

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

OS EFEITOS DA VARIAÇÃO NOS PARÂMETROS DE FABRICAÇÃO E DO
PERCENTUAL DE UMIDADE NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
COMPONENTES FABRICADOS POR FDM EM POLIAMIDA

por

Rodrigo Bernardes de Moura

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, abril de 2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

CIP - Catalogação na Publicação

Moura, Rodrigo Bernardes de
Os efeitos da variação nos parâmetros de fabricação
e do percentual de umidade nas propriedades mecânicas
de componentes fabricados por FDM em poliamida /
Rodrigo Bernardes de Moura. -- 2022.
19 f.
Orientador: Jakson Manfredini Vassoler.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2022.

1. Manufatura Aditiva. 2. Fused Deposition
Modeling. 3. Poliamida. 4. Resistência Mecânica. I.
Vassoler, Jakson Manfredini, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Rodrigo Bernardes de Moura

OS EFEITOS DA VARIAÇÃO NOS PARÂMETROS DE FABRICAÇÃO E DO
PERCENTUAL DE UMIDADE NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE
COMPONENTES FABRICADOS POR FDM EM POLIAMIDA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Jakson Manfredini Vassoler

Comissão de Avaliação:

Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Prof. Rogério José Marczak

Prof. Felipe Tempel Stumpf

Porto Alegre, abril de 2022

AGRADECIMENTOS

À AEL Sistemas S.A. pela disponibilização da impressora 3D para a impressão dos corpos de prova desse trabalho;

Ao Rodrigo Barros, técnico do Grupo de Mecânica Aplicada (UFRGS), pelo auxílio para a realização dos ensaios mecânicos e empréstimo de materiais para a execução do trabalho.

MOURA, RODRIGO. Os efeitos da variação nos parâmetros de fabricação e do percentual de umidade nas propriedades mecânicas de componentes fabricados por FDM em poliamida. 2022. 19. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

RESUMO

A manufatura aditiva por FDM (*Fused Deposition Modeling*) progressivamente se mostra como um método de fabricação aplicável em componentes com responsabilidade estrutural. Por outro lado, para permitir avanços mais efetivos nesse contexto, ainda são necessários estudos referentes às propriedades mecânicas frente a variações de parâmetros de fabricação e condições de operação do material, como em ambiente com alta umidade relativa. Com esse objetivo, o estudo avalia os impactos na resistência mecânica da variação da altura de camada e do percentual de saturação em água em componentes fabricados por FDM em duas direções de impressão distintas empregando a poliamida (PA) como material. São propostos oito casos de estudo, utilizando as alturas de camada de 0,15 mm e 0,3 mm e condições de umidade do material seco e saturado, nas direções de impressão horizontal (XY) e vertical (ZX) sobre a mesa de impressão. Com base nos resultados, observa-se que maiores alturas de camada geram percentuais de saturação mais elevados para as duas direções de impressão analisadas, o que, por sua vez, pode modificar o comportamento mecânico do material. Os resultados mostram que para as duas alturas de camada existem reduções relevantes após a saturação em água na resistência à tração especialmente na direção ZX, e no módulo de elasticidade na direção XY. Comparando-se apenas as alturas de camada, observa-se um aumento na resistência à tração com a diminuição da altura de camada para a maioria dos casos de estudo.

PALAVRAS-CHAVE: Manufatura Aditiva, *Fused Deposition Modeling*, Poliamida, Resistência Mecânica.

MOURA, RODRIGO. The effects of variation in manufacturing parameters and percentage of moisture on the mechanical properties of components manufactured by FDM with polyamide. 2022. 19. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

ABSTRACT

Additive manufacturing by FDM (Fused Deposition Modeling) is progressively showing itself as a manufacturing method applicable in components with structural responsibility. On the other hand, to allow more effective advances in this context, studies are still needed regarding the mechanical properties in the face of variations in manufacturing parameters and operating conditions of the material, such as in an environment with high relative humidity. With this objective, the study evaluates the impacts on the mechanical resistance of the variation of layer height and of the saturation percentage in water in components manufactured in two different printing directions using polyamide (PA). Eight case studies are proposed, using layer heights of 0.15 mm and 0.3 mm in dry and saturated conditions of the material, in the horizontal (XY) and vertical (ZX) printing directions on the printing platform. Based on the results, it is observed that higher layer heights generate higher saturation percentages for the two analyzed printing directions, which in turn can modify mechanical behavior. The results show that for the two layer heights there are relevant reductions after saturation in water in the tensile strength especially in the ZX direction, and in the modulus of elasticity in the XY direction. When comparing the layer heights exclusively, an increase in the tensile strength is observed with the decrease in the layer height for most case studies.

KEYWORDS: Additive Manufacturing, Fused Deposition Modeling, Polyamide, Mechanical Resistance.

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos

E	Módulo de elasticidade	MPa
σ_m	Resistência à tração	MPa
α	Percentual de saturação de água	%
F	Força instantânea	N
A_{SE}	Área da seção transversal do corpo de prova na condição seca	mm ²
A_{SA}	Área da seção transversal do corpo de prova na condição saturada	mm ²
ε	Deformação	%
σ	Tensão	MPa
D.P.	Desvio Padrão	-
M_{SE}	Massa do corpo de prova seco	g
M_{SA}	Massa do corpo de prova saturado	g

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Nylon-6,6 (ORTEGA et al., 2016 - Adaptado).....	2
Figura 3.2 – Processo de manufatura aditiva por deposição de filamento fundido (FDM) (REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017- Adaptado).....	3
Figura 3.3 – Variação da direção de impressão de um corpo de prova. (a) Impressão na direção horizontal - XY. (b) Impressão na direção vertical – ZX. (c) Geometria representando os dois planos de impressão.....	5
Figura 3.4 – Microestrutura representativa de uma seção impressa por FDM.....	5
Figura 3.5 – Influência da altura de camada t no número de camadas e na reprodução da geometria.	6
Figura 3.6 – (a) Altura de camada de 0,2 mm. (b) Camada de 0,3 mm. (BACZKŹEWSKI et al., 2021–Adaptado)	6
Figura 3.7 – Visualização de áreas de contato entre camadas para os casos de altura de camada de 0,2 mm (a) e 0,3 mm (b). (BACZKŹEWSKI, P et al., 2021 - Adaptado).....	7
Figura 4.1 – Dimensões dos corpos de prova 1BA (ISO 527-2).....	8
Figura 4.2 – Representação da geometria de impressão em vista superior.	9
Figura 4.3 – Caixa de armazenamento do filamento durante a impressão.	10
Figura 5.1 – Corpos de prova impressos.	11
Figura 5.2 – Resultados para absorção de água em diagrama de caixas.	12
Figura 5.3 – (a) Resistência à tração na direção XY e (b) Módulo de elasticidade na direção XY.	13
Figura 5.4 - (a) Resistência à tração na direção ZX e (b) Módulo de elasticidade na direção ZX.....	13

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Propriedades do nylon-6,6, nylon-11 e nylon-6,9 (MARK, FRANCIS HERMAN, 2014 – Adaptado).	3
Tabela 4.1 – Casos de estudo e respectiva identificação.	8
Tabela 4.2 – Comparações realizadas para determinação das conclusões referentes ao objetivo do estudo.....	8
Tabela 4.3 – Parâmetros de fabricação com filamento de poliamida.....	9
Tabela 5.1 – Resultados para o percentual de água absorvido em cada caso de estudo.....	11
Tabela 5.2 – Resultados – Comparação 9 – Absorção de água (α) na direção XY.....	12
Tabela 5.3 – Resultados – Comparação 10 – Absorção de água (α) na direção ZX.	12
Tabela 5.4 – Resultados de σ_m e E.....	12
Tabela 5.5 – Resultados – Comparações 1, 2, 3 e 4.	13
Tabela 5.6 – Resultados – Comparações 5 e 6 entre os casos XY15SE/SA e XY30SE/SA....	14
Tabela 5.7 – Resultados – Comparações 7 e 8 entre os casos ZX15SE/SA e ZX30SE/SA.....	14

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVO.....	1
3	FUNDAMENTAÇÃO.....	2
3.1	Poliamidas.....	2
3.2	Fused Deposition Modeling.....	3
3.2.1	Direção de Impressão	4
3.2.2	Altura de Camada	6
3.3	Influência da umidade nas propriedades mecânicas na fabricação por FDM.....	7
4	METODOLOGIA.....	8
4.1	Casos de estudo.....	8
4.2	Fabricação dos corpos de prova.....	9
4.3	Ensaio de tração	10
4.4	Tratamento estatístico	11
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	11
5.1	Corpos de prova	11
5.2	Absorção de água.....	11
5.3	Propriedades mecânicas	12
5.3.1	Influência da condição de umidade	13
5.3.2	Influência da altura de camada	14
6	CONCLUSÕES	14
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
	ANEXO 1 – Tabela de resultados individuais por corpo de prova (massa e área transversal).18	
	ANEXO 2 – Curvas Tensão – Deformação para todos os ensaios realizados.	19

1 INTRODUÇÃO

A impressão 3D pelo método FDM (*Fused Deposition Modeling*) é um dos métodos de manufatura aditiva mais empregados atualmente. Por dispensar a necessidade de fabricação de ferramental específico, a tecnologia é muito utilizada para protótipos e peças que tenham baixo volume de produção, ou que possuam geometrias complexas e de difícil obtenção por métodos convencionais como os de usinagem ou de conformação. Essa técnica de fabricação emprega frequentemente materiais poliméricos, no entanto materiais metálicos e compósitos também têm sido utilizados com êxito na fabricação de componentes pelo método FDM de impressão 3D (REDWOOD et al., 2017). Esse processo de fabricação, contudo, ainda apresenta limitações, principalmente relacionadas às propriedades mecânicas resultantes das peças impressas. Uma das dificuldades inerentes ao método de fabricação é o fato de que a resistência mecânica varia significativamente em função da direção de impressão, podendo apresentar alto grau de anisotropia (LEVENHAGEN, NEIKO et al., 2019). Outro fator limitante é o tempo de fabricação que é tipicamente elevado quando comparado a métodos convencionais utilizados em linhas de produção, o que é uma desvantagem competitiva quando existe uma necessidade por um maior volume produtivo.

