

Efeito da velocidade de impressão na acurácia de coroas tridimensionalmente impressas em resina com carga de uso odontológico

Palavras-Chave: Impressão tridimensional; Polimerização; Materiais dentários.

Autores:

André Ferreira Rios, FOP-Unicamp

Ulysses de Toledo Monteiro, FOP-Unicamp

Prof. Dr. João Sarmento Pereira Neto, FOP-Unicamp

Prof. Dr. Lourenço Correr Sobrinho, FOP-Unicamp

Prof. Dr. Américo Bortolazzo Correr (orientador), FOP-Unicamp

1. INTRODUÇÃO

A fotopolimerização de resina em VAT (do termo em inglês *vat photopolymerization* – VPP) é uma das tecnologias de manufatura aditiva assistida por computador mais utilizadas na Odontologia (Zhang *et al.*, 2021). Nesse tipo de impressão 3D, o VAT possui um filme transparente na base e, abaixo dele, há uma tela, que modula a passagem de luz, normalmente entre 385-405nm, emitida por LEDs (Ge *et al.*, 2021) para fotoativar e solidificar a resina camada por camada (Song *et al.*, 2021). A separação da camada curada da superfície do VAT ocorre através da elevação da plataforma de impressão no eixo Z, o qual pode ter sua velocidade alterada nos *softwares* de fatiamento, o que impacta diretamente no tempo de produção da peça.

A adição de carga na composição das resinas está se tornando uma tendência (Schweiger *et al.*, 2024). Estudos já demonstraram que resinas contendo carga apresentaram boas propriedades mecânicas, alta precisão e reprodutibilidade; portanto, podem ser uma opção para restaurações definitivas (Baumgartner *et al.*, 2020, Schonherr *et al.*, 2020). No entanto, altas quantidades de carga, podem afetar a precisão dimensional, um fator decisivo para o sucesso clínico da restauração, pois que isso impacta a adaptação marginal da peça (Schriwer *et al.*, 2017; Abdulkareem *et al.*, 2024).

Durante o uso de resinas para impressão 3D contendo carga, a velocidade de levantamento e abaixamento da plataforma deve ser suficiente para o completo escoamento da resina em todo o VAT, especialmente no local onde as peças estão sendo construídas e sem a formação bolhas (Quanyi *et al.*, 2017). Todavia, a literatura ainda carece de esclarecimentos a respeito da influência da velocidade de impressão na acurácia de espécimes impressos com resina contendo carga em sua composição.

2. OBJETIVO

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito velocidade de impressão na acurácia de coroas tridimensionalmente impressas em resina com carga cerâmica. A hipótese avaliada nesse estudo foi que a velocidade influencia na acurácia dimensional das coroas.

3. METODOLOGIA

3.1 Desenho do estudo

Este estudo *in vitro* avaliou o efeito da velocidade de impressão em três velocidades diferentes na acurácia de coroas tridimensionalmente impressas em resina com carga, de uso odontológico. A resina utilizada foi Smart Print Bio Vitality (SmartDent, São Carlos, Brasil) na cor B1, que apresenta em sua composição monômeros, oligômeros, fotoiniciadores, pigmentos, cargas inorgânicas (58% em peso) e estabilizantes. A amostra consistiu em 10 coroas por grupo, totalizando 30 coroas impressas, distribuídas da seguinte forma: G1: Velocidade de elevação inicial e final (mm/minuto): 60/180 e Velocidade de descida inicial e final (mm/minuto): 60/180. G2: Velocidade de elevação inicial e final (mm/minuto): 75/225 e Velocidade de descida inicial e final (mm/minuto): 75/225. G3: Velocidade de elevação inicial e final (mm/minuto): 90/270 e Velocidade de descida inicial e final (mm/minuto): 90/270.

