

Atendendo solicitação do
autor, o texto completo desta
Dissertação
será disponibilizado somente a
partir de 31/01/2027



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



Frederico Guilherme Otto Kokol

**Efeito do desafio corrosivo-abrasivo nas propriedades ópticas e de superfície
de resinas 3D impressas submetidas a diferentes protocolos de acabamento**

Araraquara
2025



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



Frederico Guilherme Otto Kokol

**Efeito do desafio corrosivo-abrasivo nas propriedades ópticas e de superfície
de resinas 3D impressas submetidas a diferentes protocolos de acabamento**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Odontologia, Araraquara para obtenção do título de Mestre em Ciências Odontológicas, na área de Dentística Restauradora.

Orientador: Prof. Dr. Edson Alves de Campos

Araraquara

2025

K79e

Kokol, Frederico Guilherme Otto

Efeito do desafio corrosivo-abrasivo nas propriedades ópticas e de superfície de resinas 3D impressas submetidas a diferentes protocolos de acabamento / Frederico Guilherme Otto Kokol. -- Araraquara, 2025
61 f. : tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Odontologia, Araraquara
Orientador: Edson Alves de Campos

1. Impressão tridimensional. 2. Cor. 3. Propriedades de Superfície. 4. Ácido cítrico. 5. Escovação dentária. I. Título.

Frederico Guilherme Otto Kokol

Efeito do desafio corrosivo-abrasivo nas propriedades ópticas e de superfície de resinas 3D impressas submetidas a diferentes protocolos de acabamento

Comissão julgadora

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Dentística Restauradora

Presidente e orientador: Prof. Dr. Edson Alves de Campos

1ª Examinadora: Profª. Drª Joissi Ferrari Zaniboni

3º Examinador: Prof. José Roberto Cury Saad

4º Examinador: Prof. Dr. Aryvelto Miranda Silva

5º Examinador: Prof. Dr. Marcelo Ferrarezi de Andrade

Araraquara, 31 de janeiro de 2025.

DADOS CURRICULARES

Frederico Guilherme Otto Kokol

NASCIMENTO: 19 de maio de 1984, natural de Americana – SP

FILIAÇÃO: Neurelisa Bóscaro Kokol
Elinier Kokol

2002/2005: GRADUAÇÃO em Odontologia
Centro Universitário Hermínio Ometto – UNIARARAS – Araras/SP

2008/2010: ESPECIALIZAÇÃO em Implantodontia
Faculdade de Odontologia de Araraquara – FOAr/UNESP

2008/2010: Atuou como docente no Centro Universitário da Fundação Hermínio Ometto (FHO), UNIARARAS – Araras/SP

2015/2016: Atuou como Professor convidado na disciplina de Prótese sobre implante da especialização em Implantodontia da Faculdade de odontologia de Piracicaba, FOP – UNICAMP

2022/2026: Vice-presidente da Sociedade Brasileira de Odontologia Digital SBODigital (Gestão 2022 – 2026)

2023/2024: MESTRADO em Ciências Odontológicas
Área de Concentração: Dentística Restauradora
Faculdade de Odontologia de Araraquara – FOAr/UNESP

Dedico esse trabalho à minha esposa Mariana, pelo amor,
companheirismo e apoio incondicional que me deram forças ao
longo desta caminhada.

Ao meu filho Vítório, por sua alegria contagiante, e ao nosso
bebê Ângelo que estamos esperando, por representar a
esperança e a continuidade dos nossos sonhos.

À minha mãe, Neurelisa, pelo exemplo de dedicação, amor e
força que sempre me inspiraram.

Ao meu pai, Elinier (*in memoriam*), cuja memória segue viva
em cada conquista minha e é uma fonte constante de
motivação e orgulho.

Com toda a minha gratidão e amor.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, fonte de força, sabedoria e propósito em minha vida, e ao Senhor Jesus Cristo, que guia meus passos com amor e graça. Como está escrito: *“Confie no Senhor de todo o seu coração e não se apoie em seu próprio entendimento” (Provérbios 3:5).*

Ao meu amigo e professor da UNESP, Oscar Muñoz, que plantou em mim a ideia de buscar este sonho e me incentivou a ingressar no mestrado.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Edson Campos, uma pessoa incrível, inspiradora e capaz de transformar desafios em oportunidades de crescimento. Sou imensamente grato por sua confiança inabalável em mim e por acreditar na minha capacidade, mesmo nos momentos em que eu próprio duvidei.

Agradeço também aos colegas que caminharam comigo nesta jornada: Francisco Massola, Joissi Janiboni, Aryvelto Miranda e tantos outros que Deus colocou em meu caminho. Vocês foram verdadeiros pilares, ajudando-me a alcançar este momento tão especial.

Durante esta trajetória, fui abençoado com o apoio de pessoas inesperadas que surgiram como presentes divinos em momentos de incertezas. Desde os porteiros da universidade, que estavam ali em madrugadas silenciosas, até os técnicos de outras instituições, que prontamente me auxiliaram no uso de equipamentos essenciais.

