

UNIVERSIDADE PAULISTA – UNIP

BIANCA ROSSI

**IMPACTO DO TEMPO DE PÓS-CURA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E NA ESTABILIDADE
DE COR DE RESINAS IMPRESSAS PARA RESTAURAÇÕES DEFINITIVAS**

SÃO PAULO
2025

BIANCA ROSSI

**IMPACTO DO TEMPO DE PÓS-CURA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E NA ESTABILIDADE
DE COR DE RESINAS IMPRESSAS PARA RESTAURAÇÕES DEFINITIVAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Odontologia da Universidade Paulista – UNIP, para obtenção do título de Doutora em Odontologia.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Fonseca de Lima.

SÃO PAULO

2025

Rossi, Bianca.

Impacto do tempo de pós-cura nas propriedades mecânicas e na estabilidade de cor de resinas impressas para restaurações definitivas / Bianca Rossi. - 2025.

17 f. : il. + CD-ROM.

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Odontologia, São Paulo, 2025.

Área de concentração: Biomateriais. Orientador:

Prof. Dr. Adriano Fonseca de Lima.

1. Polímeros.
 2. Resina.
 3. Propriedades mecânicas.
 4. Impressão 3D.
- I. Lima, Adriano Fonseca de (orientador).
- II. Título.

BIANCA ROSSI

**IMPACTO DO TEMPO DE PÓS-CURA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E NA ESTABILIDADE
DE COR DE RESINAS IMPRESSAS PARA RESTAURAÇÕES DEFINITIVAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Odontologia da Universidade Paulista – UNIP, para obtenção do título de Doutora em Odontologia.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

_____/_____
Prof. Dr. Adriano Fonseca de Lima

Universidade Paulista – UNIP

_____/_____
Prof. Dr. Matheus Kury Rodrigues

Universidade Paulista – UNIP

_____/_____
Prof.ª Dr.ª Marina Damasceno e Souza de Carvalho Chiari

Universidade Paulista – UNIP

_____/_____
Prof. Dr. Alan Rodrigo Muniz Palialo

São Leopoldo Mandic - SLMANDIC

_____/_____
Prof. Dr. Luciano de Souza Gonçalves

Universidade Federal de Santa Maria – UFRGS

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me conceder saúde, força e sabedoria para perseverar em cada etapa desta jornada.

À Universidade Paulista (UNIP) e ao Programa de Pós-Graduação em Odontologia pela oportunidade de crescimento acadêmico e científico e por todo o suporte institucional que possibilitou a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Adriano Fonseca de Lima, pela orientação segura, pelo incentivo constante, pela paciência, pela dedicação, pelo compartilhamento do seu conhecimento e experiência. Sua confiança e apoio foram fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Matheus Kury pelos valiosos ensinamentos, pelas contribuições científicas e pelo exemplo de profissionalismo e dedicação à pesquisa, fatos que muito enriqueceram meu aprendizado ao longo desta trajetória.

Aos demais professores do programa pelo comprometimento com o ensino e pela contribuição indispensável à minha formação acadêmica.

Aos meus colegas de pós-graduação pela parceria, pelas trocas de aprendizado e pela amizade construída ao longo desse percurso.

Aos meus pais por todo o amor, por todo o incentivo e por todo o exemplo de esforço e honestidade que sempre me inspiraram a seguir em frente.

Às minhas irmãs, Adriana e Camila, pelo carinho, pela compreensão e pelo apoio em todos os momentos.

De forma especial, aos meus filhos, Luísa e Pietro, razão maior da minha vida, minha motivação diária, minha fonte de alegria e meu maior estímulo para nunca desistir dos meus sonhos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, cujo apoio financeiro permitiu a realização da pesquisa.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho.