Em termos de materiais, um dos polímeros mais empregados nesse método de fabricação é a poliamida, que tem sido utilizada por diversas tecnologias no contexto da manufatura aditiva (REDWOOD et al., 2017). Devido a sua alta resistência mecânica e estabilidade térmica, esse polímero vem sendo empregado como matriz para filamentos de compósitos com aditivos de fibra de carbono segmentada para a fabricação rápida, por exemplo, de ferramental para injeção de polímeros (S.H. MASOOD; W.Q. SONG, 2004, 2005). Em termos de aplicações, a tecnologia é ainda empregada em indústrias de diversos setores, incluindo a indústria aeroespacial e médica, mas também para fins comerciais e domésticos. A fabricante Markforged®, por sua vez, utiliza o nylon como material base em sua tecnologia de impressão com deposição de fibra de vidro/carbono/aramida contínua. Segundo a marca, seus filamentos de nylon já são empregados para a fabricação de peças finais nos setores militar, aeroespacial, automobilístico. Para essas aplicações, em que o material possui responsabilidade estrutural e pode estar submetido a diversas condições ambientais, é fundamental determinar o comportamento do material ao longo do tempo, especialmente considerando a necessidade de resistência à umidade, de exposição a raios ultravioletas, de temperaturas extremas, entre outros. Polímeros possuem uma tendência natural de degradação ou alteração de importantes propriedades a partir da exposição à umidade, a raios ultravioletas ou a outras condições ambientais críticas (CALLISTER, W et al., 2009). Os efeitos desse tipo de condição sobre materiais poliméricos são razoavelmente conhecidos, entretanto a intensidade desses efeitos sobre a resistência mecânica ainda é pouco conhecida quando o método de fabricação utilizado é a manufatura aditiva (EUNSEOB KIM et al., 2016).

Para viabilizar a utilização desse método para a produção de peças submetidas a esforços elevados e expostas a ambientes com elevada umidade, é necessário consolidar o conhecimento ligado ao comportamento mecânico desses componentes. A segurança e qualidade do projeto depende diretamente da capacidade de prever esse comportamento nas condições de utilização da peça em questão. Dessa forma, é fundamental ser capaz de determinar o impacto da variação de parâmetros de impressão e da mudança das propriedades mecânicas promovida pelo material ao longo do tempo nas das peças que utilizam esse método de fabricação.

2 OBJETIVO

O objetivo do trabalho é estudar experimentalmente a influência da variação de parâmetros de impressão e do percentual de saturação de água da poliamida no módulo de

elasticidade e na resistência à tração, utilizando a técnica de manufatura aditiva por deposição de material fundido (FDM). Pretende-se determinar, a partir da variação da direção de impressão, da altura de camada e do percentual de saturação, quais fatores são mais significativos para a obtenção de melhores propriedades mecânicas e sob quais condições o percentual de umidade as afetou mais intensamente. Estas correlações podem auxiliar um projetista nas escolhas dos melhores parâmetros de fabricação de componentes submetidos a condições ambientais de alta umidade.

3 FUNDAMENTAÇÃO

3.1 Poliamidas

Polímeros, de forma geral, são definidos como macromoléculas formadas pela união de moléculas menores, os monômeros (SALDIVAR-GUERRA, E., & VIVALDO-LIMA, E., 2013). Muitos dos polímeros são orgânicos, sendo basicamente compostos por átomos de carbono, hidrogênio e outros elementos não metálicos, como oxigênio e nitrogênio (CALLISTER, W. D. J.; RETHWISCH, D. G, 2009).

Polímeros sintéticos são relativamente modernos, tendo se desenvolvido de forma mais intensa nas primeiras décadas do século XX. Atualmente, essa classe de materiais é amplamente empregada em tecidos, peças mecânicas, tintas, adesivos, componentes eletrônicos (SALDIVAR-GUERRA, E., & VIVALDO-LIMA, E., 2013). Além disso, grande parte dos processos de manufatura aditiva faz uso desse tipo de material. Como exemplos, pode-se citar o polietileno (PE), o policarbonato (PC), o poliestireno (PS) e a poliamida (PA). Esse último é o objeto de estudo do presente trabalho e será caracterizado em maiores detalhes. Poliamidas são polímeros que possuem grupos amida (-CONH-) recorrentes como parte da cadeia polimérica principal (SALDIVAR-GUERRA, E., & VIVALDO-LIMA, E., 2013). Também conhecidos genericamente por nylon, a nomenclatura desses polímeros usualmente é acompanhada por dois algarismos, que fazem referência à estrutura atômica do material em questão. Como exemplo, pode-se citar o nylon-6,6, que é constituído por dois monômeros, com cada um contendo 6 átomos de carbono (MARK, FRANCIS HERMAN, 2014). A Figura 3.1 exibe a estrutura atômica desse polímero.

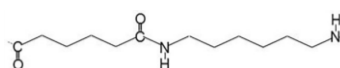


Figura 3.1: Nylon-6,6 (ORTEGA et al., 2016 - Adaptado).

A utilização desse polímero como plástico foi introduzida por DuPont em 1938, inicialmente empregando o nylon-6,6 para a fabricação de cerdas para escovas de dente. A poliamida é considerada como o primeiro plástico de engenharia, sendo a classe mais representativa desse tipo de material atualmente (MARK, FRANCIS HERMAN, 2014).

De forma geral, as poliamidas possuem propriedades mecânicas com valores relativamente elevados, boa estabilidade química e um ponto de fusão elevado. Apesar de serem considerados materiais semicristalinos, esses polímeros apresentam fortes ligações dos átomos de hidrogênio entre suas cadeias atômicas, o que permite a formação de uma grande parcela de regiões cristalinas. Esse fato faz com que o nylon mantenha elevada rigidez mesmo quando em temperaturas superiores à sua temperatura de transição vítrea até praticamente a temperatura de fusão. Dessa forma, existe um balanço positivo de propriedades. As regiões cristalinas contribuem para uma boa rigidez, elevadas resistências mecânica, química, à fluência e boa estabilidade térmica. As parcelas amorfas, por sua vez, permitem uma boa resistência ao impacto e alto alongamento (MARK, FRANCIS HERMAN, 2014). Sendo assim, a Tabela 3.1 exibe algumas propriedades físicas e mecânicas de alguns tipos de nylon.

Tabela 3.1: Propriedades do nylon-6,6, nylon-11 e nylon-6,9 (MARK, FRANCIS HERMAN, 2014 – Adaptado).

Propriedade	Nylon-6,6	Nylon-11	Nylon-6,9	Método de ensaio ASTM
Gravidade específica	1,14	1,04	1,09	D792
Absorção de água (saturação), %	8,5%	1,9%	4,5%	-
Ponto de fusão, °C	255	194	205	D2117
Tensão de escoamento, MPa	83	55	55	D638
Alongamento na ruptura, %	60-90	200	125	D638

As poliamidas usualmente são materiais higroscópicos, sendo a presença de água no material considerada uma impureza em processos de fabricação como o de injeção (MARK, FRANCIS HERMAN, 2014). Adicionalmente, estudos empregando nylon em impressão 3D (KIKUCHI et al., 2020) e nylon-6,6 injetado (PAI, C.-C.; JENG, R.-J.; GROSSMAN, S.J. & HUANG, J.-C., 1989) indicam que um aumento no percentual de umidade resulta em uma piora nas propriedades mecânicas como módulo de elasticidade, módulo de flexão e tensão de escoamento. Por outro lado, pode ocorrer um aumento na resistência ao impacto (HUANG, J.-C.; WU, T.-H.; WU, C.-L., 1995).

Conforme MOHD ISHAK et al. (1994) e HIDEYUKI et al. (2020), a absorção de água pela poliamida, especialmente em percentuais elevados, leva à dissociação e quebra das pontes de hidrogênio entre os grupos amida adjacentes, essencialmente agindo com um plastificante do material para aumentar a mobilidade das cadeias poliméricas. Esse fenômeno de degradação é o responsável por reduzir a resistência mecânica do nylon em longos períodos.

