

# INFLUÊNCIA DO TEMPO DE CURA E PÓS-CURA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE IMPACTO E DUREZA NO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA POR DLP

Fellipy Kühne  
Carlos Maurício Sacchelli

## RESUMO

A Manufatura Aditiva (MA) foi utilizada por muito tempo como um complementar a indústria de manufatura tradicional, atualmente com o surgimento de novas tecnologias e o desenvolvimento de novos compostos, a MA se posiciona cada vez mais como uma opção aos processos tradicionais. Um dos métodos de MA é o DLP e a determinação de um tempo ideal durante a cura e pós cura, são indispensáveis para se obter uma peça final com as propriedades mecânicas desejadas, sem definir isso as peças produzidas através desse método podem ser invalidadas. Então, surge a necessidade de avaliar como as condições de cura e pós cura interferem nos aspectos de resistência mecânica da peça produzida por este método. Dessa maneira, este trabalho tem por objetivo, avaliar a influência dos parâmetros tempo de cura e tempo de pós-cura, em relação ao comportamento mecânico de impacto e dureza das peças produzidas pelo processo DLP. Para realizar o experimento foi definido um corpo de prova de acordo com a norma ASTM D256-10, submetido a diferentes tempos de cura e pós-cura, posteriormente cada um foi submetido a ensaios de impacto do tipo Izod e de dureza Shore D

Com os resultados obtidos foi possível concluir que existe uma relação entre a combinação entre os tempos de cura e pós-cura que interfere nas características mecânicas relacionadas à resistência ao impacto, porém essa mesma relação foi invalidada quanto a característica de dureza das peças.

**Palavras-chave:** Manufatura aditiva, DLP, Digital light processing, Ensaio de impacto, Resistência ao impacto, Dureza, Análise estatística.

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com a norma ASTM 52900:2015, Manufatura Aditiva (MA) é o processo de fabricação responsável por materializar um objeto, camada por camada a partir de um modelo 3D digital, ao contrário do que é feito na metodologia de manufatura subtrativa.

Segundo os autores Fiedor e Ortyl (2020), com a ascensão da indústria 4.0, os métodos de MA são vastamente utilizados para viabilizar a produção em baixa escala de produtos sob encomenda, oferecendo vantagens como projetos complexos e leves. De acordo com os autores os principais métodos de MA utilizados atualmente são:

Processo térmico de polímeros termoplásticos:

- FDM (Fused deposition molding)
- BPM (Ballistic particle manufacturing)
- SLS (Selective laser sintering)

Fotopolimerização de resina líquida:

- SLA (Stereolithography)
- DLP (Digital light processing)
- MJP (Multijet printing)
- BJ (Binder jetting)
- CAL (Computed axial lithography)
- SGC (Solid ground curing)
- CLIP (Continuous liquid interface production)

Fabricação de estrutura metálica:

- DED (Direct energy deposition)
- DMLS/SLM (Direct metal laser sintering)
- EBM (Electron-beam additive manufacturing)
- MBJ (Metal binder jetting)

Outros métodos:

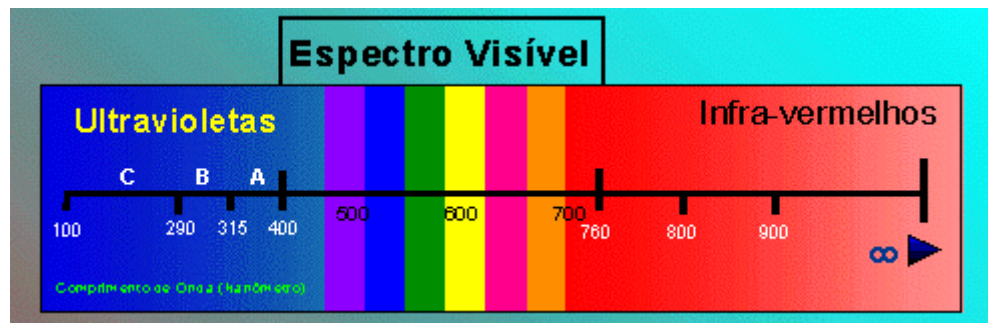
- LAM (Liquid additive manufacturing)
- LOM (Laminated object manufacturing)
- CFF (Continuous fiber fabrication)

A tecnologia de MA foi desenvolvida em 1986 por Charles Hull em um processo denominado SLA (Stereolithography), que proporcionou o descobrimento de outras tecnologias como o FDM (Fused Deposition Molding), que é um processo que funciona a partir da deposição de camadas fundidas do polímero em estado sólido, o filamento é aquecido no bico até atingir um estado semi-líquido, então é depositado sobre a superfície da máquina, ou sobre a camada anterior de acordo com Ngoa et al(2018).

Para Bagheri e Jim (2019), novas tecnologias emergentes viabilizam a prototipagem rápida, nesse contexto a MA se faz cada vez mais presente e aplicações tanto na engenharia quanto na biomedicina já são possíveis graças aos avanços cada vez mais acelerados que a tecnologia de manufatura aditiva proporciona. De acordo com Alsandi et al (2021), o método mais utilizado no meio odontológico é o denominado DLP (Digital light processing), além disso ressaltam que a tecnologia digital forneceu novos métodos que estão progredindo rapidamente, apresentando novas opções de tratamento em odontologia e juntamente com a MA já são considerados tecnologias digitais populares na área odontológica.

A MA por fotopolimerização de resina líquida, tem por objetivo a sinterização de uma determinada resina fotossensível (monômero), por meio da exposição de luz UV, dentro do intervalo de comprimento de onda UVA (315nm até 400nm), que funciona como agente catalisador da resina durante o processo de impressão, de acordo com Monzón et al (2017). Os respectivos espectros de onda são definidos de acordo com a Figura 1.

Figura 1: Escala de espectro de radiação em comprimento de onda



Fonte: Acquaticos (2010)

Segundo Bagheri e Jin (2019), as resinas utilizadas em AM por fotopolimerização de resina líquida utilizam bases de monômeros ou oligômeros e têm a sua sintetização por meio de um sistema radical. Sistemas radicais incluem três principais passos: a formação de um radical, a iniciação e a propagação. A formação do radical ocorre por meio da irradiação de luz, onde um sistema fotoiniciador (projeto) é responsável por converter a energia fotolítica em espécies reativas para iniciar a fotopolimerização. Dependendo da estrutura química do projeto a incidência de luz necessária para induzir a clivagem difere em comprimento de onda e intensidade para a mesma resina. Compostos que necessitam de uma energia maior para sinterização são utilizados no método DLP.

