

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Ciências de Saúde
Departamento de Odontologia



**Trabalho de Conclusão
de Curso**

**Análise tridimensional de diferentes
protocolos de pós-processamento em
tecnologias de impressão 3D**

André Luiz Gomes Kouzak

Brasília, 06 de junho de 2024

**Análise tridimensional de diferentes
protocolos de pós-processamento em
diferentes impressoras 3D**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Odontologia da Faculdade de Ciências
da Saúde da Universidade de Brasília,
como requisito parcial para a
conclusão do curso de Graduação em
Odontologia

Orientador: Prof. Dr. Leandro Augusto
Hilgert

Colaborador: Rafael Gomes Kouzak

Colaborador: Vitor Ramagem de
Oliveira

Brasília, 06 de junho de 2024

*Dedico meu TCC a todos que me ajudaram
nessa jornada. Aos meus pais, que sempre
me mostraram o valor da educação e da
família. Aos meus irmãos por sempre me
apoiarem e me fornecerem a melhor relação
fraternal que eu poderia ter. À minha
namorada que é meu porto seguro em
qualquer situação. Aos meus colegas que
tornaram a faculdade muito mais fácil e
leve. Ao meu professor orientador Prof. Dr.
Leandro Augusto Hilgert que foi
fundamental em todo esse processo de
crescimento acadêmico.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai e a minha mãe, que de origem humilde sempre me mostraram o valor da educação e trabalho duro. Vocês são e sempre foram exemplo de como nutrir uma família. Sou abençoado por ter a minha família. Obrigado por todo o apoio, amor e carinho, nada disso seria possível sem vocês.

Ao meu irmão, meu companheiro de risadas, crossfit e futuro parceiro de profissão, fico feliz de poder estar ainda mais próximo de você.

À minha irmã Ana Paula, você esteve presente desde o primeiro dia, sinto falta de nossas caronas para a UnB, mesmo do outro lado do oceano tenho saudades todos os dias.

À minha melhor amiga e companheira de vida Amanda, nossa relação me traz propósito e forças para trilhar todos os dias como se fossem os melhores dias de minha vida.

Ao Bubi, mesmo com suas fungadas e um jeito ranzinza você deixa minha vida muito mais feliz.

À UnB, que mesmo com todos seus defeitos, me deu a melhor educação que eu poderia pedir e principalmente a autonomia necessária para seguir essa jornada fora da faculdade.

Aos meus colegas da UnB, em especial ao meu grupo de fofoca, Vitória, Júlia, Andressa, Ana Beatriz e Mariana, vocês tornaram essa jornada inesquecível.

Aos coautores desse trabalho Vitor Ramagem Oliveira e Rafael Gomes Kouzak que foram fundamentais no desenvolvimento do meu PiBiC e TCC, contem comigo no resto da vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Leandro Augusto Hilgert, que me mostrou sempre a seriedade de um trabalho científico e também compartilhou o entusiasmo pelas novas tecnologias.

Esse trabalho foi fruto de 5 anos em uma universidade pública, espero um dia poder retornar esse privilégio na forma de ciência e trabalho para o Brasil.

*“É preciso imaginar Sísifo
feliz.”*

Albert Camus

RESUMO

Introdução: A impressão 3D é uma tecnologia em grande crescimento dentro da odontologia, entretanto estudos comparativos sobre métodos de lavagem e pós-polimerização são escassos. **Objetivo:** O objetivo desse trabalho é investigar se diferentes abordagens de pós-processamento e tecnologias de impressão causam alterações dimensionais nos modelos impressos. **Métodos:** Um manequim odontológico com 5 pontos de marcação foi escaneado para obtenção de um arquivo STL mestre, a partir desse STL 36 modelos foram impressos por duas impressoras de tecnologias de impressão diferentes, LCD e DLP. Esses modelos foram divididos em dois grandes grupos de impressão e subdivididos em 3 grupos de pós-processamento, em que cada grupo passou por um protocolo de pós-processamento diferente, sendo eles lavagem manual e pós-polimerização em câmara não própria para odontologia, lavagem em cuba ultrassônica seguida de pós-processamento em câmara própria para odontologia e o último grupo com lavagem e pós-polimerização em câmaras próprias para odontologia do mesmo fabricante. Esses modelos foram escaneados novamente e sua análise dimensional foi feita utilizando os seguintes pontos de referência: distância intermolar; distância intercaninos e comprimento do arco dental. Os arquivos STL foram analisados em um software de métrica 3D. O teste para verificar a normalidade das amostras foi o Kolmogorov-Smirnov, para analisar os grupos foi utilizado um ANOVA *two-way* e para analisar os métodos de pós-processamento para cada tecnologia de impressão e um ANOVA *one-way* para analisar cada grupo de pós-processamento de forma isolada em comparação com os outros. **Resultados:** Em relação a análise de tecnologias de impressão, a impressora com tecnologia DLP apresentou uma diferença estatística significativa em apenas um parâmetro, distância intercaninos. Já em relação aos métodos de pós-processamento, a lavagem e pós-polimerização em câmara própria para odontologia do mesmo fabricante apresentou resultados com diferença estatística relevante, sendo superior aos outros dois métodos, em relação a distância intermolar e distância intercanino. **Conclusão:** Em relação as tecnologias de impressão, foi verificado que existe uma ligeira superioridade a tecnologia DLP, entretanto devido a limitações metodológicas do desenho de estudo escolhido é difícil afirmar categoricamente que a tecnologia DLP apresente um desempenho melhor que a tecnologia LCD. Já em relação ao pós-processamento, a lavagem e pós-polimerização em câmaras próprias para odontologia do mesmo fabricante parecem mostrar que o processo de pós-processamento integrado e padronizado pelo mesmo fabricante sem interferências humanas podem resultar em modelos mais acurados. Mais estudos são necessários para entender a relação entre a impressão 3D e a etapa de pós-processamento.

