



Estudo Mecânico de Componentes Produzidos por SLS

Mestrado em Engenharia Mecânica-Produção Industrial

Telma Sofia Oliveira Ruivo

Leiria, Setembro de 2019

Esta página foi deixada em branco propositadamente



Estudo Mecânico de Componentes Produzidos por SLS

Mestrado em Engenharia Mecânica-Produção Industrial

Telma Sofia Oliveira Ruivo

Projeto realizado sob a orientação do Professor Doutor Mário António Simões Correia e do Professor Doutor Henrique de Amorim Almeida, ambos Professores da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Politécnico de Leiria

Leiria, Setembro de 2019

Originalidade e Direitos de Autor

O presente projeto é original, elaborada unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para o elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual a mesma foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica-Produção Industrial, no ano letivo 2018/2019, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

Agradecimentos

Este projeto de mestrado é o culminar de 2 anos de trabalho e aprendizagem, que está prestes a terminar, por essa razão não posso deixar de agradecer a algumas pessoas que, direta ou indiretamente me ajudaram nesta caminhada tão importante da minha vida pessoal e profissional.

Em primeira análise agradeço aos meus pais e irmã todo o ânimo para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho. A motivação que sempre me transmitiram para ultrapassar cada etapa, por estarem sempre presentes para me amparar, ajudar, criticar e congratular fazendo-me tornar e sentir uma pessoa melhor.

Presto também agradecimento aos dois professores orientadores, Professor Doutor Mário Correia e Professor Doutor Henrique Almeida que me acompanharam ao longo deste percurso, demonstrando-se sempre disponíveis para qualquer esclarecimento.

Agradeço ao Doutor Rui Tocha, diretor geral do Centimfe, pelo acolhimento e disponibilidade demonstrados, permitindo que utilizasse os recursos necessários para a elaboração dos provetes para o estudo desenvolvido nesta dissertação.

Agradeço à Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra pela disponibilidade demonstrada, permitindo que utilizasse os recursos necessários para a elaboração de alguns ensaios mecânicos executados neste projeto.

Agradeço também aos colegas do Centimfe que me acompanharam nesta etapa, sem o vosso apoio não teria sido possível a elaboração de determinados pontos fundamentais para o meu trabalho.

Em último, mas não menos importante, obrigada à Stefanie Ferreira pela disponibilidade, pela amizade, dedicação, motivação para chegar mais longe.

Resumo

Este projeto foi elaborado com o intuito de estudar o comportamento mecânico de provetes construídos perante o processo de fabricação, nomeadamente a Sinterização Seletiva por Laser (SLS). A SLS é uma técnica que consiste na orientação de um feixe de laser sobre matéria-prima em pó e essa incidência provoca um aquecimento do material, fundindo-o, surgindo assim as peças pretendidas. A matéria-prima em pó, atua como uma estrutura de suporte durante o processo de construção, sendo esta uma das vantagens da otimização do processo, pois não necessita de outro material que faça de suporte à peça quando esta está a ser construída, como por exemplo a construção de uma esfera dentro de outra. Outras vantagens são a construção de peças ou protótipos, com geometrias complexas, num curto espaço de tempo e a diversidade de materiais possíveis de utilizar nesta tecnologia como matéria-prima. Neste projeto, foi utilizado equipamento gentilmente cedido por uma empresa da Marinha Grande, Centimfe, onde foram feitos os provetes necessários para a execução dos ensaios. Os provetes foram construídos em 4 orientações diferentes, com uma trajetória de construção designada de zigue-zague. Os ensaios realizados foram: de tração, relaxação de tensão, DMA, impacto- longitudinal também designado por impacto tração, impacto-queda livre e de dureza. Estes ensaios permitiram analisar as propriedades mecânicas e térmicas dos provetes obtidos após a sinterização da matéria-prima em estudo, a referir poliamida 12. O objetivo principal deste projeto foi avaliar qual a influência da orientação de construção tendo em conta as propriedades mecânicas e térmicas, onde se concluiu a orientação 4, foi a que obteve melhores resultados, tendo sido construída de acordo com os eixos x e z, o que lhe confere uma maior resistência mecânica.

Palavras-chave: Fabrico Aditivo, Ensaios mecânicos, Sinterização Seletiva a Laser, Poliamida.

Abstract

This project was elaborated in order to study the mechanical behavior of specimens built before the manufacturing process, namely Selective Laser Sintering (SLS). SLS is a technique that consists of orienting a laser beam over powdered raw material and this incision causes the material to heat up, melting it into the desired parts. Powdered raw material acts as a support structure during the construction process, which is one of the advantages of process optimization. Other advantages are the construction of parts or prototypes with complex geometries in a short time and the diversity of materials that can be used in this technology as raw material. In this project, equipment was kindly provided by a company from Marinha Grande, Centimfe, where the specimens necessary for the execution of the tests were made. The test pieces were constructed in 4 different orientations, with a zigzag construction path. The tests were: tensile, stress relaxation, DMA, impact-traction, impact-free fall and hardness. These tests allowed to analyse the mechanical and thermal properties of the specimens obtained after the sintering of the raw material under study, referring to polyamide 12. The main objective of this project was to evaluate the influence of the construction orientation, considering the mechanical and thermal properties, where orientation 4 was concluded, it was the one that obtained the best results, having been built according to the x and z axes, which gives it a higher mechanical resistance.

Keywords: Additive Manufacturing, Mechanical Testing, Selective Laser Sintering, Polyamide.

Índice

Originalidade e Direitos de Autor	iii
Agradecimentos	iv
Resumo	v
Abstract	vi
Lista de Figuras	ix
Lista de tabelas	xi
Lista de siglas e acrónimos.....	xii
1. Introdução	1
2. Estado da Arte	3
2.1. Origem e história	4
2.2. Classificação de processos de fabrico aditivo.....	6
2.3. Funcionamento genérico de máquinas de SLS	9
2.4. Trajetórias de construção	12
2.4.1. Efeito Zigue-Zague e Efeito Zague.....	13
2.4.2. Efeito Escada.....	14
2.5. Materiais utilizados em SLS	16
2.6. Caraterização mecânica de materiais processados e utilizados em SLS	18
3. Materiais e Métodos	21
3.1. Materiais- Poliamida	21
3.2. Métodos	24
3.2.1. Ensaio de Tração	29
3.2.2. Ensaio fluência e ensaio de relaxação de tensões	30
3.2.3. Ensaio DMA	31
3.2.4. Ensaio de Impacto Longitudinal	35
3.2.5. Ensaio Impacto-Queda livre	38

3.2.6.	Ensaio Dureza Shore	39
4.	Resultados e discussão.....	41
4.1.	Ensaio de tração.....	41
4.2.	Ensaio fluência- relaxação de tensão	42
4.3.	Ensaio DMA	44
4.4.	Ensaio de Impacto longitudinal.....	46
4.5.	Ensaio impacto-queda livre	48
4.6.	Ensaio dureza Shore.....	51
4.7.	Influência da decisão na orientação da construção nas propriedades mecânicas 52	
5.	Conclusão	55
	Bibliografia ou Referências Bibliográficas.....	57

Lista de Figuras

Figura 1 - Classificação de polímeros, (Faustino, 2014).....	3
Figura 2 - Constituição interna genérica de uma máquina de SLS (Graça, 2012).....	10
Figura 3 - Aparência externa do equipamento de SLS e respetivo funcionamento. A-Depósito direito; B-Sistema de alimentação de pó direito; C-Área de trabalho/ Câmara de construção; D-Sistema de alimentação de pó esquerdo; E-Depósito esquerdo, (Klein <i>et al.</i> , 2005).....	11
Figura 4 - Influência dos principais parâmetros de construção via SLS, à direita vista de frente; à esquerda vista de topo. A- Penetração do laser; B-Sobreposição de camadas (Kulman, 2006).....	12
Figura 5 - Efeito Zigue-zague e Efeito Zague (Volpato, Foggiatto e Radigonda, 2011).....	13
Figura 6 - Efeito escada (Volpato, Foggiatto e Radigonda, 2011).....	14
Figura 7 - Representação esquemática do fatiamento uniforme (a) e adaptativo (b) (Volpato, Foggiatto e Radigonda, 2011).....	15
Figura 8 - Fabricação um exterior refinado(A) com interior rápido(B) (Volpato, Foggiatto e Radigonda, 2011).....	15
Figura 9 - Poliamida em pó.....	23
Figura 10 - Representação esquemática da orientação de construção dos provetes 1- Na horizontal, segundo o eixo X; 2- Na horizontal, segundo o eixo Y; 3- Na vertical, segundo o eixo Z; 4- Na horizontal segundo o eixo Z.....	25
Figura 11 - 2D do provete com as respetivas dimensões.....	26
Figura 12 - Etapas de preparação pré e pós processamento da matéria-prima.....	28
Figura 13 - Tensão vs Deformação em materiais poliméricos.....	30
Figura 14 - Curva de deformação em função do tempo no ensaio de fluência (Farina, 2009).....	31
Figura 15 - Comportamento de um material perfeitamente elástico (Braga, 2014).....	32
Figura 16 - Comportamento de um material viscoso (Braga, 2014).....	33
Figura 17 - Curva típica das propriedades dinâmico-mecânicas (E' , E'' e $\tan \delta$) de um polímero em função da temperatura, obtida com os resultados da técnica de DMA (Pagnoncelli Lorandi, Odila Hilário Cioffi e Ornaghi Jr., 2016).....	33
Figura 18 - Transição dos materiais (Felisberti e Cassu Navarro, 2005), (Claro Neto, 2015) e (©Cambridge Polymer Group, 2013).....	34
Figura 19 - Parâmetros do ensaio de DMA.....	35
Figura 20 - Máquina de ensaio de DMA, Triton, modelo Tritec 2000.....	35
Figura 21 - Energia que o provete consegue absorver antes de entrar em rutura (Callister, 2002).....	36
Figura 22-Equipamento da INSTRON, modelo CEAST 9050.....	36

Figura 23 - Materiais de auxílio ao ensaio de impacto-longitudinal: Paquímetro 0-150 mm, Placa metálica adequada para TIPO2 (7610,342 (<i>type 2</i>)), Grampo de aperto (7610,373 60g), Chave de apertar porcas 18 mm.....	37
Figura 24 - Ângulo inicial de 150°, à esquerda. Aperto do provete no equipamento para ensaio de impacto, à direita.....	37
Figura 25 - Dimensões do provete tipo 2, segundo a norma ISO 8256 método A (Freitas, 2016; Rodrigues, 2016).....	38
Figura 26 - Instrumento para execução do ensaio de impacto em queda livre, zona em vidro é onde se encontra o martelo utilizado para o impacto.....	38
Figura 27 - Interior do instrumento para execução do ensaio de impacto em queda livre. 1 - Região onde é colocado o material a testar, a parte superior é fixa, a parte inferior é móvel; 2 - Regulador da altura da parte móvel.....	39
Figura 28 - Placa para ensaio de impacto queda livre.	39
Figura 29 - Durómetro à esquerda e o detalhe do indentador à direita com dimensão de 0,79mm.	40
Figura 30 - Gráfico Tensão vs Deformação para cada orientação de construção.	41
Figura 31 - Média dos resultados ensaios de relaxação de tensões para cada orientação.	43
Figura 32 - Orientação 1: Representação gráfica do módulo de elasticidade e Tan Delta (δ) em função da temperatura do ensaio mecânico-dinâmico de uma amostra de PA12 com uma frequência de 1Hz.	44
Figura 33 - Orientação 2: Representação gráfica do módulo de elasticidade e Tan Delta (δ) em função da temperatura do ensaio mecânico-dinâmico de uma amostra de PA12 com uma frequência de 1Hz.	44
Figura 34 - Orientação 3: Representação gráfica do módulo de elasticidade e Tan Delta (δ) em função da temperatura do ensaio mecânico-dinâmico de uma amostra de PA12 com uma frequência de 1Hz.	44
Figura 35 - Orientação 4: Representação gráfica do módulo de elasticidade e Tan Delta (δ) em função da temperatura do ensaio mecânico-dinâmico de uma amostra de PA12 com uma frequência de 1Hz.	45
Figura 36 -Energia absorvida em [%] no ensaio de impacto-longitudinal diferentes orientações de construção.	47
Figura 37 - Resiliência das diferentes orientações de construção.....	47
Figura 38 - Energia absorvida em [J] do ensaio de impacto-longitudinal das diferentes orientações de construção.....	47
Figura 39 - Gráfico de força vs deslocamento da orientação de construção 1.....	48
Figura 40 - Gráfico de força vs deslocamento da orientação de construção 3.....	49
Figura 41 - Gráfico de deslocamento vs tempo da orientação de construção 1.....	49
Figura 42 - Gráfico de deslocamento vs tempo da orientação de construção 3.....	50

Lista de tabelas

Tabela 1 - Classificação do material que é utilizado no estado inicial, (Addispace, 2019)	6
Tabela 2 - Classificação dos processos de fabrico aditivo e seus princípios e tecnologias (Almeida, 2018). ...	8
Tabela 3 - Materiais compatíveis com equipamentos de sinterização seletiva a laser (SLS) da 3D Systems (Giordano, Caio; Zancul, 2016).....	16
Tabela 4 - Materiais compatíveis com equipamentos de sinterização seletiva a laser (SLS) da EOS (Paggi, 2008).....	17
Tabela 5 - Propriedades da PA-12 utilizada em sistemas de SLS pelos dois fabricantes (Silva, 2009).	18
Tabela 6 - Representações estruturais das cadeias de diferentes tipos de poliamidas (Paggi, 2008) e (Giordano, Caio; Zancul, 2016).....	21
Tabela 7 - Parâmetros da EOS (EOS GmbH - Electro Optical Systems, 2010).	22
Tabela 8 - Dimensões dos provetes do tipo 2 (Freitas, 2016; Rodrigues, 2016).	38
Tabela 9 - Ensaio de tração.	42
Tabela 10 - Variação de força, força máxima e força final para cada orientação do ensaio de relaxação de tensão.....	43
Tabela 11 - Ensaio DMA.....	45
Tabela 12- Energia absorvida [%] para as orientações 1 e 3	50
Tabela 13 - Resultados dos ensaios Shore A.	51
Tabela 14 - Tabela resumo.	53

Lista de siglas e acrónimos

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
3DP	<i>Three dimensional printing</i>
A_0	Área de seção transversal inicial
CAD	Desenho Assistido por Computador, do inglês <i>Computer Aided Design</i>
Centimfe	Centro Tecnológico da Indústria dos Moldes, Ferramentas especiais e Plásticos
DMA	<i>Dynamic Mechanical Analysis</i> ; Análise Mecânico-dinâmica
DSPC	<i>Direct Shell Production Casting</i>
E	Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young
EBM	<i>Electron Beam Melting</i>
ESTG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
EUA	Estados Unidos da América
FA	Fabrico Aditivo
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
IPLeiria	Politécnico de Leiria
IPQ	Instituto Português da Qualidade
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i>
MEM-PI	Mestrado em Engenharia Mecânica-Produção Industrial
MIT	<i>Massachussets Institute of Technology</i>
MJM	<i>Multi-Jet Modeling System</i>
PA	Poliamida
PA 12	Poliamida 12
PS	Poliestireno
PEAD	Polietileno de alta densidade
PMMA	Polimetilmetacrilato
q	Porcentagem de redução de área
SGC	<i>Stratasys, Solid Ground Curing</i>

SL	<i>StereoLithography</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
SLS	Sinterização Seletiva a Laser
STL	<i>Standard Template Library</i>
T _m	Temperatura de fusão
T _g	Temperatura de transição vítrea
σ_c ;	Tensão de cedência (ponto de cedência),
σ_r ;	Tensão de rotura, tensão máxima ou resistência à tracção
ε	Deformação
ε_f	Alongamento percentual até à fractura

1. Introdução

O processo de fabrico aditivo (FA), nomeadamente o de Sinterização Seletiva a Laser (SLS) é cada vez mais utilizado na indústria quer seja para a produção de um componente final, quer seja para produzir um protótipo. É possível obter por FA um ou múltiplos componentes de forma rápida, geralmente num prazo de horas. Para o caso da SLS, os materiais mais utilizados são os polímeros e os metais.

O comportamento mecânico de componentes produzidos por esta tecnologia é claramente influenciado pela estratégia e posição de construção. Para tal é necessário conhecer de forma detalhada as propriedades mecânicas e térmicas destes materiais, neste caso estudados sob forma de provetes para perceber o seu comportamento quando submetidos a ensaios mecânicos. Em muitas situações, os componentes, geometrias ou objetos são solicitados num estado mais complexo de esforços, normalmente com uma conjugação, compressões, trações, impactos, aquecimento. Por essa razão, é relevante um estudo experimental que abranja alguns ensaios mecânicos de forma a compreender o comportamento do material em diferentes situações.

O objetivo principal deste estudo é analisar o comportamento mecânico e térmico em provetes de poliamida 12 (PA12), construídos por fabrico aditivo de SLS. Para tal foi analisada a influência da orientação de construção no comportamento mecânico, por recurso a ensaios de impacto, ensaios de tração, ensaio de fluência-relaxamento de tensões e ensaio de dureza. O ensaio de impacto engloba os ensaios de impacto longitudinal e de impacto por queda-livre (Ghaith, 2009). Por outro lado, o comportamento térmico deste material foi avaliado com ensaio de análise mecânica dinâmica (DMA).

Este documento está organizado em cinco capítulos, sendo este a introdução. O segundo capítulo apresenta o estado de arte, onde é realizada uma pesquisa bibliográfica sobre o fabrico aditivo e o processo de SLS. O terceiro capítulo é descrito materiais e métodos utilizados, assim como equipamentos utilizados e geometrias dos provetes. O quarto capítulo os resultados obtidos e sua discussão, criando enfoque no subcapítulo referente à influência da decisão na orientação da

construção nas propriedades mecânicas. Finalmente, o quinto capítulo apresenta as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. Estado da Arte

O fabrico aditivo é uma ferramenta cada vez mais importante, que abrange uma vasta área, como por exemplo a medicina permitindo a produção modelos anatómicos e réplicas de implantes ou próteses personalizadas ao paciente, permite também fazer um planeamento cirúrgico, reduzindo assim o tempo necessário para a execução de uma cirurgia. Este processo consiste na produção de protótipos, de pequenas séries, ou até de peças únicas. A produção da peça inicia-se com o auxílio de matéria-prima que é adicionada por camadas até fazer a peça completa e por essa razão o desperdício de material é menor do que na fabricação subtrativa, uma vez que se parte de um bloco de material que é desbastado até se obter a geometria pretendida. Os modelos de fabricação aditiva, podem ser construídos por diferentes materiais como por exemplo, plástico ou polímeros, metais ou cerâmicos, além disso é possível obter geometrias de várias complexidades, sem necessitarem de posterior acabamento (Lino e Neto, 2019; Paggi, 2008).

