

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor, o
texto completo desta tese será
disponibilizado somente a partir de
16/12/2025.



UNESP - Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho”
Faculdade de Odontologia de Araraquara



Francisco Fernando Massola Filho

**Desempenho mecânico, óptico e estrutural de resinas impressas em 3D para
restaurações dentárias definitivas**

Araraquara
2025



UNESP - Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho”
Faculdade de Odontologia de Araraquara



Francisco Fernando Massola Filho

Desempenho mecânico, óptico e estrutural de resinas impressas em 3D para restaurações dentárias definitivas

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Odontologia, Araraquara para obtenção do título de Doutor em Odontologia, na área de Prótese Dentária.

Orientador: Edson Alves de Campos

Araraquara
2025

M419d

Massola Filho, Francisco Fernando

Desempenho mecânico, óptico e estrutural de resinas impressas em 3D para restaurações dentárias definitivas / Francisco Fernando Massola Filho. -- Araraquara, 2025

66 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Odontologia, Araraquara

Orientador: Prof. Dr. Edson Alves de Campos

1. Impressão tridimensional 2. Resinas compostas 3. Testes mecânicos 4. Microscopia.
5. Resultado do tratamento. I. Título.

Francisco Fernando Massola Filho

Desempenho mecânico, óptico e estrutural de resinas impressas em 3D para restaurações dentárias definitivas

Comissão Julgadora

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista na Faculdade de Odontologia, Araraquara para obtenção do título de Doutor em Odontologia, na área de Prótese Dentária.

Orientador: Prof. Dr. Edson Alves de Campos

2º Examinador: Prof. Dr. Jairo Matozinho Cordeiro

3º Examinador: Marcelo Ferrarezi de Andrade

4º Examinador: Profa. Dra. Marília Mattar de Amôedo Campos Velo

5º Examinador: Prof. Dr. Rogério Margonar

Araraquara, 16 de dezembro de 2025.

DADOS CURRICULARES

Francisco Fernando Massola Filho

NASCIMENTO: 13/10/1995 - Jaú - São Paulo

FILIAÇÃO: Elis Cristina Lopes Massola
Francisco Fernando Massola

2022 - Doutorado em andamento em Odontologia (Dentística Restauradora).
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, Brasil.
Orientador: Edson Alves de Campos.

2018 - Mestrado profissional em andamento em Mestrado em Prótese Dental.
Faculdade de Odontologia São Leopoldo Mandic, SLMANDIC, Brasil.
Título: Influência do tratamento de superfície e força de cisalhamento da zircônia.
Orientador: Aline Batista Goncalves Franco.
Coorientador: Sergio Candido Dias.

2018 - 2020
Especialização em Especialização em Prótese Dental. (Carga Horária: 885h).
CENTRO UNIVERSITARIO AVANTIS, UNIAVAN, Brasil.
Título: Endocrown, uma alternativa restauradora para dentes tratados endodonticamente.
Orientador: Luis Gustavo D'alto Garbelotto.

2014 - 2018
Graduação em Odontologia.
Centro Universitário Sagrado Coração, UNISAGRADO, Brasil.
Título: Efeito do modo de ativação da polimerização e envelhecimento acelerado no grau de conversão de cimentos resinosos autoadesivos.
Orientador: Thiago Amadei Pegoraro.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder força, perseverança e sabedoria ao longo desta jornada. Sem Sua presença e graça, este trabalho não teria sido possível.

À minha família, pelo amor incondicional, pelo apoio inestimável e por sempre acreditarem no meu potencial. Cada palavra de incentivo e cada gesto de carinho foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

À minha esposa, minha companheira de vida, que, neste momento tão especial, carrega em seu ventre nosso filho. Sua paciência, compreensão e amor foram a base que me sustentou nos momentos mais desafiadores. Saber que em breve teremos nossa maior bênção torna essa conquista ainda mais significativa.

Ao meu orientador, cuja orientação, dedicação e conhecimento foram essenciais para a realização desta pesquisa. Sua confiança em meu trabalho e seus ensinamentos valiosos me impulsionaram a buscar sempre o melhor.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado nos momentos de dificuldade e de celebração. A amizade e o apoio de vocês tornaram esta caminhada mais leve e significativa.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, minha eterna gratidão.

Massola Filho FF. Desempenho mecânico, óptico e estrutural de resinas impressas em 3D para restaurações dentárias definitivas [tese de doutorado]. Araraquara: Faculdade de Odontologia da UNESP; 2025.