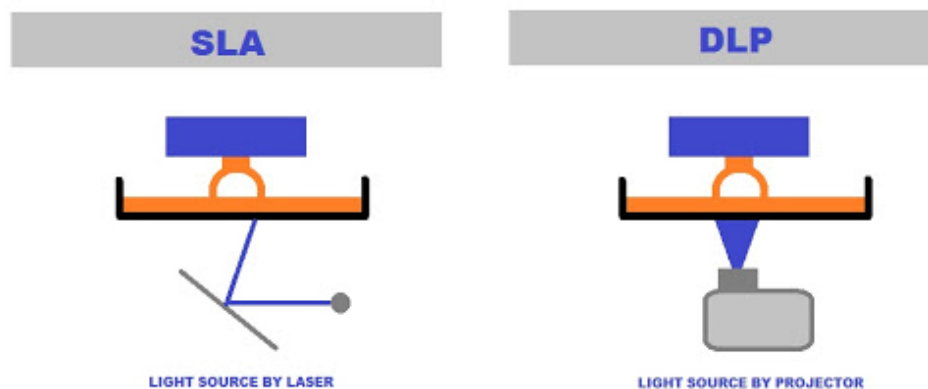
“Bioimpressão 3D é um termo que se refere a técnicas utilizadas para a fabricação 3D de materiais biocompatíveis”, Bagheri e Jin (2019). O desenvolvimento da bioimpressão 3D atraiu a atenção de desenvolvimentos envolvendo a engenharia e a medicina regenerativa, no entanto as resinas fotossensíveis comuns disponíveis são totalmente restritas a esse uso devido a sua baixa biocompatibilidade, e em caso de uso podem apresentar altos níveis de irritação e citotoxicidade, causando riscos à saúde quando estão em contato direto com o corpo humano, reforçam os autores.

Portanto somente biomateriais específicos (também conhecidos como bioinks em AM), cumprindo todos os requisitos biológicos, mecânicos e químicos podem ser utilizados para tal fim. De acordo com os autores Bagheri e Jin (2019), existem vários polímeros biocompatíveis que são aprovados pela FDA (Food and Drug

Administration) dos Estados Unidos, que podem ser utilizados em aplicações clínicas, como por exemplo materiais a base de PEG apresentam hidrofiliabilidade, biocompatibilidade e a capacidade de ser funcionalizado quimicamente dentro do processo DLP.

De acordo com Borello et al (2018), a diferença entre os equipamentos utilizados no método DLP e no SLA, está na forma como a luz ultravioleta é emitida em ambos os equipamentos. As impressoras que trabalham com a tecnologia DLP, utilizam de um projetor que emite a luz e solidifica uma camada inteira de uma vez, durante o tempo de exposição à luz ultravioleta, já as impressoras baseadas na tecnologia SLA, solidificam a resina por meio de um feixe de luz ultravioleta, que funciona como um laser UV, o mesmo deve passar por toda a região a ser sinterizada na respectiva camada, de acordo com a figura 2.

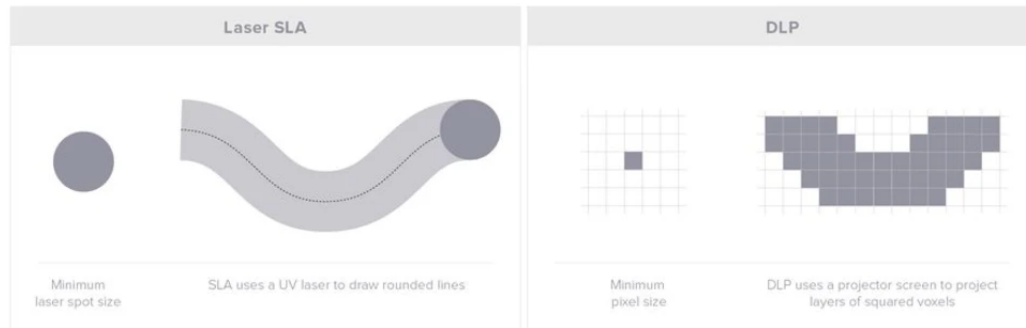
Figura 2: Comparação da fonte de luz uv, responsável pela polimerização do monômero: à esquerda SLA e a direita DLP



Fonte: Kkrobotic (2018)

Segundo Monzón et al (2017) a diferença prática, é que a tecnologia DLP traz maior agilidade no processo de impressão, ao passo que a resolução por camada entregue utilizando a tecnologia SLA é superior, o método DLP fica dependente da resolução máxima que o projetor consegue entregar, e por maior que seja essa resolução ainda imprime o serrilhado dos pixels na camada, ilustrado na figura 3.

Figura 3: Comparação do acabamento das camadas, devido a diferença de fonte de luz: à esquerda SLA e à direita DLP.



Fonte: K2go (2019)

### **DLP (Digital Light Processing):**

De acordo com Alsandi et al (2021), o processo de fabricação inicia-se no computador, onde é gerado uma geometria em um software CAD. Depois de gerada a geometria, a mesma é exportada em formato “.stl”, este arquivo é carregado em um software CAM que é responsável por transformar a geometria em um sistema de coordenadas ordenadas e parâmetros a serem obedecidos pela impressora. Depois de passar pelo software CAM, o arquivo “.stl” é gerado e passado para a máquina que então começa o processo de impressão.

Segundo Hea et al (2017), na impressora DLP podemos identificar três principais mecanismos responsáveis pela impressão, são eles; A fonte de luz responsável por sintetizar a resina, fica abaixo de todo o conjunto, logo depois vem o tanque que comporta a resina ainda em estado líquido e a plataforma, que se movimenta no eixo Z, como mostra a Figura 4.

Figura 4: Fluxo de processo do método DLP

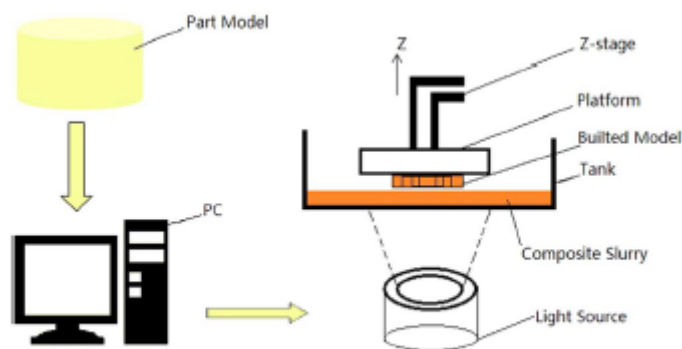


Fig. 1. The working principles of DLP.

Fonte: Hea et al. (2017)

Para Kuang et al (2018), depois de finalizado o processo de impressão, a peça pode ser submetida ao procedimento de pós-cura, que vai garantir a completa sinterização da resina, entregando as propriedades mecânicas pré-estabelecidas pelo fabricante. A pós-cura pode ser realizada por meio da exposição de luz ultravioleta à peça, geralmente é realizada em um outro equipamento que emite a luz UV no mesmo comprimento de onda que a impressora.

De acordo com Wu et al (2019), para obter melhores propriedades mecânicas, uma peça impressa pode passar pelo método de pós-processamento utilizando radiação ultravioleta, objetivando o aumento da sua resistência mecânica, embora o procedimento possa trazer alguma distorção geométrica no modelo final. Também considera que o tempo em que a resina fica exposta à luz ultravioleta é denominado tempo de exposição e os fatores que mais influenciam as propriedades mecânicas finais de uma peça são o tempo de exposição durante a impressão e durante a pós cura. De acordo com Monzón et al (2017), há alteração na dureza de um objeto impresso, devido ao aumento da incidência de luz UV durante o processo de pós-cura.

O processo DLP trouxe mais agilidade para os métodos de manufatura aditiva, sem perder a acuracidade do processo, Bagheri e Jim (2019). A qualidade de um processo de impressão depende de parâmetros bem definidos, e ajustar esses parâmetros é um processo bastante desafiador, pois um parâmetro bem

definido combinado com um outro mal configurado certamente irá afetar o resultado final da impressão além disso, estudos apontam que existem diferenças entre os parâmetros ótimos de diferentes máquinas, Seprianto et al (2020).

