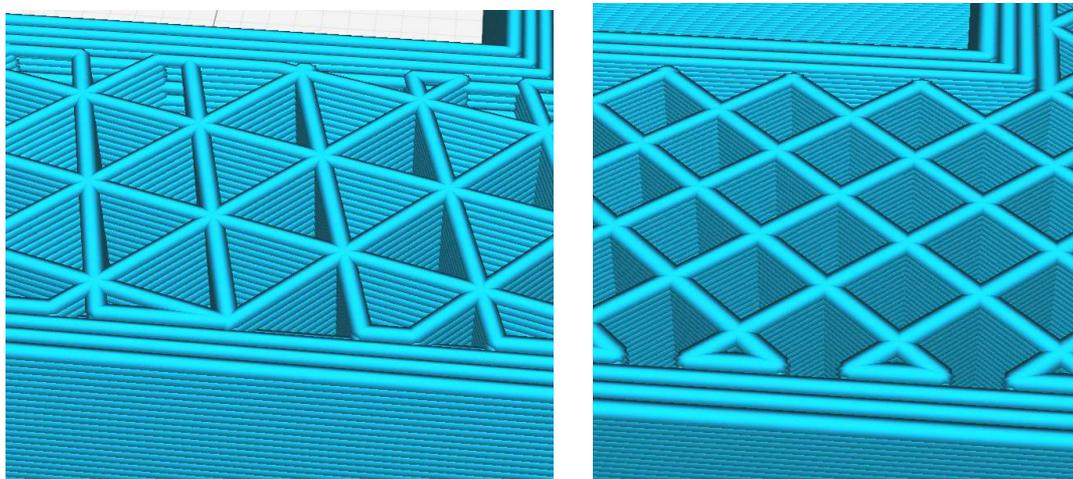


Figura 5.21 - Comparação de padrões de preenchimento

Os resultados obtidos através da geometria quadrangular assim como as simulações que bloquearam o software, não foram tidos em conta para o conjunto de resultados deste estudo, servindo apenas para detetar qual o problema produzido e como ultrapassá-lo.

Os resultados validados confirmam os testes realizados ao software, existe uma redução significativa dos deslocamentos ao imprimir a peça compensada ao invés do modelo original. Esta diferença pode ser compreendida tendo em conta a Figura 5.22.

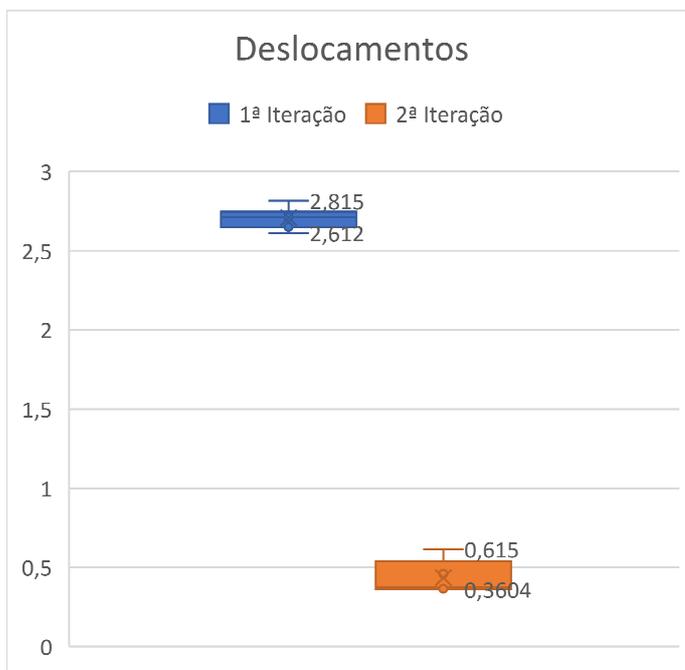


Figura 5.22 - Deslocamentos das simulações realizadas [mm]

A verdadeira questão em estudo coloca-se quando se tenta compreender que parâmetros de impressão provocam menores deslocamentos. Para isso foram estudados como variavam os deslocamentos da primeira iteração tendo em conta a densidade e a altura da camada. A Figura 5.23 mostra a relação entre a percentagem de preenchimento e a deformação máxima esperada na peça a imprimir. A Figura 5.24 assinala a mesma relação sem o *outlier* de 100% de preenchimento. Por fim a Figura 5.25 indica a relação entre a altura da camada e a deformação máxima esperada.