RESUMO

A impressão 3D tem revolucionado a Odontologia, especialmente no desenvolvimento de resinas fotopolimerizáveis para restaurações definitivas. Este estudo avaliou as propriedades ópticas, mecânicas e estruturais de diferentes resinas compostas impressas em 3D, considerando variáveis como tempo de pós-cura, resistência à flexão e estabilidade de cor, microscopia eletrônica de varredura. Foram testadas diferentes formulações de resinas híbridas, com diferentes composições de carga inorgânica e proporções de matriz polimérica. Para a metodologia, corpos de prova foram impressos seguindo um protocolo padronizado, incluindo calibração da impressora, controle de temperatura da resina e pós-cura em diferentes tempos (10, 20 e 30 minutos). A resistência mecânica foi avaliada por ensaio de flexão de três pontos, enquanto a estabilidade óptica foi determinada por espectrofotometria e análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Além disso, foram realizadas avaliações de rugosidade superficial e brilho antes e após ciclos de degradação artificial. Os resultados indicaram que a composição da resina influencia significativamente suas propriedades. As resinas com maior carga inorgânica apresentaram melhor resistência à flexão e estabilidade de cor, enquanto aquelas com menor teor de partículas demonstraram maior susceptibilidade a variações mecânicas e ópticas. O tempo de pós-cura não exerceu influência estatisticamente significativa sobre a resistência mecânica, sugerindo que tempos reduzidos podem ser igualmente eficazes. A microscopia revelou diferenças estruturais entre os materiais testados, destacando a importância da homogeneidade da dispersão de partículas para a performance final do material. Conclui-se que a escolha da resina e a padronização dos protocolos de impressão e pós-cura são determinantes para o desempenho clínico das restaurações impressas em 3D. O estudo reforça a necessidade de mais pesquisas sobre a longevidade desses materiais e sua viabilidade em restaurações definitivas na prática odontológica.

Palavras chave: Impressão tridimensional. Resinas compostas. Testes mecânicos. Microscopia. Resultado do tratamento.

Massola Filho FF. Mechanical, optical, and structural performance of 3D-printed resins for definitive dental restorations [tese de doutorado]. Araraquara: Faculdade de Odontologia da UNESP, 2025.

ABSTRACT

3D printing has revolutionized dentistry, particularly in the development of photopolymerizable resins for definitive restorations. This study evaluated the optical, mechanical, and structural properties of different 3D-printed composite resins, considering variables such as post-curing time, flexural strength, color stability, and scanning electron microscopy (SEM) analysis. Various hybrid resin formulations were tested, each with different compositions of inorganic filler and polymer matrix proportions. For the methodology, specimens were printed following a standardized protocol, including printer calibration, resin temperature control, and post-curing at different durations (10, 20, and 30 minutes). Mechanical strength was assessed using a three-point bending test, while optical stability was determined by spectrophotometry and SEM analysis. Additionally, surface roughness and gloss evaluations were conducted before and after artificial aging cycles. The results indicated that resin composition significantly influences its properties. Resins with a higher inorganic filler content exhibited superior flexural strength and color stability, whereas those with lower filler content showed increased susceptibility to mechanical and optical variations. Post-curing time did not exert a statistically significant effect on mechanical strength, suggesting that shorter curing times may be equally effective. Microscopy analysis revealed structural differences among the tested materials, emphasizing the importance of homogeneous particle dispersion for optimal material performance. It is concluded that resin selection and the standardization of printing and post-curing protocols are critical factors in the clinical performance of 3D-printed restorations. This study highlights the need for further research on the long-term durability of these materials and their feasibility for definitive restorations in dental practice.

Keywords: Printing, three-dimensional. Composite resins. Mechanical tests. Microscopy. Treatment outcome.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 PROPOSIÇÃO	11
3 PUBLICAÇÕES	12
3.1 Publicação 1	13
3.2 Publicação 2	27
3.3 Publicação 3	41
4 CONCLUSÃO	64
REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

