

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO – CDTec
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS



Trabalho de Conclusão de Curso

**Aplicação de diferentes métodos pós-cura em peças produzidas por
impressão 3D**

Dielen Marin

Pelotas, RS, Brasil

2018

DIELEN MARIN

**Aplicação de diferentes métodos pós-cura em peças produzidas por
impressão 3D**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Engenharia
de Materiais, da Universidade Federal
de Pelotas, como requisito parcial para
a Obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Aulo Ogliari

Pelotas, 2018

Aplicação de diferentes métodos pós cura em peças produzidas por impressão
3D

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Materiais, da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial para a Obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Data da Defesa: 30/07/2018

Banca examinadora:

Prof.Dr Fabrício Aulo Ogliari (Orientador)
Doutor em Odontologia pela Universidade Federal de Pelotas - UFPel

Prof. Dr Amanda Dantas de Oliveira
Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de São Carlos - UFSCar

Msc. Andressa Peglow Lüdtke
Mestranda em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Pelotas

"A persistência é o caminho do êxito"
(Charles Chaplin)

RESUMO

MARIN, Dielen. **Aplicação de diferentes métodos pós cura em peças produzidas por impressão 3D**. 2018. 50f. Trabalho de Conclusão de curso, Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

Tendo em vista à dificuldade de obter peças totalmente curadas por meio da impressão 3D, pesquisou-se neste trabalho métodos pós-cura, a fim de analisar como as peças impressas por SLA podem ter sua qualidade melhorada através da aplicação desses métodos, e como resultado analisar o aumento da resistência do material produzido. Portanto, é necessário aplicar os métodos pós-cura nas peças impressas por SLA e verificar sua resistência após sua aplicação. Realizou-se então a construção de corpos de prova através da impressora Form2 e a resina utilizada para sua construção foi a Cosmos Grey SLA (Yller Biomateriais SA, Pelotas, Brasil), na qual sua composição é baseada em substâncias de acrilatos, após eles foram submetidos a três diferentes tratamentos de pós-cura, que são: câmara UV, estufa e micro-ondas. Ao término do tratamento foram realizadas diferentes caracterizações com o propósito de verificar a influência dos tratamentos sobre as propriedades mecânicas das peças, nas quais consistem em: microscopia óptica de superfície, estabilidade dimensional, ensaio de resistência a flexão. Diante disso, verificou-se que a microestrutura das peças não sofreu alterações, no entanto o módulo de elasticidade e a tensão de ruptura das peças pós-curadas em câmara UV foram maiores comparada aos demais grupos, o que impõe a constatação de que a utilização da pós-cura em câmara UV destacou-se entre os grupos apresentando um aumento a resistência das peças.

Palavras-chave: Resistência, pós-cura, impressão 3D.

ABSTRACT

MARIN, Dielen. **Application of different post cure methods on parts produced by 3D printing**. 2018. 50f. Graduation in Materials Engineering, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2018.

In view of the difficulty of obtaining fully cured parts through 3D printing, post-cure methods are investigated in order to analyze how parts printed by SLA can have their quality improved through the application of these methods, and as a result the increase of the produced material strength. Therefore, it is necessary to apply the post-cure methods on printed parts by SLA and verify their strength after application. The test pieces are then made through the Form2 printer, after which they are subjected to three different post-cure treatments: UV chamber, oven and microwave. At the end of the treatment, different characterizations are performed with the purpose of verifying the influence of the treatments on the mechanical properties of the pieces, which consist of: surface optical microscopy, dimensional stability, flexural strength test and elasticity modulus. Accordingly, it was verified that the microstructure of the pieces did not change, however the modulus of elasticity and the tension of the post-cured pieces in microwaves were larger compared to the other groups, which requires the use of post-cure microwave stood out among the groups exhibiting an increased strength of the pieces.

Keywords: Resistance, post-cure, 3D printing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema ilustrativo mostrando a classificação da prototipagem rápida baseada na forma inicial do material	16
Figura 2 - Esquema representativo da utilização de diferentes materiais na prototipagem rápida	17
Figura 3 - Esquema do processo de fabricação por estereolitografia Top-Down	19
Figura 4 - 2,2-bis-[4-(2-hidroxi-3-metacriloxipropil-1-oxi)-fenilpropano] (BisGMA)	21
Figura 5 - Monômero epóxi, onde R representa uma cadeia alifática, aromática ou cicloalifática	22
Figura 6 - Resina epóxi a base de Bisfenol A.....	23
Figura 7 - Resina epóxi flexível	23
Figura 8 - esquema representando uma reação de obtenção de um polímero com ligações cruzadas, onde R denota um radical	24
Figura 9 - Representação do processo de iniciação por fragmentação	25
Figura 10 - Esquema da sequência de reações durante a fotopolimerização ..	26
Figura 11 - Estrutura molecular generalizadas dos grupos funcionais do epóxi (a) e do éter-vinílico(b).....	27
Figura 12 - Ilustração da reação de abertura do anel epóxi de propagação da polimerização catiônica	27
Figura 13 - Equipamento Form Cure desenvolvido pela empresa FormLabs ..	31
Figura 14 - Equipamento caseiro de pós-cura UV.....	32
Figura 15 - Amostras retangulares e em forma de disco.....	34
Figura 16 – Impressora Form2	35
Figura 17 - Câmara UV	35
Figura 18 - Estufa sem circulação de ar, marca De Leo.....	36
Figura 19 - Forno micro-ondas, marca Philco, modelo PME31	37

Figura 20 - Paquímetro digital Modelo Starret®, série EC799.....	37
Figura 21 - Esquema ilustrativo das medidas realizadas no paquímetro digital...	38
Figura 22 - Microscópio Olympus, modelo BX41M	38
Figura 23 - Máquina utilizada para o ensaio de flexão	39
Figura 24 - Amostras com aumento de 40x.....	41

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Propriedades mecânicas das amostras tratadas por diferentes processos de pós-cura	29
TABELA 2 - Propriedades mecânicas de diferentes condições pós-cura	30
TABELA 3 - Medidas obtidas através do paquímetro digital	40
TABELA 4 - Média da resistência à Mini-Flexão e Módulo de Elasticidade	42

LISTA DE ABREVIATURAS

3D	Tridimensional
BisGMA	2,2-bis-[4-(2-hidroxi-3-metacriloxipropil-1-oxi)-fenilpropano]
CAD	<i>Computer Aided Design</i> ou Projeto Auxiliado por Computador
DGEBA	Diglicidil Éter de Bisfenol A
GKS	<i>Graphical Kernel System</i>
IGES	<i>Initial Graphics Exchange Specification</i> (extensão de arquivos)
NX	Programa de recurso gráfico utilizado para elaboração de projetos
SLA	<i>StereoLithography Apparatus</i> ou Máquina de estereolitografia
STL	<i>Standard Template Library</i> (extensão de arquivos)
UV	<i>Ultraviolet radiation</i> ou Radiação ultravioleta ou luz ultravioleta

SUMARIO

RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS.....	x
SUMARIO	xi
1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVO	14
2.1 Objetivo geral	14
2.2 Objetivo específico.....	14
3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	15
3.1 Prototipagem rápida.....	15
3.2 Estereolitografia (SLA).....	18
3.3 Resinas termofixas.....	20
3.3.1 Resina acrílica	21
3.3.2 Resinas epóxi	22
3.4 Fotopolimerização.....	23
3.4.1 Fotopolimerização por radicais livres	24
3.4.2 Fotopolimerização catiônica	26
3.5 Pós-cura	28
4. MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1 Fabricação dos corpos de prova	33
4.1.1 Resina fotopolimérica.....	34
4.1.2 Impressora 3D.....	34
4.1.3 Câmara UV	35
4.1.4 Estufa	36
4.1.5 Micro-ondas	36
4.2 Caracterização do Material	37
4.2.1 Paquímetro Digital.....	37
4.2.2 Microscopia óptica de superfície.....	38
4.2.3 Ensaio de Resistência à Mini-Flexão	39
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
5.1 Paquímetro digital	40
5.2 Microscopia óptica de superfície	40

	xii
5.3 Ensaio de resistência a mini-flexão	41
6 CONCLUSÃO	43
7 REFERÊNCIAS.....	44
ANEXO A — RELATÓRIOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À MINI-FLEXÃO E MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	47

1. INTRODUÇÃO

A constante necessidade de acelerar o processo de produção, associada à redução de custos, são fatores importantes para as organizações em diversos setores. Um dos recursos que mais tem se destacado neste meio é a utilização da prototipagem rápida por impressão 3D, onde incluem áreas de engenharia, arquitetura, medicina, artes, entre outras.

Criada por Charles Hull, a impressão 3D foi desenvolvida no ano de 1983, cujo sistema de impressão consistia na solidificação de camadas (layers) de resina fotossensível por meio de laser. No ano de 1986, Hull depositou a primeira patente em tecnologia RP (US 4,575,300) para um equipamento de estereolitografia (SLA), mais tarde se tornou co-fundador da 3D System Corporation, na qual destaca-se atualmente como uma das empresas mais bem sucedidas nesse segmento (BRAGA, 2017).

No ano de 1999, os avanços na área de medicina, juntamente com a impressão 3D, permitiu que fosse criada uma bexiga urinária com esta tecnologia, e após três anos foi impresso em 3D o primeiro rim funcional. Estudos realizados recentemente, nos mostram que é possível à impressão de alimentos, carros e casas em três dimensões em apenas 24 horas (TELES e MORAES, 2016).