3.2 Desenho e impressão dos espécimes em 3D

Um manequim com um primeiro molar preparado para uma coroa total foi escaneado com escâner intraoral (CEREC Omnicam, Dentsply Sirona, Charlotte, EUA) para obtenção de um arquivo em formato STL (Standard Triangle Language). O arquivo STL foi exportado para o *software* Dental CAD 3.2 (Exocad, Darmstadt, Alemanha) onde foi feito o desenho digital da coroa total utilizando a morfologia genérica da biblioteca interna de formatos dentários. Foram utilizados os parâmetros de espessura mínima protética em 0,8 mm e espaço de cimentação em 50 µm. O desenho digital da coroa total foi exportado em formato STL para adição de suportes padronizados no software de fatiamento para impressão 3D RayWare (SprintRay, Los Angeles, EUA).

No *software* RayWare, o arquivo da amostra foi preparado para a impressão. As faces oclusais das coroas foram posicionadas em 0° em relação à plataforma de impressão, de modo que o eixo de inserção protético das coroas ficou, aproximadamente, perpendicular à plataforma de impressão. Os suportes foram criados com a ferramenta de geração automática de suportes disponível no software com os seguintes parâmetros: distância da plataforma de impressão de 4 mm, resistência alta e base do tipo road. Os novos arquivos das coroas já com os suportes foram exportados em formato STL e importados no software de fatiamento LycheeSlicer (Mango 3D, Bordeaux, França). Nesse software de fatiamento LycheeSlicer, 10 coroas foram posicionadas centralizadas na plataforma, utilizando a função *auto arrange*, de modo que a distância entre elas foi mínima e definida pelo *software*.

Todos os espécimes foram impressos seguindo as configurações padrões de impressão para a impressora 3D do modelo Anycubic Photon Mono 2 (Anycubic, Shenzhen, China), com espessura de camada de 50 µm, tempo de exposição de 1,1 segundos, tempo de descanso entre camadas (light-off-delay) 0,5 segundo e distância de elevação final e inicial 4>4 mm, alterando somente a velocidade de acordo com o grupo impresso.

3.3 Preparo dos espécimes

Imediatamente após a impressão, foi realizada a etapa de pós-processamento e acabamento seguindo as recomendações do fabricante. As coroas foram pós-processadas em uma câmara de lavagem e pós-cura específica (Wash & Cure 2.0/Anycubic). Foi feita lavagem em álcool isopropílico por 5 minutos. O álcool isopropílico ainda não evaporado foi removido com jato de ar. A pós-cura foi feita com luz violeta por 15 minutos. Os suportes foram removidos com a utilização de uma broca de tungstênio do tipo minicut em montada peça reta em motor de bancada. A finalização foi realizada com borracha abrasiva aplicando pressão leve e constante. Posteriormente, os espécimes foram armazenados em estufa em ambiente seco e escuro a 37 °C por 24 horas.

3.4 Acurácia dimensional

A acurácia dimensional foi calculada comparando medidas das coroas com as medidas do desenho digital da coroa. As medidas virtuais das coroas (comprimento mesiodistal (CMD), largura vestibulopalatina (LVP), altura em região de cúspide mesiovestibular (ACM) e espessura vestibular (EVE)) foram obtidas com a ferramenta de paquímetro digital disponível no *software* Medit Link (Medit Corp., Seul, Coreia do Sul). Além disso, os espécimes foram avaliados com relação a acurácia do volume em relação ao volume verdadeiro. O cálculo da acurácia dimensional dessas medidas lineares e do volume foi obtido pela diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro, expressa como um percentual do valor verdadeiro, expresso na fórmula:

$$A = 100 - \frac{(VM - VR)}{VR} \times 100\%$$

sendo que “A” corresponde a acurácia, “VM” ao valor mensurado fisicamente e “VR” ao valor do desenho digital considerado referência. Os valores absolutos de acurácia dos três grupos (G1 (n=10), G2 (n=10) e G3 (n=10)) foram utilizados na análise estatística.

Também foi realizada uma análise topológica nos arquivos escaneados das coroas impressas. Após alinhamento dos arquivos das coroas impressas com o desenho original da coroa, foi mensurado o desvio de superfícies em 3 regiões (Interno, Bordo e Oclusal) no programa Zeiss Inspect (Carl Zeiss GOM Metrology GmbH, Braunschweig, Alemanha). Desvios de superfícies foram obtidos em micrometros e a média dos valores absolutos usada na análise estatística.

