

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

GUILHERME MAURICIO

JONATHAN MAIA

A INFLUÊNCIA DO TEMPO DE PÓS-CURA NAS PROPRIEDADES TÉRMICAS E
MECÂNICAS DE PEÇAS IMPRESSAS POR FOTOPOLIMERIZAÇÃO EM CUBA.

Joinville - SC

2022

GUILHERME MAURICIO
JONATHAN MAIA

A INFLUÊNCIA DO TEMPO DE PÓS-CURA NAS PROPRIEDADES TÉRMICAS E
MECÂNICAS DE PEÇAS IMPRESSAS POR FOTOPOLIMERIZAÇÃO EM CUBA.

Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia Mecânica do Campus Joinville do
Instituto Federal de Santa Catarina para a
obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico

Orientador: Anael Preman Krelling

Joinville - SC

2022

Maia, Jonathan.

A influência do tempo de pós-cura nas propriedades térmicas e mecânicas de peças impressas por fotopolimerização em cuba / Jonathan Maia, Guilherme Mauricio. – Joinville, SC, 2022.

51 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Curso de Engenharia Mecânica, Joinville, 2022.

Orientador: Anael Preman Krelling.

1. Impressão 3D. 2. Pós-cura. 3. Resina UV. I. Mauricio, Guilherme. III. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. IV. Título.

GUILHERME MAURICIO

JONATHAN MAIA

A INFLUÊNCIA DO TEMPO DE PÓS-CURA NAS PROPRIEDADES TÉRMICAS E MECÂNICAS DE PEÇAS IMPRESSAS POR FOTOPOLIMERIZAÇÃO EM CUBA.

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Mecânico, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Joinville, 14 de julho de 2022.

Prof. Dr. Anael Preman Krelling

Orientador

Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Me. Emerson Luis de Oliveira

Convidado

Instituto Federal de Santa Catarina

Esp. Thiago Polli Miranda

Convidado

Slim 3D

RESUMO

O mercado da manufatura aditiva de baixo custo está crescendo de forma rápida e volumosa, tanto para aplicações domésticas quanto para finalidades industriais. A tecnologia de fotopolimerização por cuba é uma das que se destaca em diversos campos de aplicação, se popularizou nos últimos anos devido ao baixo custo de máquinas e consumíveis aliando uma boa resolução, precisão dimensional e facilidade de impressão. As impressoras 3D que utilizam da tecnologia de fotopolimerização por cuba via display de cristal líquido (LCD), têm sido utilizadas em muitos casos por hobbistas e entusiastas da impressão 3D. Fatores fundamentais para que a utilização dessa tecnologia seja feita de forma adequada, estão sendo negligenciados, dificultando o alcance das propriedades mecânicas ideais das resinas fotocuráveis. Este estudo tem como objetivo avaliar um parâmetro muito relevante conhecido como pós-cura, utilizado após a produção dos modelos por impressão 3D. Numa fase inicial foi selecionada a resina fotossensível Tough UV da marca Anycubic®, por ter propriedades mecânicas relevantes como a alta resistência à deformação permanente, a alta resistência ao impacto e ao alto alongamento tornando-a propícia para aplicações finais e prototipagem. Com o objetivo de padronizar o estudo, tanto a impressora 3D quanto a máquina de lavagem e pós-cura utilizadas são da marca Anycubic®. As amostras produzidas foram lavadas utilizando álcool isopropílico a 95% e a pós-cura foi realizada no comprimento de onda de luz ultravioleta (UV) de 405 nm com base em estudos recentes e nos equipamentos dispostos utilizando os tempos de 15, 30 e 45 minutos. Na terceira etapa as amostras impressas passaram por ensaio de tração e por uma análise dinâmico-mecânica (DMA). Com os dados obtidos foi possível concluir que quanto maior a exposição a luz ultravioleta após a impressão, maiores foram os valores para o módulo de Young, resistência a tração e temperatura de transição vítrea devido ao melhor arranjo das cadeias poliméricas internamente nos corpos de prova confeccionados pelo método de fotopolimerização por cuba por LCD.

Palavras-Chave: Impressão 3D. LCD. DMA. Pós-cura. Resina UV

ABSTRACT

The low cost additive manufacturing market is rapidly and massively growing for home applications and industrial purposes. The VAT photopolymerization technology is one of many that stands out in several fields of application and has become popular in recent years due to the low cost, combining the high resolution, dimensional accuracy and good printability. The 3D printers that use VAT photopolymerization technology via liquid crystal display (LCD), have been used in many cases in an amateur way. The fundamental factors for prototyping to be carried out properly are being neglected, making it difficult to achieve the ideal mechanical properties of photocurable resins. This study aims to evaluate a very relevant parameter known as post-curing, used after the production of 3D printing models. During the initial phase the photosensitive UV Tough resin made by Anycubic® was selected due to its relevant mechanical properties such as: high resistance to permanent deformation, high resistance to impact and high elongation. Making it suitable for prototyping and final applications for many fields. The printing parameters were mixed according to the scientific literature, the author's experience and manufacturer's instructions. The proof bodies were washed using a 95% concentration isopropyl alcohol and post-curing was performed using 405 nm wavelength ultraviolet light (UV) based on recent researchs and selected equipment for 15, 30 e 45 minutes. In the third phase, a prototyped sample was tested with a tensile strength test and dynamic mechanical analysis (DMA). With the data obtained it was possible to conclude that the higher the exposure to ultraviolet light after the immersion, the higher the value of the Young modulus and the tensile strength will be. The same effect will also happen on glass temperature transition due to the better arrangement of the internal polymeric chain on proof bodies made using the the VAT photopolymerization technology LCD.

Keywords: 3D printing. LCD. DMA. Post-curing. UV resin

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - SLA-1 a primeira impressora 3D inventada por Chuck Hull em 1983	14
Figura 2 - Processo SLA patenteado pela 3D Systems	14
Figura 3 - Projeção de máscaras ou imagens por DLP	16
Figura 4 - Impressora 3D de fotopolimerização em cuba por LED-LCD.....	17
Figura 5 - Parâmetros de influência sobre as características dos materiais impressos em fotopolimerização por cuba	18
Figura 6 - Orientações de construção das amostras	19
Figura 7 - Corpo de prova impresso com suportes	20
Figura 8 - Corpo de prova após a remoção dos suportes.....	20
Figura 9 - Diagrama de etapas do estudo.....	25
Figura 10 - Fluxo de trabalho para confecção de amostras em fotopolimerização por cuba.....	27
Figura 11 - Desenho técnico do corpo de prova ASTM D638 (2017) – Tipo IV.....	28
Figura 12 - Desenho técnico das amostras DMA.....	28
Figura 13 - Corpos de prova do tipo IV impressos na resina Tough UV	30
Figura 14 - Impressora 3D Anycubic® - Photon Mono SE.....	30
Figura 15 - Máquina Wash & Cure 2.0 na função lavagem	31
Figura 16 - Modelagem em CAD de base para gabarito de posicionamento	32
Figura 17 - Amostras na máquina de cura utilizando o gabarito de posicionamento.	33
Figura 18 - Equipamento Netzsch DMA 252 com garra dual-cantilever	34
Figura 19 - Equipamento EMIC DL1000, perspectiva isométrica	35
Figura 20 - $\tan \delta$ em função da temperatura para amostras com dimensões 60,00 (L) x 10,00 (C) x 3 (E) mm ³ pós-curadas em 15,30 e 45 min	37
Figura 21 - Módulo de armazenamento (E').....	38
Figura 22 - Gráfico tensão deformação para o tempo de exposição de 15 minutos..	40
Figura 23 - Gráfico tensão deformação para o tempo de exposição de 30 minutos..	41
Figura 24 - Gráfico tensão deformação para o tempo de exposição de 45 minutos..	42
<i>Figura 25 - Gráfico tensão-deformação para o maior limite de resistência à tração de cada tempo de exposição de pós-cura</i>	<i>42</i>
Figura 26 - Limite de resistência a tração em função do tempo de exposição	43
Figura 27 - Módulo de Young em função do tempo de exposição.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química da resina Tough UV da marca Anycubic®	26
Tabela 2 - Dados técnicos fornecidos pelo fabricante	26
Tabela 3 - Parâmetros de impressão	29
Tabela 4 - Alteração da Tg conforme de acordo com a frequência e tempo de exposição de pós-cura	37
Tabela 5 - Alteração do módulo de elasticidade para temperatura de 25°C.....	39
Tabela 6 - Alteração do módulo de elasticidade para temperatura de 40°C.....	39
Tabela 7 - Resultados dos corpos de provas expostos por 15 minutos.....	40
Tabela 8 - Resultados dos corpos de provas expostos por 30 minutos.....	41
Tabela 9 - Resultados dos corpos de provas expostos por 45 minutos.....	41
Tabela 10 - Comparativo das propriedades mecânicas para variação no tempo de pós-cura.....	43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos	12
1.1.1 Objetivo geral	12
1.1.2 Objetivo específico	12
1.1.3 Problema	13
1.1.4 Justificativa	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Impressão 3D por fotopolimerização por cuba	15
2.1.1 Fotopolimerização por escaneamento vetorial	15
2.1.2 Estereolitografia (SLA)	15
2.2 Fotopolimerização por projeção de máscaras ou imagens	17
2.2.1 Processamento de luz digital (DLP)	17
2.2.2 Fotopolimerização em cuba por LCD	18
2.2.3 Fatores de influência	19
2.2.3.1 Altura da camada	20
2.2.3.2 Orientação de impressão	20
2.2.3.3 Inclusão de suportes	22
2.2.3.4 Lavagem	23
2.2.3.5 Pós-cura	23
2.3 Resina fotossensível	24
3 METODOLOGIA	27
3.1 Escolha do tipo de resina	27
3.2 Estudo de caso para fabricação de amostras	29
3.3 Planejamento de confecção	30
3.4 Confecção das amostras	31
3.5 Lavagem das amostras	33
3.6 Pós-cura das amostras	34
3.6.1 Impressão de base pelo método FFF	34
3.7 Análise das peças	36
3.7.1 DMA	36
3.7.2 Ensaio de tração	37
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	39

4.1 Análise Mecânica Dinâmica.....	39
4.2 Ensaio de tração.....	42
5 CONCLUSÃO	47
REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

A crescente popularização da Manufatura Aditiva (MA) no mundo é um aspecto que tem movimentado um mercado bilionário. O processo que também é conhecido popularmente como impressão 3D faturou em receita o valor de US\$13,78 bilhões em 2020 e deve expandir a uma taxa de crescimento anual de 21% entre 2021 a 2028. Só no Brasil foi esperado que em 2021 a receita ultrapassasse US\$400 milhões. (GRAND VIEW RESEARCH, 2021)

A MA tem como grande vantagem a confecção de geometrias complexas frente a outros processos de fabricação tradicionais como usinagem CNC, soldagem e estampagem, por exemplo. O método traz maior velocidade, menor custo e maior flexibilidade em vários casos onde é empregada. O processo tem como característica a fabricação de objetos, camada por camada, a partir de um modelo 3D produzido digitalmente, esse arquivo é exportado em um formato específico para os softwares de MA. Os formatos mais conhecidos são STL - (STereoLithography), AMF - (Additive Manufacturing Format), OBJ - wavefront (VOLPATO, 2017). Obtendo a malha de triângulos pelos formatos citados anteriormente, o arquivo é então levado para o software de “fatiamento” que pode ser interpretado como um tipo de software CAM (Computer Aided Meaning), onde se define a estratégia de impressão por parâmetros como orientação da peça, tempo de cura entre camadas, velocidade, altura de camada e outros. Além das vantagens citadas anteriormente, a manufatura aditiva tem como característica o fato de poder ser aplicada em diversos campos da engenharia, medicina, indústria automotiva, aeroespacial, restaurações dentárias, prototipagem, educação e outros (KATALINIC et al., 2021).