Os polímeros podem classificar-se como sendo, naturais ou sintéticos, Figura 1. Os polímeros naturais já existem na natureza, como por exemplo o colagénio, a celulose ou a quitina, enquanto que os sintéticos são produzidos artificialmente pelo homem, onde podem ser utilizadas a polimerização de moléculas simples. O nylon, o polipropileno ou poliuretano, são exemplo de polímeros sintéticos, (Faustino, 2014).

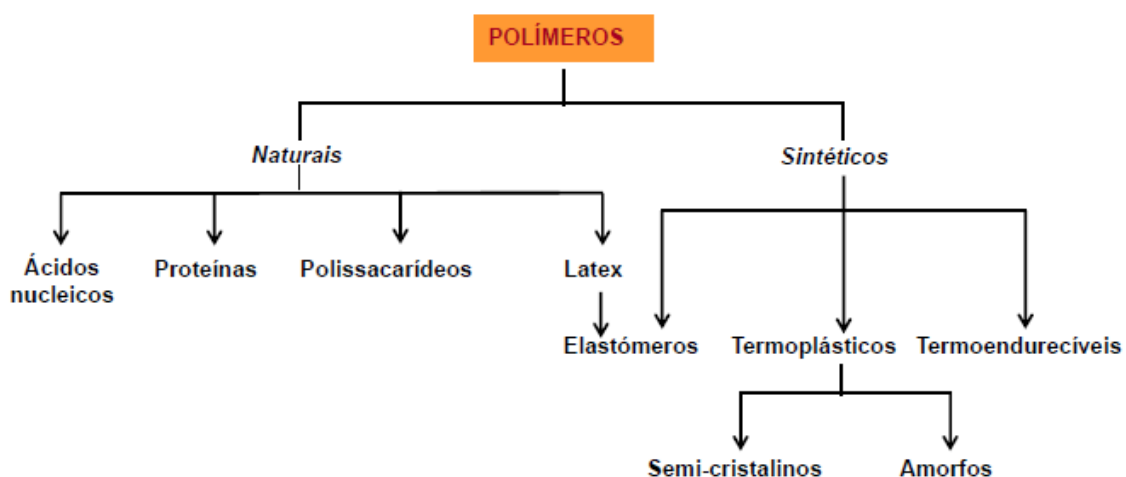


Figura 1 - Classificação de polímeros, (Faustino, 2014).

2.1. Origem e história ¹

Os sistemas de fabrico aditivo surgiram inicialmente em 1987 com o processo de estereolitografia, *Stereo Lithography* (SL), da empresa americana *3D Systems*. Este processo solidifica camadas de resina fotossensível através de um laser. O sistema *Stereo Litography* foi o primeiro sistema de prototipagem disponível comercialmente e também um precursor da máquina SLA 250. Após a empresa *3D Systems* iniciar a comercialização de máquinas SL nos EUA, a empresa japonesa NTT Data, passou a comercializar a sua versão de máquinas de SL em 1988 e a Sony/D-MEC em 1989.

Mais tarde já em 1990, a empresa *Eletro Optical Systems* (EOS) na Alemanha, passou a comercializar o sistema conhecido como Stereos. De seguida surgiu a tecnologia *Fused Deposition Modeling* (FDM) em 1991 de diferentes empresas, da americana *Stratasys*, *Solid Ground Curing* (SGC), da israelita Cubital e *Laminated Object Manufacturing* (LOM). A empresa americana, também trabalha com resina fotossensível aos raios UV, no entanto, a solidificação da camada é feita a partir de uma única operação, que utiliza máscaras criadas com tinta eletrostática numa placa de vidro. Enquanto que a tecnologia utilizada pela *Laminated Object Manufacturing* solidifica e corta folhas de papel, atualmente folhas de termoplásticos reforçados com fibras, através de um laser controlado por computador.

Sistemas de SLS da empresa americana DTM e o sistema *Soliform* de estereolitografia da japonesa Teijin Seiki ficaram disponíveis em 1992. Através do calor gerado pelo laser, SLS funde pós metálicos e pode ser utilizado para obtenção direta de matrizes de injeção.

Em 1993, a americana Soligen comercializou o produto conhecido por *Direct Shell Production Casting* (DSPC), que utiliza um mecanismo de jato de tinta para depositar um líquido que tem a função de unir os pós cerâmicos para a produção de cascas que podem por sua vez serem utilizados na produção de moldes e peças injetadas em Alumínio. Este processo foi desenvolvido e patenteado pelo *Massachusetts Institute of Technology* (MIT).

¹ Todo este subcapítulo utiliza as mesmas referências (Cotteleer, Mark; Holdowsky, Jonathan; Mahto, 2014) e (Leite, 2007).

Em 1994 muitas outras tecnologias e sistemas surgiram:

- *ModelMaker* da empresa americana *Sanders Prototype*, usando sistema de jato de cera (ink-jet wax);
- *Solid Center* da empresa japonesa *Kira Corp.*, utilizando um sistema laser guiado e um *plotter* XY para produção de moldes e protótipos por laminação de papel;
- Sistema de estereolitografia da empresa *Fockele & Schwarze* (Alemanha);
- Sistema EOSINT, da empresa alemã EOS, baseado em sinterização;
- Sistema de estereolitografia da empresa japonesa Ushio.

O sistema *Personal Modeler 2100*, que produz peças a partir de uma cabeça a jato de cera, da empresa *Ballistic Particle Manufacturing Technology* dos Estados Unidos da América (EUA), foi vendido comercialmente a partir de 1996. No mesmo ano, a empresa *Aaroflex* dos EUA passou a comercializar o sistema SOMOS em estereolitografia da multinacional *DuPont* e, a empresas *Stratasys* dos EUA lançou o seu produto *Genisys*, baseado em extrusão, similar ao processo de FDM, mas utiliza um sistema de prototipagem desenvolvido no Centro de Desenvolvimento IBM (*IBM's Watson Research Center*). Nesse ano ainda, após oito anos a comercializar produtos em esterolitografia, a empresa 3D Systems dos EUA comercializou pela primeira vez o seu sistema Atual 2100, trata-se de sistema baseado em impressão a jato de tinta tridimensional (3D). Este sistema deposita materiais em cera camada por camada através de 96 jatos. No mesmo ano a *Z Corporation* EUA lançou o sistema Z402 3D para prototipagem baseado na deposição de pós metálicos em 3D.

Apesar da evolução da tecnologia, existem parâmetros que se mantêm, nomeadamente as propriedades físicas e comportamentos mecânicos. Esses parâmetros regem-se pela *American Society for Testing Materials* (ASTM) e pela Internacional *Organization for Standardization* (ISO).

2.2. Classificação de processos de fabrico aditivo

Existem várias formas de classificar as tecnologias de fabrico aditivo que foram desenvolvidas, uma das formas é a classificação do material que é utilizado no estado inicial, estado líquido, sólido ou em pó, como descrito na Tabela 1 (Addispace, 2019).

Quando o estado inicial do material é o estado líquido, o processo que o converte em sólido é conhecido como cura (Addispace, 2019). Esta cura ocorre devido à exposição de radiação ultravioleta a que está exposta a resina líquida foto-curável, criando uma camada endurecida. Este processo é executado por um sistema de elevação, para permitir o movimento das plataformas de forma a que as camadas endurecidas fiquem sobrepostas, repetindo-se os movimentos até ser construída a geometria. Existem fatores que influenciam o processo, como por exemplo o tipo de luz ou laser, o método de varrimento ou de exposição, tipo de resina líquida, tipo de elevação e do sistema ótico utilizado (Martins, 2016).

Quando o estado inicial do material é o estado sólido, este pode encontrar-se nas mais variadas formas, como por exemplo: em fio, rolo ou laminados (Addispace, 2019).

O terceiro estado, apesar de se encontrar no estado sólido é classificado numa outra categoria, por se apresentar literalmente na forma e grão “de pó” (Addispace, 2019).

Tabela 1 - Classificação do material que é utilizado no estado inicial, (Addispace, 2019) .

Base Líquida	Estereolitografia (SL); Modelação por Jato Múltiplo(MJM);
Base Sólida	Modelação por extrusão de polímero fundido (FDM); Modelação por aglomeração de camadas (LOM);
Base em pó	Sinterização Seletiva a Laser (SLS); Impressão Tridimensional (3DP); Fusão Seletiva a Laser (SLM); Fabrico Aditivo por Feixe de Eletrões (EBM);

Segundo a ASTM-Standard F2792, existem 7 classificações diferentes, como descreve a tabela seguinte, Tabela 2 (Addispace, 2019; Almeida, 2018).

O processo de fabrico aditivo engloba um conjunto de tecnologias que podem ser definidas como o processo de aglutinação de materiais que permitem construir objetos através da sobreposição de matéria-prima (Almeida, 2018). Essa sobreposição de matéria-prima geralmente é otimizada pela orientação de construção da geometria pretendida, onde se deve ter em conta as limitações do equipamento a utilizar (Taufik e Jain, 2014).

O processo de fabrico aditivo é considerado um processo com praticamente zero desperdícios e onde existe uma considerável vantagem económica e temporal, nomeadamente quando é possível o fabrico de geometrias complexas mesmo quando estas podem ser obtidas ou não por processos convencionais (Almeida, 2018).

Tabela 2 - Classificação dos processos de fabrico aditivo e seus princípios e tecnologias (Almeida, 2018).

Categoria	Princípio	Tecnologia
Jato ligante	Um agente ligante líquido é depositado seletivamente para unir materiais em pó	3D Printing (3DP)
Deposição de energia direta	Energia térmica concentrada utilizada para fundir os materiais enquanto estes são depositados (revestimento a laser)	Deposição de Metal a Laser (LMD/LENS); Fabrico Aditivo por Feixe de Eletrões (EBAM)
Extrusão de material	O material é distribuído seletivamente através de um bocal ou orifício	Modelação por Extrusão de Material (FDM; FDMet; FDC)
Jato de material	Gotículas de material são depositadas seletivamente	Modelação por Jato Múltiplo (MJM)
Laminação de folhas	Folhas de material são ligadas para formar um objeto	Fabricação de Objetos por Camadas (LOM)
Fotopolimerização em tina	Um fotopolímero líquido colocado numa tina é seletivamente polimerizado através de ativação por luz	Estereolitografia (SL)
Fusão em camadas de pó	Energia térmica funde seletivamente regiões de um leito ou também designada cama de pó	Fusão Seletiva a Laser (SLM) Fusão por Feixe de Eletrões (EBM) Sinterização Seletiva a Laser (SLS)

As tecnologias mencionadas na Tabela 2, apresentam etapas básicas e essenciais ao processo, abordadas em 3.1, nomeadamente:

- 1º Gerar o modelo 3D em CAD;
- 2º Converter o modelo CAD para formato STL;
- 3º Fatiar o ficheiro STL em camadas finas;
- 4º Construir o modelo camada a camada, recorrendo a equipamentos de fabrico aditivo;
- 5º Limpar o modelo.

2.3. Funcionamento genérico de máquinas de SLS

Um equipamento de SLS é constituído por 4 sistemas fundamentais, nomeadamente: laser, alimentação de pó, aquecimento e de controlo, Figura 2 e tem uma aparência semelhante ao da Figura 3.

O Sistema de laser é constituído pelo sistema ótico que está encarregue pela orientação do feixe do laser, e pelo laser. O sistema de alimentação de pó engloba os elevadores, a plataforma de alimentação e a plataforma de construção. O sistema de aquecimento é formado pelo sistema de controlo de temperatura que inclui medidores e aquecedores. O Sistema de controlo é o que controla os movimentos dos motores e a libertação de energia do laser e dos aquecedores. O funcionamento básico de um equipamento SLS comercial segue várias etapas (Leite, 2007).

Primeiro, dá-se o processamento do arquivo que contém as informações do objeto a ser construído e procede-se ao aquecimento da câmara de construção. Posto isto, reúnem-se as condições para a deposição da primeira camada de pó. Assim, o sistema laser sinteriza a primeira camada de pó e a plataforma desloca-se a uma distância relativa a espessura de uma camada. Como se pode verificar na Figura 2, a câmara de construção é alimentada pela câmara de alimentação que é onde está armazenada a matéria prima. O rolo avança e arrasta a matéria-prima da câmara de alimentação por todo o seu percurso. Sempre que o rolo finda o seu percurso as camaras de alimentação sobem, para que haja

contínua alimentação do sistema, enquanto que a câmara de construção desce, por necessitar de espaço para que a peça possa ser construída. A peça apenas é sinterizada com o auxílio do sistema ótico onde o feixe de laser é projetado contra a plataforma de construção, sinterizando ou fundindo o material de acordo com a geometria da camada gerada na etapa de fatiamento do STL. A área não atingida pelo laser continua em pó, formando uma cama de pó que funciona como suporte à construção da peça. As subidas e descidas das câmaras são efetuadas pelos êmbolos. Além disso, nas laterais existem uns depósitos ou reservatórios para onde alguma da matéria prima arrastada pelo rolo cai e que posteriormente pode voltar a ser usada.

Quando a peça fica pronta, dá-se o arrefecimento do equipamento e do objeto, posteriormente é subida a plataforma para que o objeto possa ser retirado, depois o objeto é limpo de forma a ser retirado o material que não foi. Se se pretender fazer nova construção o sistema deve ser preparado previamente para construir um novo objeto e as etapas mencionada anteriormente repetir-se-ão (Klein *et al.*, 2005).

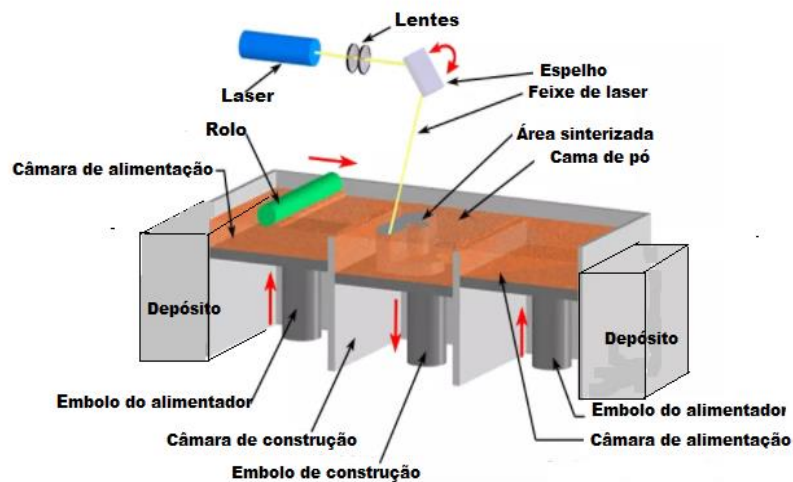


Figura 2 - Constituição interna genérica de uma máquina de SLS (Graça, 2012).

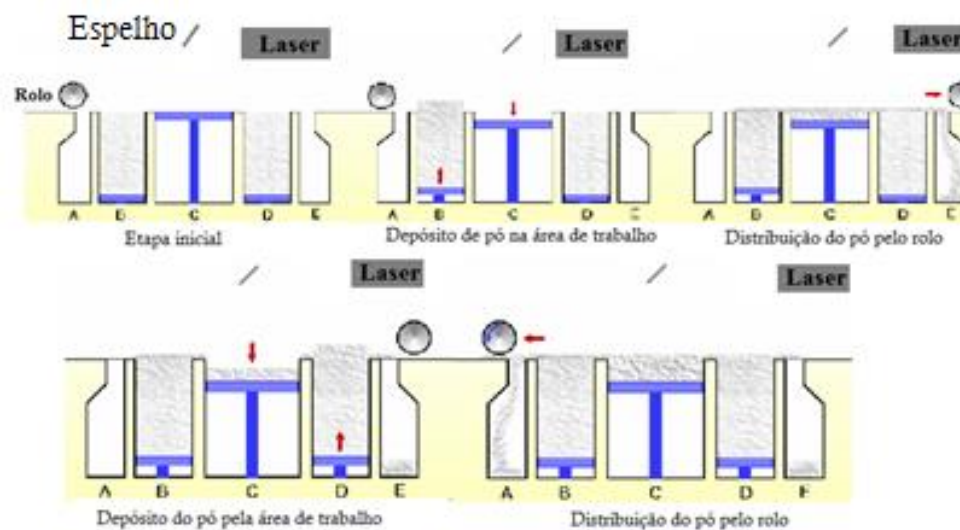
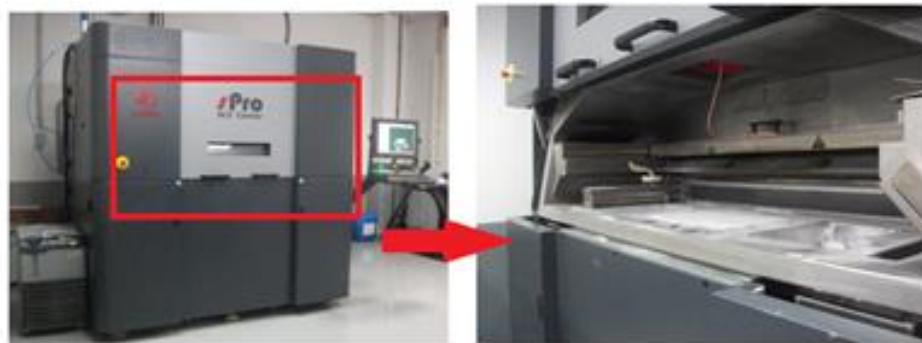


Figura 3 - Aparência externa do equipamento de SLS e respetivo funcionamento. A-Depósito direito; B-Sistema de alimentação de pó direito; C-Área de trabalho/ Câmara de construção; D-Sistema de alimentação de pó esquerdo; E-Depósito esquerdo, (Klein *et al.*, 2005).

