

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

OS EFEITOS DO ENVELHECIMENTO DO XENÔNIO NAS PROPRIEDADES  
MECÂNICAS DE COMPÓSITOS DE POLIAMIDA COM FIBRA DE VIDRO CONTÍNUA  
PRODUZIDOS VIA MANUFATURA ADITIVA

por

Rodrigo Motta Dartora

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, setembro de 2022

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

### CIP - Catalogação na Publicação

Dartora, Rodrigo Motta  
OS EFEITOS DO ENVELHECIMENTO DO XENÔNIO NAS  
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE COMPÓSITOS DE POLIAMIDA COM  
FIBRA DE VIDRO CONTÍNUA PRODUZIDOS VIA MANUFATURA  
ADITIVA / Rodrigo Motta Dartora. -- 2022.  
18 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. Compósitos . 3. Técnica  
de envelhecimento. 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 Motta Dartora

OS EFEITOS DO ENVELHECIMENTO DO XENÔNIO NAS PROPRIEDADES  
MECÂNICAS DE COMPÓSITOS DE POLIAMIDAS COM FIBRA DE VIDRO  
CONTÍNUA PRODUZIDOS VIA MANUFATURA ADITIVA

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. Cirilo Seppi Bresolin  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Jakson Manfredini Vassoler

Comissão de Avaliação:

Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Prof. Heraldo José de Amorim

Prof. Rogério José Marczak

Porto Alegre, setembro de 2022

## AGRADECIMENTOS

Ao Instituto SENAI de Inovação em Polímeros pela disponibilização da impressora 3D e do material para a impressão dos corpos de prova desse trabalho;

Ao André Carmona, Felipe Vannucchi e Frederico Egger, funcionários do SENAI, pelo auxílio para a realização dos ensaios mecânicos e discussão dos resultados obtidos.

**DARTORA, RODRIGO. Os efeitos do envelhecimento do xenônio nas propriedades mecânicas de compósitos de poliamida com fibra de vidro contínua produzidos via manufatura aditiva.** 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 impressão 3D proporcionou grandes avanços na fabricação de compósitos poliméricos, possibilitando o desenvolvimento de estruturas complexas, superando os obstáculos inerentes aos métodos tradicionais de fabricação de forma rápida. Dada a crescente demanda por matérias-primas de ponta, vários novos filamentos reforçados com fibras foram desenvolvidos nos últimos anos. A combinação entre este método de fabricação recente e novos materiais expõem a necessidade de caracterizar adequadamente as propriedades mecânicas dos compósitos impressos em 3D, visando possibilitar aplicações estruturais deste material. Estudos que demonstrem a manutenção das propriedades mecânicas são particularmente importantes para aplicações em componentes que precisam garantir sua funcionalidade por longos prazos. Assim, o presente artigo avalia as propriedades de tração no plano de compósitos unidirecionais de poliamida com fibra de vidro contínua, em orientação de impressão com deposição de 0° e 90°, juntamente com o efeito do envelhecimento induzido por xenônio. Por fim, os resultados mostraram uma diminuição estatisticamente significativa do módulo de elasticidade na comparação entre ciclos da orientação de 0°, chegando a uma perda de 18% nessa propriedade, entre o material virgem e seu último ciclo. Os resultados para a orientação de 90° seguiram a mesma lógica e também apresentaram perdas de até 32% no valor desta propriedade.

**PALAVRAS-CHAVE:** Impressão 3D, Compósitos Poliméricos, Envelhecimento Induzido.

DARTORA, RODRIGO. **The effect of xenon aging on the mechanical properties of a polyamide and glass fiber composite produced via additive manufacturing.** 2022. 19. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

## ABSTRACT

3D printing manufacturing methods widely contributed to advances in polymeric composites, enabling the development of complex structures by reducing the obstacles of traditional fabrication methods and providing swiftness in prototyping. Due to the constant and growing demand for cutting-edge raw materials, various novel fiber-reinforced filaments have been developed in the past years. The combination between this additive manufacturing method and new materials discloses the necessity to accurately characterize the mechanical properties of 3D printed composites, especially for load-bearing applications. Although, considering the inadequacy of the current technical standards for this case, plentiful different specimen geometries are considered in the literature, bringing up the issue of results unable to be compared among studies. Thus, the present article evaluates the in-plane tensile properties of unidirectional glass/polyamide composites in  $0^\circ$  and  $90^\circ$  orientations. Finally, the results showed a statistically significant decrease in the modulus of elasticity in the comparison between cycles of the  $0^\circ$  orientation, reaching a loss of 18% in this property, between the original material and its last cycle. The results for the  $90^\circ$  orientation followed the same logic and also presented losses of up to 32% in the value of this property.

**KEYWORDS:** 3D Printing, Polymer Composites, Induced Aging.

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos

E	Módulo de elasticidade	MPa
$\varepsilon$	Deformação	%
$\sigma$	Tensão	MPa
D.P.	Desvio Padrão	-

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Dimensionamento dos corpos de prova para os ensaios.....	3
Figura 2.2 - Esquema para representar o “raster contour” devido a deposição de fibra contínua .....	4
Figura 3.1 – Corpos de prova impressos com direção de fibra de 90°. .....	7
Figura 3.2 – Resultados para o módulo de elasticidade de 0° em diagrama de caixas.....	8
Figura 3.3 - Resultados para o módulo de elasticidade de 90° em diagrama de caixas.....	10
Figura 3.4 – Análise termogravimétrica com curva DTG para o filamento de estudo. ....	12
Figura 3.5 - Seção transversal do filamento utilizado. Ampliação de 250 vezes.....	12
Figura 3.6 - Diâmetros das fibras do filamento. Ampliação de 1000 vezes.....	13
Figura 3.7 - Delimitação da área do filamento para o cálculo.....	13

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Casos de estudo e respectiva identificação.....	3
Tabela 2.2 – Comparações realizadas para determinação da manutenção de propriedades mecânicas.....	6
Tabela 3.1 – Resultados para o módulo de elasticidade do material na orientação de 0°. ....	8
Tabela 3.2 – Resultados – Comparações de 1 a 6 – Módulo de elasticidade. ....	9
Tabela 3.3 - Resultados para o módulo de elasticidade na orientação de 90° .....	10
Tabela 3.4 – Resultados – Comparações de 7 a 12 – Módulo de elasticidade.. ....	10