Esse trabalho terá como foco o método mais antigo de MA, o processo de fotopolimerização em cuba. Esse processo baseia-se na construção, a partir de resinas poliméricas em estado líquido, de objetos solidificados por meio da irradiação de uma fonte de luz ultravioleta (UV) ou visível. O primeiro equipamento comercializado foi pela empresa norte-americana 3D Systems, considerada uma das empresas líderes de mercado no segmento de MA (VOLPATO, 2017).

As máquinas que utilizam fotopolímeros em estado líquido podem ser agrupadas em dois grupos principais. O primeiro, baseado em escaneamento vetorial, em que a irradiação de energia é direcionada pontualmente para uma região da camada a ser curada e outro baseado na projeção de máscaras ou imagens, na qual

a energia é direcionada em toda a extensão de uma camada da peça a ser construída. (VOLPATO, 2017).

Pela recente popularização, será abordado um método do segundo grupo, conhecido como fotopolimerização por display de cristal líquido (LCD) de alta resolução. Atualmente muitos usuários que adotam equipamentos com essa tecnologia não levam o processo de pós-cura como um fator importante para o alcance das propriedades fundamentais. Segundo Katalinic et al., (2021), a pós-cura utilizando o tempo adequado leva a um aumento de até 48% de resistência à tração e de até 47% para o módulo de elasticidade dependendo da altura da camada e da orientação de impressão.

Esse trabalho tem como objetivo avaliar a resina fotossensível do tipo Tough UV da marca Anycubic®, pois o fabricante não especifica o tempo adequado de pós cura, apenas menciona que deve ser inferior a uma hora. Deste modo se mostra interessante a avaliação de tempos de exposição à luz UV variados, após a impressão 3D, para otimização do processo de impressão e maximização de algumas propriedades.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo do presente trabalho é avaliar a influência do processo de pós-cura com diferentes tempos de exposição nas propriedades térmicas e mecânicas em amostras impressas pelo método de fotopolimerização em cuba por LCD utilizando a resina fotossensível do tipo Tough UV da marca Anycubic.

1.1.2 Objetivo específico

- Confeccionar amostras pelo método de fotopolimerização em cuba por LCD;
- Curar as amostras a diferentes tempos de exposição após a impressão dos modelos;
- Realizar ensaios de tração dos corpos de provas para comparar os resultados dos diferentes tempos de pós-cura escolhidos;
- Fazer uma análise dinâmica mecânica (DMA) a fim de avaliar a influência da pós-cura nas propriedades mecânicas e viscoelásticas;

1.1.3 Problema

Este trabalho propõe avaliar diferentes tempos de exposição da pós-cura para corpos de prova impressos visto que o fabricante não disponibiliza informações técnicas específicas para o tempo de pós-cura em função dos tipos de resinas. Abordando de forma geral que deve ser inferior a uma hora utilizando o equipamento específico para essa função.

1.1.4 Justificativa

A popularização da impressão 3D por fotopolimerização em cuba nos últimos anos possibilitou a abertura de um mercado promissor para a chegada de diferentes tipos de resinas ao grande público. Como recomendado por Katalinic *et al.* (2021), é de suma importância futuras pesquisas para otimização dos parâmetros em diferentes tipos de resinas e tecnologias de impressão distintas. Entre eles é citado a variação do tempo de pós-cura sendo fundamental para poder aproveitar ao máximo as vantagens da tecnologia de fotopolimerização em cuba. Dessa forma este trabalho irá avaliar o processo de pós-cura para resina Tough UV, insumo notável para aplicação final em projetos por ter aspecto mais dúctil que as resinas convencionais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Impressão 3D por fotopolimerização por cuba

Segundo Volpato (2017), o processo de Manufatura Aditiva (MA) por fotopolimerização tem como princípio a solidificação de uma resina fotopolimérica em estado líquido camada por camada. Essa solidificação acontece proveniente de uma luz ultravioleta (UV) ou visível. A incidência dessa luz libera energia capaz de começar uma reação química na resina fotopolimérica líquida, endurecendo o material dentro do reservatório. Esse acontecimento é denominado de fotopolimerização e ocorre devido aos fotoiniciadores contidos na composição que liberam elétrons livres pelo contato com a luz e buscam estabilidade formando cadeias poliméricas. Atualmente, segundo Staffová *et al.* (2022), a impressão de fotopolimerização é responsável por 50% do mercado de manufatura aditiva dentre os campos de engenharia de redução de massa, detecção ultrassônica, construções funcionais além de implementações em muitos campos da medicina.

2.1.1 Fotopolimerização por escaneamento vetorial

O escaneamento vetorial é feito geralmente por uma fonte de energia a laser, mas também há a possibilidade dessa fonte ser um feixe de elétrons ou plasma, todos esses processos têm como base a estereolitografia.

2.1.2 Estereolitografia (SLA)

Dentre os processos de manufatura aditiva, o mais antigo é o de estereolitografia (SLA), criado por Charles W. Hull em 1983, baseia-se na emissão de luz UV utilizando um laser com comprimento de onda pré-definido sobre a resina fotossensível. Além de ser o primeiro método MA, também é o primeiro empregado comercialmente. Figura 1 mostra a primeira impressora 3D.

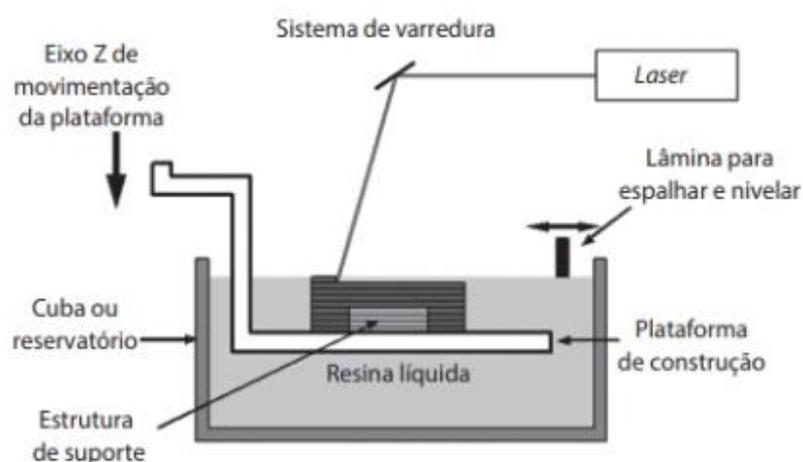
Figura 1 - SLA-1 a primeira impressora 3D inventada por Chuck Hull em 1983



Fonte: Printi It 3D (2021)

Em 1986, Hull criou a empresa 3D Systems® e patenteou o método conhecido como Estereolitografia Apparatus (SLA). Um feixe de laser emitido é orientado através de um sistema óptico que projeta geometrias em duas direções, no eixo X e Y, essas projeções são derivadas de um software de fatiamento. O conjunto mencionado anteriormente varre o feixe de laser solidificando camada por camada a resina presente na cuba, a plataforma abaixa poucos milímetros no eixo Z e produz a peça solidificada até que a programação definida no software chegue ao fim. Figura 2 apresenta o processo SLA.

Figura 2 - Processo SLA patenteado pela 3D Systems



Fonte: Volpato, 2017.

Após a peça ser impressa ela é lavada em álcool isopropílico para depois ser encaminhada a cura final em uma câmara UV onde a resina polimérica se solidificará por completo. Peças com geometrias complexas, que possuem partes suspensas e com ângulos abruptos (45° ou mais), necessitam de estruturas denominadas de suporte, trata-se de um material solidificado para servir como apoio da peça final, que então é removido e descartado após a impressão.

Essa modalidade de impressão 3D tem como vantagem o alcance de uma maior precisão, se comparada com método de fabricação por filamento fundido (FFF), resultando em um detalhamento muito alto das peças confeccionadas. A precisão nos eixos X e Y pode chegar a 0,075 mm em algumas máquinas, variando uma altura de camada entre 0,025 a 0,5 mm. A potência do laser varia entre 6 mW a 12 mW com comprimento de onda de 325 nm ou sendo do tipo Nd:YVO₄, no estado sólido, com potência de 100mW a 800mW e comprimento de onda de 354,7 nm, o diâmetro do feixe geralmente é de 0,25 mm e os primeiros lasers UV tinham como base Hélio e Cádmiio. (VOLPATO, 2017)

2.2 Fotopolimerização por projeção de máscaras ou imagens

Na década de 90, pesquisadores tiveram como objetivo criar um método similar a SLA que seria capaz de curar toda uma extensão da cuba, sendo capaz de chegar em um dimensionamento preciso em escala microscópica. Essa ideia visa uma maior velocidade de impressão sem perder a qualidade de impressão, dessa ideia foi criado o método de fotopolimerização por projeção de máscaras ou imagens.

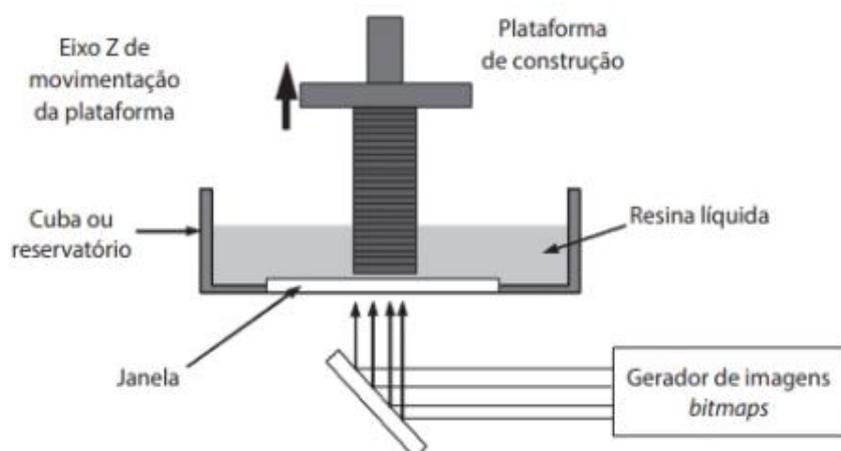
2.2.1 Processamento de luz digital (DLP)

Segundo Volpato (2017), com o mesmo intuito de polimerização das resinas em cuba, esse método difere do escaneamento vetorial por abranger toda uma área de uma vez. Utilizando uma fonte de luz UV derivada geralmente de um projetor, esse processo passa por um motor óptico denominado de *Digital Micromirror Device* (DMD), esse dispositivo contém vários espelhos que se movimentam conforme a programação previamente feita em um software de fatiamento. As imagens colocadas no DMD são então transferidas para o reservatório, camada por camada, até que a cura da peça fique completa. Como grande vantagem é possível ajustar o foco da

lente do projetor para alcançar dimensões mais precisas.