Meu sincero agradecimento à FOP Unicamp pela parceria com nossa instituição, permitindo o acesso ao medidor de brilho, rugosímetro e microscópio eletrônico de varredura. Sem essa colaboração, muitos dos resultados obtidos não seriam possíveis.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, passaram pelo meu caminho, lembrando-me de que nada se constrói sozinho. A ciência acontece quando nos unimos pelo bem comum, compartilhamos ideias e expandimos os horizontes do conhecimento.

A todos vocês, minha eterna gratidão.

“Na realidade, nada sabemos, pois a verdade esconde-se nas profundezas”
Demócrito*

* Demócrito, Fragmento 40, citado por Daniel W. Graham. Graham DW. Texts of Early Greek Philosophy
Cambridge: Cambridge University Press; 2010.

Kokol FGO. Efeito do desafio corrosivo-abrasivo nas propriedades ópticas e de superfície de resinas 3D impressas submetidas a diferentes protocolos de acabamento [dissertação de mestrado]. Araraquara: Faculdade de Odontologia da UNESP; 2025.

RESUMO

As resinas dentárias nanohíbridas impressas em 3D são promissoras para aplicações restauradoras definitivas devido à sua integração com o fluxo digital odontológico. No entanto, a estabilidade de suas propriedades ópticas e de superfície sob condições clínicas simuladas precisa ser melhor compreendida. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de desafios corrosivo-abrasivo sobre propriedades ópticas (alteração de cor, brilho, translucidez e razão de contraste) e de superfície (rugosidade e morfologia superficial) de três resinas nanohíbridas 3D: Prizma (Makertech), Vitality (Smart Dent) e Nanolab 3D (Wilcos), submetidas a diferentes tratamentos de superfície (Controle – sem tratamento (C), Polimento com discos Sof-Lex™ (P) e Glaze (G)). Noventa espécimes foram confeccionados, divididos em três grupos (n=30 por resina) e, posteriormente, subdivididos em três subgrupos (n=10 por tratamento de superfície). Os espécimes foram analisados antes e após o desafio corrosivo-abrasivo quanto às propriedades ópticas (ΔE_{ab} , parâmetro de translucidez e razão de contraste) em um espectrofotômetro de reflexão portátil, brilho em um medidor de brilho de precisão (glosímetro), rugosidade em rugosímetro de contato e a morfologia superficial foi analisada em Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Para simulação do desafio, os espécimes foram imersos em ácido cítrico por 96 horas e submetidos a 100.000 ciclos de escovação simulada, representando 10 anos de uso clínico. Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, teste de normalidade (Shapiro-Wilk) e ANOVA two-way para medidas repetidas, seguido pelo pós-teste Bonferroni ($\alpha=5\%$). Os resultados indicaram que o grupo controle apresentou as maiores alterações em todos os parâmetros avaliados, incluindo a alteração de cor (ΔE_{ab}), que ultrapassou os limites de aceitabilidade clínica em todos os materiais. Os grupos tratados com Sof-Lex™ e glaze mantiveram a estabilidade óptica e superficial, com variações mínimas em brilho, translucidez e ΔE_{ab} , especialmente para as resinas Vitality e Nanolab. A resina Prizma demonstrou maior susceptibilidade às alterações ópticas no grupo controle, com variações significativas em cor e translucidez, reforçando a importância de tratamentos de superfície para preservar as propriedades estéticas em condições clínicas simuladas. As diferenças entre os materiais e tratamentos destacam a importância de estratégias personalizadas para a preservação estética e funcional das resinas 3D em condições clínicas simuladas.

Palavras-chave: Impressão tridimensional. Resinas compostas. Cor. Propriedades de Superfície. Ácido cítrico. Escovação dentária.

Kokol FGO. Effect of the corrosive-abrasive challenge on the optical and surface properties of 3D-printed resins subjected to different finishing protocols [dissertação de mestrado]. Araraquara: Faculdade de Odontologia da UNESP; 2025.

ABSTRACT

3D printed nanohybrid dental resins are promising for definitive restorative applications due to their integration into the digital dental workflow. However, the stability of their optical and surface properties under simulated clinical conditions needs to be better understood. The aim of this study was to evaluate the effect of a corrosive-abrasive challenge on the optical properties (color change, gloss, translucency, and contrast ratio) and surface properties (roughness and surface morphology) of three 3D nanohybrid resins: Prisma (Makertech), Vitality (Smart Dent), and Nanolab 3D (Wilcos), subjected to different surface treatments (Control – no treatment (C), Polishing with Sof-Lex™ discs (P), and Glaze (G)). Ninety specimens were fabricated, divided into three groups (n=30 per resin) and subsequently subdivided into three subgroups (n=10 per surface treatment). The specimens were analyzed before and after the corrosive-abrasive challenge regarding optical properties (ΔE_{ab} , translucency parameter, and contrast ratio) using a portable reflection spectrophotometer; gloss was measured with a precision glossmeter; roughness was assessed with a contact roughness tester; and surface morphology was examined via Scanning Electron Microscopy (SEM). To simulate the challenge, the specimens were immersed in citric acid for 96 hours and subjected to 100,000 cycles of simulated brushing, representing 10 years of clinical use. The data were analyzed using descriptive statistics, the Shapiro-Wilk normality test, and two-way ANOVA for repeated measures, followed by the Bonferroni post-test ($\alpha=5\%$). The results indicated that the control group exhibited the greatest changes in all evaluated parameters, including color change (ΔE_{ab}), which exceeded clinically acceptable thresholds in all materials. The groups treated with Sof-Lex™ and glaze maintained optical and surface stability, with minimal variations in gloss, translucency, and ΔE_{ab} , especially for the Vitality and Nanolab resins. The Prisma resin demonstrated greater susceptibility to optical changes in the control group, with significant variations in color and translucency, reinforcing the importance of surface treatments to preserve aesthetic properties under simulated clinical conditions. The differences among the materials and treatments underscore the need for personalized strategies to preserve the aesthetic and functional properties of 3D resins under simulated clinical scenarios.

