

RESSALVA

Atendendo a solicitação do(a) autor(a), o texto completo desse trabalho será disponibilizado no repositório a partir de 13/06/2028.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de São José dos Campos
Instituto de Ciência e Tecnologia

LAURA VIVIANA CALVACHE ARCILA

**CARACTERIZAÇÃO E RESISTÊNCIA MECÂNICA DE COROAS
TOTAIS EM RESINA HÍBRIDA PARA IMPRESSÃO 3D APÓS O
ENVELHECIMENTO HIDROTÉRMICO**

LAURA VIVIANA CALVACHE ARCILA

**CARACTERIZAÇÃO E RESISTÊNCIA MECÂNICA DE COROAS
TOTAIS EM RESINA HÍBRIDA PARA IMPRESSÃO 3D APÓS O
ENVELHECIMENTO HIDROTÉRMICO**

Tese de doutorado apresentada ao Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Campus de São José dos Campos, como parte dos requisitos para obtenção de título de DOUTORA, pelo Programa de Pós-Graduação CIÊNCIAS APLICADAS À SAÚDE BUCAL

Área: Próteses Dentária. Linha de pesquisa: Desempenho de materiais e técnicas em odontologia restauradora.

Orientadora: Prof. Tit. Marco Antonio Bottino

Co-orientadora: Profa. Dra. Nathália de Carvalho Ramos Ribeiro

São José dos Campos

2024

Instituto de Ciência e Tecnologia [internet]. Normalização de tese e dissertação [acesso em 2025]. Disponível em <http://www.ict.unesp.br/biblioteca/normalizacao>

Apresentação gráfica e normalização de acordo com as normas estabelecidas pelo Serviço de Normalização de Documentos da Seção Técnica de Referência e Atendimento ao Usuário e Documentação (STRAUD).

Arcila, Laura Viviana Calvache

Caracterização e resistência mecânica de coroas totais em resina híbrida para impressão 3D após o envelhecimento hidrotérmico / Laura Viviana Calvache Arcila. - São José dos Campos : [s.n.], 2024.
93 f. : il.

Tese (Doutorado em Ciências Aplicadas à Saúde Bucal) - Pós-Graduação em Ciências Aplicadas à Saúde Bucal - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, 2024.

Orientadora: Marco Antonio Bottino

Coorientadora: Nathália de Carvalho Ramos Ribeiro

1. Envelhecimento. 2. Estresse Mecânico. 3. Impressão 3D. 4. Materiais dentais. 5. Resistência de Materiais. I. Bottino, Marco Antonio, orient. II. Ribeiro, Nathália de Carvalho Ramos, coorient. III. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos. IV. Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho' - UNESP. V. Universidade Estadual Paulista (UNESP). VI. Título.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A pesquisa contribui para promover inovação sustentável na odontologia, melhorando o acesso a próteses de boa qualidade, para que sua longevidade seja favorável para a sociedade, economizando investimentos frequentes nas mesmas, e potencializando o uso de tecnologias de baixo custo, alinhando-se ao cenário econômico e social do Brasil, onde há desigualdades ao acesso de boa qualidade de tratamento à saúde bucal. A abordagem também valoriza a pesquisa científica no contexto da pós-graduação, estimulando avanços importantes na área.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The research contributes to promoting sustainable innovation in dentistry, improving access to high-quality prostheses that ensure longevity beneficial to society, reducing frequent investments in replacements, and enhancing the use of low-cost technologies. This aligns with Brazil's economic and social context, where inequalities in access to quality oral healthcare persist. The approach also values scientific research within postgraduate studies, encouraging significant advancements in the field.

BANCA EXAMINADORA

Marco Antonio Bottino (Orientador)

Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

Larissa Márcia Martins Alves

Universidade de São Paulo (USP)

Faculdade de Odontologia

Campus de Bauru

João Paulo Mendes Tribst

University of Amsterdam

Academic Centre for Dentistry Amsterdam (ACTA)

LA Amsterdã, Holanda

João Mauricio Ferraz da Silva

Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

Renata Marques de Melo Marinho

Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Instituto de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

São José dos Campos, 13 de Dezembro de 2024.

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a Deus por me dar a força e a coragem quando me senti fraca e com medo nos momentos desafiadores dessa caminhada.

A minha mãe Piedad, irmãos (Dani, Dieguin y Juanpa) e minha família inteira que sempre estiveram presentes de coração comigo desde a Colômbia, e foram minha base e suporte para não me deixar cair quando tive que parar esse propósito de vida por força maior.

A meu enamorado Daniel, que chegou na fase final deste sonho e fez dela a fase mais leve e feliz de todas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e à vida por me conceder saúde para vivenciar essa experiência profissional no Brasil. Quando era mais jovem, sonhava em deixar meu país para crescer profissionalmente, mas nunca imaginei que um dia estaria aqui, neste país tão lindo e acolhedor.

Minha gratidão ao meu orientador, Prof. Bottino, que me recebeu e apoiou desde o primeiro momento em que ingressei em sua equipe de pesquisa. Senti-me honrada e imensamente feliz quando o senhor me convidou a continuar na equipe durante o Doutorado, explorando um novo tema de estudo. Tenho um respeito e carinho enormes por sua orientação e sempre serei grata por seu apoio durante minha caminhada acadêmica, desde o Mestrado.

Agradeço também ao coordenador do curso, Prof. Alexandre, por confiar em mim e enxergar meu potencial desde a entrevista no processo seletivo. Sua dedicação, simpatia e apoio inestimáveis fizeram toda a diferença neste trabalho e em outros projetos ao longo desses anos.

