



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ODONTOLOGIA DE PIRACICABA**

VICTOR MARTINS STABILE

**EFEITO DE DIFERENTES TEMPOS DE EXPOSIÇÃO E ESPESSURA
DE FATIAMENTO DE DIFERENTES RESINAS PARA IMPRESSÃO 3D
COM TECNOLOGIA LCD**

*EFFECT OF DIFFERENT EXPOSURE TIMES AND LAYER THICKNESS OF
DIFFERENT RESINS FOR 3D PRINTING WITH LCD TECHNOLOGY*

Piracicaba,
2024

VICTOR MARTINS STABILE

**EFEITO DE DIFERENTES TEMPOS DE EXPOSIÇÃO E ESPESSURA
DE FATIAMENTO DE DIFERENTES RESINAS PARA IMPRESSÃO 3D
COM TECNOLOGIA LCD**

*EFFECT OF DIFFERENT EXPOSURE TIMES AND LAYER THICKNESS OF
DIFFERENT RESINS FOR 3D PRINTING WITH LCD TECHNOLOGY*

Dissertação apresentada à Faculdade de Odontologia de Piracicaba da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Materiais Dentários.

Dissertation presented to the Piracicaba Dental School of the University of Campinas in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Dental Materials.

Orientadora: Profa. Dra. Regina Maria Puppini Rontani

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO VICTOR MARTINS STABILE E ORIENTADO PELA PROFA. DRA. REGINA MARIA PUPPIN RONTANI.

Piracicaba,
2024

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Biblioteca da Faculdade de Odontologia de Piracicaba
Marilene Girello - CRB 8/6159

St11e Stabile, Victor Martins, 1999-
Efeito de diferentes tempos de exposição e espessura de fatiamento de diferentes resinas para impressão 3D com tecnologia LCD / Victor Martins Stabile. – Piracicaba, SP : [s.n.], 2024.

Orientador: Regina Maria Puppini Rontani.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Odontologia de Piracicaba.

1. Impressão tridimensional. 2. Polimerização. 3. Materiais dentários. I. Puppini-Rontani, Regina Maria, 1959-. II. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Faculdade de Odontologia de Piracicaba. III. Título.

Informações Complementares

Título em outro idioma: Effect of different exposure times and layer thickness of different resins for 3D printing with LCD technology

Palavras-chave em inglês:

Printing, three-dimensional

Polymerization

Dental materials

Área de concentração: Materiais Dentários

Titulação: Mestre em Materiais Dentários

Banca examinadora:

Regina Maria Puppini Rontani [Orientador]

Luciana Fávaro Francisconi

Lourenço Correr Sobrinho

Data de defesa: 27-03-2024

Programa de Pós-Graduação: Materiais Dentários

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0002-9444-2306>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/7342787924446948>



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Odontologia de Piracicaba

A Comissão Julgadora dos trabalhos de Defesa de Dissertação de Mestrado, em sessão pública realizada em 27 de março de 2024, considerou o candidato VICTOR MARTINS STABILE aprovado.

PROFª. DRª. REGINA MARIA PUPPIN RONTANI

PROFª. DRª. LUCIANA FÁVARO FRANCISCONI

PROF. DR. LOURENÇO CORRER SOBRINHO

A Ata da defesa, assinada pelos membros da Comissão Examinadora, consta no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus avós Sr. Joilson Rocha Martins (em memória) e a Sra. Cleuza Costa Jorge (em memória). Ou melhor, dedico essa conquista ao Pai Biga e a Vovó Cleuza, minhas maiores saudades. Os senhores são verdadeiros exemplos de humanidade, perseverança, honestidade e, acima de tudo, amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus. Pelo dom da vida, por todas as oportunidades que têm concedido, pelos caminhos que me tem aberto e por mais uma conquista que me possibilitou alcançar.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

À minha orientadora Prof. Dra. Regina Maria Puppim Rontani, pela excelente orientação durante todo o período do mestrado, pelo acolhimento, tempo dedicado, ensinamentos compartilhados, apoio e confiança.

À Faculdade de Odontologia de Piracicaba, na pessoa do seu diretor Prof. Dr. Flávio Henrique Baggio Aguiar, pelo acolhimento institucional.

Ao Programa de Pós-graduação em Materiais Dentários, na pessoa do seu coordenador Prof. Dr. Lourenço Correr Sobrinho, pela disponibilização do departamento para desenvolvimento desta dissertação.

À Prof. Dra. Roberta Caroline Bruschi Alonso, que além de uma grande amiga, atua como uma mentora e verdadeira inspiração na minha vida. Agradeço por todos os ensinamentos compartilhados, pelo tempo dedicado, incentivo apoio.

Aos docentes Prof. Dr. Américo Bortolazzo Correr, Prof. Dr. Mário Alexandre Coelho Sinhoreti, Prof. Dr. Lourenço Correr Sobrinho e Prof. Dr. Mário Fernando de Goes, pela dedicação a minha formação e ao programa de Pós-graduação em Materiais Dentários.

À empresa Oralprint, na pessoa de seus idealizadores Dr. Fabio Ferreira, Dra. Cristiane Satomi e Dra. Roberta Alonso, pela parceria, abertura de seus laboratórios e disponibilidade de equipamentos para o desenvolvimento desta dissertação.

Aos técnicos do Departamento de Materiais Dentários da FOP-UNICAMP, Marcos Blanco Cangiani e Selma Aparecida de Souza Barbosa Segalla, pela dedicação ao programa, assistência e zelo para comigo durante o desenvolvimento desta dissertação.