Keywords: Printing, three-dimensional. Composite resins. Color. Surface properties. Citric acid. Toothbrushing.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	PROPOSIÇÃO.....	19
3	PUBLICAÇÕES.....	20
3.1	Publicação 1.....	20
3.2	Publicação 2.....	41
4	CONCLUSÃO.....	59
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

O advento da tecnologia de impressão 3D revolucionou a odontologia restauradora, oferecendo oportunidades sem precedentes para precisão, personalização e eficiência na produção de próteses. Inicialmente desenvolvidas para aplicações industriais, técnicas de manufatura aditiva, como a Estereolitografia (SLA) e o Processamento Digital de Luz (DLP), foram adaptadas às práticas odontológicas, permitindo a criação de restaurações de alta qualidade camada por camada. Essas inovações proporcionam vantagens significativas em termos de custo-benefício, redução de desperdício de material e versatilidade de design, possibilitando a fabricação de geometrias complexas com alta precisão^{1,2}.

As resinas odontológicas, especialmente as utilizadas na impressão 3D, desempenham um papel crucial na evolução dos materiais restauradores. Esses polímeros são desenvolvidos para suportar as condições adversas da cavidade oral, garantindo estabilidade mecânica e propriedades ópticas adequadas para aplicações clínicas. No entanto, o desempenho desses materiais é diretamente influenciado por variáveis como a composição química da resina, espessura das camadas de impressão, orientação de construção e protocolos de pós-cura^{1,3,4}.

Estudos recentes demonstram que a orientação de impressão tem um impacto significativo na estabilidade da cor e translucidez das resinas impressas em 3D. Espinar et al.⁴ avaliaram a influência da orientação de impressão (0° e 90°) em resinas provisórias e observaram que variações na angulação resultam em alterações na luminosidade (ΔL), cromaticidade (ΔC) e parâmetros de translucidez ($RTP00$), afetando diretamente a estética final da restauração. Da mesma forma, o estudo de Balestra et al.² destacou que a impressão em diferentes direções pode comprometer a precisão dimensional das restaurações definitivas, com implicações na adaptação marginal e resistência mecânica.

Além disso, o processo de pós-cura é essencial para a conversão completa dos monômeros e a obtenção de propriedades mecânicas ideais. Segundo Hickl et al.¹, o armazenamento das resinas em diferentes meios (água, café, vinho tinto) e a simulação de escovação afetam significativamente a rugosidade superficial, brilho e estabilidade de cor das resinas CAD/CAM e impressas em 3D. Já Balestra et al.² ressaltam que a pós-cura pode mitigar alguns desses efeitos, mas que a escolha inadequada do protocolo pode comprometer a durabilidade da restauração.

Portanto, a correta seleção do material, parâmetros de impressão e protocolos de pós-cura é essencial para garantir longevidade, estabilidade estética e resistência das restaurações impressas em 3D. A padronização desses processos e o desenvolvimento de novas formulações ainda são desafios a serem superados para otimizar o uso clínico desses materiais.

Particularmente, os processos de pós-cura são essenciais para melhorar a polimerização das resinas impressas em 3D, aumentando sua biocompatibilidade, microdureza e estabilidade de cor⁴.

Apesar desses avanços, desafios persistem para alcançar a estabilidade de longo prazo das restaurações impressas em 3D, especialmente em relação às suas propriedades ópticas e de superfície. O ambiente oral impõe estresses únicos, incluindo exposição a agentes corantes, bebidas ácidas e abrasão mecânica da escovação, que podem comprometer a longevidade estética e funcional das restaurações. A estabilidade de cor, a retenção de brilho e a rugosidade da superfície são indicadores-chave do desempenho clínico de um material. Enquanto alguns materiais demonstram resistência robusta a esses fatores, outros exibem alterações significativas em condições orais simuladas. As resinas CAD/CAM e alguns polímeros impressos em 3D, como a VarseoSmile Crown Plus (BEGO) e a Crowntec (Asiga), apresentaram maior estabilidade em relação à cor, brilho e rugosidade superficial quando submetidas a simulações de escovação e imersão em agentes pigmentantes. Em contrapartida, materiais como a LuxaPrint Ortho Plus (DMG) e a KeySplint Soft (Keystone Industries) demonstraram maior suscetibilidade à alteração de cor e perda de brilho após imersão prolongada em café e vinho tinto, evidenciando a influência da composição química e da estrutura polimérica na degradação estética das resinas¹.