3.2 Fused Deposition Modeling

A manufatura aditiva se caracteriza por ser um processo de fabricação mais recente que os formativos, como a injeção e estampagem, ou que os subtrativos, como os de usinagem. O método é chamado genericamente de impressão 3D, sendo que todas as suas subdivisões se utilizam do empilhamento progressivo de camadas de material, com altura da ordem de centésimos de milímetro, para a construção do componente desejado. A manufatura aditiva pode ser dividida em seis principais tecnologias, sendo elas *Fused Deposition Modeling* (FDM), *Stereolithography* (SLA), *Selective Laser Sintering* (SLS), *Material Jetting*, *Binder Jetting* e *Powder Bed Fusion* (DMLS) (REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017).

O método de modelagem por deposição de material fundido (FDM) se caracteriza por ser um processo de fabricação que faz uso majoritário de polímeros. Os componentes são fabricados a partir do deslocamento de um bico extrusor com elevada temperatura, pelo qual passa um filamento delgado de formato cilíndrico que é fundido e então depositado em linhas sobre uma plataforma aquecida. A Figura 3.2 exhibe esquematicamente o funcionamento do processo de deposição.

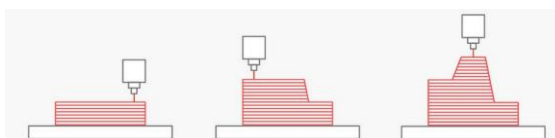


Figura 3.2 – Processo de manufatura aditiva por deposição de filamento fundido (FDM) (REDWOOD; SCHÖFFER; GARRET, 2017- Adaptado).

Conforme a Figura 3.2, a peça é construída com o empilhamento sucessivo de camadas de material fundido. Quando um nível do componente é terminado, ocorre a movimentação vertical da plataforma de impressão, dando início à fabricação de uma nova camada. Esse processo é repetido tantas vezes quantas forem necessárias até a finalização da peça.

Para realizar o projeto de impressão adequado, de forma a se obterem as propriedades mecânicas e as características dimensionais de interesse, diversas escolhas devem ser feitas de

acordo com o material especificado. Essas definições estão principalmente relacionadas aos parâmetros de máquina, ao posicionamento e à orientação da peça na plataforma de impressão e a adaptações específicas de geometria para esse processo de fabricação. No método FDM, alguns dos parâmetros relevantes são explanados na sequência:

- **Direção de impressão:** orientação relativa da peça sobre a plataforma. É fundamental determinar a direção em que os esforços sobre o componente atuarão para determinar a direção de impressão, uma vez que a resistência mecânica do material sofre influência significativa de acordo com o eixo e com o ângulo de impressão (RAJPUROHIT et al., 2018).
- **Altura de camada:** refere-se à espessura de cada camada impressa. Alturas maiores resultam em tempos totais de impressão menores e em uma menor capacidade de reprodução da geometria (REDWOOD et al., 2017), enquanto camadas de menor altura estão associadas a maiores tempos de fabricação e, por vezes, resistências à tração mais elevadas (RAJPUROHIT et al., 2018).
- **Percentual de preenchimento:** refere-se essencialmente à quantidade de material empregada na construção do componente. Percentuais mais baixos indicam que a peça terá uma menor densidade, sendo que o valor de 100% de preenchimento corresponderia à peça maciça.
- **Velocidade de impressão:** refere-se à velocidade de movimentação do bico extrusor durante a impressão, estando intimamente ligada ao tempo de impressão.
- **Temperatura de impressão:** refere-se à temperatura com a qual o filamento de impressão será fundido e depositado durante o processo.
- **Suporte de impressão:** refere-se à adição de material, a ser posteriormente removido do componente fabricado, que não é parte da geometria original da peça, com o objetivo de sustentar camadas impressas que não são suportadas pela camada imediatamente inferior a elas. São necessários, por exemplo, em geometrias com pontes ou projeções externas. É usual que o emprego de suportes prejudique a qualidade superficial da peça final.

Os parâmetros apresentados representam apenas uma parcela do total daqueles que devem ser definidos pelo projetista de um componente impresso via FDM. Em termos de variação de resistência mecânica, alguns desses parâmetros se mostram mais relevantes. Conforme estudos indicam (RAJPUROHIT et al., 2018; RANKOUHI et al., 2016; SHUBHAM et al., 2016), a altura de camada tem impacto direto na resistência à tração de peças fabricadas por esse método para diferentes tipos de material. Adicionalmente, esse parâmetro é relevante no tempo total de impressão. Outra definição importante nesse contexto é a direção de impressão, que também afeta significativamente a resistência à tração dos componentes (BASF SE, 2019, 2019, 2020; ZOU, 2016). Por essas razões, esses parâmetros foram escolhidos como foco de estudo, sendo necessários defini-los de forma mais detalhada portanto.

3.2.1 Direção de Impressão

No projeto de uma peça fabricada por FDM, é fundamental determinar qual será a orientação da peça sobre a plataforma durante o processo de impressão. Uma peça pode ser fabricada em diferentes direções, a depender da geometria, das dimensões totais e da direção de atuação dos esforços sobre o componente. Para ilustrar diferentes orientações, a Figura 3.3 exibe a comparação da mesma peça, nesse caso um corpo de prova genérico, em duas diferentes direções de impressão, além de um componente representativo que é construído nos dois planos de impressão ilustrados em a) e b).

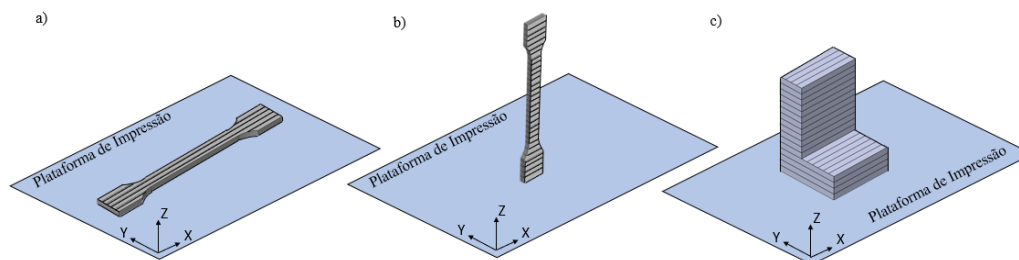


Figura 3.3 – Variação da direção de impressão de um corpo de prova. (a) Impressão na direção horizontal - XY. (b) Impressão na direção vertical - ZX. (c) Geometria representando os dois planos de impressão.

Como se observa no caso a) da Figura 3.3, a deposição de camadas ocorre ao longo da espessura do corpo de prova, enquanto no caso b) a deposição de camadas se dá ao longo da dimensão principal da peça. A depender da geometria de cada componente, pode ser mais vantajoso optar por uma ou por outra orientação em função da natureza do processo FDM. Geometrias cilíndricas, por exemplo, podem ser de difícil fabricação na direção XY pela necessidade da adição de suportes de impressão internos e externos ao cilindro, o que pode prejudicar a qualidade da peça final. Adicionalmente, em ambos os casos a estrutura do componente não é homogênea, sendo possível visualizar as linhas e camadas de impressão, que estão representadas de forma propositalmente exagerada na ilustração. Esse é um efeito inerente ao processo FDM, que gera um elevado grau de anisotropia na peça (LEVENHAGEN, NEIKO; DADMUN, MARK, 2019). Esse fenômeno pode ser melhor compreendido inicialmente através da observação da Figura 3.4, que exibe uma seção representativa de uma impressão por FDM.

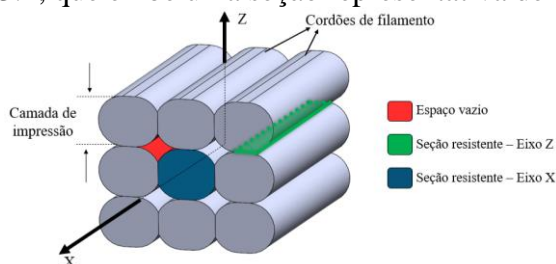


Figura 3.4 – Microestrutura representativa de uma seção impressa por FDM.

É relevante fazer a diferenciação das regiões microestruturais de uma seção impressa. A área em vermelho na Figura 3.4 representa espaços vazios que são resultantes do empilhamento e alinhamento sucessivo dos cordões de filamento. Já a área em azul representa a parcela resistente de material ao longo do cordão de filamento fundido, enquanto a região em verde se refere à área de adesão entre diferentes camadas impressas.

Estudos indicam (LI et al., 2002) a existência de uma diferença considerável em termos de propriedades mecânicas entre essas regiões. Enquanto ao longo da direção X um cordão é depositado de maneira contínua e a uma temperatura aproximadamente constante, na direção Z a adesão entre camadas se dá pela energia térmica do cordão recém fundido, que entra em contato com a camada inferior já solidificada (LI et al., 2002). Quando o filamento é depositado, ele está a uma temperatura significativamente superior à temperatura de transição vítrea do material, o que favorece o desenvolvimento de ligações adesivas entre as diferentes camadas. Essas ligações, no entanto, não apresentam as mesmas propriedades mecânicas do material original utilizado para produzir os filamentos (LI et al., 2004). Nos casos exibidos na Figura 3.3, por exemplo, a depender do material, a resistência à tração do caso a) pode chegar ao dobro do que se atinge no caso b) (BASF SE, 2019, 2019, 2020).

Frequentemente é possível fabricar uma mesma geometria com diferentes orientações sobre a plataforma de impressão. Em razão disso, para um projeto adequado, é necessária uma análise preliminar da direção de atuação dos esforços mecânicos sobre o componente. Um

desenvolvimento ótimo de impressão FDM promove o alinhamento da direção principal de deposição dos cordões de filamento com a direção das forças atuantes sobre a peça.