Aos meus pais, irmão e familiares, por todo o suporte durante a minha formação como pessoa e pelo apoio durante a confecção da dissertação. Aos meus amigos da FOP-UNICAMP que me auxiliaram durante todo o mestrado. Realmente, não foi nada fácil, mas sem vocês seria impossível. Agraço por serem meu porto seguro e companhia em momentos de dificuldade. Obrigado por estarem comigo nos momentos de dificuldade e alegria.

RESUMO

O objetivo deste estudo foi estabelecer parâmetros de impressão para uma impressora de tecnologia LCD fabricada para o uso odontológico levando em consideração o tempo de exposição da resina em diferentes espessuras de camada. Foram testados dois tipos de resinas: 1) Clear (Anycubic – resina transparente, sem carga e sem pigmento); 2) Standard (Weistek – Resina contendo carga e pigmento). As impressões foram realizadas em uma impressora 3D LCD - Endurance (Oralprint) combinando quatro tempos de exposição (2, 3, 4 e 6 segundos) com duas espessuras de camada (0,025 e 0,05 mm). Para as análises de acurácia de impressão, resistência a flexão e módulo de elasticidade, espécimes em forma de barra de 25x2x2 mm foram impressos. Todos os espécimes foram impressos de acordo com os parâmetros de impressão descritos e pós-curados em câmara de luz UV (Oralprint) por 20 minutos. Para as análises de rugosidade, dureza e grau de conversão, espécimes em forma de disco 5x2mm foram impressos. A acurácia foi avaliada pela mensuração das dimensões do espécime (n=10) com paquímetro digital. Resistência à flexão (n=10) e módulo de elasticidade (n=10) foram aferidos em máquina de ensaio universal Instron (Instron 4411, Instron). Rugosidade (n=5) e dureza Knoop (n=5) foram avaliados em rugosímetro de contato (Surfcorder SE1700, Kosaka Corp) e microdurômetro (FM-ARS 9000; Future-Tech Corp), respectivamente. O grau de conversão foi avaliado por FTIR/ATR (Vertex 70; BrukerOptik GmbH). Quanto a acurácia, o aumento do tempo de exposição resultou no aumento volumétrico dos espécimes. Resistência à flexão foi afetada tanto pelo tempo de exposição quanto pela espessura de fatiamento e tipo de resina, o mesmo foi observado módulo de elasticidade, dureza e grau de conversão. Para rugosidade, somente a espessura de fatiamento foi significativo, o fatiamento de 0,025 mm resultou em espécimes menos rugosos. Conclui-se, há relação entre tempo de exposição e espessura de camada, estes dependem da composição da resina e afetam as propriedades mecânicas do material, além de interferir na polimerização. Os parâmetros de impressão devem ser ajustados para cada tipo de resina. Para resina Clear o parâmetro de impressão mais adequado é 4 segundos de exposição com fatiamento de 0,05 mm, e para resina Standard 2 segundos de exposição com fatiamento de 0,05 mm.

Palavras-chave: Impressão Tridimensional. Polimerização. Materiais Dentários.

ABSTRACT

The aim of this study was to establish printing parameters for an LCD technology printer manufactured for dental use, considering the resin exposure time at different layer thicknesses. Two types of resins were tested: 1) Clear (Anycubic – transparent resin, without filler and pigment); 2) Standard (Weistek – Resin containing filler and pigment). The prints were performed on an LCD 3D printer - Endurance (Oralprint) combining four exposure times (2, 3, 4, and 6 seconds) with two layer thicknesses (0.025 and 0.05 mm). For analysis of print accuracy, flexural strength, and modulus of elasticity, specimens in the form of a 25x2x2 mm bar were printed. All specimens were printed according to the described printing parameters and post-cured in a UV light chamber (Oralprint) for 20 minutes. For roughness, hardness, and degree of conversion analyses, specimens in the form of a 5x2 mm disc were printed. Accuracy was assessed by measuring specimen dimensions (n=10) with digital calipers. Flexural strength (n=10) and modulus of elasticity (n=10) were measured on a universal testing machine Instron (Instron 4411, Instron). Roughness (n=5) and Knoop hardness (n=5) were evaluated using a contact profilometer (Surfcorder SE1700, Kosaka Corp) and a microhardness tester (FM-ARS 9000; Future-Tech Corp), respectively. Degree of conversion was evaluated by FTIR/ATR (Vertex 70; BrukerOptik GmbH). Regarding accuracy, increasing exposure time resulted in volumetric increase of specimens. Flexural strength was affected by both exposure time and slicing thickness, as was observed for modulus of elasticity, hardness, and degree of conversion. For roughness, only slicing thickness was significant, with 0.025 mm slicing resulting in smoother specimens. In conclusion, there is a relationship between exposure time and layer thickness, which depends on the resin composition and affects the mechanical properties of the material, as well as interfering with polymerization. Printing parameters should be adjusted for each type of resin. For Clear resin, the most suitable printing parameter is 4 seconds exposure with 0.05 mm slicing, and for Standard resin, 2 seconds exposure with 0.05 mm slicing.

Keywords: Three-Dimensional Printing. Polymerization. Dental Materials.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	ARTIGO: Tempo de exposição, espessura de fatiamento e tipo de resina afetam as propriedades mecânicas e a qualidade do objeto impresso em impressora 3D LCD	13
3	CONCLUSÃO.....	33
	REFERÊNCIAS	34
	APÊNDICE 1 - Análises de Variância dos testes realizados	36
	ANEXO 1 - Relatório de verificação de originalidade	38
	ANEXO 2 - Comprovante de submissão do artigo ao periódico <i>Dental Material</i>	39

1 INTRODUÇÃO

O fluxo digital na odontologia teve início com a idealização dos primeiros softwares de Design Auxiliado por Computador (CAD, do inglês Computer Aided Design), scanners intra e extra-orais, e a introdução do pioneiro sistema de Manufatura Auxiliada por Computador (CAM, do inglês Computer Aided Manufacturing), um sistema de manufatura subtrativa por fresagem, conhecido como sistema Cerec (Spitznagel, et al., 2018).