Existem vários tipos de laser utilizados neste processo, consoante o material necessite maior ou menos quantidade de energia para fusão do material. No processo de SLS é vantajoso que o pó colocado na plataforma de construção seja mantido a uma temperatura elevada, imediatamente abaixo do ponto de fusão (ou da temperatura de transição vítrea do pó, se o material for polimérico). Geralmente, a plataforma é aquecida por infravermelhos de modo a manter a temperatura elevada em torno da peça que está a ser produzida, bem como a zona de alimentação do pó para o pré- aquecer antes de ser espalhado sobre a área de construção. Em alguns casos, a plataforma de construção também é aquecida com resistências em seu redor. Diferentes pontos de fusão exigem diferentes tipos de laser. Os principais tipos de laser utilizados no processo são:

- Laser do tipo CO₂ com comprimento de onda na faixa de 10,6 μm , para materiais que requerem uma menor quantidade de energia, como, polímeros e materiais orgânicos em geral;
- Laser do tipo Nd:YAG com comprimento de onda na faixa de 1,06 μm , normalmente utilizado para metais e cerâmicas. Entretanto, essas designações são sugestões e não uma regra geral.

A velocidade de deslocamento do laser influencia na sinterização conjuntamente com a potência do laser. O uso de uma velocidade reduzida pode causar um excessivo aquecimento do pó, devido ao fornecimento de uma maior quantidade de energia ao material, o que acarretaria problemas na peça tais como: empenos, aumento da densidade e até degradação do material. Segundo Kulman, o uso de uma velocidade alta possivelmente impossibilitará a sinterização e, conseqüentemente, a aderência do pó à camada inferior. O espaçamento entre cada passada do feixe de laser é outro parâmetro que afeta a sinterização do material, onde a correta sobreposição das passadas auxilia na fusão do material proporcionando uma união homogênea, Figura 4 (Kulman, 2006).

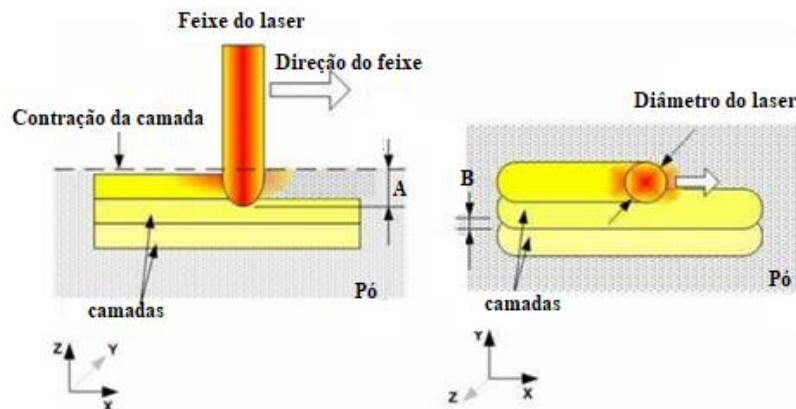


Figura 4 - Influência dos principais parâmetros de construção via SLS, à direita vista de frente; à esquerda vista de topo. A- Penetração do laser; B-Sobreposição de camadas (Kulman, 2006).

2.4. Trajetórias de construção

Um aspecto importante para o desenvolvimento deste trabalho, mesmo que não seja um dos objetivos de estudo, está relacionado com a forma de como é colocada a peça na câmara de construção, pois estratégia irá influenciar a peça a ser construída. Esta estratégia, assenta na forma com que o varrimento do laser incide na superfície do pó para o sinterizar, uma vez que é possível proporcionar diferentes taxas de transferência de calor ao material consoante as diferentes trajetórias, fazendo com que a sobreposição entre camadas e a profundidade das mesmas tenham variações. Estas variações têm

influência nas propriedades mecânicas as peças, assim como podem alterar a forma final da peça devido ao acabamento superficial com que fica (Volpato, Foggiatto e Radigonda, 2011).

2.4.1. Efeito Zigue-Zague e Efeito Zague

As diferenças em termos da energia recebida e intervalo de incidência, entre dois tipos de trajetória são descritas como efeito Zigue-Zague e efeito Zague, como representado na Figura 5.

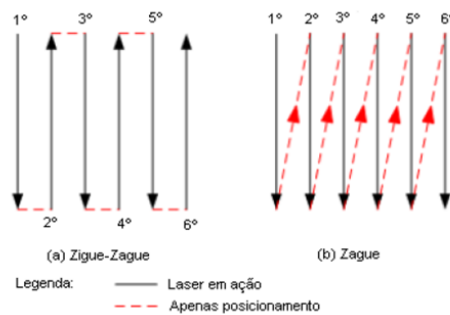


Figura 5 - Efeito Zigue-zague e Efeito Zague (Volpato, Foggiatto e Radigonda, 2011).

Quando a trajetória utilizada é a zigue-zague, a incidência tem início numa extremidade da peça e quando chega a outra, dá-se o início de outra nova trajetória, de volta, a partir do mesmo local. Assim, as duas extremidades recebem calor mais constantemente, sem tempo para um eventual arrefecimento da região. Isso pode modificar a microestrutura local devido a efeitos cinéticos. Ainda, podem ocorrer diferentes comportamentos em relação à retração das peças, ou seja, são determinantes no controle de problemas de processo como o empenamento (Volpato, Foggiatto e Radigonda, 2011).

Com a trajetória zague, o feixe laser começa a atuar sempre no mesmo lado da peça e percorre a mesma direção, assim, até que o local em que se iniciou o varrimento receba novamente a radiação, tem-se o período de tempo que o feixe percorre o restante da peça. Neste período de tempo o local citado pode perder calor e o material adjacente já poderá ter dado início ao processo de solidificação (Volpato, Foggiatto e Radigonda, 2011).

A trajetória de deslocamento do feixe determina também diferentes características e tempos de permanência sobre o material. Neste sentido, o efeito zigue -zague apresenta menor tempo em que o laser permanece desligado para deslocamento, já que no fim de uma passada, a outra é iniciada logo

de seguida, mas no sentido contrário. Estes períodos de tempo em que ocorre reposicionamento do feixe podem ser denominados como “tempos mortos” (Volpato, Foggiatto e Radigonda, 2011).

O controlo da atmosfera gasosa na qual o material polimérico é mantido durante o processamento também influencia, sendo uma importante variável de processo. A manutenção do polímero a uma temperatura relativamente elevada (próxima da sua temperatura de fusão) torna mais provável a ocorrência de reações entre a superfície do material e o ambiente. Neste sentido, as máquinas de SLS comerciais operam com um fluxo de gás inerte no interior da câmara, para que haja manutenção da integridade da cadeia polimérica e, conseqüentemente, das propriedades mecânicas finais da peça. A maior parte dos equipamentos opera com atmosfera de azoto. Porém, podem ser utilizados outros gases como: árgon ou mistura entre este e azoto (Volpato, Foggiatto e Radigonda, 2011).

2.4.2. Efeito Escada

A espessura de camada de material depositado sobre a plataforma é outro fator muito importante para controlar tanto as propriedades mecânicas finais da peça, como as relacionadas com as características de acabamento superficial e resolução de detalhes. Assim, a espessura de camada é um dos fatores de maior influência sobre a qualidade da peça, dado que as camadas espessas diminuem a capacidade de resolução de geometrias complexas, ou seja, é obtida uma peça com mau acabamento superficial. Na Figura 6, constata-se que a diminuição na espessura das camadas irá reproduzir melhor o modelo 3D CAD gerado. Resumindo, o efeito de escada, corresponde às irregularidades apresentadas na peça construída, que tiveram origem na adição de espessura de cada camada (Lino e Neto, 2019), (Taufik e Jain, 2014) e (Volpato, Foggiatto e Radigonda, 2011).

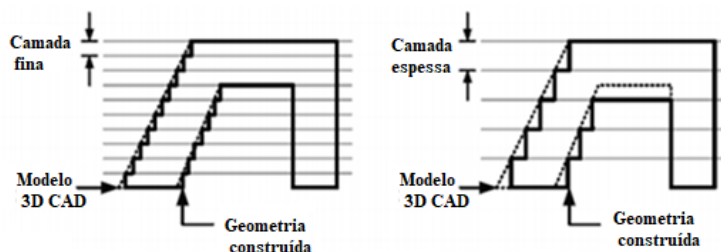


Figura 6 - Efeito escada (Volpato, Foggiatto e Radigonda, 2011).

Tendo em conta a breve abordagem do efeito escada, o ideal seria conciliar a espessura de camadas, fina e espessa, existindo por isso a possibilidade de dois tipos de fatiamento, o uniforme e o adaptativo. O método uniforme ou convencional consiste na obtenção de camadas de espessuras constantes ao

longo do eixo Z de construção (Figura 7a). No fatiamento adaptativo a espessura das camadas varia de acordo com a geometria da região da peça para que o desvio em relação à geometria CAD seja minimizado (Figura 7b) (Volpato, Foggiatto e Radigonda, 2011).

Destacam-se três vantagens do fatiamento adaptativo em relação ao uniforme (Volpato, Foggiatto e Radigonda, 2011):

- 1) a melhoria da qualidade do acabamento superficial do protótipo, em função da diminuição do efeito escada (Figura 7b);
- 2) a redução do tempo de construção do protótipo, pois em regiões onde não se verifica o efeito escada é possível utilizar camadas mais espessas, diminuindo assim, o número de camadas necessárias à fabricação;
- 3) a melhoria da precisão geométrica e dimensional do protótipo devido à amenização do efeito escada e da análise dos picos e vales.

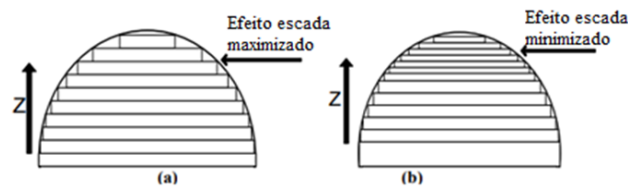


Figura 7 - Representação esquemática do fatiamento uniforme (a) e adaptativo (b) (Volpato, Foggiatto e Radigonda, 2011).

Existe ainda um método alternativo de fabricação utilizando o fatiamento adaptativo, que permite reduzir o tempo de produção, mantendo-se a qualidade superficial da peça, onde o modelo geométrico é dividido em duas partes. A primeira parte é interna, onde a altura máxima de camada permitida pelo equipamento é aplicada Figura 8B segunda parte é externa, onde se aplica um refinamento das camadas, aplicando-se espessuras que são subdivisões da altura interna Figura 8A (Volpato, Foggiatto e Radigonda, 2011).

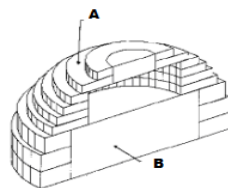


Figura 8 - Fabricação um exterior refinado(A) com interior rápido(B) (Volpato, Foggiatto e Radigonda, 2011).

2.5. Materiais utilizados em SLS

É possível construir objetos em SLS com diferentes materiais, como por exemplo os materiais poliméricos e metálicos. Relativamente aos fornecedores estes podem ser a *Electro-Optical Systems* (EOS), ou 3D Systems, sedeadas na Carolina do Sul, EUA e Alemanha respetivamente. As empresas têm distribuidores, colaboradores e parceiros em todo o mundo, o que lhes permite um contacto direto com os clientes, uma vez que fornecem *know-how* técnico, suporte e ofertas de serviços. Perante estes dois fornecedores existe uma variedade de máquinas e produtos comercializados cujo objetivo de funcionamento é o mesmo, por essa razão existem materiais compatíveis entre estes dois fabricantes e fornecedores, como mostram as tabelas seguintes, Tabela 3 e Tabela 4 (Giordano, Caio; Zancul, 2016).

Tabela 3 - Materiais compatíveis com equipamentos de sinterização seletiva a laser (SLS) da 3D Systems (Giordano, Caio; Zancul, 2016).

Material	Aplicações
DuraForm® GF plastic	<p>Poliamida com fibras de vidro resistente para aplicações funcionais.</p> <p>Protótipos funcionais.</p> <p>Pequenos e médios lotes de produtos.</p> <p>Peças que necessitam de dureza e resistência térmica.</p>
DuraForm® PA plastic	<p>Poliamida com longa durabilidade.</p> <p>Tubos de paredes finas.</p> <p>Painel de veículos, protótipos funcionais, entre outros.</p>
DuraForm® EX plastic	<p>Plásticos com alta dureza e resistência a impactos, semelhante à de plásticos de injeção.</p> <p>Ideal para produção em grandes quantidades de produtos.</p>
DuraForm® Flex plastic	<p>Termoplástico elastómero flexível com boa resistência a rasgos.</p>
DuraForm® AF plastic	<p>Poliamida com aparência metálica.</p> <p>Apresenta dureza mecânica e bom acabamento superficial.</p>
Continua	

Tabela 3 - Materiais compatíveis com equipamentos de sinterização seletiva a laser (SLS) da 3D Systems (Giordano, Caio; Zancul, 2016).(Continuação)

LaserForm™ A6 metal	Ideal para fabricação final de produtos e para ferramentas de trabalho.
LaserForm™ ST-200 e LaserForm™ ST-100	Composto de aço inoxidável para produção de produtos finais ou moldes de injeção duráveis e resistentes.
CastForm™	Material à base de poliestireno para produção de moldes de fundição.

Tabela 4 - Materiais compatíveis com equipamentos de sinterização seletiva a laser (SLS) da EOS (Paggi, 2008).

Material	Aplicações
Aço Inoxidável 15-5 (PH1) Aço inoxidável 17-4 (GP1)	Peças que exijam elevada tenacidade, ductilidade e resistência à corrosão. Protótipos funcionais. Produtos de pequenas séries. Produtos individualizados ou peças suplentes.
Liga Cobalto Cromo (MP1)	Protótipos, implantes médicos, peças que requerem altas propriedades mecânicas a temperaturas elevadas e com boa resistência à corrosão. Peças com paredes finas que necessitam de resistência e/ou rigidez. Produção em série de peças, aplicações em turbinas e motores e aplicações médicas.
Liga Níquel IN718	Peças de turbinas aéreas e terrestres, componentes de aplicação em foguetes e na indústria aeroespacial, poço de petróleo, petróleo e peças da indústria de gás natural.
Continua	

Tabela 4 - Materiais compatíveis com equipamentos de sinterização seletiva a laser (SLS) da EOS (Paggi, 2008)
(Continuação)

Liga TitaniumTi-64	<p>Protótipos funcionais, produtos de pequenas séries, produtos individualizados ou peças sobressalentes.</p> <p>Peças que exigem uma combinação de elevadas propriedades mecânicas e baixo peso específico.</p> <p>Implantes biomédicos.</p>
Liga Alumínio AlSi10Mg	<p>Protótipos funcionais, produtos de pequenas séries, produtos individualizados ou peças sobressalentes.</p> <p>Peças que exigem uma combinação de boas propriedades térmicas e baixo peso.</p>
PA 2200	Poliamida com boa resistência mecânica e térmica.
PA 3200 GF	Poliamida com fibras de vidro.

Além da compatibilidade existente, há também algumas propriedades, Tabela 5, que se encontram disponíveis nos manuais de cada fornecedor.

Tabela 5 - Propriedades da PA-12 utilizada em sistemas de SLS pelos dois fabricantes (Silva, 2009).

Propriedades	3D Systems	EOS
Resistência à tracção [MPa]	44	45
Módulo de Young [MPa]	1586	1650
Alongamento de ruptura [%]	9	20
Temperatura de fusão Tm [°C]	184	172-180

2.6. Caracterização mecânica de materiais processados e utilizados em SLS

Durante os últimos anos o processo de SLS tem apresentado destaque em diversas áreas, deste a aeroespacial à medicina, mostrando uma grande diversidade de materiais e aplicações. Por essa razão torna-se fulcral o estudo deste processo de forma a que haja a otimização a nível de redução de custos e o tempo que os produtos demoram a chegar ao mercado, mas também para os custos ambientais, enquanto reduz o gasto de energia elétrica e o consumo de material. Por essa razão têm sido investigados três aspetos considerados fundamentais para que seja possível obter as otimizações

referidas anteriormente, como é o caso da otimização da direção de construção, a otimização da configuração dos parâmetros e a implementação de algoritmos para o CAD para melhorar a eficiência da fabricação por camadas (Martins, 2016).

Mchugh e Lohfeld fizeram um estudo sobre a influência da densidade de energia sobre as propriedades físicas e propriedades mecânicas das peças produzidas com poliamida, analisando também o efeito de parte orientação durante a construção. Defendendo também que o conhecimento da influência desses parâmetros permite estabelecer linhas de tendência que vinculam as configurações de construção às propriedades resultantes da peça, desta são construídas geometrias personalizadas e com os parâmetros pretendidos (Mchugh e Lohfeld, 2007).

Bourell *et al.*, estudaram as limitações de desempenho na sinterização a laser de polímeros. Verificaram que as propriedades mecânicas das geometrias construídas por SLS são muitas vezes inconsistentes em comparação com geometrias obtidas por moldação. Esta inconsistência deve-se às propriedades mecânicas e anisotrópicas, com a ductilidade sendo fortemente afetada que resultam em defeitos microestruturais. Esses defeitos derivam de variações de temperatura da câmara de construção que quando combinadas com partículas de pó de matéria-prima irregulares podem resultar em fusão incompleta, porosidade e descarocamento de partículas (Bourell *et al.*, 2014).

Paggi, fez um estudo sobre SLS em compósitos com gradiente funcional entre poliamida 12 e nanotubos de carbono com o intuito de melhorar a sua interação com a matriz. Para a obtenção das propriedades mecânicas otimizadas foram estudadas etapas de tratamento de superfície dos nanotubos, com o objetivo. As análises microestruturais e das propriedades mecânicas foram obtidas por ensaios dinâmico-mecânicos e microscópio eletrônico de varrimento (Paggi, 2008)

Kruth *et al.*, fizeram um estudo sobre as limitações dos processos de SLS/SLM e quais as possíveis aplicações de fabricação desses processos. Para isso recorreram a cinco máquinas SLS/SLM que se diferenciavam no mecanismo do processo, material em pó e parâmetros ideais do processo. Consideraram como condições importantes à fabricação a precisão, o material, as propriedades mecânicas, a velocidade e a confiabilidade. Os ensaios mecânicos executados para verificar as peças foram a densidade, a dureza, resistência e rigidez, permitindo concluir que SLS/SLM tem capacidade para produzir peças com boas propriedades mecânicas (Kruth *et al.*, 2005).