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	2
2.1	Casos de estudo.....	3
2.2	Fabricação dos corpos de prova.....	3
2.3	Envelhecimento por xenônio .....	4
2.4	Ensaio de tração .....	5
2.5	Tratamento estatístico .....	5
2.6	TGA e MEV.....	6
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	7
3.1	Corpos de prova .....	7
3.2	Envelhecimento para 0° .....	8
3.3	Envelhecimento para 90° .....	9
3.4	TGA e MEV.....	11
4	CONCLUSÕES .....	14
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	16
	APÊNDICE 1 – Curvas Tensão – Deformação para todos os ensaios realizados.....	18

## 1 INTRODUÇÃO

A impressão 3D, também conhecida como prototipagem rápida, é um processo de fabricação que produz componentes modelados através de *softwares* CAD (Computer Aided Design). Esta tecnologia vem crescendo muito nos últimos anos, sendo um dos pilares da quarta revolução industrial. Dados da consultoria Norte-Americana Wohlers-Associate revelam que, entre 2013 e 2017, o setor de manufatura aditiva cresceu em média 25% ao ano, gerando uma receita de mais de 7 bilhões de dólares, com potencial de crescimento ainda maior nos anos seguintes (Pesquisa Fapesp, 2018). Dessa maneira, a impressão 3D se torna cada vez mais essencial para a indústria, reduzindo tempos de fabricação e custos para as empresas, gerando assim um mercado mais tecnológico e ágil.

O processo de impressão 3D é dividido em categorias, de acordo com a maneira que o componente é fabricado. São elas: *FDM (Fused Deposition Modeling)*, *Selective Laser Melting (SLM)*, *Stereolithography (STL)* ou *Laminated Object Manufacturing (LOM)* (Garret W. Melenka, 2016). O FDM é o mais comum e também a de menor custo, tornando-se a mais popular atualmente, dominando 36% do mercado (Pesquisa PWC, 2016). Impressoras FDM funcionam a partir da extrusão controlada de filamentos termoplásticos, que são aquecidos até um estado semilíquido e são depositados em uma plataforma ou mesa de impressão camada a camada, formando a peça desejada (Lu Wang, 2017). A qualidade da impressão pode ser ajustada através de seus parâmetros, como temperatura, velocidade e espessura de camada.

Devido a agilidade e grande versatilidade de geometrias que o método FDM proporciona, buscou-se evoluir os tipos de filamentos que podem ser utilizados por esse processo. Empresas começaram a lançar impressoras 3D que fabricam peças com reforços de filamento de fibras (kevlar, vidro e carbono), ou seja, fabricação por manufatura aditiva de compósitos, mais conhecidos como termoplásticos reforçados com fibras (FRTP - Fiber Reinforced Thermoplastics). Essas fibras conferem às peças fabricadas propriedades mecânicas de maior resistência e rigidez, ampliando o campo de aplicações e confiando a elas características estruturais.

Com todas essas inovações, surge a necessidade do modelamento e caracterização dos materiais de impressão 3D. Vários estudos acerca do tema já foram publicados, com metodologias e parâmetros de impressão diferentes. Andrew, 2021, elaborou ensaios em termoplásticos reforçados com fibra utilizando as diretrizes da ASTM D638 e combinando parâmetros de impressão em busca da melhor resistência. Sommyredy, 2020,

estudou anisotropia do processo através das diferentes orientações de impressão e abre uma discussão sobre a validade da teoria de laminados no processo. Brenken, 2018, aborda o tema estudando as propriedades de diferentes tipos de fibras de reforço, bem como a utilização de depósito de fibra de reforço contínua de descontínua.

Um outro aspecto importante quando se fala em polímeros e aplicações estruturais, como os usados em impressão 3D, é a sua sensibilidade a efeitos de degradação pelo tempo e condições climáticas. Neste sentido, na literatura tem se usado para a análise desta degradação métodos de envelhecimento acelerado, que reproduzem ciclos de anos em alguns dias. O envelhecimento por xenônio é uma das técnicas para a aceleração da vida útil de um polímero reforçado com fibras, uma vez que os métodos convencionais levariam um tempo elevado (Masashiro, 2016). Por ser um efeito que necessita aparato específico, e por representar um procedimento mais laborioso, este possui poucos resultados reportados em literatura. O conhecimento deste efeito pode ser primordial para uma aplicação estrutural confiável, uma vez que os engenheiros devem possuir informações suficientes para elaborar modelos matemáticos de peças para diferentes situações, e novos estudos devem buscar fornecer tais argumentos.

Assim, a fim de contribuir na compreensão da capacidade de manutenção de propriedades mecânicas ao longo do tempo, em problemas envolvendo a manufatura aditiva por impressão 3D FDM com termoplásticos reforçados, o presente trabalho busca caracterizar a resposta mecânica de compósitos impressos com fibra de vidro contínua em diferentes orientações, tanto em condições primitivas quanto envelhecidas por exposição solar, usando normas militares de envelhecimento. Como objetivo secundário, pretende-se também entender características específicas do filamento, como sua real proporção de volume de fibra, e outras características de interesse mecânico, que influenciam na resposta do material.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

O material estudado trata-se de um compósito comercial de fibras de vidros contínuas, longas, orientadas no sentido do filamento em uma matriz de poliamida (Composites datasheet, MarkForged,2022). A propriedade mecânica escolhida é o módulo de elasticidade da direção do filamento, que corresponde a maior contribuição de rigidez da fibra de vidro. Esta propriedade do material será estudada frente a diferentes números de ciclos de envelhecimento, que correspondem a diferentes tempos de exposição ao ambiente, seguindo normativa específica de envelhecimento. Uma vez que o filamento é comercial, também será feita uma avaliação por análise termogravimétrica (TGA) e microscopia eletrônica de varredura (MEV)

para entender a composição do filamento e outras características mecânicas, como o volume de fibra do filamento.

## 2.1 Casos de estudo

Para avaliar o módulo de elasticidade, optou-se pela realização de ensaios de tração com base na norma ASTM D3039. Em cada caso, foram impressos 5 corpos de prova, totalizando 40 amostras. Para estudar a influência do envelhecimento por xenônio nas duas direções de impressão de interesse definiram-se 8 casos de estudo. A Tabela 2.1 indica os casos de estudo e os ciclos são especificados na seção 2.3.