A tecnologia CAD/CAM, que utiliza a manufatura subtrativa para a confecção de peças, implica no fresamento de um bloco de material específico até alcançar a forma desejada. Contudo, algumas limitações dessa abordagem incluem considerável perda de material, surgimento de defeitos de superfície e subsuperfície propensos a concentrar tensões, restrição quanto ao número de peças fabricadas, entre outras, além do alto custo e dificuldade de manutenção dos equipamentos e materiais de fresagem (Corazza, et al., 2015; Della Bona, et al., 2021). Como estratégia que pode reduzir essas limitações dos sistemas de fresagem, a impressão 3D foi introduzida na odontologia.

O termo "impressão 3D" refere-se genericamente à técnica de manufatura aditiva que constrói objetos através da deposição sucessiva de pequenas camadas de diferentes materiais, embora a resina seja o mais popular (Liu et al., 2006). Na odontologia, essa tecnologia tem encontrado aplicação em áreas como cirurgia e traumatologia buco maxilofacial, implantodontia, periodontia, dentística, ortodontia e reabilitação oral (Dawood, et al., 2015).

A estereolitografia (SLA) foi a primeira tecnologia descrita e patenteada em 1986 por Charles W. Hull e atualmente utilizada nas áreas automotiva, aeroespacial e saúde (Hull, 1986; Dikici et al. 2017). Esta constrói objetos através da incidência de um único feixe de luz ultravioleta em uma cuba que comporta resina fotossensível. Pode ser subdividida em duas técnicas, de acordo com o movimento da plataforma e o movimento do feixe de luz, chamadas de estereolitografia por escaneamento ou estereolitografia por projeção (Kessler, et al., 2020; Coelho, et al., 2018).

Uma evolução para a impressão tridimensional foi o desenvolvimento das impressoras com tecnologia LCD (*Liquid Crystal Display*). Bem como a tecnologia SLA, essa também constrói objetos através da polimerização de monômeros fotossensíveis que estão dentro de uma cuba que permite a passagem de luz (Kessler, et al., 2020). A principal diferença entre essas duas tecnologias é o sistema de imagem (Quan, et al. 2020). Na técnica por LCD, ao invés de laser, um display de cristal líquido é utilizado. Os cristais líquidos ao serem

excitados por um campo elétrico impedem a passagem de luz em uma determinada localização do display e permitem a passagem da luz em outra localidade, com isso, somente os pixels de uma área acendem, formando a imagem da fatia a ser impressa (Chen, et al. 2020).

Existem alguns fatores determinantes na acurácia de impressão, dentre eles o tempo de exposição, a intensidade luminosa, o comprimento de onda e o fatiamento (espessura de camada - distância entre a plataforma e o fundo da cuba para cada camada) (Loflin et al., 2019; Quan, et al. 2020; Alshamrani et al., 2022). Para a impressão, a luz ao ser emitida excita os iniciadores fotossensíveis, que por sua vez, formam espécies reativas (radicais livres) capazes de quebrar uma ligação molecular dos monômeros, transformando-os em polímeros (Mousawi, et al., 2018). Para uma fotoativação eficiente três condições devem ser respeitadas: 1. A intensidade luminosa e o comprimento de onda emitido pela impressora devem ser compatíveis com o espectro de absorção do fotoiniciador; 2. A luminosidade deve se irradiar por toda a espessura da camada por um intervalo de tempo compatível com o fotoiniciador; 3. A fonte luminosa deve estar o mais próximo possível da superfície irradiada, pois o distanciamento reduz a intensidade luminosa, tornando menos efetiva a reação de polimerização (Dunn, et al., 2002).

As impressoras 3D de tecnologia LCD emitem luz na faixa de comprimentos de onda entre 380 e 410 nm, abrangendo o espectro violeta e ultravioleta (UV) (Quan, et al., 2020).

A luz nessa faixa espectral possui comprimentos de onda curtos, o que resulta na atenuação e dispersão da mesma ao passar pelo material, limitando-se à superfície e subsuperfície da resina, ou seja, apresenta baixa capacidade de penetração nos materiais (Dawood, et al., 2015; Harlow, et al., 2016; Quan, et al., 2020).

Nesse cenário, a espessura de fatiamento e o tempo de exposição surgem como variáveis que podem influenciar fortemente as características finais do objeto impresso. Espessuras de fatiamento maiores com tempo de exposição reduzido tendem a resultar em menor grau de polimerização, especialmente em função da limitação da capacidade de penetração da luz emitida pela impressora. Isso pode resultar na impressão de objetos com elevada presença de monômeros residuais, redução de estabilidade dimensional, baixa biocompatibilidade, entre outras limitações. De maneira similar, espessuras de fatiamento reduzidas com tempos de exposição prolongados podem propiciar a produção de objetos deformados, frágeis, com baixa acurácia de impressão, entre outras características indesejadas. Entretanto, a literatura é extremamente escassa neste tópico, o que torna essencial estudos avaliando a relação entre espessura de camada e tempo de exposição. Ademais, a composição das resinas pode influenciar a polimerização. Fatores como partículas de carga e pigmento

podem afetar a cinética da polimerização, e, por consequência, as propriedades mecânicas e acurácia de impressão.