Nestas máquinas o mais comum é que o projetor e o DMD estejam localizados na parte inferior e o eixo Z movimento a plataforma de construção para cima, construindo as peças de cabeça para baixo na maioria dos casos conforme a Figura 3.

Figura 3 - Projeção de máscaras ou imagens por DLP

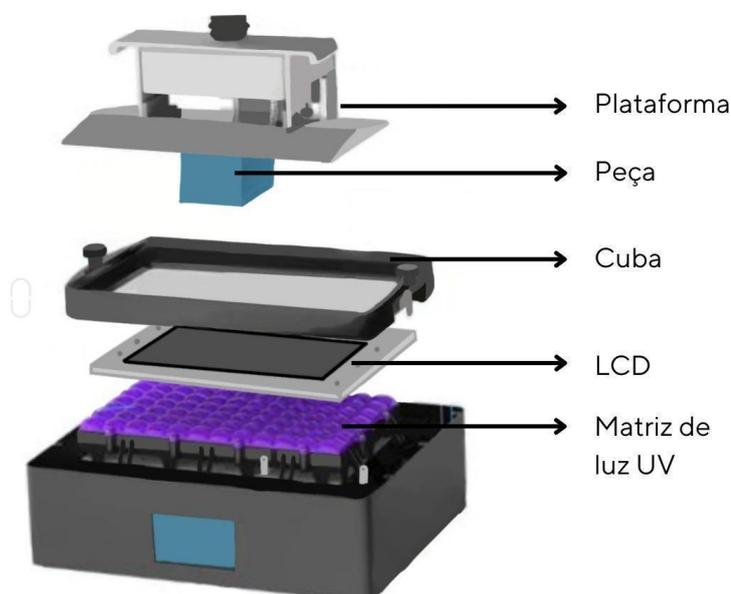


Fonte: Volpato, 2017.

2.2.2 Fotopolimerização em cuba por LCD

A impressão 3D por LCD, também conhecida como DPP, é um processo baseado em projeção de máscara ou polimerização em camadas. A tela LCD é uma matriz feita de pixels. O número de pixels em uma matriz pode alcançar milhões, dependendo do tamanho da tela e do tamanho individual do pixel. A tecnologia do LCD basicamente controla a passagem de luz através de um único pixel, combinando cristais líquidos, vidro polarizado, circuitos elétricos e a fonte de luz. Os cristais líquidos podem torcer ou distorcer dependendo se são eletricamente carregados ou não, isso altera a frequência da luz que passa através deles. Em combinação com os vidros polarizados na frente e atrás da camada de cristal líquido, o fluxo luminoso pode ser controlado através do envio de correntes elétricas. Impressoras 3D com LCD utilizam esse mecanismo para a cura das resinas fotossensíveis no comprimento de onda entre 365 a 410 nm. A construção se assemelha a impressoras que utilizam o método DLP, imprimindo de baixo para cima, conforme a Figura 4. (VLADIC et al., 2022)

Figura 4 - Impressora 3D de fotopolimerização em cuba por LED-LCD



Fonte: Elaborado pelos autores.

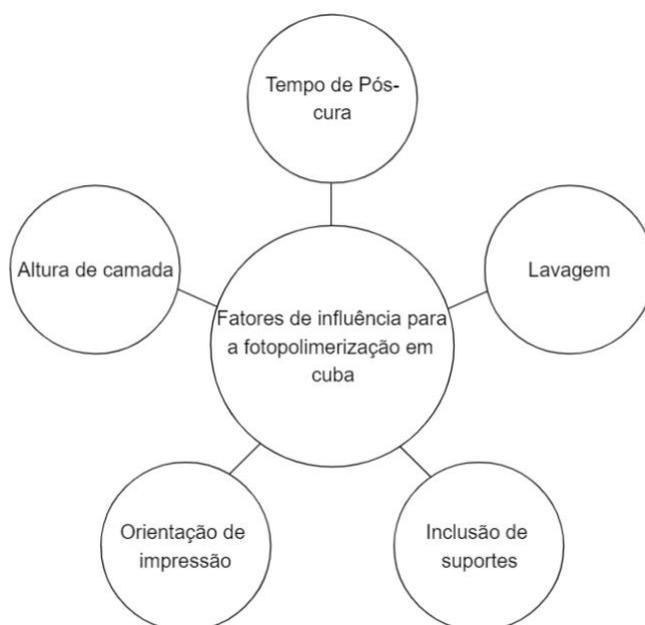
Neste processo existem algumas desvantagens, a luz UV é danosa para telas LCDs portanto há uma vida útil desses componentes. Telas LCDs do tipo RGB tem vida útil menor de aproximadamente 500 horas e precisam de mais tempo da matriz UV ativa, em torno de 5 a 10 segundos por camada. Máquinas mais recentes possuem LCD do tipo monocromático, esse tipo de tela tem maior transmitância luminosa, portanto absorve menos luz UV e prolonga a vida útil do equipamento para aproximadamente 2000 horas. Com a passagem de luz sendo facilitada é possível baixar o tempo de exposição de cura para 1,5 segundos a 3 segundos (valor pode variar conforme fabricante e pigmentação da resina), aumentando a velocidade do processo de fotopolimerização e conseqüentemente diminuindo o tempo total de impressão.

2.2.3 Fatores de influência

Apesar do tempo de pós-cura ser o fator de influência a ser avaliado com mais ênfase nesse estudo, existem vários outros parâmetros que devem ser levados em consideração para a produção das amostras, alguns mais importantes vão ter um

aprofundamento maior com base na literatura, são eles: Altura (espessura) de camada, tempo de pós cura, lavagem, orientação de impressão das amostras e inclusão de suportes nas peças (KATALINIC et al., 2021), figura 5.

Figura 5 - Parâmetros de influência sobre as características dos materiais impressos em fotopolimerização por cuba



Fonte: Katalinic et. al (2021) - adaptado.

2.2.3.1 Altura da camada

Um fator importante a se considerar ao definir os parâmetros de impressão é a altura da camada. Segundo Katalinic *et al.*, (2021), em uma análise de impressão pelo método de SLA por laser de quatro alturas de camadas distintas, sendo elas 25, 50, 100 e 160 μm , as amostras com menor altura de camada impressas na horizontal tiveram um aumento linear no módulo de elasticidade e na resistência à tração. De acordo com Cheah *et al.*, (1997), a baixa espessura da camada reduz o efeito de contração, o que é muito importante para que não haja distorções no dimensional das amostras.

2.2.3.2 Orientação de impressão

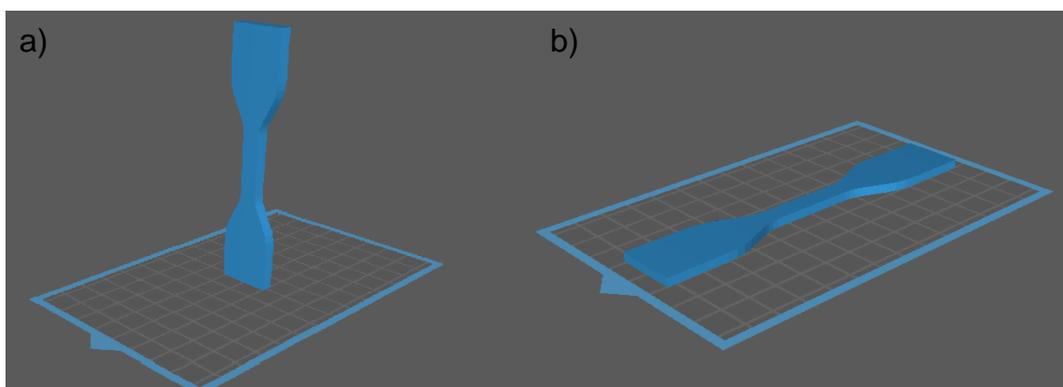
A orientação de impressão também deve ser analisada no momento de

preparar o modelo impresso no software de fatiamento, determinadas orientações de construção demonstram diferentes propriedades mecânicas dentro da manufatura aditiva, essa característica é denominada de anisotropia (VOLPATO, 2017). Para a fotopolimerização em cuba, foram analisadas orientações em 0° , 45° e 90° a produção em 0° obteve resultados significativamente melhores no módulo de elasticidade e na dureza se comparadas com as amostras em 45° e 90° (AHMAD et al, 2020).

Já é de consenso na literatura que a impressão na vertical, no sentido do empilhamento das camadas, aumenta a anisotropia das amostras diminuindo de forma abrupta a carga de tração suportada em comparação com amostras impressas na horizontal. Segundo Wang et al., (2021), utilizando a tecnologia DLP para impressão de amostras com uma resina do tipo UV tough, similar à deste estudo, revelou que tanto a resistência a tração quanto o módulo de elasticidade foram melhores para impressão no sentido horizontal, paralela à plataforma de construção.

De acordo com Staffová *et al.*, (2022), as propriedades termomecânicas também sofrem influência de acordo com a orientação de impressão, dessa vez usando o método estereolitografia por máscara (MSLA), foram investigadas amostras impressas em x, y e z. Os resultados evidenciaram um grande efeito na temperatura de deflexão térmica e na tensão de ruptura, entretanto não houve mudanças significativas na temperatura de transição vítrea (T_g). A orientação em X (b), paralela ao plano de impressão, mostrou um arranjo mecanicamente mais eficiente, seguida pela orientação Y e a mais ineficiente mais uma vez foi a orientação em Z(a). Dessa forma, se torna mais coerente optar pela orientação em X (b). A Figura 6 mostra as orientações utilizadas no estudo.

Figura 6 - Orientações de construção das amostras

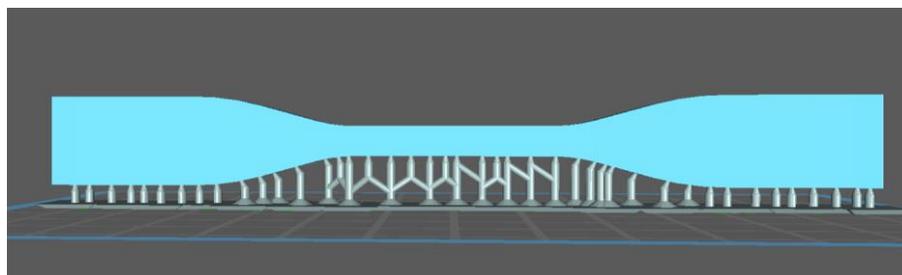


Fonte: Elaborado pelos autores.

2.2.3.3 Inclusão de suportes

Os suportes são estruturas colocadas na peça com intuito de fornecer uma base de sustentação para peças que seriam produzidas suspensas ou com ângulos muito inclinados. Esse recurso é muito útil principalmente para peças com geometrias complexas, essas estruturas são feitas em conjunto com a peça e depois são removidas com algum tipo de ferramenta ou até mesmo manualmente. Apesar de inerente a muitas peças, esse recurso demanda muita experiência e de vários parâmetros de ajuste para tentar atenuar seus pontos negativos. Segundo Arnold et al., (2019), amostras que foram impressas com suportes tiveram alterações significativas na rugosidade e no dimensionamento das seções para alturas de camadas de 50 e 100 μm , foram notadas diferenças relevantes em 91% das amostras do estudo. Com o objetivo de ilustrar os efeitos de suporte, foi impresso uma amostra do tipo IV com suportes, Figura 7, e o resultado após a remoção é mostrado na Figura 8. É visualmente perceptível alterações na seção e na rugosidade, tornando inviável a impressão utilizando suportes para esse estudo.