À minha coorientadora, Profa. Nath, expresso minha gratidão por ser minha guia desde o Mestrado, ajudando-me a crescer no universo da pesquisa. Sua paciência e disposição para enfrentar novos desafios, como o tema deste trabalho, foram fundamentais. Sempre serei muito grata.

Meu agradecimento à Profa. Renata, por estar sempre disponível para esclarecer dúvidas com seu vasto conhecimento, mostrando-me como lidar com os desafios da pesquisa com paciência e serenidade. Tenho uma profunda admiração por você, tanto como pesquisadora quanto como mulher.

Ao Prof. João Maurício, minha gratidão por me acolher em seus projetos de extensão desde o primeiro ano do Mestrado e por ser meu mentor na clínica. Com sua calma e leveza, ensinou-me o caminho para me tornar uma boa profissional na área clínica. Sua orientação foi inspiradora e transformadora. Obrigada pelo apoio constante.

À Profa. Larissa e ao Prof. João Paulo, agradeço por aceitarem fazer parte da minha banca. Vocês foram grandes referências para mim desde o início do Mestrado, e sua simpatia, inteligência e competência me motivaram a seguir nessa trajetória. Sempre

lembrarei com carinho do impacto positivo que tiveram no meu desenvolvimento acadêmico.

Ao Prof. Tiago, agradeço pela disposição em compartilhar ideias e conhecimentos, além de suas contribuições valiosas para este trabalho.

Agradeço a toda a equipe de pesquisa, especialmente por me apoiarem quando precisei fazer uma pausa na caminhada. Valorizo profundamente o tempo e esforço que dedicaram para garantir o andamento desta pesquisa e dos projetos envolvidos. Retomar após a pausa foi desafiador, mas o apoio de vocês foi indispensável.

Aos amigos que a UNESP me deu de presente e que se tornaram minha família no Brasil – Amanda, as Laris, Laura, Karina, Carol, Elisa, Amir e todos os colegas da pós-graduação –, vocês foram essenciais para que eu cumprisse esse propósito de vida de maneira mais leve. Essa amizade é para a vida toda.

*Minha gratidão à **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)** pela bolsa de doutorado- **números de processos:** 88887.613321/2021-00 / 88887.713748/2022-00, que facilitou esse processo durante minha trajetória na pós-graduação. À **Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP)** pela bolsa concedida à minha aluna de iniciação científica - **número de processo:** 2021/09652-7, Ana Júlia, cujo projeto contribuiu diretamente para esta tese. Agradeço também a todos os professores e funcionários da UNESP que, de alguma forma, facilitaram cada etapa da minha jornada.*

E por ultimo, mas igual de importante, a mi familia, infinitamente agradecida por la motivación y el entusiasmo que siempre me han dado para poder soportar la distancia de los que amo durante estos 6 años aqui em Brasil. Especialmente a mi madre y a mis hermanos, ustedes son mi base y mis raíces e hicieron que todo esto sucediera juntos. Mami, tia nana, no se imaginan cuanto soñé que parte de mi familia estuviera aqui celebrando conmigo esta etapa, que no fue fácil lejos de ustedes, pero estoy muy agradecida y feliz de tenerlas y abrazarlas em este momento.

Daniel você chegou de surpresa neste ano onde estava fechando esse ciclo, e sou imensamente grata pelo seu apoio incondicional desde o primeiro dia, respeitou meus momentos de trabalho, nos que também me ajudou e me deu leveza nos momentos desafiadores que leva à conclusão de um ciclo, sou feliz de compartilhar esse momento com você, minha família aqui no Brasil.

Ficam curtas as palavras e os a agradecimentos para expressar toda a gratidão que sento, pois me fizeram crescer muito como profissional e pessoa, MUITO OBRIGADA.

"Acredite em si mesmo e em tudo o que você é. Saiba que há algo dentro de você que é maior do que qualquer obstáculo". Christian D. Larson

RESUMO

Calvache ALV. Caracterização e Resistência Mecânica de Coroas Totais em Resina Híbrida para Impressão 3D após o Envelhecimento Hidrotérmico [tese]. São José dos Campos (SP): Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia; 2023.