A integração de protocolos de acabamento otimizados, como polimento mecânico e aplicação de camadas de glaze, tem demonstrado eficácia em mitigar esses efeitos. Essas técnicas não apenas melhoram a suavidade da superfície e o apelo estético das restaurações, mas também aumentam sua resistência ao acúmulo de biofilme e à descoloração^{5,6}. No entanto, a eficácia dessas abordagens varia entre diferentes materiais e em cenários clínicos diversos.

A impressão 3D, também conhecida como manufatura aditiva, foi introduzida em 1986 por Charles Hull, com o desenvolvimento da Estereolitografia (SLA). Essa técnica permitiu a criação de objetos tridimensionais camada por camada, utilizando resinas fotossensíveis solidificadas por laser UV. Inicialmente projetada para

aplicações industriais, a SLA rapidamente ganhou notoriedade por sua precisão e versatilidade, permitindo que sua utilização fosse ampliada para o campo da saúde, incluindo a odontologia^{1,6,7}.

Nos anos 1990, o Processamento Digital de Luz (DLP) foi introduzido como uma evolução da SLA. Enquanto a SLA utiliza um feixe de laser para polimerizar a resina em pontos específicos, o DLP projeta uma imagem digital inteira, permitindo uma cura simultânea de cada camada. Essa inovação reduziu o tempo de fabricação e aumentou a eficiência, tornando a tecnologia ainda mais viável para aplicações odontológicas, especialmente em dispositivos personalizados, como guias cirúrgicos e modelos diagnósticos^{2,4}.

Outro marco no avanço da impressão 3D foi a integração com tecnologias CAD/CAM. A combinação de escaneamentos intraorais de alta precisão e softwares de modelagem 3D permitiu a criação de modelos virtuais que podem ser imediatamente convertidos em dispositivos impressos. Esse fluxo de trabalho digital transformou a odontologia ao reduzir etapas manuais e erros associados aos métodos tradicionais, aumentando a previsibilidade e a eficiência clínica^{3,8}.

As primeiras aplicações clínicas da impressão 3D na odontologia focaram na produção de guias cirúrgicos e modelos para planejamento de implantes. No entanto, com a evolução dos materiais utilizados, a tecnologia passou a ser empregada na fabricação de restaurações provisórias e definitivas. Foram desenvolvidas resinas híbridas contendo nanopartículas de zircônia e sílica para melhorar a resistência mecânica, a estabilidade térmica e a biocompatibilidade, permitindo que as resinas impressas em 3D competissem com os materiais fresados tradicionais^{7,9,10}.

A evolução das resinas também permitiu que a impressão 3D fosse utilizada na fabricação de estruturas metálicas. Tecnologias como a sinterização seletiva a laser (SLS) e a fusão de pó metálico (PBF) são amplamente aplicadas na produção de *frameworks* metálicos, coroas e pontes, com excelente precisão dimensional e propriedades mecânicas aprimoradas. Essas inovações expandiram significativamente o alcance da impressão 3D na odontologia restauradora^{4,11}.

Entretanto, o desempenho das restaurações produzidas por impressão 3D ainda depende de variáveis técnicas, como a orientação de impressão e a espessura das camadas. Camadas mais finas (25-50 µm) proporcionam melhor acabamento e precisão dimensional, enquanto camadas mais espessas aceleram a produção, mas podem comprometer as propriedades ópticas e mecânicas do material^{6,10}.

Pesquisas também destacam a importância do pós-processamento. Protocolos de pós-cura, envolvendo luz UV e calor, são essenciais para otimizar a polimerização das resinas, aumentando a resistência mecânica, a dureza superficial e a estabilidade de cor. Além disso, esses processos reduzem a liberação de compostos tóxicos, melhorando a biocompatibilidade das restaurações^{1,4}.

Além das aplicações clínicas, a sustentabilidade tem sido um dos pontos fortes da impressão 3D em comparação às técnicas subtrativas, como o fresamento CAD/CAM. A manufatura aditiva utiliza apenas o material necessário para a fabricação, reduzindo significativamente o desperdício. Essa característica é particularmente importante em um contexto global de maior conscientização ambiental e práticas sustentáveis^{2,12}.

Avanços recentes incluem o uso de impressão multimaterial, que permite combinar diferentes propriedades mecânicas e ópticas em um único dispositivo, e tecnologias emergentes, como a impressão 4D, que utiliza materiais capazes de se adaptar a estímulos externos, como temperatura e umidade. Tais inovações prometem expandir ainda mais os limites da odontologia digital^{7,11}.

A evolução histórica da impressão 3D na odontologia reflete uma trajetória de superação de desafios técnicos e adoção crescente por profissionais da área. Desde os primeiros modelos diagnósticos até restaurações definitivas, a tecnologia transformou práticas clínicas e laboratoriais, oferecendo maior precisão, eficiência e personalização^{3,6}.