Tabela 2.1 - Casos de estudo e respectiva identificação.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8
<b>Orientação da fibra</b>	0°	0°	0°	0°	90°	90°	90°	90°
<b>Ciclo de envelhecimento</b>	N/A	1° ciclo	2° ciclo	3° ciclo	N/A	1° ciclo	2° ciclo	3° ciclo
<b>Nomenclatura</b>	0°_C0	0°_C1	0°_C2	0°_C3	90°_C0	90°_C1	90°_C2	90°_C3

## 2.2 Fabricação dos corpos de prova

Os corpos de prova para ensaio de tração foram fabricados com dimensões baseadas nas diretrizes da ASTM D3039, conforme utilizado em Andrew et al, 2021 e Goh et al, 2016. As dimensões são apresentadas na Figura 2.1. As amostras foram fabricadas com orientação 0° e 90°, sendo vinte corpos de prova para cada direção.

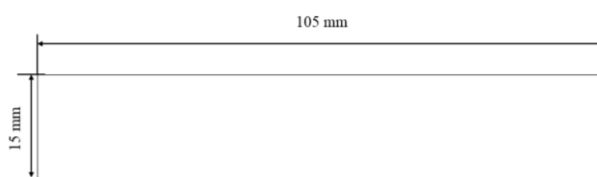


Figura 2.1 - Dimensionamento dos corpos de prova para os ensaios.

O processo de impressão FDM utiliza a deposição contínua de filamentos para construir as peças impressas. Portanto, o corpo de prova com orientação de 90° possui uma continuidade na deposição do filamento chamado de 'raster contour'. A Figura 2.2 apresenta esquematicamente a característica da deposição, mostrando que os filamentos não são

independentes uns dos outros, mas sim interligados pela fibra contínua conforme o caminho de impressão, indicado pelas setas. Para evitar qualquer interferência desse fenômeno nos resultados e provocar uma tração pura com fibras orientadas apenas em uma direção, amostras para os corpos de prova de 90° foram impressos com uma largura maior para que a mesma seja cortada na parte indicada em vermelho, a fim de reproduzir uma condição de filamentos independentes.

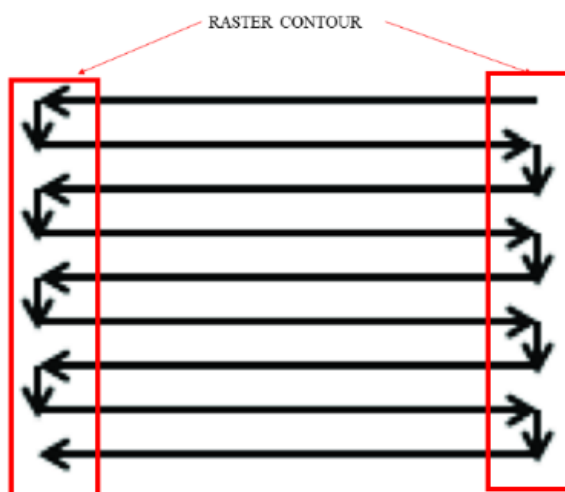


Figura 2.2 - Esquema para representar o “raster contour” devido a deposição de fibra contínua

As amostras foram impressas usando uma impressora 3D de modelo Markforged Onyx Series. A geometria do corpo de prova foi projetada usando um software de desenho assistido por computador (CAD) e exportado como um arquivo de estereolitografia (STL) para ser carregado em um software de planejamento de impressões 3D, conhecidos como *slicers*. O *slicer* controla os parâmetros de impressão como volume de fibra e deposição. Todas as amostras foram impressas com o filamento de fibra de vidro.

### 2.3 Envelhecimento por xenônio

Os efeitos do envelhecimento por xenônio também foram analisados. Para tal, 15 dos 20 corpos de prova impressos para cada orientação foram envelhecidos durante 3 intervalos de tempo diferentes, resultando em 5 amostras envelhecidas para cada intervalo. Este procedimento seguiu a norma militar MIL-STD-810G, método 505.5 Solar Radiation,

procedimento 2. De acordo com este procedimento, a quantidade de energia concebida aos corpos de prova acelera 2,5 vezes o tempo de exposição. O procedimento também recomenda 10 ciclos de 24 horas (correspondente a 25 dias) para materiais expostos ocasionalmente ao ar livre e 56 ciclos de 24 horas (correspondente a 140 dias) para materiais expostos continuamente ao ar livre. Assim, optou-se por testar os dois ciclos e um ciclo intermediário de 82 dias, a fim de observar o comportamento dos materiais após diferentes exposições à radiação solar. Portanto, os experimentos foram divididos em quatro condições: o ciclo 0, sem nenhuma ação de envelhecimento; 1º ciclo, com um envelhecimento equivalente a 25 dias; 2º ciclo, com um envelhecimento equivalente a 82 dias; 3º ciclo, com um envelhecimento equivalente a 140 dias.

## 2.4 Ensaio de tração

As propriedades das amostras impressas em 3D foram adquiridas através da realização de testes de tração. Uma máquina de tração Zwick, com uma célula de carga de 10 kN para as amostras, foi utilizada para aplicar as cargas. Os procedimentos utilizados para este teste foram baseados na ASTM D3039. De acordo com o documento, as falhas do corpo de prova precisam ocorrer entre um intervalo de tempo de 1 a 10 minutos. Seguindo esta orientação, e após alguns testes preliminares, a taxa de deslocamento foi fixada em 1 mm/min. A deformação das amostras foi medida por um vídeo extensômetro com comprimento inicial de referência de 25 mm. De acordo com a norma, o módulo de elasticidade pode ser calculado através do método “chord”, dado pela equação (2.1)

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (2.1)$$

onde  $E$  é o módulo de elasticidade em MPa,  $\sigma_1$  é a tensão em MPa medida em um valor de deformação de  $\varepsilon_1 = 0,001$  (0,1%) e  $\sigma_2$  é a tensão em MPa medida em um valor de deformação de  $\varepsilon_2 = 0,003$  (0,3%).

## 2.5 Tratamento estatístico

Para possibilitar a avaliação dos resultados e a elaboração de conclusões estatisticamente significativas, foram propostas 12 comparações cruzadas entre os casos de estudo. A Tabela 2.2

exibe essas comparações, juntamente com objetivo específico de cada uma e a grandeza analisada.

Tabela 2.2 – Comparações realizadas para determinação da manutenção de propriedades mecânicas.