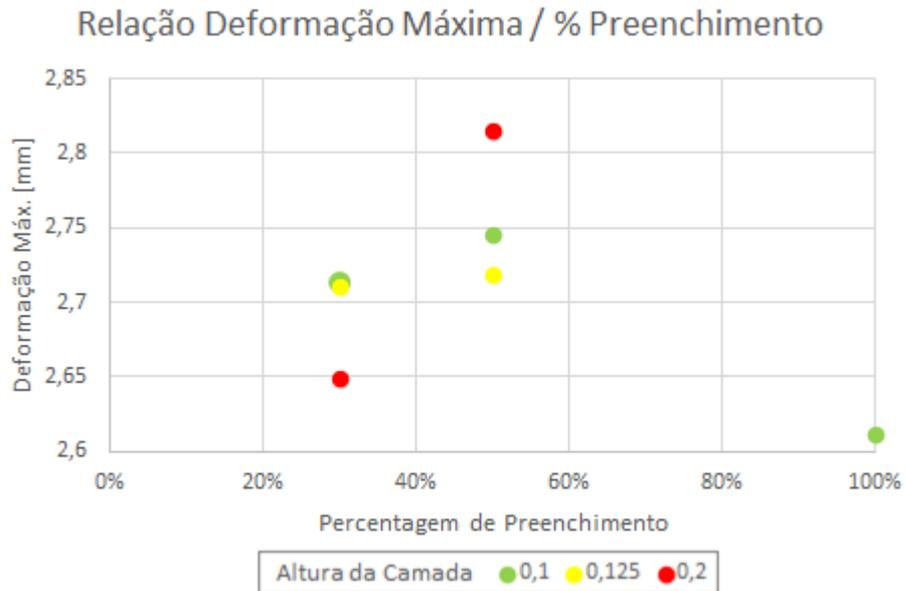


Figura 5.23 - Relação entre deformação e preenchimento, 1ª iteração

A correspondência entre a deformação e a percentagem de preenchimento parece não apresentar uma relação concreta. No entanto esta não-relação pode ser apenas devido ao ponto de 100% de preenchimento.

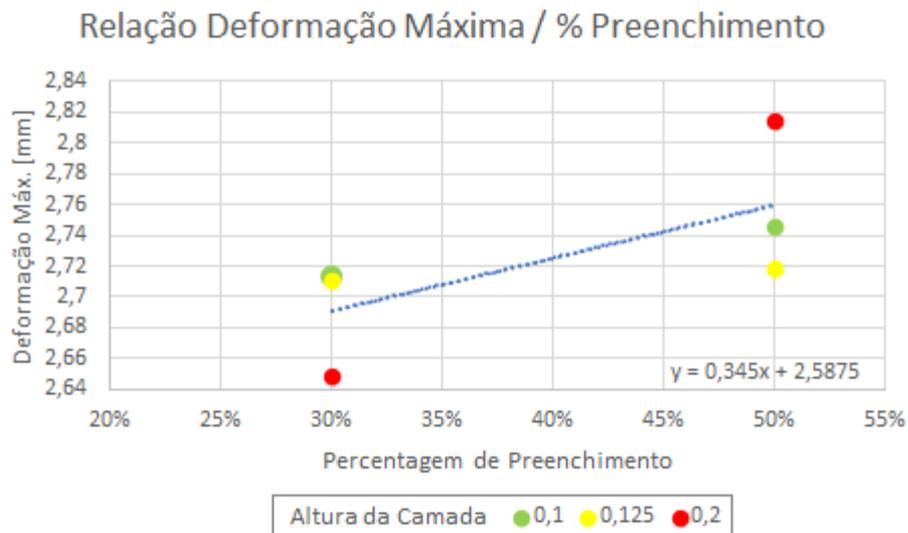


Figura 5.24 - Relação entre deformação e preenchimento sem preenchimento a 100%, 1ª iteração

A remoção deste ponto faz denotar uma tendência linear entre os pontos de preenchimento 30 e 50%. Esta relação é apresentada sob a forma de uma equação de regressão linear na Figura 5.24.