Palavras-chave: Impressão Tridimensional; Lavagem; Polimerização

ABSTRACT

Introduction: 3D printing is a rapidly growing technology in dentistry; however, comparative studies on washing and post-curing methods are scarce. **Objective:** This study aims to investigate whether different post-processing approaches and printing technologies cause dimensional changes in printed models. **Methods:** A dental manikin with 5 marked points was scanned to obtain a master STL file. From this STL file, 36 models were printed using two different printing technologies, LCD and DLP. These models were divided into two main printing groups and further subdivided into 3 post-processing groups: manual washing and post-curing in a chamber not specific to dentistry, washing in an ultrasonic bath followed by post-processing in a dentistry-specific chamber, and the last group with washing and post-curing in dentistry-specific chambers from the same manufacturer. These models were scanned again, and dimensional analysis was conducted using the following reference points: intermolar distance, intercanine distance, and dental arch length. STL files were analyzed using 3D metric software. Normality of samples was tested using Kolmogorov-Smirnov, two-way ANOVA was used to analyze groups, and one-way ANOVA was used to analyze post-processing methods for each printing technology and each post-processing group compared to the others. **Results:** Regarding the analysis of printing technologies, the DLP printer showed a statistically significant difference in only one parameter, intercanine distance. Regarding post-processing methods, washing and post-curing in dentistry-specific chambers from the same manufacturer yielded statistically significant results, being superior to the other two methods in terms of intermolar and intercanine distances. **Conclusion:** Concerning printing technologies, a slight superiority of DLP technology was observed; however, due to methodological limitations of the chosen study design, it is difficult to categorically assert that DLP technology performs better than LCD technology. Regarding post-processing, washing and post-curing in dentistry-specific chambers from the same manufacturer appear to demonstrate that an integrated and standardized post-processing process by the manufacturer without human interference may result in more accurate models. More studies are needed to infer the relationship between 3D printing and post-curing processes.

Keywords: Three-Dimensional Printing; Washing; Polymerization

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	METODOLOGIA.....	12
2.1	ESCANEAMENTO INICIAL E CONFECÇÃO DO MODELO.....	12
2.2	IMPRESSÃO DOS MODELOS	14
2.3	PÓS-PROCESSAMENTO DOS MODELOS.....	14
2.4	AVALIAÇÃO DA DISTORÇÃO	15
2.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	15
3	RESULTADOS.....	16
4	DISCUSSÃO	21
5	CONCLUSÃO	25
5.1	AGRADECIMENTOS.....	25
5.2	CONFLITO DE INTERESSE	25
5.3	FINANCIAMENTO	25
	REFERÊNCIAS	26

1. INTRODUÇÃO

A odontologia digital é uma área que está crescendo nos últimos anos, sendo responsável por trazer uma maior previsibilidade, acurácia e economia de tempo laboral do dentista. Os sistemas CAD (*Computer-Aided Design*) CAM (*Computer-Aided Manufacture*) são responsáveis pela digitalização do fluxo de trabalho utilizando ferramentas virtuais para objetivar um melhor desempenho em alguns procedimentos odontológicos[1]

Nesse contexto, as técnicas aditivas, como a impressão 3D, também chamada de prototipagem rápida, vêm ganhando uma maior visibilidade dentro do cenário digital, devido a sua capacidade de construir objetos de geometria complexa e personalizada e o reduzido gasto de materiais em comparação com as técnicas subtrativas, como o processo de fresagem[2,3]. As aplicações da impressão 3D na odontologia podem ser vistas em diversas áreas, como em enceramentos digitais, confecção de guias cirúrgicos, produção de alinhadores ortodônticos e de modelos para planejamento clínico, além de outras possibilidades[4–6].

A impressão 3D aplicada a odontologia possibilita a fabricação de um modelo virtual através da aposição de camadas para formar um objeto tridimensional[4]. Essa tecnologia está em processo de popularização devido à queda das primeiras patentes e surgimento de novas tecnologias que aumentaram a disponibilidade e acessibilidade de impressoras 3D, resultando em um grande espectro de preço para diferentes equipamentos[7]

Impressoras do tipo LCD (*Liquid Crystal Display*) e DLP (*Digital Light Processing*) estão entre as tecnologias mais utilizadas de impressão dentro da odontologia. Elas utilizam uma fonte de luz que fotopolimeriza a resina líquida depositada em um tanque de impressão[7,8]. As impressoras LCD utilizam um display de cristal líquido como fonte de luz para formar imagens a cada camada, enquanto a impressora DLP utiliza um projetor de luz para a formação dessa imagem e fotopolimerização das camadas[9]. Assim, é importante observar que ainda há uma grande diferença de preço para representantes desses dois modelos de impressoras e, principalmente, estudos comparativos sobre a acurácia dimensional entre essas duas categorias são escassos[7].