	Casos	Grandezas	Objetivo da comparação
Comparação 1	0°_C0	E	Avaliar a influência do envelhecimento em E entre CP sem envelhecimento e CP do primeiro ciclo.
	0°_C1		
Comparação 2	0°_C0	E	Avaliar a influência do envelhecimento em E entre CP sem envelhecimento e CP do segundo ciclo.
	0°_C2		
Comparação 3	0°_C0	E	Avaliar a influência do envelhecimento em E entre CP sem envelhecimento e CP do terceiro ciclo.
	0°_C3		
Comparação 4	0°_C1	E	Avaliar a influência do envelhecimento em E entre CP do primeiro ciclo e CP do segundo ciclo.
	0°_C2		
Comparação 5	0°_C1	E	Avaliar a influência do envelhecimento em E entre CP do primeiro ciclo e CP do terceiro ciclo.
	0°_C3		
Comparação 6	0°_C2	E	Avaliar a influência do envelhecimento em E entre CP do segundo ciclo e CP do terceiro ciclo.
	0°_C3		
Comparação 7	90°_C0	E	Avaliar a influência do envelhecimento em E entre CP sem envelhecimento e CP do primeiro ciclo.
	90°_C1		
Comparação 8	90°_C0	E	Avaliar a influência do envelhecimento em E entre CP sem envelhecimento e CP do segundo ciclo.
	90°_C2		
Comparação 9	90°_C0	E	Avaliar a influência do envelhecimento em E entre CP sem envelhecimento e CP do terceiro ciclo.
	90°_C3		
Comparação 10	90°_C1	E	Avaliar a influência do envelhecimento em E entre CP do primeiro ciclo e CP do segundo ciclo.
	90°_C2		
Comparação 11	90°_C1	E	Avaliar a influência do envelhecimento em E entre CP do primeiro ciclo e CP do terceiro ciclo.
	90°_C3		
Comparação 12	90°_C2	E	Avaliar a influência do envelhecimento em E entre CP do segundo ciclo e CP do terceiro ciclo.
	90°_C3		

Sendo assim, foi determinada a média aritmética simples e o desvio padrão amostral para os valores de módulo de elasticidade (E) para todos os casos de estudo. Para determinar a significância estatística dos resultados foi realizado o 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 resulta em um valor  $p$ , onde 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.

## 2.6 TGA e MEV

A fim de observar o comportamento do material em questão e como ele é constituído, realizou-se complementarmente uma análise termogravimétrica (TGA) e utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura (MEV) para observar a real disposição das fibras. A análise

de TGA fornece a variação mássica da amostra em função da temperatura. No caso de estudo, a amostra é apenas um pedaço do filamento de fibra de vidro utilizado na impressora. O procedimento utilizado segue as diretrizes da norma ASTM E1131, estabelecendo o aumento de temperatura em 10°C/min, partindo da temperatura ambiente em atmosfera inerte (nitrogênio). A temperatura aumenta até que não haja mais variação de massa e o ensaio então é encerrado. A partir deste ensaio obtém-se a TG (temperatura de transição vítrea do material), tornando possível a identificação do “grade” da matriz do compósito. O ensaio ainda conta com a curva DTG, derivada do gráfico TGA que indica os pontos em que houve degradação do material. Ademais, o MEV foi utilizado com o intuito de observar o comportamento das fibras e definir a porcentagem de fibra e matriz no compósito.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Corpos de prova

Foram fabricados quatro grupos de corpos de prova, sendo dez unidades de cada. Cada grupo pertence a um ciclo de envelhecimento e estes ainda são divididos em 5 unidades para cada orientação de impressão. A Figura 3.1 exibe o processo de impressão. No caso específico da figura, trata-se dos corpos de prova com orientação de fibra de 90°.

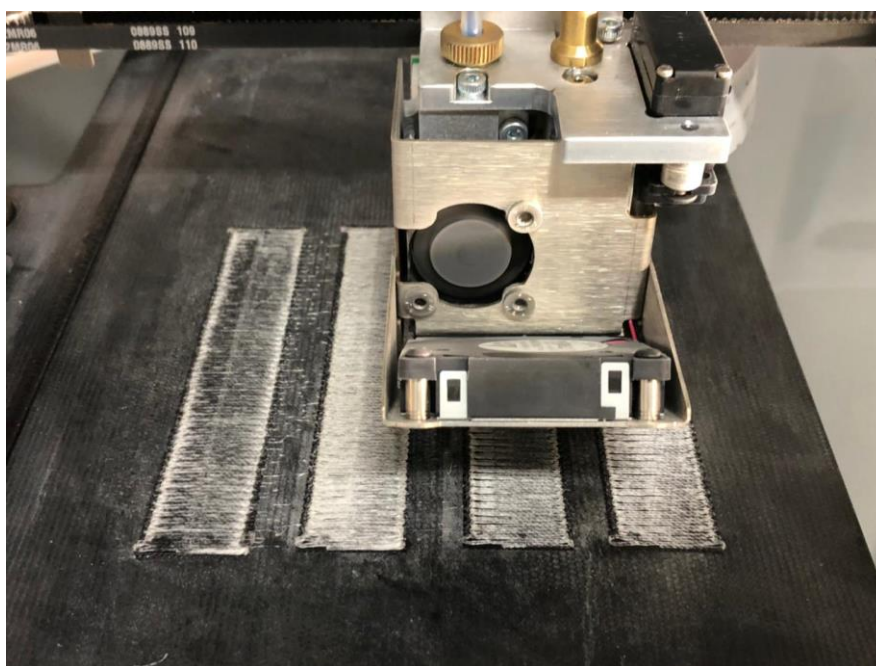


Figura 3.1 – Corpos de prova impressos com direção de fibra de 90°.



Nos casos de 0°, os filamentos estão alinhados com a direção longitudinal do corpo de prova, enquanto nos casos de 90° estão orientadas na direção transversal do corpo de prova.

### 3.2 Envelhecimento para 0°

Os valores do módulo de elasticidade obtido para cada caso de estudo pode ser observado na Tabela 3.1, tendo sido calculado a partir da orientação da norma ASTM D3039 e descrito na seção 2. A

Figura 3.2, por sua vez, exibe os resultados em forma de gráfico de caixas.

Tabela 3.1 – Resultados para o módulo de elasticidade do material na orientação de 0°.