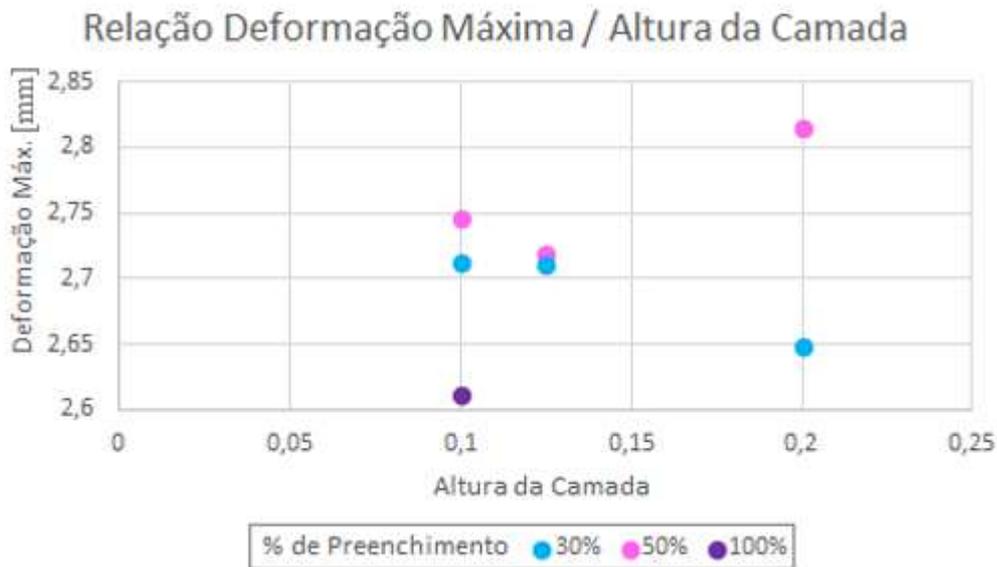


Figura 5.25 - Relação entre deformação e altura da camada, 1ª iteração

Os resultados desta relação não demonstram por si só nenhuma tendência aparente, não podendo ser esta demonstrada através de qualquer função. Poderão estes resultados significar que não existe uma relação entre a deformação e a altura da camada, ou simplesmente que não existe informação suficiente para que se tire uma conclusão.

Demonstra-se então a necessidade de realizar uma nova bateria de testes em que se modifica apenas a altura da camada a fim de verificar as diferenças nos deslocamentos com a alteração apenas deste parâmetro. Estas simulações têm os seus parâmetros apresentados na Tabela 5.8 e foram realizadas em ABS com os parâmetros iguais aos do teste 3 descritos durante o ponto 5.3.1, na Tabela 5.1 e na Tabela 5.2.

Tabela 5.8 – Parâmetros e resultados do ensaio da variação da altura da camada, 1ª iteração

Teste	Altura Camada [mm]	Tempo de Teste [min]	Deslocamento Max [mm]
E1_1	0,1	10	1,223
E1_2	0,1	10	0,3007
E2_1	0,15	10	1,217
E2_2	0,15	10	0,5948
E3_1	0,2	10	1,192
E3_2	0,2	10	0,567

Com estes novos resultados podemos demonstrar através da Figura 5.26 que existe uma relação entre estas duas variáveis.

