

• U • C •

FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Processos subtrativos versus aditivos para o fabrico de componentes de plástico

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Projeto Mecânico

Subtractive processes versus additive for the manufacture of plastic components

Autor

Pedro Miguel Videira Rodrigues

Orientadores

Doutor Pedro Vale Antunes

Mestre Daniel Gatões

Júri

Presidente Professora Doutora Maria Teresa Freire Vieira
Professora da Universidade de Coimbra

Orientador Professor Doutor Pedro Vale Antunes
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogais

Mestre Bruno da Costa Martins
Investigador Auxiliar da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



Sociedade Industrial de Reconstrução
De Máquinas e Ferramentas Lda.

Coimbra, Setembro 2018

Bons artistas copiam, grandes artistas roubam.

Pablo Picasso, 1927.

Agradecimentos

[O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.]

Resumo

No mundo actual, devido à elevada competitividade entre empresas e à evolução da tecnologia, uma nova revolução industrial está iminente (Indústria 4.0). É assim necessário a adaptação a esta nova realidade onde o fabrico de peças complexas e personalizáveis é essencial. A utilização ou integração de técnicas de Manufatura Aditiva (AM, em Inglês, *Additive Manufacturing*) pode ser a resposta para estas novas necessidades.

A presente dissertação de mestrado foca-se na comparação da qualidade apresentada pelas peças poliméricas produzidas por Sinterização Seletiva por Laser (SLS, em inglês, *Selective Laser Sintering*), Modelação por Deposição de Material Fundido (FDM, em Inglês *Fused Deposition Modelling*) e processos subtrativos de forma a verificar para que situações será economicamente viável a implementação ou integração dos processos AM na linha de produção das empresas.

No entanto a rugosidade da superfície é um dos problemas da utilização destas técnicas, de forma a minimizar esta limitação as peças produzidas em AM tiveram de passar por um pós-processamento. Para as peças produzidas por FDM utilizou-se a lixa e a acetona como pós-processamentos, já para o SLS foi usado jateamento abrasivo.

Quando comparadas as características das peças produzidas por cada método verifica-se que os processos subtrativos apresentam propriedades mecânicas um pouco superiores aos AM. De entre as duas técnicas AM escolhidas o SLS apresentou continuamente melhores propriedades mecânicas excepto na rugosidade das peças, esta disparidade podem ser explicadas através da diferença de densidade apresentada nos componentes produzidos por SLS e FDM.

Palavras-chave: AM, SLS, FDM, Rugosidade, Propriedades Mecânicas, Pós-processamento.

Abstract

In today's world, due to the high competitiveness between companies and the evolution of technology, a new industrial revolution is imminent (Industry 4.0). This has led to the necessity of adaptation to this new reality, where the manufacture of complex and customizable parts is crucial. The solution to these new needs may well be the use or integration of Additive Manufacturing (AM).

The present Master's dissertation focuses on the assessment of the quality presented by the polymeric parts produced by Selective Laser Sintering (SLS), Fused Deposition Modeling (FDM) and subtractive processes, in order to verify for which situations the implementation or integration of AM processes in the company's production line will be economically feasible and efficient.

However one of the problems that derived with the use of these techniques was the roughness of the surface. In order to minimize this limitation, the pieces produced in AM had to undergo post-processing. For the parts produced by FDM sandpaper and acetone were used as post-processing, for the SLS abrasive blasting was used.

When comparing the characteristics of the pieces produced by each method it is verified that the subtractive processes present mechanical properties slightly superior to the AM. From the two AM techniques chosen, the SLS presented the best mechanical properties, except for the roughness of the pieces, this variance can be explained by the difference in density presented in the components produced by SLS and FDM.

Keywords AM, SLS, FDM, Roughness, Mechanical Properties, Post-Processing.

Índice

Índice de Figuras.....	vii
Índice de Tabelas	ix
Simbologia e Siglas.....	x
Simbologia.....	x
Siglas	x
Introdução.....	1
1. Revisão Bibliográfica	3
1.1. Processos Aditivos	3
1.1.1. FDM.....	6
1.1.2. SLS.....	11
2. Métodos e Processos	17
2.1. Material	17
2.1.1. Filamentos.....	17
2.1.2. Pó de PA12.....	18
2.2. FDM.....	19
2.2.1. Condições operacionais.....	19
2.2.2. Condições funcionais	20
2.3. SLS.....	22
2.3.1. Condições operacionais.....	22
2.3.2. Condições funcionais	23
2.4. Caracterização dos componentes.....	25
2.4.1. Ensaio de tração	25
2.4.2. Ensaio de flexão	26
2.4.3. Ensaio de dureza	27
2.4.4. Picnometria de hélio	27
2.4.5. Microscopia de variação de foco	28
2.4.6. Espectrometria de difracção laser	29
2.4.7. TGA	29
2.4.8. Microscopia Óptica.....	29
2.4.9. Pino-disco.....	29
2.5. Pós-processamento.....	30
2.5.1. FDM.....	30
2.5.2. SLS.....	30
3. Resultados e discussão	32
3.1. Caracterização do pó.....	32
3.1.1. Espectrometria de difracção de laser	32
3.1.2. TGA	33
3.1.3. Microscopia Óptica.....	34
3.2. Caracterização dos componentes.....	35

3.2.1. FDM	35
3.2.2. SLS	47
Conclusões	57
Trabalhos Futuros.....	58
Referências Bibliográficas	59
Apêndice A- Peças e provetes produzidos.....	66
Apêndice B- Sinterização de polimeros semi-cristalinos	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Princípio de funcionamento das técnicas AM [7]	3
Figura 1.2. Processos Subtrativos vs Aditivos [8]	4
Figura 1.3. Quantidade de publicações feitas relativamente à prototipagem rápida (RP), Impressão 3D e manufatura aditiva (AM) [11]	4
Figura 1.4. Exemplos de materiais utilizados em FDM	8
Figura 1.5. Parâmetros chave da técnica FDM [18]	8
Figura 1.6. Utilização de suportes gerais [21]	10
Figura 1.7. Utilização de suportes com capacidade para se dissolver [21]	11
Figura 1.8. SinterStation 2000 [26]	12
Figura 1.9. Exemplos de materiais utilizados em SLS	13
Figura 2.1. Leapfrog Creatr [43]	19
Figura 2.2. SLS 3DSystem SPro 60 HD-HS	23
Figura 2.3. Dimensões do provete de tração normalizado (dimensões em mm)	25
Figura 2.4. Dimensões do provete de flexão normalizado (dimensões em mm)	26
Figura 2.5. Ensaio de flexão em provete de PLA	26
Figura 2.6. Medidor de Dureza Shore D	27
Figura 2.7. a) Picnómetro Micromeritics Accupyc 1330, b) Câmara de volume calibrado e câmara da amostra	28
Figura 3.1. Distribuição granulométrica do pó de PA12	32
Figura 3.2. Curva TGA para pó de PA12	33
Figura 3.3. Morfologia pó de PA12	34
Figura 3.4. Curvas Tensão-Deformação	36
Figura 3.5. Resistência à flexão e E do PLA, PA12 e POM por método FDM	38
Figura 3.6. Resistência à flexão e E do PLA, PA12 e POM por métodos subtrativos [60]– [62]	38
Figura 3.7. Imagem IFM para peça de PA12	40
Figura 3.8. Zonas de dimensionamento da peça 1	40
Figura 3.9. Zonas de dimensionamento da peça 2	41
Figura 3.10. Zonas de dimensionamento da peça 3	43
Figura 3.11. Zonas de dimensionamento da peça 4	43

Figura 3.12. Imagens adquiridas pelo IFM a) Peça 2 produzida em FDM com PLA, b) Peça 4 produzida por PS	45
Figura 3.13. Coeficiente de atrito dos materiais PA12,PLA e POM	46
Figura 3.14. Curvas Tensão-Deformação (PA12 por SLS).....	48
Figura 3.15. Orientação na vertical (provete à esquerda) e horizontal (provete à direita) [66].....	49
Figura 3.16. Efeito EOV em peças finas [68]	50
Figura 3.17. Imagens adquiridas pelo IFM da peça 1 produzida em SLS	53
Figura 3.18. Coeficiente de atrito do PA12	54
Figura 3.19. Peça 4 depois de sofrer jateamento abrasivo	56
Figura 3.20. Imagem adquirida pelo IFM do provete P1	56
Figura 3.21. Imagem adquirida pelo IFM do provete P2	56
Figura A.1. Provetes tração e flexão produzidos em 1.PLA; 2.POM; 3.PA12,FDM; 4.PA12,SLS	66
Figura A.2. Peças construídas em PLA pelo processo FDM.....	66
Figura A.3. Peças construídas em POM pelo processo FDM.....	67
Figura A.4. Peças construídas em PA12 pelo processo FDM	67
Figura A.5. Peças construídas em PA12 pelo processo SLS	68
Figura B.1. Formação do pescoço de sinterização	69

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1. Exemplos de técnicas AM.....	5
Tabela 1.2. Princípios de funcionamento das técnicas AM	6
Tabela 1.3. Exemplos e princípios de funcionamento de pós-processamentos no FDM.....	11
Tabela 1.4. Exemplos e princípios de funcionamento de pós-processamentos no SLS	15
Tabela 2.1. Condições operacionais FDM [42]	20
Tabela 2.2. Condições funcionais para a impressão de PLA,PA12 e POM através de FDM	21
Tabela 2.3. Condições operacionais SLS [50].....	23
Tabela 2.4. Parâmetros utilizados para impressão em SLS.....	24
Tabela 2.5. Variação da temperatura no aquecedor.....	24
Tabela 2.6. Variação da temperatura na zona de construção	25
Tabela 3.1. Resultados obtidos para ensaios de tração por FDM [60]–[62]	37
Tabela 3.2. Dureza Shore D para peças produzidas por FDM e por métodos substractivos [60]–[62].....	39
Tabela 3.3. Densidade para peças produzidas por FDM e por métodos substractivos [60]– [62]	39
Tabela 3.4. Dimensionamento geométrico da peça 1 para peças produzidas por FDM (PLA, PA12 e POM) e por PS	41
Tabela 3.5. Dimensionamento geométrico da peça 2 para peças produzidas por FDM (PLA, PA12 e POM) e por PS	41
Tabela 3.6. Dimensionamento geométrico da peça 3 para peças produzidas por FDM(PLA, PA12 e POM) e por PS.....	43
Tabela 3.7. Dimensionamento geométrico da peça 4, para peças produzidas por FDM (PLA, PA12 e POM) e por PS	44
Tabela 3.8. Rugosidade das peças produzidas por FDM (PLA) e PS.....	45
Tabela 3.9. Rugosidade da peça 4 antes e depois do pós-processamento.....	47
Tabela 3.10. Resultados Dureza Shore D para as peças produzidas por SLS e por métodos substractivos	50
Tabela 3.11. Densidade do PA12 e de PA12 maciço	51
Tabela 3.12. Dimensionamento das peças 1,2,3 e 4 produzidas em SLS	52
Tabela 3.13. Rugosidade das peças produzidas por SLS	53
Tabela 3.14. Rugosidades obtidas para peças produzidas em SLS	55

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

P_f – Pressão final

P_i – Pressão inicial

S_a – Rugosidade média da área selecionada

S_q – Rugosidade raiz quadrada da área selecionada

S_z – Rugosidade máxima da área selecionada

V_C – Volume da camara de expansão

V_a – Volume da amostra

V_{ca} – Volume da camara da amostra

ε_{max} – Deformação máxima

DV – Distância de Varrimento

P – Potência

VL – Velocidade do laser

E – Módulo de Elasticidade

e – Espessura de linha

m – Massa

ρ – Densidade

Siglas

3DP – 3D Printing

ABS – Acrilonitrila Butadieno Estireno

AM – Additive Manufacturing

ASTM – American Society for Testing and Materials

CAD – Computer Aided Design

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

EOV – End-of-vector

FDM – Fused Deposition Modelling
HIPS – Poliestireno de Alto Impacto
IFM – Infinite Focus Microscope
IoT – Internet of things
IPN – Instituto Pedro Nunes
IV– Infra Vermelhos
LOM – Laminated Object Manufacturing
M2M – Machine to machine
PA12 – Poliamida 12
PC – Policarbonato
PLA – Poliacido láctico
POM – Polioximetileno
PPSF – Polifenilsulfona
PS – Processos Subtrativos
RP – Rapid Prototyping
SFP – Solid Foil Polymerisation
SIRMAF – Sociedade Industrial de Reconstrução de Máquinas e Ferramentas
SLS – Selective Laser Sintering
SMS – Selective Mask Sintering
STL/SLA – Stereolithography
UV – UltraVioleta

INTRODUÇÃO

No mundo actual, devido à elevada competitividade entre empresas e à evolução da tecnologia está-se a entrar numa nova revolução industrial (Indústria 4.0). A indústria 4.0 tem como grande objetivo a criação de um sistema físico e digital que consiga cooperar em conjunto e eficazmente. Atualmente já se está a implementar nas fábricas a interoperabilidade entre máquinas (M2M), a IoT, os repositórios com elevadas quantidades de dados (“*Big Data*”) com intuito de melhorar o sistema digital, relativamente à parte física estão a ser desenvolvidos robots autónomos e a utilização das técnicas AM [1], [2].

Devido à necessidade cada vez maior de adaptação ao mercado alguns processos de manufatura vão ter de ser desenvolvidos, uma das soluções poderá passar pela integração ou substituição por um método AM, pois este apresenta uma boa capacidade de personalização, facilidade de produção de objetos com geometrias complexas e uma maior gama de materiais termoplásticos que poderão ser utilizados para o fabrico de peças [3].

Através dos pontos referenciados a cima, facilmente se consegue concluir que as técnicas AM vão ser essenciais para ultrapassar algumas limitações existentes na indústria.

Esta dissertação de mestrado, feita em cooperação com a SIRMAF, com foco na produção de peças poliméricas geometria complexa em pequena quantidade, visava verificar a viabilidade da substituição ou integração de AM nos seus processos de fabrico.

A empresa colocou alguns objetivos para esta parceria, o primeiro seria a seleção de alguns componentes por eles produzidos através do método subtrativo e verificar quais é que seriam as mais economicamente viáveis para a produção através de AM.

Após a sua selecção, começar-se-ia a fase de produção. É de notar que não foi imposto qualquer restrição a nível de processo e material utilizado, desta forma tendo em conta a disponibilidade financeira e da máquina, para a realização da mesma foram escolhidos os processos FDM e SLS. A fabricação em SLS foi feito no CENTIMFE na Marinha Grande e o material utilizado foi o PA12, vulgarmente conhecido como Nylon 12.

Em relação ao FDM foi um processo realizado no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra e foram utilizados PA12, POM e o PLA.

Numa terceira fase foram realizados alguns testes e caracterizações de forma a verificar as propriedades mecânicas das peças produzidas.

Esta tese serve assim como base para a implementação ou integração dos processos AM na linha de produção de empresas.

Para tentar cumprir da melhor forma possível estes objetivos impostos pela empresa esta dissertação foi dividido em 5 partes. Uma primeira parte onde se dá a introdução do tema de estudo.

Na segunda parte vai existir uma revisão bibliográfica relativa aos processos escolhidos.

Na terceira parte estará descrito todo o processo experimental realizado nesta dissertação.

Na quarta parte vão ser mostrados os resultados obtidos e a sua análise.

Por fim na quinta parte vão ser retiradas as conclusões finais.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1. Processos Aditivos

Em 1984 Charles Hull dá o primeiro grande passo para o avanço das técnicas AM quando consegue produzir as primeiras máquinas de estereolitografia. Inicialmente esta técnica era utilizada principalmente como uma tecnologia de prototipagem rápida (RP) com o intuito de acelerar e reduzir os custos relativos ao desenvolvimento de produtos. Esta técnica teve uma elevada adesão pois com a fabricação dos protótipos os erros eram corrigidos nos estágios iniciais de construção evitando assim a necessidade de retificações dispendiosas,[4].

Com o passar dos anos, o interesse e a importância das técnicas AM foram aumentando. Entre 1991-1992 foram comercializadas as técnicas FDM, LOM e SLS [5]. Estas tecnologias segundo a ASTM são definidas como um "processo de ligação de material para produzir componentes a partir de um modelo 3D CAD, normalmente camada a camada, em oposição às tecnologias subtrativas"(figura 2.1). Estes métodos beneficiam assim a produção de peças em pequenas quantidades com elevada complexidade estrutural [6].

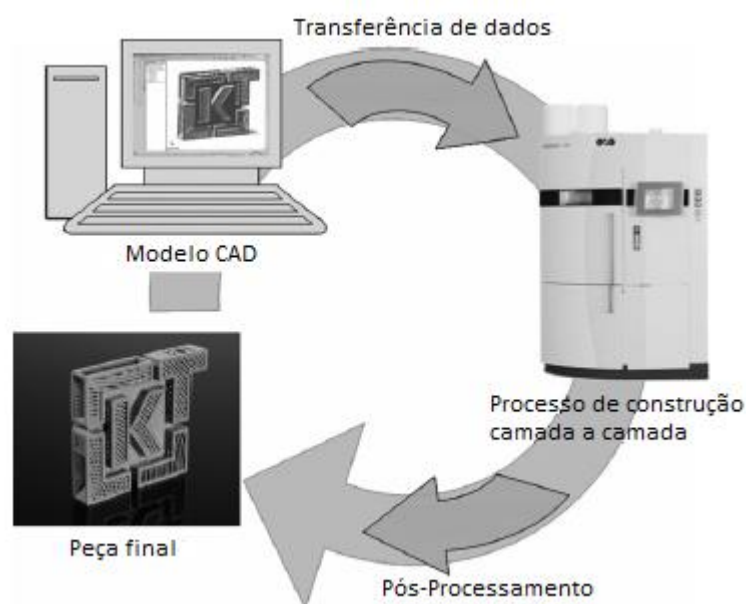


Figura 1.1. Princípio de funcionamento das técnicas AM [7]

Apesar destas vantagens, quando estas técnicas são comparadas com processos tradicionais tem de se ter sempre em conta dois pontos essenciais, a eficiência e a flexibilidade de produção desejada. A eficiência está interligada com fatores de performance como o tempo e a cadência de produção. A flexibilidade é relativa à agilidade de processo e fabrico. Nunca será possível obter uma flexibilidade e eficiência máxima, desta forma consoante o tipo de empresa esta terá de ser otimizada consoante os seus objetivos [8].