O objetivo deste trabalho foi caracterizar uma resina híbrida de impressão 3D, suas propriedades ópticas e mecânicas, também como seu comportamento mecânico em coroas totais fabricadas por impressão 3D, antes e após o envelhecimento hidrotérmico. O estudo foi subdividido em duas etapas: na primeira foi realizada a caracterização estrutural, análise das propriedades mecânicas e ópticas da resina híbrida (NanoLab, Wilcos) em espécimes geométricos em diferentes tempos de pós-polimerização (0, 16, 32 e 60 minutos), antes e após o envelhecimento hidrotérmico. Na segunda parte, foi avaliada a resistência à fratura de coroas da mesma resina do primeiro molar superior, tendo como grupo controle coroas fresadas a partir de blocos de resina para CAD/CAM (Evolux hybrid, Blue Dent) após o envelhecimento hidrotérmico. Foi avaliada a distribuição de tensões pela Análise de Elementos Finitos (FEA) das coroas impressa após envelhecimento. Barras e quadrados foram desenhados para a primeira parte, e coroas para a segunda parte, em um software de modelamento (Rhinoceros, 6.0), e foram impressos em uma impressora LCD (Anycubic Photon Mono Se 3D), pós-polimerizados em um equipamento de cura (Anycubic Cure 2.0) nos diferentes tempos de pós-cura. A caracterização foi via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), espectroscopia de energia (EDS), gravimetria para análise da composição química, e Espectroscopia Infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR) para identificar o grau de conversão. Para as propriedades mecânicas e ópticas, foi realizada flexão biaxial, microdureza, módulo elástico, avaliação da cor e translucidez. Todos os testes foram realizados antes e depois do envelhecimento hidrotérmico. A microestrutura mostra porosidades na superfície. A carga orgânica da resina foi de 46,75%, e a inorgânica de 53,24%. O aumento do tempo de pós-cura melhorou o grau de conversão e as propriedades mecânicas, e estabilidade de cor, enquanto o envelhecimento hidrotérmico impactou negativamente a dureza e o módulo de elasticidade, mas aumentou a resistência à flexão. Nas coroas impressas foi menor a resistência à fratura após o envelhecimento, sendo o grupo fresado inicial com a maior resistência. A distribuição de tensões nas coroas impressas foi semelhante após o envelhecimento hidrotérmico, embora o grupo envelhecido tenha demonstrado maior resiliência e tenacidade à fratura. Concluiu-se que tanto o comportamento mecânico quanto o óptico da resina híbrida impressa são significativamente influenciados pela microestrutura, composição química, tempos de pós-polimerização e envelhecimento hidrotérmico. O modo de processamento das coroas também influenciou sua resistência, sendo as coroas fresadas superiores às impressas.

Palavras-chave: Envelhecimento; Estresse Mecânico; Impressão 3D; Materiais dentais; Resistência de Materiais.

ABSTRACT

Arcila CLV. Characterization and Mechanical Strength of Full Crowns in Hybrid Resin for 3D Printing After Hydrothermal Aging [research project]. São José dos Campos (SP): São Paulo State University (Unesp), Institute of Science and Technology; 2024.

The objective of this work was to characterize a 3D-printed nanohybrid resin (NanoLab, Wilcos), its optical and mechanical properties, as well as its mechanical behavior in 3D-printed full crowns, before and after hydrothermal aging. The study was subdivided into two stages: in the first, the structural characterization, mechanical and optical properties of the resin were assessed on geometric specimens at different post-polymerization times (0, 16, 32, and 60 minutes) after hydrothermal aging. In the second part, the fracture resistance of the nanohybrid resin (NanoLab, Wilcos) of the upper first molar was evaluated, using CAD/CAM-milled crowns from resin blocks (Evolux hybrid, Blue Dent) as the control group after hydrothermal aging, as well as the failure risk (Fr) by Finite Element Analysis (FEA) of the printed crowns. Bars and squares were designed for the first part, and crowns for the second part, in a modeling software (Rhinoceros, 6.0), and were printed on an LCD printer (Anycubic Photon Mono Se 3D), post-cured in a curing device (Anycubic Cure 2.0) at different post-curing times. Characterization was performed via Scanning Electron Microscopy, energy spectroscopy (EDS), gravimetry to determine the chemical composition and filler content of the resin, and Fourier-transform Infrared Spectroscopy (FTIR) to identify the degree of conversion of the resin. For mechanical and optical properties, biaxial flexural strength, microhardness, elastic modulus, color, and translucency were measured. All tests were performed before and after hydrothermal aging. The microstructure reveals surface porosities. The organic and inorganic content of the resin was 46.75%, and 53.24%, respectively. Increasing the post-curing time improved the degree of conversion, mechanical properties, and color stability, while hydrothermal aging negatively impacted hardness and elastic modulus but increased flexural strength. In the printed crowns, fracture resistance was lower after aging, with the initial milled group showing the highest resistance. The stress distribution in the printed crowns was similar after hydrothermal aging, although the aged group exhibited greater resilience and fracture toughness. It was concluded that both the mechanical and optical behavior of the printed nanohybrid resin are significantly influenced by microstructure, chemical composition, post-curing times, and hydrothermal aging. The processing method of the crowns also impacted their resistance, with milled crowns being superior to printed ones.

Keywords: Aging; Mechanical Stress; 3D Printing; Dental Materials; Material Strength.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1 História da Impressão 3D, como começou?	15
2.2 Fluxo de trabalho da Impressão 3D na Odontologia.....	15
2.3 Métodos aditivos durante a impressão 3D	16
2.4 Vantagens e limitações dos processos aditivos	18
2.5 Precisão da impressão 3D	20
2.6 Materiais de impressão e suas propriedades mecânicas.....	21
2.7 Envelhecimento hidrotérmico de materiais de impressão.....	23
2.8 Aplicações de impressão 3D na Odontologia	25
3 PROPOSIÇÃO	27
3.1 Objetivos Específicos	27
4 MATERIAL E MÉTODOS	29
4.1 Confeção dos espécimes.....	29
4.2 Caracterização microestrutural	38
4.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura e EDS	38
4.2.2 Gravimetria.....	38
4.2.3 FT-IR (Espectroscopia Infravermelho transformada de Fourier)	39
4.3 Propriedades mecânicas.....	43
4.3.1 Módulo Elástico	43
4.3.2 Ensaio de Resistência à Flexão.....	45
4.3.3 Dureza Vickers	46
4.4 Propriedades ópticas.....	47
4.4.1 Medição de mudança de cor e parâmetros de translucidez	47
4.5 Envelhecimento Hidrotérmico	48
4.6 Carga para Fratura das coroas	49