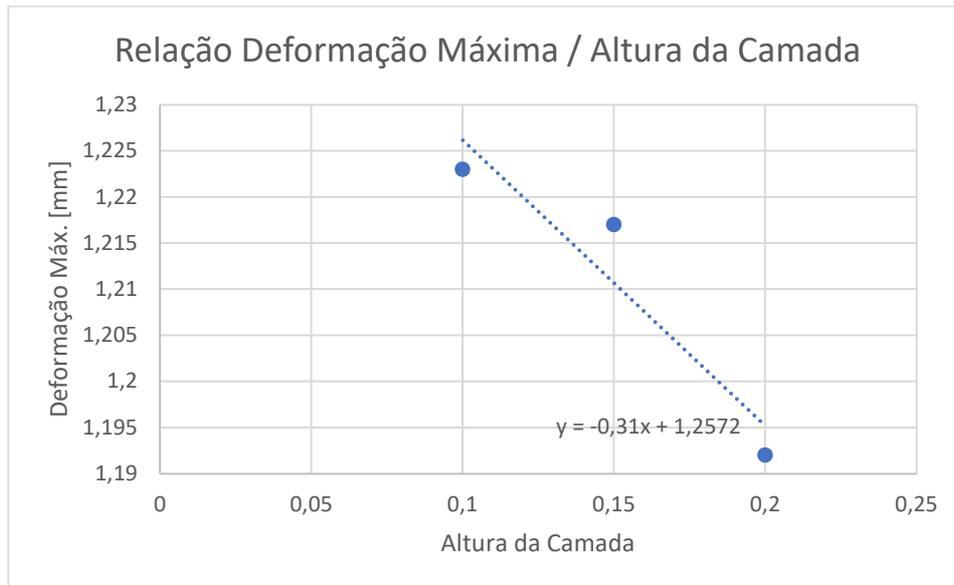


Figura 5.26 - Relação entre deformação e altura da camada em ABS, 1ª iteração

Esta relação inversa é claramente evidente nestas simulações o que pode comprovar que quanto maior a espessura da camada, menor a deformação, o que pode ser consequência de menos ciclos de aquecimento/arrefecimento (menor número de camadas necessárias para imprimir a peça) e/ou devido à maior rigidez de camada no caso de espessuras de camada mais elevada.

5.4.3.2 Análise aos resultados da 2ª iteração

Nesta secção serão feitas análises semelhantes às realizadas na secção anterior. Note-se, no entanto que, dado o menor valor absoluto das deformações, os erros numéricos associados ao método de calculo terão uma maior influência nos resultados obtidos, sendo por isso estes resultados menos relevantes que os da 1ª iteração. Estas deformações são apresentadas na Figura 5.22, de 2,8 a 2,6mm na 1ª iteração para 0,6mm a 0,4mm na 2ª iteração.

Na Figura 5.27 apresenta-se a influência da % de preenchimento na deformação máxima. Os resultados são semelhantes aos obtidos para a 1ª iteração, sendo os declives da reta de interpolação são semelhantes. Note-se que este declive quantifica a influência da percentagem de preenchimento na deformação máxima.

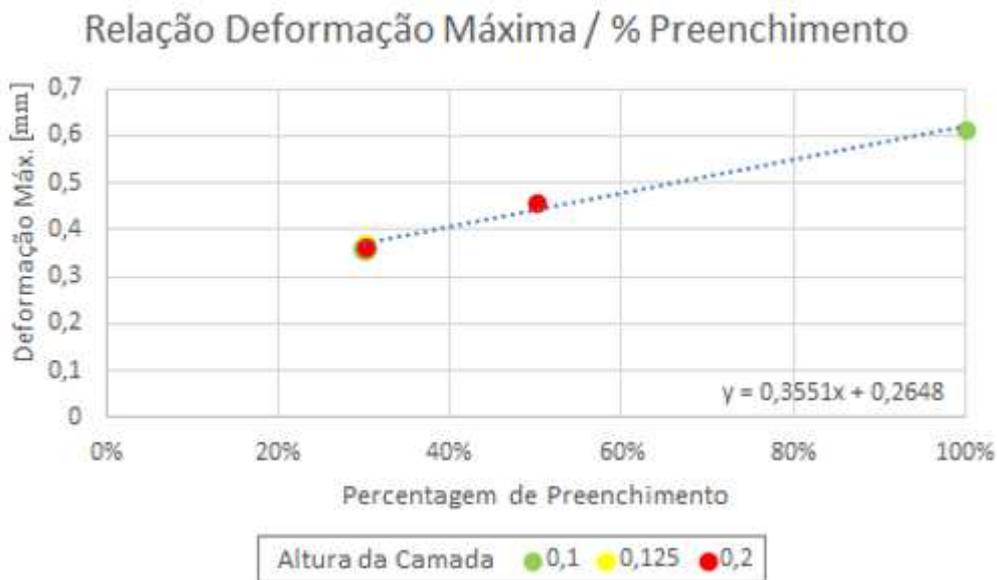


Figura 5.27 - Relação entre deformação e preenchimento, 2ª iteração

No que toca à relação da deformação em função da altura da camada, esta comparação, como mostra a Figura 5.28 pode demonstrar que quanto maior a altura da camada, maior o erro associado à peça impressa em relação à sua geometria original.