Na figura 2.2 é feita uma comparação entre os processos aditivos e subtrativos em relação à eficiência e flexibilidade de processo para cada uma.

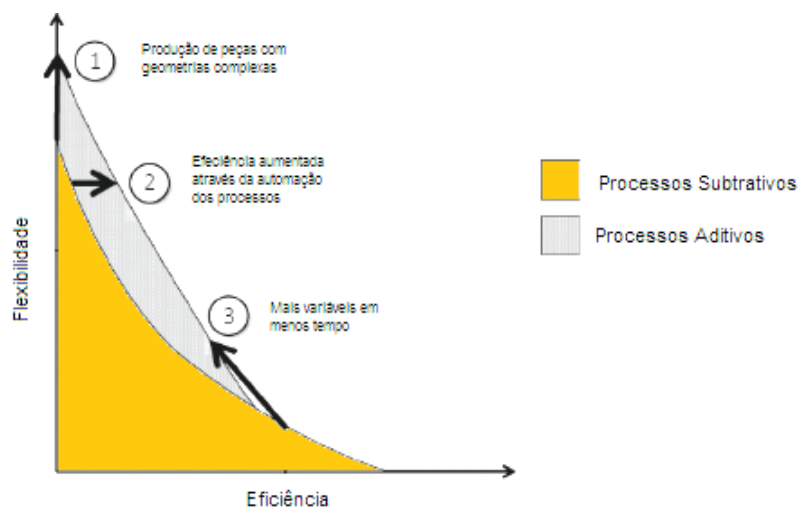


Figura 1.2. Processos Subtrativos vs Aditivos [8]

Em anos recentes, o interesse nas tecnologias AM aumentou exponencialmente nos campos científicos, como se pode ver na figura 2.3, as publicações nesta área são proporcionais à adoção destas tecnologias em ambiente industrial [9],[10].

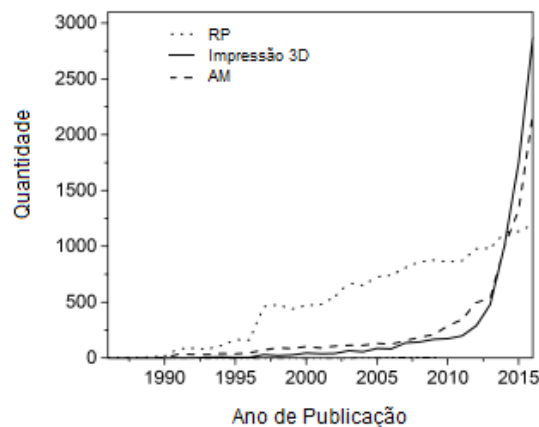


Figura 1.3. Quantidade de publicações feitas relativamente à prototipagem rápida (RP), Impressão 3D e manufatura aditiva (AM) [11]

Atualmente estas técnicas podem ser utilizadas para o fabrico de peças metálicas, poliméricas e cerâmicas. Nas tabelas 2.1 e 2.2 encontram-se as técnicas mais utilizadas nos processos aditivos e uma breve descrição do funcionamento de cada uma [7], [12].

	Estado físico do Material	Material Base	Técnica	Material Utilizado
Processos Aditivos	Sólido	Filamento	FDM	Polímeros
		Pó	3DP	Polímeros, cimentos
			SLS	Polímeros, Metais
			SMS	Polímeros
		Lâminas	LOM	Polímeros, Metais, Cerâmicos.
	SFP		Polímeros	
	Líquido	<i>Não Aplicável</i>	SLA	Fotopolímeros

Tabela 1.1. Exemplos de técnicas AM

Técnica	Princípio de funcionamento
FDM	Peças são extrudidas camada a camada
3DP	Utiliza um “ <i>binder</i> ” líquido para fazer a ligação dos pós
SLS	Passagem de um laser para induzir a sinterização do pó
SMS	Sinterização do pó é feita através da radiação IV
LOM	Lâminas vão se ligando através de um “ <i>binder</i> ” termicamente ativado para formar peças
SFP	Utiliza-se lâminas semi-polimerizadas que vão passar por cura e ligadas por um laser UV
SLA	Passagem de um laser UV para induzir polimerização do fotopolímero

Tabela 1.2. Princípios de funcionamento das técnicas AM

Apesar de na última década as técnicas AM para metais terem sofrido um elevado desenvolvimento os materiais mais utilizados continuam a ser os polímeros, mais especificamente pó de polímero para a sinterização a laser e filamentos para o FDM [11].

1.1.1. FDM

O desenvolvimento da técnica FDM pode ser dividido em três pontos essenciais.

Em 1989 a empresa Stratasys patenteia a tecnologia de FDM (US07429012), entretanto já expirada. Em Junho de 1992 é renovada e atualizada (US07894248) [13], nesta versão os componentes poderiam ser produzidos através de ceras, resinas termoplásticas, vidro e metais fundidos.

Entre 2001 e 2002 foi colocado pela Stratasys a Titan, uma máquina que conseguia produzir peças em PC e em materiais de elevada performance como o ABS e PPSF que apresentavam resistência a elevadas temperaturas, a óleos, gasolina, químicos e apresentavam uma boa resistência ao impacto. É de ter em conta que o FDM naquela altura era apenas utilizada para a produção de protótipos e com a introdução destas novas

propriedades anteriormente enunciadas, os protótipos tornavam-se ideias para serem testados no mundo real.

Por fim, entre 2011 e 2013 algumas patentes fundamentais do processo para o FDM expiraram, levando assim a uma diminuição drástica dos preços das máquinas. Consequentemente, durante estes anos existiu um elevado crescimento e adesão a esta tecnologia, o maior número de fornecedores levou ainda a que o mercado de FDM se tornasse mais acessível para a população geral [14].

Como foi dito, a técnica do FDM inicia-se com a criação de um ficheiro CAD da peça pretendida, posteriormente será traduzida em STL. Depois da aquisição do ficheiro será tratado num software como o Repetier [15] e Slic3r [16]. Estes dois programas trabalham em conjunto, o Slic3r vai gerar o código que será executado no Repetier. O Repetier irá proceder à divisão da peça por camadas tendo sempre em conta os parâmetros submetidos no Slic3r.

A fabricação da peça inicia-se quando o bico de extrusão e cama atingem os valores de temperatura desejada, chegando a estes valores o filamento será forçado a passar pelo bico de extrusão. O material extrudido vai-se depositar enquanto o bico de extrusão se movimenta em X e Y de forma a perfazer a primeira camada. Depois de terminada a primeira camada a cama desce o valor pré-programado e começa a ser feita a próxima camada. Depois da fabricação da última camada e da peça estar finalizada se for necessário vai ter de se retirar os suportes da peça e melhorar a sua superfície através de pós-processamento [17].

1.1.1.1. Materiais

Uma vantagem da utilização do FDM é a vasta gama de materiais poliméricos disponíveis, desde aqueles utilizados para o dia a dia, os plásticos de engenharia e os termoplásticos de elevada performance. Na figura 2.4 apresentam-se alguns dos materiais utilizados, quanto mais perto estiverem do topo melhores serão as suas propriedades mecânicas.

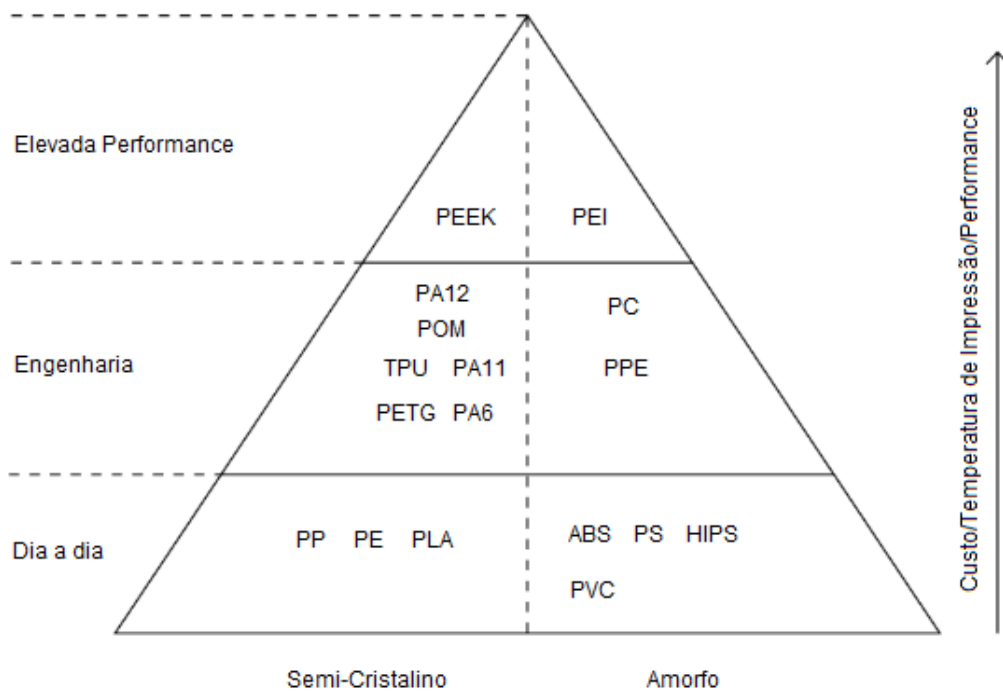


Figura 1.4. Exemplos de materiais utilizados em FDM

1.1.1.2. Parâmetros

A escolha dos parâmetros é fundamental para determinar se a peça final irá apresentar boas propriedades mecânicas, superficiais e visuais. É assim essencial uma seleção correta dos parâmetros que podemos controlar, apesar disso esta terá de ser feita tendo em conta alguns fatores externos como a temperatura, humidade, problemas de calibração da máquina FDM...Na figura 2.5 apresentam-se os parâmetros chave para a aquisição de uma peça de elevada qualidade.

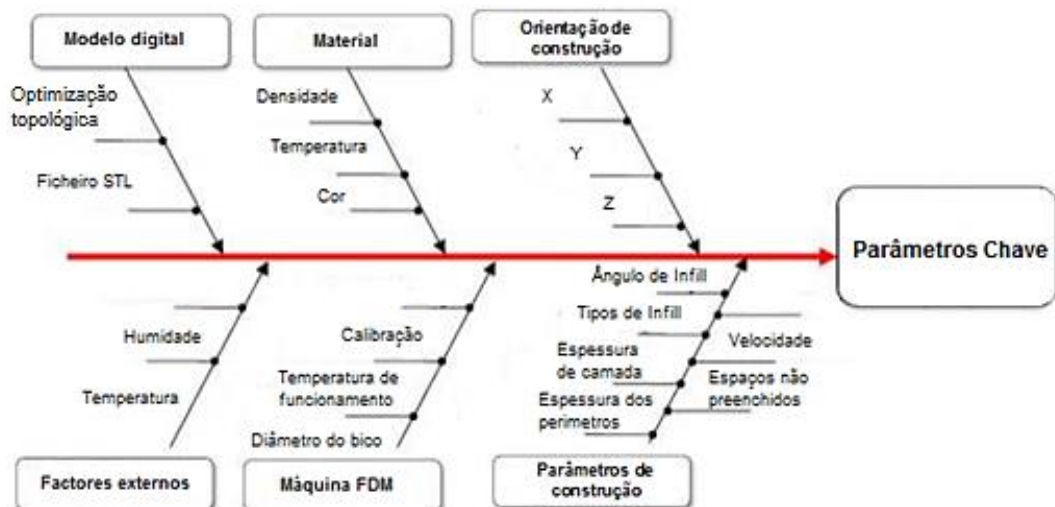


Figura 1.5. Parâmetros chave da técnica FDM [18]

Para verificar a qualidade das peças é essencial determinar algumas propriedades como a tensão de cedência e a tensão máxima à flexão, através de vários estudos verificou-se que com o aumento da espessura de *Infill* (estrutura interna da peça), do preenchimento dos espaços vazios e aumento da espessura de camada iria levar a um aumento da tensão de cedência. A tensão à flexão também aumentou com os primeiros dois parâmetros mencionados mas diminuiu com o aumento da espessura de camada [18]. Desta forma durante a otimização dos parâmetros terá de existir um equilíbrio para se obter uma peça com boas propriedades mecânicas.

Para se conseguir obter um melhor acabamento superficial e um dimensionamento das peças mais preciso a espessura de camada terá de ser reduzida, esta diminuição vai levar a arrefecimentos de camada mais homogêneos e conseqüentemente a uma maior facilidade de adesão entre camadas.

Hoje em dia já se consegue controlar melhor alguns fatores externos como a humidade e a temperatura ambiente, pois já existem máquinas FDM fechadas. Este controlo irá levar a um arrefecimento mais uniforme das camadas e a uma menor absorção da humidade, conseqüentemente as peças finais vão apresentar menos erros, melhores acabamentos e boas propriedades mecânicas.

1.1.1.3. Vantagens e Desvantagens

As principais vantagens para a tecnologia FDM são:

- Elevada quantidade de materiais termoplásticos disponíveis;
- Técnica barata (peças produzidas e filamentos);
- Técnica acessível e bastante intuitiva;
- Produção de peças com geometrias complexas;
- Velocidade de produção elevada.

Uma das principais desvantagens em relação às outras tecnologias é a precisão dimensional, irá apresentar também dificuldades na construção de superfícies curvas (furos, cones...) e na fabricação de peças grandes poderá ser necessário dividir a peça final em várias partes de forma a ser possível colocar a peça na zona de fabricação.

Devido à sua forma de fabricação camada a camada a peça final apresentará anisotropia em Z e terá um acabamento superficial fraco, consequentemente será necessário passar por pós-processamento [19], [20].

Em certos materiais como o POM, PA12, ABS o empenamento das peças é bastante comum.

1.1.1.4. Pós-processamentos

Devido à forma de construção desta técnica é possível na peça final visualizar as camadas, desta forma irá ser necessário um pós-processamento para melhorar o acabamento da peça. Alguns pós-processamentos podem melhorar as propriedades da peça e ajudar com o comportamento anisotrópico. Os pós-processamentos servem

Para grande parte das peças o primeiro pós-processamento passa pela remoção de suportes. Existem dois tipos de suportes, suporte geral e o que tem capacidade para se dissolver. A grande diferença entre estes dois suportes é a forma como se o retira da peça, enquanto no geral tem de se arrancar os suportes (figura 2.6), no com capacidade para dissolver basta colocar a peça num solvente (figura 2.7) (ex: suportes de HIPS são facilmente removidos com Limonene). Este pós-processamento não induz a melhorias no acabamento superficial, pelo contrário se os suportes não forem removidos corretamente poderão causar danos na peça.



Figura 1.6. Utilização de suportes gerais [21]



Figura 1.7. Utilização de suportes com capacidade para se dissolver [21]

Na tabela 2.3 estão apresentados alguns dos pós-processamentos mais utilizados e o seu princípio de funcionamento [22], [23].

Pós-Processamento	Princípio de funcionamento
Lixa	Passagem da lixa molhada desde P220 até a P2000
Soldagem a frio	Utilização de cola para unir peças, para o ABS é utilizado a acetona
Polimento	Depois da passagem da lixa, limpar os excessos de pó, de seguida limpar a peça em água quente com uma escova de dentes e aplicar o polimento
Vapor	Solvente e a peça são colocados num recipiente, o gás libertado vai suavizar a superfície da peça
Mergulho	Mergulho da peça num solvente

Tabela 1.3. Exemplos e princípios de funcionamento de pós-processamentos no FDM

Há que ter sempre em conta que de material para material a eficácia do pós-processamento irá variar.

1.1.2. SLS

A tecnologia SLS foi desenvolvida na Universidade do Texas por Carl Deckard e Joseph Beaman. Em 1986 é criada a primeira patente para a tecnologia de SLS (US4863538A) [24], estas patentes de SLS foram a maior propriedade intelectual geradora de receita para a Universidade do Texas durante muitos anos, devido à sua importância.

Em 1992 com a ajuda da empresa de design Product Genesis foi posta no mercado a primeira máquina de SLS, SinterStation 2000 (figura 2.8) [25].



Figura 1.8. SinterStation 2000 [26]

Carl Deckard e Joseph Beaman fundaram a companhia DTM que, em 2001, viria a ser vendida à concorrente 3D Systems. Esta empresa tinha ainda em mãos outra tecnologia emergente, a estereolitografia. 3D Systems nos dias de hoje é uma das maiores empresas de AM e um dos pilares para o seu sucesso foi a aquisição dos direitos do SLS [27].

O início da produção em SLS é semelhante ao FDM pois ambos necessitam do ficheiro STL, depois da sua aquisição o pó é depositado na plataforma.

De seguida o pó e a zona de fabricação vão ser pré-aquecidos a uma temperatura superior à temperatura de transição vítrea mas inferior à sua temperatura de degradação. Este passo é essencial, já que o pré-aquecimento diminui a quantidade de energia requerida pelo laser para que ocorra a sinterização, reduz a expansão térmica do pó causada pelo laser e principalmente minimiza a redução dimensional da peça durante o arrefecimento e recristalização [28].

Depois de atingir as temperaturas desejadas um laser de CO_2 varre a camada de pó com uma potência pré-programada, levando à sinterização do pó. O material que não é sinterizado suporta a peça, não necessitando assim de suportes adicionais. Quando a primeira camada termina, a zona de fabricação desce, um sistema de colocação de pó, chamado recoater deposita uma nova camada de pó na zona de fabricação e o laser começa a varrer a nova camada. Este processo repete-se até a peça ficar completa [29].