Leite, estudou as possibilidades de aplicação de blendas (misturas poliméricas) com gradiente de composição fabricados por SLS. Para este estudo foram produzidos provetes e peças com gradiente funcional de poliamida 12 e polietileno de alta densidade (PA12/PEAD), poliamida 6 e poliamida 12 (PA6/PA12) e polimetilmetacrilato e poliestireno (PMMA/PS). Os provetes foram caracterizados através de análises de espectroscopia de infravermelho, MEV, DSC, DRX, índice de fluidez e DMA. Também foi constatado que o processamento dos materiais poliméricos e das blendas por SLS é dependente de alguns fatores: de características do material como a forma e o tamanho das partículas e da absorção da energia do laser pelo material (Leite, 2007).

Taufik e. Jain fizeram um estudo sobre as várias estratégias desenvolvidas para decidir a orientação ideal para a construção de peças com base em diferentes critérios. A escolha adequada do critério pode melhorar a qualidade da peça em termos de precisão e acabamento da superfície. Pode também reduzir o volume de material utilizado como suporte e o tempo de construção. Estes fatores afetam a resistência e o custo da peça (Taufik e Jain, 2014).

De forma a aumentar o conhecimento em relação à caracterização mecânica do material processado pela tecnologia de SLS, o trabalho de investigação focará a influência no comportamento mecânico da orientação de construção, por recurso a ensaios de tração, ensaio relaxação de tensão, ensaio de DMA, ensaio de impacto-tração ou longitudinal, ensaio de impacto-queda livre e ensaio de dureza.

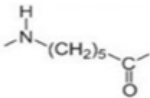
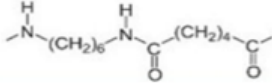
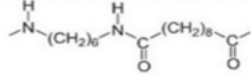
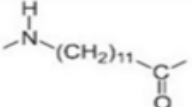
3. Materiais e Métodos

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos utilizados para que seja possível a realização da parte experimental, começando por referenciar o SLS e materiais possíveis de utilizar neste processo e como é obtida a matéria-prima. Num outro subcapítulo serão abordadas as metodologias utilizadas para cada um dos ensaios decorridos, bem como gráficos que demonstram as curvas típicas de cada ensaio em material polimérico, sempre que possível.

3.1. Materiais- Poliamida

A poliamida, PA 2200 (tem como base a PA12) foi o material utilizado para a tecnologia de fabrico aditivo em estudo. Este material é um polímero sintético contendo o grupo amida. A ligação amida é formada a partir da reação de condensação entre um grupo amina e um grupo carboxílico ou um grupo de cloreto de acilo. Os números na designação das poliamidas dizem respeito ao número de átomos de carbono dos monómeros de partida, como por exemplo PA6 ou PA12, representado na Tabela 6 (Paggi, 2008) e (Giordano, Caio; Zancul, 2016).

Tabela 6 - Representações estruturais das cadeias de diferentes tipos de poliamidas (Paggi, 2008) e (Giordano, Caio; Zancul, 2016).

Poliamida	Número de Carbonos (C)	Monómero
PA 6	6	
PA 6,6	6+6	
PA 6,10	6+10	
PA 12	12	

A Tabela 7, que se segue apresenta propriedades mecânicas gerais da PA 12 do fornecedor EOS, apresentadas no manual da matéria-prima utilizada para a construção dos provetes.

Tabela 7 - Parâmetros da EOS (EOS GmbH - Electro Optical Systems, 2010).

Mechanical properties	Value	Unit	Test Standard
Izod Impact notched (23°C)	4.4	kJ/m ²	ISO 180/1A
Shore D hardness (15s)	75	-	ISO 868

3D Data	Value	Unit	Test Standard
<small>The properties of parts manufactured using additive manufacturing technology (e.g. laser sintering, stereolithography, Fused Deposition Modelling, 3D printing) are, due to their layer-by-layer production, to some extent direction dependent. This has to be considered when designing the part and defining the build orientation.</small>			
Tensile Modulus (X Direction)	1650	MPa	ISO 527-1/-2
Tensile Modulus (Y Direction)	1650	MPa	ISO 527-1/-2
Tensile Modulus (Z Direction)	1650	MPa	ISO 527-1/-2
Tensile Strength (X Direction)	48	MPa	ISO 527-1/-2
Tensile Strength (Y Direction)	48	MPa	ISO 527-1/-2
Tensile Strength (Z Direction)	42	MPa	ISO 527-1/-2
Strain at break (X Direction)	18	%	ISO 527-1/-2
Strain at break (Y Direction)	18	%	ISO 527-1/-2
Strain at break (Z Direction)	4	%	ISO 527-1/-2
Charpy impact strength (+23°C, X Direction)	53	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy notched impact strength (+23°C, X Direction)	4.8	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Flexural Modulus (23°C, X Direction)	1500	MPa	ISO 178

Thermal properties	Value	Unit	Test Standard
Melting temperature (20°C/min)	176	°C	ISO 11357-1/-3
Vicat softening temperature (50°C/h 50N)	163	°C	ISO 306

Other properties	Value	Unit	Test Standard
Density (laser sintered)	930	kg/m ³	EOS Method
Powder colour (ac. to safety data sheet)	White	-	-

A PA12 tem a aparência de um pó branco, como representado na Figura 9 e referido na tabela anterior. O seu uso é adequado a peças com diferentes geometrias dimensões e requisitos, além disso é caracterizada pela EOS, da seguinte forma:

- Apresenta elevada resistência e rigidez;
- Boa resistência química;
- Alta seletividade e resolução de detalhes;
- Biocompatível do acordo com EN ISO 10993-1 e USP / nível VI / 121 ° C;
- Ductilidade funcional a temperaturas baixas;
- Resistência ao envelhecimento a temperaturas elevadas ao longo do tempo;
- Boa resistência ao impacto;
- Baixo coeficiente de atrito.

A poliamida pode ser aplicada em diversas áreas, nomeadamente:

- Em aplicações médicas, como por exemplo em próteses;
- Peças de plástico totalmente funcionais de alta qualidade;
- Substitutos plásticos de moldagem por injeção.

A PA utilizada neste estudo foi a poliamida, PA 2200 referência do fabricante, também denominada como referido anteriormente de PA12.



Figura 9 - Poliamida em pó.

3.2. Métodos

Este capítulo faz referência aos ensaios utilizados para o estudo mecânico e térmicos dos componentes produzidos em SLS, informando em que consiste cada ensaio e que dados importantes é possível obter.

Os ensaios mecânicos visam analisar/avaliar/estudar o comportamento mecânico dos materiais, uma vez que cada material possui características diferentes, como por exemplo elasticidade, dureza, resistência, condução térmica/de calor. Cada material possui características físicas, químicas, mecânicas, térmicas, temperatura de fusão característicos de cada família de materiais.

Como referido anteriormente as propriedades dos materiais são analisadas através de ensaios mecânicos, podendo ser classificados quanto à integridade geométrica e dimensional da peça ou componente ou quanto à velocidade de aplicação da carga (Teofilo, 2013).

Quanto à integridade geométrica e dimensional da peça ou componente os ensaios podem ser de dois tipos:

- Destrutivos: quando executados provocam a inutilização parcial ou total das peças (tração, dureza, fadiga etc.);
- Não-destrutivos: quando executados não comprometem a integridade da peça (raios X, ultrassom etc.).

Quanto à velocidade de aplicação da carga, os ensaios podem ser:

- Estáticos: quando a carga é aplicada de maneira suficientemente lenta, induzindo a uma sucessão de estados de equilíbrio, caracterizando um processo quase-estático. Nessa categoria têm-se os ensaios tração, compressão, flexão, torção e dureza.
- Dinâmicos: quando a carga é aplicada rapidamente ou ciclicamente. Nesse têm-se os ensaios de fadiga e de impacto/choque.
- Carga constante: quando a carga é aplicada durante um longo período, que é o caso do ensaio de fluência.

Tal como referido anteriormente, um dos objetivos deste estudo é analisar se existe variação comportamental dos provetes (quando submetidos a diferentes ensaios mecânicos) consoante a orientação de construção, para isso foram escolhidas quatro orientações diferentes (ver Figura 10):

- -Na horizontal, segundo o eixo X, orientação nº1;
- -Na horizontal, segundo o eixo Y, orientação nº2;
- -Na vertical, segundo o eixo Z, orientação nº3;
- -Na horizontal segundo o eixo Z, orientação nº4.

A palavra orientação e a correspondente numeração são uma implicação de nome, desta forma sabe-se que por exemplo escrever, orientação 1 ou orientação nº 1 equivale a ter um provete construído na horizontal, segundo o eixo X.

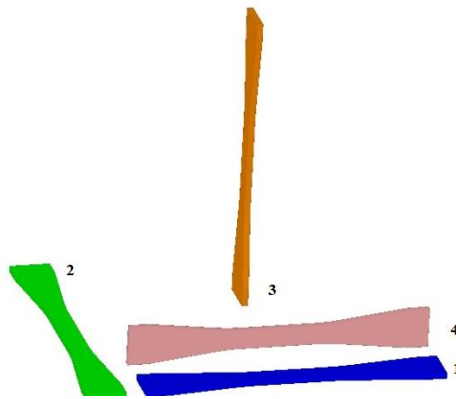


Figura 10 - Representação esquemática da orientação de construção dos provetes 1- Na horizontal, segundo o eixo X; 2- Na horizontal, segundo o eixo Y; 3- Na vertical, segundo o eixo Z; 4- Na horizontal segundo o eixo Z.

Para cada ensaio foi necessário recorrer a provetes de diferentes dimensões. Nos ensaios de tração, fluência-relaxação de tensão e dureza foram utilizados o mesmo tipo de provetes as dimensões do provete tiveram como base a norma ASTM D638, Figura 11. Para o ensaio de impacto longitudinal os provetes regeram-se pela norma ISO 8256 A.

Foram realizados 6 ensaios mecânicos diferentes no total, com provetes construídos em 4 orientações diferentes. Para cada ensaio mecânico houve no mínimo 5 testes para cada orientação diferente. No total foram construídos 64 provetes e realizados 172 testes.

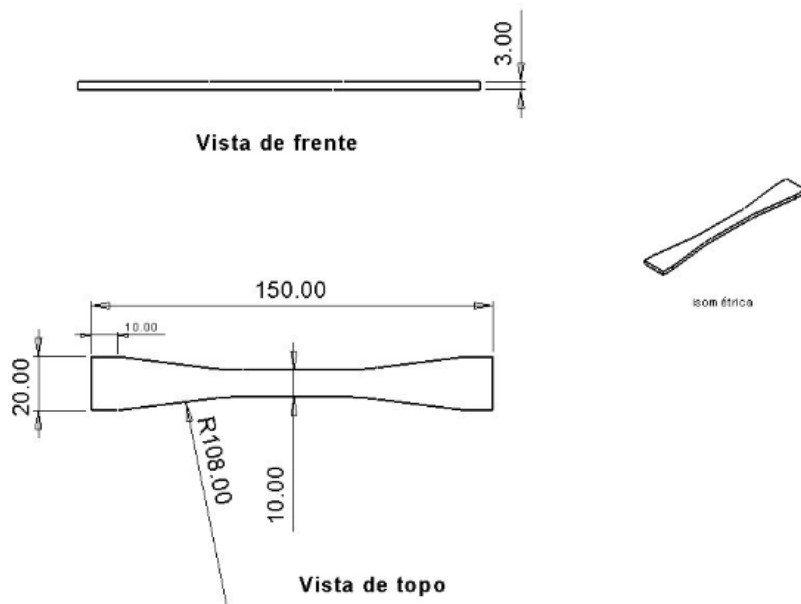


Figura 11 - 2D do provete com as respectivas dimensões.

Para que seja possível fazer qualquer tipo de construção por fabrico aditivo, é necessário percorrer uma série de etapas, quer seja pré ou pós processamento da matéria-prima, Figura 12, no laboratório de fabrico aditivo.

Para começar a impressão da peça pretendida é necessário preparar a matéria-prima, geralmente reutilizada, adicionando nova matéria-prima consoante o acabamento que se pretende. Para um melhor acabamento adiciona-se maior quantidade de poliamida em pó não utilizada anteriormente.

Essa junção é feita numa betoneira, deixando misturar durante cerca de 15 a 20 minutos. De seguida é necessário passar toda a matéria-prima por uma peneira elétrica, para que as impurezas sejam retidas, ficando o pretendido dentro de um balde que depois é transportado para as câmaras de alimentação. Estas câmaras são cheias, ou não, dependendo da quantidade de matéria prima-necessária para a construção da peça. Dado que o material utilizado é em pó, é preciso aspirar os resíduos que ficam em cima da máquina, de forma a manter sempre tudo limpo e cuidado para não haver influencias externas.

Através do *software* da máquina de SLS, dá-se ordem para que seja iniciada a construção da peça, após terem sido convenientemente dispostas no volume disponível para tal. Deve manter-se sempre a sala a uma temperatura rondando os 22/23°C conseguida através do ar condicionado, para evitar o sobreaquecimento da máquina de SLS, ligando o termostato *Chiller* que está diretamente ligado

à máquina. A peça fica a ser construída demorando algumas horas, dependendo da complexidade e geometria da peça. No entanto, não é a complexidade que limita o tempo de produção, mas sim o volume/dimensão da peça, ou seja, a complexidade tem menor influência do que a dimensão. Quando acaba a construção é necessário deixar arrefecer ainda dentro da máquina e, posteriormente, é que é retirada, para isso é preciso comandar a máquina para tal, mas antes tem que ser colocado o acrílico no local indicado. Após a extração da peça, é colocada a base, e aí é transportada para a bancada de trabalho, onde é removida a base e posteriormente o acrílico dependendo do caso. Se forem peças frágeis é mantido o acrílico, uma vez que limita o movimento da matéria-prima, e é necessário pincelar a poliamida retirando as peças uma a uma. Caso as peças sejam mais resistentes/robustas, pode ser retirado o acrílico e as peças são retiradas da poliamida. Feito isto as peças são limpas com um pincel uma a uma para extrair o excesso de poliamida, que mesmo assim deixa os seus resíduos. Para eliminar completamente esses resíduos as peças são grenalhadas (um jato de ar que contem areia).

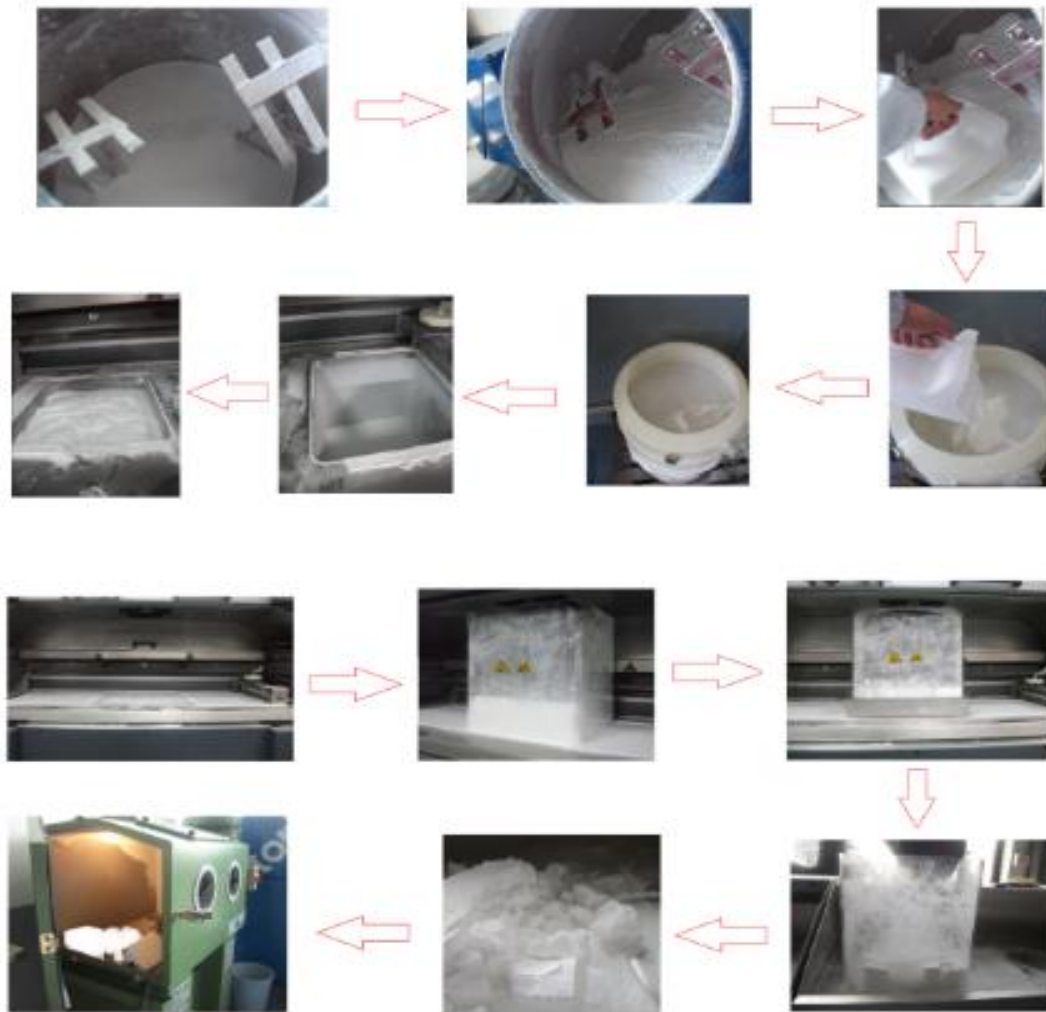


Figura 12 - Etapas de preparação pré e pós processamento da matéria-prima.

Os provetes utilizados para os ensaios mecânicos, foram construídos no laboratório de fabrico aditivo, percorrendo as etapas acima identificadas. A sua posição de construção foi ao centro da câmara de construção, de forma a que não houvesse alteração a nível da temperatura. A trajetória de construção aplicada foi a de efeito zigue-zague, passando da direita para a esquerda e da esquerda para a direita. A espessura de camada durante o processo foi de 0,08 mm. O tempo de construção foi de aproximadamente 960 minutos.