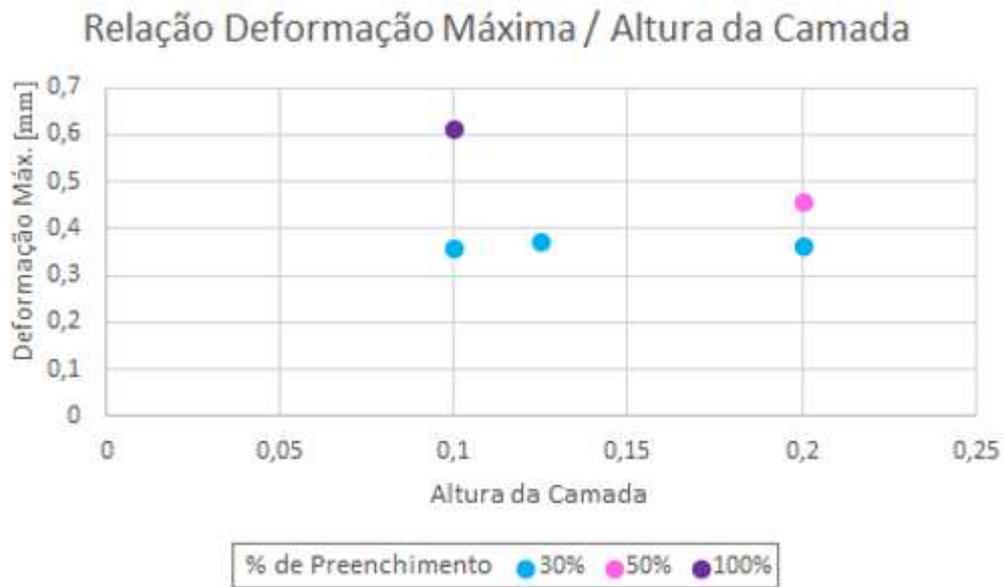


Figura 5.28 - Relação entre deformação e altura da camada em nylon, 2ª iteração

Procede-se então ao estudo da relação da deformação em função da altura da camada para a 2ª iteração na bateria de testes extra feito em ABS, Figura 5.29, e comprova-se mais uma vez que quanto maior a altura da camada, maior o erro em relação à geometria original.