RESUMO

A introdução da impressão 3D na odontologia restauradora tem criado novas oportunidades para soluções personalizadas e realizadas em consultório. As resinas desenvolvidas para manufatura aditiva vêm sendo promovidas como potenciais alternativas aos compósitos convencionais para restaurações definitivas. No entanto, permanecem dúvidas quanto à sua confiabilidade em longo prazo, uma vez que a resistência mecânica e a estabilidade óptica são fatores críticos para o sucesso intraoral. Os compósitos resinosos tradicionais, especialmente as formulações nanoparticuladas, possuem amplo histórico clínico e desempenho bem documentado, servem como referência adequada para os novos materiais impressos. Compreender como a pós-polimerização influencia as propriedades das resinas impressas em 3D é fundamental para estabelecer sua aplicabilidade clínica. Este estudo avaliou o impacto de diferentes tempos de pós-polimerização sobre as propriedades mecânicas e a estabilidade de cor de uma resina impressa em 3D; comparou seu desempenho com um compósito nanoparticulado de uso direto amplamente utilizado. Espécimes da resina impressa (*VarseoSmile Crown Plus*) foram submetidos à pós-polimerização por 0, 5, 10, 15 ou 20 minutos. Um compósito nanoparticulado convencional (*Filtek Z350XT, 3M/Solventum*) foi utilizado como referência (fotoativação por 20 s). Os testes mecânicos incluíram resistência à flexão, ao módulo flexural e à resistência coesiva, seguindo as normas ISO. Para a avaliação de cor, amostras em formato de disco foram imersas em saliva artificial, Coca-Cola® ou vinho tinto por 7 dias; posteriormente, foram polidas e submetidas a um protocolo de clareamento. A variação de cor (ΔE^*00) e o índice de brancura para odontologia (ΔWID) foram medidos no *baseline*, após a pigmentação e após o tratamento. Os resultados demonstraram que o compósito direto apresentou valores significativamente mais altos de resistência à flexão e à resistência coesiva

em todas as condições testadas. Embora a pós-polimerização tenha melhorado o desempenho mecânico da resina impressa, seus valores não atingiram os níveis observados no compósito. Ambas as resinas apresentaram alterações de cor perceptíveis após a pigmentação, e o vinho tinto foi o agente mais crítico. O polimento e o clareamento reduziram a descoloração, mas não restauraram totalmente a cor inicial. O compósito mostrou maior resistência à pigmentação do que à resina impressa. Com base nos resultados, conclui-se que a pós-polimerização melhora o desempenho mecânico das resinas impressas em 3D, mas não elimina a diferença em relação aos compósitos convencionais. Além disso, a maior suscetibilidade à pigmentação levanta preocupações sobre a estabilidade estética em longo prazo. Embora as resinas impressas em 3D representem uma alternativa promissora para a odontologia restauradora, avanços adicionais ainda são necessários antes que se possam substituir de forma confiável os compósitos em aplicações definitivas.

Palavras-chave: polímeros, resina, propriedades mecânicas, impressão 3D.

ABSTRACT

The introduction of 3D printing into restorative dentistry has created new opportunities for customized and chairside solutions. Resins developed for additive manufacturing are being promoted as potential alternatives to conventional composites for definitive restorations. However, questions regarding their long-term reliability remain, since mechanical endurance and optical stability are critical for intraoral success. Traditional resin composites, particularly nanofilled formulations, have an extensive clinical record and well-documented performance, serving as an appropriate benchmark for novel printed materials. Understanding how post-curing influences the properties of 3D-printed resins is essential to establishing their clinical applicability. This study evaluated the impact of different post-curing regimens on the mechanical properties and color stability of a 3D-printed resin, comparing its performance with a widely used nanofilled direct composite. Specimens of a 3D-printed resin (VarseoSmile Crown Plus) were subjected to post-curing for 0, 5, 10, 15, or 20 minutes. A conventional nanofilled composite (Filtek Z350XT, 3M/Solventum) served as reference (light activation 20 s). Mechanical testing included flexural strength, flexural modulus, and cohesive strength, following ISO standards. For color evaluation, disk-shaped samples were immersed in artificial saliva, Coca-Cola®, or red wine for 7 days, then polished and subjected to a whitening protocol. Color change (ΔE_{00}) and whiteness index (ΔWID) were measured at baseline, after staining, and after treatment. The results demonstrated that direct composite presented significantly higher flexural and cohesive strength values than those of the printed resin under all conditions. Although post-curing enhanced the mechanical performance of the 3D-printed material, the latter did not reach the levels achieved by the composite. Both resins exhibited perceptible color alterations after staining, with red wine producing the most pronounced effects. Polishing and