No mercado atual, existem inúmeras companhias que produzem equipamentos para prototipagem rápida por impressão 3D. As principais entre elas são a Z Corporation, a Objet Geometrics e a 3D system. As impressoras da Objet Geometrics e a 3D system tem o processo de obtenção das peças através da solidificação das resinas líquidas fotossensíveis por meio da radiação UV, possibilitando a obtenção de protótipos detalhados e precisos. Já as da Z Corporation, têm seu princípio de funcionamento baseado em um processo que espalha uma fina camada de pó. Em seguida um cabeçote imprime um aglutinante sobre a mesma. Após, um pistão desce sobre o material, fazendo uma prensagem, deixando a superfície lisa e pronta para receber a próxima camada (SALMORIA, et al., 2009).

Segundo Azevedo (2010), a impressão 3D também apresenta algumas desvantagens. A baixa produtividade comparada à utilização de injeção plástica, que mesmo necessitando o uso de moldes, produz uma grande

quantidade em um tempo menor. A resistência apresentada pelas peças também é um problema, devido ao deslocamento sofrido pela impressão 3D, sua resistência torna-se menor, além da sua elevada exigência de manutenção e diversas interrupções ao longo da sua produção.

A FormLabs desenvolveu uma ferramenta que utiliza como parâmetros, a utilização de luz e calor, com o objetivo de desenvolver um método pós-cura, com isso proporcionando a peça uma melhora em suas propriedades mecânicas.

A proposta deste trabalho consiste em empregar métodos de pós-cura em peças impressas por impressora 3D, a impressora utilizada é a Form2 onde a resina utilizada na sua produção é a Cosmos Grey SLA (Yller Biomateriais SA, Pelotas, Brasil), na qual sua composição é baseada em substância a base de acrilatos. Para tanto, o objetivo deste trabalho é analisar como as peças impressas por SLA podem ter sua qualidade melhorada através da aplicação dos procedimentos e técnicas de método pós-cura, e como isso resulta no aumento da resistência do material produzido.

Um dos fatores críticos para a execução deste trabalho está relacionado com as propriedades mecânicas e físicas das peças impressas por SLA, pois ao término da impressão encontram-se em um “estado verde”, ou seja, já possuem seu formato final, porém a reação de polimerização não foi concluída. Por isso, o trabalho que estamos desenvolvendo pretende responder a seguinte questão de pesquisa: Em que medida os procedimentos e técnicas do método pós-cura são capazes de intervir na otimização das peças impressas por SLA?

Para responder a essa questão será apurada a possibilidade de obter um aumento de resistência, após expor as mesmas ao micro-ondas, câmara UV e estufa, após as amostras serão submetidas a testes de resistência a flexão, microscopia ótica de superfície e estabilidade dimensional.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Analisar como as peças impressas por SLA podem ter sua qualidade melhorada através da aplicação dos procedimentos e técnicas do método pós-cura, e como isso resulta no aumento da resistência do material produzido.

2.2 Objetivo específico

Esse trabalho apresenta os seguintes objetivos específicos:

- Aplicar os métodos de pós-cura que consistem em: câmara UV, micro-ondas e estufa nas peças impressas por SLA
- Verificar a resistência das peças impressas após a aplicação dos métodos pós-cura
- Desenvolver um percurso metodológico próprio
- Colaborar com o desenvolvimento de pesquisas da engenharia de materiais voltadas para melhora de resistência mecânica dos materiais

3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1 Prototipagem rápida

A prototipagem rápida por impressão 3D tem seu funcionamento semelhante a uma impressora comum, na qual um cabeçote jorra tinta sobre o papel. O modelo sólido é gerado através de um sistema CAD e em seguida direcionado para o arquivo da máquina onde é fatiado. Em seguida, dependendo do processo, a resina ou aglutinante é depositada por meio de um cabeçote sobre a bandeja do equipamento, construindo assim o protótipo (SALMORIA, et al., 2009).

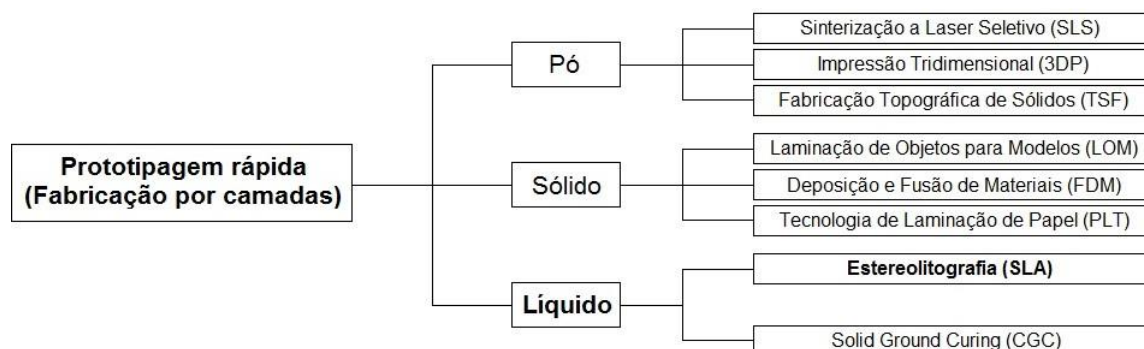
A complexidade geométrica e os detalhes alcançados por essa máquina são superiores comparados a máquinas convencionais de usinagem, que apresentem geometrias de execução demorada (COSTA, 2012).

Hoje em dia há inúmeros processos de prototipagem rápida, alguns já conhecidos e outros ainda em desenvolvimento. Para cada tipo de impressão, uma tecnologia diferente é aplicada para a produção da peça, segundo Grellman (2001), muitos deles apresentam conceitos semelhantes, como:

- Construção da geometria da peça no sistema CAD
- Fatiamento do modelo geométrico em camadas discretas bidimensionais
- Fabricação do modelo física tridimensional, camada por camada

Devido o aumento de exigências em relação aos protótipos, constatou-se a necessidade de evolução nos processos de prototipagem rápida. Os processos mais utilizados variam de acordo com o custo do processo, velocidade de produção e o desempenho da peça. A forma mais adequada para a classificação dos sistemas de prototipagem rápida é através dos materiais usados em sua forma inicial, nas condições de: pó, sólido e líquido. Na figura 1 é possível ver um esquema (FERNANDES, 2001).

Figura 1 - Esquema ilustrativo mostrando a classificação da prototipagem rápida baseada na forma inicial do material



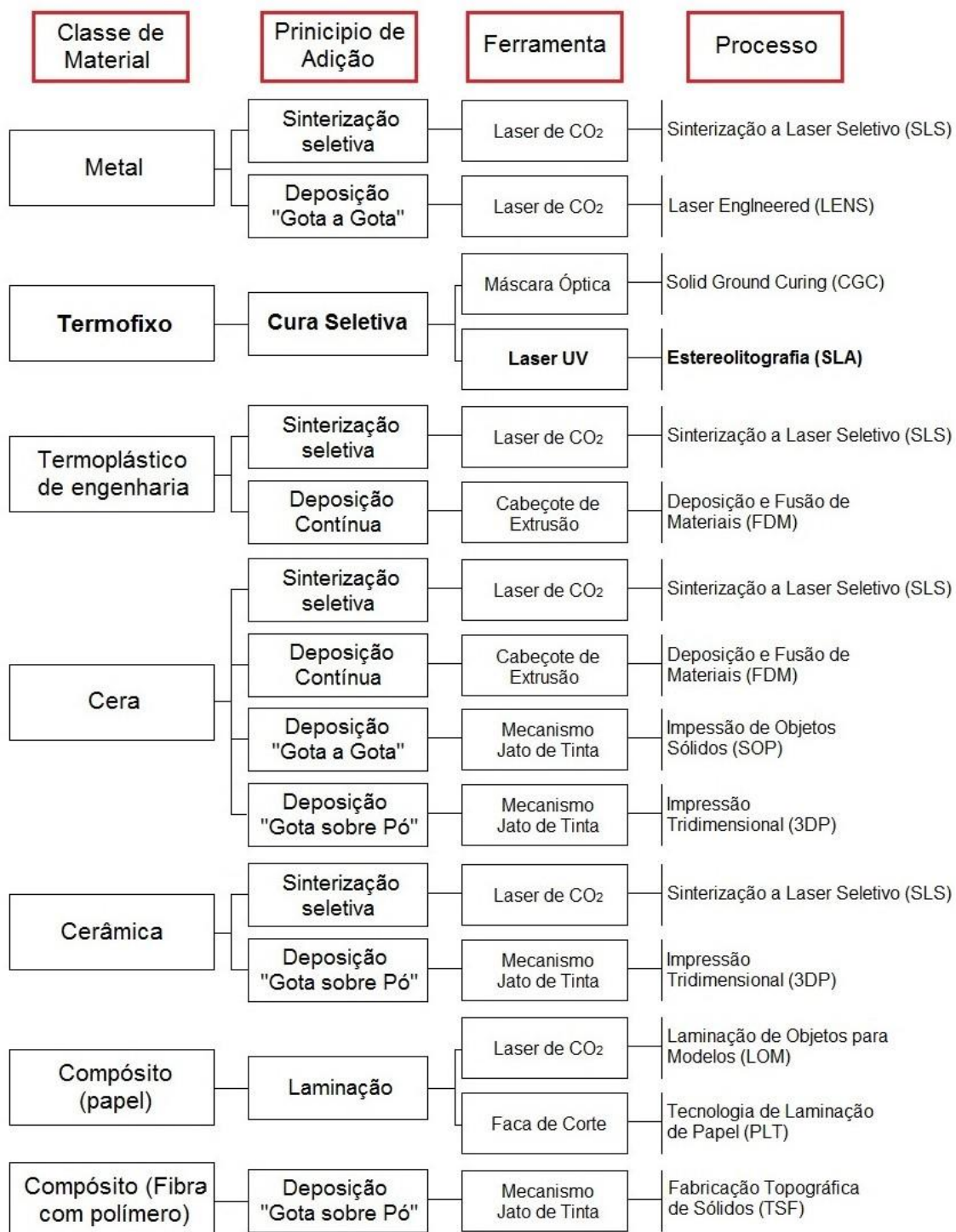
Fonte: Fernandes (2001, p.5)