	$\bar{E} \pm D.P.$ [GPa]
0°_C0	22,27 ± 2,23
0°_C1	19,58 ± 1,37
0°_C2	18,27 ± 1,12
0°_C3	18,26 ± 1,02

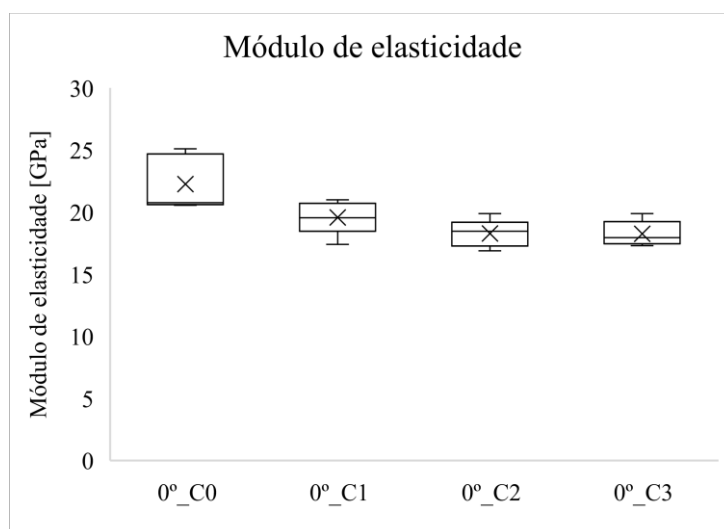


Figura 3.2 – Resultados para o módulo de elasticidade de 0° em diagrama de caixas.

Conforme indicado na Tabela 2.2, para determinar se o envelhecimento da amostra afeta sua propriedade mecânica foram calculados os valores  $p$  resultantes do teste-t para as Comparações de 1 a 6. A Tabela 3.2 exibe os resultados.

Tabela 3.2 – Resultados – Comparações de 1 a 6 – Módulo de elasticidade.

		0°_C0	0°_C1	0°_C2	0°_C3	Variação [%]	<i>p</i>
E [GPa]	Comparação 1	22,27	19,58	-	-	12	0,0511
E [GPa]	Comparação 2	22,27	-	18,27	-	17	0,0072
E [GPa]	Comparação 3	22,27	-	-	18,26	18	0,0065
E [GPa]	Comparação 4	-	19,58	18,27	-	6,5	0,1351
E [GPa]	Comparação 5	-	19,58	-	18,26	6,7	0,1208
E [GPa]	Comparação 6	-	-	18,27	18,26	≈ 0	0,9882

A partir dos resultados apresentados, nota-se que nas comparações de número 1 a 5 mostram uma diminuição percentual na grandeza estudada, o módulo de elasticidade. Apenas na comparação 6 a diminuição é irrelevante, e por isso considerada zero. Entretanto, os valores de *p* indicam uma relação estatisticamente significativa entre tempo de envelhecimento e módulo de elasticidade apenas para as comparações de número 2 e 3. Dessa maneira, pode-se concluir que há um limite de degradação para o material estudado nas condições estabelecidas. O compósito vai diminuindo seu percentual de degradação até chegar a um valor constante, estabilizando duas propriedades mecânicas no ciclo intermediário. Além disso, o valor do módulo de elasticidade presente no datasheet para a orientação de 0° é de 21 GPa, para um corpo de prova sem envelhecimento. Este valor está condizente com o observado nos ensaios com tratamento estatístico, no qual o módulo de elasticidade varia entre 20,04 GPa e 24,5 GPa.

### 3.3 Envelhecimento para 90°

Os valores do módulo de elasticidade obtido para cada caso de estudo pode ser observado na Tabela 3.1, tendo sido calculado a partir da orientação da norma ASTM D3039 e descrito na seção 2. A

Figura 3.2, por sua vez, exhibe os resultados em forma de gráfico de caixas, com os quartis, mediana e média indicados.

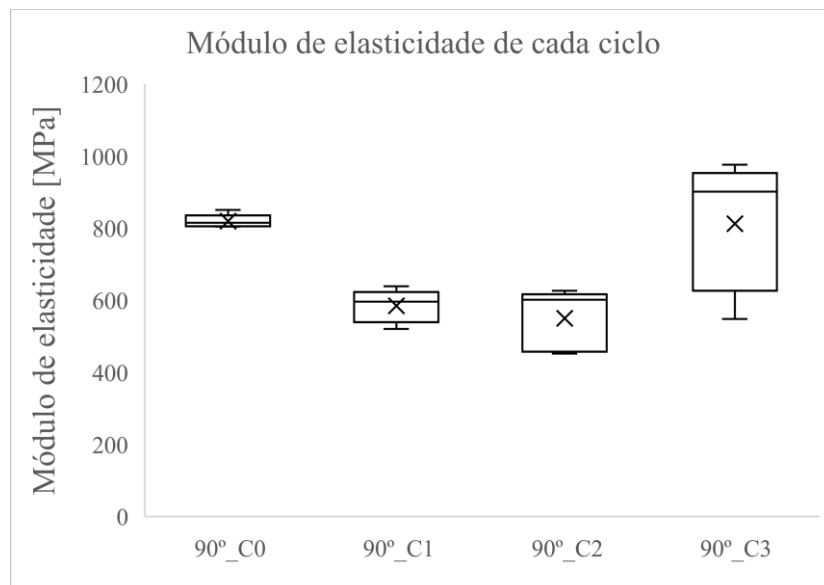


Figura 3.3 - Resultados para o módulo de elasticidade de 90° em diagrama de caixas.

Tabela 3.3 - Resultados para o módulo de elasticidade na orientação de 90°

	$\bar{E} \pm D.P.$ [MPa]
<b>90°_C0</b>	819,10 ± 21,64
<b>90°_C1</b>	584,48 ± 46,50
<b>90°_C2</b>	550,25 ± 85,00
<b>90°_C3</b>	812,50 ± 180

Conforme indicado na Tabela 2.2, para determinar se o envelhecimento da amostra afeta sua propriedade mecânica foram calculados os valores  $p$  resultantes do teste-t para as Comparações de 1 a 6. A Tabela 3.2 exibe os resultados.

Tabela 3.4 – Resultados – Comparações de 7 a 12 – Módulo de elasticidade..