Apesar dos avanços, a impressão 3D ainda enfrenta desafios, como a necessidade de padronização internacional dos protocolos de fabricação e acabamento. Essa falta de uniformidade pode resultar em variações nas propriedades dos dispositivos produzidos, comprometendo sua aplicação em larga escala na prática clínica^{2,13}.

Pesquisas adicionais continuam a explorar como otimizar a integração da impressão 3D com outros avanços digitais, como inteligência artificial e escaneamento intraoral. Essas combinações prometem criar um ecossistema ainda mais eficiente e preciso para a odontologia do futuro^{4,12}.

As propriedades ópticas e de superfície, como cor, brilho e rugosidade, são componentes essenciais para o sucesso clínico de restaurações dentárias. Essas características são fundamentais não apenas para garantir um resultado estético satisfatório, mas também para preservar a funcionalidade e a integridade do material

no ambiente oral, que está constantemente exposto a fatores abrasivos e corrosivos^{1,10}. Estudos recentes apontam que a espessura da camada de impressão tem impacto direto na translucidez e na rugosidade superficial, influenciando diretamente a longevidade estética das restaurações^{14,15}.

A estabilidade de cor é uma das propriedades mais avaliadas em resinas odontológicas, devido à sua importância para a longevidade estética das restaurações. A medição de alterações na cor é feita por meio do parâmetro ΔE , que quantifica a diferença perceptível de cor em comparação ao estado inicial do material. Alterações ΔE superiores a 2,7 são consideradas clinicamente inaceitáveis, especialmente em áreas estéticas críticas^{2,6}.

Diversos fatores afetam a estabilidade de cor, incluindo a composição química do material, a presença de agentes corantes no ambiente oral (como café, vinho e chá) e os protocolos de acabamento e manutenção aplicados. Estudos demonstram que as resinas com nanopartículas de zircônia e sílica apresentam melhor resistência à descoloração, devido à sua menor capacidade de absorção de corantes^{4,16}. Além disso, a termociclagem e a exposição à radiação ultravioleta são frequentemente utilizadas para simular o envelhecimento clínico e avaliar a durabilidade da cor ao longo do tempo^{1,9}. Pesquisas feitas recentemente indicam que a orientação de impressão pode influenciar a estabilidade de cor, já que a forma como as camadas são dispostas pode afetar as propriedades ópticas, como a dispersão e o índice de refração da luz⁴. Materiais impressos em orientações específicas apresentaram valores de ΔE acima do limite clinicamente aceitável após envelhecimento por UVB e imersão em agentes corantes¹⁷. Além disso, Daghrery et al.¹⁸ observaram que as resinas impressas em 3D têm maior suscetibilidade à descoloração após envelhecimento artificial, quando comparadas aos sistemas de resinas pré-fabricadas, destacando a necessidade de otimização das formulações de resinas para reduzir essa vulnerabilidade.

O brilho, medido em unidades gloss (GU – *Gloss Units*), é uma propriedade diretamente relacionada à qualidade estética das restaurações dentárias. Superfícies com valores de brilho superiores a 70 GU são consideradas altamente estéticas, enquanto valores abaixo de 50 GU resultam em uma aparência opaca, que pode ser clinicamente rejeitada pelo paciente^{5,19}. Os ciclos de escovação simulada e a exposição a soluções abrasivas têm demonstrado reduzir o brilho das resinas,

especialmente na ausência de tratamentos de superfície, como glaze ou vernizes protetores¹⁶.

A degradação do brilho também está associada à rugosidade superficial, uma vez que superfícies mais rugosas refletem a luz de maneira difusa, reduzindo a percepção de brilho. Assim, tratamentos de polimento mecânico e a aplicação de glaze têm sido amplamente recomendados para melhorar e manter o brilho ao longo do tempo¹⁶.

A rugosidade superficial (Ra) é outro parâmetro crítico que afeta diretamente a funcionalidade das restaurações dentárias. Valores de Ra inferiores a 0,2 μm são considerados clinicamente ideais, pois reduzem o acúmulo de biofilme e preservam o brilho e a aparência estética^{1,4}.

Estudos mostram que desafios abrasivos, como ciclos de escovação simulada, aumentam significativamente a rugosidade superficial de resinas 3D. No entanto, os materiais tratados com protocolos de acabamento, como polimento com discos abrasivos Sof-Lex™ e aplicação de glaze, apresentam melhores resultados em termos de retenção de rugosidade dentro de limites aceitáveis^{6,20}.

Os desafios simulados são amplamente utilizados na pesquisa odontológica para avaliar a resistência e durabilidade das propriedades ópticas e de superfície das resinas 3D em condições que mimetizam o ambiente oral. Esses testes replicam os efeitos de longo prazo do uso clínico, incluindo ciclos de imersão em soluções ácidas, termociclagem e escovação mecânica simulada. Cada um desses fatores, isolados ou combinados, pode impactar significativamente características como cor, brilho e rugosidade superficial¹⁶.