Após o término da peça, esta irá passar por um processo de arrefecimento. Nesta fase, se for retirada demasiado cedo pode levar a erros dimensionais da peça. O tempo de arrefecimento vai variar de material para material, torna-se assim essencial saber o seu tempo de arrefecimento na medida que afecta não só o dimensionamento da peça como as suas propriedades mecânicas [30], [31].

Finalmente a peça é retirada do bloco de polímero e limpa, os pós não sinterizados poderão ser novamente utilizado para uma próxima produção.

Todo o processo é realizado num ambiente com um menor nível de humidade possível de forma a evitar a erros dimensionais [32].

1.1.2.1. Materiais

Na figura 2.9 estão apresentados os materiais utilizados para SLS [33].

Atualmente o polímero mais utilizado é o PA12, comparado com outros materiais pode apresentar propriedades mecânicas inferiores, mas sendo o material mais estudado para o SLS e apresentar preços relativamente baixos quando comparado com os outros materiais tornam o PA12 um material muito utilizado [34].

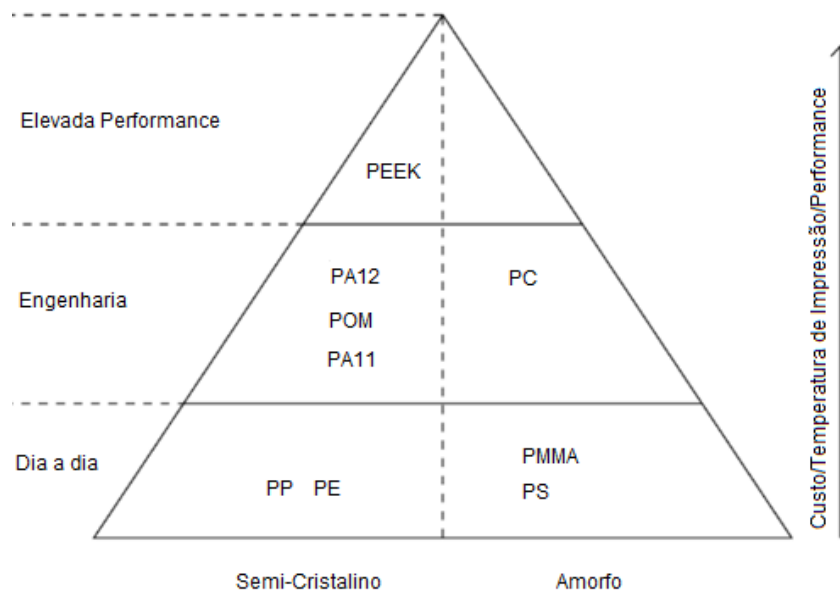


Figura 1.9. Exemplos de materiais utilizados em SLS

1.1.2.2. Parâmetros

Para se conseguir obter um produto final de qualidade tem de se ter em conta os seguintes parâmetros: temperatura, distância entre varrimentos (DV), espessura de linha (e) e a potência (P) e velocidade de laser (VL).

Como já enunciado anteriormente, um controlo detalhada da temperatura ao longo do processo (pré e pós aquecimento da peça) conduz a uma diminuição do risco da peça final apresentar problemas dimensionais e propriedades mecânicas não desejáveis.

O cálculo da densidade de energia é essencial devido ao seu enorme impacto nas propriedades das peças, [35]. A densidade será calculada através de alguns parâmetros em cima referenciados, como se pode verificar na equação 2.1.

$$\text{Densidade de Energia}[J/mm^3] = \frac{P[W]}{VL[mm/s] \times DV[mm] \times e[mm]} \quad (1.1)$$

Alguns estudos realizados com o PA12 concluíram que uma maior densidade de energia leva a uma melhor sinterização (Apêndice B) e a melhorias das propriedades mecânicas, este aumento das propriedades pode ser explicado pela diminuição da viscosidade do material que levará a uma menor porosidade e conseqüentemente a uma maior densidade da peça. O aumento da densidade de energia só é favorável até um determinado ponto, pois o incremento excessivo leva a aumentos da tensão entre camadas (tensões residuais), levando ao empenamento das mesmas [36]. Estes problemas, criados por uma densidade excessiva levam a uma degradação das propriedades mecânicas.

A espessura de camada é um fator que tem influência no tempo de fabricação, quanto maior for a espessura de camada, mais rápido será a peça construída. Apesar disso, uma espessura demasiado alta pode afetar a rugosidade e a precisão dimensional da peça, desta forma será necessário otimizar este valor [37].

1.1.2.3. Vantagens e Desvantagens

As principais vantagens para a tecnologia SLS são:

- Não utiliza suportes pois o pó atua como suporte natural
- Fabricação de peças complexas
- Comparativamente ao processo FDM, o SLS produz peças com propriedades mecânicas mais homogêneas ao longo da peça
- Elevada quantidade de matérias disponíveis
- Ideal para produções de baixas e médias séries de peças

A principal limitação desta técnica é que normalmente as peças produzidas são porosas ou apresentam um acabamento superficial muito grosseiro, desta forma é necessário um pós-processamento para eliminar estas limitações.

Quando comparado com outros processos AM como o FDM e o SLA o SLS vai apresentar tempos de produção um pouco maiores (FDM:horas-2dias; SLS:horas-semanas).

Outro problema a ter em conta é a distorção térmica apresentada, este problema poderá levar a defeitos dimensionais e ao empenamento das peças. Tem ainda limitações na fabricação de peças grandes e planas (empenamento) e tem dificuldade na fabricação de buracos de pequenas dimensões.

1.1.2.4. Pós-processamentos

Sendo um processo que utiliza pó como matéria-prima as peças finais vão apresentar um acabamento com pó e granulado.

. Normalmente depois do arrefecimento do bloco de pó, o primeiro passo do pós-processamento será retirar as peças do bloco, normalmente é utilizado uma pistola de ar comprimido para se conseguir recolher as peças [38].

Na tabela 2.4 estão apresentados alguns dos pós-processamentos mais utilizados e o seu princípio de funcionamento.

Pós-Processamento	Princípio de funcionamento
Polimento com vibrações	Utilização de máquinas vibratórias, com aparas cerâmicas que vibram contra a peça, corroendo-a gradualmente
Spray e Lacagem	Passagem de spray e lacagem para se obter diferentes tipos de acabamento
Tingimento	Imersão da peça num banho quente de tinta à escolha
Jateamento abrasivo	Passagem de um jato de partículas

Tabela 1.4. Exemplos e princípios de funcionamento de pós-processamentos no SLS

2. MÉTODOS E PROCESSOS

2.1. Material

Tendo em conta que a máquina disponível para a realização do FDM estava localizada no DEM existiu uma grande liberdade de escolha do material, já em relação ao SLS a produção das peças foi feita no material utilizado pela empresa.

2.1.1. Filamentos

Com liberdade para escolher os filamentos foram seleccionados os seguintes filamentos para a produção de peças em FDM. O primeiro escolhido foi o PLA, por ser dos materiais mais utilizados para este processo devido a sua facilidade de impressão, obtenção de peças com elevados nível de detalhe, serem um material termoplástico biodegradável e apresentarem boas propriedades mecânicas, apesar disso comparativamente aos restantes materiais é aquele que terá as propriedades mecânicas mais baixas [39].

Os restantes filamentos escolhidos, foram seleccionados tendo em conta que a peça final teria de ficar com as melhores propriedades possíveis, desta forma foram escolhidos dois materiais de engenharia.

O PA12 também conhecido por nylon foi escolhido devido à sua elevada rigidez, dureza, resistência à abrasão e resistência ao impacto. Apesar destas características também vão existir algumas desvantagens, este material apresenta um coeficiente de atrito bastante baixo, durante a impressão à libertação de gases tóxicos (caprolactam) e tem tendência a absorver água [39].

O POM é um material com elevada resistência à fadiga, apresenta uma boa estabilidade dimensional e uma boa resistência ao impacto, apesar disso é um material que quando é sobreaquecido vai levar à degradação do material e existirá a libertação de formaldeído, um gás que poderá levar a problemas respiratórios, fadiga, irritações de pele e ao aparecimento de cancro, tudo dependerá da concentração inalada, temperatura praticada e da ventilação do próprio espaço [40]. Este material de engenharia também tem um baixo coeficiente de atrito e facilidade de absorção de água como o PA12 [39].

Para o fabrico das peças com os dois últimos materiais mencionados tiveram-se de ter assim algumas precauções de forma a não correr riscos de saúde e conseguir obter peças com a melhor qualidade possível.

Foi assim escolhida uma sala para a produção das peças que tivesse uma boa ventilação, foi ainda tentado ao máximo estar o mínimo de tempo possível durante a impressão das peças de forma a inalar a menor quantidade de gás possível.

O baixo coeficiente de atrito apresentado levou a que fosse necessário a utilização de certos materiais para que fosse possível a aderência da primeira camada.

Para o PA12 teve que se colocar na cama cola de madeira de forma a evitar o escorregamento da peça, já para o POM teve que se colar uma pequena base de POM de forma a existir uma boa aderência da primeira camada evitando assim o empenamento da peça e o seu escorregamento, notar que a base de POM com o aumento de temperatura da cama também poderia empenar e escorregar desta forma uma elevada espessura e comprimento e largura baixo são essenciais para se conseguir obter uma boa base para a fabricação da peça.

Finalmente para evitar a absorção da humidade do ar foi construída uma caixa o mais isolada possível de forma aos filamentos estarem o mínimo expostos ao ar atmosférico, foi ainda colocado sílica dentro desta caixa. Para melhorar ainda mais as propriedades finais da peça e o seu acabamento final teve se o cuidado de antes do filamento ser utilizado leva-lo ao forno durante 7 horas a 80 °C .

2.1.2. Pó de PA12

Para a realização do processo SLS o material utilizado foi PA12, mais especificamente o PA 2200 Balance 1.0 [41]. Este pó é dos mais utilizados para a produção de peças em SLS devido à sua elevada variedade de aplicações porque este apresenta elevada resistência química, elevada dureza e resistência ao impacto e consegue produzir peças com elevados níveis de detalhe. Desta forma normalmente as peças produzidas são sempre funcionais e de elevada qualidade, devido às boas propriedades apresentadas pelo material este poderá substituir alguns plásticos produzidos por injeção de moldes.

2.2. FDM

2.2.1. Condições operacionais

Para o fabrico de peças por FDM foi utilizado a impressora 3D Leapfrog Creatr (figura 3.1....), as suas condições operacionais estão representadas na tabela 3.1. [42].

Contrariamente às impressoras de uso pessoal a impressora utilizada já apresenta algumas características que a diferencia das outras. A Leapfrog Creatr vai apresentar uma base aquecida, tem a capacidade de imprimir dois materiais diferentes ao mesmo tempo (apresenta 2 extrusores) e como se pode ver pela figura 3.1a peça vai estar muito melhor protegida contra correntes de ar e dissipações de calor. Com estas três novas adaptações vai-se conseguir uma melhor aderência da primeira camada à base, controla-se melhor o arrefecimento da peça e as suas flutuações de temperatura e ainda dá a possibilidade da utilização de materiais diferentes ao mesmo tempo. Esta última característica é ideal para a utilização de suportes solúveis, facilitando assim a sua remoção e a diminuição da possibilidade de dano da peça no processo de remoção de suportes.



Figura 2.1. Leapfrog Creatr [43]

Especificações Técnicas	
Aquecimento da mesa [°C]	Max. 90
Aquecimento do bico [°C]	Max. 275
Nº de extrusoras	2
Tamanho de filamento [mm]	1.75
Tamanho bico extrusão [mm]	0.35
Velocidade max. de impressão [mm/s]	60
Velocidade max. de deslocamento [mm/s]	350
Dimensões da impressora [mm]	600×500×500
Dimensão da mesa [mm]	270×200
Altura max. de produção [mm]	200
Precisão de posicionamento (X e Y) [mm]	0.0169
Precisão de posicionamento (Z) [mm]	0.02

Tabela 2.1. Condições operacionais FDM [42]

2.2.2. Condições funcionais

Os parâmetros utilizados para a impressão de peças por FDM estão representados na tabela 3.2.

	PLA	PA12	POM
Temperatura do extrusor [°C]	205	265	260
Temperatura da mesa [°C]	55	80	60
Espessura de camada [mm]	0.2	0.3	0.25
Nº de perímetros	2	2	2
Preenchimento [%]	30	30	30
“Skirt” [voltas]	3	3	3
“Brim” [mm]	-	-	3
Velocidade de perímetros [mm/s]	45	25	45
Velocidade de preenchimento [mm/s]	65	35	70
Velocidade de deslocamento quando não está a imprimir [mm/s]	80	60	80

Tabela 2.2. Condições funcionais para a impressão de PLA,PA12 e POM através de FDM

Os parâmetros a cima referenciados já são uma versão otimizada para a fabricação das peças. No início, a primeira otimização a ser realizada foi na temperatura de impressão.

Antes de iniciar a produção das peças foram consultados alguns artigos e obviamente as especificações do filamento utilizado para saber a que temperaturas o filamento conseguia imprimir. Depois desta consulta e de comparado estes valores conclui que as temperaturas dos filamentos variam não só de material para material mas também de fornecedor para fornecedor, após algumas impressões com diferentes filamentos verifco que a qualidade da máquina e as condições ambientais serão também pontos chave na escolha da temperatura.

Para o PLA comparando [44] e [45] verifica-se o que é anteriormente mencionado. Iniciou-se a fabricação de cubos a diferentes temperaturas utilizando as especificações do fornecedor [46], depois de algumas tentativas conseguiu-se obter um cubo com uma boa aderência entre camadas e um bom acabamento superficial. Posteriormente os restantes parâmetros foram otimizados até se obter o melhor acabamento superficial possível.

Contrariamente ao PLA tanto o PA12 como o POM são materiais relativamente novos no FDM, conseqüentemente existe muito menos material sobre como trabalhar estes dois materiais. Apesar desta contrariedade e utilizando as folhas técnicas de cada material [47], [48] iniciou-se a fabricação dos cubos. Para a fabricação com estes dois materiais a utilização da cama aquecida foi essencial, esta tinha como função a diminuição da velocidade de arrefecimento das camadas levando assim a uma boa aderência da primeira camada. Tendo isto em conta e utilizando cola de madeira facilmente se obteve a otimização dos parâmetros para as peças construídas em PA12.

O POM sendo um material que necessita de elevadas temperaturas mas que também tem tendência a empenar foi um pouco mais complicado a impressão das peças. Contrariamente aos dados fornecidos pelo fornecedor a temperatura otimizada foi ligeiramente superior à por eles sugerida, a uma temperatura de 230° (temperatura máxima proposta pelo fornecedor) não havia uma boa adesão da primeira camada e conseqüentemente era impossível a fabricação de peças, este erro pode ser explicado pela qualidade da máquina, filamento ou condições da sala desfavoráveis.

Para se conseguir a impressão de peças viáveis teve de se utilizar uma pequena base POM e de aplicar algumas funções para ajudar na aderência da primeira camada como o *Skirt* e o *Brim*. O *Skirt* e o *Brim* são duas operações utilizadas para melhorar a impressão, a primeira tem como função o estabelecimento de um fluxo suave do filamento e a segunda vai levar a uma melhor adesão da primeira camada da peça.

2.3. SLS

2.3.1. Condições operacionais

A produção de peças por SLS foi feita com o equipamento SLS 3DSystem SPro 60 HD-HS (figura 3.2.), as suas condições operacionais estão representadas na tabela 3.3 [49].

Antes do pó ser colocado na máquina para o início do fabrico da peça esta vai ter de passar por uma preparação da matéria-prima, de forma a minimizar e a reaproveitar o máximo de pó possível vai ser misturado PA12 novo com PA12 reciclado. Posteriormente esta mistura vai passar por uma peneira com o intuito de remover possíveis impurezas e para que o pó fique mais solto.

Após esta preparação o pó vai ser colocado nas zonas de alimentação e de fabricação e as pás vão ser aplicadas para que ocorra uma maior concentração de calor na zona de construção.



Figura 2.2. SLS 3DSystem SPro 60 HD-HS

Especificações Técnicas	
Tamanho max. de construção [mm]	381×330×460
Espessura de camada [mm]	0.08-0.15
Velocidade de varrimento [m/s]	6
Potência do laser [W]	70
Tipo de laser	CO ₂
Taxa de construção por volume [L/Hr]	1.8

Tabela 2.3. Condições operacionais SLS [50]

2.3.2. Condições funcionais

Os parâmetros utilizados para a impressão de peças por SLS e variação da temperatura no aquecedor e na zona de construção estão representados nas tabelas 3.4-3.6.