Outra forma de classificar o processo de prototipagem rápida é por meio do material empregado, na qual pode ser: metais, polímeros termofixos, polímeros termoplásticos de engenharia, cera, cerâmica ou diferentes compósitos. (Figura 2)

Como podemos observar na figura 1, a estereolitografia (SLA) e o Solid Ground Curing são os únicos processos de prototipagem rápida que utilizam a forma inicial do material em forma líquida. Para o processo de estereolitografia, utiliza-se para a construção dos protótipos a classe de materiais de resinas termofixas, como podemos ver na figura 2, os demais grupos dividem-se em metais, cera, cerâmica, compósito, compósito (com fibra de polímero) e termoplástico de engenharia. As resinas utilizadas para o processo de impressão podem ter sua composição a base de substâncias acrílicas ou epóxi.

As resinas termofixas apresentam como características serem infusíveis, insolúveis e não reciclável, uma vez que mesmo diante do emprego de uma temperatura e pressão elevadas, após o processo de polimerização ela não retornam ao estado de fluidez, pois sua estrutura tridimensional, reticulada com a formação de ligações cruzadas impede o deslizamento entre as cadeias.

Figura 2 - Esquema representativo da utilização de diferentes materiais na prototipagem rápida



Fonte: Fernandes (2001, p. 6)

3.2 Estereolitografia (SLA)

Desenvolvida pela 3D systems Inc., EUA, no ano de 1988 a estereolitografia foi o primeiro processo de fabricação de prototipagem rápida criada, e atualmente o mais difundido. Sua tecnologia permite a produção de peças sólidas em formato tridimensional, utilizando resinas fotocuráveis a base de epóxis ou acrilatos (FERNANDES, 2001).

A confecção das peças é oriunda da polimerização de uma resina fotocurável composta por monômeros que através da incidência de raios ultravioletas se curam. A impressora SLA possui uma cuba, onde mesma é preenchida com resina em seu interior, juntamente com uma plataforma que movimenta-se de cima para baixo. Para que isso seja possível, é utilizado um programa (CAD), que é uma das etapas essenciais para a obtenção das peças, no qual envia para a plataforma as informações de cada camada a ser polimerizada, conforme o modelo virtual desenvolvido (GRELLMAN, 2001; FERNANDES 2010).

O passo inicial é modelar a peça em CAD, através do programa chamado NX (programa de recurso gráfico utilizado para elaboração de projetos, cujo sua finalidade é simular, analisar geometrias (COSTA, 2012). O arquivo com o modelo deve estar de acordo com os sistema utilizado para o processo de prototipagem rápida, na qual os principais formatos de conversão são o STL e IGES. (GRELLMAN, 2001).

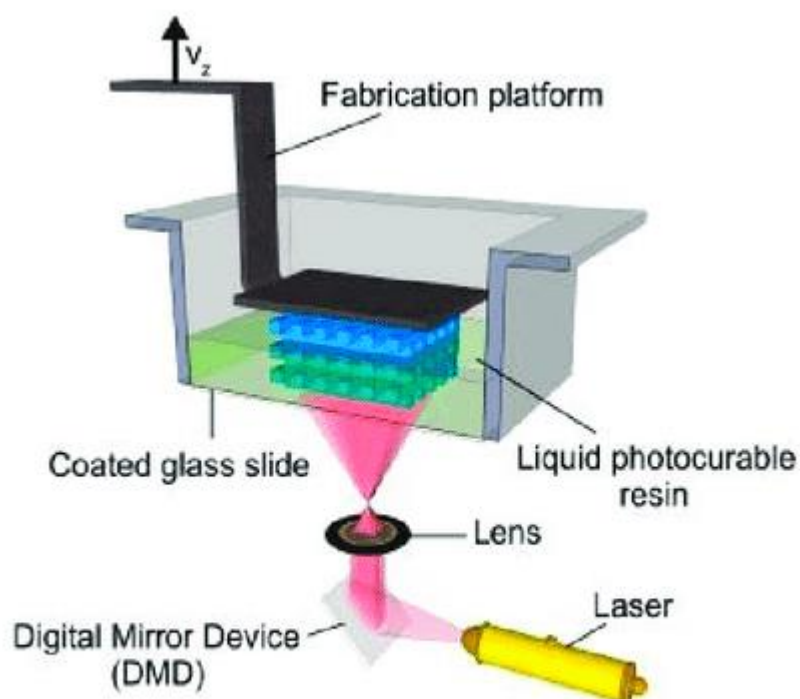
Existem alguns módulos de operações, como:

- Drafting: Utilizado para desenvolver cotas, tolerâncias e gerar relatórios de posicionamentos com observações e anotações como, por exemplo, numerações de itens, tirar medidas de componentes, indicar angulas e manipular a peça em qualquer posição e, inclusive, gerar desenhos seguindo as normas técnicas.
- Modelin: Este módulo é conhecido como CAD e sua finalidade é editar superfícies, fazer furos em sólidos, organizar componentes, criar superfícies, replicar em tamanho maior ou menor qualquer trabalho referente a estrutura e geometria das peças, montagem e desmontagem de componentes, simulações, etc.
- Manufacturing: Conhecido como módulo CAM, é utilizado para gerar caminhos de ferramentas (trajeto de a ferramenta vai percorrer para usinar a peça, gerando a geometria da mesma) criarem ferramentas de usinagem, elaborar relatórios para o operador da maquina, editar e organizar o processo de usinagem, sendo possível, inclusive, simular a usinagem em si. (COSTA, p. 20)

O funcionamento da impressora é dado através do controle numérico, na qual posiciona a plataforma na superfície da resina e os espelhos galvanométricos direcionam o feixe de laser para a porção de resina correspondente a essa primeira camada. A formação de uma cadeia polimérica entre as moléculas do monômero dispersas na resina será possível quando essa camada for atingida por um laser, no qual os foto-iniciadores irá desencadear uma reação localizada, ocorrendo a solidificação (FERNANDES, 2001).

Após essa etapa, a plataforma sobe 0,1mm penetrando a primeira camada solidificada na resina líquida promovendo uma nova camada seja polimerizada sobre a primeira, repedindo o processo até a conclusão do modelo. É possível visualizar um esquema simplificado desse processo na figura 3.

Figura 3 - Esquema do processo de fabricação por estereolitografia Top-Down



Fonte: ResearchGate¹

¹Disponível em: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-two-kinds-of-SLA-approaches-a-Bottom-up-setup-In-the-top-down-setup-b_fig1_322014553. Acesso em: 07 Ago. 2018

As temperaturas controladas garantem que o material não terá nenhum tipo de variação térmica. Essas temperaturas são de, 33° C na resina e de 23° C no ambiente externo e interno da impressora evitando modificações no que diz respeito a dilatação ou viscosidade, garantindo uma alta precisão na geometria, sendo a maior variação a da plataforma que é de 0,1mm (COSTA, 2012).

Ao fim de todos os procedimentos realizados para a conclusão da peça, ela será submetida a um pós-processamento, onde ocorrerá a limpeza para retirada do excesso de resina, pós-cura por radiação ultravioleta e ou/ térmico e tratamentos superficial (KLAUSS, 2006).

3.3 Resinas termofixas

Os polímeros termofixos, também conhecidos como termorrígidos e termoendurecidos, apresentem características de fluidez e amolecimento quando são submetidos ao aumento elevado de temperatura e pressão, obtendo a forma do molde, reagindo quimicamente, formando ligações cruzadas entre cadeias e solidificando-se (CANEVAROLO, 2006).

No entanto, após a polimerização, mesmo diante do emprego de temperatura e pressão não é possível tornar o polímero novamente fluido, o caracterizando como um material infusível, insolúvel e não reciclável, pois há formação de uma estrutura tridimensional, reticulada com ligações cruzadas entre as cadeias moleculares que impede o deslizamento de uma sobre as outras. Este processo de formação de ligação cruzada é denominado de cura (CANEVAROLO, 2006; KLAUSS, 2006).

O que determina as propriedades mecânicas e viscoelásticas de um polímero é a densidade das ligações cruzadas, onde seu grau determina propriedades específicas como: elevada dureza, fragilidade à temperatura ambiente e estabilidade dimensional (KLAUSS, 2006).

Os processos mais empregados para a polimerização de resinas comerciais são: radiações eletromagnéticas, como raio gama e raio-X, ultravioleta (UV) e radiação visível. No entanto, destacam-se os processos de

cura realizados por feixe de elétrons e ultravioleta (KLAUSS, 2006).