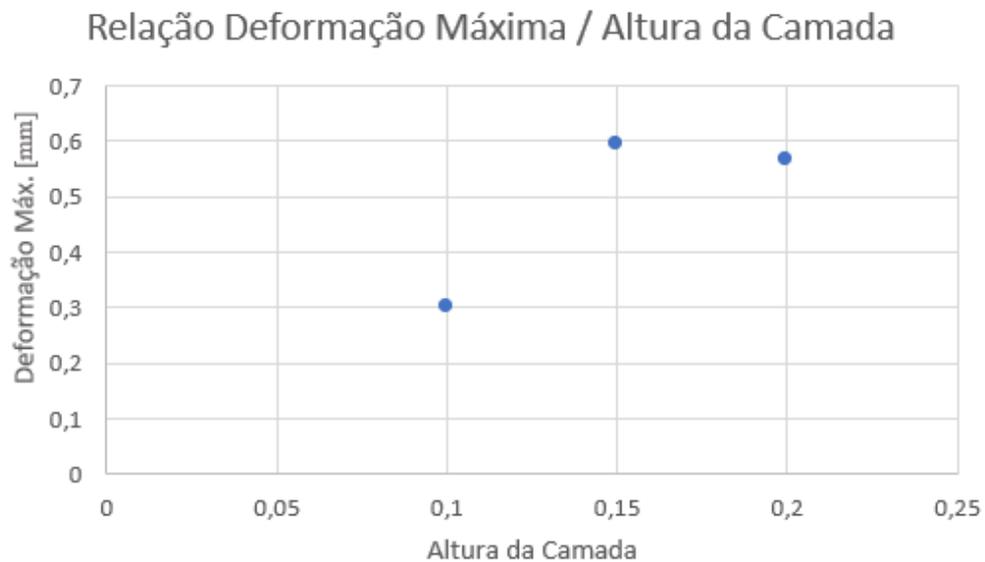


Figura 5.29 - Relação entre deformação e altura da camada em ABS preenchimento de 20%, 2ª iteração

Pode-se afirmar que as tendências da deformação com a espessura da camada e com a percentagem de enchimento são claras na 1ª iteração, contudo os erros associados são mais altos quando se têm espessuras de camada maiores.

Estes resultados vão de encontro aos encontrados no estudo “A STUDY ON THE EFFECT OF LAYER THICKNESS AND INFILL DENSITY ON GEOMETRIC TOLERANCE IN FDM” (Pombinha *et al.*, 2018), onde se verifica que quanto maior a altura da camada, maiores os erros geométricos da peça testada como mostrado na Tabela 5.9. De notar que em Pombinha *et al.*, 2018 foi estudada a tolerância geométrica, e em contrapartida este estudo analisa numericamente os desvios em relação ao CAD (modelo perfeito).

Apesar de os autores em Pombinha *et al.*, 2018 não referirem as razões para estes erros ocorrerem, assumem que a variação de temperatura assume um papel principal, o que se comprova nos resultados desta dissertação.

Tabela 5.9 - Resultados para o nível de confiança de 95% para cada altura de camada do erro de tolerância (valores em mm)

(Pombinha et al., 2018)

Altura da Camada	0,1 mm	0,125 mm	0,2 mm	Alcance [mm]
Planicidade	0,120	0,105	0,095	0,025
Concentricidade	0,177	0,183	0,258	0,081
Perpendicularidade	0,338	0,565	0,639	0,301
Paralelismo Circular	0,227	0,353	0,251	0,126

Capítulo 6

Conclusões

6.1 Conclusões

A tecnologia abrangida neste estudo, apesar de não se encontrar numa fase embrionária, está no que se pode chamar o seu pico de explosão tecnológica. Com o desenvolvimento de novos materiais cada vez mais abrangentes, as indústrias adaptam-se a uma produção dependente da impressão 3D, por ser mais flexível e cada vez mais rápida no que toca à evolução do seu produto para colmatar nichos de mercado. É principalmente nesta explosão de evoluções que encontramos desenvolvimentos como o software Digimat-AM que consegue através de cálculo numérico de elementos finitos otimizar a impressão, reduzindo defeitos dimensionais, geométricos e tensões residuais.

Pode-se formalizar que existe uma relação de proporcionalidade direta entre a deformação e a percentagem de preenchimento, detetada na Figura 5.24, no entanto existe uma relação inversa entre a deformação máxima e a altura da camada de impressão para a 1ª iteração, Figura 5.26. Estes resultados são confirmados pela literatura apresentada, mais propriamente pelos resultados experimentais de (Pombinha *et al.*, 2018).

Estas formalizações são realizadas com base nos resultados das simulações por software Digimat-AM e devem por isso ser confirmadas em modelos impressos fisicamente em impressoras 3D por FFF.

O futuro da impressão 3D, principalmente na tecnologia FFF, passará por testar novos materiais poliméricos e desenvolver as suas aplicações. De momento os mais esperados serão os polímeros de alta resistência que abrangerão um vasto leque de aplicações na indústria, substituído também os materiais utilizados atualmente.

Para que estes materiais possam ser utilizados na indústria, é necessária a ajuda de softwares de computação numérica como o testado, a fim de que a impressão desses seja fiável tanto como possível e ir de encontro às exigências sempre crescentes da indústria atual.