A impressão 3D de um objeto requer uma etapa de pós-processamento a fim de que ele alcance as especificações estruturais, mecânicas e de biocompatibilidade

desejadas para seu uso[10–12]. A etapa de pós-processamento consiste na lavagem do objeto recém-impresso para retirar o excesso de resina ainda em estado líquido, secagem e polimerização do objeto com luz de comprimento de onda adequado para a resina fotopolimerizável escolhida[10]. Esse processo é dependente de variáveis como tempo de lavagem, temperatura do líquido de lavagem, tempo de exposição a luz, comprimento da luz e alterações nesses parâmetros levam a distorções[11–17]. Os estudos a respeito de alterações dimensionais em processos de pós-polimerização com diferentes parâmetros são escassos ou não contém todas as informações importantes para uma análise criteriosa[13,18].

O objetivo desse trabalho foi analisar a distorção tridimensional de modelos impressos usando um software de métrica 3D a fim de avaliar diferentes formas de pós-processamento entre duas impressoras diferentes, sendo uma do tipo LCD e outra DLP. A hipótese nula corresponde ao fato de não haver diferenças significantes entre os grupos de tecnologia de impressão e de pós-processamentos diferentes.

2. METODOLOGIA

Um manequim superior, com marcações de pontos de referência, foi escaneado inicialmente por um escâner de bancada e o arquivo resultante na extensão STL (Standard Triangle Language) exportado para um software CAD para a confecção de um modelo digital de referência. O modelo foi exportado para os softwares de fatiamento específicos de cada impressora e posteriormente impressos com a mesma resina nos dois modelos de impressora. Após a prototipagem, os modelos foram escaneados e exportados em STL (Standard Triangle Language) para um programa CAD de análise. A avaliação foi realizada através da comparação das medições dos pontos de referência dos modelos impressos com as medidas do modelo digital de referência como mostrado na figura 1.

2.1. ESCANEAMENTO INICIAL E CONFECÇÃO DO MODELO

Em um manequim odontológico de arcada superior completo (MOM Dentística Estético código 1944), foram feitos pontos de referência nos dentes 16, 13, 21, 23 e 26. O manequim foi então escaneado pelo escâner de bancada Open Technologies – Mod. Optical Reveng Dental – Optical 3D Scanner®, e o arquivo resultante exportado em STL para um software CAD. No programa de edição de malhas Meshmixer®, o arquivo inicial foi transformado em modelo com a adição de uma base e a configuração de espessura uniforme de 3mm. Esse arquivo foi armazenado como modelo de referência, e exportado como arquivo STL para os softwares de fatiamento das respectivas impressoras.

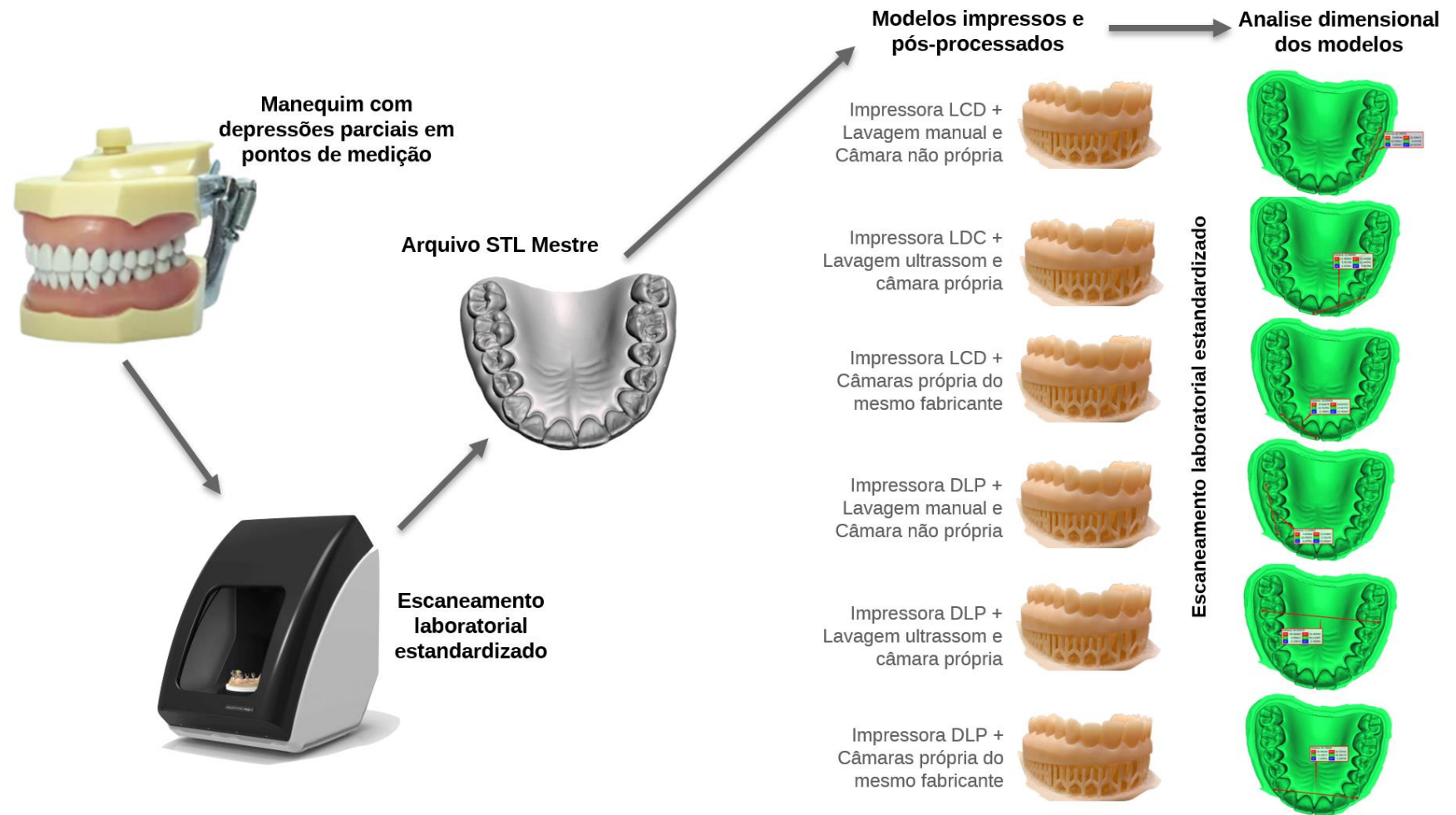


Figura 1 - Fluxograma mostrando a metodologia de impressão, pós-processamento e análise tridimensional das amostras.