4.7 Fractografia.....	50
4.8 Análise de Elementos Finitos	51
5 RESULTADOS	55
5.1 Caracterização de resina nanohíbrida para impressão 3D	55
5.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura.....	55
5.1.2 FT-IR	57
5.1.3 Gravimetria.....	59
5.1.4 EDS (Espectroscopia de Energia Dispersiva de Raios-X)	60
5.2 Propriedades mecânicas da resina nanohíbrida para impressão 3D	62
5.2.1 Resistência à Flexão Biaxial	62
5.2.2 Dureza Vickers	63
5.2.3 Módulo Elástico	64
5.3 Propriedades ópticas da resina hibrida para impressão 3D (Cor e Translucidez)	65
5.4 Carga para fratura das coroas	66
5.5 FT-IR das coroas impressas.....	67
5.6 Fractografia.....	68
5.7 Análise de Elementos Finitos das coroas impressas	72
6 DISCUSSÃO.....	76
7 CONCLUSÃO.....	82
REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica impulsionada pela engenharia computadorizada, como a tecnologia CAD/CAM (*Computer-aided design/computer-aided manufacturing*) e a impressão 3D, tem causado um impacto transformador na odontologia.

A técnica aditiva através da impressão 3D, também reconhecida como prototipagem rápida, cria peças ao acrescentar camadas sequenciais, eliminando as limitações geométricas que poderiam impedir a impressão. Além disso, permite a criação de detalhes minuciosos e geometrias internas complexas, que estariam restritas pelo método de fabricação subtrativa (Andonović and Vrtanoski, 2010; Keating et al., 2008; Liu et al., 2006; Van Noort, 2012).

A impressão 3D já se tornou popular na odontologia para fabricação de modelos dentais, guias cirúrgicos, dispositivos oclusais, e também para a confecção de coroas totais, restaurações parciais, facetas e próteses fixas (Abduo et al., 2014; Liu et al., 2006; Van Noort, 2012; Tahayeri et al., 2018).

Com o propósito de realizar restaurações dentárias de longa duração, tem-se incorporado nanopartículas de cerâmica às resinas utilizadas na impressão 3D. Essas resinas têm como composição base fotopolímeros à base de acrílico (Aati et al., 2022, 2021; Borella et al., 2023; Mangal et al., 2020). A introdução de carga inorgânica, como nanopartículas de cerâmica, pode aprimorar tanto as propriedades mecânicas quanto estéticas das resinas empregadas na impressão 3D. Isso inclui o aumento da resistência à flexão, do módulo elástico e da dureza. Além disso, de acordo com os tempos de pós-polimerização, pode haver variações na cor do material (Kim et al., 2020; Tieh et al., 2022).

Por outro lado, a influência do envelhecimento térmico em resinas poliméricas para restaurações temporárias já é amplamente investigada na literatura. Esse processo pode impactar significativamente as propriedades físicas das resinas, tendo como base a composição, os parâmetros de processamento, o método de fabricação e o protocolo de envelhecimento (Alp et al., 2018; Astudillo-Rubio et al., 2018; Keßler et al., 2021); sendo possível observar um aumento na resistência à flexão das resinas após envelhecimento hidrotérmico (Bergamo et al., 2022). No entanto, existem poucos estudos que investigaram essas propriedades sob condições de termociclagem de

resinas para restaurações finais (longa duração) por impressão 3D.

É crucial destacar que a compreensão da composição química e a caracterização do material de impressão são necessárias para abarcar não apenas o seu comportamento mecânico, mas também suas propriedades ópticas. Essas propriedades desempenham um papel fundamental na obtenção de um desempenho satisfatório para restaurações ou peças protéticas de longa duração utilizadas na cavidade bucal.

Desta forma, esse estudo tem o objetivo de caracterizar e estudar as propriedades ópticas e resistência mecânica de coroas totais de longa duração fabricadas em resina nanohíbrida impressas em 3D comparadas à materiais resinosos fabricados por CAD/CAM. Entretanto, vale salientar que o objetivo principal não será a comparação entre os materiais, e sim testar a viabilidade de utilização a longo prazo e o comportamento mecânico das coroas impressas envelhecidas hidrotermicamente. Para isso também será avaliada a caracterização microestrutural, propriedades ópticas e mecânicas, em diferentes tempos de pós-polimerização, e distribuição de tensões após o envelhecimento hidrotérmicos, que podem afetar o comportamento final do material impresso.

7 CONCLUSÃO

Dentro das limitações deste estudo, concluiu-se que:

- Tanto o comportamento mecânico quanto o óptico da resina híbrida para impressão 3D são significativamente influenciados por fatores como microestrutura, composição química, tempos de pós-polimerização e envelhecimento hidrotérmico;
- Após o envelhecimento, houve uma redução na dureza, módulo elástico e resistência à flexão biaxial;
- Um tempo adequado de pós-polimerização, sugerido em aproximadamente 20 minutos, é essencial para garantir uma estabilidade de cor clinicamente aceitável e alcançar propriedades mecânicas ideais, embora isso possa impactar a translucidez do material;
- O modo de processamento das coroas também influenciou a carga para fratura, sendo as coroas fresadas superiores às impressas;
- O comportamento das coroas tanto impressas como fresadas foram semelhantes após o envelhecimento hidrotérmico de 25.000 ciclos, no entanto o grupo inicial impresso apresentou a maior carga para fratura em comparação aos envelhecidos;
- A distribuição de tensões nas coroas impressas foi semelhante após o envelhecimento hidrotérmico, embora o grupo envelhecido tenha demonstrado maior resiliência e tenacidade à fratura.