6.2 Propostas de Trabalhos Futuros

Será interessante estudar no futuro se os testes feitos neste estudo correspondem a testes experimentais realizados em impressoras FFF com os materiais utilizados, assim como compreender como diferentes materiais se deformam utilizando a mesma geometria. Esses serão os principais objetivos a estudar para que a impressão 3D seja aplicada na indústria com um maior grau de sucesso.

Bibliografia

AARDEMA, Lauren - **PEEK Filament Data Sheet** [Em linha]. Haarlem, The Netherlands : 3D4Makers, 2018, atual. 2018. [Consult. 12 fev. 2021]. Disponível em WWW:<URL:https://cdn.shopify.com/s/files/1/0762/2839/files/TDS_PEEK_Filament_1.pdf?5159116558357548495>. [Consult. 12 fev. 2021].

ANWAR, Shafkat *et al.* - 3D Printing is a Transformative Technology in Congenital Heart Disease. **JACC: Basic to Translational Science**. . ISSN 2452302X. 3:2 (2018) 294–312. doi: 10.1016/j.jacbts.2017.10.003.

ASNAFI, Nader *et al.* - 3D Metal Printing From an Industrial Perspective. **BHM Berg und Hüttenmännische Monatshefte**. . ISSN 0005-8912. 164:3 (2019) 91–100. doi: 10.1007/s00501-019-0827-z.

ATTARAN, Mohsen - The Rise of 3-D Printing: The Advantages of Additive Manufacturing Over Traditional Manufacturing. **Business Horizons**. . ISSN 00076813. 60:5 (2017) 677–688. doi: 10.1016/j.bushor.2017.05.011.

CHAMPLAIN, John; WOODCOCK, Jeff - Understanding Gcode Commands. **Image Engraving**. [Em linha] (2015). 6. Disponível em WWW:<URL:https://www.picengrave.com/Pic Programs Page/PDF Files/misc/Understanding Gcode.>. [Consult. 30 jan. 2021].

CHUANG, Kathy C. *et al.* - Additive Manufacturing and Characterization of ULTEM Polymers and Composites. **Composites and Advanced Materials Expo**. [Em linha] (2015). 448–463. Disponível em WWW:<URL:https://ntrs.nasa.gov/citations/20160000203>.

CICALA, Gianluca *et al.* - Comparison of Ultem 9085 Used in Fused Deposition Modelling (FDM) with Polytherimide Blends. **materials**. 11:285 (2018) 1–14. doi: 10.3390/ma11020285.

COOKE, A. L.; SOONS, J. A. - Variability in the Geometric Accuracy of Additively Manufactured Test Parts. Em **Proceedings of 21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium**. Austin, TX : National Institute of Standards and

Technology, Gaithersburg, MD, USA, 2010

DILBEROGLU, Ugur M.; SIMSEK, Seyda; YAMAN, Ulas - Shrinkage Compensation Approach Proposed for ABS Material in FDM Process. **Materials and Manufacturing Processes**. . ISSN 1042-6914. 34:9 (2019) 993–998. doi: 10.1080/10426914.2019.1594252.

DWORAK, Michał; BŁAŻEWICZ, Stanislaw - Mechanical Assessment of a Hip Joint Stem Model Made of a PEEK/Carbon Fibre Composite Under Compression Loading. **Acta of Bioengineering and Biomechanics**. . ISSN 1509409X. 18:2 (2016) 71–79. doi: 10.5277/ABB-00359-2015-02.

E-XSTREAM - Digimat-AM Manual. [Em linha] (2017). XII: 1345–1397. Disponível em WWW:<URL:www.e-Xstream.com>. [Consult. 30 jan. 2021]

E-XSTREAM - Digimat Software Brochure. [Em linha] (2019). 1–15. Disponível em WWW:<URL:https://bit.ly/2L7FE9r>. [Consult. 30 jan. 2021]

GARCÍA PLAZA, Eustaquio *et al.* - Analysis of PLA Geometric Properties Processed by FFF Additive Manufacturing: Effects of Process Parameters and Plate-Extruder Precision Motion. **Polymers**. . ISSN 20734360. 11:10 (2019). doi: 10.3390/polym11101581.