Observa-se, portanto, a importância de se desenvolver parâmetros de impressão para a tecnologia LCD e compreender a polimerização neste cenário. Assim, o objetivo deste trabalho foi estabelecer parâmetros de impressão para uma impressora de tecnologia LCD fabricada para o uso odontológico levando em consideração o tempo de exposição da resina a luz emitida pela impressora em diferentes espessuras de fatiamento, além de estabelecer os efeitos da relação entre espessura de camada e tempo de exposição nas propriedades mecânicas e acurácia de impressão de diferentes de resinas comerciais, sendo uma particulada e com carga e outra transparente e sem carga.

2 ARTIGO

Tempo de exposição, espessura de fatiamento e tipo de resina afetam as propriedades mecânicas e a qualidade do objeto impresso em impressora 3D LCD

Resumo

Objetivo: avaliar o impacto do tempo de exposição e espessura do fatiamento na polimerização, acurácia de impressão e propriedades mecânicas de diferentes resinas impressas em impressora 3D LCD. **Método:** Três fatores de estudo foram avaliados: 1) Tipo de resina em dois níveis (Clear e Standard); 2) Tempo de exposição em quatro níveis (2, 3, 4 e 6 segundos); e 3) Espessura de fatiamento em dois níveis (0,025 e 0,05 mm). Foi avaliada a acurácia de impressão através da mensuração das dimensões dos espécimes (n=10). A resistência à flexão (RF) e módulo de elasticidade (E) foram medidos em máquina de ensaio universal (n=10). A dureza (KHN) foi medida em microdurômetro (n=5). O grau de conversão (GC) foi avaliado através de FTIR/ATR (n=3). A rugosidade (Ra) foi obtida em rugosímetro de contato (n=5). Os dados foram submetidos a ANOVA 3-fatores seguido pelo teste de Tukey ($\alpha=0,05$). **Resultado:** Para acurácia, o aumento do tempo de exposição resultou em aumento volumétrico dos espécimes. A espessura de fatiamento, tempo de exposição e tipo de resina afetam significativamente as propriedades de RF, E, KHN e GC, bem como a interação entre esses fatores. Ra foi afetada somente pela espessura de fatiamento, no qual espessuras menores resultaram em objetos menos rugosos. **Conclusão:** O tempo de exposição e espessura do fatiamento afetam a acurácia de impressão e propriedades mecânicas do objeto impresso. O aumento do tempo de exposição propicia o aumento volumétrico do objeto. Menores espessuras de fatiamento potencializam a polimerização em resina sem carga e pigmento e produz superfície mais lisa. A composição da resina para impressão 3D interfere nas suas propriedades mecânicas.

Palavras-chave: Impressão Tridimensional. Polimerização. Materiais Dentários.

Introdução

Impressão 3D é uma técnica de manufatura aditiva amplamente conhecida, na qual objetos são construídos pela sobreposição de camadas de um material (Tay, et al., 2016). A estereolitografia (SLA) foi a primeira tecnologia a ser descrita em 1986 por Hull (Hull, 1986). A tecnologia de impressão 3D LCD é uma evolução da tecnologia SLA e se difere

principalmente no sistema de imagem, nesta um display de cristal líquido é utilizado como fonte luminosa (Quan, et al., 2020; Kessler, et al., 2020). Em ambas, a composição e características físicas da resina desempenham papel crucial na qualidade da impressão (Lin, et al., 2020). Além disso, parâmetros de impressão também influencia diretamente na qualidade do objeto impresso. Tempo de exposição e espessura de camada, devem ser ajustados considerando o tipo de resina e o modelo da impressora 3D (Tahayeri et al., 2018; Loflin et al., 2019; Alshamrani et al., 2022).

Há uma variedade de resinas disponíveis para impressão 3D e estas alternam sua composição de acordo com as aplicações e finalidades dos objetos produzidos. As resinas para impressão 3D devem ser líquidas e capazes de polimerizar sob a luz emitida pela impressora (Guerra, et al., 2019). Monômeros de baixa viscosidade e alta fluidez são comumente utilizados (Lin, et al., 2020). O fotoiniciador, bem como sua concentração, deve ser compatível com o comprimento de onda da luz emitida pela impressora (Melisaris, et al., 2002; Guerra, et. al., 2019). Entre os monômeros resinosos mais utilizados encontram-se o trietilenoglicol dimetacrilato (TEGDMA), uretano dimetacrilato (UDMA) e bisfenol-A dimetacrilato etoxilado (BisEMA) (Lin, et al., 2019). Os fotoiniciadores do tipo I de Norrish são frequentemente utilizados (Guerra, et al., 2019). Dependendo da aplicação, a resina pode ser conter somente matriz orgânica, sem cargas ou pigmentos, ou incluir cargas nano-híbridas ou micro-híbridas, bem como pigmentos (Della Bona, et al., 2021; Aati, et al., 2021).

Diversos fatores intrínsecos e extrínsecos influenciam a polimerização e as propriedades físicas de materiais resinosos. A base monomérica (Lovell, et al., 1999), o tipo de fotoiniciador (Miletic, Santini, 2012), a carga em formato e tamanho (Turssi, et al., 2005), assim como os pigmentos (Musanje, Darvel, 2006), exercem impacto direto na polimerização e nas propriedades do material. A dispersão da luz na resina é completamente diferente em resinas sem carga transparente e resinas com carga e pigmento. Além disso, fatores extrínsecos, como a intensidade luminosa (Halvorson, et al., 2002), o tempo de exposição (Emami, Söderholm, 2003) e a distância da fonte de luz (Price, et al., 2011) também desempenham papel significativo na polimerização e nas características físicas e propriedades da resina.