Pensando nisso, surge a necessidade de analisar como esses parâmetros influenciam nas características mecânicas de determinado material, com o objetivo avaliar a ordem de influência dos mesmos dentro do processo de impressão.

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência dos parâmetros de tempo de cura e pós-cura no comportamento mecânico de impacto e dureza de uma peça obtida pela tecnologia DLP.

Para que isso seja possível foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar na revisão da literatura quais os principais fatores que influenciam as propriedades mecânicas no processo DLP;
- Avaliar o impacto que a emissão de luz UV causa nas propriedades mecânicas durante o processo de impressão e de pós cura, por meio de um planejamento experimental;



## 2 MATERIAIS E MÉTODO

No Brasil a norma que regulariza a avaliação biológica de produtos aplicados na área da saúde, assim como o processo de gerenciamento de risco é a ISO 10993-1:2013.

A diversidade e aplicabilidade de fórmulas biocompatíveis ainda são limitadas, porém existe uma grande demanda por pesquisas em materiais fotopolimerizáveis biocompatíveis, de acordo com os autores Bagheri e Jin (2019). A resina escolhida para a realização dos testes pertence ao fabricante Yllor, modelo Cosmos DENTURE, utilizada na fabricação de provisórios e dentaduras para o setor odontológico.

Com base no experimento feito pelos autores Seprianto et al (2020), este experimento busca identificar a relação entre os fatores: Tempo de exposição durante o processo de impressão e o tempo de exposição durante o processo de pós cura, porém, por meio de testes de impacto Izod e utilizando análise de variância (ANOVA) para avaliar a correlação entre os fatores, e qual deles afeta mais a propriedade mecânica da peça final.

Portanto, para realizar o experimento foram definidas as seguintes variáveis: Tempo exposição, tempo de exposição durante a pós cura e carga utilizada no ensaio de impacto.

Assim foi construída a seguinte Tabela 1, contendo os fatores envolvidos no processo, detalhando quais serão os fatores fixos, assim como os valores dos fatores que serão variados durante o estudo.

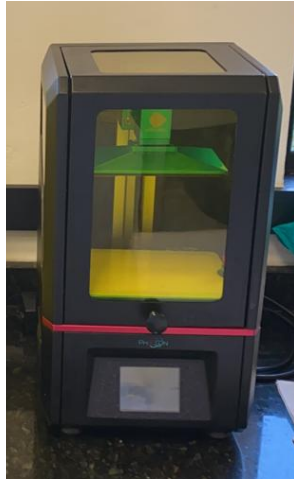
Tabela 1: Parâmetros fixos e variáveis

<b>Fator</b>	<b>Valor</b>
Altura da camada	0.050 (mm)
Tempo de exposição	12 e 17 (s) - Variável
Tempo de exposição pós-cura	10 e 15 (min) - Variável
Tempo de exposição base	80 (s)
Quantidade de camadas base	5 (un.)

Fonte: Autor (2021)

Para o experimento foi utilizada uma impressora DLP comercial da marca Anycubic, modelo Photon ilustrado na Figura 5.

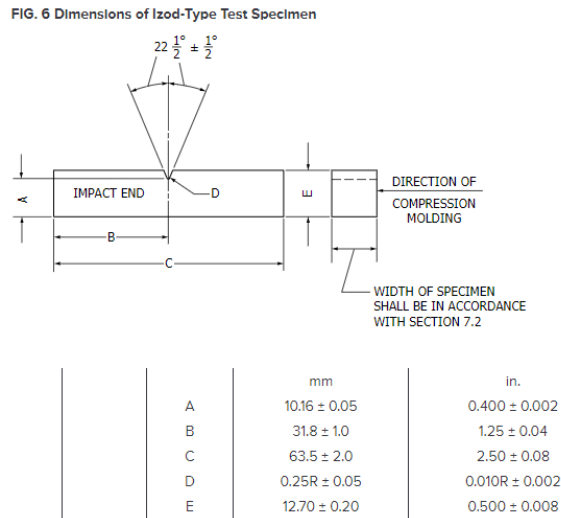
Figura 5: Impressora DLP Anycubic Photon



Fonte: O autor (2021)

Foi desenvolvido um corpo de prova com auxílio de um software CAD, de acordo com a norma D256-10, para posteriormente avaliar a dureza. Além disso, foram desenvolvidos corpos de prova para avaliação de resistência a impacto, método Izod, atendendo a respectiva norma como mostra a Figura 6.

Figura 6: Dimensões do corpo de prova, de acordo com a norma ASTM D256-10



Fonte: D256-10(2018) - Acessado em 25/07/2021 às 17:16

O procedimento de pós cura foi feito em uma cabine comercial da marca Anycubic, modelo Wash and Cure 2.0 como mostra a Figura 7, responsável por submeter os corpos de prova a um espectro de frequência igual a 405nm, de acordo com os tempos definidos na Tabela 1.

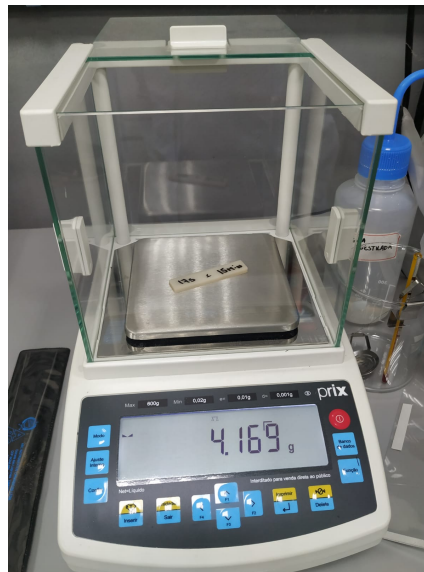
Figura 7: Cabine de pós cura - Anycubic Wash and Cure 2.0



Fonte: Autor (2021)

Antes de realizar o experimento, foi feita a pesagem de cada corpo de prova utilizando a balança de precisão do laboratório de ensaios mecânicos da universidade, como mostra a figura 8.

Figura 8: Procedimento de pesagem dos corpos de prova na balança de precisão



Fonte: O autor (2021)

Após feita a pesagem foi dado início aos testes mecânicos, no equipamento Izod Charpy 50C da marca Equilam da universidade, configurada para atender ao ensaio Izod e utilizando um pêndulo de 5 Joules com velocidade de impacto de 3.8m/s. Antes de iniciar os testes de impacto com os respectivos corpos de prova, foi realizado um ensaio livre, a fim de medir a resistência que o ar e o atrito dos rolamentos provoca na máquina, que trouxe um resultado para  $K_c$  de -0,24J.

Assim podemos utilizar a seguinte fórmula para obter a energia de impacto absorvida pelo corpo de prova.

$$K = K_t - K_c$$

Sendo:

K: Energia absorvida corrigida

$K_t$ : Energia total absorvida

$K_c$ : Energia absorvida do atrito do rolamento e da resistência do ar

Ao calcular a energia absorvida corrigida (K) para cada corpo de prova, foi possível encontrar o valor de energia de impacto (I), dividindo a energia absorvida pela área da seção transversal de cada corpo.

$$I = K/A$$

Onde:

I: Energia de impacto

K: Energia absorvida corrigida

A: Área da seção transversal

Em seguida foi dada a continuidade ao ensaio com os corpos de prova, cada amostra foi enumerada de 1 a 5, e a ordem de testes foi feita obedecendo essa sequência, como mostra a Figura 9.