3.2.2 Altura de Camada

O parâmetro de altura de camada se refere à espessura de cada uma das camadas empregadas na construção da peça em questão. Sendo assim, a Figura 3.5 exibe de forma representativa uma mesma geometria com alturas de camada distintas.

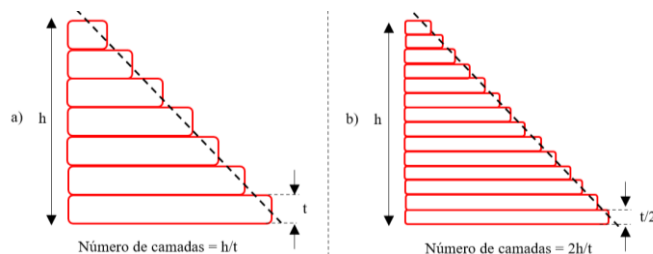


Figura 3.5 – Influência da altura de camada t no número de camadas e na reprodução da geometria.

Como se observa, uma diminuição da espessura de camada gera um aumento do número total de camadas. Pode-se afirmar que o tempo de impressão varia de forma linear com o número de camadas impressas (REDWOOD et al., 2017). Dessa forma, visando a uma redução no tempo de impressão, deve-se projetar o componente com a maior espessura de camada possível, diminuindo assim o número total de camadas.

Por outro lado, o aumento demasiado desse parâmetro pode causar efeitos indesejáveis relacionados ao acabamento superficial e à capacidade de reprodução da geometria da peça (REDWOOD et al., 2017). Observando a Figura 3.5, percebe-se que no caso a) há uma maior discrepância entre a linha tracejada preta, que representa a geometria idealizada de projeto, e a geometria impressa de fato que é ilustrada em vermelho. Conclui-se que, para fabricar a geometria da forma mais fidedigna possível, a altura de camada tenderia a um valor nulo.

Adicionalmente, estudos indicam que a variação da espessura de camada tem impactos na resistência mecânica da peça. Segundo sugerido por RAJPUROHIT et al. (2021), uma altura de camada menor gera uma maior área de contato entre as camadas impressas, representada ilustrativamente em verde na Figura 3.4, aumentando a área mecanicamente resistente e por consequência elevando a resistência à tração nessa direção. Conforme outro estudo (BACZXŻEWSKI et al., 2021), esse fenômeno foi observado em um caso experimental exibido na Figura 3.6, que mostra duas seções transversais ampliadas de peças impressas em PLA com diferentes alturas de camada e utilizando 100% de preenchimento, mantendo-se os demais parâmetros de fabricação.

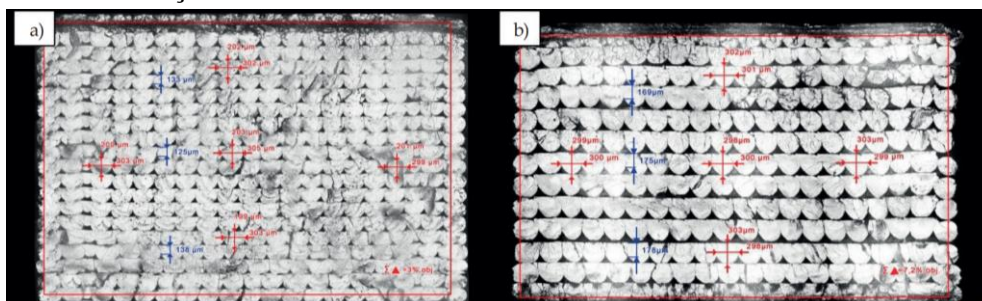


Figura 3.6 – (a) Altura de camada de 0,2 mm. (b) Camada de 0,3 mm. (BACZXŻEWSKI et al., 2021–Adaptado)

Na Figura 3.6, as camadas estão empilhadas ao longo do eixo Z. Observa-se que, apesar de utilizar um percentual de preenchimento de 100%, ainda existem áreas vazias em que não há presença do material de impressão. Essas regiões são representadas em preto, em contraste com as regiões em branco ou cinza, que representam o material polimérico de impressão. Sendo assim, de forma simplificada, quanto maior é a área preta entre as camadas, menor é área de

contato entre elas. A Figura 3.7, por sua vez, é uma ampliação da Figura 3.6 e foca na diferença existente entre os dois casos apresentados.

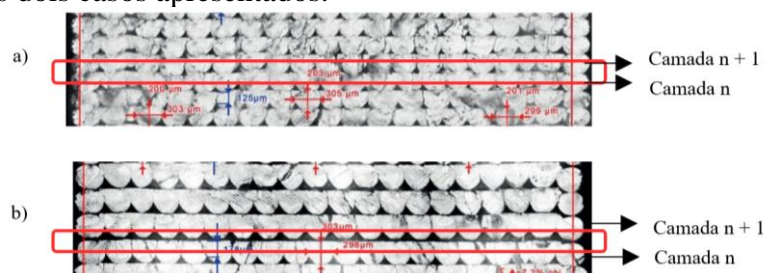


Figura 3.7 – Visualização de áreas de contato entre camadas para os casos de altura de camada de 0,2 mm (a) e 0,3 mm (b). (BACZKŹEWSKI, P et al., 2021 - Adaptado).

Comparando os dois casos da Figura 3.7, no caso a), com menor espessura de camada, a microestrutura da seção é mais homogênea, com menos áreas vazias, e a região de adesão entre camadas é maior. É relevante perceber que no caso b), no destaque circulado em vermelho, o contato das camadas é mínimo. Dessa forma, é necessário avaliar o componente com o objetivo de verificar vantagens referentes a um menor tempo de impressão em caso de adoção de maiores alturas de camada ou então de uma maior resistência mecânica e melhor resolução de impressão para menores alturas. A depender da aplicação da peça, essas ou aquelas características podem ser priorizadas durante o projeto.

3.3 Influência da umidade nas propriedades mecânicas na fabricação por FDM

Os polímeros, em especial os higroscópicos como as poliamidas, estão sujeitos à absorção de umidade ambiente, o que pode levar a alterações em suas propriedades mecânicas (MARK, FRANCIS HERMAN, 2014). No que se refere especificamente ao processo FDM, no entanto, existem poucos estudos referentes aos efeitos ambientais, como a absorção de água, sobre as propriedades das peças fabricadas por esse método (EUNSEOB, KIM; YONG-JUN, SHIN; SUNG-HOON, AHN, 2016).

KIKUCHI et al. (2020) elaborou um estudo utilizando o nylon como material de impressão, que mostrou uma diminuição expressiva do módulo de elasticidade partir da elevação do percentual de umidade da amostra ensaiada. Dados fornecidos pela fabricante de filamentos para impressão BASF exibem aumentos significativos em termos de resistência à tração e módulo de elasticidade nos casos em que corpos de prova de nylon impresso por FDM passaram por um processo de secagem antes da execução dos ensaios (BASF SE, 2019). EUNSEOB KIM et al. (2016), por sua vez, realizou uma comparação entre amostras impressas em diferentes direções e amostras injetadas de material ABS em relação ao percentual de umidade absorvido quando expostos a diferentes condições ambientais. Posteriormente, verificou-se a variação da resistência à tração e módulo de elasticidade em cada caso. O autor realizou a impressão de corpos de prova na direção vertical, a 0° e a 45° na horizontal sobre a plataforma de impressão. Na sequência, as amostras impressas e injetadas foram imersas em água destilada a 20°C e a 60°C, tendo sido pesadas periodicamente por um intervalo de 300 horas. Dado tempo suficiente, ocorreu a saturação dos corpos de prova injetados, a 45°, a 0° e na vertical nos valores respectivos de 0,339%, 5,972%, 5,131% e 7,879% de umidade. Adicionalmente, após a realização de ensaios de tração com as amostras, o autor observou em todos os casos uma redução do módulo de elasticidade e da resistência à tração do material.

Sugere-se, portanto, que as peças fabricadas por FDM em ABS são capazes de absorver um percentual maior de água em comparação com o processo de injeção. Segundo EUNSEOB KIM et al. (2016), a diferença entre os percentuais se dá em função da presença de regiões vazias entre camadas e cordões de filamento. Sendo assim, é relevante determinar se o

fenômeno ocorre com outros materiais e quais são os parâmetros de impressão que influenciam em uma maior ou menor absorção de umidade.

4 METODOLOGIA

4.1 Casos de estudo

Para avaliar o módulo de elasticidade e resistência à tração do material, optou-se pela realização de ensaios de tração com base na norma ISO 527 (2012). Para cada caso, foram impressos 5 corpos de prova com dimensões exibidas na Figura 4.1, de acordo com o tipo 1BA estabelecido pela norma.

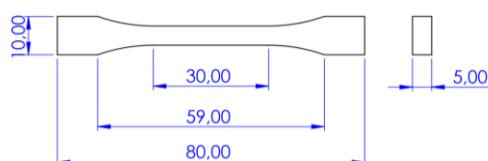


Figura 4.1 – Dimensões dos corpos de prova 1BA (ISO 527-2).