Figura 7 - Corpo de prova impresso com suportes



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 8 - Corpo de prova após a remoção dos suportes



Fonte: Elaborado pelos autores.

2.2.3.4 Lavagem

Após a impressão, a peça confeccionada é removida da plataforma de impressão e levada a um banho para retirada do excesso da resina e obtenção de um produto mais sólido e liso. A lavagem pode ser feita com etanol, água destilada, solução salina tamponada com fosfato, tratamento com plasma e outros. Devido a eficaz capacidade de remoção do excesso de resina, o etanol e similares são os produtos mais utilizados para esse fim. O etanol também se mostrou eficaz em diminuir a toxicidade após a lavagem. (BARDELICK et al., 2021).

Ainda mais comum que o etanol, são utilizadas concentrações de álcool isopropílico para lavagem, principalmente para impressoras desktop, como a utilizada neste trabalho. Foram observados um decaimento de 50% no limite de resistência à tração na utilização do álcool isopropílico 60%, um incremento de 82% no alongamento total das amostras em comparação com amostras que não foram lavadas (BARDELICK et al., 2021). Já para o álcool isopropílico 90%, foi observado um aumento de 15% na dureza, aumento do limite resistência a tração e um pequeno aumento no alongamento se comparado a concentração de 60%, por esse motivo para esse trabalho foi escolhido álcool isopropílico para esse procedimento.

2.2.3.5 Pós-cura

A etapa de pós-cura é o objetivo deste estudo. Tanto para aplicação em *hobby* como profissional é fundamental que esse parâmetro seja configurado corretamente para que a resina tenha as propriedades mecânicas e térmicas maximizadas. De acordo com o estudo conduzido por Zguris (2019), que investigou 3 comprimentos de onda ultravioleta distintos para pós-cura, o comprimento de 405 nm resultou no melhor módulo de elasticidade e na melhor resistência à tração para uma resina fotossensível com base acrílica. Além disso, foi verificada uma diferença expressiva nas propriedades pós-curadas para as não curadas nos três comprimentos de onda avaliados.

Bonada *et al.* (2017), utilizando impressão por DLP, verificaram que a taxa de conversão monômero em polímero na pós-cura utilizando luz visível é de 77% enquanto utilizando luz UV chega a aproximadamente a 89%, entretanto no mesmo estudo não houve diferença significativa para a exposição de 20 e 40 minutos na

resistência à tração, mas um aumento no módulo de elasticidade e uma diminuição no alongamento. No mesmo estudo, foi realizada uma análise mecânica dinâmica e observado um aumento intenso na temperatura de transição vítrea (T_g), com o processo de pós-cura aplicado nas amostras. Com base no que foi descoberto é possível otimizar o processo de pós-cura buscando propriedades mecânicas distintas, caso o intuito seja maximizar o máximo alongamento não é interessante prolongar a exposição a luz UV por longos períodos.

Para a pesquisa de Riccio *et al.* (2021), cujo objetivo foi a avaliar o tempo de pós-cura para uma grande variabilidade de tipos de resina para um único tempo de exposição, a resina do tipo Tough teve um acréscimo de 29% de resistência à tração enquanto a resina biocompatível denominada Custom Tray apresentou um aumento de 215%, ambas da marca Formlabs®. No contexto geral, 12 tipos de resinas da marca Formlabs® foram impressas pelo método SLA, apresentaram uma média de 88% de aumento no módulo de Young e 89% de acréscimo na resistência à tração. Por outro lado, a pós-cura também mostrou em alguns casos o aumento do comportamento frágil que pode estar ligado ao efeito de contração que pode ter gerado um estresse residual na estrutura do polímero, alguns tipos de resinas se apresentaram mais quebradiças, diminuindo o campo elástico.

Houve também grande divergência dos dados técnicos fornecidos pelo fabricante com os encontrados nos testes, os fatores que podem ter justificado a discrepância são variáveis como umidade e temperatura de armazenamento.

2.3 Resina fotossensível

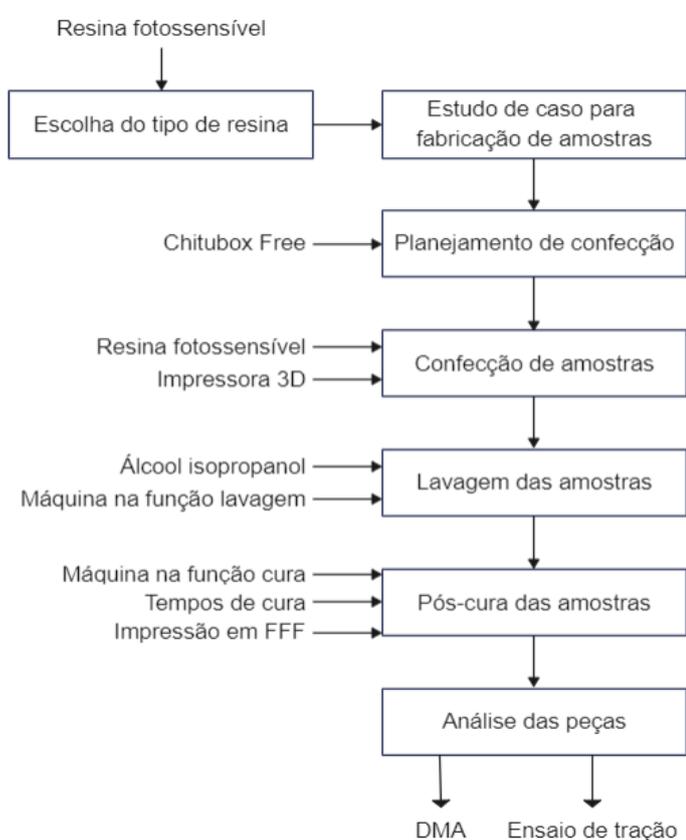
Segundo Riccio *et al.* (2021), as resinas mais comuns para impressão têm como composição oligômeros, monômeros e um ou mais fotoiniciadores, há também outros materiais conhecidos como plastificantes, cargas de reforço e pigmentos. Esses materiais têm como função estabilizar a resina, melhorar a taxa de reação, otimizar outras propriedades como a taxa de contração, definir a opacidade, coloração, viscosidade e outros. Devido a facilidade de absorção de luz UV e outros comprimentos de luz visíveis, os fotoiniciadores tem como função absorver a energia derivada da luz, transformando-a em energia química na forma de reagente. A fotopolimerização assume que as resinas fotossensíveis tenham cadeias carbônicas pequenas e todos os componentes do polímero, mesmo que ainda não estejam

totalmente polimerizados. A exposição à luz ultravioleta torna as cadeias poliméricas maiores, mais estáveis formando um estado sólido. Quando a resina é atingida pela luz UV a molécula do fotoiniciador é dividida em duas partes, e a ligação entre essas duas partes se torna muito reativa, buscando estabilidade nas cadeias de monômeros e oligômeros adjacentes que por sua vez reagem com outro grupo formando cadeias ramificadas mais longas e assim por diante, até atingir um estado sólido estável, tudo isso em poucos milissegundos.

3 METODOLOGIA

Neste t3pico ser3o apresentados os recursos utilizados e como eles foram empregados na impress3o dos corpos de provas. O p3s-processo de impress3o tamb3m ser3 demonstrado a fim de justificar as escolhas dos autores. Os equipamentos selecionados para o fluxo de trabalho s3o da mesma marca visando padroniza3o do processo e a minimiza3o de aleatoriedades. Todos os equipamentos, assim como os insumos, foram fornecidos pela empresa Slim 3D impressoras. A metodologia utilizada est3 disposta na Figura 9.

Figura 9 - Diagrama de etapas do estudo



Fonte: Elaborado pelos autores.

3.1 Escolha do tipo de resina

A resina comercial Flexible Tough UV fotocur3vel com base em polimetilmetacrilato (PMMA) de pigmenta3o branca da marca Anycubic®, foi utilizada para esse estudo. Essa resina foi selecionada por ser mais resistente ao impacto e ter

um caráter mais flexível que as resinas convencionais, tornando-a interessante para aplicações de desenvolvimento de produto final e mais apta para confecção de protótipos pelo comportamento dúctil-elástico. O custo relativamente mais baixo que suas concorrentes e por ter um comprimento de cura compatível com a maioria das impressoras do mercado (365-405nm) a torna importante pela utilização mais ampla dos usuários que as resinas menos acessíveis. A composição da resina pode ser verificada na tabela 1 e na tabela 2 são mostrados os dados técnicos.

Tabela 1 - Composição química da resina Tough UV da marca Anycubic®

Substância	Porcentagem (%)	Tipo
(octahydro-4,7-methano-1H-indenediyl)bis(methylene) diacrylate	40-60	Monômero
Propylidynetrimehanol, ethoxylated, esters with acrylic acid	40-60	Oligômero
Diphenyl(2,4,6-trimethylbenzoyl)phosphine oxide	4-10	Fotoiniciador
2,2-bis(acryloyloxymethyl)butyl acrylate	4-10	Pigmento

Fonte: Ficha de informação de segurança de produtos químicos Shenzhen Anycubic® Technology Co., Ltd – adaptado

Tabela 2 - Dados técnicos fornecidos pelo fabricante

Dados técnicos Tough UV - Anycubic®	
Solidificação por comprimento de onda (nm)	365-405
Dureza (Shore D)	76
Viscosidade a 25°C (mPA.s)	150 - 250
Densidade em estado líquido (g/cm ³)	1,1 - 1,15
Resistência à tração (MPa)	35-45
Resistência à flexão (MPa)	50-60
Módulo de flexão (GPa)	0,9 - 1,2
Módulo de elasticidade (GPa)	0,8 - 1,2
Impacto Izod (J/m)	60 - 60
Validade (meses)	18

Fonte: Shenzhen Anycubic® Technology Co., Ltd - adaptado

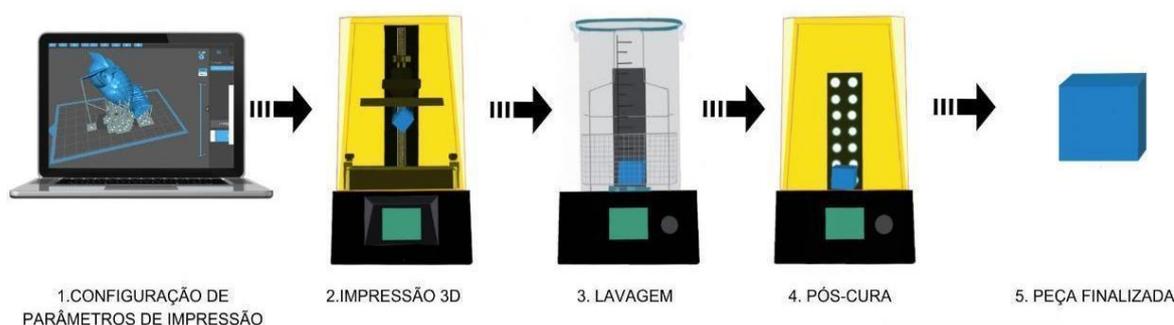
3.2 Estudo de caso para fabricação de amostras

Nesta etapa, como o objetivo é avaliar a influência da pós-cura, o foco foi padronizar ao máximo o processo buscando gerar menos variáveis a fim de minimizar possíveis anomalias.