3.5 Análise estatística

Os dados coletados foram avaliados quanto à normalidade (teste de Shapiro-Wilk) e homocedasticidade das variâncias (teste de Levene). Todos os dados apresentaram normalidade e distribuição homogênea ($p > 0,05$), conforme verificado pelos testes de Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente. Portanto, foi utilizada análise de variância de um fator, seguido do teste de Tukey. Os testes foram realizados no software estatístico SAS (SAS Institute Inc., Cary, USA), sendo considerado o nível de significância de 5% para todas as análises.

4. RESULTADOS

Acurácia lineares

A acurácia linear de CMD não sofreu influência significativa da velocidade de impressão ($p = 0,1366$), com médias ajustadas variando entre 94,51% (VB) e 95,23% (VC). Para LPV, também não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre os grupos ($p = 0,1231$), com valores variando de 94,58% (VB) a 95,04% (VC). Da mesma forma, os valores de ACM não apresentaram diferença significativa entre as velocidades ($p = 0,0977$), oscilando entre 93,78% (VA) e 95,94% (VB). No parâmetro EVE, os valores de acurácia linear variaram de 96,25% (VA) a 96,64% (VC), sem diferenças significativas entre os grupos ($p = 0,9324$) (Tabela 1).

Tabela 1: Média ajustadas e desvio padrão de acurácia linear (%) de coroas impressas em diferentes velocidades seguido do significado estatístico.

Grupo	CMD	LPV	ACM	EVE
VA	95,1 ± 0,25 A	95,02 ± 0,22 A	93,78 ± 0,66 A	96,25 ± 0,76 A
VB	94,51 ± 0,26 A	94,58 ± 0,22 A	95,94 ± 0,70 A	96,31 ± 0,80 A
VC	95,23 ± 0,26 A	95,04 ± 0,22 A	94,47 ± 0,70 A	96,64 ± 0,80 A
<i>p</i>	0,1366	0,1231	0,0977	0,9324

Desvios de superfície e volume

O desvio de superfície médio não sofreu influência da velocidade ($p = 0,3109$), com valores variando de $30,93 \mu\text{m}$ (VC) a $34,46 \mu\text{m}$ (VA). Na região oclusal, os desvios variaram entre $36,22 \mu\text{m}$ (VA) e $38,11 \mu\text{m}$ (VB), sem diferença estatística entre os grupos ($p = 0,9757$). Da mesma forma, os desvios na região interna não apresentaram diferença significativa ($p = 0,4159$), com valores entre $25,00 \mu\text{m}$ (VB) e $28,89 \mu\text{m}$ (VA). Os desvios na região de bordo também não foram afetados pela velocidade de impressão ($p = 0,3069$), variando de $41,67 \mu\text{m}$ (VC) a $46,68 \mu\text{m}$ (VA). Quanto ao volume, o volume do design original da coroa foi de $366,06 \text{ mm}^3$; os valores das coroas impressas oscilaram entre $342,08 \text{ mm}^3$ (VC) e $345,38 \text{ mm}^3$ (VA), sem diferença estatisticamente significativa entre os grupos ($p = 0,7577$) (Tabela 2).

Tabela 2: Média ajustadas e desvio padrão de desvios de superfície (μm) e volume (mm^3) de coroas impressas em diferentes velocidades seguido do significado estatístico.

Grupo	Médio	Oclusal	Interno	Bordo	Volume
VA	$34,46 \pm 2,417 \text{ A}$	$36,22 \pm 6,01 \text{ A}$	$28,89 \pm 2,97 \text{ A}$	$46,68 \pm 2,45 \text{ A}$	$345,38 \pm 3,13 \text{ A}$
VB	$32,78 \pm 2,417 \text{ A}$	$38,11 \pm 6,01 \text{ A}$	$25,00 \pm 2,97 \text{ A}$	$45,00 \pm 2,45 \text{ A}$	$344,58 \pm 3,30 \text{ A}$
VC	$30,93 \pm 2,417 \text{ A}$	$37,22 \pm 6,01 \text{ A}$	$25,56 \pm 2,97 \text{ A}$	$41,67 \pm 2,45 \text{ A}$	$342,08 \pm 3,30 \text{ A}$
<i>p</i>	<i>0,3109</i>	<i>0,9757</i>	<i>0,4159</i>	<i>0,3069</i>	<i>0,7577</i>