Assim como outras resinas fotossensíveis, resinas destinadas à impressão 3D são suscetíveis à influência desses fatores intrínsecos e extrínsecos. A formulação específica da resina impacta diretamente suas características e propriedades (Piedra-Cascón, et al., 2021). A angulação de impressão e a espessura do fatiamento também afetam as características superficiais do material (Unkovskiy, et al., 2018; Loflin, et al., 2019). No entanto, a interação entre a composição da resina, relacionado a partículas de carga e pigmentos, a espessura de

camada e o tempo de exposição nas propriedades mecânicas e na acurácia de impressão os objetos impressos com resinas de impressão 3D ainda não é claro e demanda estudos.

Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da relação entre tempo de exposição e espessura de camada nas características de polimerização, acurácia de impressão e propriedades mecânicas de resinas comerciais, sendo uma particulada e com carga e outra transparente e sem carga, quando impressas por tecnologia LCD.

As hipóteses testadas neste estudo foram: 1. A acurácia de impressão será afetada pelo tempo de exposição, maiores tempos resultarão em objetos aumentados volumetricamente; 2. As propriedades mecânicas e o grau de conversão serão afetados pela variação dos parâmetros de impressão dependendo do tipo de resina; 3. A topografia dos objetos impressos, será afetada pela espessura de fatiamento, mas não pelo tempo de exposição.

Material e Método

Delineamento do Estudo

Para este estudo, o efeito de 3 fatores: 1) Resina para impressão 3D, em dois níveis, (Standard e Clear); 2) Tempo de exposição, em quatro níveis (2 segundos, 3 segundos, 4 segundos e 6 segundos); e 3) Espessura do fatiamento, em dois níveis (0,025 mm e 0,05 mm) sobre seis variáveis de resposta: acurácia de impressão, resistência à flexão, módulo de elasticidade, dureza, grau de conversão e rugosidade de superfície foi determinado. Os parâmetros de impressão foram definidos através de estudo piloto

Confecção dos Espécimes

Os espécimes foram impressos e pós-curados de acordo com os parâmetros apresentados a seguir:

Resina para impressão 3D

Foram selecionadas duas resinas para impressão 3D destinadas a impressão de objetos modelos odontológicos e auxiliares protéticos, sendo uma transparente e sem carga – Clear (3D Printing UV Sensitive Resin, Anycubic Technology CO.LTD, Shenzhen, China) e outra pigmentada e com carga – Standard (3D Printing Photopolymer Resin Dental Mode, Yellowish, Weistek CO.LTD, Shenzhen, China). A composição e especificações das resinas podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição e Especificações das resinas utilizadas neste estudo.

Resina 3D	Fabricante	Composição
3D Printing UV Sensitive Resin (Clear)	Anycubic Technology CO.LTD, Shenzhen, China.	Acrilato de poliuretano, monômero de acrilato e fotoiniciador
3D Printing Photopolymer Resin Dental Mode (Standard)	Weistek CO.LTD, Shenzhen, China.	Monômeros resinosos, fotoiniciadores, pigmento e carga

Parâmetros de impressão, Impressora 3D e Parâmetros de pós-cura

Todos os espécimes foram projetados de forma digital com o Software Fusion 360 (Autodesk Inc., San Rafael, CA, USA) e convertidos em arquivos STL.

O planejamento de impressão foi realizado no software ChiTuBox® (ChiTuBox V1.7.0; ChiTuBox, Shenzhen, China), no qual foram inseridos os parâmetros de impressão espessura da fatia e tempo de exposição de acordo com o grupo, ângulo de impressão de 45°, em relação ao eixo dos espécimes, e a localidade dos apoios. Os parâmetros de impressão foram definidos a partir de estudo piloto objetivando a hipo e hiperexposição das resinas. Assim, tempos de exposição de 2 segundos, 3 segundos, 4 segundos e 6 segundos foram testados; assim como 2 espessuras de fatiamento: 0,025 mm e 0,05 mm. Esses parâmetros foram utilizados para ambas as resinas.

A impressora utilizada neste estudo foi a impressora 3D de tecnologia LCD Endurance Oralprint (Oralprint, São Paulo, SP, Brasil), especialmente desenvolvida para aplicações odontológicas.

Espécimes em forma de disco com 5 mm de diâmetro por 2 mm de espessura foram impressos para as análises de rugosidade de superfície, dureza Knoop e grau de conversão. Para os testes de acurácia de impressão, resistência à flexão e módulo de elasticidade foram impressos espécimes em forma de barra com 25 mm de comprimento, 2 mm de largura e 2 mm de espessura.

Para a pós-cura, a Câmara UV Oralprint (Oralprint, São Paulo, SP, Brasil) foi utilizada. Os espécimes foram posicionados sobre uma lâmina de vidro no centro do equipamento e pós-curados por 20 minutos, sendo que após 10 minutos os espécimes eram virados, para que houvesse polimerização homogênea. Em seguida, os espécimes foram armazenados em ambiente seco ao abrigo da luz por 24 horas, até o início dos testes.