Figura 9: Corpos de prova após serem submetidos ao teste de impacto



Fonte: O autor (2021)

Após a finalização dos ensaios de impacto em todas as amostras, foi feito um ensaio de dureza, medindo uma tríade em cada corpo de prova para garantir um padrão no ensaio.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 ENSAIO DE IMPACTO

Com os resultados obtidos através do ensaio de impacto nas amostras, foi construída a Tabela 2, que mostra o valor em Joules do resultado do ensaio com cada corpo de prova na coluna “K”, a energia de impacto do material (coluna “I”), assim como a média para cada amostra e desvio padrão.

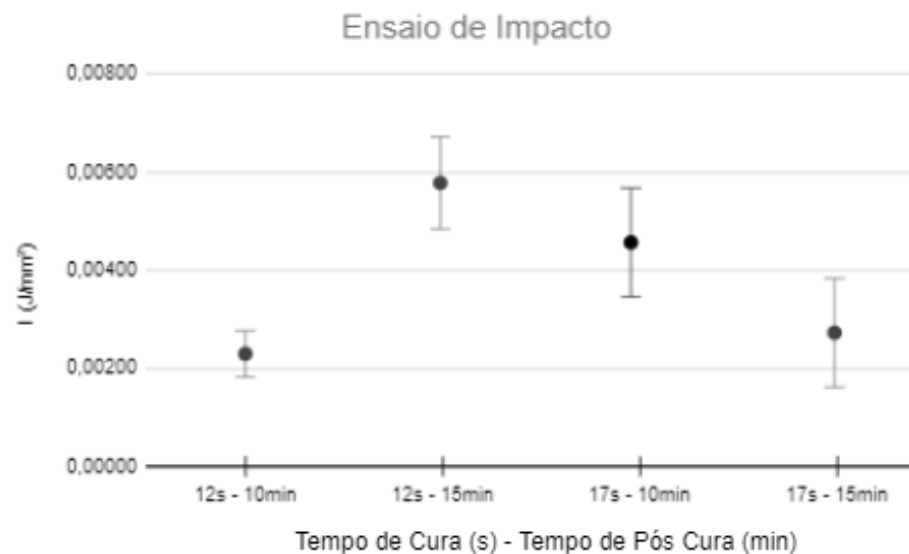
Tabela 2: Energia absorvida (K) e Energia de impacto (I)

Cura e Pós-cura	Corpo nº	K (J)	I (J/mm <sup>2</sup> )	Média (J/mm <sup>2</sup> )	Desv. Padrão (J/mm <sup>2</sup> )
<b>12s - 10min</b>	1	0,24187	0,00187	0,00230	0,00047
	2	0,24222	0,00222		
	3	0,24280	0,00280		
<b>12s - 15min</b>	1	0,24664	0,00664	0,00579	0,00094
	2	0,24478	0,00478		
	3	0,24593	0,00593		
<b>17s - 10min</b>	1	0,24402	0,00402	0,00457	0,00111
	2	0,24384	0,00384		
	3	0,24585	0,00585		
<b>17s - 15min</b>	1	0,24272	0,00272	0,00273	0,00127
	2	0,24399	0,00399		
	3	0,24146	0,00146		

Fonte: O autor (2021)

A partir destes resultados foi gerado um gráfico com os valores de energia de impacto para melhor visualização e análise dos resultados obtidos durante o experimento, conforme mostra o Gráfico 1.

Gráfico 1: Ensaio de impacto



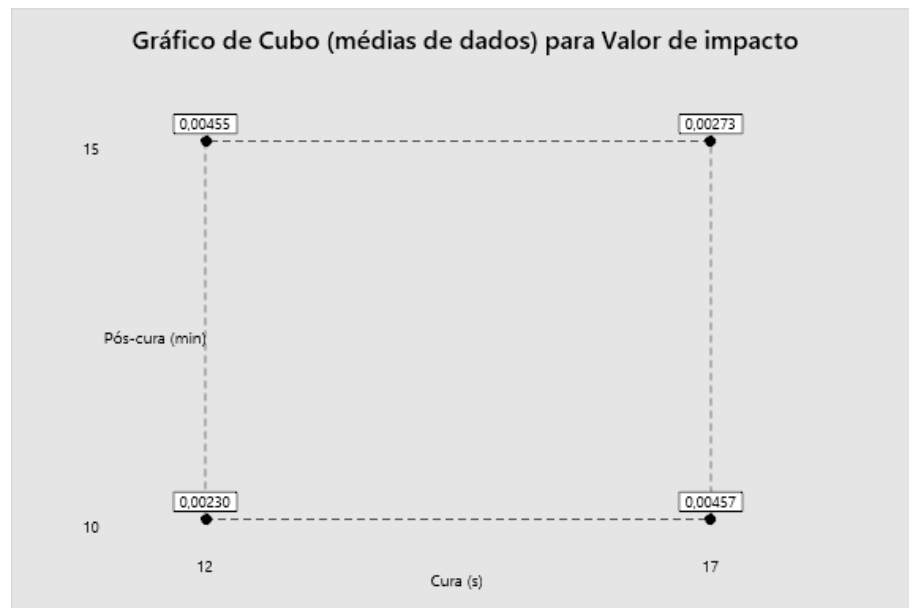
Fonte: O autor (2021)

A partir do Gráfico 1 é possível observar que o resultado com menor resistência ao impacto foi obtido na amostra com condições de cura igual a 12s e pós cura igual a 15 minutos, porém a menor variação se deu nessa mesma amostra.

A partir destes dados foi feito uma análise de variância estatística (ANOVA), com o objetivo de buscar a correlação entre os fatores estudados, e se existe uma influência entre ambos. Para realizar a análise estatística dos resultados obtidos, foi utilizado o software Minitab, primeiramente foi gerado um gráfico de cubo, que mostra a média dos valores obtidos em cada amostra, com a variação dos parâmetros disposta nos eixos, como mostra o Gráfico 2.



Gráfico 2: Cubo - Média de dados para impacto



Fonte: O autor (2021)

Em seguida foi feita uma análise de variância que tem por objetivo analisar o impacto que as variáveis causam no resultado final, assim como a correlação entre ambos, o resultado dessa análise é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Resultado da análise de variância para impacto

<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor-P</b>
Modelo	3	0,000013	0,000004	3,23	0,082
Linear	2	0,000000	0,000000	0,10	0,902
Cura (s)	1	0,000000	0,000000	0,11	0,745
Pós-cura (min)	1	0,000000	0,000000	0,09	0,766
Interações de 2 fatores	1	0,000013	0,000013	9,47	0,015
Cura (s)*Pós-cura (min)	1	0,000013	0,000013	9,47	0,015
Erro	8	0,000011	0,000001		
Total	11	0,000024			

Fonte: O autor (2021)

Os resultados dispostos na Tabela 3 sugerem que para os parâmetros de cura e pós-cura isolados, os mesmos não interferem diretamente na propriedade de resistência mecânica, devido ao Valor-P de ambos serem superiores à 0.05, porém ao analisar a combinação desses parâmetros, a análise sugere que existe uma relação ligada a propriedade mecânica final da peça.

A análise de variância feita a partir dos resultados obtidos por meio do ensaio de impacto, mostram que o valor-P para os parâmetros de cura e pós-cura isolados não alteram a resistência ao impacto do corpo, porém quando analisamos o valor-P desses parâmetros combinados, a análise sugere que nessas condições existe uma relação que interfere no valor de resistência ao impacto.