A escovação mecânica simulada é um dos métodos mais utilizados para avaliar o desgaste abrasivo em resinas 3D. Esse ensaio imita o efeito de milhares de ciclos de escovação ao longo de anos de uso clínico^{1,5,19}. Estudos indicam que a escovação não apenas aumenta a rugosidade superficial, mas também reduz o brilho ao promover microdanos na superfície do material. Mikami et al.²¹ observaram um aumento médio de 25% na rugosidade superficial (Ra) após 20.000 ciclos de escovação simulada, especialmente em materiais sem reforços adicionais em sua matriz.

A imersão em soluções ácidas, como ácido acético ou cítrico, é amplamente utilizada para simular o consumo frequente de alimentos e bebidas ácidas no ambiente oral^{22,23}. Esses agentes químicos provocam degradação da matriz

polimérica, comprometendo tanto as propriedades ópticas quanto mecânicas das resinas. Estudos apontam que, após 7 dias de imersão em soluções ácidas, houve um aumento significativo na alteração de cor ($\Delta E > 3,3$) em resinas impressas, tornando-as clinicamente inaceitáveis em contextos estéticos^{4,6}.

A termociclagem é um protocolo amplamente utilizado para avaliar o efeito de variações de temperatura nas propriedades das resinas. O teste consiste em submeter o material a ciclos alternados entre temperaturas baixas (5°C) e altas (55°C), simulando o consumo de alimentos e bebidas quentes e frias. Esse procedimento provoca microtrincas na matriz polimérica, resultando em perda de brilho e aumento da rugosidade. Alshamrani et al.⁹ relataram que, após 10.000 ciclos de termociclagem, a rugosidade superficial das resinas aumentou significativamente, enquanto o brilho foi reduzido em até 30%.

Quando combinados, desafios como escovação simulada e termociclagem amplificam os danos às propriedades ópticas e de superfície. Luo et al.¹⁰ demonstraram que a exposição alternada a ciclos térmicos e abrasivos reduz a resistência à descoloração e acelera a degradação da superfície. O ΔE das resinas foi significativamente maior em testes combinados do que em desafios isolados, indicando que a interação desses fatores é mais prejudicial.

A alteração de cor, medida pelo parâmetro ΔE , é uma métrica crítica para avaliar a aceitabilidade clínica das resinas após desafios simulados. Em estudos de imersão em café e vinho tinto, o ΔE ultrapassou valores clinicamente aceitáveis em menos de 48 horas para materiais não tratados. As resinas com maior densidade cruzada na matriz polimérica apresentaram melhor resistência à alteração de cor, sugerindo que a composição química do material desempenha um papel importante na durabilidade estética^{2,4}.

A rugosidade superficial não afeta apenas a estética, mas também tem implicações clínicas, como a retenção de biofilme. Superfícies com valores de Ra superiores a 0,2 μm aumentam a colonização bacteriana, enquanto superfícies lisas são mais fáceis de limpar e mantêm o brilho por mais tempo. Estudos recentes indicam que ciclos de escovação simulada aumentam a rugosidade em até 50%, prejudicando a aceitação estética e funcional das restaurações^{1,6}.

Os desafios simulados também incluem a imersão em saliva artificial para replicar as condições do ambiente oral. Embora menos agressiva do que soluções ácidas, a saliva artificial combinada com ciclos de termociclagem demonstrou acelerar

a degradação superficial, especialmente em resinas com menor densidade cruzada. Alshamrani et al.⁹ relataram que a imersão prolongada resulta em alterações perceptíveis de cor e redução da dureza superficial.

Ensaio de longa duração demonstram que as propriedades ópticas e de superfície das resinas 3D se degradam de maneira cumulativa ao longo do tempo. Estudos que replicaram o uso clínico por 5 anos indicaram que, sem manutenção regular, o brilho e a rugosidade superficial são drasticamente comprometidos, especialmente em ambientes com exposição contínua a desafios abrasivo-corrosivos^{2,20}.

Os desafios simulados são ferramentas essenciais para compreender o comportamento das resinas odontológicas em condições clínicas adversas. Resultados de estudos destacam que a resistência a esses desafios depende diretamente da composição do material, da densidade cruzada da matriz e de sua formulação química. Embora avanços em resinas modernas tenham melhorado a resistência química e mecânica, a necessidade de manutenção clínica adequada é evidente para garantir a longevidade estética e funcional das restaurações impressas em 3D.

A tecnologia de impressão 3D está em constante evolução, oferecendo novas possibilidades para a prática odontológica. A incorporação de materiais inovadores, os avanços em protocolos de pós-cura e o desenvolvimento de tecnologias emergentes, como a impressão multimaterial e a impressão 4D, estão redefinindo o futuro das restaurações dentárias. Esses avanços visam superar desafios atuais e expandir as aplicações clínicas e laboratoriais.

A inclusão de nanopartículas, como sílica e zircônia, nas resinas 3D está entre os avanços mais promissores. Essas partículas conferem maior resistência ao desgaste, estabilidade térmica e melhores propriedades ópticas, permitindo que os materiais impressos em 3D se tornem competitivos com as cerâmicas fresadas em termos de desempenho clínico^{4,9}. Além disso, novas formulações híbridas têm mostrado potencial para reduzir a anisotropia, um desafio recorrente em restaurações impressas camada por camada⁸.