		<b>90°_C0</b>	<b>90°_C1</b>	<b>90°_C2</b>	<b>90°_C3</b>	<b>Varição [%]</b>	<b><math>p</math></b>
E [MPa]	Comparação 7	819,10	584,50	-	-	29	0,00005
E [MPa]	Comparação 8	819,10	-	550,25	-	32	0,00012
E [MPa]	Comparação 9	819,10	-	-	812,50	1	0,93057
E [MPa]	Comparação 10	-	584,50	550,25	-	6	0,45106
E [MPa]	Comparação 11	-	584,50	-	812,50	28	0,02540
E [MPa]	Comparação 12	-	-	550,25	812,50	31	0,01860

Primeiramente é importante ressaltar que, para esta orientação de impressão, não há valores de referência para o módulo de elasticidade do material fornecido pelo fabricante. Os resultados apresentados para os ensaios com orientação de 90° geraram ressalvas. O valor do módulo de elasticidade e sua variação com o envelhecimento seguem uma lógica de degradação até o segundo ciclo, com o teste-t indicando diferenças estatisticamente significativas para as comparações 7, 8, 11 e 12. Entretanto, o resultado do módulo de elasticidade apresentado para o terceiro ciclo (comparações 11 e 12) apresenta grande variação. E visto o número de amostras baixo, não foram observados *outliers*, não podendo ser desconsiderados estatisticamente. Observando os gráficos dos ensaios dispostos no Apêndice 1, julga-se que pode haver um problema no procedimento experimental, ou algum efeito provocado pelo envelhecimento de longa duração, que podem ter degradado superficialmente as ligações entre os filamentos da impressão, de forma aleatória, aumentando a dispersão. O fato de os corpos de prova para 90° terem sido cortados para eliminar a correlação entre as fibras pode também ter gerado imperfeições em cada amostra que podem provocar essa dispersão. Para investigar este fenômeno, deveria se fazer mais ensaios, aumentando a amostragem para o tratamento estatístico.

### **3.4 TGA e MEV**

O resultado da análise termogravimétrica está disposto na Figura 3.4. Nota-se que o filamento de fibra de vidro começa a degradar na temperatura de 448°C de acordo com a curva DTG e perde 43,32% da massa registrada inicialmente. Isso indica que, do filamento estudado, 43,32% da massa é polímero impregnado em fibra de vidro para realizar a aderência em outros tipos de filamento que podem ser utilizados na impressora ao mesmo tempo. O estudo realizado por K.P Pramoda, 2003, propõe a degradação de uma poliamida 6, chegando no mesmo resultado de temperatura desta presente análise, sugerindo que se trata do mesmo material. A pequena massa perdida em temperaturas mais baixas pode representar umidade presente no material e alguma quantidade de impurezas.

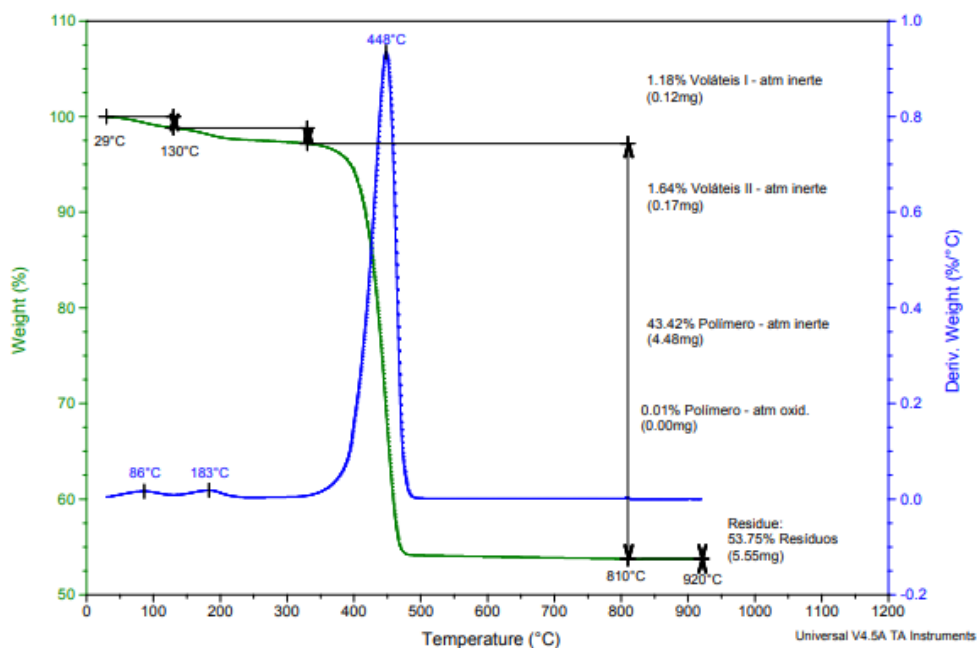


Figura 3.4 – Análise termogravimétrica com curva DTG para o filamento de estudo.

A imagem da Figura 3.5 apresenta o resultado obtido através do MEV, de uma seção transversal do filamento utilizado neste estudo. A partir da foto pode-se comprovar que trata-se de um compósito de fibras contínuas, onde a região mais escura representa o polímero utilizado para fixação nas outras partes já impressas e a fibra de reforço.