Depois de definidas as variáveis a serem utilizadas com base na literatura, o estudo prosseguiu no fluxo de trabalho da Figura 10 para impressão 3D das amostras. Foram então embasados o procedimento de confecção, configuração dos parâmetros no software, geração dos arquivos e avaliação de qualidade após a impressão.

Para não interferência do meio externo, as amostras foram impressas sempre em um ambiente escuro, com uma temperatura padrão entre 20°C a 30°C conforme a recomendação do fabricante. Após as peças impressas, a qualidade dimensional era avaliada utilizando um paquímetro digital e a qualidade das superfícies era analisada visualmente. Amostras que apresentaram bolhas na intersecção com a plataforma de impressão ou que apresentaram variação dimensional de mais de 0,2 mm foram descartadas. As amostras aprovadas foram conduzidas para lavagem em álcool isopropílico da marca Quimidrol e imediatamente submetidas à pós-cura nos tempos de 15, 30 e 45 minutos, após isso, foram devidamente etiquetadas e colocadas e armazenadas sem contato com a luz. Por fim, essas amostras foram submetidas aos ensaios de tração e a DMA.

Figura 10 - Fluxo de trabalho para confecção de amostras em fotopolimerização por cuba



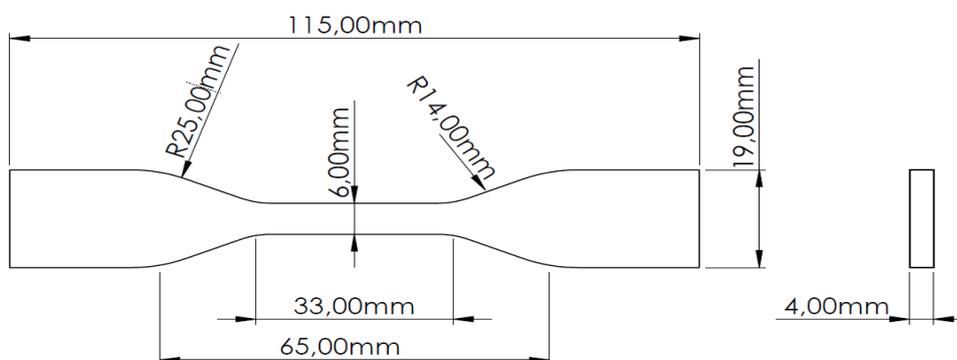
Fonte: Elaborado pelos autores.

Para os corpos de prova do ensaio de tração foram utilizadas as dimensões do tipo IV da norma ASTM D638 (2017), essas dimensões são recomendadas para

materiais de diferentes valores de rigidez, geralmente utilizadas quando se busca um estudo comparativo, assim como selecionado por Zguris (2019). Foram fabricados ao total 15 corpos de prova do tipo IV, sendo 5 para cada condição avaliada (15, 30 e 45 minutos), atendendo as exigências da norma.

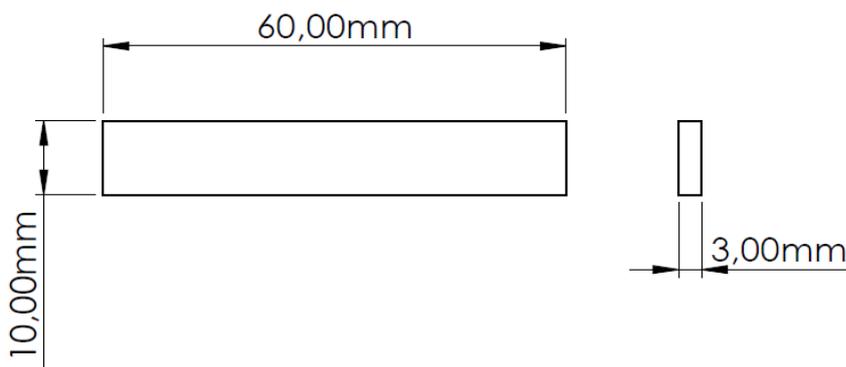
As dimensões das amostras para o DMA foram de 60,00 (L) x 10,00 (C) x 3 (E) mm³ e o arquivo STL, foi gerado pelo software CAD Fusion 360 da Autodesk, as amostras foram confeccionadas em duplicata para redundância caso houvesse algum problema durante o desenvolvimento. O detalhamento do corpo de prova do tipo IV é mostrado na Figura 11 e da amostra de DMA na Figura 12.

Figura 11 - Desenho técnico do corpo de prova ASTM D638 (2017) – Tipo IV



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 12 - Desenho técnico das amostras DMA



Fonte: Elaborado pelos autores.

3.3 Planejamento de confecção

A estratégia de impressão 3D é definida pelo software de fatiamento, nele são definidos os parâmetros de impressão como tempo de exposição, velocidade,

resolução de altura de camada e outras funções primordiais para o processo de fotopolimerização em cuba. Para esse propósito foi escolhida a versão gratuita do software Chitubox®, como o intuito deste estudo é avaliar o processo de pós-cura, optou-se por utilizar os parâmetros de fatiamento indicados pelo fabricante a fim de alcançar as propriedades mecânicas fornecidas nos dados técnicos. Também optou-se por imprimir os corpos de prova na horizontal, com a maior área em contato com a superfície da plataforma e sem suportes, devido aos efeitos da anisotropia e da inclusão de suportes citados anteriormente neste trabalho. Os parâmetros utilizados estão descritos na tabela 3 e foram retirados do repositório designado para cada máquina da marca:

Tabela 3 - Parâmetros de impressão

Parâmetros	Valores
Altura de camada (mm)	0.05
Tempo de exposição (s)	1.5
Tempo de descanso (s)	1
Número de camadas da base	6
Tempo de exposição de camadas da base (s)	30
Elevação em Z (mm)	6
Velocidade de elevação (mm/s)	4
Velocidade de retração (mm/s)	6

Fonte: Shenzhen Anycubic Technology Co., Ltd - adaptado

3.4 Confeção das amostras

Para a impressão dos corpos de prova, mostrados na Figura 13, foi utilizada uma impressora 3D também da fabricante Anycubic®, modelo Photon Mono SE com matriz de LED UV de 405 nm, precisão dimensional no XY de 51 µm e de 10 µm no eixo Z e que pode imprimir a uma velocidade de até 80mm/h, mostrada na Figura 14. Essa impressora possui LCD do tipo monocromático, que torna possível reduzir significativamente o tempo de cura entre as camadas tornando o processo de impressão mais veloz. Para a confecção foram realizados os seguintes passos:

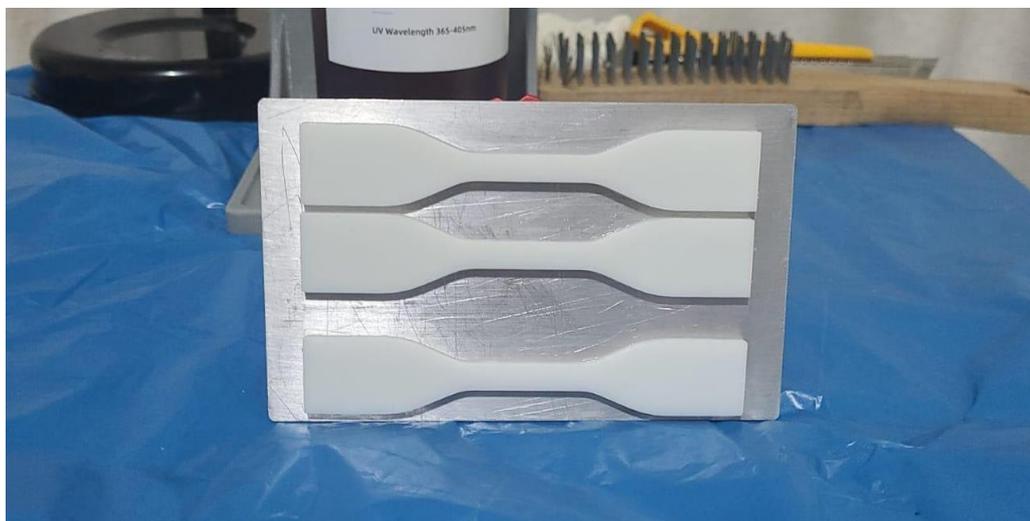
a) Verificação do nivelamento da plataforma de impressão: com a cuba removida é selecionada a função de posicionamento inicial da impressora. Uma folha de papel sulfite de aproximadamente 0,074 milímetros de espessura, dobrada ao meio, é

inserida entre a plataforma e o LCD, caso essa folha não esteja com o tensionamento adequado é preciso soltar os parafusos de fixação e reapertar até que haja um meio termo para então configurar o novo valor para o zero da impressora.

b) Verificação do tensionamento do filme FEP na cuba: o componente deve estar tensionado para que não haja erros no processo. Caso o FEP esteja com baixa tensão ou opaco, deve-se apertar os parafusos da armação ou então realizar a troca do componente.

c) Com a cuba inserida novamente dentro da impressora, o frasco da resina é agitado por 1 minuto a fim de homogeneizar a fórmula do composto e então despejada na cuba.

Figura 13 - Corpos de prova do tipo IV impressos na resina Tough UV



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 14 - Impressora 3D Anycubic® - Photon Mono SE



Fonte: Elaborado pelos autores.

3.5 Lavagem das amostras

Após a impressão a plataforma de construção é levada até a máquina Wash & Cure 2.0 da marca Anycubic, na função lavagem. Dentro do recipiente da Figura 15 contém álcool isopropílico 95% com formulação da empresa Quimidrol. Visto a degradação ocasionada por esse tipo de álcool para resinas com base acrílica, foi reduzido para 5 minutos o tempo de lavagem com o objetivo de atenuar os efeitos desse tipo álcool observada por Bardelcik et. al (2021) em uma lavagem de 10 minutos utilizando uma lavadora similar, mas de outra marca.

Figura 15 - Máquina Wash & Cure 2.0 na função lavagem



Fonte: Elaborado pelos autores.

3.6 Pós-cura das amostras

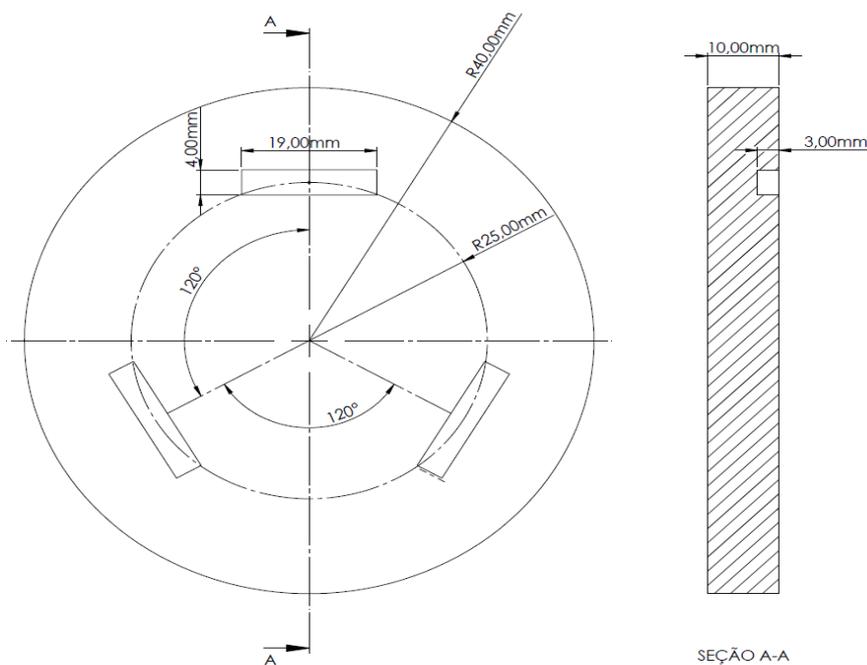
O objetivo central deste trabalho é a influência do tempo de pós-cura sobre os objetos impressos, como já mencionado, o processo de cura após a impressão é fundamental para as propriedades termomecânicas. Por esse motivo não se avaliou amostras sem passar por esse processo, optou-se por trabalhar com 3 tempos de cura: 15, 30 e 45 minutos. O fabricante limita-se a informar que o tempo de pós-cura deve ser inferior a 60 minutos, por esse motivo os valores mencionados foram escolhidos. Para essa etapa foi utilizada a máquina Wash & Cure 2.0 na função cura. Esse equipamento possui 12 lâmpadas com comprimento de onda de 405 nm e uma plataforma giratória visando uma distribuição uniforme por toda a zona de abrangência.