HAGEDORN-HANSEN, D.; OOSTHUIZEN, G. A.; GERHOLD, T. - Resource-Efficient Process Chains to Manufacture Patient-Specific Prosthetic Fingers. **South African Journal of Industrial Engineering**. . ISSN 22247890. 27:1 (2016) 75–87. doi: 10.7166/27-1-1279.

HEBDA, Michael *et al.* - A Method for Predicting Geometric Characteristics of Polymer Deposition During Fused-Filament-Fabrication. **Additive Manufacturing**. . ISSN 2214-8604. 27:October 2018 (2019) 99–108. doi: 10.1016/j.addma.2019.02.013.

HÉBERT, Philippe *et al.* - Holistic Multiscale Simulation Approach for Additive Layer Manufacturing of Plastics. **SPE ACCE**. (2016). 1–15.

MARAVOLA, Michael *et al.* - Epoxy Infiltrated 3D Printed Ceramics for Composite Tooling Applications. **Additive Manufacturing**. . ISSN 22148604. 25:Oct18 (2019) 59–63. doi: 10.1016/j.addma.2018.10.036.

MARKFORGED - Mark Two Datasheet. **Markforged.com**. [Em linha]. ISSN 00392049 (2020). F-PR-2027:4.3 1. Disponível em WWW:<URL:https://s3.amazonaws.com/mf.product.doc.images/Datasheets/F-PR-2027.pdf>. [Consult. 30 jan. 2021]

NGO, Tuan D. *et al.* - Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges. **Composites Part B: Engineering**. . ISSN 13598368. 143:Dec17 (2018) 172–196. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.

POLYFLUOR PLASTICS - PEEK Filament Datasheet. [Em linha] (2011). 1–3. Disponível em WWW:<URL:https://pdf.directindustry.com/pdf/polyfluor-plastics-bv/datasheet-material-peek/56544-602204.html>. [Consult. 30 jan. 2021]

POMBINHA, Pedro *et al.* - A Study on the Effect of Layer Thickness and Infill Density on Geometric Tolerance in FDM. **Proceedings of the 3rd International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2018)**. May (2018) 14–17.

RAVOORI, Darshan *et al.* - Nozzle-Integrated Pre-Deposition and Post-Deposition Heating of Previously Deposited Layers in Polymer Extrusion Based Additive Manufacturing. **Additive Manufacturing**. . ISSN 22148604. 28:January (2019) 719–726. doi: 10.1016/j.addma.2019.06.006.

REDWOOD, Ben; SCHÖFFER, Filemont; GARRET, Brian - The 3D Printing Handbook. **3D Hubs**. [Em linha]. ISSN 9082748509 (2017). 304. Disponível em WWW:<URL:https://www.3dhubs.com/3d-printing-handbook/>.

SADEK, Sherif Aly - Comparative Study Clarifying the Usage of PEEK as Suitable Material to Be Used as Partial Denture Attachment and Framework. 7:7 (2019) 1193–1197.

STANSBURY, Jeffrey W.; IDACAVAGE, Mike J. - 3D Printing With Polymers : Challenges Among Expanding Options and Opportunities. **Dental Materials**. . ISSN 0109-5641. 32:1 (2015) 54–64. doi: 10.1016/j.dental.2015.09.018.

STRATASYS - Ultem 9085 Data Sheet. (2013). 1–2.

STRATASYS - ULTEM 1010 Resin Data Sheet. [Em linha] (2014). 1–3. Disponível em WWW:<URL:https://www.cati.com/docs/go/ultem_1010_material_spec_sheet_mcad.

pdf>. [Consult. 30 jan. 2021]

STRATASYS - FDM TPU 92A Datas Sheet. (2018). 1–2.

STRATASYS - Antero 840CN03 Data Sheet. (2019). 12.

ZHA, Wentao; ANAND, Sam - Geometric Approaches to Input File Modification for Part Quality Improvement in Additive Manufacturing. **Journal of Manufacturing Processes**. . ISSN 15266125 (2015). 20: 465–477.

ZHU, Zuowei; ANWER, Nabil; MATHIEU, Luc - Shape Transformation Perspective for Geometric Deviation Modeling. **Procedia CIRP**. . ISSN 2212-8271. 75:2018) 75–80. doi: 10.1016/j.procir.2018.04.038.