REFERÊNCIAS

- Aati S, Akram Z, Ngo H, Fawzy AS. Development of 3D printed resin reinforced with modified ZrO₂ nanoparticles for long-term provisional dental restorations. *Dent Mater*. 2021;37(6):e360–74. doi: 10.1016/j.dental.2021.02.010. PMID: 33663884.
- Aati S, Shrestha B, Fawzy A. Cytotoxicity and antimicrobial efficiency of ZrO₂ nanoparticles reinforced 3D printed resins. *Dent Mater*. 2022;38(8):1432–42. doi: 10.1016/j.dental.2022.06.030. PMID: 35792014.
- Abduo J, Lyons K, Bennamoun M. Trends in computer-aided manufacturing in prosthodontics: A review of the available streams. *Int J Dent*. 2014;2014(783948):15. doi: 10.1155/2014/783948.
- Akiba S, Takamizawa T, Tsujimoto A, Moritake N, Ishii R, Barkmeier WW, et al. Influence of different curing modes on flexural properties, fracture toughness, and wear behavior of dual-cure provisional resin-based composites. *Dent Mater J*. 2019;38(5):728–37. doi: 10.4012/dmj.2018-300. PMID: 31231107.
- Alharbi N, Osman R, Wismeijer D. Effects of build direction on the mechanical properties of 3D-printed complete coverage interim dental restorations. *J Prosthet Dent*. 2016;115(6):760–7. doi: 10.1016/j.prosdent.2015.12.002. PMID: 26803175.
- Alp G, Murat S, Yilmaz B. Comparison of Flexural Strength of Different CAD/CAM PMMA-Based Polymers. *J Prosthodont*. 2018;28(2):e491–5. doi: 10.1111/jopr.12755. PMID: 29377319.
- Andonović V, Vrtanoski G. Growing rapid prototyping as a technology in dental medicine 2010;29(1):31–9.
- Anusavice JL, Shen C RH. *Phillips materiais dentários*. 12th Rio d. Elsevier Brasil; 2013.
- Aragón MLC, Pontes LF, Bichara LM, Flores-Mir C, Normando D. Validity and

reliability of intraoral scanners compared to conventional gypsum models measurements: A systematic review. *Eur J Orthod*. 2016;38(4):429–34. doi: 10.1093/ejo/cjw033. PMID: 27266879.

ASTM [internet]. Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies, West Conshohocken, PA. Standard terminology for additive manufacturing - general principles and terminology 2009.

Astudillo-Rubio D, Delgado-Gaete A, Bellot-Arcís C, Montiel-Company JM, Pascual-Moscardó A, Almerich-Silla JM. Mechanical properties of provisional dental materials: A systematic review and meta-analysis. *PLoS One*. 2018;13(2):1–19. doi: 10.1371/journal.pone.0193162. PMID: 29489883.

Barazanchi A, Li KC, Al-Amleh B, Lyons K, Waddell JN. Additive Technology: Update on Current Materials and Applications in Dentistry. *J Prosthodont*. 2017;26(2):156–63. doi: 10.1111/jopr.12510. PMID: 27662423.

Barszczewska-Rybarek IM, Chrószcz MW, Chladek G. Novel urethane-dimethacrylate monomers and compositions for use as matrices in dental restorative materials. *Int J Mol Sci*. 2020;21(7):1–23. doi: 10.3390/ijms21072644. PMID: 32290163.

Bergamo ETP, Campos TMB, Piza MMT, Gutierrez E, Lopes ACO, Witek L, et al. Temporary materials used in prosthodontics: The effect of composition, fabrication mode, and aging on mechanical properties. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2022;133(June). doi: 10.1016/j.jmbbm.2022.105333. PMID: 35839630.

Birnbaum NS AH. Dental impressions using 3D digital scanners: virtual becomes reality. *Compend Contin Educ Dent*. 2008;29(8):494, 496, 498-505. PMID: 18935788.

Borella PS, Alvares LAS, Ribeiro MTH, Moura GF, Soares CJ, Zancopé K, et al. Physical and mechanical properties of four 3D-printed resins at two different thick layers: An in vitro comparative study. *Dent Mater*. 2023;39(8):686–92. doi:

10.1016/j.dental.2023.06.002.

Buergers R, Rosentritt M, Handel G. Bacterial adhesion of *Streptococcus mutans* to provisional fixed prosthodontic material. *J Prosthet Dent*. 2007;98(6):461–9. doi: 10.1016/S0022-3913(07)60146-2. PMID: 18061740.

Campos F, Valandro LF, Feitosa SA, Kleverlaan CJ, Feilzer AJ, De Jager N, et al. Adhesive cementation promotes higher fatigue resistance to zirconia crowns. *Oper Dent*. 2017;42(2):215–24. doi: 10.2341/16-002-L. PMID: 27892840.

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. *J Prosthet Dent*. 2020:1–6. doi: 10.1016/j.prosdent.2020.09.003.

Chung SM, Yap AUJ, Chandra SP, Lim CT. Flexural strength of dental composite restoratives: Comparison of biaxial and three-point bending test. *J Biomed Mater Res - Part B Appl Biomater*. 2004;71(2):278–83. doi: 10.1002/jbm.b.30103. PMID: 15386492.

Chung YJ, Park JM, Kim TH, Ahn JS, Cha HS, Lee JH. 3D printing of resin material for denture artificial teeth: Chipping and indirect tensile fracture resistance. *Materials (Basel)*. 2018;11(10):1–13. doi: 10.3390/ma11101798.