3.6.1 Impressão de base pelo método FFF

Objetivando a distribuição uniforme do fluxo luminoso sobre as amostras, foram confeccionadas duas bases por impressão do tipo FFF. Utilizando o software CAD Fusion 360 da Autodesk, foram modeladas bases circulares de 80 (D) x 5 (E) mm², para que as amostras fossem curadas na vertical de forma homogênea. Os encaixes foram posicionados para que as 3 amostras em cura simultânea não se interceptam

conforme a máquina for rotacionando. As bases foram confeccionadas com o filamento poliácido láctico (PLA) de cor preta, da marca Slim 3D, em uma impressora 3D do tipo FFF da fabricante Creality®, modelo CR-10s, a modelagem e a disposição das amostras na máquina de cura podem ser observadas nas Figuras 16 e 17.

Figura 16 - Modelagem em CAD de base para gabarito de posicionamento



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 17 - Amostras na máquina de cura utilizando o gabarito de posicionamento



Fonte: Elaborado pelos autores.

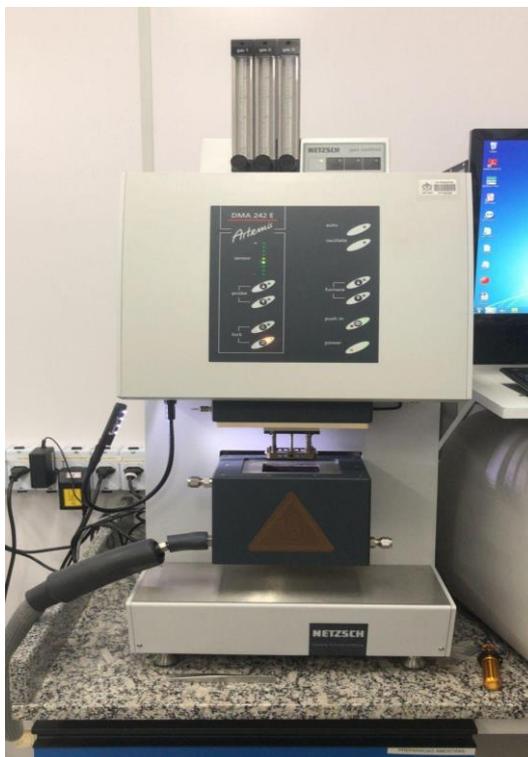
3.7 Análise das peças

Neste tópico os corpos de provas foram avaliados de acordo com os critérios citados anteriormente e levados para fase de ensaios, onde serão colhidos dados para interpretação dos autores.

3.7.1 DMA

A Análise Dinâmico-Mecânica foi realizada no equipamento DMA 242 da marca Netzsch, localizado no LABMAT da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O ensaio foi realizado no modo dual-cantilever com amplitude de 60 μm , intervalo de temperatura de 10°C - 120°C e multifrequência (1 Hz, 5 Hz e 10 Hz). Com o ensaio é possível obter os módulos de armazenamento (E') e perda (E''), fator de perda ($\tan \delta$) e temperatura de transição vítrea (T_g). A Figura 18 mostra o equipamento utilizado no estudo.

Figura 18 - Equipamento Netzsch DMA 252 com garra dual-cantilever



Fonte: Elaborado pelos autores.

3.7.2 Ensaio de tração

Os ensaios foram realizados seguindo a norma ASTM D638 (2017). A norma define que se deve ensaiar ao menos 5 corpos de prova por condição, totalizando 15 ensaios. A máquina utilizada para os ensaios de tração foi uma DL1000 da marca Emic, Figura 19, do laboratório da empresa SCiTec, com uma velocidade de 5mm/min. A máquina automaticamente retorna valores de deslocamento em milímetros de acordo com a carga aplicada em Newtons para cada instante em segundos. Os dados gerados pela máquina são então tratados em uma planilha onde uma conversão é realizada para obtenção da tensão (σ) em MPa dividindo a força (F) pela área inicial da seção (A_0) do corpo de prova segundo a equação 1. Já a deformação (ε) é obtida dividindo a variação do comprimento (Δl) pelo comprimento inicial (l_0), conforme a equação 2:

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

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

Figura 19 - Equipamento EMIC DL1000, perspectiva isométrica



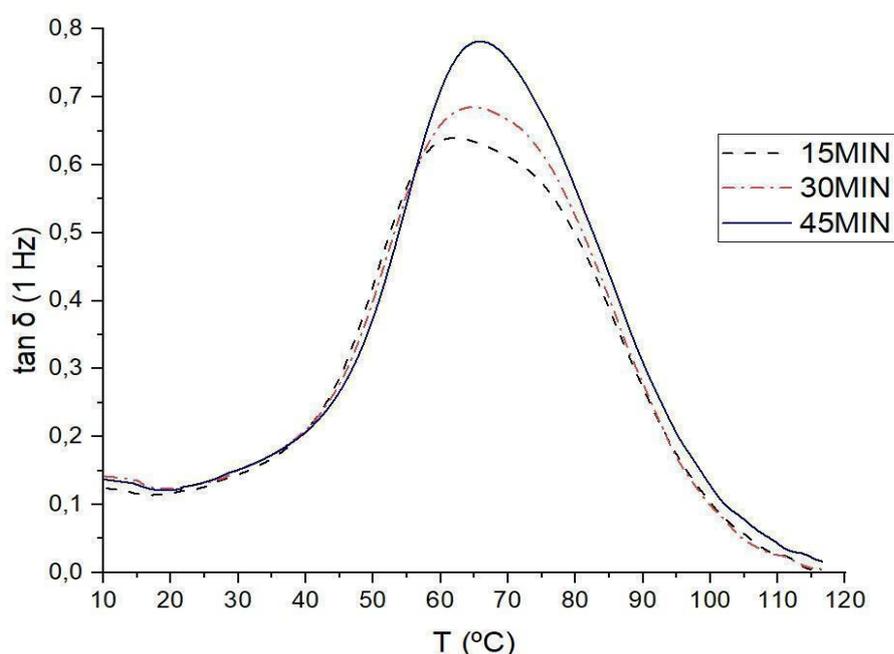
Fonte: Elaborado pelos autores.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Análise Mecânica Dinâmica

Pelo ensaio realizado com os 3 períodos de pós-curas, foi possível determinar a influência na temperatura de transição vítrea (T_g), conforme a Figura 20 a seguir:

Figura 20 - $\tan \delta$ em função da temperatura para amostras com dimensões 60,00 (L) x 10,00 (C) x 3 (E) mm³ pós-curadas em 15,30 e 45 min



Fonte: Elaborado pelos autores.

O valor da temperatura de transição vítrea é retirado com base no pico de fator de perda ($\tan \delta$), e aumenta com o aumento da frequência, de acordo com a tabela 4.

Tabela 4 - Alteração da T_g conforme de acordo com a frequência e tempo de exposição de pós-cura

Frequência	Temperatura de transição vítrea (°C)		
	15 minutos	30 minutos	45 minutos
1 Hz	60,3	64,9	65,4
5 Hz	69,6	71,8	72,3
10 Hz	73,5	74,9	75,4

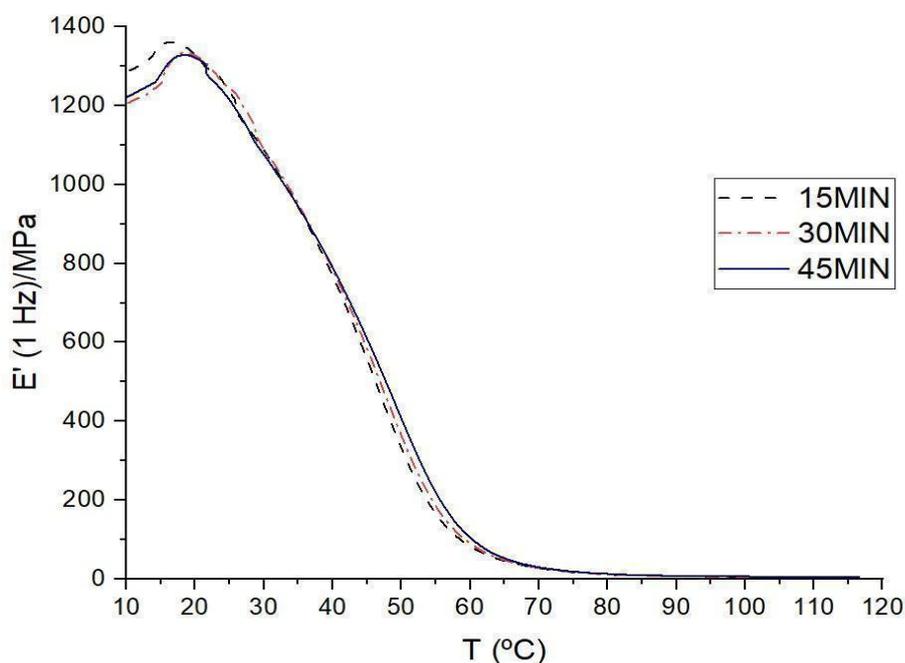
Fonte: Elaborado pelos autores.

Constatou-se que o maior valor de T_g da resina Tough UV é encontrado para o

tempo de pós-cura de 45 minutos a uma frequência de 10 Hz e corresponde a aproximadamente 75,4°C. As 3 frequências foram analisadas pois conforme o aumento da frequência, menor o tempo de relaxamento das cadeias poliméricas portanto observa-se um comportamento do material mais próximo ao estado sólido. Para minimizar a influência da frequência sobre $\tan \delta$ é interessante também avaliar os dados relativos para menor frequência (1 Hz) (DIAS, 2020), dessa forma, o melhor resultado para T_g é de 65,4°C para o tempo de exposição de 45 minutos.

Também foi possível através do DMA, obter valores para o módulo de armazenamento (módulo de elasticidade), definido como uma medida da energia mecânica que o material é capaz de armazenar, em determinadas condições experimentais, na forma de energia potencial ou elástica (Cassu, 2005). A Figura 21 abaixo demonstra os valores módulo de armazenamento (E') em função da temperatura T (°C).

Figura 21 - Módulo de armazenamento (E')



Fonte: Elaborado pelos autores.