Devido as grandes vantagens as resinas são empregadas em diversos processos, pois apresenta baixo custo, estabilidade térmica e dimensional, resistência química a altas temperaturas e facilidade de moldar peças com grandes dimensões com destaque para o uso de um composto formado por uma resina a base epóxi-acrilato, muito empregado em processo de estereolitografia, em razão de que apresentam algumas propriedades desejadas e foto-iniciadores, necessário para ativar o processo de fotopolimerização (KLAUSS, 2006; SANCHEZ et al., 2010).

3.3.1 Resina acrílica

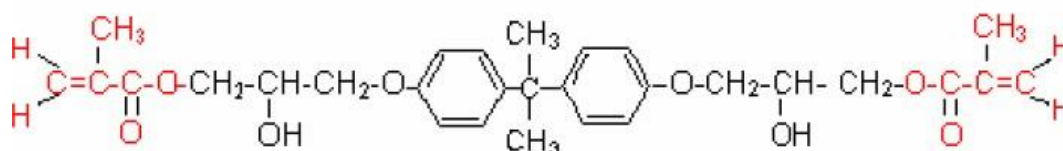
Em meados da década da sessenta foi criado o primeiro fotopolímero curável com a radiação ultravioleta, cujo seu objetivo era reduzir a poluição do ar provocada por revestimentos a base de solvente. Sua composição era baseada em substâncias químicas à base de acrilatos, como benefício esse fotopolímero apresentava uma rápida fotopolimerização quando exposto a uma radiação apropriada, com isso ganhou destaque e comercialmente estão disponíveis diversos monômeros de acrilatos, que atuam na resina como modificadores e provocando melhoras as propriedades finais após a cura (FERNANDES, 2001).

As resinas acrílicas apresentem elevada resistência química, devido a presença de ligações carbono-carbono, que superam em termos de resistência as resinas alquídicas e poliésteres, cujo as ligações presentes são éster (KLAUSS, 2006).

A respeito da figura 4, Klauss (2006) em seu trabalho afirma que:

As resinas a base de acrilato são largamente utilizadas na área odontológica. Bis-GMA (Bisfenol A glicol dimetacrilato), desenvolvido por Raphael L. Bowen, em 1962, é obtido através da reação do DGEBA (éter diglicídico de bisfenol A) com o monômero olefínico metacrilato de metila. (p.15)

Figura 4 - 2,2-bis-[4-(2-hidroxi-3-metacriloxipropil-1-oxi)-fenilpropano] (BisGMA)



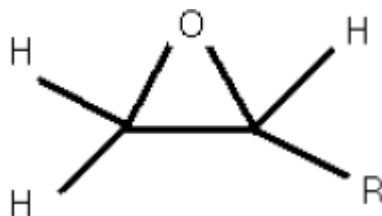
3.3.2 Resinas epóxi

Há diversas aplicações pra resina epóxi, como por exemplo: adesivos, laminação e aplicação de revestimento. Apresenta como característica uma elevada resistência a umidade, solventes e produtos químicos (KLAUSS, 2010).

Por apresentar características interessantes como: dureza, baixo encolhimento durante a cura pois há ausência de materiais voláteis e excelente resistência térmica e química, as resinas epóxi conquistaram espaço e atualmente são utilizadas nos processos de estereolitografia, porém também apresentam algumas desvantagens, são frágeis, apresentam baixa resistência ao impacto e possuem pouca resistência à propagação de rachaduras (KLAUSS, 2006).

A resina epóxi se divide em três membros, que são conhecidos como: epóxi, oxirano ou grupo etoxileno, conforme mostra a figura 5 (KLAUSS, 2006).

Figura 5 - Monômero epóxi, onde R representa uma cadeia alifática, aromática ou cicloalifática

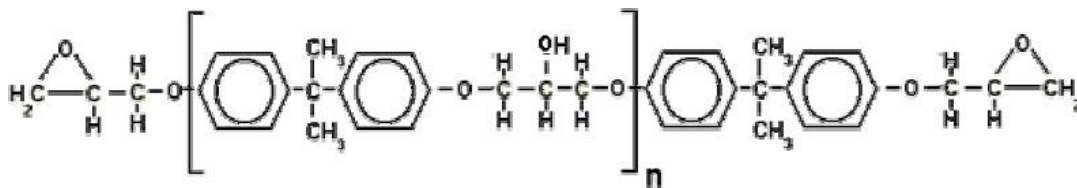


Fonte: KLAUSS (2006, p.18)

A capacidade do anel epóxi formar ligações cruzadas com uma grande variedade de substratos leva à formação de uma rede tridimensional, denominado material termorrígido, o qual apresenta características de insolúvel e infusível. O processo de cura promove a conversão da resina epóxi ao estado rígido (ALCÂNTA, 2003).

Atualmente, 90% das resinas disponíveis comercialmente são preparadas a partir da reação do bisfenol A e epícloridrina, pois são mais versáteis e de menor custo (ALCÂNTARA, 2003; KLAUSS, 2006). (figura 6).

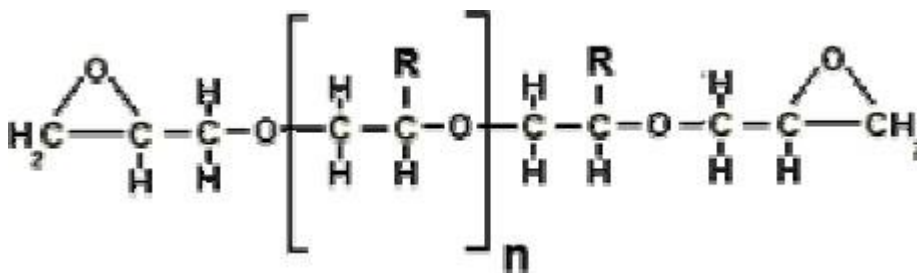
Figura 6 - Resina epóxi a base de Bisfenol A



Fonte: KLAUSS (2006, p. 19)

Também se destaca como as principais resinas comerciais a resina epóxi flexível, cuja a sua estrutura apresenta longas cadeias lineares substituindo seus bisfenóis por poliglicóis pouco ramificados. Apresentam baixa reatividade e normalmente são utilizados como flexibilizantes em outras resinas. (figura 7).

Figura 7 - Resina epóxi flexível.



Fonte: KLAUSS (2006, p. 20)

3.4 Fotopolimerização

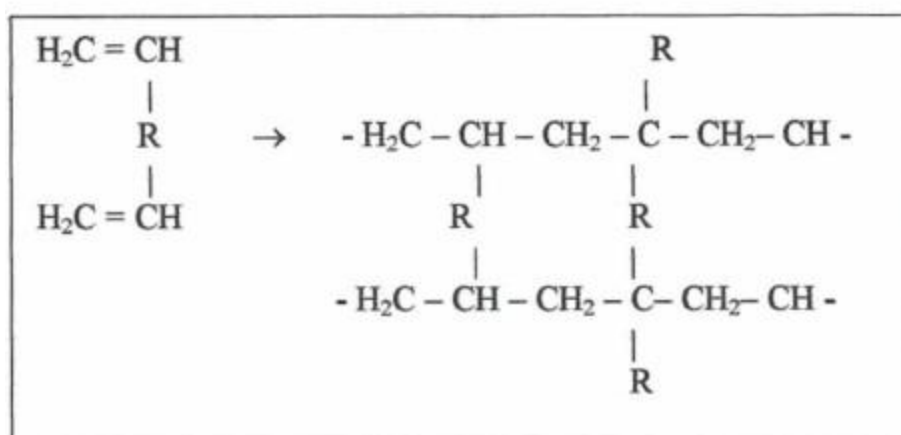
Devido às inúmeras vantagens apresentadas, o interesse na fotoquímica dos polímeros teve um aumento considerável nos últimos anos, tais como: economia, técnica e meio ambiente. A inserção de novas tecnologias faz com que a cura por radiação, ultravioleta e fotocura tenham se tornado um grande atrativo a partir dos anos 90 (FREGOLENTE, 2006).

Segundo, FERNANDES (2010) a polimerização ocorre com a ligação entre as moléculas pequenas (monômeros) formando molécula grande (polímero) compondo várias unidades manométricas. Também conhecida como

cura, a fotopolimerização permite que a polimerização ocorra através do contato com a radiação.

A figura 8 demonstra que a polimerização de monômeros multifuncionais ocasiona a formação de ligações cruzadas. A reação dos grupos vinílicos, que são derivados do grupo eteno, ou seja, contendo uma dupla ligação carbono-carbono se ligue a um carbono de outro monômero, com isso as pequenas moléculas formadas (monômeros) que estavam no estado líquido passam a ser grandes (polímeros) e permanecer no estado sólido (KLAUSS, 2006).

Figura 8 - esquema representando uma reação de obtenção de um polímero com ligações cruzadas, onde R denota um radical

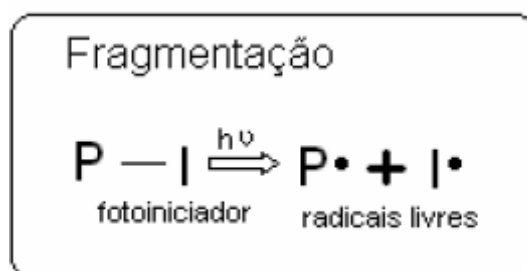


Fonte: Fernandes (p. 15)

3.4.1 Fotopolimerização por radicais livres

Dividem-se em dois mecanismos a formação de radicais livres, uma delas ocorre quando o fotoiniciador excitado gera espécies de radicais livres através da fragmentação homolítica. A representação desse mecanismo de iniciação pode ser visualizado na figura 9.