Para estudar a influência da direção de impressão, da altura de camada e da condição de umidade no comportamento mecânico da poliamida impressa por FDM, definiram-se 8 casos de estudo. Foram determinadas duas direções de impressão XY e ZX, conforme Figura 3.3, duas alturas de camada (0,15 mm e 0,3 mm) e as condições seca ou saturada do material. O filamento usado foi o Ultrafuse PA (BASF SE, 2019). Esses casos são exibidos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Casos de estudo e respectiva identificação.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8
Direção de impressão	XY	XY	XY	XY	ZX	ZX	ZX	ZX
Altura de camada [mm]	0,15	0,15	0,3	0,3	0,15	0,15	0,3	0,3
Condição de umidade	Seco	Saturado	Seco	Saturado	Seco	Saturado	Seco	Saturado
Identificação	XY15SE	XY15SA	XY30SE	XY30SA	ZX15SE	ZX15SA	ZX30SE	ZX30SA

Para possibilitar a avaliação dos resultados e a elaboração de conclusões, foram propostas 10 comparações entre os casos de estudo. A Tabela 4.2 exibe essas comparações, juntamente com objetivo específico de cada uma e as respectivas grandezas analisadas.

Tabela 4.2 – Comparações realizadas para determinação das conclusões referentes ao objetivo do estudo.

	Casos	Grandezas	Objetivo da comparação
Comparação 1	XY15SE	E, σ_m	Avaliar a influência da absorção de água em E e σ_m para a altura de camada de 0,15 mm na direção XY.
	XY15SA		
Comparação 2	XY30SE	E, σ_m	Avaliar a influência da absorção de água em E e σ_m para a altura de camada de 0,3 mm na direção XY.
	XY30SA		
Comparação 3	ZX15SE	E, σ_m	Avaliar a influência da absorção de água em E e σ_m para a altura de camada de 0,15 mm na direção ZX.
	ZX15SA		
Comparação 4	ZX30SE	E, σ_m	Avaliar a influência da absorção de água em E e σ_m para a altura de camada de 0,3 mm na direção ZX.
	ZX30SA		
Comparação 5	XY15SE	E, σ_m	Avaliar a influência da altura de camada em E e σ_m para o material seco na direção XY.
	XY30SE		
Comparação 6	XY15SA	E, σ_m	Avaliar a influência da altura de camada em E e σ_m para o material saturado na direção XY.
	XY30SA		
Comparação 7	ZX15SE	E, σ_m	Avaliar a influência da altura de camada em E e σ_m para o material seco na direção ZX.
	ZX30SE		
Comparação 8	ZX15SA	E, σ_m	Avaliar a influência da altura de camada em E e σ_m para o material saturado na direção ZX.
	ZX30SA		
Comparação 9	XY15SA	α	Avaliar a influência da altura de camada no percentual de saturação do corpo de prova na direção XY.
	XY30SA		
Comparação 10	ZX15SA	α	Avaliar a influência da altura de camada no percentual de saturação do corpo de prova na direção ZX.
	ZX30SA		

4.2 Fabricação dos corpos de prova

Inicialmente, antes de iniciar a fabricação dos corpos de prova, foi necessário submeter o filamento de poliamida a um processo de secagem. Conforme indicado pelo *data sheet* do fabricante (BASF SE, 2019), o carretel de filamento foi colocado em um forno a ar a uma temperatura de 70°C por 4 horas e 30 minutos.

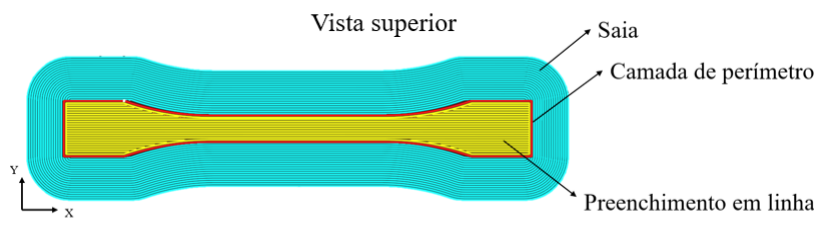
A impressora utilizada foi o modelo Guider IIs da fabricante Flashforge com bico de diâmetro 0,4 mm, sendo o Flashprint o *software* de impressão. O equipamento foi mantido fechado durante a operação e a adesão dos corpos de prova à plataforma de impressão foi realizada com a aplicação de cola do tipo bastão PVA. Os parâmetros de impressão empregados são exibidos na Tabela 4.3. Essas definições se deram com base primeiramente no *data sheet* do filamento (BASF SE, 2019), tendo sido ajustadas posteriormente a partir de testes de impressão realizados antes da fabricação dos corpos de prova.

Tabela 4.3 – Parâmetros de fabricação com filamento de poliamida.

Parâmetro	Valor
Temperatura do extrusor [°C]	240
Temperatura da plataforma [°C]	120
Velocidade de impressão [mm/s]	35
Camadas de perímetro	1
Preenchimento [%]	100
Padrão de preenchimento	Em linha
Número de camadas inferiores	3
Número de camadas superiores	3

Com isso, a Figura 4.2 apresenta as configurações XY e ZX respectivamente obtidas através do *software* de impressão.

Casos XY15SE, XY15SA, XY30SE, XY30SA (Tabela 4.1)



Casos ZX15SE, ZX15SA, ZX30SE, ZX30SA (Tabela 4.1)

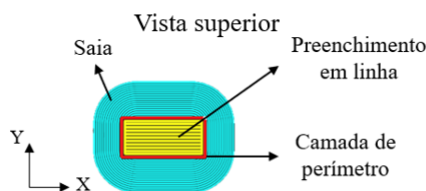


Figura 4.2 – Representação da geometria de impressão em vista superior.

Em ambas as orientações, adicionou-se uma saia apenas à primeira camada de impressão do corpo de prova, de forma a permitir uma maior aderência à plataforma de impressão. Ao final do processo de impressão, a saia foi removida.

Durante a impressão, o filamento foi mantido em uma caixa fechada, apenas com um orifício para a passagem do material até a impressora. No interior da caixa, foi adicionado sílica-gel com o objetivo de reduzir a umidade relativa do ar, diminuindo assim a absorção de umidade por parte do nylon durante a impressão. A Figura 4.3 exhibe o aparato descrito.



Figura 4.3 – Caixa de armazenamento do filamento durante a impressão.

Após a impressão dos 40 corpos de prova individualmente, realizou-se a identificação e o armazenamento de cada caso de estudo em uma embalagem com a presença de sílica-gel. Os corpos de prova dos casos XY15SE, XY30SE, ZX15SE e ZX30SE foram mantidos nas embalagens até a realização dos ensaios de tração. Para promover a absorção de água dos casos XY15SA, XY30SA, ZX15SA e ZX30SA, realizou-se a imersão em água destilada por um período de 360 horas. Durante esse período, a cada 48 horas um corpo de prova de cada caso foi pesado e sua massa anotada. Determinou-se o atingimento da saturação quando a variação de massa do corpo de prova foi menor do que 0,1% em duas medidas consecutivas. Ao final, realizou-se a pesagem e medição da seção transversal de todos os corpos de prova. Para medir as dimensões de interesse, empregou-se um paquímetro digital Mitutoyo 500-196-30. A área considerada foi a menor obtida a partir da verificação de três pontos ao longo do comprimento útil do corpo de prova. A balança utilizada foi o modelo AL 500C da marca Marte com resolução de 0,001 g. O cálculo do percentual de água absorvido foi feito através da variação de massa antes e depois do período imerso na água destilada.

4.3 Ensaios de tração

De acordo com a norma ISO 527-2 (2012), para um ensaio de tração utilizando o corpo de prova do tipo 1BA e que se deseje obter o módulo de elasticidade, a velocidade a ser empregada é de 1 mm/min. A máquina de ensaios universal utilizada foi o modelo AG-X Plus da fabricante Shimadzu com célula de carga de 250 kN, tendo sido empregado um *clip gauge*, modelo SG25-50AD da Shimadzu, para aquisição da deformação durante o regime elástico em cada corpo de prova.

A tensão de engenharia σ durante o ensaio é calculada a partir da razão entre a força F em cada instante e da área inicial da seção transversal do corpo de prova. Para os casos 1, 3, 5 e 7 (Tabela 4.1), em que os corpos de prova estão secos, a tensão σ é calculada usando a área inicial da seção transversal dos corpos de prova secos A_{SE} . Já para os casos 2, 4, 6 e 8 (Tabela 4.1), em que os corpos de prova estão saturados de água, a tensão é calculada com a área inicial da seção transversal dos corpos de prova saturados A_{SA} . Os valores das áreas para cada corpo de prova podem ser verificados no ANEXO 1. Adicionalmente, é relevante definir como as grandezas de interesse, módulo de elasticidade e resistência à tração, são calculadas. Primeiramente, para determinação do módulo de elasticidade pela ISO 527-1 (2012), foi definido o método “*Chord slope*”, calculado pela Equação (4.1),

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (4.1)$$

onde E é o módulo de elasticidade em MPa, σ_1 é a tensão em MPa medida em um valor de deformação de $\varepsilon_1 = 0,0005$ (0,05%) e σ_2 é a tensão em MPa medida em um valor de deformação de $\varepsilon_2 = 0,0025$ (0,25%). A resistência à tração σ_m , por sua vez, é definida pela norma como sendo a tensão no primeiro local de máximo observado durante o ensaio de tração.