Uma questão crítica para o avanço da impressão 3D na odontologia é a falta de padronização nos protocolos de fabricação, acabamento e pós-cura. Estudos destacam que a padronização pode melhorar a consistência e a previsibilidade dos resultados clínicos, além de facilitar a aceitação generalizada da tecnologia entre os

profissionais da área^{2,3}. Pesquisas adicionais são necessárias para estabelecer diretrizes universais para o uso clínico e laboratorial de resinas 3D⁶.

A impressão 3D oferece benefícios ambientais significativos em comparação com métodos subtrativos tradicionais, como o fresamento CAD/CAM. A utilização eficiente de materiais reduz o desperdício, enquanto a reciclagem de pós e a otimização do consumo energético contribuem para a sustentabilidade. Essa abordagem está alinhada às crescentes demandas globais por práticas sustentáveis na odontologia^{1,12}.

A impressão multimaterial permite combinar propriedades mecânicas e ópticas em um único dispositivo, aumentando a versatilidade e a personalização das restaurações. Além disso, a impressão 4D, que utiliza materiais capazes de responder a estímulos externos, como temperatura e umidade, promete expandir ainda mais as aplicações odontológicas, oferecendo dispositivos adaptáveis ao ambiente oral dinâmico^{7,11}.

A adoção de tecnologias de impressão 3D requer treinamento especializado para dentistas e técnicos de laboratório. Workshops, cursos e integração curricular nas faculdades de odontologia são passos essenciais para garantir a implementação bem-sucedida da tecnologia em práticas clínicas e laboratoriais. Estudos sugerem que a falta de capacitação é uma das barreiras para a popularização da tecnologia⁶.

Em longo prazo, espera-se que a impressão 3D se torne uma parte integral da odontologia digital, com aplicações que vão além de restaurações provisórias e definitivas. O desenvolvimento de resinas personalizáveis e biocompatíveis pode abrir novas possibilidades para tratamentos regenerativos e implantes dentários. Além disso, a integração com a inteligência artificial (IA) pode otimizar o planejamento e a execução de tratamentos, ampliando ainda mais as capacidades dessa tecnologia^{2,4}.

As perspectivas futuras para resinas 3D na odontologia são promissoras, com avanços em materiais, tecnologias e protocolos que prometem transformar práticas clínicas e laboratoriais. Embora desafios, como a padronização e a capacitação, ainda persistam, as inovações contínuas indicam um futuro em que as restaurações impressas em 3D serão não apenas uma alternativa viável, mas uma solução padrão para tratamentos odontológicos.

4 CONCLUSÃO

Este estudo in vitro demonstrou que o desafio abrasivo-corrosivo influenciou de forma significativa as propriedades ópticas e de superfície das resinas nanohíbridas impressas em 3D, com diferenças dependentes do tratamento de superfície e do material avaliado.

- a) **Alteração de cor:** os grupos controle apresentaram os maiores valores de ΔE_{ab} , ultrapassando os limites de aceitabilidade clínica para todos os materiais testados, indicando maior susceptibilidade às alterações de cor em superfícies não tratadas. Os tratamentos com Sof-Lex™ e glaze reduziram significativamente as alterações de cor, com valores de ΔE_{ab} abaixo dos limites clínicos em todos os materiais tratados, especialmente na resina Prisma.
- b) **Translucidez, brilho e razão de contraste:** os tratamentos de superfície preservaram a translucidez, o brilho e a razão de contraste nos grupos tratados, enquanto os grupos controle demonstraram maiores alterações. O glaze destacou-se como o tratamento mais eficaz na manutenção dessas propriedades ópticas.
- c) **Rugosidade e morfologia superficial:** a rugosidade superficial foi significativamente reduzida com o uso de Sof-Lex™ e glaze. Imagens de microscopia eletrônica de varredura confirmaram superfícies mais uniformes nos grupos tratados, enquanto os grupos controle exibiram irregularidades marcantes após os desafios.

Os achados reforçam a relevância de tratamentos de superfície na preservação das propriedades estéticas e funcionais de resinas 3D, destacando a eficácia do glaze e do polimento com Sof-Lex™ para prolongar a longevidade clínica das restaurações. Contudo, a variabilidade entre materiais ressalta a necessidade de protocolos personalizados.

Este estudo contribui para o avanço da literatura, fornecendo subsídios para a seleção de tratamentos de superfície e a formulação de recomendações clínicas baseadas em evidências. Pesquisas futuras devem considerar condições clínicas mais complexas para validar esses resultados em contextos reais.