Figura 9 - Representação do processo de iniciação por fragmentação



Fonte: KLAUSS (2006, p.21)

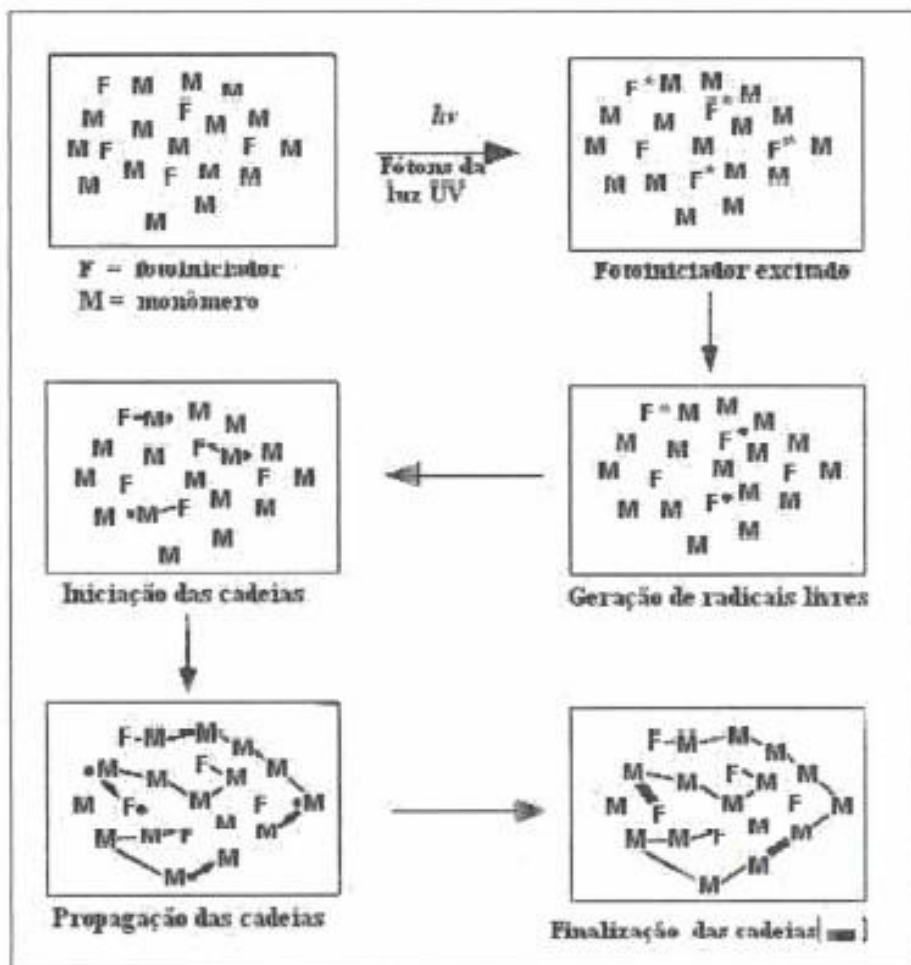
KLAUSS (2006), em seu trabalho afirma que sob radiação UV, os radicais livres ($P\cdot$) são formados por um fotoiniciador (I) que absorve fótons a uma certa frequência, onde h representa a constante de Planck, ν é a frequência do fóton e $h\nu$ é a energia do fóton.

Uma das desvantagens da polimerização por radicais livres é consequência da inibição do oxigênio, causando a resina uma superfície parcialmente curada quando a exposição ou irradiação ultravioleta não forem suficientes.

A respeito da fotopolimerização por estereolitografia, Klaus 2006 descreve o mecanismo da seguinte forma:

As moléculas de fotoiniciadores, P, presentes no material misturadas com os monômeros, M, absorvem fótons a uma determinada frequência, provenientes da incidência do laser da máquina de estereolitografia, gerando assim uma espécie de fotoiniciador excitado P^* . Uma pequena fração de P^* é convertida em uma molécula iniciadora reativa (radical livre), $P\cdot$, depois de passado por várias etapas complexas de transformações. Essas moléculas reagem com uma molécula do monômero para formar um iniciador de polimerização, $P - M\cdot$, iniciando assim, o processo de formação das cadeias poliméricas. Os monômeros adicionais continuam reagindo durante a propagação da cadeia, $PMMMMM\cdot$, até a inibição da cadeia pelo processo terminal da reação de polimerização. À medida que as reações ocorrem, a resina torna-se sólida, aumentando a sua resistência mecânica e densidade. (p. 22)

Figura 10 - Esquema da sequência de reações durante a fotopolimerização



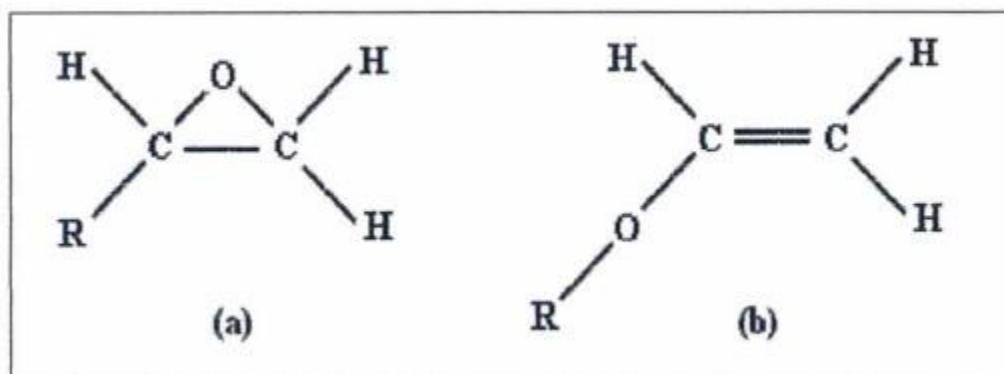
Fonte: Fernandes (2001, p.18)

3.4.2 Fotopolimerização catiônica

Devido aos benefícios apresentados pela fotopolimerização catiônica, a técnica tem chamado atenção. O método utilizado para sua cura é a aplicação de radiação, no qual é iniciada por UV e tem uma série de aplicações como: tintas, adesivos, revestimentos e eletrônicos. Porém, a fotopolimerização por mecanismos catiônicos também apresenta algumas desvantagens, nas quais são a inibição por bases e águas, incluindo umidade (FERNANDES, 2001; KLAUSS, 2006).

Os monômeros fotoiniciados catiônicos, dividem-se em dois principais grupos encontrados: o epoxeto do epóxi e o viniléter do éter-vinílico. (figura 11).

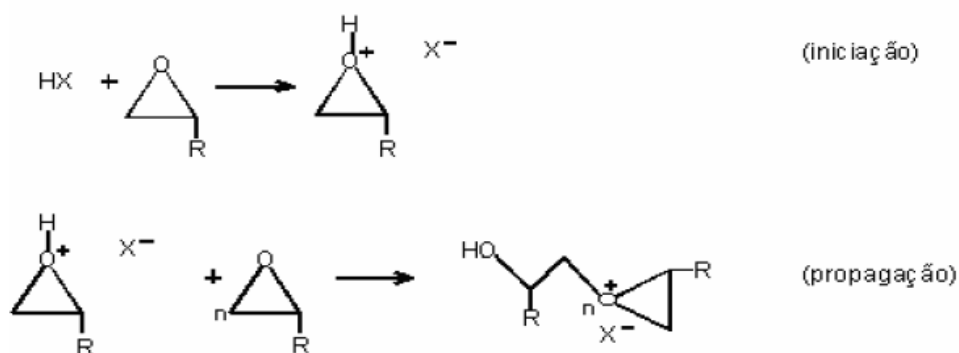
Figura 11 - Estrutura molecular generalizadas dos grupos funcionais do epóxi (a) e do éter-vinílico(b)



Fonte: Fernandes (2001, p.19)

A figura 12 demonstra como é realizado a formação do polímero através dos monômeros de epóxi, uma vez que é possível a abertura dos seus anéis na presença do fotoiniciador. A abertura do anel é conhecida por causar mínima alteração ao volume na reação (menor contração), pois a quantidade e tipo de ligações químicas são iguais antes e depois das reações. O mesmo não ocorre com acrilatos, portanto estes convertem uma ligação dupla em duas ligações simples. Diferente do epóxi, os monômeros éter-vinílicos não possuem uma estrutura cíclica, mas sim uma estrutura com ligações duplas podendo ser quebradas cationicamente, por consequência da forte tendência de doar elétrons do átomo de oxigênio adjacente.

Figura 12 - Ilustração da reação de abertura do anel epóxi de propagação da polimerização catiônica



Fonte: KLAUSS (2006, p.24)

2.5 Pós-cura

Segundo informações extraídas do site FormLabs, essa técnica é essencial ao projeto. A adição de pós-cura ao processo de estereolitografia, promove à peça um acréscimo em sua resistência e desempenho, pois ela permite aumentar a percentagem de ligações cruzadas entre as cadeias das resinas (FERNANDES, 2000). Isso é necessário uma vez que, após sua construção no molde pode encontrar-se com regiões não curadas ou parcialmente curadas, fato decorrente da potência e velocidade do laser, profundidade de cura e sobre-cura, diâmetro do feixe do laser utilizado na impressora, espessura de camada e também as propriedades químicas da resina fotocurável (KLAUSS, 2006).