4.4 Tratamento estatístico

A fim de avaliar os resultados de forma adequada, foi necessário realizar um tratamento estatístico dos dados obtidos através dos ensaios. Sendo assim, foi determinada a média aritmética simples e o desvio padrão amostral para os valores de módulo de elasticidade (E), resistência à tração (σ_m) para todos os casos de estudo. Adicionalmente, para os casos envolvendo a saturação do material, determinou-se também a média e desvio padrão amostral do percentual de água absorvido (α).

Para determinar a significância estatística dos resultados, definiram-se dez comparações entre os casos de estudo, com posterior realização do teste-t para a rejeição ou aceitação da hipótese nula ($H_0: \mu_1 = \mu_2$) com nível de significância de 5% (SELTMAN, HOWARD, 2018).

O teste-t para cada comparação resultará em um valor p . Para valores de p maiores do que 0,05, aceita-se a hipótese nula H_0 . Se o valor p for menor ou igual a 0,05, rejeita-se H_0 (SELTMAN, HOWARD, 2018), ou seja, o resultado apresenta significância estatística e as médias das grandezas analisadas são estatisticamente distintas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Corpos de prova

Foram fabricados quatro tipos de corpos de prova, sendo dez unidades de cada. A Figura 5.1 exibe cada caso impresso com a respectiva identificação na parte inferior da imagem.

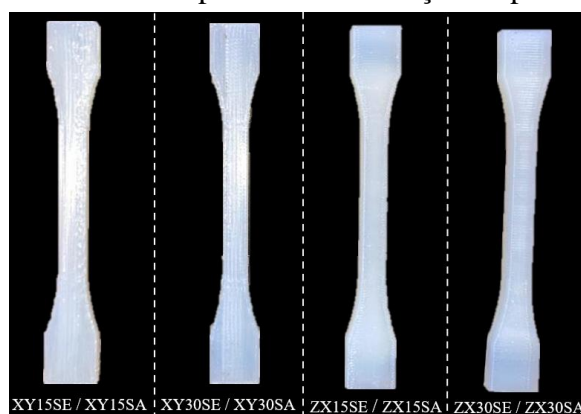


Figura 5.1 – Corpos de prova impressos.

Analisando fisicamente os corpos de prova é possível notar a orientação das linhas de impressão. Nos casos com prefixo XY, estão alinhadas com a direção longitudinal do corpo de prova, enquanto nos casos ZX estão orientadas na direção transversal do corpo de prova. As dimensões e massas de cada corpo de prova podem ser verificados no ANEXO 1.

5.2 Absorção de água

O percentual de água absorvido em cada caso de estudo pode ser observado na Tabela 5.1, tendo sido calculado a partir da variação de massa dos corpos de prova após a imersão em água destilada. A Figura 5.2, por sua vez, exibe os resultados em forma de gráfico de caixas, com os quartis, mediana e média indicados.

Tabela 5.1 – Resultados para o percentual de água absorvido em cada caso de estudo.

	$\bar{\alpha} \pm D.P. [\%]$
XY15SA	$8,13 \pm 0,42$
XY30SA	$8,81 \pm 0,48$
ZX15SA	$9,28 \pm 0,46$
ZX30SA	$12,42 \pm 0,27$

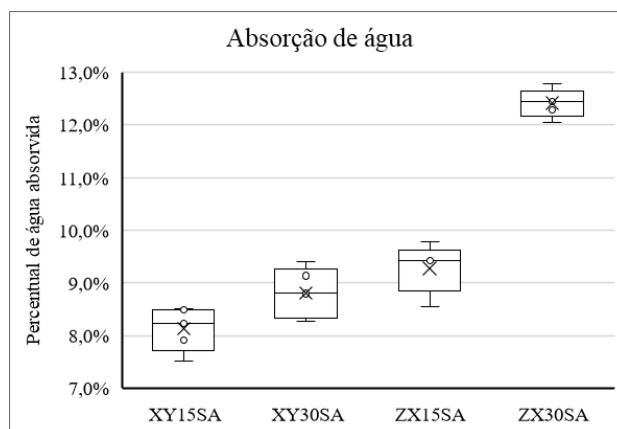


Figura 5.2 – Resultados para absorção de água em diagrama de caixas.

Conforme indicado na Tabela 4.2, para determinar se a altura de camada influencia no percentual de saturação da peça impressa foram calculados os valores p resultantes do teste-t para a Comparações 9 e 10. A Tabela 5.2 e a Tabela 5.3 exibem os resultados.

Tabela 5.2 – Resultados – Comparação 9 – Absorção de água (α) na direção XY

		XY15SA	XY30SA	Variação [%]	p
Percentual de saturação (α) [%]	Comparação 9	8,13	8,81	8,36	0,046

Tabela 5.3 – Resultados – Comparação 10 – Absorção de água (α) na direção ZX.

		ZX15SA	ZX30SA	Variação [%]	p
Percentual de saturação (α) [%]	Comparação 10	9,28	12,42	33,84	0,000001

A partir dos resultados, nota-se que em ambas as comparações houve uma elevação no percentual de saturação com o aumento da altura de camada. Adicionalmente os valores p indicam a existência de uma relação estatisticamente significativa entre a altura de camada e o percentual de saturação do corpo de prova para as duas direções de impressão. Acredita-se que o fenômeno esteja relacionado a uma maior quantidade de espaços vazios entre as camadas e cordões de filamento no caso de maiores alturas de camada, conforme explanado no Capítulo 3.3. A presença desses vazios aumenta a área de contato efetiva do meio com o material, também favorecendo a absorção de água do corpo de prova e aumentando o percentual de saturação.

5.3 Propriedades mecânicas

Os valores de resistência à tração σ_m e módulo de elasticidade (E) médios são exibidos com seu respectivo desvio padrão pela Tabela 5.4. As curvas Tensão – Deformação estão presentes no ANEXO 2.

Tabela 5.4 – Resultados de σ_m e E .

	$\bar{\sigma}_m \pm D.P. [MPa]$	$\bar{E} \pm D.P. [MPa]$
XY15SE	47,7 \pm 1,7	1.801,6 \pm 152,7
XY15SA	34,9 \pm 2,3	294,4 \pm 16,8
XY30SE	44,8 \pm 2,0	1.628,8 \pm 229,4
XY30SA	31,0 \pm 2,4	273,0 \pm 34,4
ZX15SE	20,1 \pm 1,7	1.041,0 \pm 81,7
ZX15SA	7,1 \pm 1,1	237,7 \pm 19,7
ZX30SE	19,1 \pm 1,0	617,4 \pm 95,1
ZX30SA	4,9 \pm 0,4	220,8 \pm 6,5

Com o objetivo de facilitar a visualização e comparação dos resultados em cada direção de impressão, foram elaborados diagramas de caixa exibidos na Figura 5.3 e na Figura 5.4.

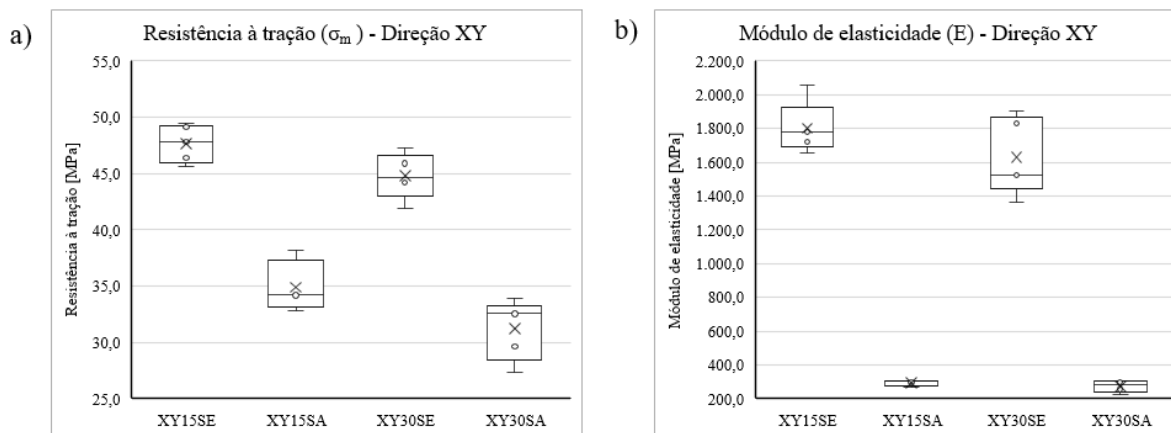


Figura 5.3 – (a) Resistência à tração na direção XY e (b) Módulo de elasticidade na direção XY.