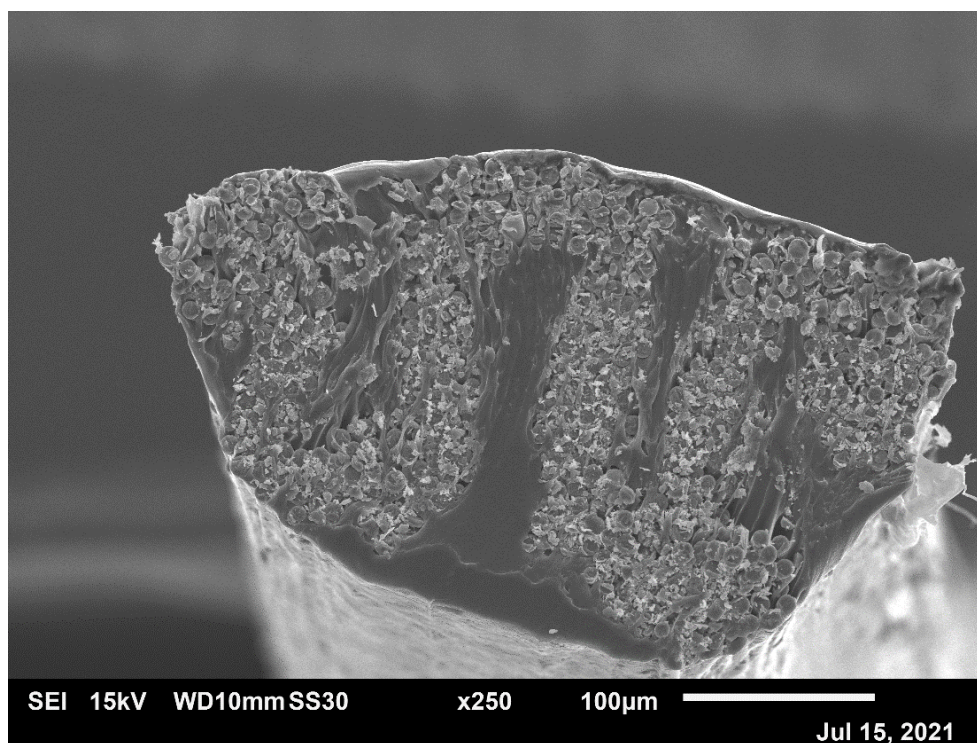


Figura 3.5 - Seção transversal do filamento utilizado. Ampliação de 250 vezes.

Com o auxílio do próprio *software* que realiza as imagens foi possível medir diâmetros das fibras contidas nesse filamento. A Figura 3.6 apresenta essas medições. Utilizando uma ferramenta de cálculo de área, foi possível estabelecer a área da seção transversal do filamento, conforme Figura 3.7. A fim de diminuir o erro desta medida, visto que ela é feita manualmente através de pequenas seções de retas até formar todo o contorno, realizou-se a verificação da área 5 vezes, e como resultado adotou-se a média destas medidas. Por fim, ainda foi contabilizado o número de fios de fibra presentes no filamento, também realizando 5 medidas para reduzir o erro.

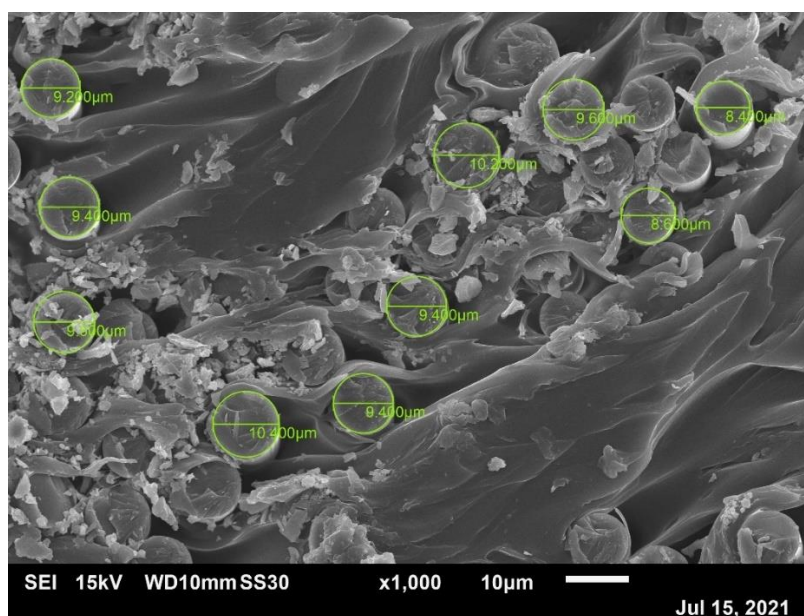


Figura 3.6 - Diâmetros das fibras do filamento. Ampliação de 1000 vezes.

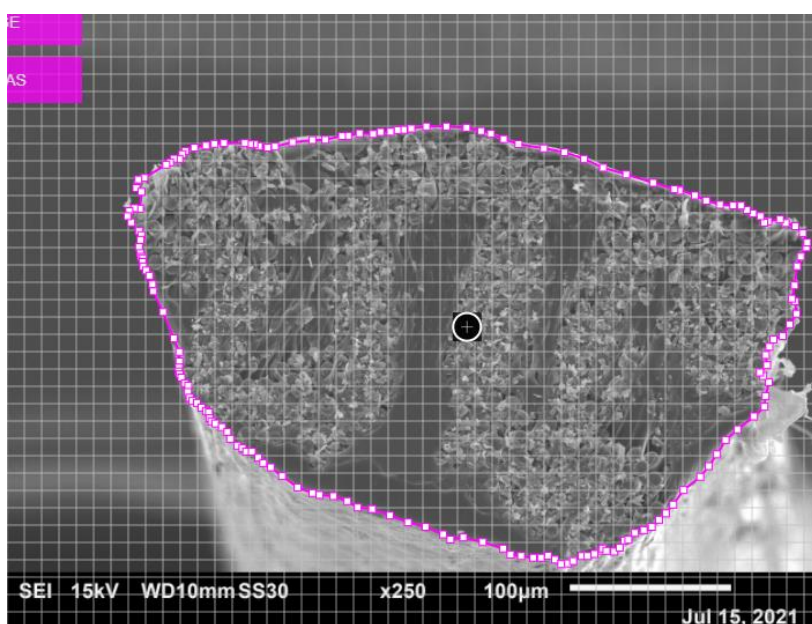


Figura 3.7 - Delimitação da área do filamento para o cálculo.

Dessa maneira, obtém-se uma área de seção transversal média equivalente  $81,3 * 10^4 \mu m$ , um diâmetro de fio médio de  $9,41 \mu m$  e uma quantidade média de fios de 385. Assim, pode-se concluir que a quantidade de fibra do compósito em área da seção transversal gira em torno de 32%.

#### 4 CONCLUSÕES

A partir da metodologia proposta foi possível identificar como a resposta mecânica de filamento compósito de poliamida com fibra de vidro se comporta frente a exposição solar acelerada. Importantes resultados foram obtidos a respeito da variação das propriedades mecânicas do filamento de fibra de vidro em função do seu envelhecimento e outras características do material.

Para o envelhecimento no caso das fibras orientadas a  $0^\circ$ , há um indicativo de limite de degradação do material, ou seja, a partir de determinado tempo de exposição o ambiente não afeta mais o módulo de elasticidade do compósito, onde as propriedades sofrem redução média de cerca de 17 e 18% no módulo de elasticidade (Comparação 2 e 3), correspondente a uma exposição de 82 e 140 dias, respectivamente. O módulo de elasticidade para a orientação de  $0^\circ$  segue o indicado pelo fabricante no datasheet, dessa maneira reforçando a validade do procedimento para este caso.