2.2. IMPRESSÃO DOS MODELOS

Os modelos foram exportados em formato STL para os softwares de fatiamento das impressoras LCD AnyCubic MonoX® e DLP FlashForge Hunter®, para o seu posicionamento na plataforma de impressão, adição de suportes e definição dos parâmetros de impressão. Os modelos foram impressos paralelos à plataforma de impressão, com altura das camadas em 0,05mm. A resina utilizada foi a Yllor Cosmos Dental Model DLP®, seguindo os parâmetros de impressão da fabricante para cada impressora.

2.3. PÓS-PROCESSAMENTO DOS MODELOS

Os modelos impressos por cada impressora foram divididos em 3 grupos de 6 modelos pelos quais passaram por três protocolos de pós-processamento diferentes (n=36). No primeiro grupo, o protocolo de pós-processamento seguiu da seguinte forma: lavagem manual dos modelos com álcool isopropílico 95%, em dois recipientes separados, com uso de pincel por 4 minutos em cada recipiente, seguido da secagem total do modelo ao ar livre por 10 minutos e polimerização dos modelos em câmara de cura não-própria para odontologia, com potência de 48W comprimento de onda dual de 365 e 405nm por 30 minutos. No segundo grupo, o protocolo de pós-processamento consistiu em lavagem do modelo com álcool isopropílico 95% em dois recipientes separados com lavagem em banho de imersão ultrassônico (Ultrasonic Cleaner – GB0610®) por 4 minutos em cada recipiente, seguido de secagem do modelo ao ar livre por 10 minutos e polimerização em câmara de cura própria para odontologia (CUREbox®) com potência de luz de 36W e comprimento de onda dual de 365 e 405nm por 30 minutos. No terceiro grupo, o processo de pós-processamento consistiu em lavagem e polimerização em câmara de lavagem e cura (Wash & Cure 1.0®) com potência de 40W e comprimento de onda dual de 365 e 405nm com a lavagem por 8 minutos e secagem do modelo ao ar livre por 10 minutos seguida de pós-polimerização por 30 minutos

2.4. AVALIAÇÃO DA DISTORÇÃO

Os modelos após o pós-processamento foram escaneados com o mesmo escâner de bancada inicial e o arquivo foi exportado para um software CAD de análise de malhas (CloudCompare v2.12®). Para realizar a avaliação de distorção entre os modelos, medidas foram feitas entre os pontos de referência para comparar a distância intermolar, distância intercaninos e comprimento do arco dental com os valores do modelo de referência digital e suas respectivas médias entre os 6 grupos de pós-processamento diferentes. Também foi incluído um grupo adicional em que as mesmas mensurações foram feitas a partir do STL mestre, com intuito de comparações estatísticas.

2.5. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para se testar a normalidade das amostras foi feito o teste de Kolmogorov-Smirnov no qual verificou de tratar-se de uma amostra normal. Os testes paramétricos foram repetidos em cada caso, primeiramente com os dados referentes a distância de cada grupamento e depois com os dados referentes a distorção de cada grupamento, essa foi uma escolha feita para termos noção da distorção em relação a parâmetros clinicamente aceitáveis.

A análise estatística ficou dividida em três partes. Primeiramente para verificar se existe alguma diferença estatística entre impressoras, foi feito um teste ANOVA two-way, esse teste foi feito comparando todos os modelos impressos por cada impressora (n=18) com as mensurações feitas no modelo mestre (n=6).

Para analisar as distorções presentes entre os métodos de pós-processamento utilizados, foi feito um teste ANOVA de two-way, no qual os grupos em análise eram os próprios grupos de pós-processamento das duas impressoras (n=12) que eram comparados com as mensurações feitas no modelo mestre (n=6).

Por fim, para analisar as diferentes combinações criadas entre impressoras e métodos de pós-processamento foi feito um teste ANOVA one-way com cada uma dessa combinação (n=6) e as mensurações feitas no modelo mestre (n=6).

3. RESULTADOS

Os resultados encontrados em relação a análise de impressoras (tabela 1) mostraram que em relação aos parâmetros de comprimento do arco, distância intermolar, distorção do arco e distorção intermolar as impressoras com tecnologia de impressão distintas não apresentaram diferenças estatísticas entre si, apenas entre os grupos e o modelo mestre. Em relação aos parâmetros de distância e distorção intercaninos observou-se uma diferença estatística entre a impressora AnyCubic 3D Photon MonoX e a impressora FlashForge Hunter, na qual a impressora FlashForge Hunter apresentou um menor grau de distorção quando comparada com a impressora AnyCubic ($p < 0,05$).