Parâmetros pó de PA12			
	Período de Aquecimento	Período de Construção	Período de Arrefecimento
Espessura de camada (mm)	0.12	0.08	0.12
Espessura de pó (mm)	0.15	0.15	0.15
Temperatura do aquecedor (°C)	0-135	135	135-45
Temperatura zona de construção (°C)	0-173	173-172	172-85
Potência Laser, Perímetros (W)	6	6	6
Potência Laser, Preenchimento (W)	19	19	19

Tabela 2.4. Parâmetros utilizados para impressão em SLS

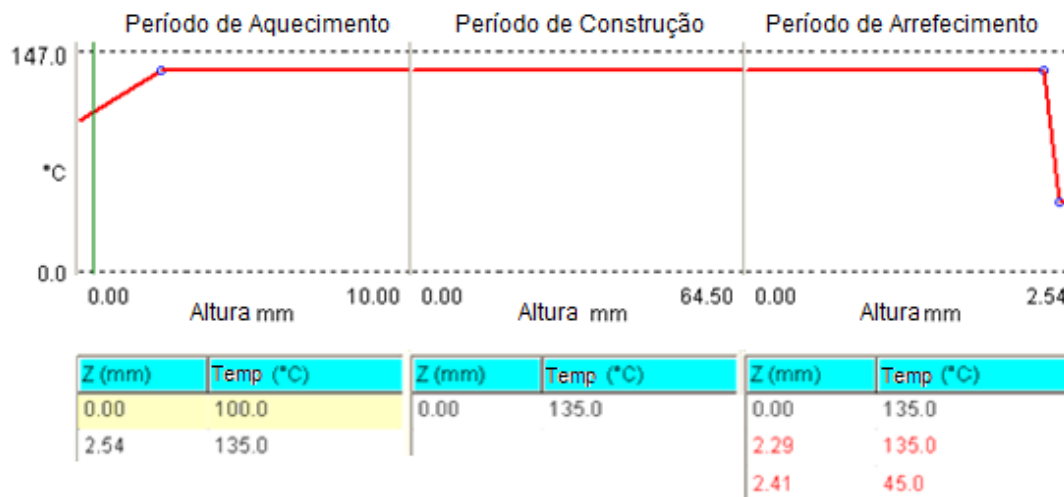


Tabela 2.5. Variação da temperatura no aquecedor

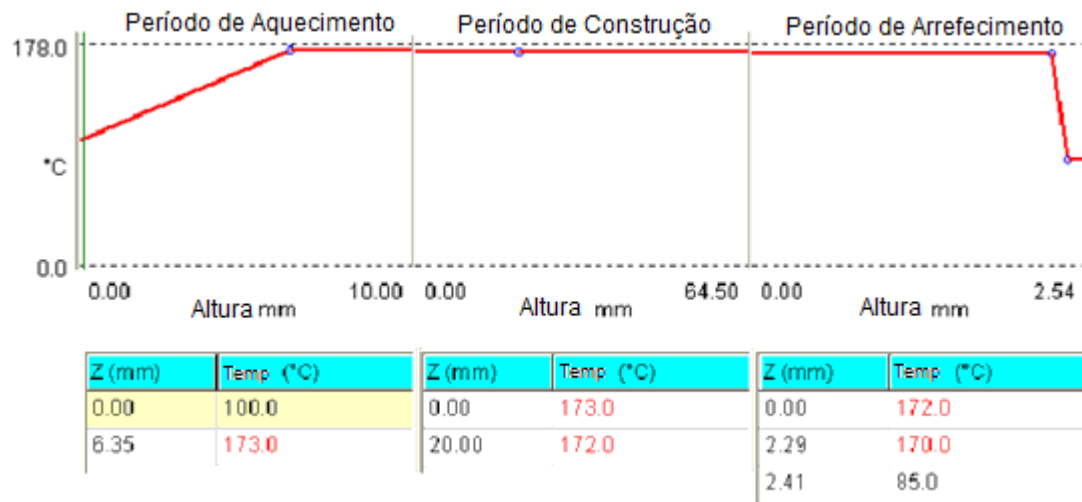


Tabela 2.6. Variação da temperatura na zona de construção

2.4. Caracterização dos componentes

2.4.1. Ensaios de tração

Os provetes construídos para a realização deste teste foram produzidos segundo a norma ASTM D 638-03 [51] (figura 3.3). Ter sempre em conta que os provetes produzidos tanto por FDM como SLS não são processos com uma eficácia de 100%, desta forma é natural encontrar algum desvio dimensional.

Foi utilizado o equipamento Shimadzu, modelo Autograph AG-X com uma célula de carga de 5 KN. Os ensaios foram realizados a uma velocidade de 0.5 mm/min , à temperatura ambiente. Foram testados 6 provetes de tração para cada material, não foi utilizado extensómetro e estes ensaios permitiram obter a tensão máxima e a deformação máxima de cada provete.

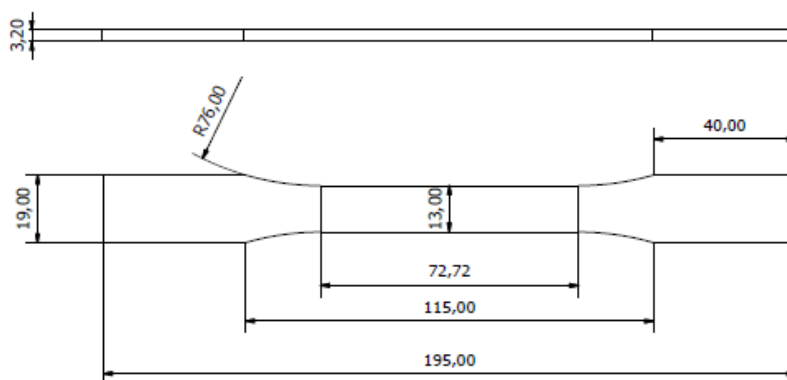


Figura 2.3. Dimensões do provete de tração normalizado (dimensões em mm)

2.4.2. Ensaio de flexão

O método de teste utilizado para os ensaios de flexão, foi a flexão por 3 pontos, a fabricação do provete foi feita segundo a norma ASTM D 790-03 (figura 3.4) [52].

A máquina utilizada para realizar os testes de flexão foi a Shimadzu, modelo Autograph AG-X. Os ensaios foram realizados a uma velocidade de 0.5 mm/min , à temperatura ambiente e utilizou-se uma distância entre pinos de 45 mm . Foram testados 6 provetes de flexão para cada material, estes ensaios permitiram obter a resistência à flexão e o módulo de elasticidade de cada provete.

Notar que como se está a utilizar polímeros, estes vão apresentar elevada deformação, desta forma tem de se ter em conta que o término do ensaio se vai dar não quando existir a rotura do provete mas quando este estiver perto de tocar nas paredes da garra de flexão como é mostrado na figura 3.5.

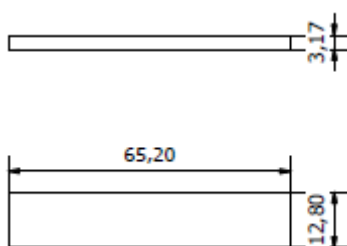


Figura 2.4. Dimensões do provete de flexão normalizado (dimensões em mm)

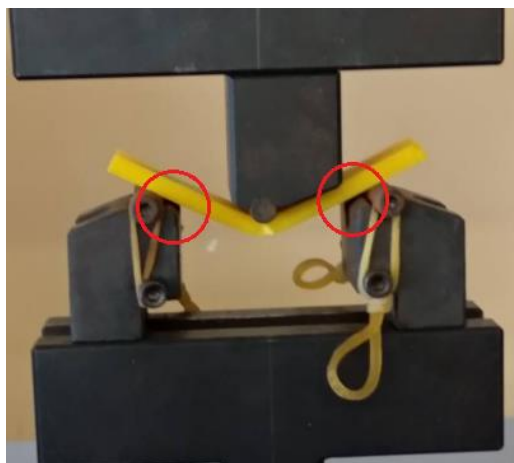


Figura 2.5. Ensaio de flexão em provete de PLA

2.4.3. Ensaios de dureza

A técnica utilizada para medir a dureza foi a da Dureza Shore D.

Este ensaio foi realizado no IPN num equipamento portátil da marca CV Instruments Limited (figura 3.6) segundo a norma ASTM D 2240-15 [53].

O durómetro através da penetração de um indentador vai medir a resistência à penetração, posteriormente um sistema de leitura vai converter o valor de deslocamento vertical do indentador num valor de dureza Shore D.

Os ensaios foram realizados a uma temperatura de 22.8°C, com uma humidade de 30%. Para cada material foram feitas 12 identações com cada uma a ter duração de 1 segundo.



Figura 2.6. Medidor de Dureza Shore D

2.4.4. Picnometria de hélio

O ensaio para a picnometria de hélio foi realizado no IPN com o picnómetro Micromeritics Accupyc 1330 (figura 3.7). Este teste realiza-se tendo-se em conta que o pó ou peça não apresenta poros fechados no interior das suas partículas. O picnómetro de hélio é constituído por uma câmara de volume calibrado e outra câmara onde se coloca a amostra. Através da variação de pressão do hélio pode-se assim calcular qual o volume real da amostra (equação 3.1). O hélio é dos gases mais utilizados para este processo não só por ser inerte como por apresentar facilidade de penetração nos poros devido ao tamanho dos seus átomos.

$$V_a = V_{ca} - \frac{V_c}{\frac{P_i}{P_f} - 1} \quad (2.1)$$

Obtido o V_a através da equação 3.2 calcula-se a densidade real.

$$\rho = \frac{m}{V_a} \quad (2.2)$$

A única grande desvantagem deste processo será a limitação das dimensões da amostra.

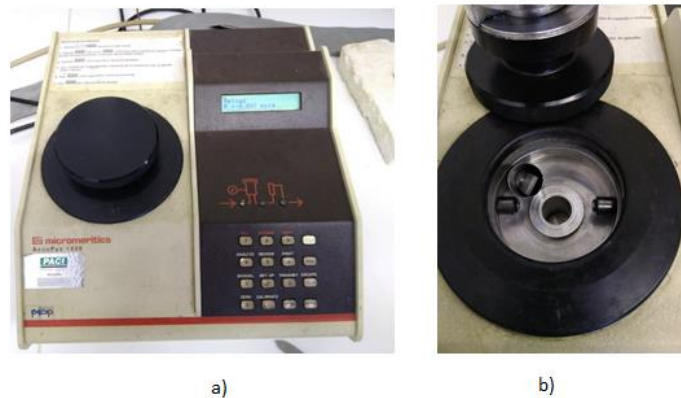


Figura 2.7. a) Picnómetro Micromeritics Accucyc 1330, b) Câmara de volume calibrado e câmara da amostra

2.4.5. Microscopia de variação de foco

O equipamento utilizado para realizar este teste foi o Alicona Infinite Focus, este microscópio vai construir uma peça 3D através da compilação de várias imagens capturadas em 2D , vai ter também a capacidade de em apenas um sistema conseguir fazer medições de coordenadas e a avaliação da rugosidade. As fotos 2D vão ser retiradas por varrimento lateral, vertical e em altura. Os limites para o varrimento vertical varia dos 10 *nm* até uma escala de *mm* , o lateral desde os 400 *nm* até os *mm* também e a o varrimento em altura não poderá passar dos 22 *mm*, estes limites estão impostos com o objectivo da foto recolhida apresentar uma boa resolução.

A medição dos perfis foi feita segundo a ISO 5436 [54] e a rugosidade pela ISO 4287(1997) [55].

2.4.6. Espectometria de difracção laser

Esta técnica tem como objectivo a análise da distribuição do tamanho de partículas da amostra através de um sistema que mede a intensidade da dispersão angular da luz durante o processo de interacção entre as partículas da amostra e a passagem do laser.

A teoria utilizada para o cálculo da distribuição do tamanho das partículas foi a de Fraunhofer. Ter em conta que esta teoria apesar de ser a mais simples de ser utilizada devido a não se necessitar de conhecer as propriedades ópticas da amostra, esta não apresentará resultados viáveis para amostras que apresentem um tamanho de partícula inferior a $50\ \mu\text{m}$. O equipamento utilizado no IPN foi o Malvern Mastersizer 3000 e as suas análises foram realizadas por via húmida para este ensaio foi utilizado a ISO 13320(2009) [56].

2.4.7. TGA

Este método em inglês designa-se por TGA (“*Thermogravimetric analysis*”) e tem como função o acompanhamento da perda ou ganho de massa em função da temperatura ou do tempo.

O equipamento utilizado foi o TA Instruments TGA-Q500 V20.13, o teste foi realizado a uma taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$ até aos 600°C , numa atmosfera de nitrogénio.

2.4.8. Microscopia Óptica

Foi utilizado um microscópio da marca Leica modelo DM 4000 M LED e uma câmara Leica modelo MC 120 HD. Esta análise tem o intuito de avaliar a morfologia superficial dos pós de PA12.

2.4.9. Pino-disco

Esta técnica é normalmente utilizada nas análises tribológicas, com o propósito de fazer a medição do coeficiente de atrito entre duas superfícies de contacto.

Neste processo vai se fixar o material num disco rotativo que estará em contínuo contacto com um pino, sobre o pino está aplicada uma carga calibrada. Neste

processo será possível ajustar a velocidade de rotação do disco, da carga aplicada e o tempo de ensaio.

O ensaio foi realizado a 100 *rpm*, com uma carga de 5 *N* durante 10 minutos e foi utilizado um pino de 316L.

2.5. Pós-processamento

Uma das grandes desvantagens da produção por SLS e FDM é a qualidade do acabamento superficial, desta forma para tentar melhorar este aspecto foram realizados alguns métodos para tentar melhorar a qualidade da peça final.

2.5.1. FDM

O primeiro método testado para melhorar o acabamento das peças produzidas por FDM foi a utilização de uma lixa. Para este processo foi utilizado uma lixa P320, para evitar a acumulação de calor manteve-se a lixa molhada do início ao fim e teve-se o cuidado de manter a lixa limpa. Depois da passagem da lixa a impressão é limpa com uma escova de dentes, água e sabão.

O segundo método foi a utilização de acetona para tentar suavizar as superfícies da peça. Molhou-se um cotonete com acetona e fizeram-se 100 passagens com 3 segundos de intervalo a cada 10 passagens. Inicialmente foi feita a suavização das camadas utilizando vapor de acetona, as peças reagiram mal a este processo pois apesar de apresentarem uma superfície com uma menor rugosidade esta perdia resistência.

Notar que estes dois processos vão levar a uma diminuição dimensional das peças, desta forma depois da execução destes testes teriam de ser produzidas novas peças com um ligeiro aumento das dimensões para no final do pós-processamento se conseguir obter o dimensionamento final desejado.

2.5.2. SLS

Este método vai apresentar um acabamento superficial granuloso desta forma terá de ser realizado um pós-processamento para melhorar a sua superfície.

Um dos processos mais utilizados para melhorar peças produzidas em SLS é o jateamento abrasivo. Este método foi realizado no IPN, na máquina Vitalino J.Costa,Lda modelo VJC-IIOS a uma pressão de 5 *bar*. Dos vários ensaios realizados fez-se variar a

distância do bico à peça e a duração do ensaio. O fluxo libertado era composto por partículas de alumina nova com alumina reutilizada desta forma como se vai verificar no capítulo que se segue as peças que passam por este método vão ficar pretas devido às impurezas existentes na alumina reutilizada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização do pó

A caracterização do pó utilizado para produzir as peças em SLS é essencial. A utilização de um *feedstock* com o tamanho e morfologia correta é um fator chave para se obter uma boa compactação da cama de pó e uma sinterização controlada do material. Irá ter ainda impacto nas propriedades finais da peça como a rugosidade e a porosidade [57]. Desta forma foi realizada uma análise granulométrica, a perda de massa com o aumento da temperatura (TGA) e por fim a microscopia óptica de maneira a estudar o fator de forma.

3.1.1. Espectrometria de difracção de laser

Através do estudo da distribuição granulométrica (figura 4.1), pode-se verificar que tamanho médio de partícula é $45.4 \mu m$, e que a dispersão da distribuição granulométrica é simétrica e reduzida, com um $d_{10} = 31.3 \mu m$ e $d_{90} = 64.3 \mu m$.

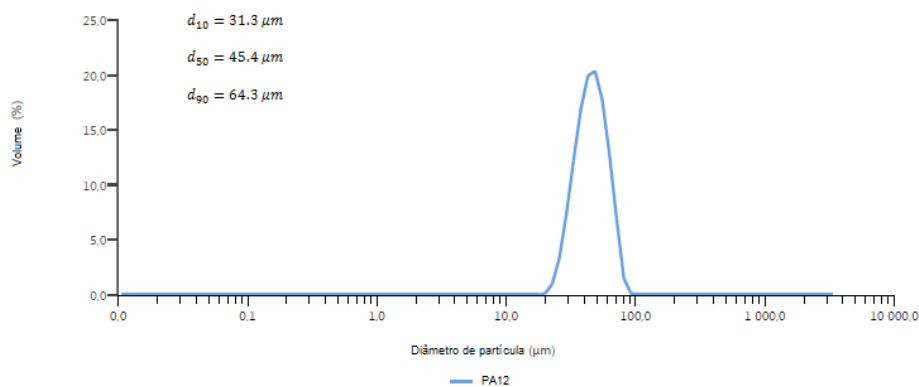


Figura 3.1. Distribuição granulométrica do pó de PA12

Segundo *Shi et al* (2004) o tamanho de partícula mais adequado para a fabricação de peças em SLS é de $75-100 \mu m$. A aproximação ao valor mais baixo desta gama do tamanho de partícula leva a um aumento da densidade e da precisão dimensional da peça, contudo uma diminuição excessiva pode levar a uma complicação na escoabilidade devido à formação de aglomerados de pó. Estas aglomerações levam ao

aumento da rugosidade da peça e a variações dimensionais indesejadas. Comparando o valor obtido e o intervalo anteriormente referido, pode-se concluir que a utilização de um tamanho de partícula maior poderia levar à produção de peças com melhor rugosidade e precisão dimensional, e conseqüentemente a uma minimização do pós-processamento, ou mesmo a sua eliminação na cadeia de processo.

3.1.2. TGA

A partir da figura 4.2 podemos verificar como decai a massa de pó com o aumento da temperatura. A curva verde representa o peso da amostra ao longo do teste e a azul apresenta-se a derivada da curva verde. Analisando a derivada, consegue-se quantificar a percentagem de decaimento da massa através dos pontos máximos.

O PA12 com o aumento da temperatura sofre dois decaimentos bruscos de massa, o primeiro com uma taxa mais elevada inicia-se aos 396.14°C onde há uma perda de 82.87% do seu peso (perda de 5.25 mg do peso inicial), o segundo, mais moderado começa aos 424.71 °C e existe uma perda de 15.58% (perda de 0.99 mg). Da amostra inicial restou 0.095 mg de pó.