Uma das formas de processo pós-cura é expor à peça impressa em uma câmara que emita raios ultravioletas ou em forno elétrico. O tempo de exposição a esses meios e a temperatura empregada será delimitado conforme as dimensões que a peça ira apresentar, geralmente o seu tempo de pós-cura será de uma ou duas horas, no entanto se a peça for muito grande, o processo pode levar até doze horas (FUH, 1997; FERNANDES, 2000). A utilização de calor nessa etapa, parte da premissa que o efeito causado é responsável pelo alívio de tensões formado na fase gel da polimerização (BAGIS, 1997).

O processo de estereolitografia causa ao fotopolímero um encolhimento de até 8% durante a polimerização, como consequência, promove a distorção e deformação causadas pelas tensões internas durante a fabricação, influenciando diretamente na precisão dimensional, esse percentual aumentará conforme a cura parcial da resina (FUH, 1997).

Atualmente existem diversos estudos buscando soluções para obtenção de peças de alto desempenho e qualidade, através do emprego de métodos de pós- cura, além dos métodos tradicionais como a cura por UV. Salmoria et al.(2005) desenvolveu pesquisas utilizando o micro-ondas e forno convencional como forma de tratamento, a resina empregada foi SOMOS™ 7110, cujo sua formulação apresenta grupos funcionais de epóxi, acrilatos e polióis o tempo empregado foi de quatro minutos numa potência de 300 e 700 W e 60 minutos numa temperatura de 125° C, respectivamente.

Os resultados obtidos pelas peças pós-curadas foi superior às peças

verdes, como mostra a tabela abaixo:

Tabela 1 - Propriedades mecânicas das amostras tratadas por diferentes processos de pós-cura

Processo de pós-cura	Módulo de elasticidade (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Resistência á Fratura (MPa)	Deformação (%)	Energia de Impacto (Jm ^{K1})
Nenhum	1050±5	43±2	32±2	10.5±0.8	28
Ultravioleta	1210±4	51±2	38±3	9.6±0.8	31
Micro-ondas	1265±5	54±4	44±5	8.8±0.9	31
Forno Convencional	1320±4	61±3	52±2	8.6±0.6	32

Fonte: Salmoria (2005, p. 159)

Segundo Jaynithi (1995, p. 107) “Cura térmica e ultravioleta já são técnicas que estão em uso há algum tempo”, em seu trabalho ele traz a abordagem de uma terceira técnica, a utilização de banho ultrassom como forma de pós-cura das peças. A resina utilizada em seu trabalho é a SOMOS™ 6100, cuja sua formulação é a base de epóxi. Os resultados obtido pelo uso de banho ultrassom foram superiores em relação ao emprego do UV, porém é importante salientar que as propriedades físicas de um fotopolímero são muito distintas, portanto não podemos generalizar para outros materiais.

Em sua pesquisa foram realizados dez diferentes métodos de pós-cura, divididas em pós-cura ultravioleta, térmica e ultrassônica. Foi estabelecida uma condição padrão de pós-cura para o ultrasom. Os diferentes resultados podem ser vistos na tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas de diferentes condições pós-cura

#	Condições de pós-cura	Módulo de elasticidade (MPa)	Resistência à Tração (MPa)	Alongamento (%)	Resistência à Flexão (MPa)	Módulo de Flexão (MPa)	Dureza	Teste de impacto Izod (Ft-lb/in)	Condição de distorção térmica (°C)
1	Pós-cura térmica 60 min à 80°C	2645	68	5.3	105.0	2803	82	0.88	59.6
2I	Pós-cura térmica 60 min à 130°C	2172	68	5.5	105.4*	2872	82	0.91	96.1*
3	Pós-cura térmica 60 min à 150°C	3180	69	9.7	105.7	2922*	83	0.88	67.5
4	Pós-cura por banho ultrassom à 80°C	2949	66	5.5	101.2	2811	82	0.77	60.3
5	60 min de pós-cura UV em forno PCA	2585	61	5.3	94.1	2736	84	0.69	51.2
6	30 min pós-cura ultrassom+30 pós-cura térmica à 80°C	3722*	66	5.5	103.9	2884	83	0.69	52.8
7	30 min pós-cura ultrassom+30 pós-cura térmica à 130°C	3418	68	6.7	103.7	2890	84	NA	61.3
8	30 min pós-cura ultrassom+30 pós-cura UV em forno PCA	3692	65	4.7	100.0	2815	84	0.77	49.5
9	30 min pós-cura UV+30 pós-cura térmica à 100°C	3179	66	8.1	100.0	2726	84	0.90	66.8
10	30 min pós-cura térmica à 100°C +30 pós-cura UV	3328	70*	10.3	NA	NA	85*	0.95*	59.5

Fonte: (*=Valor máximo; NA= Não Avaliado; °=Melhor resultado) JAYANTHI (1995, p. 108)

A empresa americana FormLabs, fundada em 2012 que se destaca no mercado de vendas de impressoras 3D, desenvolveu a “Form Cure”, com a combinação de luz e calor. Esse equipamento visa curar a peça de uma forma mais eficiente, com intuito de apresentar melhores propriedades. No seu site a empresa também sugere o uso de luz natural como forma de pós-cura, no entanto, deve-se tomar cuidado, pois as diferentes condições climáticas podem alterar os seus resultados aplicando esse método.

Figura 13 - Equipamento Form Cure desenvolvido pela empresa Form Labs.



Fonte: An introduction to Post-Curing SLA 3D Prints.²

Também é possível realizar a construção caseira de um equipamento pós- cura. Segundo informações fornecidas pelo site 3D print.com, uma peça recém- impressa apresenta características semelhantes à de um esmalte, pois a resina se mostra com aspecto pegajoso ao fim de seu processo de cura, onde o mesmo não foi completado. Baseado nisso, a ideia parte do princípio de utilizar uma cabine secadora de esmaltes para a construção de uma caixa de cura UV.

Com a promessa de ser algo fácil de fazer e barato, os materiais

² Disponível em: <<https://formlabs.com/blog/introduction-post-curing-sla-3d-prints/>>. Acesso em: 24 jun. 2018.

utilizados são: papel alumínio, cortador de caixa, fita adesiva, fita de caixa, lápis, lâmpada UV e caixa de papelão. O resultado pode ser visto na figura abaixo.

Figura 14 - Equipamento caseiro de pós-cura UV



Fonte: Hack of the Day: Build Your Own UV Cure Box for Under \$30, Courtesy of Formlabs. **3D print.com.**³

³ Disponível em: <<https://www.3dprint.com/113283/formlabs-uv-cure-box/>>. Acesso em: 8 mai. 2018.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas as metodologia para o desenvolvimento dos procedimentos experimentais, bem como materiais e equipamentos.

Foram realizados três diferentes etapas de pós-cura nos corpos de prova, nas quais consiste em: câmara UV, estufa e micro-ondas.

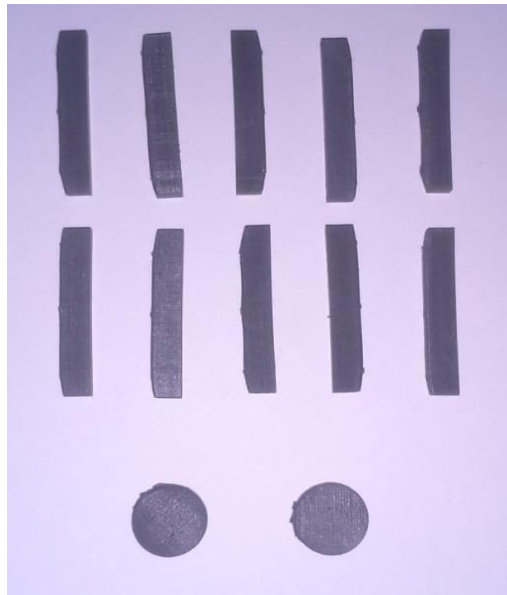
4.1 Fabricação dos corpos de prova

Para a fabricação dos corpos de prova, primeiramente os mesmos foram modelados no SolidWorks e passados para o formato .STL. Em seguida foram gerados os suportes e “fatiadas” as peças em camadas de 50 µm no software Preform; gerando-se assim modelos prontos para serem enviados à impressora 3D Form2 da Formlabs.

Durante esta etapa, a temperatura da resina foi mantida a 23 °C e selecionando o programa de impressão Grey v.4 da Formlabs para a impressora Form2. Os corpos de prova fabricadas foram divididas em quatro grupos, com dez peças cada. Um dos grupos não passou pela etapa de pós-cura, com a finalidade de realizar um comparativo aos demais que foram submetidos a pós-cura.

Para a realização de ensaio de flexão e da integridade da superfície por meio de microscopia óptica, foram preparados quarenta corpos de prova retangulares (24 x 4 x 2 mm). Para a avaliação estabilidade dimensional, foram construídas oito peças em forma de discos com 10 mm de diâmetro.

Figura 15 - Amostras retangulares e em forma de disco



Fonte: O autor (2018)

4.1.1 Resina fotopolimérica

A resina utilizada para a construção dos corpos de prova desse trabalho foi a Cosmos Grey SLA (Yller Biomateriais SA, Pelotas, Brasil), sua composição é a base de acrilatos cujo as características apresentadas são: baixo odor, baixa toxicidade e baixa viscosidade.

4.1.2 Impressora 3D

A máquina de estereolitografia utilizada foi a de modelo Form2, fabricada pela FormLabs. Esse modelo utiliza um laser de hélio-cádmio com comprimento de onda de 405 nm, potência inicial de 250 mW e diâmetro do feixe de 0,25 mm. A impressora utilizada para a construção dos corpos de prova desse trabalho pode ser vista na figura 16.