whitening improved color, but baseline shade was not fully recovered. The composite displayed greater resistance to discoloration than the 3D-printed resin. Based on the results, it can be concluded that post-curing improves the mechanical performance of 3D-printed resins but does not equate it with that of traditional composites. Furthermore, the higher susceptibility of the printed resin to staining raises concerns about long-term esthetic stability. While 3D-printed resins represent a promising alternative for restorative dentistry, further refinement is required before they can reliably replace composites in definitive applications.

Keywords: polymers, resin, mechanical properties, 3D printing

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
2 ARTIGO.....	13
3 CONCLUSÕES GERAIS	42
4 REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

A odontologia restauradora moderna é fortemente marcada pelo uso de compósitos resinosos, materiais que se tornaram protagonistas na busca por tratamentos estéticos e funcionais aliados à filosofia da odontologia minimamente invasiva. O desenvolvimento contínuo desses compósitos, com evolução em matriz resinosa, tipo e concentração de partículas de carga e sistemas iniciadores de polimerização, tem permitido sua aplicação em praticamente todas as situações clínicas, desde restaurações diretas simples até casos mais complexos em dentes anteriores e posteriores (1, 2). Além disso, esses compósitos são materiais que oferecem vantagens clínicas relevantes, como a possibilidade de reparo intraoral (3, 4), preservação de estrutura dental e alto desempenho estético a longo prazo (5, 6).

Entretanto, em situações em que a destruição coronária é extensa ou quando há necessidade de reabilitações múltiplas e complexas, as restaurações indiretas ainda são a principal opção (7, 8). Para esses casos, cerâmicas e resinas de fresagem industrializada ganharam espaço consolidado, especialmente devido à precisão, à reproduzibilidade e à previsibilidade que os fluxos digitais oferecem (9). O conceito CAD-CAM (*Computer-Aided Design e Computer-Aided Manufacturing*) permitiu que a confecção de restaurações passasse a ser realizada com maior controle e maior padronização, o que reduziu etapas laboratoriais manuais e aumentou a eficiência clínica.

Apesar dessas vantagens, o método substrativo apresenta limitações conhecidas: grande desperdício de material, desgaste progressivo das fresas, dificuldades em fresar áreas de geometria complexa e limitações no detalhamento de margens finas (9, 10). Tais fatores

estimularam o avanço da manufatura aditiva na odontologia, com destaque para a impressão 3D. Essa tecnologia viabiliza a construção de peças pela deposição ou polimerização sucessiva de camadas, o que reduz o desperdício de material, permite maior liberdade geométrica e, em teoria, torna o processo mais econômico e sustentável (10).

Na odontologia, a impressão 3D evoluiu rapidamente: passou de modelos de estudo e de guias cirúrgicos para aplicações mais complexas, como a confecção de restaurações temporárias e, mais recentemente, definitivas (10-12). A tecnologia de impressão empregada (SLA, DLP ou LCD) e os parâmetros de impressão, como espessura da camada, orientação da peça na plataforma, protocolos de lavagem e, sobretudo, as condições de pós-cura, influenciam diretamente as propriedades finais do material (11, 13-15).