Com base nos resultados obtidos por meio da análise de variância, foi gerado um gráfico de resíduo com o objetivo de analisar se existe uma boa repetibilidade nos dados gerados, como mostra o Gráfico 3.

Gráfico 3: Resíduo de valor de impacto



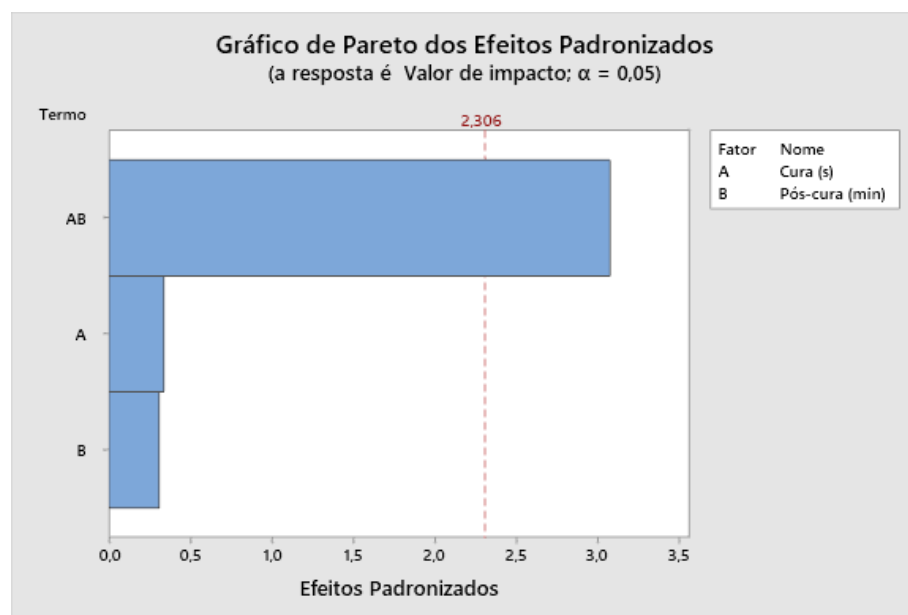
Fonte: O autor (2021)

O Gráfico de “probabilidade normal”, mostra que os resultados obtidos a partir do experimento seguem uma distribuição normal. O Gráfico “Versus Ajustados” mostra a variação residual dentro das 4 amostras, é possível observar que a menor variação residual se deu na amostra que seguem as sugestões do fabricante (12s - 10 min). O Histograma mostra a distribuição de frequência para os resultados obtidos e o Gráfico “Versus Ordem”, mostra que a variação residual é independente, ou seja, os resíduos seguem uma distribuição independente em ordem temporal e não apresentam nenhuma tendência, turno ou ciclo.

Após gerar o Gráfico de resíduos foi feito um Gráfico 4 (de Pareto) dos efeitos padronizados, com o objetivo de estudar a relação entre os parâmetros isolados e a

resistência ao impacto do corpo, assim como a combinação de ambos para o mesmo efeito.

Gráfico 4: Pareto dos efeitos padronizados para impacto

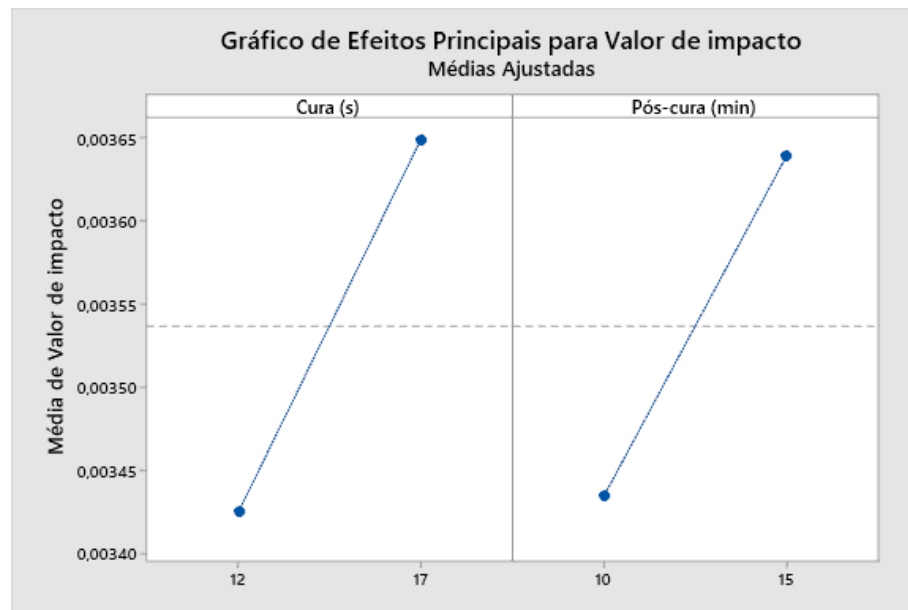


Fonte: O autor (2021)

O Gráfico 4, sugere que existe pouca relação de efeito entre os parâmetros de cura e pós-cura isolados com a resistência ao impacto, porém, quando combinados existe influência causada nessa característica mecânica.

Em seguida foi gerado um Gráfico 5 de efeito principal, e um Gráfico 6 de interação.

Gráfico 5: Efeito principal para o valor de impacto

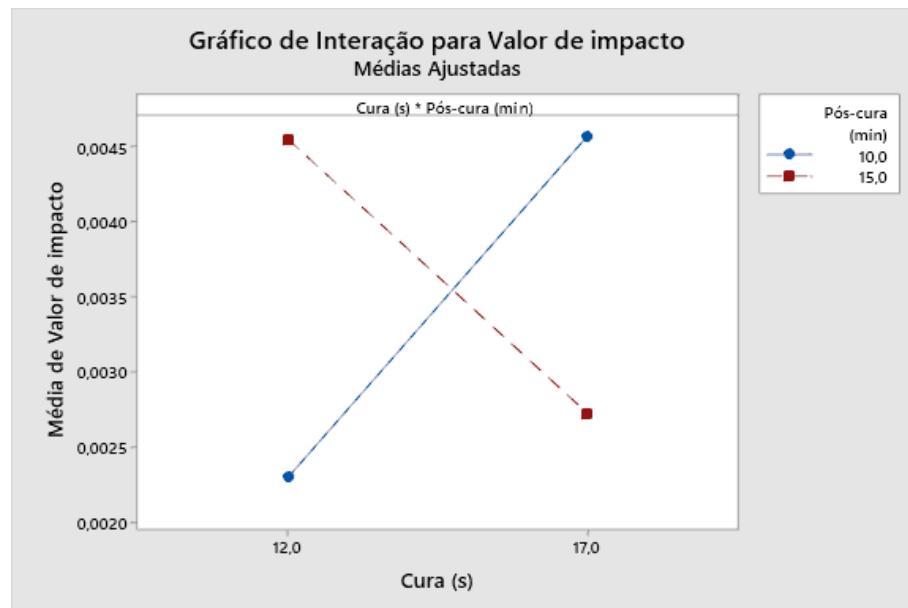


Fonte: O autor (2021)

No Gráfico 5, é possível analisar a diferença entre as médias para um determinado efeito isolado, de forma geral tanto para a cura quanto para pós-cura existe um aumento na resistência ao impacto quando se elevam os tempos.