Cotes C, Cardoso M, de Melo RM, Valandro LF, Bottino MA. Effect of composite surface treatment and aging on the bond strength between a core build-up composite and a luting agent. *J Appl Oral Sci*. 2015;23(1):71–8. doi: 10.1590/1678-775720140113. PMID: 25760269.

Dal Piva AM de O, Tribst JPM, Borges ALS, Souza RO de A e., Bottino MA. CAD-FEA modeling and analysis of different full crown monolithic restorations. *Dent Mater*. 2018;34(9):1342–50. doi: 10.1016/j.dental.2018.06.024. PMID: 29934125.

Dawood A, Marti BM, Sauret-Jackson V, Darwood A. 3D printing in dentistry. *Br Dent J*. 2015;219(11):521–9. doi: 10.1038/sj.bdj.2015.914. PMID: 26657435.

Delgadoi ANHS, Young AM. Methacrylate peak determination and selection recommendations using ATR-FTIR to investigate polymerisation of dental methacrylate mixtures. *PLoS One*. 2021;16(6 June):1–13. doi: 10.1371/journal.pone.0252999. PMID: 34106972.

Denry I, Kelly JR. Emerging ceramic-based materials for dentistry. *J Dent Res*. 2014;93(12):1235–42. doi: 10.1177/0022034514553627. PMID: 25274751.

Ellakany P, Fouda SM, Mahrous AA, AlGhamdi MA, Aly NM. Influence of CAD/CAM Milling and 3D-Printing Fabrication Methods on the Mechanical Properties of 3-Unit Interim Fixed Dental Prosthesis after Thermo-Mechanical Aging Process. *Polymers (Basel)*. 2022;14(19). doi: 10.3390/polym14194103.

Ender A, Mehl A. Accuracy of complete-Arch dental impressions: A new method of measuring trueness and precision. *J Prosthet Dent*. 2013;109(2):121–8. doi: 10.1016/S0022-3913(13)60028-1. PMID: 23395338.

Fabian Fonzar R, Carrabba M, Sedda M, Ferrari M, Goracci C, Vichi A. Flexural resistance of heat-pressed and CAD-CAM lithium disilicate with different translucencies. *Dent Mater*. 2017;33(1):63–70. doi: 10.1016/j.dental.2016.10.005. PMID: 27855994.

Fahad M, Dickens P, Gilbert M. Novel polymeric support materials for jetting based additive manufacturing processes. *Rapid Prototyp J*. 2013;19(4):230–9. doi: 10.1108/13552541311323245.

Gale MS, Darvell BW. Thermal cycling procedures for laboratory testing of dental restorations. *J Dent*. 1999;27(2):89–99. doi: 10.1016/S0300-5712(98)00037-2. PMID: 10071465.

Gengenbach TR, Griesser HJ. Deposition conditions influence the postdeposition oxidation of methyl methacrylate plasma polymer films. *J Polym Sci Part A Polym Chem*. 1998;36(6):985–1000. doi: 10.1002/(SICI)1099-0518(19980430)36:6<985::AID-POLA14>3.0.CO;2-H.

Gere JM SP. Tension, ompression and shear. In: Mechanics of materials. 1984.

Ghavami-Lahiji M, Firouzmanesh M, Bagheri H, Jafarzadeh Kashi TS, Razazpour F, Behroozibakhsh M. The effect of thermocycling on the degree of conversion and mechanical properties of a microhybrid dental resin composite. *Restor Dent Endod*. 2018;43(2):1–12. doi: 10.5395/rde.2018.43.e26.

Groth C, Kravitz ND, Jones PE, Graham JW, Redmond WR. Three-dimensional printing technology. *J Clin Orthod*. 2014;48(8):475–85. PMID: 25226040.

Hada T, Kanazawa M, Iwaki M, Arakida T, Soeda Y, Katheng A, et al. Effect of printing direction on the accuracy of 3D-printed dentures using stereolithography technology. *Materials (Basel)*. 2020;13(15):1–12. doi: 10.3390/ma13153405.

Hatamleh MM, Watson J. Construction of an Implant-Retained Auricular Prosthesis with the Aid of Contemporary Digital Technologies: A Clinical Report. *J Prosthodont*. 2013;22(2):132–6. doi: 10.1111/j.1532-849X.2012.00916.x. PMID: 22947024.

Horne MR. Formulas for stress and strain. vol. 3 1954. doi: 10.1016/0022-5096(54)90042-3.

Huang HL, Hsu JT, Fuh LJ, Lin DJ, Chen MYC. Biomechanical simulation of various surface roughnesses and geometric designs on an immediately loaded dental implant. *Comput Biol Med*. 2010;40(5):525–32. doi: 10.1016/j.combiomed.2010.03.008. PMID: 20385379.

Jang Y, Sim JY, Park JK, Kim WC, Kim HY, Kim JH. Accuracy of 3-unit fixed dental prostheses fabricated on 3D-printed casts. *J Prosthet Dent*. 2020;123(1):135–42. doi: 10.1016/j.prosdent.2018.11.004. PMID: 31027960.

Katkar RA, Taft RM, Grant GT. 3D Volume Rendering and 3D Printing (Additive Manufacturing). *Dent Clin North Am*. 2018;62(3):393–402. doi: 10.1016/j.cden.2018.03.003. PMID: 29903557.

Keating AP, Knox J, Bibb R, Zhurov AI. A comparison of plaster, digital and reconstructed study model accuracy. *J Orthod*. 2008;35(3):191–201. doi: 10.1179/146531207225022626. PMID: 18809782.