Em relação aos métodos de pós-processamento, os resultados encontrados (tabela 2) evidenciaram que existe diferença estatística ($p < 0,05$) em relação a distâncias e distorções intermolares e intercaninos entre as metodologias de pós processamento. O grupo da Wash and Cure 2.0 apresentou a menor distorção entre os outros dois grupos quando comparado com o modelo mestre no que diz respeito aos parâmetros supracitados. O grupo da Lavagem Manual + Luz não Própria para Odontologia obteve um resultado intermediário e o Grupo da Lavagem no Ultrassom + CUREbox apresentou o pior resultado, apresentando maior distorção entre os três grupos.

Quando foi feita a análise entre as diferentes combinações encontradas dentro desse modelo de estudo, compostas por impressora + método de pós-processamento, chegamos aos resultados evidenciados nas tabelas 3 e 4. No que se refere ao comprimento e distorção de arco existe uma diferença estatística ($p < 0,05$) em que os grupos da Lavagem Manual + Luz não própria da impressora AnyCubic Photon MonoX (LMMX), Wash and Cure 2.0 da impressora AnyCubic Photon MonoX (WCAM), Lavagem Manual + Luz não Própria da impressora FlashForge Hunter (LMFF) e Lavagem no Ultrassom + CUREbox da impressora FlashForge Hunter (LUFF) apresentaram menor distorção quando comparados com os grupos Lavagem Ultrassom + CUREbox da impressora AnyCubic Photon MonoX (LUMX) e Wash and Cure 2.0 da impressora FlashForge Hunter (WCFF).

Em relação a distância e distorção intermolar existe uma diferença estatística que mostra uma sequência da menor até a maior distorção em que o grupo WCFF

apresenta menor grau de distorção seguido pelo WCMX que são seguidos pelos grupos LMMX, LMFF e LUFF que se encaixam no mesmo grau de distorção seguidos pela maior distorção nesse parâmetro correspondente ao grupo da LUMX.

Para analisar a distância e distorção intercaninos se chega a uma diferença estatística em que o grupo WCFF apresenta menor distorção e o grupo LUMX apresenta a maior distorção de todos, os outros grupos apresentam resultados intermediários, mas diferentes entre si estatisticamente na seguinte ordem LMFF, WCMX, LMMX e LUFF.

Tabela 1 - Avaliação de medidas e distorções por tecnologia de impressão.

Impressora (n = 18 por impressora)	Comprimento do arco	Distância Intermolar	Distância intercanino	Distorção de Arco	Distorção intermolar	Distorção Intercanino
Anycubic Photon MonoX	85,902±0,119 b	50,471±0,073 b	36,578±0,049 c	0,193±0,118 b	0,167±0,073 b	0,207±0,049 c
Flashforge Hunter	85,914±0,083 b	50,498±0,085 b	36,635±0,067 b	0,180±0,083 b	0,140±0,085 b	0,150±0,067 b
Modelo mestre	86,094±0,097 a	50,638±0,021 a	36,785±0,020 a	0,000±0,097 a	0,000±0,021 a	0,000±0,020 a

Letras minúsculas distintas representam diferença estatística entre impressoras e modelo mestre para uma mesma medida (dentro da coluna).

Tabela 2 – Avaliação de medidas e distorções por método de pós-processamento utilizado.

Pós-processamento (n = 12 por método de pós-processamento)	Comprimento do arco	Distância Intermolar	Distância intercanino	Distorção de Arco	Distorção intermolar	Distorção Intercanino
Lavagem manual + Luz não própria para odontologia	85,933±0,130 b	50,487±0,075 bc	36,616±0,046 bc	-0,162±0,129 b	-0,152±0,075 bc	-0,152±0,075 bc
Lavagem ultrassom + CureBox	85,905±0,101 b	50,428±0,064 c	36,565±0,041 c	-0,190±0,101 b	-0,210±0,064 c	-0,219±0,04 c
Wash and Cure 2.0	85,887±0,066 b	50,540±0,060 b	36,637±0,081 b	-0,208±0,066 b	-0,098±0,060 b	-0,148±0,082 b
Modelo mestre	86,094±0,097 a	50,638±0,021 a	36,785±0,020 a	0,000±0,097 a	0,000±0,02 a	0,000±0,020 a

Letras minúsculas distintas representam diferença estatística entre métodos de pós-processamento e modelo mestre para uma mesma medida (dentro da coluna).

Tabela 3 – Avaliação de medidas de acordo com impressora e método de pós-processamento utilizado

Impressora	Pós-processamento	Comprimento do arco	Distância Intermolar	Distância Intercanino
(n = 6 por combinação impressora + método de pós-processamento / n = 6 medidas do modelo mestre)				
Anycubic Photon MonoX	Lavagem Manual + Câmara não-própria para odontologia	85,923±0,167 ab	50,493±0,063 bc	36,584±0,019 cd
	Lavagem Ultrassom + CUREbox	85,862±0,111 b	50,403±0,066 c	36,550±0,033 d
	Wash and Cure 2.0	85,919±0,072 ab	50,516±0,038 b	36,599±0,073 bcd
Flashforge Hunter	Lavagem Manual + Câmara não-própria para odontologia	85,942±0,095 ab	50,480±0,091 bc	36,648±0,043 bc
	Lavagem Ultrassom + CUREbox	85,846±0,077 ab	50,452±0,055 bc	36,580±0,045 cd
	Wash and Cure 2.0	85,854±0,044 b	50,563±0,074 ab	36,675±0,076 b
Modelo mestre		86,094±0,097 a	50,638±0,021 a	36,785±0,020 a

Letras minúsculas distintas representam diferença estatística entre métodos de pós-processamento por impressora e modelo mestre para uma mesma medida (dentro da coluna).