O gráfico de efeitos principais para valor de impacto, mostra que existe um ganho na resistência ao impacto à medida que aumenta o tempo de exposição em ambos os casos.

Gráfico 6: Efeito combinado para o valor de impacto



Fonte: O autor (2021)

Já o Gráfico 6 mostra a interação entre os parâmetros de cura e pós cura, ao passo que quando não existe uma interação entre os parâmetros analisados menor é o ângulo entre as linhas, é possível observar que o gráfico sugere que existe uma interação entre os parâmetros de cura e pós-cura.

De forma geral, os resultados obtidos mostram que a variação isolada de um parâmetro não tem relação direta com a resistência ao impacto, porém a combinação entre os parâmetros interage significativamente com essa característica mecânica.

### 3.2 ENSAIO DE DUREZA

Com os valores obtidos pelo ensaio de dureza, foi gerada a Tabela 4, onde mostram a média obtida pelo ensaio de cada amostra, a média da amostra e desvio padrão.

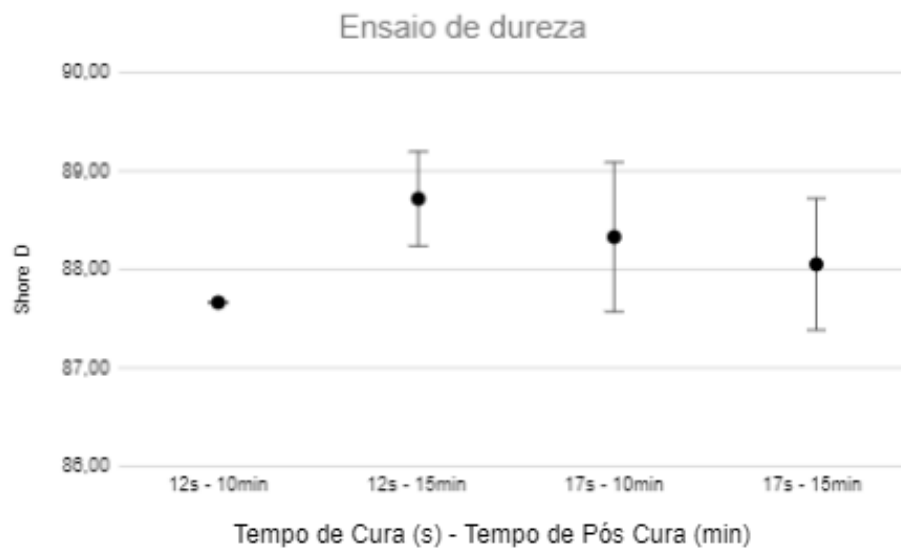
Tabela 4: Tabela com a tríade e média para dureza

Cura e Pós-cura	Corpo nº	Shore D			Média Tríade	Média Amostra (Shore D)	Desv. Padrão (Shore D)
		Medida 1	Medida 2	Medida 3			
<b>12s - 10min</b>	1	87,50	87,50	88,00	87,67	87,67	0,00
	2	88,00	87,00	88,00	87,67		
	3	88,00	87,50	87,50	87,67		
<b>12s - 15min</b>	1	89,00	89,00	89,00	89,00	88,72	0,48
	2	89,00	89,00	89,00	89,00		
	3	88,00	88,50	88,00	88,17		
<b>17s - 10min</b>	1	89,00	89,00	89,00	89,00	88,33	0,76
	2	89,00	88,50	88,00	88,50		
	3	88,00	87,50	87,00	87,50		
<b>17s - 15min</b>	1	88,00	88,00	88,50	88,17	88,06	0,67
	2	87,00	87,00	88,00	87,33		
	3	88,50	88,50	89,00	88,67		

Fonte: O autor (2021)

A partir da tabela gerada, foi construído um Gráfico 7 para visualizar melhor a faixa de valores e como ambos se comportaram dentro de cada amostra, assim como o desvio padrão obtido.

Gráfico 7: Dureza



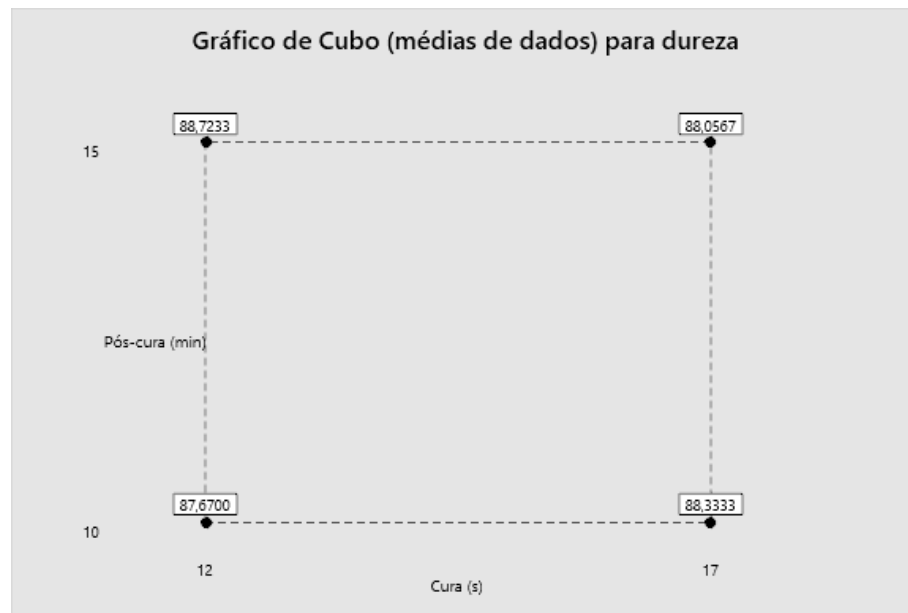
Fonte: O autor (2021)

O Gráfico 7 mostra que houve pouca variação entre as médias de dureza para as amostras, além disso as variações se deram dentro da mesma faixa de valores. Porém é necessário fazer a mesma análise estatística que foi feita para o ensaio de impacto.

Portanto foi utilizado o software Minitab para gerar o gráfico de cubo, para visualizar a média de dados de dureza da amostra, como mostra o Gráfico 8.



Gráfico 8: Cubo - Média de dados para dureza



Fonte: O autor (2021)

Em seguida foi feita a análise de variância para verificar se existe alguma relação entre os parâmetros de cura e pós-cura com a dureza final da peça. Os valores provenientes da análise de variância são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5: Análise de variância