O avanço da odontologia digital transformou significativamente a fabricação de restaurações dentárias, particularmente com a introdução da tecnologia de impressão tridimensional (3D). Esse processo de fabricação permite a produção de estruturas dentárias altamente personalizadas, precisas e reproduzíveis, oferecendo uma alternativa viável aos métodos convencionais subtrativos, como fresagem e fundição¹. Além das aplicações clínicas, a sustentabilidade emergiu como uma vantagem chave da impressão 3D em comparação com técnicas subtrativas, como fresagem CAD/CAM. A fabricação aditiva utiliza apenas o material necessário para a fabricação, minimizando significativamente o desperdício. Essa característica é particularmente relevante no atual contexto global de maior conscientização ambiental e adoção de práticas sustentáveis². Estudos recentes destacaram o papel crescente da fabricação aditiva na odontologia restauradora, enfatizando sua capacidade de reduzir o desperdício de material e aumentar a relação custo-benefício em comparação com técnicas tradicionais². No entanto, desafios como a retração por polimerização, durabilidade do material e biocompatibilidade a longo prazo continuam sendo áreas de preocupação³.

A impressão 3D, também conhecida como fabricação aditiva, tem sido amplamente adotada na odontologia devido à sua capacidade de fabricar geometrias complexas com alta precisão. Várias técnicas, incluindo estereolitografia (SLA), processamento de luz digital (DLP) e jateamento de material, foram desenvolvidas para polimerizar resinas líquidas em restaurações sólidas. Dentre essas, SLA e DLP são particularmente favorecidas para aplicações dentárias devido à sua alta resolução e capacidade de produzir restaurações com detalhes finos⁴. No entanto, estudos comparativos recentes levantaram preocupações sobre as diferenças de precisão entre SLA e DLP, com alguns relatos sugerindo que restaurações impressas em DLP apresentam melhor adaptação marginal em comparação com as baseadas em SLA⁵. Além disso, fatores de pós-processamento, como limpeza, fotopolimerização adicional e condições de armazenamento, influenciam significativamente a precisão dimensional final das restaurações impressas⁶. Pesquisas também ressaltam o papel crítico do pós-processamento na otimização do desempenho de resinas impressas em 3D. Protocolos de fotopolimerização adicional, que envolvem exposição à luz UV

e tratamentos térmicos controlados, são fundamentais para melhorar a eficiência da polimerização. Esses processos contribuem para o aumento da resistência mecânica, maior dureza da superfície e maior estabilidade de cor. Além disso, a fotopolimerização eficaz minimiza a liberação de monômeros residuais e compostos potencialmente prejudiciais, melhorando assim a biocompatibilidade das restaurações dentárias¹⁵.

Resinas fotopolimerizáveis utilizadas na impressão 3D são compostas por oligômeros, monômeros, fotoiniciadores, estabilizantes e enchimentos inorgânicos⁷. A inclusão de enchimentos inorgânicos, como sílica, zircônia e alumina, melhora a resistência mecânica, resistência ao desgaste e propriedades estéticas da restauração final⁸. Um estudo de Revilla-León et al. demonstrou que o teor de enchimento e a distribuição das partículas na matriz de resina afetam significativamente a viscosidade e a imprimibilidade das resinas impressas em 3D, impactando, em última análise, seu desempenho clínico a longo prazo⁹. Além disso, uma concentração excessiva de enchimentos inorgânicos pode comprometer o processo de polimerização, levando a um aumento da fragilidade e redução da tenacidade à fratura¹⁰.

As propriedades mecânicas das resinas impressas em 3D são de extrema importância para seu sucesso clínico. Várias investigações demonstraram que a carga de enchimento afeta significativamente a resistência à flexão, resistência à fratura e comportamento de desgaste^{11,12}. Por exemplo, pesquisas mostraram que resinas nano-híbridas com uma proporção maior de enchimentos inorgânicos exibem propriedades mecânicas superiores em comparação com aquelas com menor teor de enchimento¹³. Por outro lado, um estudo por Jang et al. relatou que o grau de conversão em resinas altamente preenchidas pode ser comprometido devido ao aumento da dispersão da luz, levando a uma polimerização subótima e a um desempenho mecânico reduzido¹⁴. Isso destaca a necessidade de equilibrar o teor de enchimento e a eficiência da polimerização para garantir propriedades materiais otimizadas.

O comportamento óptico das resinas impressas em 3D é um fator chave para se obter restaurações esteticamente agradáveis. Parâmetros como translucidez, dispersão da luz e estabilidade da cor influenciam a integração visual do material com a dentição natural¹⁵.