Tabela 4 – Avaliação das distorções de acordo com impressora e método de pós-processamento utilizado.

Impressora	Pós-processamento	Distorção do arco	Distorção Intermolar	Distorção Intercanino
(n = 6 por combinação impressora + método de pós-processamento / n = 6 medidas do modelo mestre)				
Anycubic Photon MonoX	Lavagem Manual + Câmara não-própria para odontologia	-0,171±0,166 ab	-0,145±0,063 bc	-0,0234±0,033 cd
	Lavagem Ultrassom + CUREbox	-0,231±0,110 b	-0,235±0,066 c	-0,201±0,019 d
	Wash and Cure 2.0	-0,175±0,071 ab	-0,121±0,03 b	-0,186±0,073 bcd
Flashforge Hunter	Lavagem Manual + Câmara não-própria para odontologia	-0,152±0,094 ab	-0,158±0,091 bc	-0,136±0,043 bc
	Lavagem Ultrassom + CUREbox	-0,148±0,077 ab	-0,186±0,055 bc	-0,204±0,045 cd
	Wash and Cure 2.0	-0,240±0,044 b	-0,075±0,074 ab	-0,109±0,076 b
Modelo mestre		0,000±0,097 a	0,000±0,021 a	0,000±0,020 a

Letras minúsculas distintas representam diferença estatística entre métodos de pós-processamento por impressora e modelo mestre para uma mesma medida (dentro da coluna).

4. DISCUSSÃO

A hipótese nula do estudo foi negada, visto que houve diferença estatística relevante entre os grupos de pós-processamento e de tecnologias de impressão em alguns parâmetros analisados.

O objetivo desse estudo foi fazer uma análise dimensional de modelos impressos com diferentes métodos de pós processamento impressos por diferentes tecnologias de impressão. O pós-processamento, que consiste na lavagem do modelo e na pós-polimerização, é uma etapa fundamental para a conversão final dos monômeros residuais em polímeros, reduzindo a citotoxicidade do objetos impressos, e é uma das variáveis que determinam a acurácia de uma tecnologia de impressão[7,12,14–17,19,20]. Entretanto, não existem estudos que comparem, na totalidade, diferentes métodos usados para pós-processamento e a sua influência na acurácia dimensional de impressão com as tecnologias LCD e DLP.

O universo de impressoras dentro da impressão 3D é muito amplo[7,8]. Entre as tecnologias presentes dentro da indústria da impressão 3D, uma das mais acessíveis dentro da categoria de impressoras que usam resina fotopolimerizável é a tecnologia que utiliza o display de LCD para a polimerização de camadas. Esse foi um ponto muito importante na escolha de impressoras para esse trabalho, visto que a gama de preços é extremamente variável e faltam estudos comparando a acurácia dimensional entre essas duas tecnologias de impressão. As impressoras de filamento também apresentam um custo-benefício acessível, contudo não foram incluídas no seguinte estudo devido ao fato de apresentarem características superficiais pobres em relação as impressoras LCD e DLP[7]. A mesma resina foi utilizada para todos os grupos com os parâmetros recomendados pelo fabricante para evitar maiores variações nos testes.

A direção de impressão é um tópico extremamente importante durante o processo de fatiamento digital de um modelo 3D, em STL, para um modelo apto a ser impresso por uma impressora. As direções de impressão mais comuns são organizadas em 3 orientações podendo ser paralela, perpendicular ou inclinada (angulação intermediária entre 0 e 90 graus) em relação ao eixo de impressão. O trabalho utilizou a orientação dos modelos na perpendicular em relação ao eixo de impressão da impressora devido às atuais evidências mostrarem que não existe uma diferença estatística entre diferentes direções de impressões para alterações

dimensionais em modelos odontológicos [21].

Acurácia é uma medida que engloba a precisão, que é a capacidade de se chegar próximo a um ponto desejado, e a repetibilidade, conseguir manter uma consistência dentro dessa medida[22]. Quando o tópico trata a respeito de impressoras 3D, a acurácia é um ponto fundamental de análise, pois ela consegue demonstrar que a impressora apresenta propriedades de impressão que são precisas e ao mesmo tempo repetíveis a cada impressão. Esse estudo ao analisar características dimensionais de modelos impressos consegue verificar como diferentes métodos de pós-processamento afetam a acurácia de cada tecnologia de impressão.

Analisando apenas os resultados por diferentes tecnologias de impressão, é importante evidenciar que foram obtidas diferenças estatísticas relevantes em apenas um dos três parâmetros analisados (distância e distorção intercanino). Assim, ambas as tecnologias de impressão apresentaram boa capacidade de impressão de pequenos detalhes com boa reprodutibilidade entre os grupos, configurando boa acurácia. Esse resultado é muito positivo para impressoras de tecnologia LCD por serem mais acessíveis que impressoras de tecnologia DLP.

A seleção do líquido para a lavagem dos materiais impressos é um tema de estudo abordado por alguns autores[14,16,17]. Apesar de alguns autores trazerem o TPM (*tripropylene glycol monomethyl ether*) como a solução que apresenta os melhores resultados em relação ao álcool isopropílico[17], esses achados ainda não são consenso dentro da área, visto que aumentar o tempo de exposição UV durante a pós-polimerização pode ajudar a trazer resultados similares[14]. Assim, a escolha nesse estudo de trazer o álcool isopropílico como líquido para a lavagem das amostras foi de trazer um líquido que é amplamente utilizado durante o pós-processamento pelos cirurgiões dentistas.