O módulo de armazenamento das amostras foi selecionado a uma temperatura próxima a 25°C e 40°C para diferentes frequências conforme a variação do período de exposição, os dados retirados da análise estão exemplificados na tabela 5 e tabela 6, respectivamente:

Tabela 5 - Alteração do módulo de elasticidade para temperatura de 25°C

Frequência (Hz)	Módulo de elasticidade (MPa)		
	15 minutos	30 minutos	45 minutos
1	1230,66	1365,32	1206,91
5	1365,32	1381,71	1351,00
10	1420,57	1438,42	1409,31

Fonte: Elaborado pelos autores

Nota-se que na temperatura de 25°C há um acréscimo no módulo de elasticidade conforme o aumento da frequência. Nesta temperatura houve valores maiores do módulo de elasticidade para o período de 30 minutos e um decréscimo médio aproximado de 1,3% comparando a exposição de 15 minutos e 45 minutos. Já para o comparativo de entre 15 e 30 minutos houve um acréscimo médio de 4,5% avaliando todas as frequências. Para a temperatura de 40°C houve um comportamento diferente das amostras, o valor de exposição de 45 minutos demonstrou maiores valores de módulo elástico para todas as frequências conforme a tabela 6.

Tabela 6 - Alteração do módulo de elasticidade para temperatura de 40°C

Frequência (Hz)	Módulo de elasticidade (MPa)		
	15 minutos	30 minutos	45 minutos
1	758,74	778,67	785,90
5	915,16	938,69	946,51
10	980,91	1004,42	1012,89

Fonte: Elaborado pelos autores

Nota-se um aumento gradual médio de 1,7% para o aumento de exposição para todas as frequências. No comparativo entre as temperaturas 25°C e 40°C é possível ver uma queda abrupta no módulo de elasticidade, comparando os melhores resultados para menor frequência (1 Hz), para atenuar a influência da frequência sobre a avaliação (DIAS, 2020). Foi possível evidenciar uma variação no módulo de elasticidade de 73,7% para as temperaturas avaliadas.

4.2 Ensaio de tração

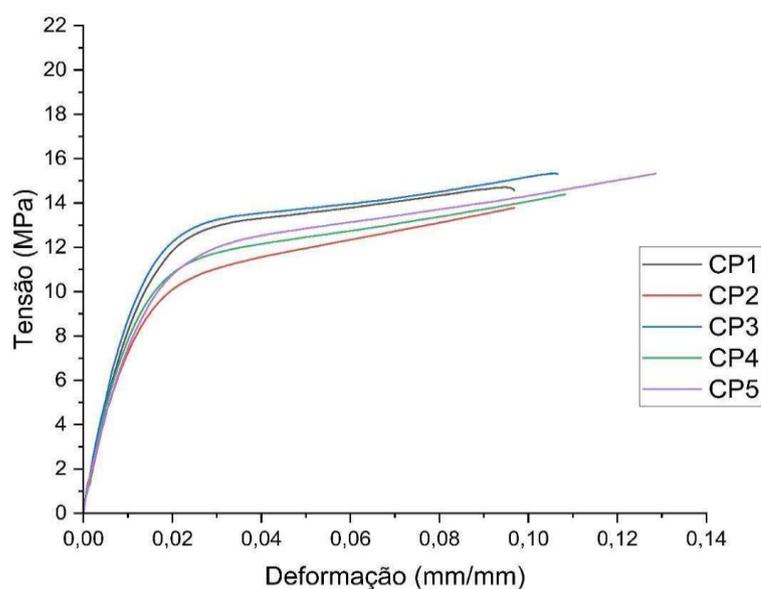
Nos ensaios de tração dos corpos de prova impressos e expostos a 15, 30 e 45 minutos de pós-cura, foram obtidos os seguintes resultados de tensão de ruptura e módulo de Young, expostos na tabela 7, tabela 8 e tabela 9, é ilustrado na Figura 22, Figura 23 e Figura 24.

Tabela 7 - Resultados dos corpos de provas expostos por 15 minutos

Corpo de prova	Tensão de ruptura (MPa)	Módulo de Young (GPa)
CP1	14,71	0,88
CP2	15,43	0,72
CP3	15,32	0,84
CP4	15,02	0,71
CP5	15,44	0,74

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 22 - Gráfico tensão deformação para o tempo de exposição de 15 minutos



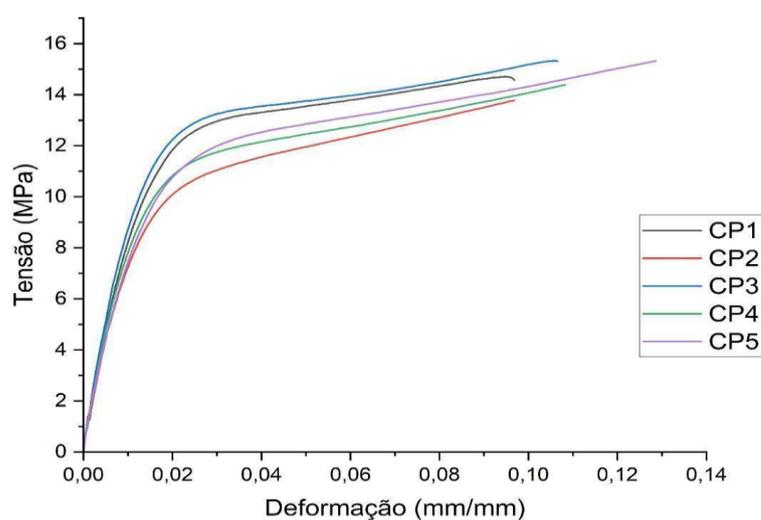
Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 8 - Resultados dos corpos de provas expostos por 30 minutos

Corpo de prova	Tensão de ruptura (MPa)	Módulo de Young (GPa)
CP1	18,33	0,86
CP2	15,85	0,87
CP3	16,79	0,95
CP4	18,80	1,07
CP5	15,80	0,63

Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 23 - Gráfico tensão deformação para o tempo de exposição de 30 minutos



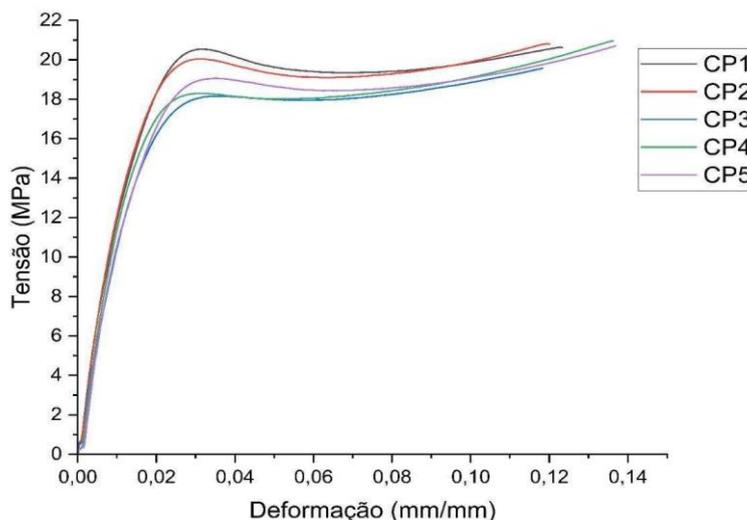
Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 9 - Resultados dos corpos de provas expostos por 45 minutos

Corpo de prova	Tensão de ruptura (MPa)	Módulo de Young (GPa)
CP1	20,63	1,11
CP2	20,81	1,52
CP3	20,93	1,00
CP4	20,96	1,32
CP5	20,97	1,25

Fonte: Elaborado pelos autores.

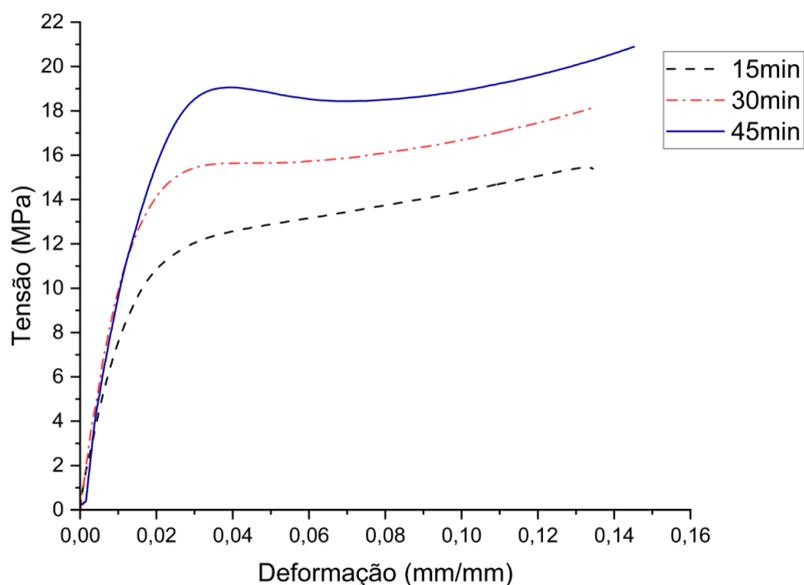
Figura 24 - Gráfico tensão deformação para o tempo de exposição de 45 minutos



Fonte: Elaborado pelos autores.

A fim de comparar os resultados encontrados, foi selecionado o corpo de prova que apresentou a maior tensão de ruptura para cada tempo de exposição. A tensão de ruptura foi selecionada para análise por apresentar o maior valor numérico na maioria dos casos, por estar muito próxima do limite de resistência à tração e também por ser o fator avaliado em alguns estudos e nos dados técnicos do fabricante. A Figura 25 mostra o maior limite de resistência à tração para cada tempo de exposição.

Figura 25 - Gráfico tensão-deformação para o maior limite de resistência à tração de cada tempo de exposição de pós-cura



Fonte: Elaborado pelos autores.

É verificado um aumento tanto para resistência à tração quanto para o módulo de Young com o aumento do tempo de pós-cura. Na resistência à tração o aumento foi de aproximadamente 35% enquanto para o módulo de Young houve um aumento em torno de 73% entre os tempos de 15 (menor valor) a 45 minutos (maior valor). Na Tabela 10 os valores obtidos experimentalmente são comparados com os dados técnicos fornecidos pelo fabricante.