Para a orientação de  $90^\circ$  os resultados mostram que até o ciclo 1 e 2 de envelhecimento, correspondente a 25 e 82 dias de exposição, as propriedades sofrem redução média de cerca de 29 a 32%, respectivamente, no módulo de elasticidade (Comparação 7 e 8). Para o ciclo 3 (140 dias), o procedimento precisa ser revisto uma vez que os resultados apresentam grande variação.

A temperatura de degradação do polímero presente no compósito é de  $448^\circ C$ , indicando que o mesmo se trata de uma Poliamida 6. Ademais, a análise termogravimétrica indica uma porcentagem de massa de 43% de polímero, 55% de fibra de vidro, sendo o restante água e impurezas.

As imagens do MEV e a metodologia indicada para a sua avaliação mostram que se trata de um filamento com fibras de vidro contínuas e que, da área, cerca de 68% são polímero, 32% é fibra de vidro.

Para trabalhos futuros sugere-se realizar mais testes para a orientação de  $90^\circ$  a fim de melhorar a amostragem para tratamento estatístico adequado. Além disso, também sugere-se

uma análise dos vazios gerados pelo processo de impressão a fim de propor um modelo matemático para o estudo do material em diferentes aplicações.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

3D Experience. Disponível em <<https://make.3dexperience.3ds.com/processes/material-extrusion>>. Acessado em: 07/06/2022.

3D Printing Industry. Disponível em <<https://3dprintingindustry.com/news/carbon-fibers-prove-stronger-kevlar-glass-fdm-3d-prints-116852/>>. Acessado em: 06/06/2022.

Anthony Kelly, Carl Zweben (Editors-in-chief); Tsu-Wei Chou (Volume Editor) – “Fiber Reinforcements and General Theory of Composites”, Vol.1, Elsevier Science Ltd., the Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX51GB, UK (2000).

Garrett W. Melenka, Benjamin K.O. Cheung, Jonathon S. Schofield, Michael R. Dawson, Jason P. Carey, Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures, Composite Structures, Volume 153, 2016, Pages 866-875, ISSN 0263-8223, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.07.018>.

Handbook of Composites. Edited by S.T. Peters. Published in 1998 by Chapman & Hall, London. ISBN 0 412 54020 7

Koerner, R, M; Hsuan, T. G.; Koerner, R. M.. Photo-initiated degradation of geotextiles. Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering, v. 124, n. December, p. 196-201, 1986.

Lu Wang, William M. Gramlich, Douglas J. Gardner, Improving the impact strength of Poly(lactic acid) (PLA) in fused layer modeling (FLM), Polymer, Volume 114,2017, Pages 242-248, ISSN 0032-3861, <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2017.03.011>.

Marcelo F.S.F. de Moura, Alfredo B. de Moraes, António G. de Magalhães (2011) – “Materiais compósitos – Materiais, fabrico e comportamento mecânico”, Publindústria, Produção de comunicação Lda.

MARINUCCI, G. Materiais compósitos poliméricos:fundamentos e tecnologia. São Paulo: A rtliber, 2011.

MATERIALS DATASHEET, COMPOSITE, MarkForged. Disponível em <<https://www-objects.markforged.com/craft/materials/CompositesV5.2.pdf>> . Acessado em 15/07/2022.

Mohammadjavad Kazemi, Sk Faisal Kabir, Elham H. Fini, State of the art in recycling waste thermoplastics and thermosets and their applications in construction, Resources, Conservation and Recycling, Volume 174, 2021, 105776, ISSN 0921-3449, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105776>.

PWC. Disponível em < <https://www.pwc.com/us/en/industrial-products/publications/assets/pwc-next-manufacturing-3d-printing-comes-of-age.pdf>>. Acessado em: 01/06/2022

Revista Fapesp. Disponível em < <https://revistapesquisa.fapesp.br/o-avanco-da-impressao-3d/>>. Acessado em: 07/06/2022.

S.E. Gad, Polymers, Editor(s): Philip Wexler, Encyclopedia of Toxicology (Third Edition), Academic Press, 2014, Pages 1045-1050, ISBN 9780123864550, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00912-X>.

T.G. Yashas Gowda, M.R. Sanjay, K. Subrahmanya Bhat, P. Madhu, P. Senthamarai kannan & B. Yogesha | Duc Pham (Reviewing Editor) (2018) Polymer matrix-natural fiber composites: An overview, Cogent Engineering, 5:1, DOI: [10.1080/23311916.2018.1446667](https://doi.org/10.1080/23311916.2018.1446667)

University of Cambridge. Disponível em [https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/add\\_manuf/fdm.php](https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/add_manuf/fdm.php)> Acessado em: 08/63/2022

Vinny R. Sastri,<sup>8</sup> - Other Polymers: Styrenics, Silicones, Thermoplastic Elastomers, Biopolymers, and Thermosets, Editor(s): Vinny R. Sastri, In Plastics Design Library, Plastics in Medical Devices (Third Edition), William Andrew Publishing, 2022, Pages 287-342, ISBN 9780323851268, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85126-8.00007-2>.

Yang H-S, Wolcott MP, Kim H-S, and Kim H-J. Polymer Testing 2006; 25(5): 668-676.

**APÊNDICE 1 – Tabela de resultados individuais por corpo de prova.**

Caso	CP#	E [GPa]	$\bar{E}$	D.P
0°_C0	1	24,28	22,27	2,23
	2	25,10		
	3	20,75		
	4	20,54		
	5	20,67		
0°_C1	1	20,43	19,58	1,37
	2	19,54		
	3	20,99		
	4	19,55		
	5	17,40		
0°_C2	1	18,45	18,27	1,12
	2	16,88		
	3	18,49		
	4	17,64		
	5	19,89		
0°_C3	1	17,60	18,26	1,02
	2	19,87		
	3	17,29		
	4	17,94		
	5	18,60		

Caso	CP#	E [MPa]	$\bar{E}$	D.P
90°_C0	1	814,97	819,10	21,64
	2	803,86		
	3	850,79		
	4	806,80		
	5	820,00		
90°_C1	1	639,00	584,48	46,50
	2	596,00		
	3	607,00		
	4	558,00		
	5	520,00		
90°_C2	1	626,00	550,25	85,02
	2	463,00		
	3	607,00		
	4	601,00		
	5	452,00		
90°_C3	1	876,00	812,49	180,62
	2	705,00		
	3	548,00		
	4	901,00		
	5	930,00		