3.2.1. Ensaio de Tração

O ensaio de tração é caracterizado por fazer a tração a um provete até este entrar em rotura, uma vez que o corpo vai alongando, devido ao deslocamento que sofre por lhe ser aplicada uma força crescente a uma velocidade constante, 5mm/min no caso em estudo. É um ensaio de fácil reprodução. As deformações provocadas ao material aquando do ensaio são uniformemente distribuídas até se atingir a força máxima, que é a que vai provocar a rotura do material. Durante este ensaio o *software* da máquina de tração vai recolhendo valores que dizem respeito à força e alongamento sofridos pelo comprimento do provete.

Este ensaio permite determinar o módulo de elasticidade também denominado de módulo de Young (que é uma propriedade mecânica intrínseca do material), uma vez que existe uma relação entre tensão e deformação.

A tensão nominal é a tensão média no provete de tração que se obtém dividindo a carga (força aplicada a cada momento) pela área inicial da secção do provete. Designando a tensão nominal por σ vem a seguinte fórmula:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (1)$$

em que P é a carga e A_0 é a área de secção transversal inicial.

A extensão ε utilizada na curva tensão nominal-extensão nominal é a extensão linear média que se obtém dividindo o aumento de comprimento pelo comprimento de deformação l_0 . Assim, temos a fórmula:

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l} \quad (2)$$

Onde l é o comprimento.

Os parâmetros que descrevem a curva tensão-deformação são:

- Módulo de Young, E;
- Tensão de cedência (ponto de cedência), σ_c ;
- Tensão de rotura, tensão máxima ou resistência à tracção, σ_r ;

- Alongamento percentual até à fractura, ε_f
- Percentagem de redução de área, q .

O módulo de elasticidade está relacionado com a força de ligação entre os átomos do material do provete. A lei de Hooke relaciona a tensão e a extensão e é dada por:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3)$$

Ou seja, os ensaios irão permitir que se possa comparar as propriedades dos provetes que, apesar de serem do mesmo material, as camadas foram construídas de diferentes formas.

O Figura 13 representa um exemplo de curva tensão vs deformação em materiais poliméricos.

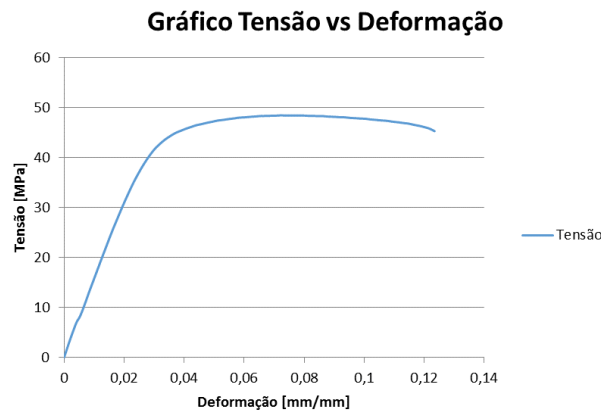


Figura 13 - Tensão vs Deformação em materiais poliméricos.

3.2.2. Ensaio fluência e ensaio de relaxação de tensões

O ensaio de fluência é um ensaio mecânico que visa analisar a deformação plástica que ocorre de forma gradual ao longo de um determinado período de tempo quando um corpo é submetido a uma carga/tensão e temperatura constantes. Em materiais poliméricos, altas deformações de fluência podem ocorrer acima da temperatura de transição vítrea (Farina, 2009; Pagnoncelli Lorandi, Odila Hilário Cioffi e Ornaghi Jr., 2016).

A deformação a que o provete é submetido durante ensaio é medida através de um extensómetro mecânico que está no equipamento que permite medir a deformação (ε) em função do tempo(t), Figura

14, onde é obtido uma curva da deformação em função do tempo do ensaio (Farina, 2009; Pagnoncelli Lorandi, Odila Hilário Cioffi e Ornaghi Jr., 2016).

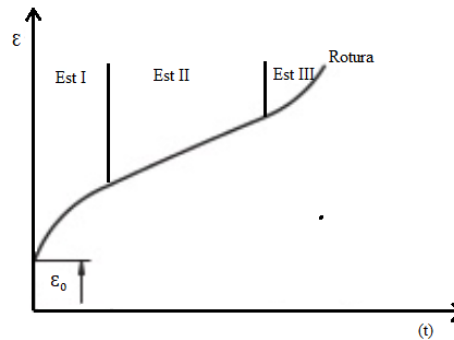


Figura 14 - Curva de deformação em função do tempo no ensaio de fluência (Farina, 2009).

É possível observar na Figura 14, que ϵ_0 , também denominada de deformação inicial, ocorre no instante da aplicação da carga no início do ensaio, onde devido à tensão aplicada suficientemente elevada pode verificar-se desde logo uma deformação plástica (Farina, 2009).

Neste ensaio ocorrem três estágios distintos na curva de fluência:

- Zona de fluência primária, Est I- observa-se uma diminuição de velocidade de fluência com o tempo, isto é, a resistência à fluência aumenta com o tempo;
- Zona de fluência secundária Est II- caracterizada por uma velocidade de fluência constante;
- Zona de fluência terciária, Est III- observa-se o aumento da velocidade de deformação.

O ensaio de relaxação de tensão consiste na redução da tensão aplicada no provete ao longo do tempo, mantendo a deformação constante, desta forma ocorre uma queda de tensão ao qual é mantida a velocidade de deformação para determinado valor (Carvalho, 2015) e (Com *et al.*, 2000).

Neste ensaio os parâmetros definidos foram: l_0 de 97,998 mm, um tempo de 2400 s, e um deslocamento de 2,999 mm até atingir a força máxima.

3.2.3. Ensaio DMA

O ensaio de DMA visa a caracterização das propriedades viscoelásticas de um material, consistindo na aplicação de uma deformação sinusoidal a uma amostra e na medição da força resultante transmitida

por essa última com o auxílio de um Analisador Mecânico Dinâmico (Pagnoncelli Lorandi, Odila Hilário Cioffi e Ornaghi Jr., 2016).

Um Analisador Mecânico Dinâmico é um instrumento bastante polivalente, dado que permite a realização de análises automatizadas aplicando uma excitação dinâmica controlada em frequência e amplitude a uma amostra, dentro das condições definidas pelo operador (Pagnoncelli Lorandi, Odila Hilário Cioffi e Ornaghi Jr., 2016).

O funcionamento deste equipamento consiste na aplicação de uma força (tensão) à amostra. Como a amostra se deforma, a quantidade de deslocamento é medida pelo sensor de posição do Transformador Linear Diferencial Variável, (LVDT). A deformação pode ser calculada a partir do deslocamento. A força (ou tensão) é aplicada de forma senoidal com uma frequência definida (Pagnoncelli Lorandi, Odila Hilário Cioffi e Ornaghi Jr., 2016).

A DMA consiste na aplicação de uma tensão ou deformação mecânica oscilatória, normalmente sinusoidal, de baixa amplitude a um sólido ou líquido viscoso, medindo-se a deformação sofrida por este, ou a tensão resultante. Esta resposta pode dar-se em função da variação da frequência da oscilação ou da temperatura (Pagnoncelli Lorandi, Odila Hilário Cioffi e Ornaghi Jr., 2016).

Os materiais podem ser classificados como elásticos, viscosos e viscoelásticos de acordo com a sua resposta ao estímulo mecânico.

Para um material elástico, a deformação é proporcional à tensão aplicada, tendo um ângulo de atraso (δ) igual a zero, tal como se pode verificar na Figura 15.

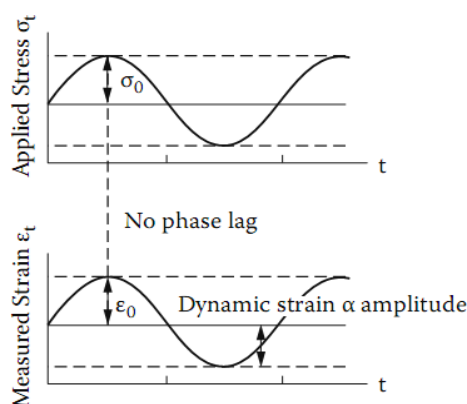


Figura 15 - Comportamento de um material perfeitamente elástico (Braga, 2014).

Para um material viscoso, a deformação e a tensão aplicada apresentam uma relação igual à viscosidade, tendo um ângulo de atraso (δ) com 90° , tal como se pode verificar na Figura 16 (Giordano, Caio; Zancul, 2016) e (Braga, 2014).

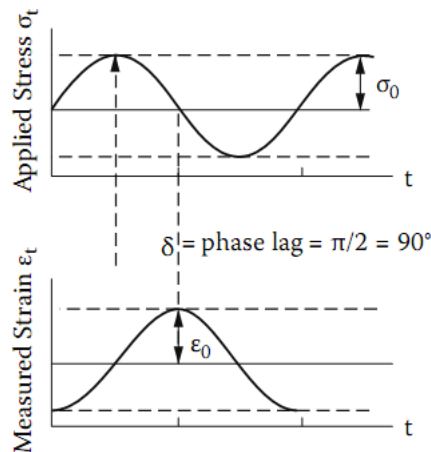


Figura 16 - Comportamento de um material viscoso (Braga, 2014).

Para um material viscoelástico, a deformação e a tensão aplicada descrevem um comportamento intermediário, tendo um o ângulo de atraso (δ) entre 0° e 90° .

Pela observação da Figura 17 verifica-se que com o aumento da temperatura, o material passa de um estado vítreo para um estado elástico, “estado de borracha”. As primeiras transições observadas são chamadas de transição γ e transição β . Após a entrada na transição vítrea, observa-se uma rápida queda nos valores de E' e um pico na curva de E'' e de $\tan \delta$. (Pagnoncelli Lorandi, Odila Hilário Cioffi e Ornaghi Jr., 2016).

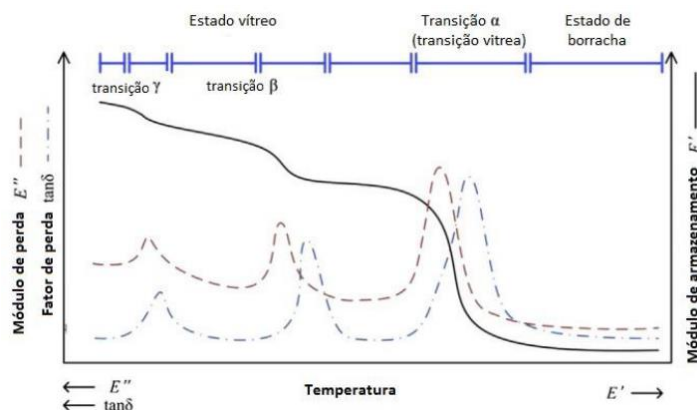


Figura 17 - Curva típica das propriedades dinâmico-mecânicas (E' , E'' e $\tan \delta$) de um polímero em função da temperatura, obtida com os resultados da técnica de DMA (Pagnoncelli Lorandi, Odila Hilário Cioffi e Ornaghi Jr., 2016).

Através da DMA também se pode obter transições termodinâmicas de primeira e segunda ordem, quando se traça o espectro do módulo *versus* temperatura. As transições podem ser de primeira ordem, correspondendo à fusão e à cristalização, de segunda ordem, como é o caso da temperatura de transição vítrea (T_g) e relaxações secundárias (β , γ , δ) Tal como se verifica na Figura 18, estas relaxações indicam as alterações subtis do material (Pagnoncelli Lorandi, Odila Hilário Cioffi e Ormaghi Jr., 2016).

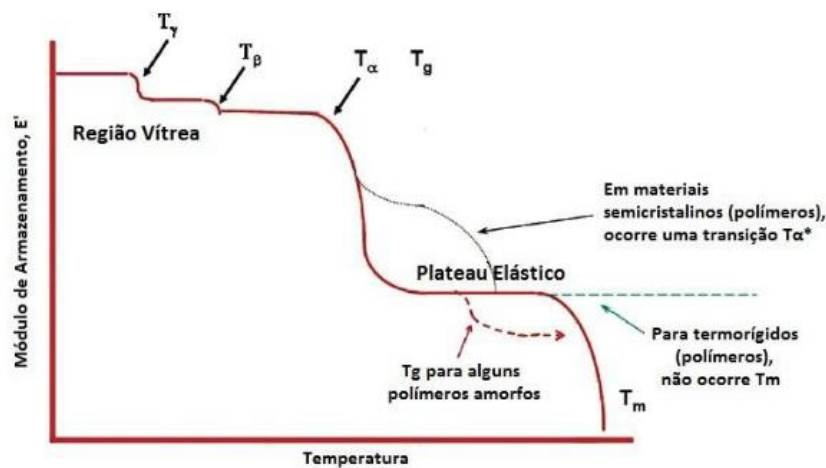


Figura 18 - Transição dos materiais (Felisberti e Cassu Navarro, 2005), (Claro Neto, 2015) e (©Cambridge Polymer Group, 2013).

Neste ensaio os parâmetros definidos para a análise do varrimento em temperatura “*temperature scan*” foram: *displacement* (deslocamento) inicial de 0 T_f de 110°C, uma temperatura acima da temperatura de transição vítrea da PA12 ($\pm 40^\circ\text{C}$) e a baixo da temperatura de fusão da PA12 ($\pm 170^\circ\text{C}$). Definiu-se uma velocidade de 2°C/min, frequência de 1Hz e tensão (*strain*) 0,05mm. Os parâmetros descritos anteriormente encontram-se na Figura 19. Este ensaio foi realizado num equipamento da marca *Triton*, modelo *Tritec 2000*, Figura 20.

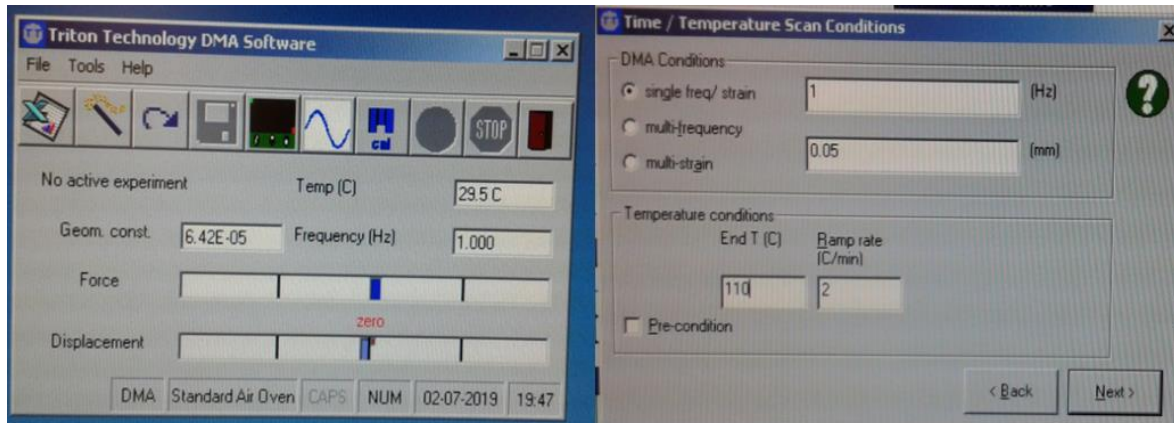


Figura 19 - Parâmetros do ensaio de DMA.



Figura 20 - Máquina de ensaio de DMA, Triton, modelo Tritec 2000.

3.2.4. Ensaio de Impacto Longitudinal

Os ensaios de impacto tração ou também conhecido por ensaios de impacto longitudinal, realizam-se no equipamento do modelo CEAST 9050, da INSTRON, Figura 22. Neste equipamento foi seguida a norma ISO 8256A-25, a sua utilização permite retirar resultados referentes à quantificação de energia que o provete absorve até à rutura, avaliação da resistência ao impacto e a respetiva resiliência dos provetes. A energia de impacto pode ser definida como a energia que o provete consegue absorver antes de entrar em rutura, onde é medida a deformação sofrida pelo provete (Freitas, 2016; Leonardo, 2016).

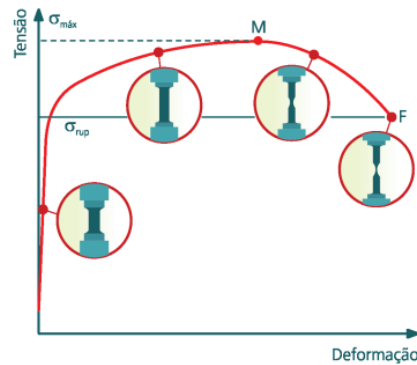


Figura 21 - Energia que o provete consegue absorver antes de entrar em rutura (Callister, 2002).

Antes de iniciar o ensaio é necessário escolher o suporte da amostra que irá auxiliar a execução do ensaio, como por exemplo, a escolha prévia do tipo de provete, entre outros materiais de auxílio ao ensaio, Figura 23 (será abordado adiante num subcapítulo). É necessário efetuar a calibração do equipamento fazendo com que o martelo oscile livremente até que pare, no entanto na prática estas oscilações têm de ser paradas por acção humana, se tal não acontecesse o martelo oscilaria infinitamente uma vez que não existe atrito. De salientar que o martelo oscila sempre até à posição a que foi largado, um ângulo de 150° , como se pode observar à esquerda da Figura 24. Após a calibração é necessário escolher os parâmetros de teste adequados ao tipo de ensaio, posteriormente inserir a dimensão do provete a ensaiar. O ensaio inicia com o pêndulo posicionado a um ângulo de 150° e com uma energia de 25J e com o provete como representado na Figura 24 (Leonardo, 2016) e (Freitas, 2016).