5. DISCUSSÃO:

Durante o processo de impressão 3D, que se dá camada por camada, a plataforma de impressão eleva no eixo Z, permitindo que resina líquida não curada, ocupe o espaço entre a estrutura fotopolimerizada e a superfície de cura, permitindo a formação de uma nova camada. No entanto, devido à alta viscosidade de resinas contendo carga odontológica, a menor velocidade de escoamento da resina torna-se um desafio para o aumento da velocidade de impressão, podendo levar a defeitos e falhas na impressão (Wang et al., 2019). Assim, o presente trabalho avaliou se é possível elevar essa velocidade de elevação da plataforma, sem que ocorra um alto número de falhas e prejuízo na acurácia.

Os resultados indicam que a variação na velocidade de impressão não influenciou significativamente a fidelidade dimensional das coroas impressas. A alta acurácia de coroas impressas minimizam ajustes e garantem uma boa adaptação no dente preparado (Sidhom et al., 2022). No presente estudo, os valores de acurácia das medidas lineares variaram de 93,8% a 96,6%, sem diferenças significativas entre as velocidades de impressão. Esse desempenho é considerado satisfatório, pois a literatura demonstra que uma acurácia acima de 90% é clinicamente aceita (Revilla-León et al., 2025). Sendo assim, apesar do aumento da velocidade de impressão, a resina foi capaz de escoar de maneira adequada e garantir a conformidade de suas dimensões.

O mesmo padrão foi observado para os desvios de superfície nas diferentes regiões analisadas (interna, oclusal e de bordo), os quais também não apresentaram diferenças significativas entre os grupos. O desvio de superfície corresponde à discrepância entre a malha escaneada da peça impressa e o modelo digital de referência. Valores mais baixos indicam maior precisão na reprodução da geometria da peça, ou seja, maior veracidade da impressão. Estudo prévio demonstrou que desvios de superfície inferiores a $100 \mu\text{m}$ são considerados clinicamente aceitáveis (Al-Ramadan et al., 2024). No presente estudo, os valores de desvio de superfície variaram de $25,00 \mu\text{m}$ a $46,68 \mu\text{m}$, o que evidencia a alta precisão das coroas impressas, independente da velocidade de impressão utilizada. Na prática clínica, isso significa que uma coroa com menor desvio superficial tende a apresentar melhor adaptação ao dente preparado, reduzindo a necessidade de ajustes clínicos, melhorando o assentamento marginal e contribuindo para a longevidade da restauração. Isso implica em benefícios diretos para laboratórios, clínicas e pacientes, como a otimização do tempo, maior rotatividade de produção e redução de custos.

Com relação os resultados de volume, não houve diferenças estatisticamente significativas entre os grupos. O volume original da coroa fornecida pelo *software* CAD foi de 366,06 mm³. Em todos os grupos, o volume impresso foi menor, variando de 342,08mm³ a 345,38mm³. Isso pode ser atribuído à contração de polimerização durante o processo de impressão 3D e pós-cura (Lee et al., 2021). Ainda assim, a impressão 3D pode apresentar discrepâncias marginais comparáveis ou inferiores em comparação com coroas produzidas por manufatura subtrativa (Abdulkareem et al., 2024).

Dessa forma, este estudo fornece evidências claras e aplicáveis de que a velocidade de impressão, dentro da faixa analisada, não compromete a acurácia dimensional de coroas em resina com carga cerâmica. Isso legitima o uso de protocolos otimizados em fluxos digitais odontológicos modernos.