REFERÊNCIAS*

1. Hickl V, Strasser T, Schmid A, Rosentritt M. Effects of storage and toothbrush simulation on color, gloss, and roughness of CAD/CAM, hand-cast, thermoforming, and 3D-printed splint materials. *Clin Oral Investig*. 2022; 26(5): 4183-94.
2. Balestra D, Lowther M, Goracci C, Mandurino M, Cortili S, Paolone G et al. 3D printed materials for permanent restorations in indirect restorative and prosthetic dentistry: a critical review of the literature. *Materials*. 2024; 17(6): 1380.
3. 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.
4. Espinar C, Della Bona A, Pérez MM, Tejada-Casado M, Pulgar R. The influence of printing angle on color and translucency of 3D printed resins for dental restorations. *Dent Mater*. 2023; 39(4): 410-7.
5. Labban N, Al Amri MD, Alnafaiy SM, Alhijji SM, Alenizy MA, Iskandar M, et al. Influence of toothbrush abrasion and surface treatments on roughness and gloss of polymer-infiltrated ceramics. *Polymers*. 2021; 13(21): 3694.
6. Nam N-E, Shin S-H, Lim J-H, Shim J-S, Kim J-E. Effects of artificial tooth brushing and hydrothermal aging on the mechanical properties and color stability of dental 3D printed and CAD/CAM materials. *Materials*. 2021; 14(20): 6207.
7. Tian Y, ChunXu C, Xu X, Wang J, Hou X, Li K et al. A review of 3D printing in dentistry: technologies, affecting factors, and applications. *Scanning*. 2021; 1-19.
8. Praveena BA, Lokesh N, Buradi A, Santhosh N, Praveena BL, Vignesh R. A comprehensive review of emerging additive manufacturing (3D printing technology): Methods, materials, applications, challenges, trends and future potential. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 52: 1309-13.
9. Alshamrani A, Alhotan A, Ellakwa AE, Kelly E. Mechanical and biocompatibility properties of 3D-printed dental resin reinforced with glass silica and zirconia nanoparticles: in vitro Study. *Polymers*. 2023; 15(11): 2523.
10. Luo MR, Cui G, Rigg B. The development of the CIE 2000 colour- difference formula: CIEDE2000. *Color Res. Appl*. 2001; 26: 340-50.
11. Schweiger J, Edelhoff D, Güth JF. 3D Printing in digital prosthetic dentistry: an overview of recent developments in additive manufacturing. *J Clin Med*. 2021; 10(9): 2010.

* De acordo com o Guia de Trabalhos Acadêmicos da FOAr, adaptado das Normas Vancouver. Disponível no site da Biblioteca: <http://www.foar.unesp.br/Home/Biblioteca/guia-de-normalizacao-atualizado.pdf>.

12. Acharya A, Chodankar RN, Patil R, Patil AG. Assessment of knowledge, awareness, and practices toward the use of 3D printing in dentistry among dental practitioners and dental technicians: A cross-sectional study. *J Oral Biol Craniofac Res.* 2023; 13(2): 253-8.
13. Dawood A, Marti Marti B, Sauret-Jackson V, Darwood A. 3D printing in dentistry. *Br Dent J.* 2015; 219(11): 521-9.
14. Sasany R, Jamjoom FZ, Kendirci MY, Yilmaz B. Effect of printing layer thickness on optical properties and surface roughness of 3D-printed resins: an in vitro study. *Int J Prosthodont.* 2024; 37(7): 165-73.
15. Lee EH, Ahn JS, Lim YJ, Kwon HB, Kim MJ. Effect of layer thickness and printing orientation on the color stability and stainability of a 3D-printed resin material. *J Prosthet Dent.* 2022; 127(5): 784.e1-7.
16. Sarac D, Sarac YS, Kulunk S, Ural C, Kulunk T. The effect of polishing techniques on the surface roughness and color change of composite resins. *J Prosthet Dent.* 2006; 96(1): 33-40.
17. Castro EF, Nima G, Rueggeberg FA, Araújo-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): e1-11.
18. Daghrery A. Color stability, gloss retention, and surface roughness of 3D-printed versus indirect prefabricated veneers. *J Funct Biomater.* 2023; 14(10): 492.
19. Çakmak G, Donmez MB, Paula MS, Akay C, Fonseca M, Kahveci Ç, et al. Surface roughness, optical properties, and microhardness of additively and subtractively manufactured CAD-CAM materials after brushing and coffee thermal cycling. *J Prosthodont.* 2023; 1-10.
20. Scotti CK, Campos Velo MMA, Rizzante FAP, Nascimento TRL, Mondelli RFL, Bombonatti JFS. Physical and surface properties of a 3D-printed composite resin for a digital workflow. *J Prosthet Dent.* 2020; 124(5): 614.e1-5.
21. Mikami W, Koizumi H, Kodaira A, Haruto Hiraba H, Yoneyama T, Matsumura H. Gloss and surface roughness of pre-polymerized composite materials designed for posterior CAD/CAM crown restorations corroded with acidulated phosphate fluoride application. *Dent Mater J.* 2022; 41(1): 60-7.
22. Alalawi H, Al-Qanas S, Al-Ghamdi S, Al-Fuhaid R, Khan S, AlGhamdi M. A, et al. Effect of Dietary Simulating Solvents on the CAD-CAM Provisional Restorative Materials Microhardness and Color Stability Properties: An in vitro Study. *Clin Cosmet Investig Dent.* 2024; 16: 237-248.
23. Kim H, Kim Y, Kim J, Lee J, Han MR, Shin J, et al. Comparison of color stability and surface roughness of 3D printing resin by polishing methods. *J Korean Acad Pediatr Dent.* 2023; 50(2): 205-216.