A etapa de pós-cura é especialmente crítica, pois afeta o grau de conversão, a estabilidade dimensional e a resistência mecânica da peça (16-18). Estudos recentes demonstram que tempos ou protocolos de pós-cura inadequados podem comprometer a rede polimérica, o que resulta deformações, aumento do conteúdo de monômero residual e, consequentemente, piora nas propriedades mecânicas e biológicas (16, 17, 19).

Do ponto de vista da composição, os primeiros materiais disponíveis para impressão 3D apresentavam formulações com baixo conteúdo de carga inorgânica e propriedades restritas ao uso provisório (11, 14). A introdução de resinas reforçadas, com maior teor de partículas cerâmicas ou vítreas, trouxe a possibilidade de indicação para restaurações permanentes (9). Contudo, a literatura ainda carece de evidências robustas sobre seu desempenho clínico. Estudos *in vitro* demonstram resultados encorajadores em propriedades como resistência flexural e dureza, mas os dados clínicos ainda são limitados. Por exemplo,

Doumit *et al.* (20) observaram desgaste significativo em restaurações impressas após 24 meses, fato que questiona sua real viabilidade para uso permanente. De forma semelhante, Hobbi *et al.* (12), em ensaio clínico de três anos, relataram taxas de falha elevadas em próteses fixas posteriores impressas, principalmente fraturas em regiões de conector, o que reforça a visão de que, até o momento, esses materiais podem ter desempenho mais compatível com restaurações provisórias de longo prazo.

As limitações relatadas podem ser explicadas pelos mecanismos intrínsecos à manufatura aditiva. A deposição em camadas sucessivas pode originar zonas interfaciais com menor grau de polimerização e aumentar a susceptibilidade à degradação hidrolítica e ao manchamento (11, 14). A heterogeneidade da rede polimérica formada e a dependência da polimerização fotoinduzida em áreas profundas contribuem para variações de desempenho. Bebidas como vinho e refrigerantes são frequentemente utilizadas em estudos laboratoriais por simularem desafios clínicos cotidianos (21, 22). Nesse contexto, não basta que o material apresente apenas resistência inicial à pigmentação; é fundamental que ele apresente um manchamento que, caso ocorra, seja passível de reversão por procedimentos clínicos simples, como polimento ou clareamento supervisionado.

Outra questão relevante é que grande parte dos estudos prévios avaliou materiais de menor teor de carga, usados como provisórios, ou análises de curto prazo que não refletem adequadamente as condições clínicas de longo tempo (11, 14, 15), uma vez que os materiais com indicação de uso definitivo foram inseridos recentemente no mercado. Assim, persiste a necessidade de estudos comparativos com materiais já estabelecidos na prática clínica, como

compósitos nanoparticulados diretos, que contam com extensa evidência de sucesso clínico a longo prazo.

Dante desse cenário, torna-se fundamental investigar se as resinas para impressão 3D, atualmente indicadas para restaurações definitivas, realmente apresentam propriedades mecânicas e ópticas compatíveis com essa finalidade. O presente estudo buscou avaliar uma resina 3D com indicação para restaurações permanentes. Por isto, analisou sua resistência à flexão, seu módulo de elasticidade, sua resistência coesiva e sua estabilidade de cor após exposição a soluções pigmentantes, além da efetividade de procedimentos clínicos para remoção dessas manchas. Como referência, utilizou-se um compósito nanoparticulado de aplicação direta, amplamente documentado na literatura e consolidado clinicamente. A hipótese nula estabelecida foi a de que a resina 3D apresentaria comportamento equivalente ao compósito convencional; já a hipótese alternativa considerou a possibilidade de desempenho inferior em ao menos uma das propriedades avaliadas.