Kelly JR, Rungruanganunt P, Hunter B, Vailati F. Development of a clinically validated bulk failure test for ceramic crowns. *J Prosthet Dent*. 2010;104(4):228–38. doi: 10.1016/S0022-3913(10)60129-1.

Keßler A, Hickel R, Ilie N. In vitro investigation of the influence of printing direction on the flexural strength, flexural modulus and fractographic analysis of 3d-printed temporary materials. *Dent Mater J*. 2021;40(3):641–9. doi: 10.4012/dmj.2020-147. PMID: 33456026.

Kessler A, Hickel R, Reymus M. 3D Printing in Dentistry — State of the Art 2019;45(1):30–40. doi: <http://doi.org/10.2341/18-229-L>.

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 Crown and Bridge Materials. *Polymers (Basel)*. 2020;12(2762):1–20.

Kim JE, Choi WH, Lee D, Shin Y, Park SH, Roh BD, et al. Color and translucency stability of three-dimensional printable dental materials for crown and bridge restorations. *Materials (Basel)*. 2021;14(3):1–15. doi: 10.3390/ma14030650. PMID: 33572545.

De Kok P, Kleverlaan CJ, De Jager N, Kuijs R, Feilzer AJ. Mechanical performance of implant-supported posterior crowns. *J Prosthet Dent*. 2015;114(1):59–66. doi: 10.1016/j.prosdent.2014.10.015. PMID: 25819357.

Kosmač T, Oblak C, Jevnikar P, Funduk N, Marion L. The effect of surface grinding and sandblasting on flexural strength and reliability of Y-TZP zirconia ceramic. *Dent Mater*. 1999;15(6):426–33. doi: 10.1016/S0109-5641(99)00070-6.

Lal K, White GS, Morea DN, Wright RF. Use of stereolithographic templates for

surgical and prosthodontic implant planning and placement. Part I. The concept. *J Prosthodont*. 2006;15(1):51–8. doi: 10.1111/j.1532-849X.2006.00069.x. PMID: 16433652.

Leprince JG, Lamblin G, Devaux J, Dewaele M, Mestdagh M, Palin WM, et al. Irradiation modes' impact on radical entrapment in photoactive resins. *J Dent Res*. 2010;89(12):1494–8. doi: 10.1177/0022034510384624. PMID: 20940363.

Leprince JG, Palin WM, Hadis MA, Devaux J, Leloup G. Progress in dimethacrylate-based dental composite technology and curing efficiency. *Dent Mater*. 2013;29(2):139–56. doi: 10.1016/j.dental.2012.11.005. PMID: 23199807.

Liu Q, Leu MC, Schmitt SM. Rapid prototyping in dentistry: Technology and application. *Int J Adv Manuf Technol*. 2006;29(3–4):317–35. doi: 10.1007/s00170-005-2523-2.

Ma L, Guess PC, Zhang Y. Load-bearing properties of minimal-invasive monolithic lithium disilicate and zirconia occlusal onlays: Finite element and theoretical analyses. *Dent Mater*. 2013;29(7):742–51. doi: 10.1016/j.dental.2013.04.004. PMID: 23683531.

Mangal U, Seo JY, Yu J, Kwon JS, Choi SH. Incorporating aminated nanodiamonds to improve the mechanical properties of 3d-printed resin-based biomedical appliances. *Nanomaterials*. 2020;10(5):1–17. doi: 10.3390/nano10050827.

Melchels FPW, Feijen J, Grijpma DW. A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering. *Biomaterials*. 2010;31(24):6121–30. doi: 10.1016/j.biomaterials.2010.04.050. PMID: 20478613.

Mitteramskogler G, Gmeiner R, Felzmann R, Gruber S, Hofstetter C, Stampfl J, et al. Light curing strategies for lithography-based additive manufacturing of customized ceramics. *Addit Manuf*. 2014;1:110–8. doi: 10.1016/j.addma.2014.08.003.

Miyazaki T, Hotta Y, Kunii J, Kuriyama S, Tamaki Y. A review of dental CAD/CAM:

Current status and future perspectives from 20 years of experience. *Dent Mater J*. 2009;28(1):44–56. doi: 10.4012/dmj.28.44.

Najeeb S, Zafar MS, Khurshid Z, Siddiqui F. Applications of polyetheretherketone (PEEK) in oral implantology and prosthodontics. *J Prosthodont Res*. 2016;60(1):12–9. doi: 10.1016/j.jpor.2015.10.001. PMID: 26520679.

Van Noort R. The future of dental devices is digital. *Dent Mater*. 2012;28(1):3–12. doi: 10.1016/j.dental.2011.10.014. PMID: 22119539.

Prause E, Malgaj T, Kocjan A, Beuer F, Hey J, Jevnikar P, et al. Mechanical properties of 3D-printed and milled composite resins for definitive restorations: An in vitro comparison of initial strength and fatigue behavior. *J Esthet Restor Dent*. 2024;36(2):391–401. doi: 10.1111/jerd.13132. PMID: 37680013.

Puebla K, Arcaute K, Quintana R, Wicker RB. Effects of environmental conditions, aging, and build orientations on the mechanical properties of ASTM type i specimens manufactured via stereolithography. *Rapid Prototyp J*. 2012;18(5):374–88. doi: 10.1108/13552541211250373.

Quan H, Zhang T, Xu H, Luo S, Nie J, Zhu X. Photo-curing 3D printing technique and its challenges. *Bioact Mater*. 2020;5(1):110–5. doi: 10.1016/j.bioactmat.2019.12.003.