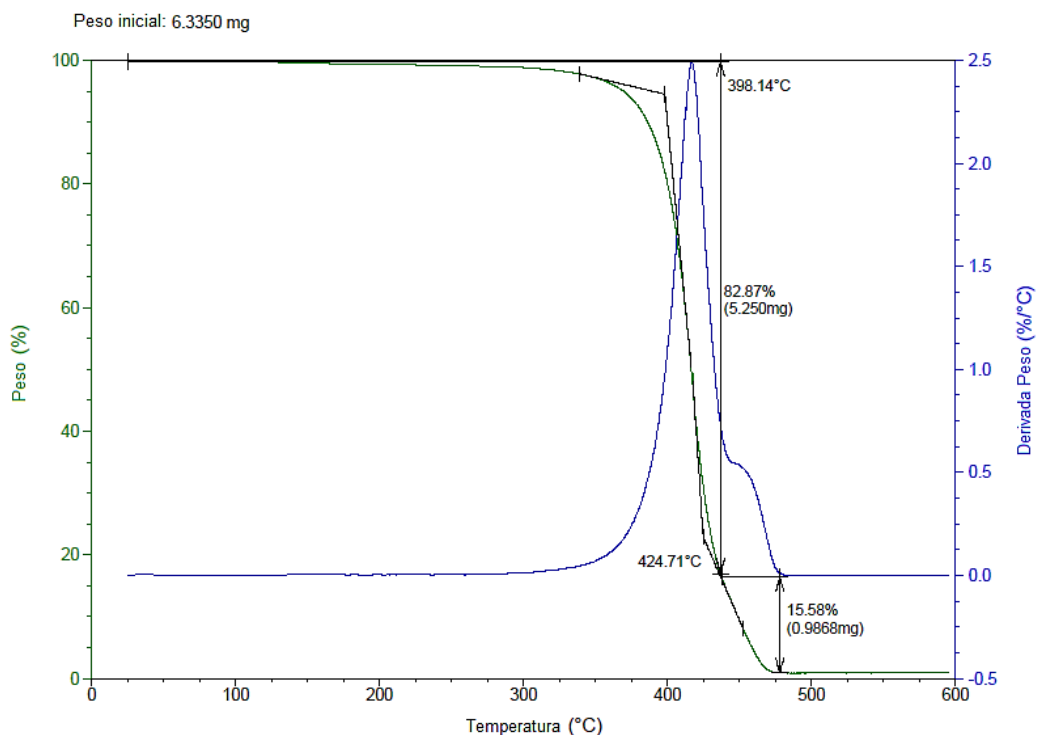


Figura 3.2. Curva TGA para pó de PA12

3.1.3. Microscopia Óptica

A partir das imagens da figura 4.3 e tendo em conta que as partículas não apresentam uma esfericidade elevada, conclui-se que o factor de forma é inferior a 1.

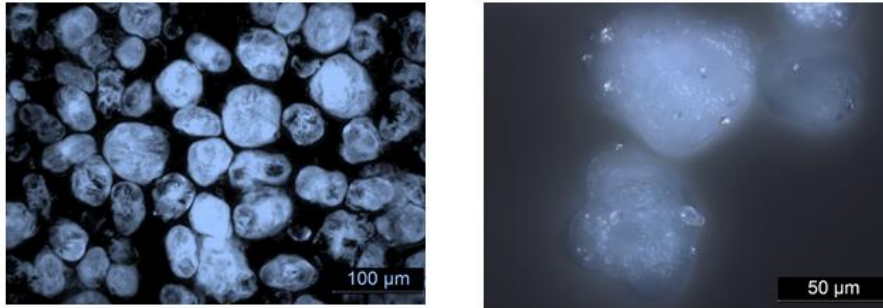


Figura 3.3. Morfologia pó de PA12

3.2. Caracterização dos componentes

Este subcapítulo foi subdividido em dois processos onde se apresentam as técnicas mais apropriadas para a caracterização das peças produzidas por FDM e SLS.

3.2.1. FDM

Idealmente tanto as peças como os provetes deveriam de ter sido produzidos com uma percentagem de preenchimento (*Infill*) de 100%. Depois da fabricação inicial de algumas peças com este parâmetro, verificou-se que o software da máquina tinha um erro associado sempre que o preenchimento era superior a 75%, que impossibilitava a fabricação completa. Além disso, as peças inacabadas, devido à elevada concentração de calor, apresentavam um mau acabamento superficial. Tendo em conta um equilíbrio entre esta limitação e o tempo de fabricação disponível, tanto as peças como os provetes tiveram de ser produzidos com um preenchimento de 30%.

Ter ainda em conta que durante a impressão apesar de existir uma monitorização da fabricação é impossível assegurar que todas as camadas foram construídas sem nenhum erro e sem impurezas na impressão (a FDM utilizada não podia ser completamente fechada, pois a acumulação de calor poderia sobreaquecer os motores).

No apêndice A apresentam-se algumas imagens dos provetes e peças fabricadas em SLS e FDM.

3.2.1.1. Ensaio de tração

Nas figura 4.4 estão apresentadas para cada material as curvas Tensão-Deformação de cada provete, tem-se ainda na tabela 4.1 uma comparação entre as propriedades obtidas por FDM e por métodos substractivos.

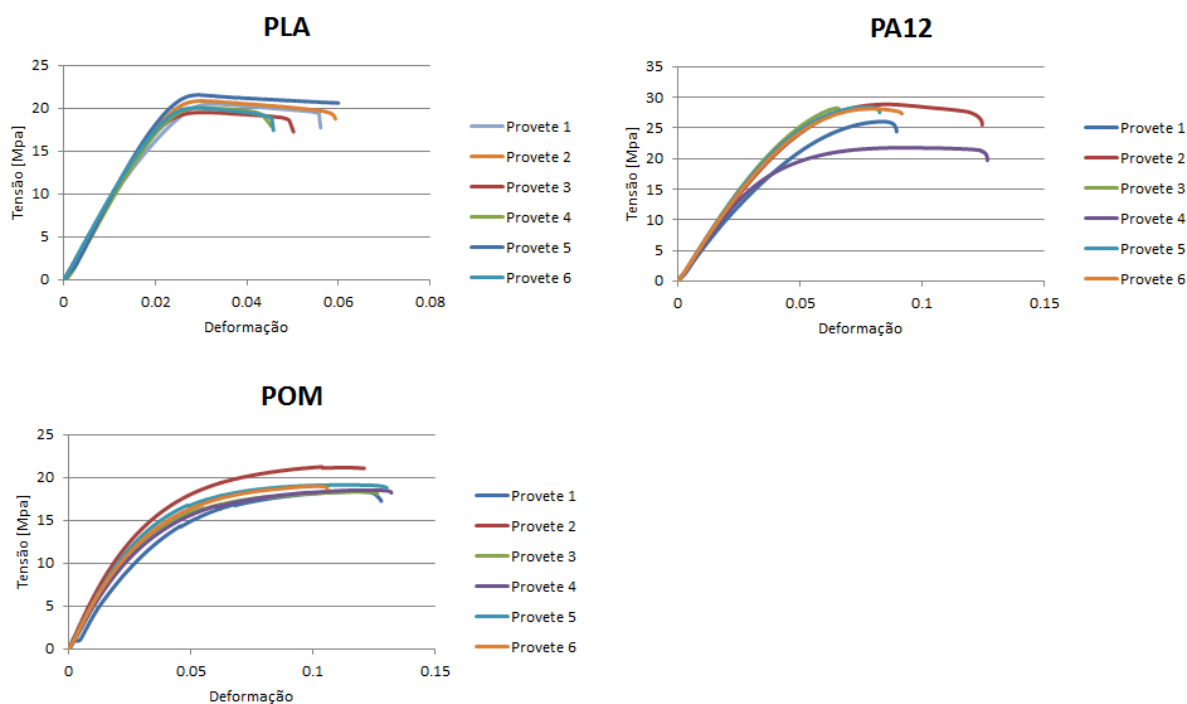


Figura 3.4. Curvas Tensão-Deformação

Comparando o estudo de otimização de parâmetros para peças produzidas em FDM com PA12 realizado por *Basavaraj e Vishwas (2016)*, verifica-se que o valor por eles obtidos para a tensão máxima obtida é semelhante ao adquirido nesta tese, pode-se assim concluir que apesar de não se ter utilizado os valores ideais para o *Infill* se conseguiu obter um bom valor para a tensão máxima do material [58].

Relativamente ao PLA sendo dos materiais mais utilizados o estudo e a otimização de parâmetros estão melhor concebidos, a tensão máxima obtida com os parâmetros otimizados de *Lanzotti et al (2016)* e *Chacón et al (2017)* vão apresentar valores na ordem dos métodos subtrativos, este aumento pode ser explicado pelo aumento do número de perímetros, espessura de camada e da utilização de um *Infill* de 100 % [45], [59].

Ao comparar com os métodos subtrativos as peças produzidas no FDM vão apresentar valores de tensão bem mais baixos. Em relação à deformação tanto o PLA como o PA12 produzidos em FDM têm valores semelhantes ao subtrativo. Esta diferença de valores tanto na tensão como deformação pode ser explicada pelos pontos anteriormente referenciados no início deste capítulo.

Em relação às curvas Tensão-Deformação obtidas e tendo em conta que os provetes foram todos ensaiados às mesmas condições, os resultados obtidos para o PLA e

POM são muito similares mas para o PA12 já se começa a notar uma ligeira dispersão de valores. A dispersão existente no PA12 pode ser explicada através da possível má fabricação de camadas interiores dos provetes, existência de impurezas nas camadas intermédias ou arrefecimentos demasiado rápidos.

	Tensão [<i>Mpa</i>]	ϵ_{max} [%]
PLA maciço	50	6
PLA (fig...)	20.4 ± 0.6	5.7 ± 0.8
PA12 maciço	55	10
PA12 (fig...)	26.9 ± 2.3	10 ± 2.0
POM maciço	60	40
POM (fig...)	19.4 ± 1.5	10 ± 0.1

Tabela 3.1. Resultados obtidos para ensaios de tração por FDM [60]–[62]

3.2.1.2. Ensaios de flexão

Na figura 4.5 estão apresentados os valores obtidos dos ensaios de flexão, cada um vai corresponder ao valor médio dos 6 provetes ensaiados para cada material.

O módulo de elasticidade foi calculado pela tangente do gráfico de Tensão-Deformação, para garantir que a tangente traçada está numa zona onde há um desenvolvimento linear de deformação optou-se por traçar a recta desde o ponto de início de teste até a um quarto da deflexão máxima.

Segundo *Mostafa et al (2018)* os parâmetros que têm mais influência na resistência à flexão são a percentagem de *Infill*, o número de perímetros utilizados e a espessura de camada. Depois de uma optimização destes parâmetros para o fabrico de peças em PA12 verificou-se que para se obter uma resistência à flexão máxima teria de ser utilizado 100 % de *Infill*, espessura de camada de 0.254 mm e apenas 1 perímetro (62.9 *Mpa*) [63]. Conclui-se então que um aumento do *Infill* poderia ter melhorado a resistência à flexão obtida e consequentemente apresentar valores um pouco mais próximos dos apresentados pelos métodos subtractivos (figura 4.6).

No fabrico de peças em PLA *Chacón et al* e *Gordon et al* fizeram uma optimização dos parâmetros para obter valores máximos de resistência à flexão e de *E*, novamente a percentagem de *Infill* e espessura de camada foram parâmetros chave [44],[64]. Pode-se concluir que com uma melhor optimização dos parâmetros os valores obtidos poderiam ter sido melhores e capazes de superar em alguns campos os métodos subtrativos.

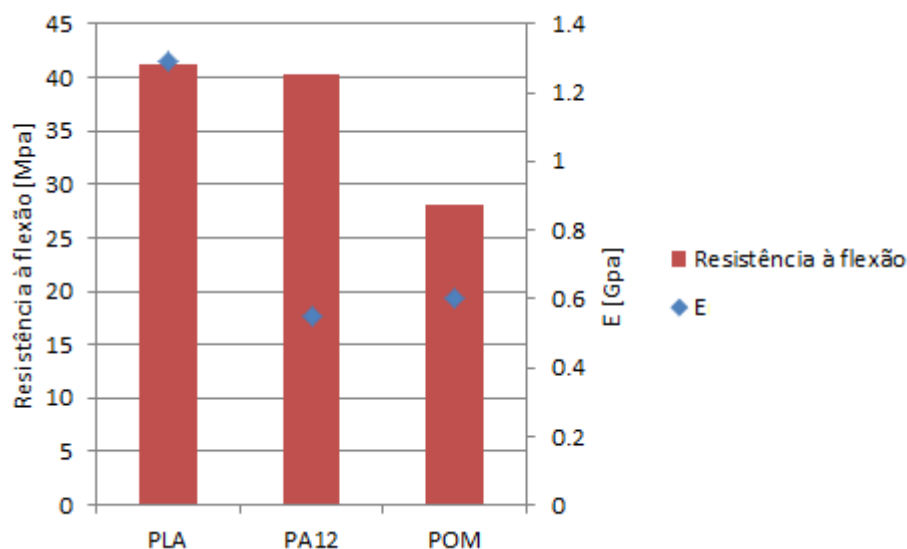


Figura 3.5. Resistência à flexão e *E* do PLA, PA12 e POM por método FDM

	PLA	PA12	POM
Resistência à flexão (Mpa)	100	70	90
E (Gpa)	3.4	1.2	2.8

Figura 3.6. Resistência à flexão e *E* do PLA, PA12 e POM por métodos subtrativos [60]–[62]

3.2.1.3. Ensaios de dureza

Para o ensaio de dureza Shore D utilizou-se um provete de cada material onde cada um foi testado doze vezes. Na tabela 4.2 apresenta-se o valor médio obtido para cada material e para peças produzidas por métodos subtrativos.

	PLA maciço	PLA	PA12 maciço	PA12	POM maciço	POM
Dureza (Shore D)	83	54.9 ± 3.7	69	28.4 ± 4.8	80	47.3 ± 3.5

Tabela 3.2. Dureza Shore D para peças produzidas por FDM e por métodos substractivos [60]–[62]

Através da análise da tabela 4.2 verifica-se que o método FDM apresenta valores de dureza bem inferiores ao substractivo.

3.2.1.4. Picnometria de hélio

Foram realizados para cada material 3 provetes em que cada um foi ensaiado 5 vezes. Na tabela 4.3 está representado a média dos resultados obtidos para cada material produzido por FDM e a densidade para materiais produzidos por PS.

	PLA maciço	PLA	PA12 maciço	PA12	POM maciço	POM
Densidade (Kg/m³)	1250	1481	1000	1040	1400	1454

Tabela 3.3. Densidade para peças produzidas por FDM e por métodos substractivos [60]–[62]

3.2.1.5. Microscopia de variação de foco

Através da análise das imagens obtidas pelo IFM vai ser possível adquirir o dimensionamento geométrico das peças, assim como alguns valores de rugosidade.

Sendo o IFM um processo demoroso optou-se por fazer o uso desta ferramenta no dimensionamento geométrico apenas nas zonas com mais complexidade ou de maior dificuldade de medição, as restantes medidas foram retiradas com um paquímetro digital.

Relativamente à rugosidade, o IFM não conseguiu adquirir imagens nas peças de PA12 e POM devido ao seu acabamento superficial (figura 4.7), desta forma foi impossível obter as suas rugosidades.



Figura 3.7. Imagem IFM para peça de PA12

a) Dimensionamento Geométrico

Nas figuras 4.8-4.11 e tabelas 4.4-4.7 é representado o dimensionamento geométrico de peças produzidas por processos subtrativos (PS) e a variação dimensional existente em cada material produzido em FDM quando comparado com os PS.

Todas as medidas apresentadas durante este ponto vão estar em milímetros, excepto as medidas B, C e D da peça 3 que como representam valores de ângulos vão estar em graus.