6. CONCLUSÃO

Variações na velocidade de impressão não alteraram significativamente a acurácia de medidas lineares, volume e desvio de superfície de coroas impressas com resinas com carga de uso odontológico.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Zhang F, Zhu L, Li Z, Wang S, Shi J, Tang W, Li N, Yang J. The recent development of vat photopolymerization: A review. *Addit. Manuf.* 2021;48(Part B):102423. doi: 10.1016/j.addma.2021.102423.
2. Ge Q, Chen Z, Cheng J, Zhang B, Zhang YF, Li H, He X, Yuan C, Liu J, Magdassi S, Qu S. 3D printing of highly stretchable hydrogel with diverse UV curable polymers. *Sci Adv.* 2021 Jan 6;7(2):eaba4261. doi: 10.1126/sciadv.aba4261. PMID: 33523958; PMCID: PMC7787492
3. Song H, Rodriguez NA, Seepersad CC, Crawford RH, Chen M, Duoss EB. Development of a variable tensioning system to reduce separation force in large scale stereolithography. *Addit. Manuf.* 2021;38:101816. doi: 10.1016/j.addma.2020.101816.
4. Schweiger J, Edelhoff D, Schubert O. 3D printing of ultra-thin veneers made of lithium disilicate using the LCM method in a digital workflow: A feasibility study. *J Esthet Restor Dent.* 2024 Apr;36(4):588-594. doi: 10.1111/jerd.13155. Epub 2023 Nov 14. PMID: 37962058.
5. Baumgartner S, Gmeiner R, Schonherr JA, Stampfl J. Stereolithography-based additive manufacturing of lithium disilicate glass ceramic for dental applications. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl.* 2020;116:111180.
6. Schonherr JA, Baumgartner S, Hartmann M, Stampfl J. Stereolithographic additive manufacturing of high precision glass ceramic parts. *Materials (Basel).* 2020;13(7):1492
7. Abdulkareem MA, Al-Shamma AMW. Marginal adaptation and fracture resistance of 3D-printed and CAD/CAM-milled definitive resin matrix ceramic crowns. *Int J Comput Dent.* 2024 Dec 9;27(4):355-363. doi: 10.3290/j.ijcd.b4494301. PMID: 37823542.
8. Schriwer C, Skjold A, Gjerdet NR, Øilo M. Monolithic zirconia dental crowns. Internal fit, margin quality, fracture mode and load at fracture. *Dent Mater.* 2017 Sep;33(9):1012-1020. doi: 10.1016/j.dental.2017.06.009.
9. Mu Q, Wang L, Dunn CK, Kuang X, Duan F, Zhang Z, Qi HJ, Wang T. Digital light processing 3D printing of conductive complex structures. *Additive Manufacturing.* 2017;74-83. doi: 10.1016/j.addma.2017.08.011.
10. Wang, Quandai & Sun, Yulong & Guo, Bingbing & Li, Pengyang & Li, Yan. (2019). CFD analysis and prediction of suction force during the pulling-up stage of the continuous liquid interface production process. *AIP Advances.* 9. 015225. 10.1063/1.5080516.
11. Al-Ramadan, A., Abualsaud, R., Al-Dulaijan, Y. A., Al-Thobity, A. M., & Alalawi, H. (2024). Accuracy and Fit of Ceramic Filled 3D-Printed Resin for Permanent Crown Fabrication: An In Vitro Comparative Study. *Prosthesis*, 6(5), 1029-1041. <https://doi.org/10.3390/prosthesis6050075>
12. Lee, B.-I.; You, S.-G.; You, S.-M.; Kim, D.-Y.; Kim, J.-H. Evaluating the accuracy (trueness and precision) of interim crowns manufactured using digital light processing according to post-curing time: An in vitro study. *J. Adv. Prosthodont.* 2021, 13, 89.
13. Sidhom M, Zaghoul H, Mosleh IE, Eldwakhly E. Effect of Different CAD/CAM Milling and 3D Printing Digital Fabrication Techniques on the Accuracy of PMMA Working Models and Vertical Marginal Fit of PMMA Provisional Dental Prosthesis: An In Vitro Study. *Polymers (Basel).* 2022 Mar 22;14(7):1285. doi: 10.3390/polym14071285. PMID: 35406159; PMCID: PMC9003362.
14. Revilla-León M, Fry E, Supaphakorn A, Barmak AB, Kojs JC. Manufacturing accuracy of the intaglio surface of definitive resin-ceramic crowns fabricated at different print orientations by using a stereolithography printer. *J Prosthet Dent.* 2025 Feb;133(2):505-511. doi: 10.1016/j.prosdent.2023.04.012. Epub 2023 May 26. PMID: 37246096.