Apesar dos avanços tecnológicos e da crescente difusão de resinas para impressão 3D com indicação de uso definitivo, ainda há um hiato importante entre as promessas comerciais e a real comprovação científica de sua longevidade clínica. A decisão de adotar tais materiais não é apenas técnica; ela impacta diretamente a previsibilidade dos tratamentos restauradores e a satisfação dos pacientes, sobretudo em reabilitações extensas ou em áreas estéticas de alta demanda. Nesse sentido, compreender se essas resinas apresentam desempenho comparável ao de compósitos nanoparticulados consagrados é fundamental para orientar escolhas clínicas baseadas em evidências. Assim, este estudo não apenas contribui para preencher uma lacuna científica relevante. Ele também oferece subsídios

práticos para a tomada de decisão na rotina clínica; reforça a importância de uma avaliação crítica antes da incorporação definitiva dessas tecnologias à prática odontológica.

2 CONCLUSÕES GERAIS

Este estudo demonstrou que o desempenho da resina impressa em 3D é altamente dependente do protocolo de pós-cura. As propriedades mecânicas, como resistência à flexão, módulo de elasticidade e resistência coesiva, aumentaram progressivamente com o tempo de exposição. São necessários 15 a 20 minutos de pós-cura para alcançar valores próximos aos do compósito convencional. A ausência de pós-cura resultou desempenho significativamente inferior, reforçou a importância crítica desta etapa para o uso clínico de resinas impressas.

No que se refere à estabilidade de cor, tanto o compósito convencional quanto a resina impressa adequadamente pós-polimerizada apresentaram comportamento semelhante, com alterações geralmente aceitáveis em condições simuladas. O vinho tinto promoveu a maior descoloração, o que confirmou a vulnerabilidade dos materiais resinosos frente a bebidas ricas em álcool e em agentes pigmentantes, como o tanino. Os tratamentos de superfície, como polimento e clareamento, foram eficazes na redução da pigmentação, ainda que o clareamento tenha atuado principalmente em manchas extrínsecas.

Apesar de a resina impressa atender aos requisitos mínimos da ISO quando submetida ao pós-cura otimizado, seu desempenho global ainda é inferior ao de compósitos convencionais consolidados. Assim, sua aplicação clínica imediata parece mais adequada como restaurações transitórias de longa duração, em vez de restaurações definitivas. Entretanto, os avanços contínuos em formulação de resinas e em processos de manufatura

aditiva indicam que, em um futuro próximo, essas resinas poderão alcançar ou mesmo superar compósitos e cerâmicas tradicionais, tanto em resistência quanto em estabilidade estética.

REFERÊNCIAS

1. Da Rosa Rodolpho PA, Donassollo TA, Cenci MS, Loguercio AD, Moraes RR, Bronkhorst EM, et al. 22-Year clinical evaluation of the performance of two posterior composites with different filler characteristics. *Dent Mater.* 2011;27(10):955-63.
2. Collares K, Opdam NJM, Laske M, Bronkhorst EM, Demarco FF, Correa MB, et al. Longevity of Anterior Composite Restorations in a General Dental Practice-Based Network. *J Dent Res.* 2017;96(10):1092-9.
3. van de Sande FH, Moraes RR, Elias RV, Montagner AF, Rodolpho PA, Demarco FF, et al. Is composite repair suitable for anterior restorations? A long-term practice-based clinical study. *Clin Oral Investig.* 2019;23(6):2795-803.
4. Kanzow P, Wiegand A, Schwendicke F, Gostemeyer G. Same, same, but different? A systematic review of protocols for restoration repair. *J Dent.* 2019;86:1-16.
5. Tennert C, Maliakal C, Suarez Machado L, Jaeggi T, Meyer-Lueckel H, Wierichs Richard J. Longevity of posterior direct versus indirect composite restorations: A systematic review and meta-analysis. *Dent Mater.* 2024;40(11):e95-e101.
6. Demarco FF, Cenci MS, Montagner AF, de Lima VP, Correa MB, Moraes RR, et al. Longevity of composite restorations is definitely not only about materials. *Dent Mater.* 2023;39(1):1-12.
7. Bresser RA, Hofsteenge JW, Buijs GJ, van den Breemer CRG, Ozcan M, Cune MS, et al. Partial glass-ceramic posterior restorations with margins beyond or above the cemento-enamel junction: An observational retrospective clinical study. *J Prosthodont Res.* 2024.