Figura 22-Equipamento da INSTRON, modelo CEAST 9050

Este ensaio teve as seguintes pré-operações:

- Aperto do provete no grampo de aperto;

- Aperto do provete na amarra da máquina de ensaio;
- Posicionamento nas linhas de guia, quando se coloca o provete na máquina;
- Largada do pêndulo na posição inicial;

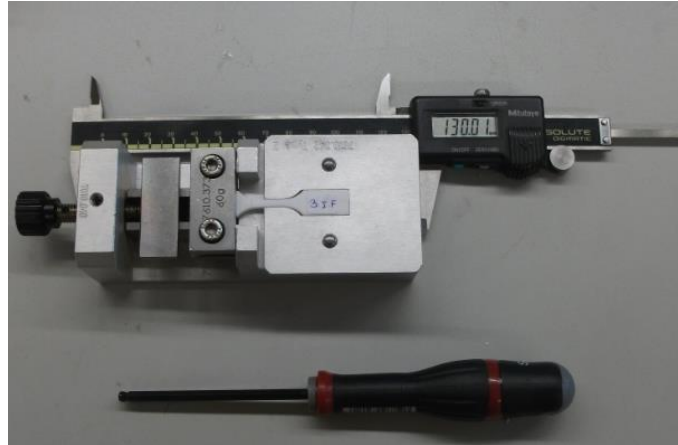


Figura 23 - Materiais de auxílio ao ensaio de impacto-longitudinal: Paquímetro 0-150 mm, Placa metálica adequada para TIPO2 (7610,342 (type 2)), Grampo de aperto (7610,373 60g), Chave de apertar porcas 18 mm.



Figura 24 - Ângulo inicial de 150°, à esquerda. Aperto do provete no equipamento para ensaio de impacto, à direita.

Para este ensaio, foi utilizado um provete de tipologia número dois Tabela 8 e Figura 25 (Freitas, 2016; Rodrigues, 2016) Foram construídos provetes nas quatro orientações mencionadas anteriormente.

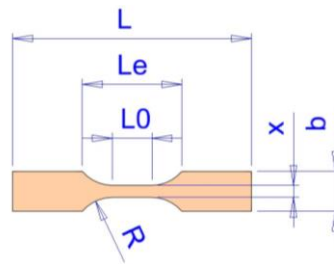


Figura 25 - Dimensões do provete tipo 2, segundo a norma ISO 8256 método A (Freitas, 2016; Rodrigues, 2016).

Tabela 8 - Dimensões dos provetes do tipo 2 (Freitas, 2016; Rodrigues, 2016).

Tipo de provete	L [mm]	b [mm]	x [mm]	L_0 [mm]	L_e [mm]	R [mm]
2	60 ± 2	$10 \pm 0,2$	$3 \pm 0,2$	$10 \pm 0,2$	$25 \pm 0,2$	10 ± 1

3.2.5. Ensaio Impacto-Queda livre

O ensaio por queda livre (*Drop Weight*) consiste na queda livre de uma massa de determinada altura sobre a estrutura a ser testada. Quando a massa está suspensa, esta possui determinado valor de energia potencial gravítica que será convertida em energia cinética quando a massa for liberada.

O provete fica assente ao centro da base do regulador de altura da parte móvel, Figura 26, que é ajustado à região fixa do equipamento. Estando completa esta etapa, é deixado cair a massa em queda livre. O ensaio decorreu segundo a norma EN ISO 6603-2 e foi utilizado um equipamento com o modelo Ceast 9340 da Instron,

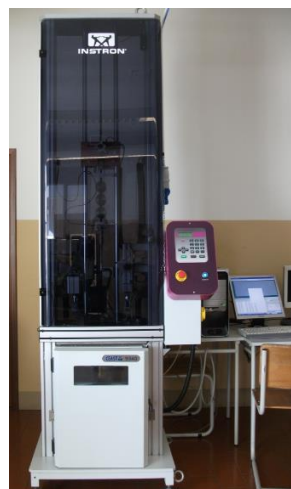


Figura 26 - Instrumento para execução do ensaio de impacto em queda livre, zona em vidro é onde se encontra o martelo utilizado para o impacto.

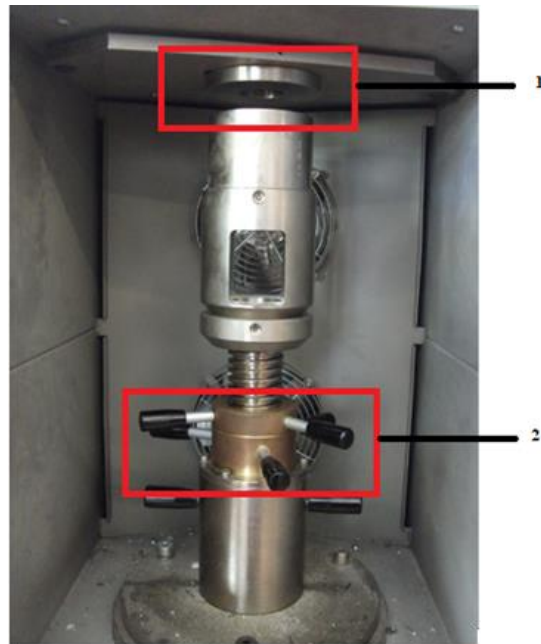


Figura 27 - Interior do instrumento para execução do ensaio de impacto em queda livre. 1 - Região onde é colocado o material a testar, a parte superior é fixa, a parte inferior é móvel; 2 - Regulador da altura da parte móvel.

Para este ensaio, foi utilizada uma placa quadrada de dimensão de 100x100x4 [mm], Figura 28. Foram apenas construídas as orientações 1 e 3, pois como o provete é um quadrado construir as quatro orientações, seria fazer uma replicação, o que não era necessário.

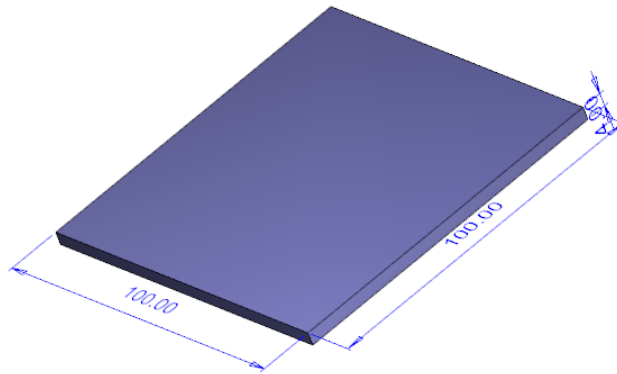


Figura 28 - Placa para ensaio de impacto queda livre.

3.2.6. Ensaio Dureza Shore

O ensaio de dureza, pertence ao tipo de ensaios destrutivos como referido anteriormente. É um ensaio que avalia a dureza superficial de polímeros, material utilizado neste caso de estudo, ou elastómeros. A dureza Shore não pode ser utilizada como forma de prever a resistência ao desgaste ou a outra

propriedade mecânica. A dureza Shore avalia a resistência relativa à indentação, a qual varia com o tempo, principalmente porque os materiais usados neste tipo de ensaio têm uma grande resiliência e, portanto, uma grande capacidade para absorver a energia e de se adaptar à deformação (Instituto Pedro Nunes).

“A escala de dureza Shore pode ser classificada em A e D. A dureza Shore A é adequada para medir a dureza de polímeros, borrachas, elastômeros, materiais sintéticos macios, feltro, couro. Enquanto que a escala de dureza Shore D é adequada para medir a dureza de materiais sintéticos, plásticos rígidos” (Instituto Pedro Nunes).

Esta avaliação é efetuada num equipamento de medição chamado de durómetro, com modelo 903 Shore da Instron, que utiliza indentador rígido, Figura 29, para penetrar um provete normalizado, em condições previamente definidas, segundo a norma ASTM-D2240.

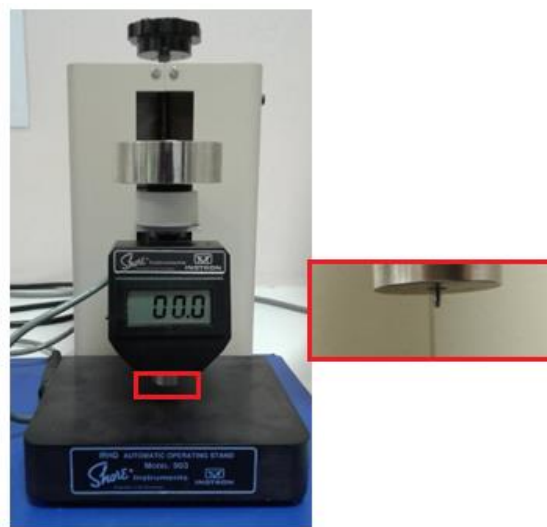


Figura 29 - Durómetro à esquerda e o detalhe do indentador à direita com dimensão de 0,79mm.

4. Resultados e discussão

Este capítulo apresenta e discute os resultados para os diferentes ensaios, referidos nos capítulos anteriores.

4.1. Ensaio de tração

O ensaio de tração foi realizado cinco vezes, as curvas apresentadas nos gráficos, são referentes à média dos ensaios para cada orientação e não de um ensaio único, representando, no entanto, o comportamento típico observado para cada orientação de construção, através das curvas tensão vs deformação.

A Figura 30, permite visualizar que, por exemplo, para haver uma deformação correspondente a 0,1 mm foi necessária uma tensão de 25 MPa, no entanto a maior tensão aplicada corresponde a um deslocamento menor. Tal deve-se à construção dos provetes, onde existe uma maior estabilidade entre camadas na orientação 1.

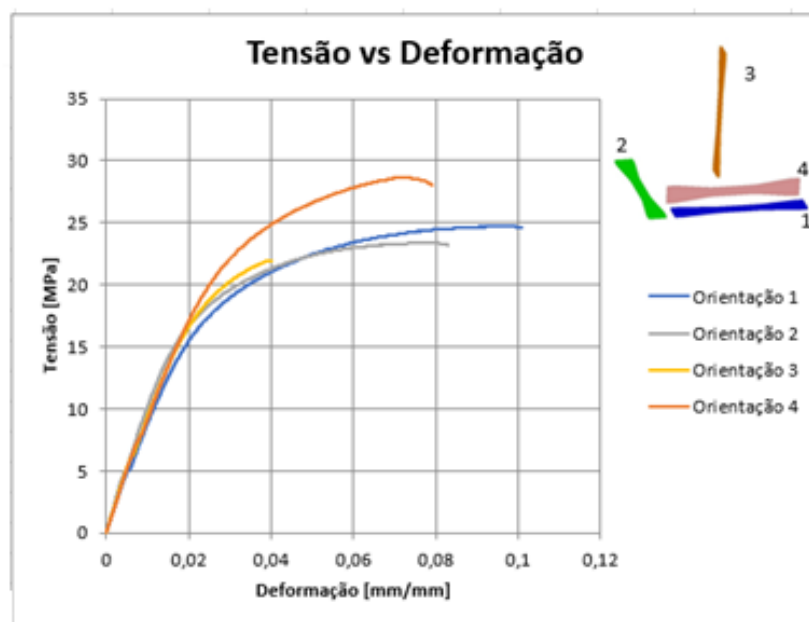


Figura 30 - Gráfico Tensão vs Deformação para cada orientação de construção.

Através da Tabela 9, verificou-se que o provete com a orientação de construção 4 é o que apresenta valores superiores de tensão. Seguido da orientação 1, seguindo-se a orientação 2 e, por último o provete com a orientação de construção nº3. De um modo geral a dispersão de resultados é alta pois a percentagem dos valores obtidos é superior a 10% para a força e tensão. Como a percentagem para o módulo de Young é inferior a 10%, considera-se que tem uma baixa dispersão.

Verifica-se também que é a orientação 4 que consegue suportar maior força, seguindo-se a orientação 1. Tal está relacionado com a orientação de construção, porque ambas foram construídas com o mesmo eixo X. A orientação 3 construída no eixo Z é a que apresenta menor tensão, dado que sua secção rapidamente entra em rutura devido fraca à coesão entre camadas.

Tabela 9 - Ensaio de tração.

	Orientação 1	Orientação 2	Orientação 3	Orientação 4	Média	Desvio Padrão	Desv.Pad/Média [%]
Força [N]	917,90	782,50	784,82	1099,45	896,17	129,53	14
Tensão [MPa]	25,95	23,38	21,97	29,20	25,13	2,75	11
Módulo Young [MPa]	904,99	1108,96	1032,89	1012,21	1014,76	72,90	7

4.2. Ensaio fluência- relaxação de tensão

Este ensaio teve a duração de 2400 segundos, para todas as orientações de construção, exceto para a orientação 1, que iniciou em 300 segundos (1Fa), 600 segundos (1Fb), 1200 segundos (1Fc), 1800 segundos (1Fd), e por fim 2400 segundos (1Fe), foi aplicado um deslocamento inicial de 3 mm, onde se atinge a força máxima neste intervalo de deslocamento. Posto isto observou-se a curva de estabilização da carga, durante o tempo definido. A representação (1Fa), (1Fb), (1Fc), (1Fd) e (1Fe), significa que é um provete com a orientação 1 (1Fa), para o ensaio de relaxação de tensão (1Fa) e foi o primeiro provete a ser ensaiado naquele ensaio (1Fa).

A variação de força é dada através da diferença entre a força máxima e a força final. Onde a força máxima obtida é derivada do deslocamento inicial de 3 mm. A força final é a resultante do intervalo de tempo definido para a duração do ensaio. A % de variação de força consiste na % de decréscimo da força desde a força máxima até à força obtida no final do ensaio.

A Tabela 10, apresenta a média dos resultados obtidos tendo em conta os parâmetros em estudo. Permite observar que a orientação de construção 3 é a que apresenta uma maior % variação de força. Segue-se a orientação 1, orientação 2 e por fim a orientação 4.

Tabela 10 - Variação de força, força máxima e força final para cada orientação do ensaio de relaxação de tensão.

	Força máxima [N]	Força final [N]	Variação de força [N]	% Variação de força
Orientação 1	765,49	522,58	242,90	31,73
Orientação 2	827,31	577,67	249,64	30,18
Orientação 3	741,58	503,08	238,51	32,16
Orientação 4	627,40	441,26	186,14	29,67
Média	740,45	511,15	229,30	30,94
Desvio Padrão	72,38	48,75	25,25	1,04
Desv.padrão/Média[%]	10	10	11	3

Através da observação da Figura 31, constata-se que a curva de relaxação de tensão da orientação 1 e 3 para o mesmo intervalo de tempo apresentam um comportamento muito semelhante, pelo que existe sobreposição das curvas. Tal é também verificado observando a tabela acima, Tabela 10, onde os valores obtidos para estas duas orientações referidas, apresentam pouca discrepância, uma vez que apresentam percentagens iguais ou menores que 10%.

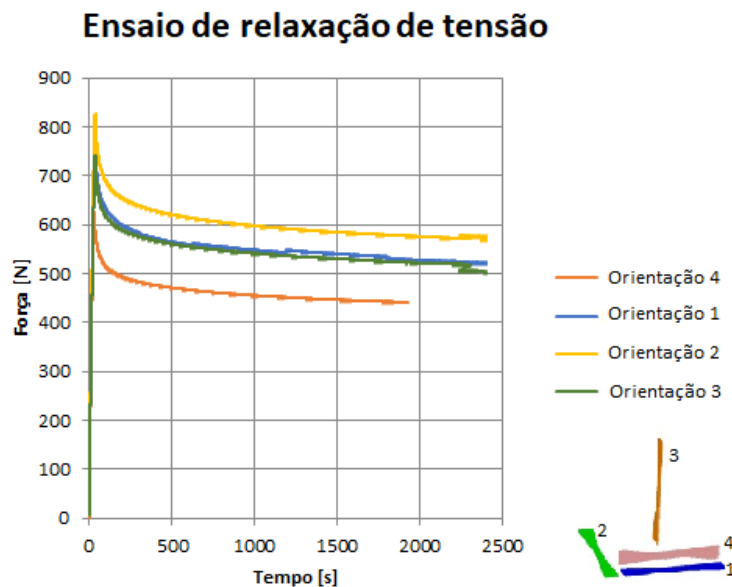


Figura 31 - Média dos resultados ensaios de relaxação de tensões para cada orientação.

4.3. Ensaio DMA

Ao analisar o gráfico das propriedades mecânicas da PA12 em função da temperatura que consta na Figura 32, verifica-se a existência de duas curvas ou ondas sinusoidais, a curva azul corresponde ao módulo de elasticidade e a curva vermelho corresponde à $\tan \delta$ (desfasamento) face à carga dinâmica aplicada. A Tabela 11, apresenta a leitura dos valores feita através da observação e análise das figuras: Figura 32, Figura 33, Figura 34 e Figura 35.

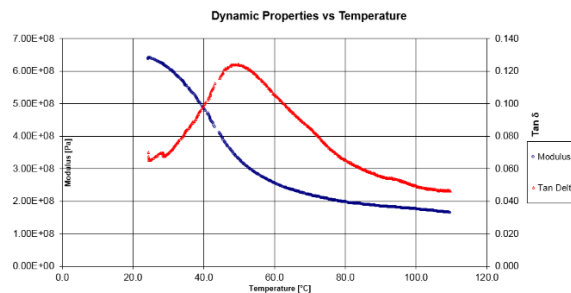


Figura 32 - Orientação 1: Representação gráfica do módulo de elasticidade e Tan Delta (δ) em função da temperatura do ensaio mecânico-dinâmico de uma amostra de PA12 com uma frequência de 1Hz.

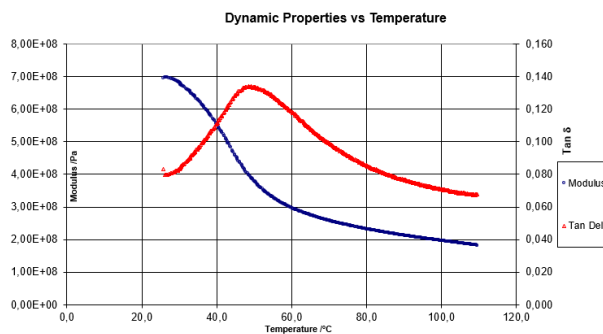


Figura 33 - Orientação 2: Representação gráfica do módulo de elasticidade e Tan Delta (δ) em função da temperatura do ensaio mecânico-dinâmico de uma amostra de PA12 com uma frequência de 1Hz.