Peça 1:

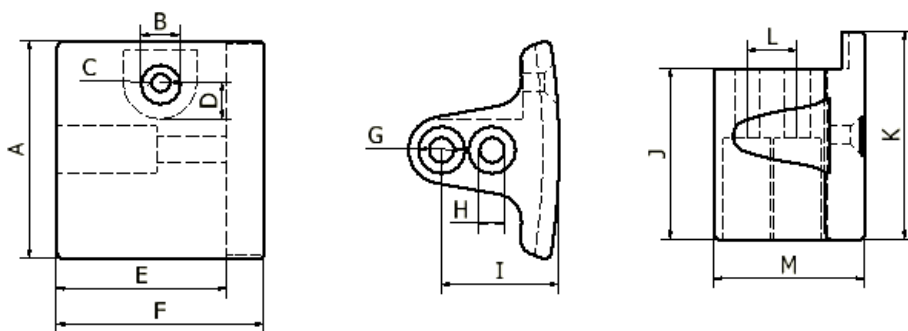


Figura 3.8. Zonas de dimensionamento da peça 1

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
PS	64.7	13	5.5	11	51	62	14	7.5	35	51	62	15	45
PLA	-0.4	-0.4	-0.1	-1.1	+0.2	+0.1	-0.8	-0.3	-0.1	+0.2	+0.1	-0.2	-0.1
PA12	-0.3	-1.2	-0.5	-1.3	+0.1	+0.2	-0.4	-0.5	-0.1	+0.1	+0.1	+0.2	+0.1
POM	-1.4	-0.1	-0.6	-1.4	-0.1	-0.5	-0.6	-0.5	0	-0.2	-0.2	+0.1	+0.4

Tabela 3.4. Dimensionamento geométrico da peça 1 para peças produzidas por FDM (PLA, PA12 e POM) e por PS

Peça 2:

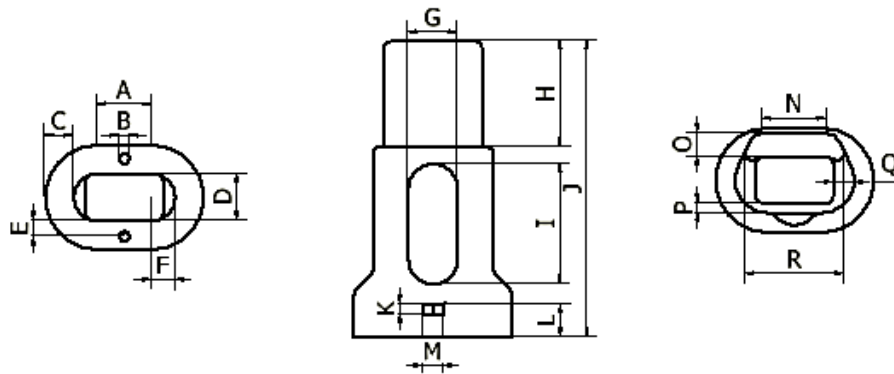


Figura 3.9. Zonas de dimensionamento da peça 2

Tabela 3.5. Dimensionamento geométrico da peça 2 para peças produzidas por FDM (PLA, PA12 e POM) e por PS

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
PS	15.4	3	8	13.4	3.7	6.7	14	30	34.2	83.5	2.6	9.3	5.5	18	6.5	2.5	6	26.8
PLA	+5.4	-0.1	-0.2	-0.2	-0.5	-2	-0.4	-0.2	-0.3	-0.1	0	0	0	+1.9	-0.4	-0.1	-0.1	-0.6
PA12	+5.5	-0.2	+1.7	-0.2	-0.1	-2.4	-0.6	-0.1	-0.9	0	0	-0.1	-0.1	+2.6	+0.4	+0.2	+0.3	-5.3
POM	+5.3	-0.2	+0.3	+0.1	-0.3	-1.8	-0.5	-0.4	-1.1	-1	-0.2	-0.4	+0.2	+1.9	-0.3	-0.1	-0.3	-0.1

Peça 3:

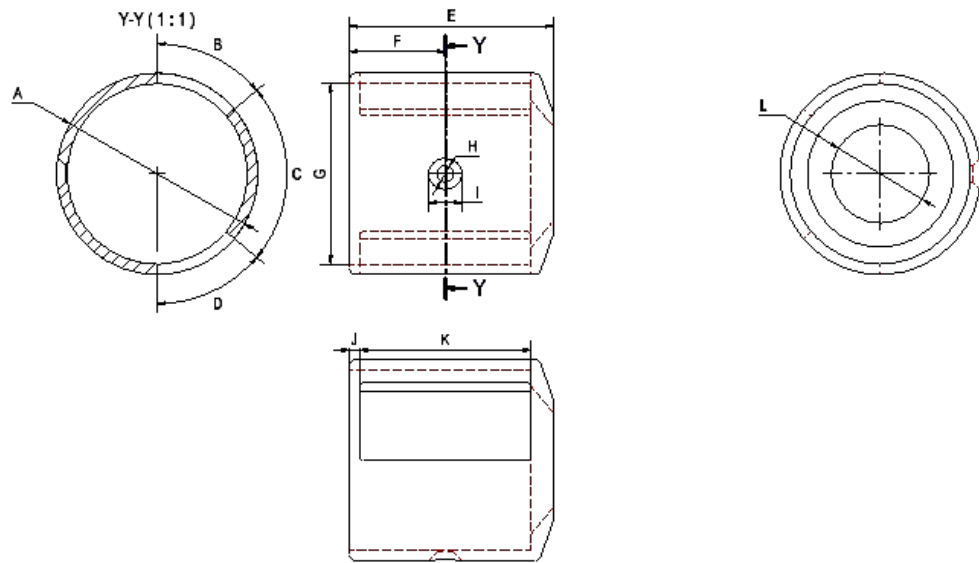


Figura 3.10. Zonas de dimensionamento da peça 3

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
PS	62	50°	80°	50°	63	29.5	55.5	5.1	10.4	3	53	30.6
PLA	+0.1	+1°	-5°	+4°	+0.1	-1.1	-0.2	-0.1	-0.2	0	-0.5	-0.5
PA12	+1.2	-3°	+3°	0°	+0.2	-0.1	+0.6	-0.8	+0.2	+0.3	-0.7	-0.8
POM	+0.7	-2°	+3°	-1°	-0.1	-0.6	+0.3	-0.3	-0.8	+0.1	-0.5	-1.0

Tabela 3.6. Dimensionamento geométrico da peça 3 para peças produzidas por FDM(PLA, PA12 e POM) e por PS

Peça 4:

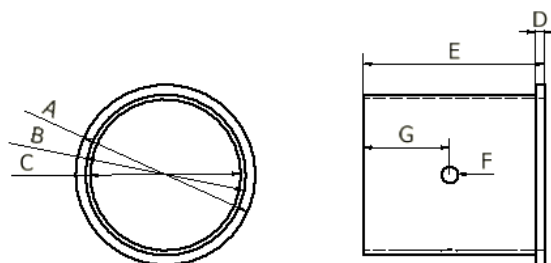


Figura 3.11. Zonas de dimensionamento da peça 4

	A	B	C	D	E	F	G
PS	55.5	49.5	46.5	3	56	5.1	26.5
PLA	+0.3	-0.4	-0.6	-0.1	-0.8	-0.4	-1.9
PA12	+0.1	+0.2	-0.9	+0.2	-0.1	-0.5	-0.7
POM	-0.7	-0.7	-0.9	+0.1	-0.3	-0.6	-0.7

Tabela 3.7. Dimensionamento geométrico da peça 4, para peças produzidas por FDM (PLA, PA12 e POM) e por PS

De um modo geral conclui-se que o erro obtido nas peças produzidas em FDM não são muito preocupantes, pois o erro médio apresentado para cada peça nunca é superior a 1 *mm*. Entre os materiais escolhidos o PLA sendo um material mais fácil de trabalhar e que melhor se comporta durante o seu arrefecimento é aquele que apresenta uma menor variação dimensional, o POM sendo o material onde existiu uma maior dificuldade na fabricação (aderência da primeira camada, arrefecimentos demasiado rápidos) foi a que apresentou dos três materiais os piores valores.

b) Rugosidade

Como foi dito anteriormente não foi possível retirar os valores de rugosidade para as peças produzidas em PA12 e POM.

Na tabela 4.8, apresentam-se os valores de rugosidade das peças produzidas em PLA e das peças produzidas por PS, na figura 4.12 são amostradas algumas imagens retiradas do IFM bem-sucedidas utilizadas para o cálculo da rugosidade das peças produzidas em PLA.

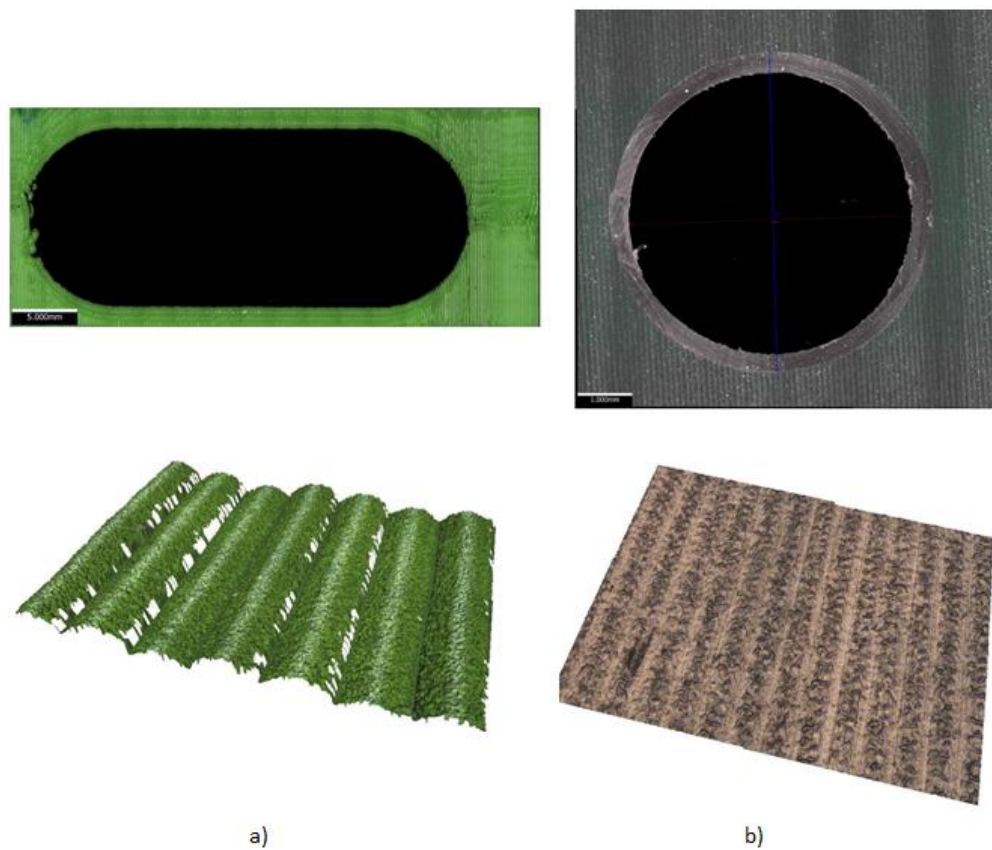


Figura 3.12. Imagens adquiridas pelo IFM a) Peça 2 produzida em FDM com PLA, b) Peça 4 produzida por PS

	PLA				Subtractivos			
	1	2	3	4	1	2	3	4
$S_a[\mu m]$	8.91	10.98	9.23	11.49	0.99	-	0.65	0.61
$S_q[\mu m]$	11.86	13.52	11.56	13.73	1.27	-	0.94	0.77
$S_z[\mu m]$	259.57	77.19	175.69	110.92	17.94	-	48.65	25.02

Tabela 3.8. Rugosidade das peças produzidas por FDM (PLA) e PS

Comparativamente ao PS o FDM apresenta valores de rugosidade um pouco superiores. Estes valores podem ser melhorados de duas formas, utilização de um pós-processamento ou existir previamente à fabricação das peças uma otimização nos valores de espessura de camada e na velocidade da deposição de camada. A diminuição da velocidade e espessura de camada vai levar a uma melhor aderência entre camadas levando à redução dos erros de fabricação [65].

3.2.1.6. Pino-Disco

Na figura 4.13, está representada a evolução do coeficiente de atrito dos três materiais em estudo. Nos valores obtidos para o PA12 pode-se verificar que no início do ensaio há uma diminuição dos valores de coeficiente de atrito, este pode ser explicado tendo em conta que no começo a peça em estudo irá sofrer uma fase de adaptação ao disco levando assim a uma flutuação de valores. Dos três materiais verifica-se que no PLA há uma maior oscilação de resultados. Esta variação de resultados pode ser explicada com possíveis oscilações do pino causadas pela rugosidade superficial da peça em estudo.

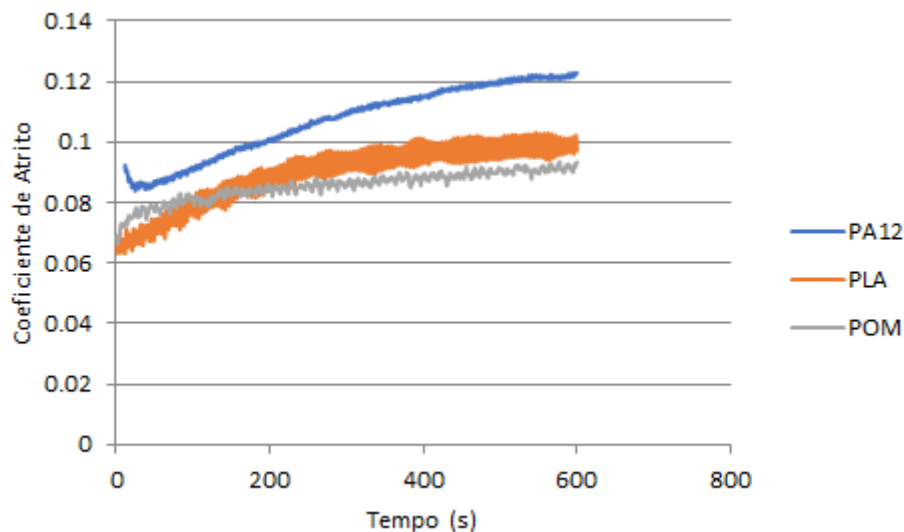


Figura 3.13. Coeficiente de atrito dos materiais PA12, PLA e POM

3.2.1.7. Pós-processamento

O pós-processamento é uma fase da finalização da peça que é essencial para que a produção obtida possa ter as melhores propriedades possíveis.

Neste caso a propriedade mais em foco irá ser a rugosidade superficial da peça, tem de se ter também em conta que durante a passagem da lixa e da acetona vai existir perda de material e conseqüentemente redução dimensional da peça. Para facilitar o cálculo da redução dimensional os pós-processamentos escolhidos foram realizados na peça com uma geometria menos complexa, foi assim escolhida a peça 4.

Na tabela 4.9 apresentam-se as rugosidades S_a (Rugosidade média da área seleccionada), S_q (raiz quadrada da rugosidade da área seleccionada), S_z (Rugosidade máxima da área seleccionada) obtidas previamente e depois da passagem da lixa e acetona.

		PLA		PA12		POM	
		Lixa	Acetona	Lixa	Acetona	Lixa	Acetona
Rugosidade Inicial	$S_a [\mu m]$	11.5		-		-	
	$S_q [\mu m]$	13.7		-		-	
	$S_z [\mu m]$	110.9		-		-	
Rugosidade Final	$S_a [\mu m]$	6.67	2.30	6.3	-	4	-
	$S_q [\mu m]$	9.31	3.70	9.9	-	5.8	-
	$S_z [\mu m]$	95.76	57.59	111.8	-	108	-

Tabela 3.9. Rugosidade da peça 4 antes e depois do pós-processamento

A impossibilidade de captação de imagens com o IFM para as peças de PA12 e POM levou a que não fosse possível obter as suas rugosidades. Apesar disso pode-se verificar através da análise da tabela 4.9, que após a passagem da lixa sobre este dois materiais já se conseguiu captar imagens das peças e consequentemente obter as suas rugosidades.

Conclui-se então que a captação de imagens não foi possível devido a rugosidades muito elevadas e que o método da acetona só apresenta resultados positivos com o PLA.

A utilização da lixa no PLA levou a uma diminuição dimensional de 0.1 mm e a acetona 0.2 mm , tendo em conta esta diminuição dimensional poderá ter de ser necessário fazer as produções com um ligeiro aumento nas suas dimensões.

3.2.2. SLS

3.2.2.1. Ensaio de tração

Na figura 4.14 apresenta-se as curvas Tensão-Deformação, obtidas após a realização dos ensaios de tração em 6 provetes.

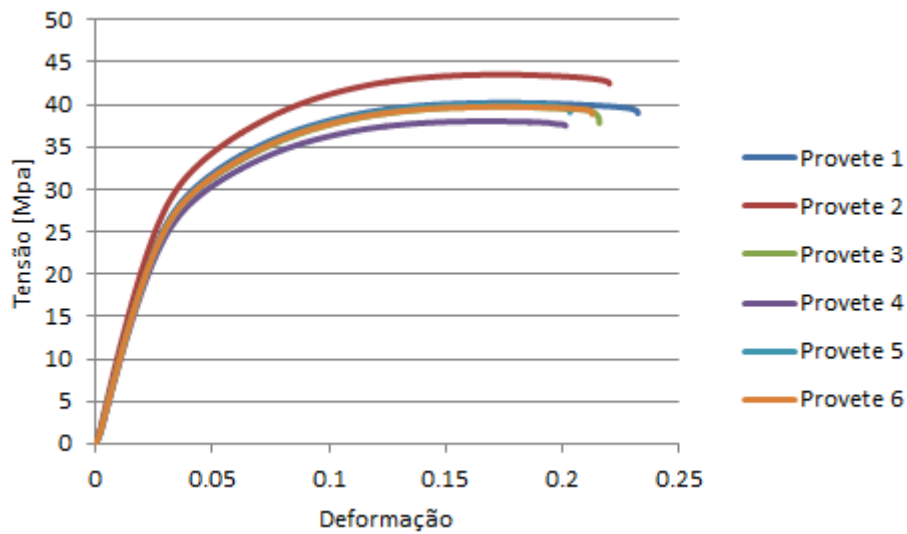


Figura 3.14. Curvas Tensão-Deformação (PA12 por SLS)

A média da tensão máxima obtida em todos os provetes foi de 40,4 Mpa, comparativamente ao processo anterior existiu um aumento de 13,5 Mpa. Este aumento poderá ser devido à menor percentagem de espaços vazios existentes nas produções de SLS. Apesar desse aumento ainda não consegue igualar ou superar as peças produzidas por PS (55 Mpa).

O valor de tensão máxima suportada pela peça vai se comportar proporcionalmente com a densidade. Um dos parâmetros que vão influenciar a densidade vai ser a densidade de energia utilizada, quanto maior for este valor maior será o “afundamento” do pó durante a sinterização, conseqüentemente existirá uma maior deposição de pó na próxima passagem do *recoater* para preencher o vazio deixado. O aumento da densidade de energia será benéfico para a densidade da peça até um determinado ponto, segundo alguns estudos depois de excedidos os 0,012 J/mm² o pó começa a deteriorar. Este excesso de densidade de energia vai dificultar a penetração do laser nas camadas mais profundas levando assim a uma má sinterização dos pós [66], [67].

Naturalmente uma maior densidade de energia também será benéfico até ao valor crítico para o aumento da resistência à deformação das peças. Outro parâmetro importante é a orientação da peça (figura 4.15).