Análise da Acurácia de Impressão

A acurácia de impressão foi avaliada através da comparação do volume real dos espécimes em forma de barra (n=10) com o volume pré-determinado no software CAD (25 mm

$\times 2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} = 100\text{mm}^3$). Medidas em cada dimensão (altura, comprimento e espessura) foram tomadas com paquímetro digital (Mitutoyo, Brasil) para o cálculo do volume real do espécime, o qual foi calculado através da equação apresentada abaixo.

$$\text{Volume real (mm}^3\text{)} = \text{Comprimento} \times \text{Espessura} \times \text{Altura}$$

O erro dimensional volumétrico obtido pela diferença entre o valor de referência definido no projeto CAD (100 mm^3) e o volume real calculado, foi utilizado para a análise de precisão.

$$\text{Erro dimensional (\%)} = (\text{Volume real} - \text{Volume projetado}) \times 100$$

Análise da Resistência à Flexão e Módulo de Elasticidade

A avaliação da resistência à flexão e determinação do módulo de elasticidade foram realizadas com teste de flexão de 3 pontos de acordo com a ISO 4049:2019. Os espécimes em forma de barra ($n=10$) foram posicionados em máquina de ensaios universal (Instron, modelo 4411, Buckinghamshire, Inglaterra) com a distância entre apoios de 20 mm e velocidade de carga compressiva de 1 mm/min até a fratura. Os dados obtidos em Kgf foram convertidos em MPa e o módulo de elasticidade calculado pelo software Bluehill 2.

Análise da Dureza Knoop

Espécimes em forma de disco ($n=5$) foram polidos em lixas d'água de granulação decrescente (#600, #1200, #2000) e discos de feltro com pasta diamantada acoplados a politriz (Arotec S/A Ind. e Com., Cotia, SP, Brasil). A cada troca de lixas e feltros, os espécimes foram lavados em água destilada por 20 minutos em cuba ultrassônica (Shenzhen Codyson Electrical Co., Ltd, CHN) para remoção dos resíduos da superfície.

A análise da dureza foi efetuada em microdurômetro (FM-ARS 9000; Future-Tech Corp., Tokio, Japão) com endentador Knoop, com carga de 50 g aplicada durante 5 segundos. Três endentações foram realizadas na superfície dos espécimes. Os valores, obtidos em micrometros, foram convertidos em número de dureza Knoop (KHN), pelo software do aparelho (HDPS-ARS Ver. 1.31.4). A média aritmética obtida entre as 3 endentações foi utilizada para a análise estatística.

Análise do Grau de Conversão

O Grau de Conversão foi avaliado em Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier - FTIR, com acessório de Refletância Total Atenuada acoplado – ATR (Vertex 70; BrukerOptik GmbH, Ettlingen, Alemanha). 20 mg de cada resina não polimerizada foram dispensados sobre o cristal para obtenção dos espectros infravermelhos dos materiais não polimerizados. Em seguida, os espécimes (n=3), impressos e pós-curados de acordo com a descrição, foram colocados sobre o cristal e os espectros infravermelhos dos materiais polimerizados foram obtidos. Os espectros dos materiais foram obtidos entre 400 e 4000 cm⁻¹ pela co-adição de 16 scans com resolução de 4 cm⁻¹.

O cálculo do grau de conversão foi realizado baseado na proporção entre as duplas ligações de carbono, alifático, aromático e carbonila, nos estados polimerizados e não polimerizados. Para resina Standard o cálculo foi feito baseado na variação da intensidade das bandas localizadas entre 1640 e 1720 cm⁻¹, correspondente as ligações alifáticas e carbonila, respectivamente. Para resina Clear, o cálculo foi baseado na variação da intensidade das bandas entre 1610 e 1640 cm⁻¹, correspondente as ligações aromáticas e alifáticas, respectivamente.

A determinação do grau de conversão (GC%) foi feito através da seguinte equação:

$$GC (\%) = \left(1 - \frac{\text{Polimerizado}}{\text{Não polimerizado}} \right) \times 100$$

Análise da Rugosidade de Superfície

Para análise da rugosidade de superfície, espécimes em forma de disco (n=5) foram posicionados em rugosímetro de contato (Surfcorder modelo SE1700, Kosaka Corp., Tokio, Japão) e três mensurações em diferentes orientações foram realizadas. A rugosidade média (Ra), representada pela média entre os picos e vales da superfície, foi avaliada após a respectiva agulha do instrumento percorrer 2,5 mm sobre a superfície em análise com velocidade de 0,05 mm/s, com cut-off de 0,25 mm. A média das três leituras foi considerada a rugosidade média (Ra) do espécime.

Análise Estatística

Os dados foram submetidos a ANOVA 3-fatores e teste post-hoc de Tukey com nível de significância de 5%. Foi utilizado o software estatístico ASSISTAT 7.7.

Resultados

Acurácia de Impressão

De acordo com a Análise de Variância, todos os fatores de estudo, assim como a interação entre eles, foram significativos para acurácia de impressão ($p < 0,01$). A comparação das médias com o teste post-hoc de Tukey é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Comparação das médias da variação do volume (%).

		Variação do volume (%)			
		2 segundos	3 segundos	4 segundos	6 segundos
CLEAR	0,025 mm	-1,11 (7,14) abB	2,23 (4,33) bAB	6,33 (4,92) bcAB	9,03 (4,32) cA
	0,05 mm	-3,98 (5,98) bA	-1,42 (3,63) bA	-0,04 (2,23) cA	-0,05 (7,76) dA
STANDARD	0,025 mm	4,14 (1,96) aC	18,43 (7,57) aB	19,2 (7,08) aB	76,29 (18,41) aA
	0,05 mm	1,13 (3,6) abC	5,95 (4,2) bBC	13,72 (5,01) abAB	21,25 (7,17) bA

Médias seguida por letras minúsculas diferentes na mesma coluna e letras maiúsculas na mesma linha indica diferença significativa ($p < 0,05$) para variação do volume. Valores negativos indicam volume inferior ao projetado no software CAD.

Para a resina Clear, algumas combinações de tempo de exposição com espessura do fatiamento causaram diminuição do volume dos espécimes enquanto outras causaram aumento, representados por números negativos e positivos, respectivamente. Para a resina Standard, todas as combinações avaliadas causaram aumento significativo do volume.