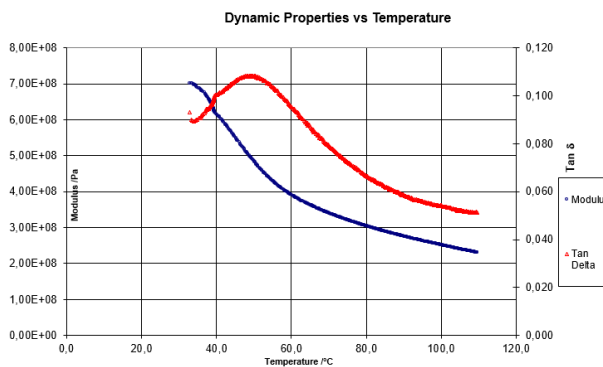


Figura 34 - Orientação 3: Representação gráfica do módulo de elasticidade e Tan Delta (δ) em função da temperatura do ensaio mecânico-dinâmico de uma amostra de PA12 com uma frequência de 1Hz.

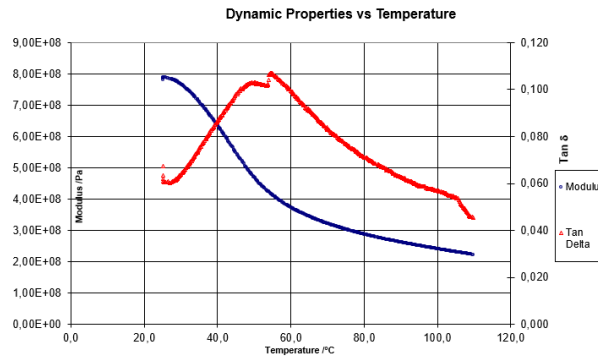


Figura 35 - Orientação 4: Representação gráfica do módulo de elasticidade e Tan Delta (δ) em função da temperatura do ensaio mecânico-dinâmico de uma amostra de PA12 com uma frequência de 1Hz.

A leitura da tabela pode ser feita da seguinte forma: a zona da mudança de declive da curva azul corresponde ao módulo de elasticidade e permitiu determinar a existência da temperatura da transição vítrea (T_g) de aproximadamente 57°C com um valor de módulo de elasticidade de aproximadamente 270MPa. Na curva correspondente ao desfaseamento verifica-se que o pico ocorre aproximadamente aos 50°C para o valor de Tan delta de 0,124.

Tabela 11 - Ensaio DMA.

	Temperatura T_g [°C]	Módulo Young [MPa]	Temperatura Tan delta [°C]	Valor de Tan delta
Orientação 1	57,00	270,00	49,60	0,124
Orientação 2	59,00	300,00	49,20	0,134
Orientação 3	59,00	400,00	50,20	0,109
Orientação 4	59,00	309,00	54,40	0,107
Média	58,50	319,75	50,85	0,12,
Desvio Padrão	0,87	48,53	2,08	0,01
Desv.padrão/Média[%]	1	15	4	9

Pela observação da tabela acima, os valores de temperatura T_g são próximos entre si, ou seja, independentemente da orientação a variação é praticamente nula, 1%.

O maior valor para o módulo Young corresponde à orientação 3 com 400 MPa, enquanto que o menor valor pertence à orientação 1, a um valor de 270 MPa. Nas outras orientações os valores obtidos estão compreendidos entre os do módulo da orientação 3 e 1, especificamente 300 MPa para a orientação 2

e 309 MPa para a orientação 4, não sendo possível relacionar a orientação de construção da orientação 2 e 4.

Tal como acontece na temperatura de Tg, a temperatura de Tan delta não apresenta variação significativa dos valores, 4%.

Quanto aos valores de Tan delta, o maior corresponde à orientação 2, 0,134 e o menor 0,107 à orientação. 4. As orientações 3 e 4 apresentam valores muito próximos entre si, o que poderá relacionar a igualdade destas duas orientações será o facto de ambas terem sido construídas tendo em comum o eixo Z. A orientação 1 apresenta um valor de tan delta de 0,124.

É de salientar que a linha correspondente ao tan delta da Figura 35, apresenta uma notória descontinuidade, por essa razão foi considerada a temperatura de tan delta mais elevada que se conseguia ler. Tal facto pode dever-se a impurezas presentes no provete na região submetida ao ensaio, ou a alguma má formação aquando da construção do provete.

4.4. Ensaio de Impacto longitudinal

Este ensaio decorreu segundo a metodologia descrita anteriormente. Através da observação das figuras, verifica-se que a orientação 1, apresenta maior capacidade de absorver energia do que a orientação 3, Figura 36. O mesmo acontece com a resiliência, Figura 37, a orientação 1 é a que se mais se destaca em relação às outras orientações de construção, significa isto que de acordo com a definição teórica de resiliência, a orientação capaz de absorver menos energia é a 3, onde também se verifica que a energia resultante, Figura 38, do impacto é menor.

A definição de resiliência pode ser descrita como a capacidade de um material absorver energia sem fraturar ou deformar plasticamente, a energia que é armazenada denomina-se de resiliência.

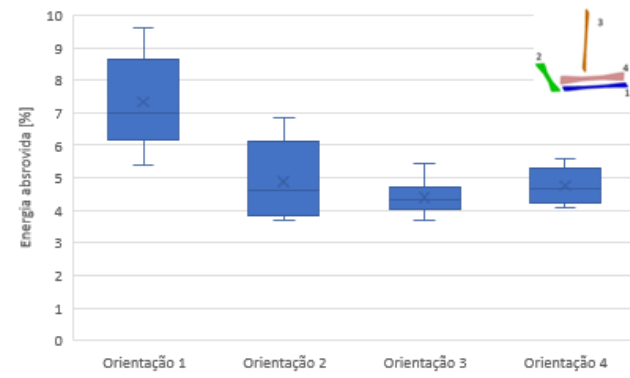


Figura 36 -Energia absorvida em [%] no ensaio de impacto-longitudinal diferentes orientações de construção.

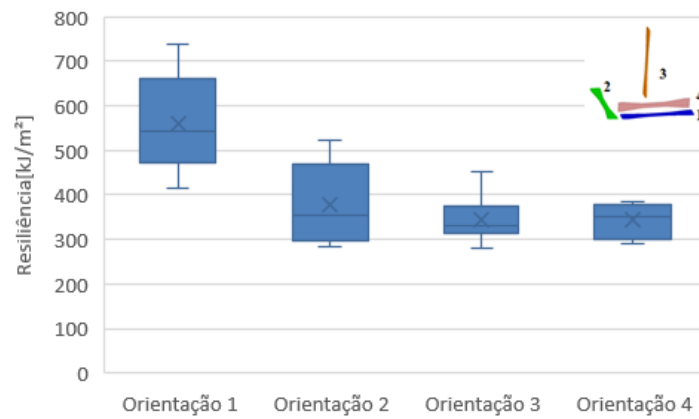


Figura 37 - Resiliência das diferentes orientações de construção.

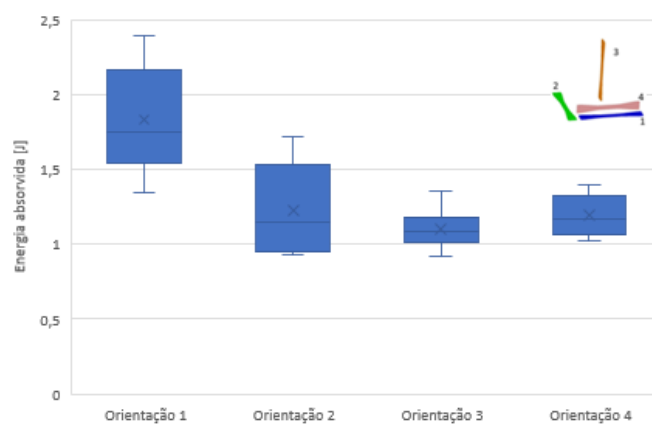


Figura 38 - Energia absorvida em [J] do ensaio de impacto-longitudinal das diferentes orientações de construção.

4.5. Ensaio impacto-queda livre

Para este ensaio foram utilizadas apenas duas orientações de construção, uma vez que sendo uma placa quadrada iriam ser replicadas duas das orientações, não sendo necessário para o caso em estudo. As orientações construídas foram a 1 e a 3.

Pretendeu-se observar o efeito que um corpo de queda livre largado de alturas diferentes incutia numa placa provete, desta forma o x_i inicial define a posição inicial da largada do peso. Estipularam-se quatro posições iniciais, a saber: 1mm, 1,5mm, 2,5mm e 3mm, que foram ensaiadas para as duas orientações.

A observação da Figura 39, referente à orientação de construção 1, permite verificar que o deslocamento maior é alcançado pelo $x_i = 2,5$ mm. Este x_i de 2,5 mm também é o que atinge a força máxima de aproximadamente 1000 N. Enquanto que a menor força apresentada é referente a $x_i = 1$ mm. Observa-se também que para o deslocamento de 3 mm, a posição inicial de 2,5 mm é a que exerce maior força, seguida de $x_i = 3$ mm, as posições correspondentes a $x_i = 1$ e 2,5 mm exercem uma força semelhante porque as curvas se sobrepõem.

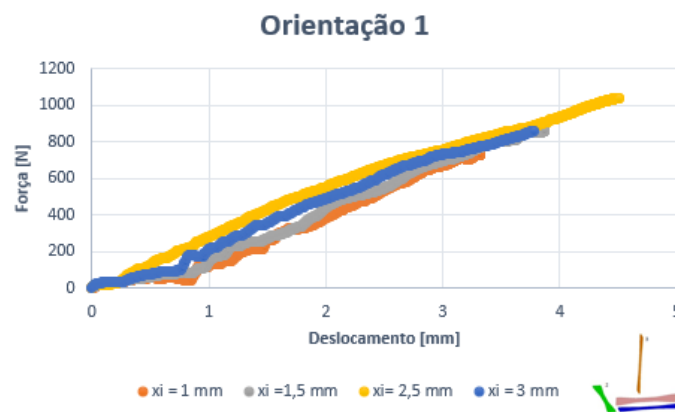


Figura 39 - Gráfico de força vs deslocamento da orientação de construção 1.

Pela observação da Figura 40, referente à orientação de construção nº3, constata-se o maior deslocamento atingido foi de aproximadamente 4 mm, atingido com uma força de 1200 N, para o valor de $x_i = 2,5$ mm. Constata-se que para o deslocamento de 2 mm, a maior força foi exercida foi pelo $x_i = 1$ mm, com cerca de 800 N, o que significa que para o mesmo deslocamento é o que exerce uma força maior. Até ao deslocamento de aproximadamente 1 mm, todos os valores de posição escolhidos para x_i exercem a mesma força, que não se verifica na Figura 39, referente à orientação 1.

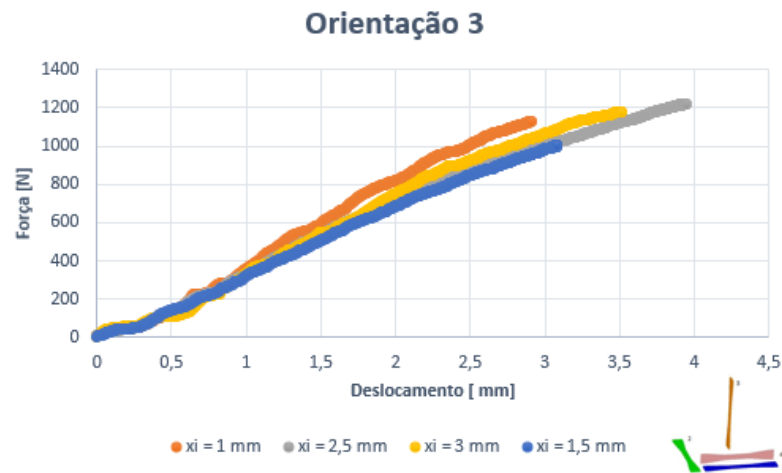


Figura 40 - Gráfico de força vs deslocamento da orientação de construção 3.

Pela observação da Figura 41, referente à orientação de construção 1, verifica-se que independentemente de xi o deslocamento dos quatro ensaios apresenta um comportamento parabólico para o mesmo intervalo de tempo, ou seja, apresentam um crescimento até atingirem o valor máximo de deslocamento e de seguida começa o decréscimo. O valor $\xi=3$ mm é o que apresenta maior deslocamento, para o tempo correspondente a cerca de 1100 ms e um deslocamento final de 3mm. Para os restantes valores de xi atingem para o tempo de 1900 ms o mesmo valor decrescente de deslocamento, ou seja, o valor final atingido é de cerca de 1mm. Todos estes valores de xi apresentam o mesmo intervalo de tempo.

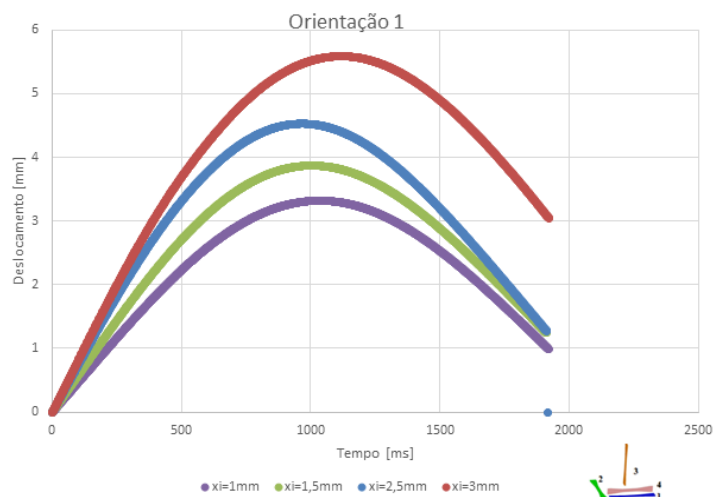


Figura 41 - Gráfico de deslocamento vs tempo da orientação de construção 1.

A observação da Figura 42, referente à orientação de construção nº3, permite constatar que para os valores de $\xi=1,5$ mm e $\xi=2,5$ mm apresentam 1 mm de diferença do deslocamento máximo para o intervalo de tempo compreendido entre 500 e 1000 ms, apresentando também um deslocamento final com 0,5 mm de diferença entre si, de uma forma geral apresentam comportamento da curva hiperbólica semelhante. Enquanto que os $\xi=1$ mm e $\xi=3$ mm apresentam também um comportamento parecido, onde também existe a deslocação máxima entre ambos com a diferença de 1 mm, em que $\xi=3$ mm é quem tem o maior deslocamento, 5mm. Além disso entre estes dois últimos valores de ξ referidos são os que apresentam maior intervalo de tempo.

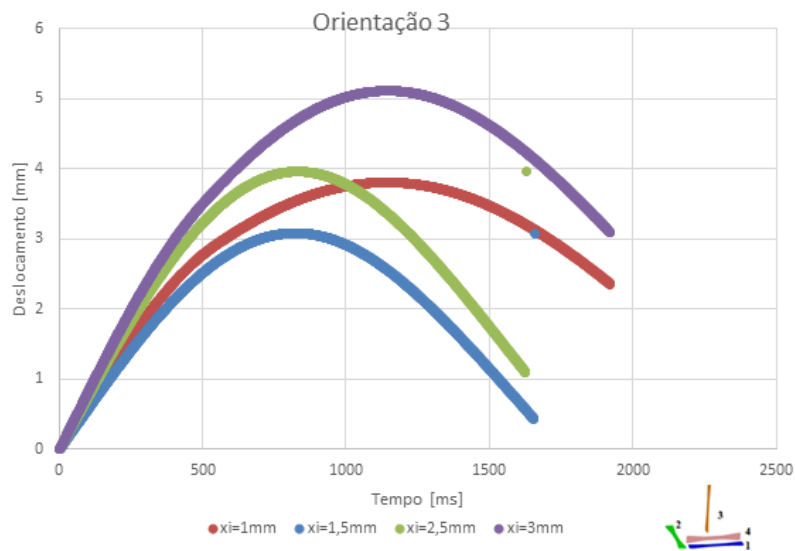


Figura 42 - Gráfico de deslocamento vs tempo da orientação de construção 3.

Na Tabela 12, é possível constatar que para a mesma orientação existe uma diferença de absorção de energia entre o maior e menor percentagem de absorção de cerca 30%. A orientação 1 para um ξ de 1 mm é a que consegue absorver mais energia, significa que a mais resiliente. Por outro lado, a orientação 3 para uma posição inicial de 3 mm é a menos resiliente.

Tabela 12- Energia absorvida [%] para as orientações 1 e 3

Posição inicial (ξ) [mm]	Orientação 1 Energia absorvida [%]	Orientação 3 Energia absorvida [%]
1,00	73,53	43,27
1,500	52,61	64,95
2,50	42,03	47,90
3,00	45,27	37,45

4.6. Ensaio dureza Shore

A Tabela 13 descreve a média para cada ensaio referente a cada provete testado, porque em cada provete o indentador era “acionado” em 5 zonas diferentes. É apresentada no fim da tabela a média global, agrupando os resultados gerais obtidos em cada orientação. Apesar de no descritivo do fornecedor apresentar valor teórico para a dureza no ensaio de Shore D, não foi possível laboratorialmente fazer o mesmo ensaio, pois os valores obtidos eram superiores ao espectável, por essa razão recorreu-se ao ensaio Shore A.

De acordo com Caetano (Caetano, 2019), os valores teóricos obtidos para estes ensaios estão compreendidos em dureza sensitiva como duro, 75-90, e muito duro, 90-100, significa isto que a profundidade da impressão deixada no provete com a aplicação da carga aplicada é menor para a dureza sensitiva classificada como dura.

Segundo a classificação acima mencionada, a orientação 3 apresenta-se como muito dura, enquanto que as restantes orientações se classificam simplesmente como duras.

A análise da Tabela 13 permite verificar que a orientação 3 é a que apresenta valores mais elevados para o ensaio de Shore A, seguindo-se a orientação 4, orientação 1 e por fim a orientação 2.

Tabela 13 - Resultados dos ensaios Shore A.

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Média	Desvio padrão	Desv.padrão/Média [%]
Orientação 1	82,70	82,200	79,8	77,8	80,2	80,54	1,77	2
Orientação 2	76,00	80,1	81,6	77,6	75,7	78,20	2,31	3
Orientação 3	92,50	89,30	87,4	92,7	92,3	90,84	2,12	2
Orientação 4	82,30	88,30	88,6	89,2	88,3	87,34	2,54	3

4.7. Influência da decisão na orientação da construção nas propriedades mecânicas

Foram desenvolvidas enumeras estratégias de forma a otimizar a orientação da construção. A maioria dos investigadores considerou o acabamento da superfície como o fator mais importante seguido pela precisão dimensional, tempo de construção e estruturas de suporte. Em geral, essas estratégias de orientação apresentam diferenças significativas entre elas, e não há um padrão claro para sua implementação (Taufik e Jain, 2014).