4 CONCLUSÃO

A jornada de pesquisa apresentada nesta tese, através dos seus três artigos complementares, consolidou uma compreensão abrangente sobre o complexo desempenho mecânico, óptico e estrutural das resinas impressas em 3D destinadas a restaurações dentárias definitivas. Ficou evidente que a excelência desses materiais é uma orquestração delicada entre a sua composição intrínseca e a precisão dos protocolos de fabricação. Minha investigação demonstrou, primeiramente, que a microestrutura e a distribuição homogênea de cargas inorgânicas são pilares fundamentais para a integridade do material, com resinas contendo nanopartículas bem integradas apresentando uma arquitetura superior, que serve de base para um desempenho mecânico robusto. Subsequentemente, ao simular os desafios do ambiente bucal, como o desgaste erosivo-abrasivo e a pigmentação, reforcei a tese de que a composição do material é crucial para a sua resiliência, com algumas resinas evidenciando uma notável capacidade de preservar brilho e microdureza sob estresse. Por fim, minha análise sobre a resistência à flexão e a estabilidade da cor revelou que, embora o teor de carga inorgânica seja o fator primordial para a força mecânica, o processo de pós-polimerização desempenha um papel crítico e frequentemente subestimado na manutenção da estabilidade óptica a longo prazo. A observação de que tempos insuficientes de pós-polimerização podem comprometer drasticamente a estabilidade da cor das restaurações sublinha a imperatividade de protocolos rigorosos e otimizados. Em última análise, esta tese advoga que a seleção criteriosa de resinas e a estrita adesão a parâmetros de impressão e pós-polimerização são indispensáveis para garantir a previsibilidade clínica e a longevidade estética e funcional das restaurações dentárias impressas em 3D, instigando, assim, a contínua busca por padronização e otimização nesta promissora área da odontologia.

REFERÊNCIAS

1. Rekow ED. Digital dentistry: the new state of the art is it disruptive or destructive? *Dent Mater.* 2020; 36(1): 9–24.
2. Whitaker M. The history of 3D printing in healthcare. *Bull R Coll Surg Engl.* 2014; 96(7): 228-9.
3. Javaid M, Haleem A. Current status and applications of additive manufacturing in dentistry: a literature-based review. *J Oral Biol Craniofac Res.* 2019; 9(3): 179-85.
4. Ferracane JL. Resin composite—State of the art. *Dent Mater.* 2011;27(1):29–38.
5. Mitra SB, Wu D, Holmes BN. An application of nanotechnology in advanced dental materials. *J Am Dent Assoc.* 2003;134(10):1382–1390.
6. Zattera Aca, Morganti Fa, de Souza Balbinot G, Della Bona A, Collares Fm. The influence of filler load in 3D printing resin-based composites. *Dent Mater.* 2024;40(10):1041–1046.
7. Liu Y, Jin G, Lim JH, Kim JE. Effects of washing agents on the mechanical and biocompatibility properties of water washable 3D printing crown and bridge resin. *Sci Rep.* 2024;14:9909.
8. Sandmair MN, Kleber C, Ströbele DA, von See C. AFM analysis of a three-point flexure tested, 3D printing definitive restoration material for dentistry. *J Funct Biomater.* 2023;14(3):152.
9. Hosoda H, Yamada T, Inokoshi S. SEM and elemental analysis of composite resins. *J Prosthet Dent.* 1990;64(6):749–755.
10. Rastelli ANS, Jacomassi DP, Faloni APS, Queiroz TP, Rojas SS, Bernardi MIB, Bagnato VS, Hernandez AC. The filler content of the dental composite resins and their influence on different properties. *Microsc Res Tech.* 2012;75:758–765.
11. Randolph LD, Palin WM, Leloup G, Leprince JG. Filler characteristics of modern dental resin composites and their influence on physico-mechanical properties. *Dent Mater.* 2016;32(12):1586–1599.
12. Wang Z, Chiang MYM. System compliance dictates the effect of composite filler content on polymerization shrinkage stress. *Dent Mater.* 2016;32(4):551–560.

13. Paral SK, Lin D-Z, Cheng Y-L, Lin S-C, Jeng J-Y. A review of critical issues in high-speed vat photopolymerization. *Polymers*. 2023;15:2716.
14. Aydınoğlu A, Hazar Yoruç AB. Effects of silane-modified fillers on properties of dental composite resin. *Mater Sci Eng C*. 2017;79:382–389.
15. Del Rosario M, et al. The field guide to 3D printing in optical microscopy for life sciences. *Adv Biol*. 2022;6(4):2100994.