8. Hofsteenge JW, Bresser RA, Buijs GJ, van der Made SA, Ozcan M, Cune MS, et al. Clinical performance of bonded partial lithium disilicate restorations: The influence of preparation characteristics on survival and success. *J Dent.* 2024;142:104828.
9. Sampaio GN, de Oliveira Limirio JPJ, Gomes JML, Lemos CAA, Pesqueira AA, Pellizzer EP. Evaluation of mechanical properties of CAD-CAM composite resins for milled versus 3D printed definitive restorations: A systematic review and meta-analysis. *J Prosthet Dent.* 2025.
10. Kessler A, Hickel R, Reymus M. 3D Printing in Dentistry-State of the Art. *Oper Dent.* 2020;45(1):30-40.
11. de Castro EF, Nima G, Rueggeberg FA, Araujo-Neto VG, Faraoni JJ, Palma-Dibb RG, et al. Effect of build orientation in gloss, roughness and color of 3D-printed resins for provisional indirect restorations. *Dent Mater.* 2023;39(7):e1-e11.
12. Hobbi P, Ordueri TM, Ozturk-Bozkurt F, Toz-Akalin T, Ates MM, Ozcan M. Assessing the performance of 3D-printed resin composite posterior fixed dental prostheses: A 3-year prospective clinical trial. *J Dent.* 2025;160:105887.
13. Willers AE, Giannini M, Hirata R, Bergamo ETP, de Cassia Romano B, Andre CB, et al. Three-Dimensional Assessment of Internal and Marginal Fit of Provisional Crowns Fabricated Using 3D-Printing Technology. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater.* 2025;113(6):e35595.
14. Soto-Montero J, de Castro EF, Romano BC, Nima G, Shimokawa CAK, Giannini M. Color alterations, flexural strength, and microhardness of 3D printed resins for fixed provisional restoration using different post-curing times. *Dent Mater.* 2022;38(8):1271-82.
15. Britto VT, Cantelli V, Collares FM, Bertol CD, Della Bona A. Biomechanical properties of a 3D printing polymer for provisional restorations and artificial teeth. *Dent Mater.* 2022;38(12):1956-62.

16. Finck NS, Fraga MAA, Correr AB, Moreira TA, Dalmaschio CJ, Ramagem VO, et al. Comparative evaluation of mechanical and thermal properties of 3D-printed restorative polymers: Effects of resin type, printer technology, and post-curing time. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2025;172:107166.
17. 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. *Dent Mater.* 2024;40(3):451-7.
18. Kim D, Shim JS, Lee D, Shin SH, Nam NE, Park KH, et al. Effects of Post-Curing Time on the Mechanical and Color Properties of Three-Dimensional Printed Crown and Bridge Materials. *Polymers (Basel).* 2020;12(11).
19. Ozden Y, Altinok Uygun L. Effects of postcuring times on the trueness of 3D -printed dental inlays made with permanent resins. *Clin Oral Investig.* 2025;29(5):244.
20. Doumit M, Beuer F, Bose MWH, Unkovskiy A, Hey J, Prause E. Wear behavior of 3D printed, minimally invasive restorations: Clinical data after 24 months in function. *J Prosthet Dent.* 2025;134(3):662-9.
21. Sly MM, Korkmaz-Ceyhan Y, Dini F, Ocampo Escobedo RL, Abram E, Paravina RD. Aging and Staining Effects on Optical Properties of Flowable Composites. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater.* 2025;113(9):e35648.
22. Mota GMDM, Kury M, Tenorio CPDB, do Amaral FLB, Turssi CP, Cavalli V. Effects of Artificial Staining and Bleaching Protocols on the Surface Roughness, Color, and Whiteness Changes of an Aged Nanofilled Composite. *Front Dent Med.* 2020;1.