Os ensaios realizados neste projeto permitem fazer uma comparação entre os ensaios mecânicos e as propriedades obtidas, relacionando-as com as diferentes orientações. Seria de esperar que como a matéria-prima utilizada na construção dos provetes tem como fornecedor a EOS, que as propriedades mecânicas se assemelhem às teóricas, das Tabela 5 e Tabela 7.

Um dos fatores a ter em consideração foi que a trajetória de construção foi sempre a mesma, trajetória zigue-zague, e que por isso a recepção de calor é mais constante, o que significa que o tempo de arrefecimento entre cada camada tende a ser menor, logo existe uma melhor uniformização e aderência entre as partículas de pó a ser sinterizado. Desta forma, é possível comprovar que apenas a orientação de construção dos provetes é o fator influenciador, porque os provetes foram construídos todos ao centro da câmara de construção.

Quando a orientação de construção é perpendicular à direção do carregamento, isto é, quando a orientação das camadas é paralela à direção do carregamento, é obtida a resistência mecânica máxima, porque quanto maior o valor da tensão, maior a resistência mecânica de um material. A resistência da peça é maior do que quando a carga é aplicada segundo a direção perpendicular. Isto significa que as propriedades mecânicas das peças produzidas diferem consoante a direção do eixo escolhido para a construção da peça. Por essa razão é importante analisar sempre previamente a que fim se destina o uso da peça, assim como o tipo de esforços a que será submetida. Após esta análise deverá ter-se em conta qual a orientação de construção que lhe poderá ser ótima, de forma a serem mantidas as condições que lhe são intrínsecas (Martins, 2017).

A Tabela 14 que se segue, mostra de forma resumida, sempre a ordem decrescente de valor obtido das orientações e os espaços em branco são propositados, pois representam situações não aplicáveis para a situação em estudo. Por exemplo, para o ensaio de tração na linha que representa a Força [N], tem a seguinte ordem: 4; 1; 3; 2. Esta ordem significa que se verificou que o provete com a orientação de

construção 4 é o que apresenta valores superiores de força. Seguido da orientação 1, seguindo-se a orientação 3 e, por último o provete com a orientação de construção nº2.

Tabela 14 - Tabela resumo.

	Ensaio				
	Tracção	Relaxação de tensão	DMA	Impacto tração	Shore
Força [N]	4; 1; 3; 2				
Tensão [MPa]	4; 1; 2; 3				
Módulo Young [MPa]	2; 3; 4; 1		3; 2; 4; 1		
Força máxima [N]		2; 1; 3; 4			
Força final [N]		2; 1; 3; 4			
Variação força [N]		2; 1; 3; 4			
Variação força [%]		3; 1; 2; 4			
Tan delta			2; 1; 3; 4		
Temperatura [°C]			2; 3; 4; 1		
Energia absorvida [%]				1; 2; 4; 3	
Resiliência				1; 2; 4; 3	
Energia absorvida [J]				1; 2; 4; 3	
Dureza					3; 4; 1; 2

Relativamente à orientação 1, foi a que obteve o segundo valor mais alto para tensão e força, mas, no entanto, apresenta menor valor obtido para o módulo de Young, tanto no ensaio de tração como no ensaio de DMA. O ensaio de relaxação de tensão é o que se apresenta em segundo lugar. No ensaio de DMA apresenta o segundo valor mais elevado para Tan delta, mas tal não acontece com a temperatura, uma vez que é o que a apresenta mais baixa. Quanto ao ensaio de impacto longitudinal é o que tem melhor desempenho em todos os parâmetros indicamos na tabela acima. No entanto, em relação ao ensaio de tração e de DMA, os resultados do módulo de Young podem ser uniformes nas amostras (3/4/2/1), mas seria necessário a realização de mais ensaios para realmente confirmar essa uniformidade. Ainda referente à orientação 1 é a que apresenta uma menor dureza, perante o ensaio Shore.

Para o ensaio de tração a orientação 2, classifica-se em último lugar o que toca à força, enquanto que para a tensão fica em penúltimo e módulo de Young em primeiro. No entanto no ensaio de relaxação de tensão é a orientação que se destaca, em todos os parâmetros à exceção da % de variação de força onde se verifica que apresenta das menores variações. Para o ensaio de DMA o valor obtido para o módulo de Young é o que apresenta o segundo maior valor, e para os restantes parâmetros é que apresenta valores superiores. Quanto ao ensaio de impacto-longitudinal é que se classifica em toda a abordagem em segundo lugar. é a orientação com menor valor de dureza no ensaio de Shore.

A orientação 3 no ensaio de tração é o penúltimo menor valor para a força, por apresentar a menor tensão e, no entanto, é o que obteve o segundo maior valor de módulo de Young, e maior valor no ensaio de DMA. Verifica-se a maior % de variação de força aquando do ensaio de relaxação de tensão, mas nos outros parâmetros do ensaio está em penúltimo lugar. É a orientação que apresenta o segundo maior valor de temperatura, e o terceiro maior valor de Tan delta, no ensaio de DMA. Para o ensaio de impacto longitudinal é o valor menor em todos os parâmetros do ensaio em questão. É a orientação que tem o maior valor dureza no ensaio de Shore.

Por fim, verifica-se que a orientação 4 tem melhor desempenho no ensaio de tração, excetuando o parâmetro do módulo de Young que é a orientação com o segundo menor valor. Obteve a última classificação nos parâmetros em estudo no ensaio de relaxação de tensão, bem como no valor de Tan delta, no ensaio de DMA. Quanto aos valores do ensaio de DMA e de relaxação de tensão apresenta-se na penúltima classificação para temperatura e módulo de Young. É uma orientação com uma dureza elevada para o ensaio de Shore.

De um modo geral, a relaxação de tensão e a temperatura/Tan delta sugerem que quanto mais força suportam, mais temperatura também são capazes de suportar. Os materiais duros, comprovados pelo ensaio de Shore tem menor capacidade de absorvida de energia de impacto, verificado no ensaio impacto- longitudinal.

No global o que tem melhores resultados é a orientação 4, apesar de haver parâmetros onde aparece em penúltimo, como é o caso do impacto longitudinal, é bom, porque se a % de energia absorvida é mais baixa, significa que não é tão fácil fraturar. Tal sugere que possa ser utilizado em aplicações sujeitas a maiores tensões/impacto/resistência. Verifica-se também que apresenta reduzido modulo de Young e baixa resiliência, o que significa que tem baixo limite de elasticidade. Por essa razão não é resiliente, pois um material resiliente, é aquele que apresenta alta tensão de limite de elástico e baixo módulo de Young. O mesmo acontece com a energia resultante, é mais baixa, logo significa que a influência externa pode ser "desprezada" por ser mínima.

5. Conclusão

O processo SLS é um método muito viável em termos de otimização de tempo, apresenta elevada facilidade na construção de peças muito complexas, permite a utilização de diversos tipos de matéria-prima para o fabrico do processo, como por exemplo, materiais metálicos, cerâmicos ou poliméricos. A matéria-prima base apresenta-se no estado de pó, sendo esta uma outra vantagem, uma vez que o pó atua como uma estrutura de suporte natural durante o processo de construção. Este processo pode ser usado para gerar modelos funcionais, verificar o ajuste e testar alguns aspetos da função. Um aspeto que se negligencia, é a análise das propriedades que melhor se adequam à peça que se pretende construir, dado que de uma forma geral apenas se valoriza o aspeto superficial da peça.

Neste processo existem variáveis que influenciam as propriedades mecânicas do material a analisar, como é o caso, das trajetórias de construção, da espessura de camada, da orientação escolhida para a construção dos provetes. Esta última foi estudada de forma mais exaustiva, pois era um dos objetivos deste projeto. Foram escolhidas 4 orientações de construção diferentes e executados diversos ensaios mecânicos.

Relativamente ao ensaio de tração, verificou-se que o provete com a orientação de construção 4 é o que apresenta valores superiores de tensão. Seguindo da orientação 1, seguindo-se a orientação 2 e, por último o provete com a orientação de construção nº3.

No ensaio de relaxação de tensão, verificou-se que a orientação de construção 3, seguindo-se da orientação 1, orientação 2 e por fim a orientação.

No ensaio de DMA observou-se que o valores de temperatura T_g são próximos entre si, ou seja, independentemente da orientação não existe variação significativa de T_g . Quanto aos valores de $Tan\ \delta$, o maior corresponde à orientação 2, e o menor às orientações 3 e 4.

Relativamente ao ensaio de impacto-longitudinal, verificou-se que a orientação 1, apresenta maior capacidade de absorver energia do que a orientação 3.

Quanto ao ensaio de impacto-queda livre, para o mesmo intervalo de tempo e para posições iniciais de largada do peso, diferentes, verificou-se que a posição inicial $x_i=3\text{mm}$ é a que apresenta maior força, em ambas as orientações, orientação 1 e orientação 3.

Por fim, o ensaio de dureza Shore A, permitiu a classificação da matéria-prima sinterizada com dura, onde a orientação 3 é a que apresenta valores mais elevados para o ensaio de shore A, seguindo-se a orientação 4, orientação 1 e por fim a orientação 2.

Um fator influenciador na obtenção de resultados é o tempo definido para o ensaio, como se verifica no de relaxação de tensão. O tempo definido para este ensaio não foi suficiente para observar com mais rigor a estabilização da curva força vs tempo. Por essa razão, como sugestão de trabalho futuro seria, executar o ensaio de relaxação de tensão definindo um maior espaço de tempo, para ser possível observar a estabilização da curva. Uma outra sugestão, seira fazer um estudo semelhante, ao deste projeto, tendo em conta outras orientações de construção.

Após a análise e discussão dos ensaios, conclui-se que a orientação 4 é a que acarreta melhores propriedades, porque foi construída de acordo com os eixos x e z, o que lhe confere uma maior resistência mecânica. Além disso esta forma de construção, confere uma menor percentagem de energia absorvida após um impacto, bem como uma baixa resiliência, ou seja, apresenta baixa capacidade de absorver energia durante o regime de deformação exclusivamente elástica. Quanto à sua dureza, esta classifica-se apenas como um material duro, tendo em conta a capacidade de outro material penetrar o provete construído por esta orientação.

Bibliografia ou Referências Bibliográficas

©Cambridge Polymer Group - Glass Transition Determination by DMA. ©Cambridge Polymer Group, Inc. 2013).

ADDISPACE - Estudo e diagnóstico das oportunidades da manufatura aditiva metálica para o setor aeroespacial na região Sudoeste. **Interreg, Sudoeste, Addispace**. 2019).

Almeida, Magda Carolina Pinto De - **Aparas metálicas como matéria-prima para processos aditivos** : Dissertação Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias- Universidade de Coimbra, 2018

Bourell, David L. *et al.* - Performance Limitations in Polymer Laser Sintering Performance limitations in polymer laser sintering. **Physics Procedia**. . ISSN 1875-3892. 56:December (2014) 147–156. doi: 10.1016/j.phpro.2014.08.157.

Braga, Ana - **Caracterização de Misturas de Poliamidas de Elevado Desempenho para Moldação por Injeção** : Dissertação Mestrado, Instituto Superior Técnico, 2014 Disponível em WWW:<URL:https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/844820067123944/Dissertacao Ana Braga 66914_Nov2014.pdf>.

Callister, William - **Ciência e Engenharia de Materiais** [Em linha]. 5ª ed. Disponível em WWW:<URL:https://brogdomonzaofiles.wordpress.com/2013/10/ciencia-e-engenharia-de-materiais-uma-introducao-a-william-d-callister-jr.pdf>.

Carvalho, Sofia - **Fluência de materiais**. : Dissertação de Mestrado, Instituto de Engenharia do Porto, 2015

Claro Neto, Salvador - DMA - O que é preciso saber antes de sua utilização (parte III). **Brazilian Journal of Thermal Analysis**. . ISSN 2316-9842. 4:1–2 (2015) 48. doi: 10.18362/bjta.v4.i1-2.91.

COM, Carregados *et al.* - Relaxamento de tensão em compostos de policloropreno carregados com negro de fumo. **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. 2000).

Cottleer, Mark; Holdowsky, Jonathan; Mahto, Monika - The 3D opportunity primer- The basics of additive manufacturing. **Deloitte University Press**. 2014).

Dizon, John Ryan C. *et al.* - Mechanical characterization of 3D-printed polymers. **Elsevier-Additive Manufacturing**. . ISSN 22148604. 20:2018). doi: 10.1016/j.addma.2017.12.002.

Duarte, Cláudia - **Caracterização Químico-Física de Novos Polímeros Estabilizantes para Formulações da Indústria de Cosméticos** **Caracterização Químico-Física de Novos Polímeros Estabilizantes para Formulações da Indústria de Cosméticos**. : Dissertação Mestrado, Universidade de Coimbra, 2011

Farina, Luis Cláudio - **Caracterização viscoelástica por meio de ensaios de fluência e ruptura**

por fluência de compósitos poliméricos de matriz de resina epoxídica e fibra de carbono. :

Dissertação Mestrado, Instituto de pesquisas energéticas e nucleares da Universidade de São Paulo, 2009

Faustino, David De Figueiredo Teixeira - **Caracterização Mecânica de Poliamidas utilizadas em Intercoolers** : Dissertação Mestrado, Instituto Superior Técnico, 2014 Disponível em

WWW:<URL:https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/281870113702019/DissertacaoMestrado_DavidFaustino.pdf>.

Felisberti, Maria Isabel; CASSU NAVARRO, Silvana - Comportamento Dinâmico-Mecânico e relaxações em polímeros e blendas poliméricas. **Quim. Nova.** 28:2 (2005).

Freitas, Victor - **Resposta ao impacto longitudinal e transversal de laminados de vidro / epóxi.**: Dissertação Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2016

Ghaith, Fadi A. - Nonlinear Finite Element Modeling of Charpy Impact Test. **Advanced Materials Research.** . ISSN 1662-8985. 83–86:December 2009 (2009) 182–189. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.83-86.182.

Giordano, Caio; Zancul, Eduardo; Rodrigues Vinícius - Análise dos custos da produção por manufatura aditiva em comparação a métodos convencionais. **Revista científica eletrônica de Engenharia de Produção.** 2016).

Graça, David - **Fabrico e Pós-Processamento de Peças Obtidas por TDP** : Dissertação Mestrado, Universidade de Aveiro, 2012 Disponível em WWW:<URL:http://ria.ua.pt/bitstream/10773/10012/1/7069.pdf>.

Instituto Pedro Nunes. 2019. *Ensaio de Dureza.* Disponível em <https://www.ipn.pt/laboratorio/LEDMAT/ensaio/57>. [08-03-2019]

Klein, Fernando R. *et al.* - Estudo da Incorporação de CaCO₃ na Poliamida Utilizada no Processo de Sinterização a Laser Seletivo. **Revista Matéria.** 2005).

Kruth, J. *et al.* - Benchmarking of different SLS / SLM processes as rapid manufacturing techniques. **Int. Conf. Polymers & Moulds Innovations (PMI).** 2005).

Kulman, Cristiano - **Desenvolvimento de sistema-protótipo de sinterização seletiva a laser, visando a obtenção de componentes com gradientes funcionais** : Dissertação Mestrado,

Universidade Federal de Santa Catarina, 2006 Disponível em

WWW:<URL:https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/89269/232384.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Leite, Janaina Lisi - **Sinterização seletiva a laser de blendas de PA12/PEAD, PA6/PA12 e PMMA/PS com gradientes funcionais aplicáveis em componentes anti-fricção.** : Tese Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2007

Leonardo, André Filipe Simões - **Efeito das soluções cimentícias na resposta ao impacto longitudinal e transversal de laminados vidro/epóxico.** : Dissertação Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2016

Lino, Jorge; Neto, Rui - A prototipagem rápida na indústria nacional. **Departamento de Engenharia**

Mecânica da FEUP. 42 (2019).

Martins, Joana Domingues - **Análise ao comportamento mecânico de estruturas de suporte produzidas por fdm**. [S.l.] : Dissertação Mestrado, Instituto Politécnico de Leiria, 2016

Martins, Tomás - **Influência dos parâmetros de fabrico nas propriedades mecânicas de peças obtidas por impressão 3D com um único material**. : Instituto Superior Técnico, 2017

Mchugh, Peter E.; LOHFELD, Stefan - Dependence of mechanical properties of polyamide components on build parameters in the SLS process Dependence of mechanical properties of polyamide components on build parameters in the SLS process B . Caulfield , P . E . McHugh , S . Lohfeld * National C. February (2007). doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.09.007.

Paggi, Rodrigo Acácio - **Sinterização seletiva a laser de compósitos com gradiente funcional entre poliamida 12 e nanotubos de carbono aplicáveis no setor aeroespacial**. : Dissertação Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008

Pagnoncelli Lorandi, Natalia; Odila Hilário Cioffi, Maria; Ornaghi Jr., Heitor - Análise Dinâmico-Mecânica de Materiais Compósitos Poliméricos. **Scientia cum Industria**. . ISSN 23185279. 4:1 (2016) 48. doi: 10.18226/23185279.v4iss1p48.

Rodrigues, Ana Rita - **Estudo da influência do efeito de meios corrosivos na resistência ao impacto de laminados vidro / epóxico**. : Dissertação Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2016

Silva, Fábio - **Estudo da Pirólise de Poliamida-12 em Leito Fluidizado Borbulhante**. : Dissertação Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2009

Taufik, Mohammad; JAIN, Prashant Kumar - Role of build orientation in layered manufacturing : A review Role of build orientation in layered manufacturing : a review Mohammad Taufik * and Prashant K . Jain. **International Journal of Manufacturing Technology and Management**. 2014). doi: 10.1504/IJMTM.2013.058637.

Teofilo, Jorge - Ensaio Mecânicos dos Materiais. **UFPA – ITEC – Faculdade de Engenharia Mecânica**. 2013) 167–276.

Volpato, Neri; Foggatto, José; Radigonda, André - Implementação de uma variação do fatiamento adaptativo no processo FDM. **6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. 1996 (2011).