Observa-se que as resinas apresentam diferenças significativas no padrão de comportamento frente às diferentes combinações de fatiamento e exposição. Os parâmetros de impressão que causaram menores alterações no volume, ou seja, que obtiveram maior acurácia de impressão para a resina Clear foram 4 segundos de tempo de exposição com espessura de fatiamento de 0,05 mm, embora não haja diferença significativa dos demais tempos de exposição nessa espessura de fatiamento. Para a resina Standard, a melhor combinação foi de 2 segundos de exposição com espessura de fatiamento de 0,05 mm, embora sem diferença significativa das combinações 2s/0,025mm e 3s/0,05mm. Assim, estes podem ser considerados os parâmetros mais apropriados para impressão. Os parâmetros que causaram distorções inaceitáveis para aplicações odontológicas, acarretando aumento de volume excessivo, foram as combinações 4s/0,05mm, 6s/0,05mm, 3s/0,025mm, 4s/0,025mm, 6s/0,025mm para resina Standard, e 6s/0,025mm para resina Clear.

Resistência à Flexão

De acordo com a Análise de Variância todos os fatores de estudo, assim como a interação entre eles, foram significativos para resistência à flexão ($p < 0,01$). A comparação das médias com o teste post-hoc de Tukey é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Comparação das médias de Resistência à Flexão (MPa).

		Resistência à Flexão (MPa)			
		2 segundos	3 segundos	4 segundos	6 segundos
CLEAR	0,025 mm	60,05 (2,9) bAB	57,23 (4,1) bB	63,92 (3,7) cA	64,45 (8,5) bA
	0,05 mm	59,21 (2,7) bAB	61,13 (3,7) bAB	62,15 (3,4) cA	56,85 (10,5) cB
STANDARD	0,025 mm	76,85 (1,6) aB	77,75 (3,5) aB	84,19 (2,8) aA	71,49 (3,3) aC
	0,05 mm	75,48 (1,4) aA	75,13 (3,9) aA	74,72 (2,2) bA	72,65 (3,3) aA

Médias seguida por letras minúsculas diferentes na mesma coluna e letras maiúsculas na mesma linha indica diferença significativa ($p < 0,05$) para resistência à flexão.

Considerando os padrões apropriados de impressão já definidos no teste de acurácia, observa-se que para a resina Clear, a combinação 4s/0,05mm acarretou resistência a flexão significativamente superior à combinação 6s/0,05mm, enquanto as combinações 2s/0,05mm e 3s/0,05mm apresentaram valores intermediários não diferindo significativamente das demais.

Para Standard, não houve diferença significativa nos valores de resistência para os diferentes tempos de exposição na espessura de fatiamento de 0,05mm, de modo que se pode considerar que todos os grupos apresentaram valores de resistência aceitáveis nessa condição. Cabe salientar que a combinação 4s/0,25mm apresentou o maior valor de resistência à flexão, diferindo significativamente dos demais, porém essa combinação apresentou distorção excessiva na impressão e por isso, apesar do ganho em resistência, essa combinação não é considerada apropriada.

Módulo de Elasticidade

De acordo com a Análise de Variância, apenas o tipo de resina foi significativo ($p < 0,01$), porém há interação significativa entre os três fatores (resina, tempo de exposição e espessura de fatiamento) para módulo de elasticidade ($p < 0,01$). A comparação das médias com o teste post-hoc de Tukey é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Comparação das médias de Módulo de Elasticidade (GPa).

		Módulo de Elasticidade (GPa)			
		2 segundos	3 segundos	4 segundos	6 segundos
CLEAR	0,025 mm	1,50 (0,18) bAB	1,43 (0,14) bB	1,53 (0,18) bAB	1,64 (0,18) aA
	0,05 mm	1,51 (0,17) bA	1,52 (0,13) bA	1,62 (0,14) bA	1,57 (0,24) aA
STANDARD	0,025 mm	1,68 (0,06) aAB	1,75 (0,16) aA	1,80 (0,19) aA	1,52 (0,12) aB
	0,05 mm	1,63 (0,03) abB	1,84 (0,16) aA	1,59 (0,06) bB	1,62 (0,14) aB

Médias seguida por letras minúsculas diferentes na mesma coluna e letras maiúsculas na mesma linha indica diferença significativa ($p < 0,05$) para módulo de elasticidade.

A análise do módulo de elasticidade permite verificar a rigidez dos materiais, nesse contexto, observa-se que considerando as combinações mais apropriadas, a resina Standard apresenta módulo de elasticidade significativamente superior à resina Clear, tomando como referências as combinações 2s/0,05mm, 2s/0,025mm e 3s/0,05mm para a resina Standard e as 2s/0,05mm, 3s/0,05mm e 4s/0,05mm para a resina Clear.

Analisando os efeitos do tempo de exposição, para a resina Clear, o aumento do tempo de exposição não acarretou aumento do módulo de elasticidade na espessura de 0,05mm, de modo que não houve diferença significativa entre os grupos. Já, para a espessura de 0,025, o tempo de exposição de 6s aumentou significativamente o módulo de elasticidade, porém como esse aumento de rigidez também foi acompanhado de aumento de volume inaceitável, essa combinação não é considerada apropriada.

Para a resina Standard, com espessura de fatiamento de 0,05mm, o tempo de exposição de 3s acarretou módulo de elasticidade significativamente superior aos tempos de 2s, 4s e 6s.