Ramos GF, Ramos NC, Alves LMM, Kaizer MR, Borges ALS, Campos TMB, et al. W. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2021;119(September 2020):104438. doi: 10.1016/j.jmbbm.2021.104438. PMID: 33798936.

Reis AFN, Borges ALS, Paradella TC, da Silva de Assis RAS, Valandro LF, de Melo RM. Effect of resin cement elastic modulus on the biaxial flexural strength and structural reliability of an ultra-thin lithium disilicate glass–ceramic material. *Clin Oral Investig*. 2023;27(2):787–96. doi: 10.1007/s00784-022-04836-9. PMID: 36576566.

Revilla-León M, Özcan M. Additive Manufacturing Technologies Used for Processing Polymers: Current Status and Potential Application in Prosthetic Dentistry. *J*

Prosthodont. 2019;28(2):146–58. doi: 10.1111/jopr.12801. PMID: 29682823.

Sampaio CS, Niemann KD, Schweitzer DD, Hirata R, Atria PJ. Microcomputed tomography evaluation of cement film thickness of veneers and crowns made with conventional and 3D printed provisional materials. *J Esthet Restor Dent*. 2020(July):1–9. doi: 10.1111/jerd.12651. PMID: 32937028.

Sculpteo A Brand of BASF [internet]. . Available from: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/basics-of-3d-printing/the-history-of-3d-printing/>.

Shim JS, Kim JE, Jeong SH, Choi YJ, Ryu JJ. Printing accuracy, mechanical properties, surface characteristics, and microbial adhesion of 3D-printed resins with various printing orientations. *J Prosthet Dent*. 2020;124(4):468–75. doi: 10.1016/j.prosdent.2019.05.034. PMID: 31810611.

Souza ACO, Xavier TA, Platt JA, Borges ALS. Effect of base and inlay restorative material on the stress distribution and fracture resistance of weakened premolars. *Oper Dent*. 2015;40(4):E158–66. doi: 10.2341/14-229-L. PMID: 25764042.

Stansbury JW, Idacavage MJ. 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. *Dent Mater*. 2016;32(1):54–64. doi: 10.1016/j.dental.2015.09.018. PMID: 26494268.

Tahayeri A, Morgan MC, Fugolin AP, Bompolaki D, Athirasala A, Pfeifer CS, et al. 3D printed versus conventionally cured provisional crown and bridge dental materials. *Dent Mater*. 2018;34(2):192–200. doi: 10.1016/j.dental.2017.10.003. PMID: 29110921.

Tieh MT, Waddell JN, Choi JJE. Optical and mechanical properties of conventional, milled and 3D-printed denture teeth. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2022;126(October 2021):105061. doi: 10.1016/j.jmbbm.2021.105061. PMID: 34963102.

Tymrak BM, Kreiger M, Pearce JM. Mechanical properties of components fabricated

with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Mater Des.* 2014;58:242–6. doi: 10.1016/j.matdes.2014.02.038.

Urrios A, Parra-Cabrera C, Bhattacharjee N, Gonzalez-Suarez AM, Rigat-Brugarolas LG, Nallapatti U, et al. 3D-printing of transparent bio-microfluidic devices in PEG-DA. *Lab Chip.* 2016;16(12):2287–94. doi: 10.1039/c6lc00153j. PMID: 27217203.

Vandenbroucke B, Kruth J-P. Selective Laser Melting of Biocompatible Metals for Rapid. *Rapid Prototyp J.* 2007;13(4):148–59.

Vijay Pal Singh. Rapid prototyping, materials for RP and applications of RP. *Int J Eng Res Sci.* 2013;4:473–480.

Yao J, Li J, Wang Y, Huang H. Comparison of the flexural strength and marginal accuracy of traditional and CAD/CAM interim materials before and after thermal cycling. *J Prosthet Dent.* 2014;112(3):649–57. doi: 10.1016/j.prosdent.2014.01.012. PMID: 24721504.

Yao Q, Morton D, Eckert GJ, Lin WS. The effect of surface treatments on the color stability of CAD-CAM interim fixed dental prostheses. *J Prosthet Dent.* 2021;126(2):248–53. doi: 10.1016/j.prosdent.2020.05.017. PMID: 32829886.

Yeung M, Abdulmajeed A, Carrico CK, Deeb GR, Bencharit S. Accuracy and precision of 3D-printed implant surgical guides with different implant systems: An in vitro study. *J Prosthet Dent.* 2020;123(6):821–8. doi: 10.1016/j.prosdent.2019.05.027. PMID: 31653399.

Yi YJ, Kelly JR. Effect of occlusal contact size on interfacial stresses and failure of a bonded ceramic: FEA and monotonic loading analyses. *Dent Mater.* 2008;24(3):403–9. doi: 10.1016/j.dental.2007.06.017. PMID: 17698187.

Zhang Z chen, Li P lun, Chu F ting, Shen G. Influence of the three-dimensional printing technique and printing layer thickness on model accuracy. *J Orofacc Orthop.* 2019;80(4):194–204. doi: 10.1007/s00056-019-00180-y. PMID: 31172199.

Zimmermann M, Ender A, Egli G, Özcan M, Mehl A. Fracture load of CAD/CAM-fabricated and 3D-printed composite crowns as a function of material thickness. Clin Oral Investig. 2019;23(6):2777–84. doi: 10.1007/s00784-018-2717-2. PMID: 30368664.