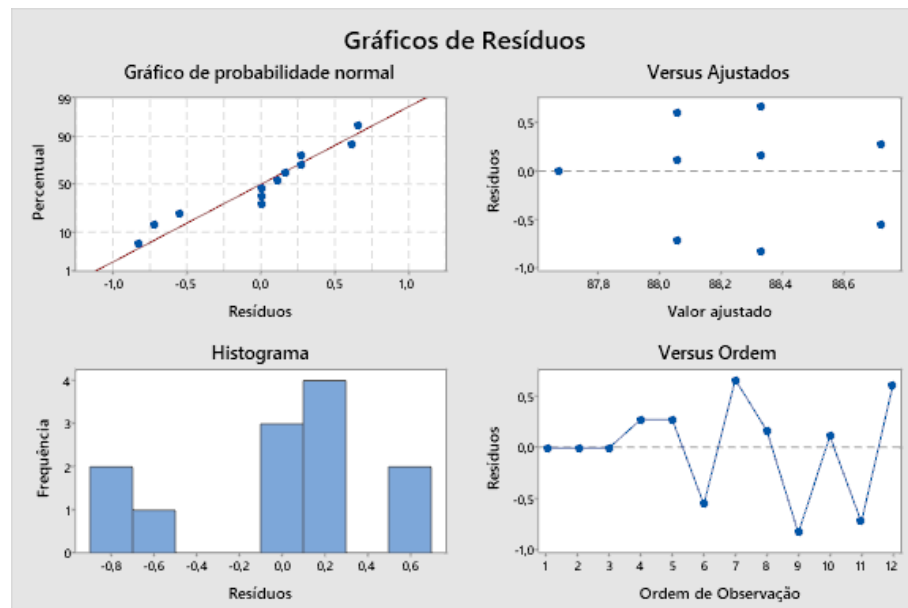
<b>Fonte</b>	<b>GL</b>	<b>SQ (Aj.)</b>	<b>QM (Aj.)</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor-P</b>
<b>Modelo</b>	3	1,77909	0,59303	1,87	0,214
<b>Linear</b>	2	0,45242	0,22621	0,71	0,519
<b>Cura (s)</b>	1	0,00001	0,00001	0	0,996
<b>Pós-cura (min)</b>	1	0,45241	0,45241	1,42	0,267
<b>Interações de 2 fatores</b>	1	1,32667	1,32667	4,17	0,075
<b>Cura (s)*Pós-cura (min)</b>	1	1,32667	1,32667	4,17	0,075
<b>Erro</b>	8	2,543	0,31788		
<b>Total</b>	11	4,32209			

Fonte: O autor (2021)

Ao analisar os valores obtidos, a ANOVA sugere pelo Valor-P que os parâmetros isolados de cura e pós cura não interferem diretamente na dureza da peça final, o mesmo acontece para a combinação desses parâmetros.

Em seguida foi construído o gráfico de resíduos quatro em um para a análise de dureza feita nas amostras, como ilustrado no Gráfico 10.

Gráfico 9: Resíduos para a média de dureza

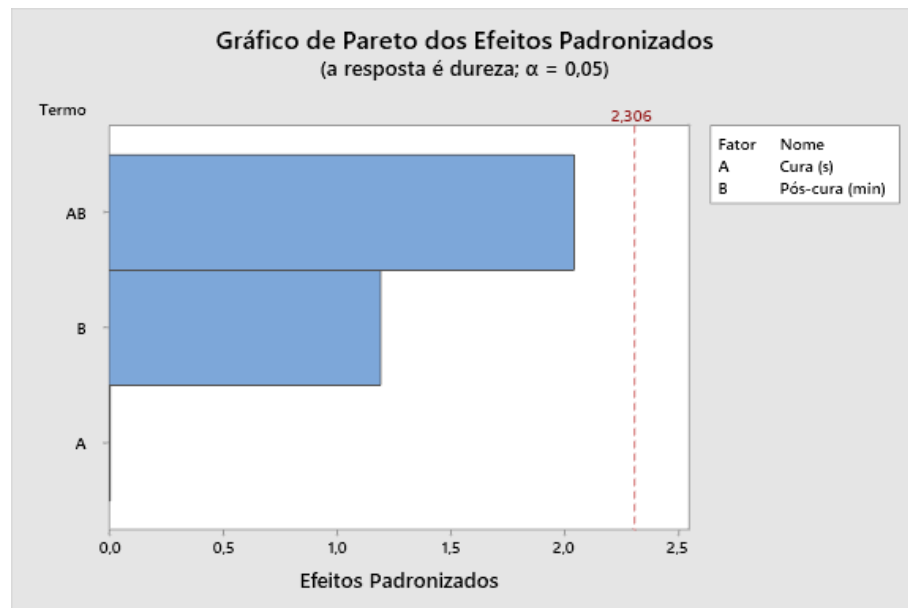


Fonte: O autor (2021)

O Gráfico de “probabilidade normal”, sugere que as amostras seguem uma distribuição normal, o histograma mostra que a maior frequência de variação de resíduos se deu entre a faixa 0,0 e 0,2. O Gráfico “Versus Ajustado” mostra a variação residual que mais uma vez trouxe a menor variação na amostra que obedeceu às orientações do fabricante. O Gráfico “Versus Ordem” mostra que a variação residual é independente.

Em seguida foi construído o Gráfico 10 para confirmar se existe alguma relação entre os parâmetros e a dureza da peça.

Gráfico 10: Pareto dos efeitos padronizados para dureza

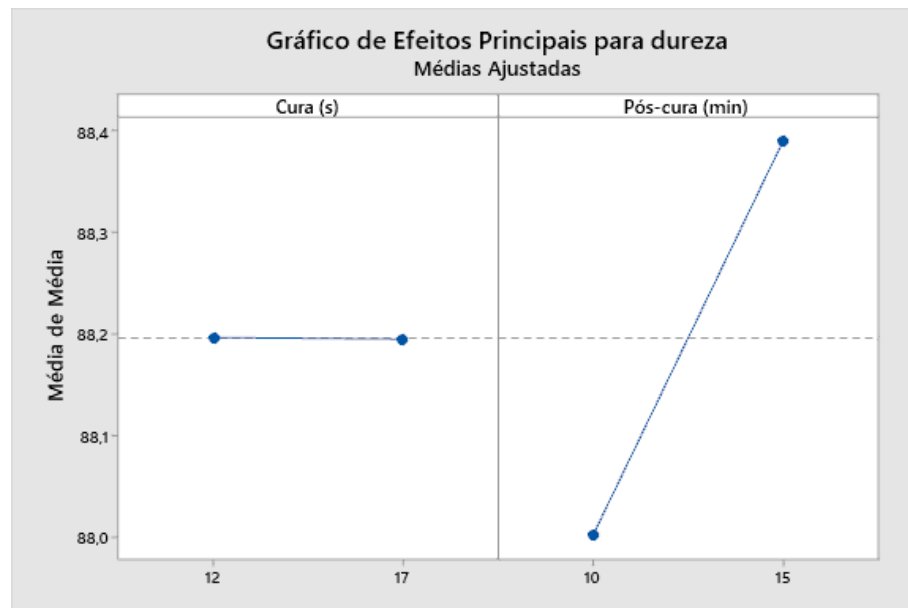


Fonte: O autor (2021)

O Gráfico 10, proveniente da análise fatorial, indica que nenhum dos fatores, nem quando combinados, foram suficientes para alterar significativamente a dureza das amostras.

Então foi feito o gráfico de efeitos principais para poder observar se existe alguma relação que os parâmetros de cura e pós-cura isolados tem com a dureza final da peça, o Gráfico 11 mostra os resultados dos efeitos principais.