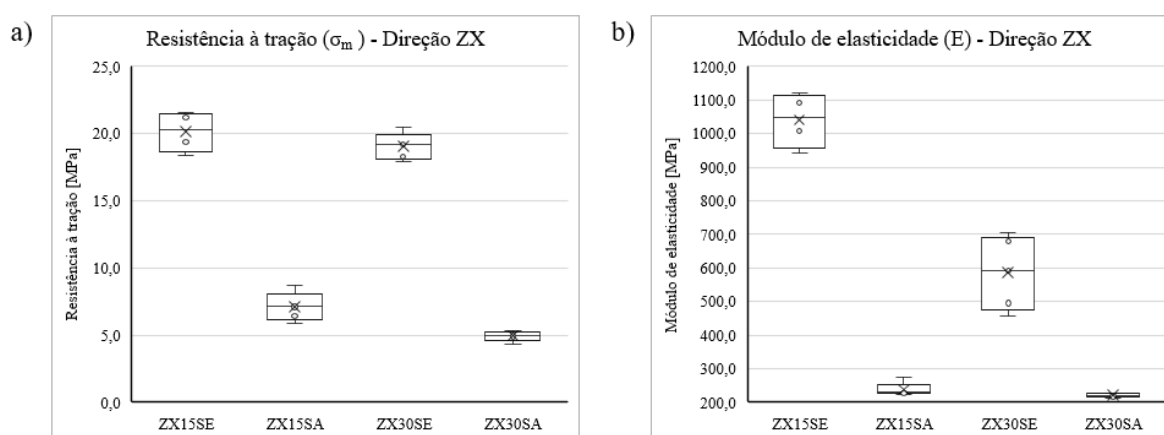


Figura 5.4 - (a) Resistência à tração na direção ZX e (b) Módulo de elasticidade na direção ZX.

5.3.1 Influência da condição de umidade

Para possibilitar uma análise dos resultados mais criteriosa em termos estatísticos da influência da umidade na resistência à tração e no módulo de elasticidade, foi elaborada a Tabela 5.5. Essa tabela realiza as comparações de 1 a 4 provenientes da Tabela 4.2, exibindo o percentual de variação das propriedades de interesse e seu respectivo valor p .

Tabela 5.5 – Resultados – Comparações 1, 2, 3 e 4.

		SE (Seco)	SA (Saturado)	Varição [%]	p	
Resistência à tração ($\bar{\sigma}_m$) [MPa]	Comparação 1	XY15	47,7	34,9	-26,8%	0,00003
	Comparação 2	XY30	44,8	31,0	-30,3%	0,00002
	Comparação 3	ZX15	20,1	7,1	-64,7%	0,000001
	Comparação 4	ZX30	19,1	5,0	-74,0%	0,00000002
Módulo de elasticidade (\bar{E}) [MPa]	Comparação 1	XY15	1801,6	294,4	-83,7%	0,0000002
	Comparação 2	XY30	1628,8	273,0	-83,2%	0,000001
	Comparação 3	ZX15	1041,0	237,7	-77,2%	0,0000001
	Comparação 4	ZX30	617,4	220,8	-64,2%	0,00007

Como se nota, a saturação com água resultou em reduções relevantes e estatisticamente significantes em todas as comparações realizadas, tanto para o módulo de elasticidade quanto para a resistência à tração. O comportamento observado, no que se refere à piora das

propriedades mecânicas, era esperado conforme estudos de MOHD ISHAK et al. (1994) e HIDEYUKI et al. (2020). Notam-se reduções mais expressivas na resistência à tração para os casos da direção de impressão ZX e no módulo de elasticidade para os casos na direção XY.

5.3.2 Influência da altura de camada

De forma análoga à análise de influência da condição de umidade nas propriedades mecânicas, foram elaboradas a Tabela 5.6 e a Tabela 5.7 para avaliar a influência da altura de camada nessas propriedades.

Tabela 5.6 – Resultados – Comparações 5 e 6 entre os casos XY15SE/SA e XY30SE/SA.

			XY15	XY30	Variação [%]	<i>p</i>
Resistência à tração ($\bar{\sigma}_m$) [MPa]	Comparação 5	SE (Seco)	47,7	44,8	-6,1%	0,037
	Comparação 6	SA (Saturado)	34,9	31,0	-11,2%	0,045
Módulo de elasticidade (\bar{E}) [MPa]	Comparação 5	SE (Seco)	1801,6	1628,8	-	0,198
	Comparação 6	SA (Saturado)	294,4	273,0	-	0,295

Observa-se que para a direção XY as comparações realizadas exibem reduções na resistência à tração com o aumento da altura de camada. Esse comportamento era esperado, uma vez que o emprego de maiores alturas de camada gera um aumento de espaços vazios na estrutura do componente (BACZXŻEWSKI et al., 2021), diminuindo assim as áreas de resistência estrutural efetiva. Por outro lado, não foi possível verificar alterações estatisticamente significativas do módulo de elasticidade.

Tabela 5.7 – Resultados – Comparações 7 e 8 entre os casos ZX15SE/SA e ZX30SE/SA.

			ZX15	ZX30	Variação [%]	<i>p</i>
Resistência à tração ($\bar{\sigma}_m$) [MPa]	Comparação 7	SE (Seco)	20,1	19,1	-	0,237
	Comparação 8	SA (Saturado)	7,1	4,9	-30,4%	0,003
Módulo de elasticidade (\bar{E}) [MPa]	Comparação 7	SE (Seco)	1041,0	617,4	-40,7%	0,0002
	Comparação 8	SA (Saturado)	237,7	220,8	-	0,106

Para o caso das comparações 7 e 8, analisando a direção ZX de impressão, o aumento da altura de camada gerou uma redução na resistência à tração no caso saturado e no módulo de elasticidade para a condição seca. Sugere-se que o resultado tenha relação com o percentual de água absorvido pelo caso ZX30SA, que foi significativamente maior do que no caso com altura de camada de 0,15 mm. Para o restante dos casos, não houve significância estatística, não sendo possível afirmar que as médias são distintas.

6 CONCLUSÕES

A partir do estudo realizado, importantes resultados foram obtidos a respeito da variação das propriedades mecânicas da poliamida impressa por FDM com a alteração da direção de impressão, altura de camada e percentual de umidade. Sendo assim, as principais conclusões seguem:

- 1) Para as duas direções de impressão analisadas (XY e ZX), o aumento da altura de camada gerou uma elevação estatisticamente significativa no percentual de saturação do material.
- 2) A direção de impressão ZX com as alturas de camada de 0,15 e 0,3 mm saturaram com um percentual significativamente mais elevado que nos casos da direção XY.
- 3) Houve redução significativa na resistência à tração em todos os casos propostos a partir da saturação com água dos corpos de prova. Ressalta-se que as maiores reduções percentuais foram observadas nos corpos impressos na direção ZX, chegando a uma queda de 74,0% no caso com altura de camada de 0,3 mm. Sugere-se que essa orientação

de impressão é afetada de forma extremamente relevante pelo percentual de umidade presente no material.

- 4) Houve redução significativa do módulo de elasticidade em todos os casos propostos a partir da saturação com água. As maiores reduções foram observadas nos corpos impressos na direção XY, chegando a quedas próximas de 83% para as duas alturas de camada estudadas.
- 5) Avaliando a influência da altura de camada nas propriedades mecânicas, verifica-se que para todos os casos da direção XY (Comparação 5 e 6) houve uma redução da resistência à tração a partir do aumento da altura de camada. Para a direção ZX (Comparação 7 e 8), o aumento da altura de camada gerou uma redução estatisticamente significativa apenas para o caso saturado na resistência à tração e para o caso seco no módulo de elasticidade.
- 6) De forma geral, durante o projeto de uma peça impressa exposta a condições de elevada umidade, deve-se priorizar a fabricação do componente na direção XY e com altura de camada reduzida. Em caso de necessidade de fabricação da peça na direção ZX por questões geométricas do componente, sugere-se fortemente o emprego de alturas de camada menores para diminuir o percentual de saturação do material e elevar a resistência à tração da peça nessa direção.
- 7) Para a direção XY, considerando situações em que o componente projetado não estará exposto a condições rigorosas de umidade, e que se deseje maximizar a resistência à tração da peça, deve ser priorizado o uso de menores alturas de camada, uma vez que se constatou uma redução de 6,1% dessa propriedade a partir desse parâmetro. Por outro lado, em função do tempo de impressão depender linearmente do número total de camadas do componente (REDWOOD et al., 2017), sugere-se a realização de uma avaliação específica da necessidade de um ganho relativamente pequeno de resistência à tração frente ao grande aumento no tempo de fabricação da peça.

Como prosseguimento no contexto do estudo, sugere-se a observação dos efeitos da absorção de umidade com a variação do percentual de preenchimento da peça na resistência mecânica. A caracterização desse comportamento é relevante, uma vez que esse parâmetro se relaciona com a massa de filamento para construção de uma mesma geometria e com o tempo de impressão. Outra importante adição ao presente estudo seria analisar o comportamento mecânico para uma maior quantidade de alturas de camada, de forma a propor curvas de resistência a tração e/ou módulo de elasticidade em função do percentual de umidade absorvido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BACZKŹEWSKI, P.; MARCINIAK, D.; NOWINKA, B.; BOROWIAK, M. & BIELIŃSKI, M. Influence of FFF process parameters and macrostructure homogeneity on PLA impact strength. **Polimery**, 2021, Vol. 66, Nr.9. DOI: [dx.doi.org/10.14314/polimery.2021.9.XXX](https://doi.org/10.14314/polimery.2021.9.XXX).

BASF SE. “**Ultrafuse ASA**”, Technical Data Sheet (Version No.:2.2 – Revisado em 13/11/2019).

BASF SE. “**Ultrafuse PA**”, Technical Data Sheet (Version No.:2.2 – Revisado em 12/11/2019).

BASF SE. “**Ultrafuse PLA PRO1**”, Technical Data Sheet (Version No.:3.3 – Revisado em 06/11/2020).