Figura 16- Impressora Form2, Formlabs



Fonte: O autor (2018)

4.1.3 Câmara UV

Na figura 17 é mostrada a câmara UV utilizada para a realização dos tratamentos de pós-cura. A potência utilizada foi de 36 W e o tempo empregado de 30 minutos. O tempo e a potência utilizados foram baseados no trabalho desenvolvido por Salmoria (2005), no entanto a potência utilizada pelo autor foi dez vezes maior que a utilizada nesse trabalho, mas o tempo empregado foi o mesmo.

Figura 17 - Câmara UV



Fonte: O autor (2018)

4.1.4 Estufa

Na figura 18 é mostrada a estufa (sem circulação de ar) de escala laboratorial da marca De Leo, utilizada para a realização do tratamento térmico. Os corpos de prova permaneceram na estufa durante 60 minutos à uma temperatura de 125 °C. Para o tratamento térmico, as informações como tempo e temperatura também foram obtidas através do trabalho realizado Salmoria (2005).

Figura 18 - Estufa sem circulação de ar, marca De Leo



Fonte: O autor (2018)

4.1.5 Micro-ondas

Na figura 19 é mostrado o forno micro-ondas utilizado modelo PME31, marca Philco, com potência total de 1400 W. Para a realização do experimento foi utilizado um micro-ondas doméstico, na qual foi ajustado para 840 W e o tempo empregado para o tratamento das peças foi 3 minutos e 30 segundos. Salmoria (2005) realizou o mesmo tratamento pós-cura em seu trabalho, no entanto a potência empregada e o tempo utilizado foram respectivamente, 700 w e 4 minutos.

Figura 19 - Forno micro-ondas marca Philco, modelo PME31



Fonte: O autor (2018)

4.2 Caracterização do material

Após a conclusão das etapas de pós-cura, foram realizados diferentes caracterizações com o propósito de verificar a influência dos tratamentos sobre as propriedades mecânicas das peças. Logo, foram feitas as seguintes análises: Microscopia óptica de superfície, dimensionamento da peça, ensaio de resistência a flexão e módulo de elasticidade .

4.2.1 Paquímetro Digital

Para a verificar a estabilidade dimensional apresentada pelas peças, com e sem o tratamento pós-cura, foi utilizado um paquímetro digital, que tem como característica apresentar elevada precisão.

O modelo utilizado é da marca Starrett®, série EC799, com resolução de 0,01 mm-0.0005" e com exatidão $\pm 0,02$ mm - ± 0.001 ".

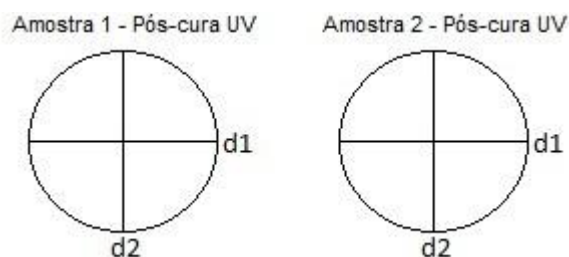
Figura 20 - Paquímetro digital modelo Starrett®, série EC799



Fonte: O autor

A figura 21 mostra como foi realizada as medidas dimensionais nas amostras circulares, onde d1 foi determinada como medida horizontal e d2 como medida vertical. As amostras foram divididas em quatro grupos: pós-cura em câmera UV, pós-cura em estufa, pós-cura em micro-ondas e sem tratamento de pós-cura.

Figura 21 - Esquema ilustrativo das medidas realizadas no paquímetro digital



4.2.2 Microscopia óptica de superfície

A obtenção das fotomicrografias para a análise de rachaduras nas peças foi realizada no laboratório de Pesquisa em Materiais (LAPEM) - UFPel. Foi utilizado uma microscópio Olympus, modelo BX41M, usando o software ISCapture.

Figura 22 - Microscópio Olympus, modelo BX41M



Fonte: O autor (2018)

Após os tratamento de pós-cura foram fotografado

- 2 amostras para uma ampliação de 40x pós-curada em estufa;
- 2 amostras para uma ampliação de 40x pós-curada em micro-ondas
- 2 amostras para uma ampliação de 40x pós-curada em UV
- 2 amostras para uma ampliação de 40x sem tratamento de pós-cura

4.2.3 Ensaio de Resistência à Mini-Flexão

O ensaio de flexão consiste em posicionar o corpo de prova sobre dois apoios distanciados entre si a uma distância L , sendo a carga de dobramento ou de flexão aplicada no centro do corpo de prova a uma distância $L/2$ de cada apoio.

Durante o ensaio de resistência à flexão desenvolvem-se tensões de tração, compressão e cisalhamento. E, a partir do ensaio de resistência à flexão pode-se calcular o módulo de elasticidade.

Foram ensaiados quarenta corpos de prova ao total, sendo trinta destinado aos que passaram pelo processo de pós-cura e dez que não sofreram nenhuma tratamento. Os ensaios foram realizados no Centro de Desenvolvimento e Controle de Biomateriais (CDC-Bio) da Universidade Federal de Pelotas em uma máquina universal EMIC, DL500, com célula de carga de 100 N (10 Kgf) e velocidade 1mm/min, acoplada a um programa computadorizado responsável por fornecer os dados obtidos (Figura 23).

Figura 23 - Máquina utilizada para o ensaio de flexão



Fonte: O autor (2018)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Paquímetro digital

A Tabela 3 mostra as medidas obtidas através do paquímetro digital para as amostras em formato de discos.

Tabela 3 - Medidas obtidas através do paquímetro digital

Grupos	d1 (mm)	d2 (mm)
Sem tratamento	10,18	10,14
Pós-cura em câmara UV	10,33	10,29
Pós-cura em estufa	10,35	10,31
Pós-cura em micro-ondas	10,21	10,23

Segundo Fuh (1997) o processo de estereolitografia causa ao fotopolímero um encolhimento de até 8% durante a polimerização, como consequência, promove a distorção e deformação causadas pelas tensões internas durante a fabricação, influenciando diretamente na precisão dimensional, esse percentual aumentará conforme a cura parcial da resina.

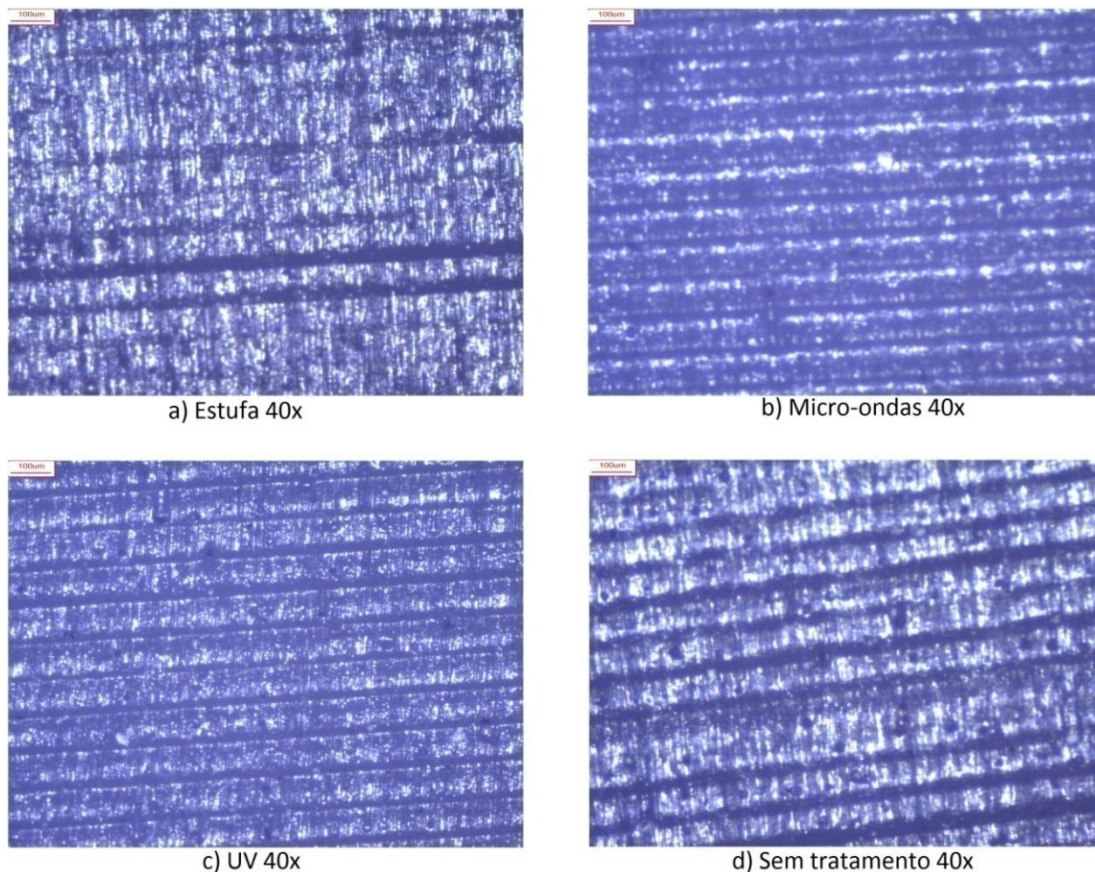
Observamos que a pós-cura em estufa apresentou maior distorção dimensional comparada aos demais grupos. O percentual apresentado foi 1,67% maior que o grupo sem nenhum tratamento, enquanto o micro-ondas foi de 0,29% e com câmara UV de 1,47%. Portanto, segundo Fuh (1997), podemos afirmar que a utilização dos métodos pós-cura influenciaram na polimerização das peças, causando uma variação dimensional no material. No entanto o autor afirma que a forma de impressão 3D causa distorções as peças devido ao processo ser em camadas, e a potência do laser empregado, fazendo com que as elas não sejam uniformes.