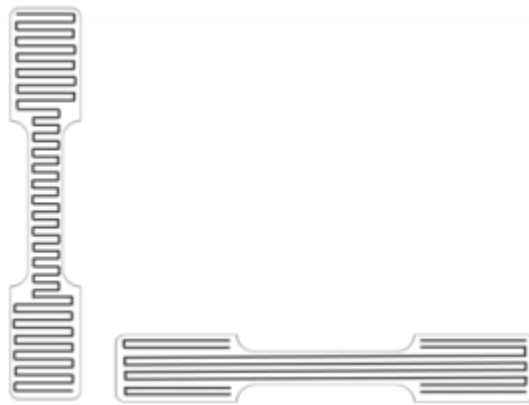


Figura 3.15. Orientação na vertical (provete à esquerda) e horizontal (provete à direita) [66]

Orientações diferentes vão levar a varrimentos de laser distintos, como se pode verificar na figura 4.15 no provete com orientação horizontal o varrimento vai ser mais demorado, desta forma vai existir um arrefecimento e solidificação não homogéneo das linhas de varrimento. Na orientação vertical o arrefecimento das linhas de varrimento é mais homogéneo, conseqüentemente existirá uma melhor sinterização das linhas de varrimento e uma maior dutibilidade da peça final [66],[67].

O valor médio obtido de deformação foi de 20 % superando o processo FDM e o subtractivo.

3.2.2.2. Ensaios de flexão

Estes ensaios foram realizados da mesma forma e com as mesmas condições que os provetes de FDM. O cálculo do módulo de elasticidade foi feito com o princípio estabelecido anteriormente. Tendo isto em conta, obteve-se um valor médio de resistência à flexão de $50.76 \pm 1.1 \text{ Mpa}$ e um módulo de elasticidade de 0.83 Gpa . Novamente existiu um aumento nestas duas propriedades comparativamente ao método FDM mas fica um pouco aquém dos valores apresentados pelos métodos subtractivos.

Um dos parâmetros que vai influenciar a resistência à flexão é a orientação de fabricação da peça. Tendo em conta o efeito *end-of-vector* (EOV), que diz que no início de fabricação de cada linha de sinterização vai existir um incremento inicial da potência do laser e posteriormente este irá estabilizar (figura 4.16). O incremento inicial de potência de laser vai levar a que os cantos das peças apresentem uma maior densidade que o resto da peça (anisotropia). Este efeito vai ser mais notado em peças finas.

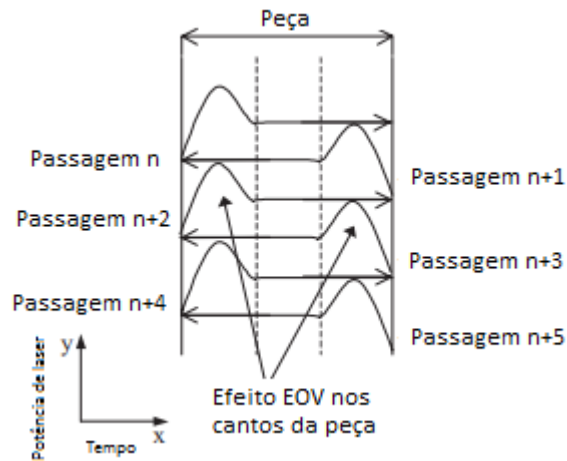


Figura 3.16. Efeito EOV em peças finas [68]

Tendo em conta este efeito facilmente se pode concluir que uma peça que é construída segundo o eixo dos Z vai apresentar uma resistência à flexão inferior a uma orientação em X e Y [68].

Os valores obtidos vão ser ligeiramente inferiores quando comparados com os apresentados em alguns artigos de optimização de parâmetros. Para melhorar estas propriedades teriam de se mudar alguns parâmetros como a orientação da peça, velocidade do laser, densidade de energia [68],[69].

3.2.2.3. Ensaios de dureza

Na tabela 4.10 pode-se verificar que as peças produzidas por SLS vão apresentar valores superiores de dureza Shore D quando comparados com os métodos subtrativos.

	PA12 maciço	PA12
Dureza (Shore D)	69	79.1 ± 0.6

Tabela 3.10. Resultados Dureza Shore D para as peças produzidas por SLS e por métodos subtrativos

3.2.2.4. Picnometria de hélio

Na tabela 4.11 encontra-se o valor médio obtido de densidade para as peças produzidas por SLS.

	PA12 maciço	PA12
Densidade (Kg/m ³)	1020	1324

Tabela 3.11. Densidade do PA12 e de PA12 maciço

Como foi dito anteriormente uma maior densidade vai levar a que a peça apresenta propriedades mecânicas superiores. Para um aumento da densidade tem de se ter em conta o tamanho de partícula de forma a reduzir a porosidade da peça [57]. A utilização de parâmetros otimizados como a densidade de energia e temperatura da zona de fabricação vai levar a uma melhor sinterização dos pós [34]. Uma otimização destes parâmetros vai levar assim a uma melhor densidade da peça e conseqüentemente a um aumento nas propriedades mecânicas da peça.

3.2.2.5. Microscopia de variação de foco

Vai agora ser apresentado os valores de dimensionamento geométrico e rugosidade para as peças produzidas em SLS.

As peças produzidas por SLS e FDM foram impressas segundo o mesmo ficheiro STL desta forma as figuras 4.8-4.11 vão representar o dimensionamento geométrico das peças produzidas em SLS.

a) Dimensionamento Geométrico

Na tabela 4.12 apresenta-se o desvio dimensional de cada uma das peças produzidas em SLS comparativamente com as peças produzidas em PS. A unidade utilizada foi o *mm* excluindo as medidas B,C e D da peça 3 onde é utilizado o grau.

Tabela 3.12. Dimensionamento das peças 1,2,3 e 4 produzidas em SLS

Peça	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	-0.5	-1.5	0	-0.9	-0.3	-0.3	0	-0.2	-0.6	-0.1	-0.2	-0.2	-0.9	-	-	-	-	-
2	+4.2	+0.2	+0.2	-0.3	+0.6	-3	0	-0.5	-0.3	-0.1	-2.4	-0.1	-0.4	+2	+0.5	+0.4	+0.3	+1.1
3	+0.6	+1°	-3°	+2°	-0.5	-0.1	+0.1	+0.1	+3.1	+0.1	-0.6	-0.3	-	-	-	-	-	-
4	-0.3	0	+0.2	+0.4	-0.1	0	-0.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Através da tabela 4.12 verifica-se que o erro dimensional das peças produzidas em SLS voltou a ser inferior a 1 *mm*.

b) Rugosidade

Na tabela 4.13 apresentam-se os valores de rugosidade das peças produzidas em SLS.

Comparando os valores da tabela 4.9 e 4.13 conclui-se que as peças produzidas em SLS vão apresentar uma maior rugosidade que as de FDM desta forma estas vão ter uma maior necessidade de um pós-processamento eficaz para se obter uma peça com boa rugosidade.

Na figura 4.17 apresenta-se uma imagem adquirida pelo IFM para a aquisição da rugosidade da peça 1.

	PA12			
	1	2	3	4
$S_a [\mu m]$	18.6	24.5	12.5	16.1
$S_q [\mu m]$	24.1	31.9	16.3	21.5
$S_z [\mu m]$	241.4	288.5	161.8	270.6

Tabela 3.13. Rugosidade das peças produzidas por SLS

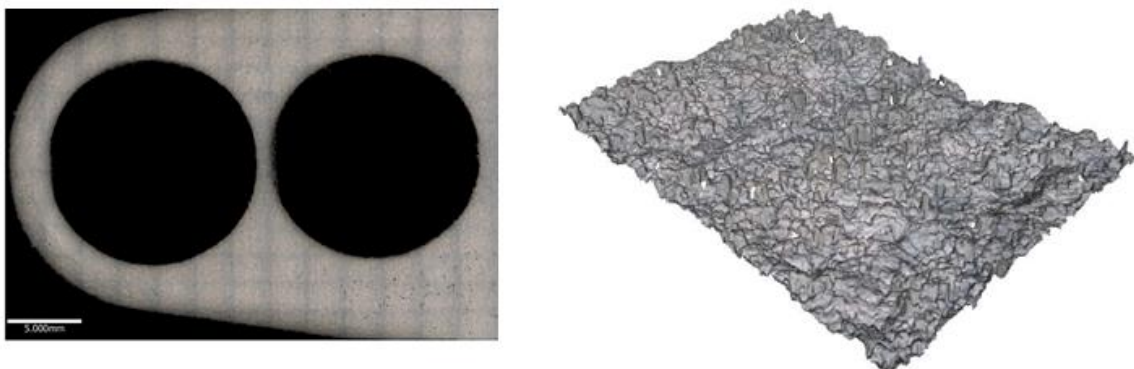


Figura 3.17. Imagens adquiridas pelo IFM da peça 1 produzida em SLS

3.2.2.6. Pino-Disco

Os valores obtidos em SLS para o coeficiente de atrito subiram em 25% relativamente ao PA12 produzido em FDM. Apesar de ainda não chegar aos valores de referência dos métodos subtrativos este processo apresenta melhores resultados de coeficiente de atrito que o FDM (figura 4.18).

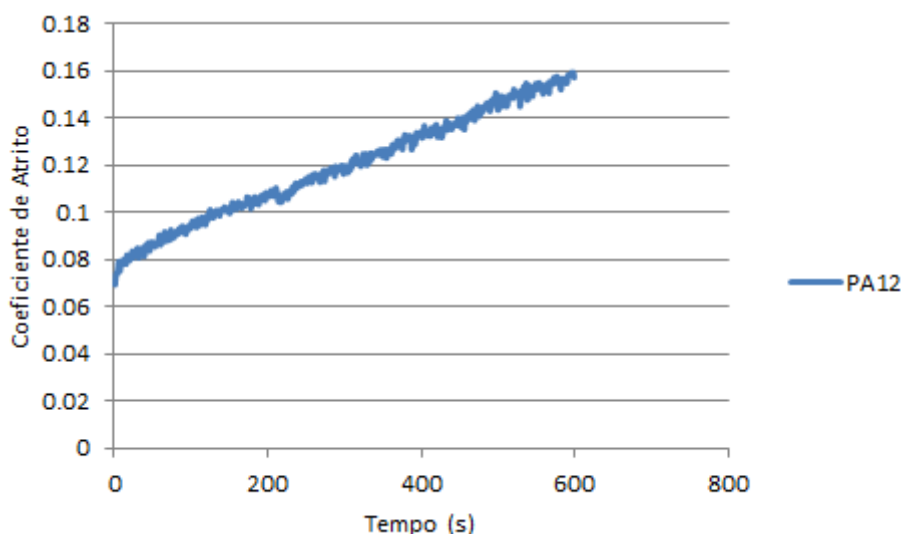


Figura 3.18. Coeficiente de atrito do PA12

3.2.2.7. Pós-processamento

O pós-processamento utilizado para a produção das peças por SLS foi o jateamento abrasivo.

Este teste foi realizado inicialmente em 2 provetes (*P1* e *P2*), em *P1* o tempo de teste foi 5 minutos e com uma distância do bico ao provete de 20 *cm*, para o provete 2 (*P2*) aumentou-se o tempo para 10 minutos e utilizou-se uma distância de 50 *cm*, tem-se ainda o valor antes do pós-processamento (*P0*).

Posteriormente o jateamento foi realizado nas peças 2 e 4, a peça 2 passou por dois jateamentos, no primeiro (2.1) utilizou-se os parâmetros de *P2* e o segundo jateamento com os de *P1* (2.2). A peça 4 apenas passou por um jateamento, onde foram utilizados os parâmetros de *P1* (tabela 4.14) .

PA12						
	P0	P1	P2	2.1	2.2	4
$S_a[\mu m]$	13.1	4.4	5.5	12.6	12.5	4.5
$S_q[\mu m]$	16.3	5.6	7.3	17.6	16.8	5.9
$S_z[\mu m]$	131.1	74.6	104.6	211.9	197.8	97.4

Tabela 3.14. Rugosidades obtidas para peças produzidas em SLS

Em *P1* existiu uma perda de material de 0.24 mm e o provete apresentou no final do teste uma ligeira inclinação. Para *P2* utilizou-se uma maior distância de bico e um maior tempo para tentar evitar que existi-se deformação da peça, para este teste a peça teve uma perda dimensional de 0.14 mm .

O primeiro jateamento na peça 2 apresentou uma diminuição média dimensional em toda a peça de 0.05 mm , já o segundo existiu uma diminuição média de 0.15 mm . A peça 4 sofreu uma diminuição média de 0.1 mm .

A máquina ideal para realizar este pós-processamento seria aquela que conseguisse um jateamento uniforme em toda a peça, neste caso como a máquina utilizada apresentava apenas um bico para que fosse possível o jateamento de todas as faces foi necessário ir girando a peça.

O último parágrafo pode servir como explicação para a diferença de material perdida nas peças e provetes, nos provetes apenas foi feito o jateamento em uma face, nas peças a execução do movimento de rotação levará a que cada face tenha um menor tempo de incidência comparativamente ao provete, levando assim a uma maior rugosidade e menos perda de material.

Na figura 4.19, pode-se verificar as consequências da utilização de um fluxo de alumina reutilizado, a figura 4.20 e 4.21 representam algumas imagens adquiridas pelo IFM.



Figura 3.19. Peça 4 depois de sofrer jateamento abrasivo

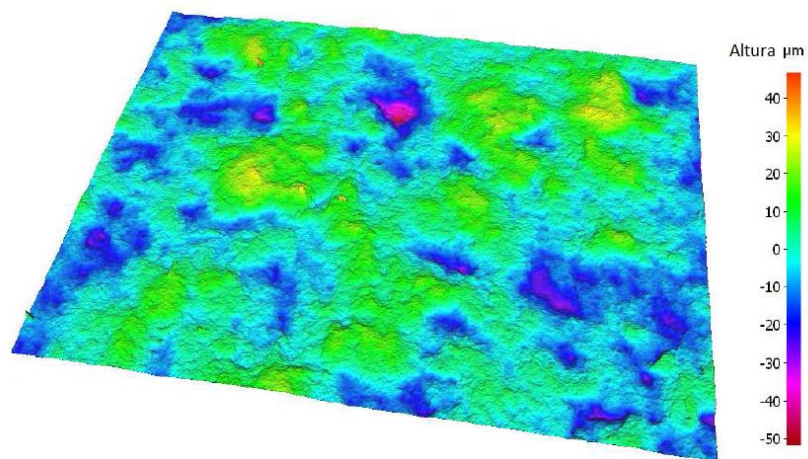


Figura 3.20. Imagem adquirida pelo IFM do provete P1

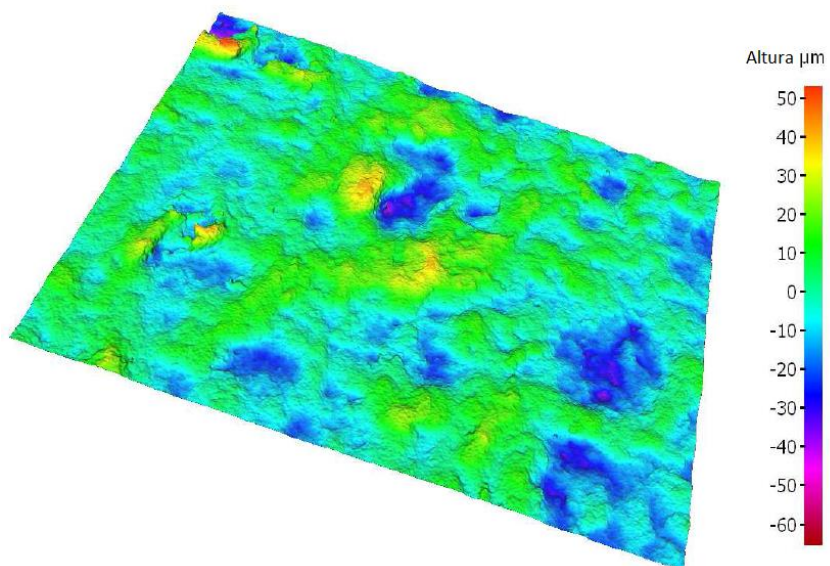


Figura 3.21. Imagem adquirida pelo IFM do provete P2

CONCLUSÕES

As principais conclusões resultantes desta dissertação de mestrado são sintetizadas nos pontos que se seguem:

- Todos os componentes fabricados por SLS e FDM apresentam uma rugosidade elevada quando comparada com os processos subtrativos, desta forma a aplicabilidade vai ser destinada a peças complexas onde o parâmetro de rugosidade .
- Uma das formas para melhorar a rugosidade das peças produzidas por AM é a utilização de pós-processamentos, comparando as duas técnicas o SLS vai apresentar uma maior necessidade de pós-processamento devido à sua elevada rugosidade quando comparada com o FDM
- Dos pós-processamentos utilizados no FDM o mais eficiente e que apresentou uma melhor rugosidade foi a utilização da lixa.
- Quando comparados os ensaios realizados é verificado que os processos subtrativos apresentam melhores resultados de tensão de tração, resistência à flexão, módulo de elasticidade e dureza.
- Das duas técnicas AM utilizadas aquela que vai apresentar melhores resultados é o SLS, esta diferença de valores pode ser explicada pela diferença de densidade existente entre estes processos.
- Dimensionalmente as peças produzidas por FDM e SLS apresentam um desvio inferior a 1 *mm*. De entre os materiais utilizados o POM é aquele que apresenta uma maior dispersão de valores devido ao seu arrefecimento inconstante.
- Apesar das limitações existentes das técnicas AM quando comparadas com os processos subtrativos, as peças produzidas por SLS apresentam uma alternativa viável para peças com uma rugosidade mínima de 7 μm .