Tabela 10 - Comparativo das propriedades mecânicas para variação no tempo de pós-cura

Dados do fabricante	Tensão de ruptura (MPa)		Módulo de Young (GPa)	
	35 - 45		0,8 - 1,2	
Período de exposição (min)	Resultados obtidos			
	\bar{X}	σ	\bar{X}	σ
15	15,79	0,32	0,78	0,08
30	17,11	1,39	0,88	0,16
45	20,86	0,14	1,24	0,20

Fonte: Elaborado pelos autores

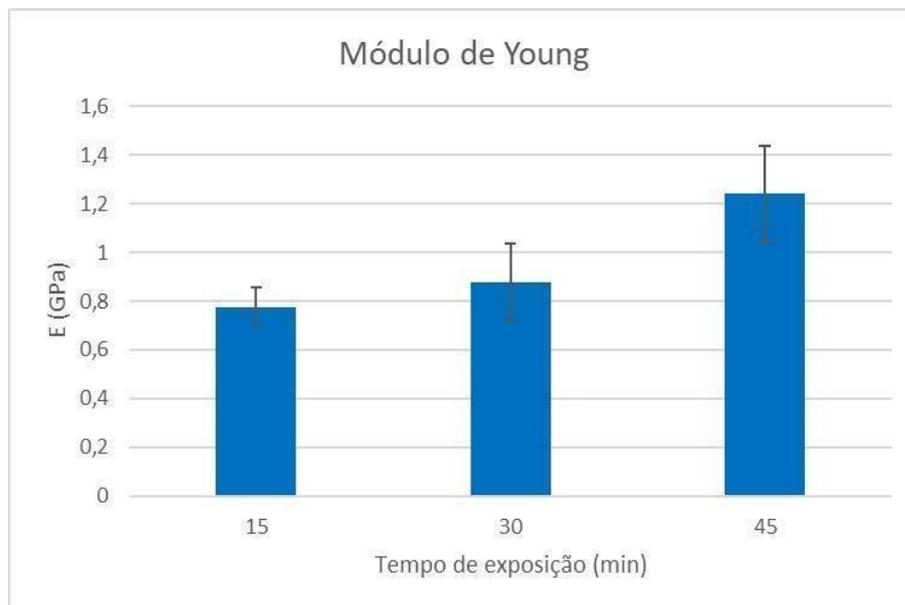
Para ilustrar a comparação entre os tempos de exposição foram elaborados os gráficos a seguir, Figura 26 e Figura 27.

Figura 26 - Limite de resistência a tração em função do tempo de exposição



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 27 - Módulo de Young em função do tempo de exposição



Fonte: Elaborado pelos autores.

Avaliando os dados coletados, fica evidente a importância do tempo de exposição à luz UV após a impressão 3D como já conferido na literatura científica. A solidificação interna e o melhor arranjo das cadeias poliméricas demonstram uma maior resistência à tração. Avaliando as médias encontradas entre o tempo de 15 e 45 minutos houve um aumento de 32% na tensão de ruptura e de aproximadamente 59% no módulo de Young, corroborando com os resultados encontrados por Riccio et al., (2021) utilizando o método de impressão por SLA para resina Tough UV da empresa Formlabs® e com Wang et al., (2021) utilizando o método DLP também para a resina Tough UV, mas da fabricante BMF Precision Technology. É notada também uma divergência significativa na resistência à tração apresentada pelo fabricante da resina, assim como apontado por Riccio et al, (2021) em todos os tipos de resinas fotossensíveis avaliadas.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou a influência do tempo de pós-cura em três níveis de um fator importante no processo de fotopolimerização em uma cuba, avaliou-se a influência da variação do tempo de exposição de pós-cura sobre a resina fotossensível Tough UV da fabricante Anycubic®. Objetivou-se padronizar ao máximo a operação para evitar anomalias nos processos de planejamento de impressão, confecção, lavagem e pós-cura das amostras analisadas.

Os dados encontrados vão de encontro com a literatura científica daqueles que analisaram resinas semelhantes por meio de fotopolimerização em cuba, mas por métodos distintos. (ZGURIS, 2019; RICCIO et al., 2021; KATALINIC et al., 2021) evidenciaram uma influência significativa da pós-cura tanto para o módulo de Young quanto para a tensão de ruptura com o método SLA. WANG, *et al.* (2021), utilizando a tecnologia DLP também evidenciaram as variações mencionadas nas propriedades mecânicas citadas.

Neste estudo, utilizando o método de fotopolimerização em cuba por LCD, encontrou-se evidências do aumento do módulo de elasticidade tanto pelo ensaio de tração quanto por DMA na resina fotossensível. No ensaio de tração o aumento de entre o menor tempo de exposição (15 minutos) e o maior (45 minutos) foi de 59%. Para a análise dinâmica mecânica, o módulo de elasticidade para temperatura de 25°C apresentou os melhores resultados para o período de exposição de 30 minutos em todas as frequências avaliadas. Para a temperatura de 40°C o melhor resultado de E' foi para o período de 45 minutos. Um número maior de amostras deve ser avaliado para averiguar a divergência em estudos futuros. A variação entre os valores encontrados em ambos os ensaios se deve ao ensaio de tração ser um processo quase-estático enquanto a DMA é dinâmica.

A tensão de ruptura, obtida pelo ensaio de tração, também foi influenciada pelo período de pós-cura. Observou-se por meio das evidências coletadas um aumento progressivo desta propriedade mecânica, analisando a variação entre 15 e 45 minutos houve um aumento de aproximadamente 32%. Para a temperatura de transição vítrea, houve um incremento menos significativo, mas que verificou-se para todas frequências na média geral de 2,5%.

Os valores de tensão de ruptura estão distantes dos apontados pelo fabricante em todos os períodos de exposição averiguados. Para a melhor média no tempo de

45 minutos a diferença é de 67,8% para o valor mais baixo exposto nos dados técnicos. Já para o módulo de elasticidade os valores são equiparáveis à margem fornecida para os 3 tempos de exposição, sendo o de 45 minutos muito próximo ao valor máximo. A diferença entre os dados técnicos pode ser explicada pela degradação do álcool isopropanol na estrutura polimérica acrílica da resina, por mais que o tempo de lavagem de 5 minutos utilizado seja baixo, pode ter sido um fator que influenciou na baixa tensão de ruptura. É interessante avaliar esse fator em trabalhos futuros, juntamente com um controle de umidade do ambiente.

Conclui-se que o tempo de exposição é fundamental para as propriedades mecânicas avaliadas, portanto deve ser inerente ao processo de fotopolimerização por cuba. Mais tipos de resinas fotossensíveis devem ser avaliadas futuramente com técnicas distintas de impressão 3D levando em consideração os dados obtidos neste trabalho e na literatura científica apresentada no desenvolvimento do processo.

REFERÊNCIAS

- 3D Printing industry analysis.** Grand View Research, São Francisco. Mai. 2021. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/3d-printing-industry-analysis>. Acesso em: 01 nov. 2021.
- AMERICAM SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638:** Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. United States, 2017.
- ARNOLD, Christin; MONSEES, Delf; HEY, Jeremias; SCHWEYEN, Ramona. Surface Quality of 3D-Printed Models as a Function of Various Printing Parameters. **Materials**, [S.L.], v. 12, n. 12, p. 1970, 19 jun. 2019. DOI <http://dx.doi.org/10.3390/ma12121970>. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1944/12/12/1970?type=check_update&version=1. Acesso em: 25 jun 2022.
- BARDELICK, Alexander; YANG, Steven; ALDERSON, Faraz; GADSDEN, Andrew. The effect of wash treatment on the mechanical properties and energy absorption potential of a 3D printed polymethyl methacrylate (PMMA). **Materials Today Communications**, Ontario, Canada, ano 2021, v. 26, n. 101728, p. 2352-4928, 22 mar. 2021. DOI <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101728>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492820327392>. Acesso em: 1 jun. 2022.
- BONADA, J.; MUGURUZA, A.; FERNÁNDEZ-FRANCOS, X.; RAMIS, X.. Influence of exposure time on mechanical properties and photocuring conversion ratios for photosensitive materials used in Additive Manufacturing. **Procedia Manufacturing**, Barcelona, Spain, ano 2017, v. 13, p. 762-769, 5 out. 2017. DOI <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.182>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235197891730820X>. Acesso em: 3 jun. 2022.
- CASSU, Silvana Navarro; FELISBERTI, Maria Isabel. Comportamento dinâmico-mecânico e relaxações em polímeros e blendas poliméricas. **Química Nova**, [S.L.], v. 28, n. 2, p. 255-263, mar. 2005. FapUNIFESP. DOI <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-40422005000200017>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/p3F3zvfXmWzpKmSkfykgH3M/?lang=pt>. Acesso em: 3 jun. 2022
- CHEAH, C.M.; FUH, J.y.H.; NEE, A.y.C.; LU, L.; CHOO, Y.s.; MIYAZAWA, T.. Characteristics of photopolymeric material used in rapid prototypes Part II. Mechanical properties at post-cured state. **Journal Of Materials Processing Technology**, [S.L.], v. 67, n. 1-3, p. 46-49, maio 1997. Elsevier BV. DOI [http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136\(96\)02816-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136(96)02816-6). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924013696028166?via%3Dihub>. Acesso em: 7 jun. 2022
- DIAS, Adriana Maria Lopes. **Impressão FFF de polímeros de memória de forma.** 2020. 63 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Polímeros, Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2020.

KATALINIC, Branko; PARK, Hong Seok; SMITH, Mark. Influence of layer height, build orientation and post curing on tensile mechanical properties of SLA 3D printed material. **DAAAM International**, Vienna, Austria, 32. ed. p. 200-208, 2021. DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation.

AHMAD, Khalid W. H.; ZURINA, Mohamad; NORHAYANI, Othman; HAJJAR, Che Man Siti; MAZURA, Jusoh. The Mechanical Properties of Photopolymer Prepared Via 3D Stereolithography Printing: the effect of uv curing time and anisotropy. **Chemical Engineering Transactions**, [S.L.], v. 78, p. 565-570, fev. 2020. AIDIC: Italian Association of Chemical Engineering. DOI <http://dx.doi.org/10.3303/CET2078095>. Disponível em: <https://www.aidic.it/cet/20/78/095.pdf>. Acesso em: 25 mai. 2022.

RICCIO, Carmela; CIVERA, Marco; RUIZ, Oliver Grimaldo; PEDULLÀ, Perla; REINOSO, Mariana Rodriguez; TOMMASI, Giulia; VOLLARO, Martina; BURGIO, Vito; SURACE, Cecilia. Effects of Curing on Photosensitive Resins in SLA Additive Manufacturing. **Applied Mechanics**, [S.L.], v. 2, n. 4, p. 942-955, 22 nov. 2021. MDPI AG. DOI <http://dx.doi.org/10.3390/applmech2040055>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2673-3161/2/4/55>. Acesso em: 19 mai. 2022.

STAFFOVÁ, Martina; ONDREÁĽ, František; SVATÍK, Juraj; ZBONČÁK, Marek; JANČÁŘ, Josef; LEPCIO, Petr. 3D printing and post-curing optimization of photopolymerized structures: basic concepts and effective tools for improved thermomechanical properties. **Polymer Testing**, [S.L.], v. 108, p. 107499, abr. 2022. Elsevier BV. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107499>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941822000277?via%3Dihub>. Acesso em: 7 jun. 2022.

VLADIC, Gojko; BANJANIN, Bojan; KASIKOVIC, Nemanja; PAVLOVIC Zivko. Vat photopolymerization. In: IZDEBSKA-PODSIADLY, Joanna. **Polymers for 3D printing**. Poland. 2022. p. 65-74.

VOLPATO, Neri. **Manufatura aditiva : tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017. 400 p.

WANG, Yitong; LI Xin; CHEN, Yang; ZHANG, Chao. Strain rate dependent mechanical properties of 3D printed polymer materials using the DLP technique. *Additive Manufacturing*. v.67, 2021. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2021.102368>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214860421005224?via%3Dihub>. Acesso em: 28 mai. 2022

ZGURIS, Zachary. **Formlabs White Paper: How Mechanical Properties of Stereolithography 3D Prints are Affected by UV Curing**. Disponível em: <https://www.dynamism.com/download/2016/UV%20Postcure%20white%20paper.pdf>. Acesso em: 30 mai. 2022