Gráfico 11: Efeitos principais para dureza

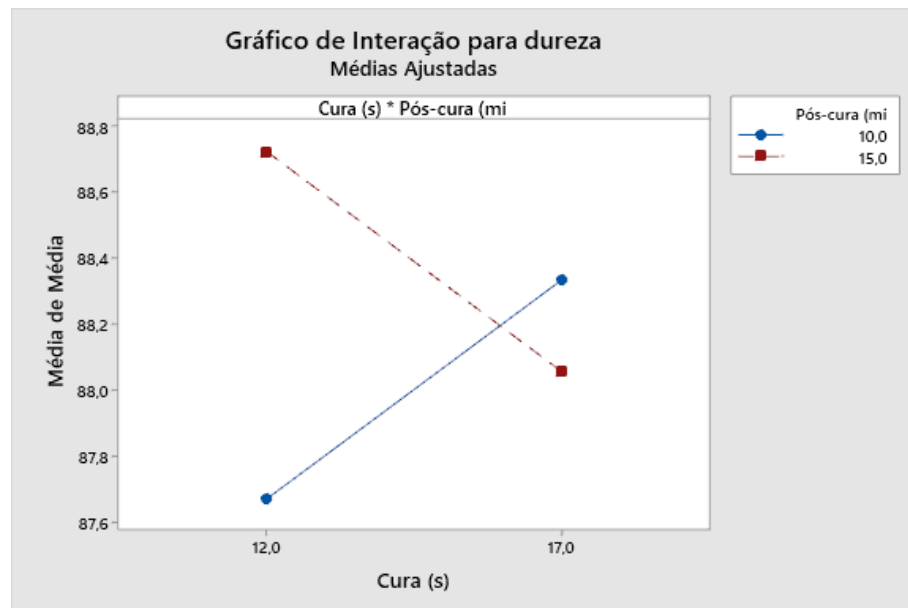


Fonte: O autor (2021)

O Gráfico 11 sugere que o parâmetro de cura, não interfere na dureza final da peça, porém é possível observar que o parâmetro de pós cura tem uma relação com essa característica mecânica.

Por fim foi construído o Gráfico 12, de interação entre os parâmetros para dureza, a fim de observar se existe alguma interação entre os parâmetros.

Gráfico 12: Interação para dureza



Fonte: O autor (2021)

Podemos observar que os resultados sugerem que existe uma interação entre os fatores, porém não é possível observar neste tipo de gráfico se esta relação é estatisticamente significativa.

Houve uma normalidade nos dados devido a repetibilidade apresentada entre as amostras, sendo assim é possível considerar que dentro da faixa de testes estabelecida no experimento o desvio padrão e a variação se comportaram dentro da normalidade e que a menor variação residual se deu na amostra com os parâmetros sugeridos pelo fabricante.

## 4 CONCLUSÃO

Com a realização deste trabalho, pode-se concluir que os tempos de cura e pós-cura quando combinados influenciam apenas a característica mecânica relacionada à resistência ao impacto de uma peça produzida pelo método DLP. E para a dureza final da peça, não exercem influência estatisticamente significativa, atingindo o objetivo do estudo.

Através da análise feita é possível concluir que quando se busca uma maior produtividade pode-se optar pela condição de cura de 17 segundos e 10 minutos no processo de pós-cura.

Já quando se deseja uma maior resistência ao impacto o melhor resultado é a condição de 12 segundos e 15 minutos. Quando o objetivo é uma maior estabilidade nas propriedades mecânicas de um determinado lote de peças produzidas, pode-se optar pela condição especificada pelo fabricante de 12 segundos de cura e 10 minutos no pós-cura.

Os resultados obtidos a partir da ANOVA feita para os parâmetros de dureza mostram que não existe uma relação entre os parâmetros estudados e essa propriedade mecânica, porém os valores obtidos da amostra que obedeceu a especificação do fabricante quanto às condições de cura e pós-cura, se apresentaram mais estáveis.

Uma sugestão para a continuação deste estudo, seria o ensaio de tração.

## REFERÊNCIAS

ALSANDI, Qutabaiba et al. Evaluation of Mechanical and Physical Properties of Light and Heat Polymerized UDMA for DLP 3D Printer. *Sensors*, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM 52900:2015**: Informação: Definição da manufatura aditiva.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D256:10**: Informação: Normas para ensaio de impacto.

BAGHERI, Ali; JIN, Jianyong. Photopolymerization in 3D Printing. *ACS Appl. Polym. Mater.* 2019, 1, 593–611

BORELLO, Joeph et al. 3D printing a mechanically-tunable acrylate resin on a commercial DLP-SLA printer. **Elsevier: Additive Manufacturing**, 2018.

Comparativo Entre Impressoras SLA e DLP. K2go, 3 de mai. de 2019. Disponível em:  
<<https://www.k2go.com.br/comunidade/impressao-3d/comparativo-entre-impressoras-sla-e-dlp>> Acesso em: 12 de jul. 2021.

Comparison: SLA VS DLP. KkRobotic, 25 de jun. de 2018. Disponível em:  
<<http://forum.kkrobotic.com/3d-printing-technology-comparison-sla-vs-dlp/compariso-n-sla-vs-dlp/>> Acesso em: 12 de jul. de 2021.

FIEDOR, Paweł; ORTYL, Joanna. A New Approach to Micromachining: High-Precision and Innovative Additive Manufacturing Solutions Based on Photopolymerization Technology. Cracóvia: Materials, 2020.

HEA, Rongxuan et al. Fabrication of complex-shaped zirconia ceramic parts via a DLP stereolithography-based 3D printing method. **Elsevier: Ceramics**, 2017.

**ISO 10993-1:2013**, 2013. Disponível em  
<<https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=258222>>

KUANG, Xiao et al. High-Speed 3D Printing of High-Performance Thermosetting Polymers via Two-Stage Curing. **Macromolecular Rapid Communications Journal**, <<https://doi.org/10.1002/marc.201700809>>. 2018.

MOZÓN, Mario et al. Anisotropy of Photopolymer Parts Made by Digital Light Processing. Gran Canaria : Materials, 2017.

NGOA, Tuan D. et al, Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. **Elsevier Journal: Composites Part B**, 2018.

Radiação Ultravioleta Gerada Pela Iluminação. Acquaticos, Agosto de 2010. Disponível em:  
<<http://acquaticos.blogspot.com/2010/08/radiacao-ultravioleta-gerada-pela.html>>



Seprianto, D. et al. The Effect of Rectangular Parallel Key Manufacturing Process Parameters Made with Stereolithography DLP 3D Printer Technology Against Impact Strength. **Journal of Physics: Conference Series**. <<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1500/1/012028>>. Conf. Ser. 1500 012028, 2020.

WU, Dong et al. Mechanics of shape distortion of DLP 3D printed structures during UV post-curing. **The Royal Society Of Chemistry Journal**, <<https://doi.org/10.1039/c9sm00725c>>. Soft Matter, 2019, 15, 6151.

FISCHER BECKERT, Sueli. Planejamento de experimentos, outubro de 2020. 39 p. Notas de Aula. Arquivo digital.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, por me dar todas as condições necessárias para concluir essa etapa em minha vida, também a toda a minha família, em especial a minha esposa Gabriele, minha mãe Jaqueline e meu irmão José, por sempre estarem ao meu lado me apoiando em todas as fases da minha vida. Ao meu professor e amigo Modesto Hurtado Ferrer que me estendeu a mão em todas as vezes que precisei da sua ajuda e conselhos durante a minha jornada na faculdade "...que sejamos sempre brutalmente sinceros!". Ao meu professor orientador Carlos Maurício Sacchelli pela disposição e paciência ao me orientar no desenvolvimento deste trabalho, à professora Sueli Fischer Beckert que se dispôs a me auxiliar na análise dos dados nesse estudo, aos professores responsáveis pelos laboratórios Gabriel Benedet Dutra e Wagner Maurício Pachekoski por permitirem o uso dos equipamentos, e aos alunos Mateus Zanzi e Gabriel Alexandre por me acompanharem durante o experimento.