TRABALHOS FUTUROS

Em futuros trabalhos poderá ser interessante explorar as seguintes situações:

- Averiguar se um aumento da percentagem de *Infill* nas peças produzidas por FDM levaria a um aumento das propriedades mecânicas.
- Realizar o mesmo estudo utilizando materiais de engenharia diferentes.
- Realizar o mesmo estudo utilizando técnicas AM diferentes.
- Realizar uma análise económica de forma a verificar se a utilização de técnicas AM são economicamente viáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. Shrouf, J. Ordieres, and G. Miragliotta, “Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm,” in *2014 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 2014, pp. 697–701.
- [2] U. M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, and M. Dolen, “The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0,” *Procedia Manuf.*, vol. 11, pp. 545–554, 2017.
- [3] M. Fera, R. Macchiaroli, F. Fruggiero, and A. Lambiase, “A new perspective for production process analysis using additive manufacturing—complexity vs production volume,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 95, no. 1–4, pp. 673–685, Mar. 2018.
- [4] K. V. Wong and A. Hernandez, “A Review of Additive Manufacturing,” *ISRN Mech. Eng.*, vol. 2012, pp. 1–10, 2012.
- [5] T. Wohlers and T. Gornet, “History of Additive Manufacturing,” 2014.
- [6] B. Berman, “3-D printing: The new industrial revolution,” *Bus. Horiz.*, vol. 55, no. 2, pp. 155–162, Mar. 2012.
- [7] B. Wendel, D. Rietzel, F. Kühnlein, R. Feulner, G. Hülder, and E. Schmachtenberg, “Additive Processing of Polymers,” *Macromol. Mater. Eng.*, vol. 293, no. 10, pp. 799–809, Oct. 2008.
- [8] F. Thiesse *et al.*, “Economic Implications of Additive Manufacturing and the Contribution of MIS,” *Bus. Inf. Syst. Eng.*, vol. 57, no. 2, pp. 139–148, Apr. 2015.
- [9] T. Wohlers, “Tracking Global Growth in Industrial-Scale Additive Manufacturing,” *3D Print. Addit. Manuf.*, vol. 1, no. 1, pp. 2–3, Mar. 2014.
- [10] “Wohlers Report 2018: 3D Printer Industry Tops \$7 Billion,” 2018. [Online]. Available: <https://www.forbes.com/sites/tjmccue/2018/06/04/wohlers-report-2018-3d-printer-industry-rises-21-percent-to-over-7-billion/#5e9109582d1a>. [Accessed: 03-Sep-2018].
- [11] S. C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr, and R. Mülhaupt, “Polymers for 3D

- Printing and Customized Additive Manufacturing,” *Chem. Rev.*, vol. 117, no. 15, pp. 10212–10290, Aug. 2017.
- [12] J. W. Stansbury and M. J. Idacavage, “3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities,” *Dent. Mater.*, vol. 32, no. 1, pp. 54–64, Jan. 2016.
- [13] S. Scott Crump, “Apparatus and method for creating three-dimensional objects,” 30-Oct-1989.
- [14] “History of Stratasys, Inc. – FundingUniverse.” [Online]. Available: <http://www.fundinguniverse.com/company-histories/stratasys-inc-history/>. [Accessed: 03-Sep-2018].
- [15] “- Repetier Software.” [Online]. Available: <https://www.repetier.com/>. [Accessed: 03-Sep-2018].
- [16] “Slicing - Repetier-Host Documentation.” [Online]. Available: <https://www.repetier.com/documentation/repetier-host/slicing/>. [Accessed: 03-Sep-2018].
- [17] Alkaios Bournias Varotsis, “Introduction to FDM 3D printing | 3D Hubs.” [Online]. Available: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing>. [Accessed: 03-Sep-2018].
- [18] R. Narang and D. Chhabra, “Analysis of Process Parameters of Fused Deposition Modeling (FDM) Technique,” *Int. J. Futur. Revolut. Comput. Sci. Commun. Eng. IJFRCSE*, 2017.
- [19] F. Knoop, A. Kloke, and V. Schoeppner, “Quality improvement of FDM parts by parameter optimization,” 2017, p. 190001.
- [20] S. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, and P. K. Wright, “Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 8, no. 4, pp. 248–257, Oct. 2002.
- [21] “Removing support material | Professional 3D printing made accessible | Ultimaker.” [Online]. Available: <https://ultimaker.com/en/resources/52488-removing-support-material>. [Accessed: 09-Sep-2018].
- [22] J. S. Chohan and R. Singh, “Pre and post processing techniques to improve surface characteristics of FDM parts: a state of art review and future applications,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 23, no. 3, pp. 495–513, Apr. 2017.

- [23] A. Lalehpour and A. Barari, "Post processing for Fused Deposition Modeling Parts with Acetone Vapour Bath," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 31, pp. 42–48, Jan. 2016.
- [24] Carl R. Deckard, "Method and apparatus for producing parts by selective sintering," 17-Oct-1986.
- [25] P. Mona Saffarzadeh, M.S., Gregory James Gillispie, M.S., Philip Brown, "SELECTIVE LASER SINTERING (SLS) RAPID PROTOTYPING TECHNOLOGY: A REVIEW OF MEDICAL APPLICATIONS," p. 9, 2016.
- [26] M.-K. Nikolinakou and WSEAS (Organization), *New aspects of engineering mechanics, structures, engineering geology : proceedings of the 1st WSEAS international conference on engineering mechanics, structures, engineering geology (EMESEG '08)*. WSEAS, 2008.
- [27] "Selective Laser Sintering, Birth of an Industry - Department of Mechanical Engineering," 2012. [Online]. Available: <http://www.me.utexas.edu/news/news/selective-laser-sintering-birth-of-an-industry>. [Accessed: 05-Sep-2018].
- [28] H. Zarringhalam and Hadi, "Investigation into crystallinity and degree of particle melt in selective laser sintering," 2007.
- [29] "An Introductory Guide to SLS 3D Printing | Formlabs." [Online]. Available: <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/>. [Accessed: 03-Sep-2018].
- [30] E. Y. J.-P. Kruth, G. Levy, R. Schindel, T. Craeghs, "Consolidation of Polymer Powders by Selective Laser Sintering."
- [31] Alkaios Bournias Varotsis, "Introduction to SLS 3D Printing | 3D Hubs." [Online]. Available: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sls-3d-printing>. [Accessed: 03-Sep-2018].
- [32] D. Kwon, E. Park, S. Ha, and N. Kim, "Effect of humidity changes on dimensional stability of 3D printed parts by selective laser sintering," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 18, no. 9, pp. 1275–1280, Sep. 2017.
- [33] S. K. Tiwari, S. Pande, S. Agrawal, and S. M. Bobade, "Selection of selective laser sintering materials for different applications," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 21, no. 6, pp. 630–648, Oct. 2015.

- [34] R. D. Goodridge, C. J. Tuck, and R. J. M. Hague, "Laser sintering of polyamides and other polymers," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 57, no. 2, pp. 229–267, Feb. 2012.
- [35] Y. Khalil, A. Kowalski, and N. Hopkinson, "Influence of energy density on flexural properties of laser-sintered UHMWPE," *Addit. Manuf.*, vol. 10, pp. 67–75, Apr. 2016.
- [36] B. Caulfield, P. E. McHugh, and S. Lohfeld, "Dependence of mechanical properties of polyamide components on build parameters in the SLS process," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 182, no. 1–3, pp. 477–488, Feb. 2007.
- [37] I. Gibson and D. Shi, "Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 3, no. 4, pp. 129–136, Dec. 1997.
- [38] Ben Redwood, "Post processing for SLS printed parts | 3D Hubs." [Online]. Available: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/post-processing-sls-printed-parts>. [Accessed: 03-Sep-2018].
- [39] Sean Rohringer, "25 Most Popular 3D Printer Filament Types of 2018 | All3DP," 2018. [Online]. Available: <https://all3dp.com/1/3d-printer-filament-types-3d-printing-3d-filament/>. [Accessed: 05-Sep-2018].
- [40] "Product Safety Summary Ultraform® Polyoxymethylene," 2010.
- [41] "PA 2200 Balance 1.0 PA12 EOS GmbH-Electro Optical Systems."
- [42] H. Kamerlingh, "Leapfrog Creatr'14 DATASHEET Contents."
- [43] "Leapfrog Creatr 3D Printer Reviews & Prices | 3D Hubs." [Online]. Available: <https://www.3dhubs.com/3d-printers/leapfrog-creatr>. [Accessed: 10-Sep-2018].
- [44] J. Torres, M. Cole, A. Owji, Z. DeMastry, and A. P. Gordon, "An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of experiments," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 22, no. 2, pp. 387–404, 2016.
- [45] J. M. Chacón, M. A. Caminero, E. García-Plaza, and P. J. Núñez, "Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection," *Mater. Des.*, vol. 124, pp. 143–157, Jun. 2017.
- [46] "Leapfrog Engineering PLA - Filaments - Products." [Online]. Available: <https://www.lpfrg.com/en/catalog/product/view/id/341/s/leapfrog-engineering-pla/category/5/#92=141>. [Accessed: 04-Sep-2018].

- [47] “STYX-12 - White | Formfutura.” [Online]. Available: <https://www.formfutura.com/shop/product/styx-12-white-1113?category=183>. [Accessed: 05-Sep-2018].
- [48] “3D Filament POM 1,75mm - in unserem Online Shop.” [Online]. Available: <https://www.motedis.com/shop/3D-Filaments/3D-Filaments/3D-Filament-POM-175mm-05kg-Made-in-Europe::3540.html>. [Accessed: 05-Sep-2018].
- [49] D. Tpu, “DuraForm® Materials for SLS Printing Production thermoplastic parts with ProX® and sPro™ SLS printers For more information refer to our SLS Material Selection Guide or the individual DuraForm and CastForm material datasheets on www.3dsystems.com Heat Deflection Temperature (°C) @ 0.45 MPa @ 1.82 MPa Flammability Hardness ASTM 792 ASTM D790ASTM D790 ASTM D638 ASTM D638 ASTM D638 ASTM D256 ASTM D648 UL 94 ASTM D2240 sPro Compatible Material Properties,” 2018.
- [50] D. Tpu, “DuraForm® Materials for SLS Printing Production thermoplastic parts with ProX® and sPro™ SLS printers For more information refer to our SLS Material Selection Guide or the individual DuraForm and CastForm material datasheets on www.3dsystems.com Heat Deflection Temperature (°C) @ 0.45 MPa @ 1.82 MPa Flammability Hardness ASTM 792 ASTM D790ASTM D790 ASTM D638 ASTM D638 ASTM D638 ASTM D256 ASTM D648 UL 94 ASTM D2240 sPro Compatible Material Properties,” 2018.
- [51] “ASTM D638-03. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. American Society for Testing and Materials. United States of America.”
- [52] “ASTM D790-03. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. American Society for Testing and Materials. United States of America.”
- [53] “ASTM D2240 - 15 Standard Test Method for Rubber Property—Durometer Hardness.”
- [54] “ISO 5436-1,” 2000.
- [55] “ISO 4287:1997 - Geometrical Product Specifications (GPS) -- Surface texture: Profile method -- Terms, definitions and surface texture parameters.” [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/10132.html>. [Accessed: 06-Sep-2018].
- [56] “ISO 13320 (2009). Particle size analysis -- Laser diffraction methods. International

- Society of Standardization.”
- [57] Y. Shi, Z. Li, H. Sun, S. Huang, and F. Zeng, “Effect of the properties of the polymer materials on the quality of selective laser sintering parts,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, vol. 218, no. 3, pp. 247–252, Jul. 2004.
- [58] C. K. Basavaraj and M. Vishwas, “Studies on Effect of Fused Deposition Modelling Process Parameters on Ultimate Tensile Strength and Dimensional Accuracy of Nylon,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 149, no. 1, 2016.
- [59] A. Lanzotti, M. Grasso, G. Staiano, and M. Martorelli, “The impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printer,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 21, no. 5, pp. 604–617, 2015.
- [60] N. Ingeo, “PLA (general purpose) Composition detail (polymers and natural materials) PLA (general purpose),” pp. 8–10.
- [61] P. Tek, “PA (type 12 , rigid) Composition detail (polymers and natural materials),” pp. 3–5.
- [62] B. Polymer, P. Thermoplastic, E. Compressive, and V. Hardness, “POM (copolymer) Composition detail (polymers and natural materials) POM (copolymer),” pp. 1–3.
- [63] K. G. Mostafa, C. Montemagno, and A. J. Qureshi, “Strength to cost ratio analysis of FDM Nylon 12 3D Printed Parts,” *Procedia Manuf.*, vol. 26, pp. 753–762, 2018.
- [64] J. M. Chacón, M. A. Caminero, E. García-Plaza, and P. J. Núñez, “Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection,” *Mater. Des.*, vol. 124, pp. 143–157, 2017.
- [65] S. O. Akande, “Dimensional Accuracy and Surface Finish Optimization of Fused Deposition Modelling Parts using Desirability Function Analysis,” *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 4, no. 04, pp. 196–202, 2015.
- [66] J. Nelson, G. Galloway, A. E. W. Rennie, T. N. Abram, and G. R. Bennett, “Effects of scan direction and orientation on mechanical properties of laser sintered polyamide-12,” *Int J Adv. Des. Manuf. Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 19–25, 2014.
- [67] S. L. Sintering and S. Gra, “LA-UR-17-24716 Title : Author (s): Intended for : Selective Laser Sintering of PA2200 : Effects of print parameters on Issued :,” 2017.
- [68] U. Ajoku, N. Saleh, N. Hopkinson, R. Hague, and P. Erasenthiran, “Investigating

- mechanical anisotropy and end-of-vector effect in laser-sintered nylon parts,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 220, no. 7, pp. 1077–1086, 2006.
- [69] A. Pilipović, I. Drstvenšek, and M. Šercer, “Mathematical model for the selection of processing parameters in selective laser sintering of polymer products,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 2014, no. 1, 2014.

APÊNDICE A- PEÇAS E PROVETES PRODUZIDOS



Figura A.1. Provets tração e flexão produzidos em 1.PLA; 2.POM; 3.PA12,FDM; 4.PA12,SLS



Figura A.2. Peças construídas em PLA pelo processo FDM



Figura A.3. Peças construídas em POM pelo processo FDM

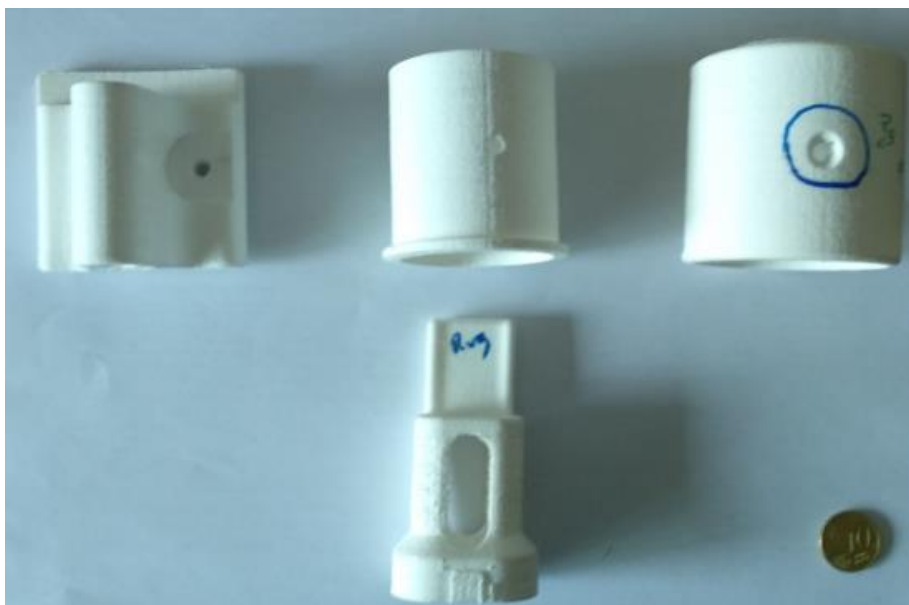


Figura A.4. Peças construídas em PA12 pelo processo FDM



Figura A.5. Peças construídas em PA12 pelo processo SLS

APÊNDICE B- SINTERIZAÇÃO DE POLÍMEROS SEMI-CRISTALINOS

Polímeros semi-cristalinos quando expostos a uma temperatura superior à sua temperatura de amolecimento não têm tendência a começar a amolecer imediatamente, em vez disso vão manter a sua resistência até uma determinada quantidade de calor ser absorvido. Chegando a este ponto ele passa rapidamente a líquido viscoso, posteriormente a parte viscosa presente no pó vai fluir pelas partículas de pó e criar ligações entre eles (pescoços de sinterização).

Chegando a fase de arrefecimento quando a temperatura é inferior à temperatura de amolecimento irá existir um crescimento e uma reorganização da estrutura molecular.

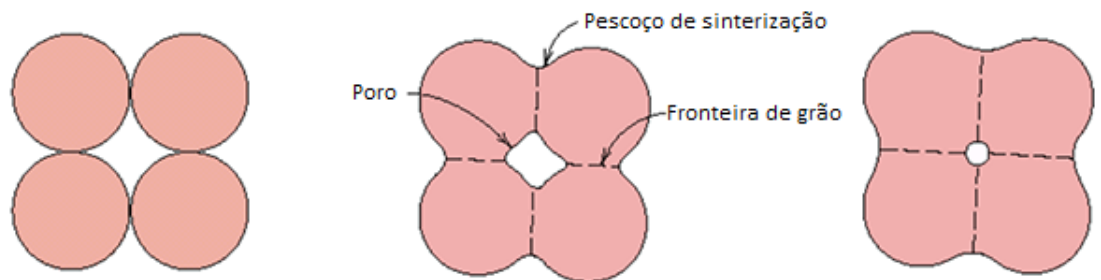


Figura B.1. Formação do pescoço de sinterização

No SLS o pré-aquecimento e a passagem do laser vão levar à formação de pescoços de sinterização e conseqüentemente à formação das camadas pré-programadas.

Após a finalização da peça a utilização de um pós-aquecimento (utilizar uma temperatura ligeiramente inferior à temperatura de amolecimento) durante algum tempo de forma a evitar a contração da peça.