O correto tempo de exposição dos modelos impressos à luz UV durante a etapa de pós-processamento é fundamental para que exista uma correta finalização da polimerização dos monômeros residuais e ao mesmo tempo não pode ser um tempo excessivo para que o modelo não possa se tornar citotóxico. O tempo de exposição escolhido de 30 minutos foi a opção que pareceu ter o melhor desempenho na conversão de monômeros residuais em polímeros sem que exista um aumento na citotoxicidade do material[11].

Quando se analisam os resultados referentes aos métodos de pós-processamento observa-se que os grupos que passaram por lavagem no Ultrassom e

pós-polimerização na CUREbox apresentaram maior grau de distorção nos parâmetros de mensuração e distorção intermolar e intercanina. Para tentar explicar esse dado é importante analisar a potência intrínseca de cada equipamento de pós-polimerização. Assim, a potência de luz da CUREbox é a menor potência em relação com a potência de luz dos outros métodos de pós-polimerização, com 36W em comparação com os 48W da Câmara não-própria para odontologia e os 40W da Wash and Cure, entretanto pressupor que a potência de luz seria inadequada para a melhor pós-polimerização não entra em consenso com as recomendações do fabricante da resina, em que 72W de luz durante 10 minutos seriam o ideal para uma pós-polimerização decente, nesse caso 36W por 30 minutos se encaixariam perfeitamente[23]. Outro ponto a ser observado que pode ajudar com a explicação dos resultados é a direção das fontes de luz nas câmaras de polimerização: no caso da CUREbox, os LEDs ficam no teto da câmara e a luz é refletida através de espelhos nas paredes e no assoalho da câmara; na câmara não própria, a luz se encontra nas laterais, e somente o assoalho é espelhado; já na Wash and Cure, os LEDs encontram-se apenas em uma posição, sendo a plataforma giratória a responsável por distribuir a luz no objeto. Também se notou um aquecimento maior do objeto após a polimerização na CUREbox que pode também ter impactado o processo de pós-polimerização.

Dessa forma, analisando os resultados entre as tecnologias de impressão é importante salientar que existem diferenças estatísticas significantes entre elas em apenas um parâmetro de mensuração, assim, ambas as tecnologias apresentam uma boa acurácia com distorções dentro dos níveis de aceitabilidade clínica. Esse resultado é extremamente positivo para a tecnologia LCD por ser uma tecnologia muito mais acessível que a tecnologia DLP. Já em relação aos métodos de pós-processamento, verificamos que o grupo que utilizou a Wash and Cure como método de lavagem e pós-polimerização apresentou resultados estatisticamente melhores em relação aos outros grupos. Contudo, quando analisamos as várias combinações geradas a partir desse modelo de estudo, não conseguimos chegar a uma resposta clara de qual método com qual impressora se apresenta como capaz de gerar menores distorções em relação ao outro, mas sim conseguimos identificar a complexidade que se traduz o processo de impressão 3D e de pós processamento, nos quais são necessários mais estudo para a completa compreensão do tema.

É importante salientar que existem limitações metodológicas dentro desse desenho de estudo. Dentro dos da análise dos arquivos STL é importante salientar

que existe uma distorção dimensional inerente a dois processos; o próprio processo de escaneamento, apesar de se tratar de um escâner de bancada com todas as propriedades que garantem a melhor reprodutibilidade possível, ainda existem distorções dimensionais inerentes ao produto STL gerado do escaneamento; a marcação de pontos é feita de forma manual, ou seja, esse processo é passível de erros humanos, apesar de usar um software de análise 3D e utilizando a média de 3 mensurações para gerar o menor viés de operador possível, esse processo ainda é passível de erros de mensuração, isso é notado pelo próprio desvio padrão observado no parâmetro de comprimento do arco dentário.

Esse estudo também mostrou que dentro do âmbito do pós-processamento existe uma gama de direções a serem seguidas para novas pesquisas científicas. Entender o papel da wattagem dentro da pós-polimerização, o eixo de incidência da luz de pós-polimerização, uso de atmosferas de nitrogênio para diminuir a formação de monômeros residuais. Também dentro das tecnologias de impressão podemos salientar que novas tecnologias LCD também trazem a necessidade de novos estudos para saber se essas tecnologias com resolução cada vez maior, trarão também resultados cada vez melhores, entender o papel dos FAPs, película que fica no fundo do tanque de resina e como é sua importância garantindo que a resolução de impressão seja alcançada.

Diante disso, são necessários mais estudos para que consigamos entender o papel do pós-processamento na distorção dimensional causada na impressão de um objeto com resinas fotopolimerizáveis.

5. CONCLUSÃO

Esse estudo investigou o papel de diferentes protocolos de pós-processamento para diferentes impressoras 3D. Ele apresenta limitações metodológicas que dificultam que conclusões incisivas sejam feitas favorecendo ou desfavorecendo alguma tecnologia ou protocolo de pós-processamento. Diante disso, parece que o uso de protocolos de pós-processamento integrados aparenta resultados superiores em relação aos outros dois métodos e em relação as tecnologias de impressão, ambas aparentam qualidades que estão dentro do limiar de aceitabilidade clínica. Entretanto, ainda são necessários novos estudos para podermos entender como a etapa de pós-processamento e as tecnologias de impressão podem ou não causar alterações dimensionais dentro da impressão 3D.

5.1 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao ProIC UnB pela oportunidade de desenvolvimento dessa pesquisa científica.

5.2 CONFLITO DE INTERESSE

Os autores declaram que não houve conflito de interesse.

5.3 FINANCIAMENTO

Esse projeto foi financiado pelos próprios autores.