CALLISTER, W. D. J.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering: an introduction**. 8th. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009. ISBN 978-0-470-41997-7.

EUNSEOB KIM, YONG-JUN SHIN & SUNG-HOON AHN. The effects of moisture and temperature on the mechanical properties of additive manufacturing components: fused deposition modeling. **Rapid Prototyping Journal**, Seoul, 2016, Vol. 22, Issue: 6, pp.887-894

HIDEYUKI SHINZAWA & JUNJI MIZUKADO. Water absorption by polyamide (PA) 6 studied with two-trace two-dimensional (2T2D) near-infrared (NIR) correlation spectroscopy, **Journal of Molecular Structure**, Tsukuba, 2020, Vol. 1217. ISSN 0022-2860 <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.128389>.

HUANG, J-C.; WU, T-H. & WU, C-L.. Effects of Moisture on Mechanical Properties of Glass-Filled Nylon-6,6. **Science and Engineering of Composite Materials**. Lowell, 1995, Vol. 4, No. 3, pp. 199-203. <https://doi.org/10.1515/SECM.1995.4.3.199>.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO-527: Plastics — Determination of tensile properties**. Second Edition, 2012.

KIKUCHI, BRUNO; BUSSAMRA, FLAVIO; DONADON, MAURICIO; FERREIRA, RAFAEL & SALES, RITA. (2020). Moisture effect on the mechanical properties of additively manufactured continuous carbon fiber-reinforced Nylon-based thermoplastic. **Polymer Composites**. São José dos Campos, 2020. <https://doi.org/10.1002/pc.25789>

LEVENHAGEN, NEIKO & DADMUN, MARK. Improving Interlayer Adhesion in 3D Printing with Surface Segregating Additives: Improving the Isotropy of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene Parts. **ACS Applied Polymer Materials**, Knoxville, 2019, Vol.1, 876-884.

LI, L.; SUN, Q.; BELLEHUMEUR, C. & GU, P. Investigation of bond formation in FDM process. **Solid Freeform Fabrication Symp.**, Austin, TX, Aug. 2002, pp1-8.

LI, L.; SUN, Q.; BELLEHUMEUR, C. & GU, P. Modeling of Bond Formation Between Polymer Filaments in the Fused Deposition Modeling Process. **Journal of Manufacturing Processes**, Calgary, Alberta, 2004, Vol.6/No.2.

MARK, FRANCIS HERMAN. **Encyclopedia Of Polymer Science and Technology**. Vol. 3. 4. ed. New Jersey: Wiley, 2014. ISBN: 978-1-118-63389-2.

MARKFORGED. **Industries**. Disponível em: <<https://markforged.com/industries>>. Acesso

em: 08/03/2022.

MOHD ISHAK, Z.A. & BERRY, J.P. Effect of moisture absorption on the dynamic mechanical properties of short carbon fiber reinforced nylon 6, 6. **Polymer Composites**. Manchester, 1994, Vol. 15: 223-230. <https://doi.org/10.1002/pc.750150308>.

ORTEGA, RYAN; CARTER, ERIN & ORTEGA, ALBERT. Nylon 6,6 Nonwoven Fabric Separates Oil Contaminates from Oil-in-Water Emulsions. **PLOS ONE**. Akron, 2016. doi:10.1371/journal.pone.0158493.

PAI, C.-C.; JENG, R.-J.; GROSSMAN, S.J. & HUANG, J.-C.. Effects of moisture on thermal and mechanical properties of nylon-6,6. **Adv. Polym. Technol.** Lowell, 1989, Vol. 9, No. 2., p. 157-163. <https://doi.org/10.1002/adv.1989.060090206>.

RAJPUROHIT, SHILPESH & DAVE, HARSHIT. Effect of process parameters on tensile strength of FDM printed PLA part. **Rapid Prototyping Journal**, Surat, 2018, Vol. 24, Issue: 8, pp. 1317-1324.

RANKOUHI, BEHZAD; JAVADPOUR, SINA; DELFANIAN, FEREDOON & LETCHER, TODD. Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS With Respect to Layer Thickness and Orientation. **Journal of Failure Analysis and Prevention**. 2016. Vol. 16, p. 467-481. DOI 10.1007/s11668-016-0113-2.

REDWOOD, BEN; SCHÖFFER, FILEMON & GARRET, BRIAN. **The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications**. 1.ed. Amsterdam: Coers & Roest, 2017.

S.H. MASOOD & W.Q. SONG. Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using Fused deposition modelling. **Materials and Design**, Melbourne, 2004, Vol. 25:587 – 594.

S.H. MASOOD & W.Q. SONG. Thermal characteristics of a new metal/polymer material for FDM rapid prototyping process. **Assembly Automation**. Melbourne, 2005, Vol. 25, 309 – 315.

SALDIVAR-GUERRA, E. & VIVALDO-LIMA, E.. **Handbook of Polymer Synthesis, Characterization, and Processing**. 1ed. Mexico, DF: Wiley, 2013.ISBN 978-0-470-63032-7.

SELTMAN, HOWARD. **Experimental Design and Analysis**. 2018. Disponível em: <https://www.stat.cmu.edu/~hseltman/309/Book/Book.pdf>

SHUBHAM, PRITISH; SIKIDAR, ARNAB & CHAND, TEG. The Influence of Layer Thickness on Mechanical Properties of the 3D Printed ABS Polymer by Fused Deposition Modeling. **Key Engineering Materials**. Noida, 2016, Vol. 706, pp. 63-67. Doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.706.63.

ZOU, RUI; XIA, YANG; LIU, SHIYI; HU, PING; HOU, WEN-BIN; HU, QINGYUAN & SHAN, CHUNLAI. Isotropic and anisotropic elasticity and yielding of 3D printed material. **Composites Part B: Engineering**. Dalian, 2016, Vol. 99, p. 506-513. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.009>.

ANEXO 1 – Tabela de resultados individuais por corpo de prova (massa e área transversal).

Caso	CP#	M_{SE}	\bar{M}_{SE}	D.P.	M_{SA}	\bar{M}_{SA}	D.P.	α	$\bar{\alpha}$	D.P.	A_{SE}	\bar{A}_{SE}	D.P.	A_{SA}	\bar{A}_{SA}	D.P.
XY15SE	1	3,143	2,959	0,196	-	-	-	-	-	-	26,52	26,16	0,53	-	-	-
	2	2,690			-			-			24,95			-		
	3	2,808			-			-			26,32			-		
	4	2,726			-			-			25,75			-		
	5	3,110			-			-			26,15			-		
XY15SA	6	3,126	3,267	0,182	3,361	3,267	0,182	7,52%	8,13%	0,42%	26,52	26,16	0,53	28,08	28,47	0,52
	7	2,998			3,253			8,51%			26,88			29,15		
	8	3,107			3,371			8,50%			26,26			27,87		
	9*	2,731			2,956			8,24%			25,86			28,78		
	10	3,147			3,396			7,91%			26,36			28,45		
XY30SE	11	3,044	3,018	0,031	-	-	-	-	-	-	26,11	26,17	0,31	-	-	-
	12	3,033			-			-			26,57			-		
	13	2,963			-			-			25,70			-		
	14	2,989			-			-			26,06			-		
	15	2,989			-			-			25,86			-		
XY30SA	16	3,000	3,299	0,034	3,264	3,299	0,034	8,80%	8,81%	0,48%	25,81	26,17	0,31	27,77	28,41	0,66
	17	3,062			3,350			9,41%			26,41			29,32		
	18	3,031			3,308			9,14%			26,31			28,89		
	19	3,021			3,271			8,28%			26,52			27,93		
	20	3,044			3,3			8,41%			26,37			28,14		
ZX15SE	21	3,167	3,148	0,112	-	-	-	-	-	-	25,60	27,03	0,64	-	-	-
	22*	2,885			-			-			27,09			-		
	23	3,092			-			-			26,68			-		
	24	3,167			-			-			26,94			-		
	25	3,239			-			-			27,77			-		
ZX15SA	26	3,210	3,482	0,071	3,504	3,482	0,071	9,16%	9,28%	0,46%	27,46	27,03	0,64	29,81	29,63	0,52
	27	3,309			3,592			8,55%			27,61			30,36		
	28	3,106			3,410			9,79%			26,57			28,94		
	29	3,167			3,467			9,47%			27,41			29,38		
	30	3,139			3,435			9,43%			27,20			29,65		
ZX30SE	31	3,046	3,051	0,012	-	-	-	-	-	-	26,01	26,44	0,29	-	-	-
	32*	3,062			-			-			26,42			-		
	33	3,052			-			-			26,31			-		
	34	3,054			-			-			26,11			-		
	35	3,051			-			-			26,42			-		
ZX30SA	36	3,052	3,427	0,025	3,442	3,427	0,025	12,78%	12,42%	0,27%	26,52	26,44	0,29	29,27	29,62	0,32
	37	3,054			3,434			12,44%			26,63			29,81		
	38	3,064			3,448			12,53%			27,09			30,03		
	39	3,021			3,385			12,05%			26,37			29,32		
	40	3,051			3,426			12,29%			26,47			29,65		

*Resultados para resistência mecânica descartados. Rompimento fora do comprimento útil.

ANEXO 2 – Curvas Tensão – Deformação para todos os ensaios realizados.