5.2 Microscopia óptica de superfície

Na figura 24 é possível observar a formação de estrias no corpos de prova, cuja consequência é resultado da deposição das camadas durante o processo de impressão 3D e efeito do laser sobre elas. Não foi identificado

rachaduras em nenhuma das fotomicrografias, sugerindo que a aplicação dos diferentes métodos pós-cura não danificou as amostras.

Figura 24 - Amostras com aumento de 40x



Fonte: O autor (2018)

5.3 Ensaio de resistência a mini-flexão

Na tabela 4 é possível visualizar a análise dos dados obtidos através dos testes estatísticos ANOVA e Tukey, apresentando as médias e os desvios padrão de resistência de cada grupo para tensão máxima e módulo de elasticidade. Os gráficos fornecidos pelos testes teste de mini-flexão pode ser visto nos anexos desse trabalho.

Em relação a tensão máxima, a ANOVA mostrou não haver diferença estatisticamente significativa entre os grupos A, B e C, enquanto que o grupo D apresentou diferença estatisticamente significativa em relação aos demais grupos ($F=40,001$; $p<0,05$).

Para o módulo de elasticidade, a ANOVA mostrou também, não haver

diferença estatisticamente significativa entre os grupos A, B e C, enquanto que o grupo D apresentou diferença estatisticamente significativa em relação aos demais grupos ($F=43,73$; $p<0,05$). O teste Tukey foi aplicado para comparar entre quais grupos existe diferença, e revelou que a diferença estatística se apresentou no grupo D ($p<0,05$).

As amostras pós-curadas em câmara UV foi o grupo que apresentou aumento significativo na resistência mecânica, esse aumento pode ser explicado pelo fato da resina utilizada nesse trabalho ser termosensível, ou seja, a cinética de reação do processo de cura se inicia com a abertura do anel, por adição de agente de cura. Portanto, o oligômero (acrílico) se cura na presença de iniciadores específicos.

Tabela 4: Média da resistência à Mini-Flexão e Módulo de Elasticidade

Grupos	Método de Pós-Cura	σ (Mpa) (\pm Desvio padrão)	E (Mpa) (\pm Desvio Padrão)
A	Sem tratamento	23,38 ($\pm 3,86$)	99,49 ($\pm 18,23$)
B	Estufa	24,76 ($\pm 4,78$)	92,48 ($\pm 30,01$)
C	Micro-ondas	21,50 ($\pm 3,85$)	92,47 ($\pm 10,15$)
D	UV	46,97 ($\pm 9,59$)	323,10 ($\pm 102,97$)

6. CONCLUSÃO

De acordo com o problema de pesquisa apresentado na introdução deste trabalho, pretendia-se verificar de que maneira os procedimentos e técnicas do método pós-cura, são capazes de intervir na otimização das peças impressas por SLA?

Para responder essa questão foi preciso retomar alguns resultados que já foram previamente tratados. Primeiramente, é importante destacar que a superfície das amostras pós-curadas e sem tratamento não apresentou características de fragilidade nas peças, revelando apenas a ordenação das camadas na microestrutura causada pelo processo de estereolitografia.

As amostras pós-curadas em câmara UV apresentaram maior valor para o módulo de elasticidade e tensão máxima, comparada aos demais grupos que não apresentaram tanto aumento, chegando a ter até menores valores comparados a amostra sem tratamento.

As dimensões das peças sofreram variações, com destaque para a pós-cura em estufa que apresentou variação de 1,67% em relação ao grupo sem tratamento. No entanto é importante salientar que a variação dimensional é resultado da potência do laser e disposição das camadas, ou seja, não é resultado do processo de pós-cura.

7. REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, Robério. **Estudo das Propriedades Micro e Macroscópicas de pseudo Redes Poliméricas Interpenetradas (pseudo-RPIs) à Base de Resina Epóxi para Aplicações na Área Odontológica**. Florianópolis. 206 p Tese (Química) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2003.

AN INTRODUCTION to Post-Curing SLA 3D Prints. **Form Labs**. Disponível em: <<https://formlabs.com/blog/introduction-post-curing-sla-3d-prints/>>. Acesso em: 24 jun. 2018.

AZEVEDO, Fábio. **Estudo e projeto de melhoria em máquina de impressão 3D**. São Carlos. 38 p TCC (Engenharia Elétrica) - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2013.

BAGIS, Yldirim H. Effect of post-cure temperature and heat duration on monomer conversion of photo-activated dental resin composite.. **Dental Materials**, v. 13, n. 4, p. 228-232, 1997.

BRAGA, Luísa. **Manufatura aditiva: uma análise de aplicações atuais**. Rio de Janeiro. 55 p TCC (Engenharia Mecânica) - PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO, 2017.

CANEVAROLO, Sebastião V. **Ciência dos Polímeros**. 2. Ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2006. 275 p.

CAPELLATO, Patricia. **Avaliação da resistência à flexão e rugosidade superficial de uma resina odontológica após imersão em café**. Taubaté-SP, 2006. 73 p Dissertação (Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ.

COSTA, Marcos Paulo. **Processo de estereolitografia (sla) no auxílio do design**. São Caetano do Sul. 55 p Monografia (Engenharia Automotiva) - CENTRO UNIVERSITÁRIO DO INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA, 2012.

FERNANDES, Gerson. Influência do processo de pós-cura em câmera de luz ultravioleta de peças obtidas com resina fotopolimérica em máquinas de estereolitografia . In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 14. 2000, São Pedro-SP.

_____. **Resina fotopolimérica somos 7110 para estereolitografia: condições de pós processamento e caracterização química e térmica**. Florianópolis, 2001. 72 p Dissertação (Engenharia de Materiais) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2001.

FREGOLENTE, Patrícia. **Estudo da fotopolimerização de monômeros monofuncionais e multifuncionais para produção e recobrimento de lentes oftálmicas**. Campinas. 85 p Dissertação (Engenharia química) - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 2006.

FUH, JYH. Post-Cure Shrinkage of Photo-Sensitive Material Used in Laser Lithography Process. **Materials Processing Technology**, v. 63, n. 1-3, p. 887-891.

GRELLMAN, Dauri Alberto. **Utilização das tecnologias de estereolitografia e microfusão para aplicações em prototipagem rápida e ferramental rápido**. Florianópolis, 2001. 153 p Dissertação (Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2001.

HACK of the Day: Build Your Own UV Cure Box for Under \$30, Courtesy of Formlabs. **3D print.com**. Disponível em: <<https://www.3dprint.com/113283/formlabs-uv-cure-box/>>. Acesso em: 8 mai. 2018.

JAYANTHI, Suresh. Influence of post curing conditions on the mechanical properties of stereolithographic photopolymers. **Du Pont Somos Materials Group**, August. 1995.

KAHRAMAN, M.Vezir. Flame retardance of epoxy acrylate resin modified with phosphorus containing compounds. **Progress in organic coatings**, v. 51, n. 3, p. 213-219, 2004.

KLAUSS, Priscila . **Processos de cura e de decomposição térmica da resina renshapetm sl 5260 utilizada em fabricação rápida por estereolitografia**. Florianópolis , 2006. 64 p Dissertação (Engenharia de Materiais) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 2006.

MUNHOZ, André Luiz Jardini et al. **Cura localizada de resina termosensível utilizando o laser de CO2 como fonte seletiva de calor**. 1997. (Engenharia de Mecânica) – UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, 1997.

SALMORIA, G.V. Stereolithography somos 7110 resin: mechanical behavior and fractography of parts post-cured by different methods. **Polymer Testing**, v. 24, n. 2, p. 157-162, 2005.

SALMORIA, Gean V. Análise dimensional da fabricação de peças miniaturizadas por impressão 3D. In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, V. 2009. 5. ed, BELO HORIZONTE: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2009.

_____. Prototipagem rápida por impressão 3D com resinas fotocuráveis: uma análise sobre as tecnologias disponíveis no mercado nacional . In: 9º CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 9. 2007, Cambina Grande-PB: Associação Brasileira de Polímeros, 2007.

SANCHEZ, Elisabete. Compósito de Resina de Poliéster Insaturado com Bagaço de Cana-de-Açúcar: Influência do Tratamento das Fibras nas Propriedades. **Polímeros**, 2010. TELES, Vanessa. In: , Curitiba, 2016.

ANEXOS

UFPEL ensaio de flexão 3 pontos

[illegible]

Corpo de Prova	Força Máxima (N)	Tensão Máxima (MPa)	módulo elasticidade (MPa)
CP 1	72.89	48.60	357.79
CP 2	77.25	51.50	396.63
CP 3	81.85	39.29	235.43
CP 4	82.93	35.38	203.39
CP 5	85.82	41.19	242.17
CP 6	76.38	57.28	455.35
CP 7	86.88	65.16	484.07
CP 8	69.77	52.33	376.73
CP 9	52.69	39.52	239.98
CP 10	82.16	39.44	239.54
Número CPs	10	10	10
Média	76.86	46.97	323.1
Mediana	79.55	44.89	300.0
Desv. Padrão	10.12	9.592	102.9
Coef. Var. (%)	13.16	20.42	31.85
Mínimo	52.69	35.38	203.4
Máximo	86.88	65.16	484.1