REFERÊNCIAS

1. Beuer F, Schweiger J, Edelhoff D. Digital dentistry: An overview of recent developments for CAD/CAM generated restorations. *Br Dent J* 2008;204:505–11. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2008.350>.
2. Bae EJ, Jeong I Do, Kim WC, Kim JH. A comparative study of additive and subtractive manufacturing for dental restorations. *Journal of Prosthetic Dentistry* 2017;118:187–93. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2016.11.004>.
3. Van Noort R. The future of dental devices is digital. *Dental Materials* 2012;28:3–12. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2011.10.014>.
4. Dawood A, Marti BM, Sauret-Jackson V, Darwood A. 3D printing in dentistry. *Br Dent J* 2015;219:521–9. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2015.914>.
5. Abduo J, Lyons K, Bennamoun M. Trends in computer-aided manufacturing in prosthodontics: A review of the available streams. *Int J Dent* 2014;2014. <https://doi.org/10.1155/2014/783948>.
6. Beuer F, Schweiger J, Edelhoff D. Digital dentistry: An overview of recent developments for CAD/CAM generated restorations. *Br Dent J* 2008;204:505–11. <https://doi.org/10.1038/sj.bdj.2008.350>.
7. Etemad-Shahidi Y, Qallandar OB, Evenden J, Alifui-Segbaya F, Ahmed KE. Accuracy of 3-Dimensionally Printed Full-Arch Dental Models: A Systematic Review. *J Clin Med* 2020;9:3357. <https://doi.org/10.3390/jcm9103357>.
8. Stansbury JW, Idacavage MJ. 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. *Dental Materials*, vol. 32, Elsevier Inc.; 2016, p. 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.09.018>.
9. Quan H, Zhang T, Xu H, Luo S, Nie J, Zhu X. Photo-curing 3D printing technique and its challenges. *Bioact Mater* 2020;5:110–5. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2019.12.003>.
10. Reymus M, Fabritius R, Keßler A, Hickel R, Edelhoff D, Stawarczyk B. Fracture load of 3D-printed fixed dental prostheses compared with milled and conventionally fabricated ones: the impact of resin material, build direction, post-curing, and artificial aging—an in vitro study. *Clin Oral Investig* 2020;24:701–10. <https://doi.org/10.1007/s00784-019-02952-7>.

11. Chen H, Cheng DH, Huang SC, Lin YM. Comparison of flexural properties and cytotoxicity of interim materials printed from mono-LCD and DLP 3D printers. *Journal of Prosthetic Dentistry* 2020;1–6. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.09.003>.
12. Bayarsaikhan E, Lim JH, Shin SH, Park KH, Park YB, Lee JH, et al. Effects of postcuring temperature on the mechanical properties and biocompatibility of three-dimensional printed dental resin material. *Polymers (Basel)* 2021;13. <https://doi.org/10.3390/polym13081180>.
13. Kim J, Lee DH. Influence of the Postcuring Process on Dimensional Accuracy and Seating of 3D-Printed Polymeric Fixed Prostheses. *Biomed Res Int* 2020;2020. <https://doi.org/10.1155/2020/2150182>.
14. Finck NS, Fraga MAA, Correr AB, Dalmaschio CJ, Rodrigues CS, Moraes RR. Effects of solvent type and UV post-cure time on 3D-printed restorative polymers. *Dental Materials* 2023. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2023.12.005>.
15. Sahrir CD, Ruslin M, Lee SY, Lin WC. Effect of various post-curing light intensities, times, and energy levels on the color of 3D-printed resin crowns. *J Dent Sci* 2024;19:357–63. <https://doi.org/10.1016/j.jds.2023.07.008>.
16. Oh R, Lim JH, Lee CG, Lee KW, Kim SY, Kim JE. Effects of washing solution temperature on the biocompatibility and mechanical properties of 3D-Printed dental resin material. *J Mech Behav Biomed Mater* 2023;143. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.105906>.
17. Hwangbo NK, Nam NE, Choi JH, Kim JE. Effects of the washing time and washing solution on the biocompatibility and mechanical properties of 3d printed dental resin materials. *Polymers (Basel)* 2021;13. <https://doi.org/10.3390/polym13244410>.
18. Materials B, Kim D, Shim J, Lee D, Shin S, Nam N. Effects of Post-Curing Time on the Mechanical and Color Properties of Three-Dimensional Printed n.d.
19. Xu Y, Xepapadeas AB, Koos B, Geis-Gerstorfer J, Li P, Spintzyk S. Effect of post-rinsing time on the mechanical strength and cytotoxicity of a 3D printed orthodontic splint material. *Dental Materials* 2021;37:e314–27. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2021.01.016>.
20. Mostafavi D, Methani MM, Piedra-Cascón W, Zandinejad A, Revilla-León M. Influence of the Rinsing Postprocessing Procedures on the Manufacturing Accuracy

of Vat-Polymerized Dental Model Material. *Journal of Prosthodontics* 2021;30:610–6. <https://doi.org/10.1111/jopr.13288>.

21. McCarty MC, Chen SJ, English JD, Kasper F. Effect of print orientation and duration of ultraviolet curing on the dimensional accuracy of a 3-dimensionally printed orthodontic clear aligner design. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* 2020;158:889–97. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2020.03.023>.

22. ISO 5725-1_1994(en), Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 1_ General principles and definitions n.d.

23. Bula Yller. Yller, 2022. Disponível em: <<https://www.yller.com.br/bulas/>>. Acesso em: 10/03/2022. n.d.