Dureza Knoop

De acordo com a Análise de Variância, todos os fatores de estudo, assim como a interação entre eles, foram significativos para dureza Knoop ($p < 0,0001$). A comparação das médias com o teste post-hoc de Tukey é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Comparação das médias de Dureza Knoop (KHN).

		Dureza Knoop (KHN)			
		2 segundos	3 segundos	4 segundos	6 segundos
CLEAR	0,025 mm	11,77 (0,58) cA	12,56 (0,55) bcA	11,91 (0,75) bA	11,87 (0,63) bA
	0,05 mm	12,96 (0,42) bA	11,94 (0,76) cA	12,35 (0,92) bA	12,78 (0,46) bA
STANDARD	0,025 mm	15,06 (0,37) aA	13,06 (0,42) bB	14,58 (0,57) aA	14,33 (0,24) aA
	0,05 mm	15,79 (0,83) aA	14,95 (0,93) aAB	14,05 (0,28) aB	13,94 (0,56) aB

Médias seguida por letras minúsculas diferentes na mesma coluna e letras maiúsculas na mesma linha indica diferença significativa ($p < 0,05$) para dureza Knoop.

Para a dureza Knoop, observa-se que a resina Standard apresenta dureza significativamente superior à resina Clear, tomando como referências as combinações 2s/0,05mm, 2s/0,025mm e 3s/0,05mm para a resina Standard e as 2s/0,05mm, 3s/0,05mm e 4s/0,05mm para a resina Clear.

Dentro dessas combinações consideradas apropriadas, para ambas as resinas, não há diferença significativa entre os grupos. Adicionalmente, cabe salientar que, para a resina Clear, para o tempo de exposição de 2s, a espessura de 0,025mm causou redução significativa de dureza quando comparado à espessura de 0,05mm. Nos demais tempos, as médias não se diferenciam. Para resina Standard, ocorre diferença estatística entre as espessuras de fatiamento apenas no tempo de exposição de 3 segundos, nos demais tempos não há diferença estatística.

Grau de Conversão

De acordo com a Análise de Variância, todos os fatores de estudo, assim como a interação entre eles, foram significativos para o grau de conversão ($p < 0,0001$). A comparação das médias com o teste post-hoc de Tukey é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Comparação das médias de Grau de Conversão (%).

		Grau de Conversão (%)			
		2 segundos	3 segundos	4 segundos	6 segundos
CLEAR	0,025 mm	97,01 (0,56) aA	92,53 (0,91) aB	88,16 (1,25) aC	91,33 (0,85) bB
	0,05 mm	89,23 (0,80) bB	86,59 (2,11) bB	79,86 (2,29) bC	94,78 (2,37) aA
STANDARD	0,025 mm	56,79 (0,59) cB	58,63 (1,38) cA	55,86 (0,61) cAB	58,12 (0,42) cA
	0,05 mm	53,69 (0,82) cAB	57,93 (0,45) cAB	55,78 (1,44) cB	58,51 (0,50) cA

Médias seguida por letras minúsculas diferentes na mesma coluna e letras maiúsculas na mesma linha indica diferença significativa ($p < 0,05$) para grau de conversão.

Para o grau de conversão, observa-se que a resina Standard apresenta grau de conversão significativamente inferior à resina Clear, tomando como referências as combinações 2s/0,05mm, 2s/0,025mm e 3s/0,05mm para a resina Standard e as 2s/0,05mm, 3s/0,05mm e 4s/0,05mm para a resina Clear.

Considerando os parâmetros de impressão, a maior espessura de camada (0,05 mm) acarretou redução do grau de conversão para a resina Clear quando combinada com os tempos de 2s, 3s e 4s. Já para a resina Standard, a espessura de fatiamento não gerou efeito significativo e não houve diferenças entre as espessuras 0,025 mm e 0,05 mm para todos os tempos de exposição. Adicionalmente, observa-se que o tempo de exposição afetou as resinas de modo

diferente, o maior grau de conversão foi verificado para a combinação 2s/0,025mm para a resina Clear (97%), diferindo significativamente das demais combinações, enquanto para a resina Standard, as espessuras de fatiamento não causaram diferença estatística entre os tempos de exposição avaliados.

Rugosidade de Superfície

De acordo com a Análise de Variância, apenas a espessura do fatiamento exerce efeito significativo para rugosidade ($p = 0,4117$). A comparação das médias com o teste post-hoc de Tukey é apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 – Comparação das médias de Rugosidade de Superfície (μm).

		Rugosidade de Superfície (μm)				Média por Fatiamento
		2 segundos	3 segundos	4 segundos	6 segundos	
CLEAR	0,025 mm	2,168 (0,274)	2,129 (0,796)	2,281 (0,820)	3,263 (0,645)	b
	0,05 mm	2,682 (0,668)	2,896 (0,665)	2,943 (0,712)	3,017 (0,743)	a
STANDARD	0,025 mm	2,414 (0,383)	2,267 (0,778)	2,139 (0,402)	2,232 (0,660)	b
	0,05 mm	2,793 (0,607)	2,970 (0,798)	2,646 (0,754)	3,123 (0,792)	a
Média por Tempo		A	A	A	A	

Médias seguidas por letras minúsculas diferentes na mesma coluna e letras maiúsculas na mesma linha indicam diferença significativa ($p < 0,05$) para rugosidade de superfície.

Considerando a rugosidade de superfície, apenas o fator fatiamento gerou efeito significativo. A espessura de fatiamento de 0,025 mm resultou em espécimes com superfícies significativamente mais lisas do que a espessura de 0,05 mm.

Discussão

A acurácia de impressão é uma propriedade fundamental para a aplicação da tecnologia de impressão 3D em odontologia. Se o objeto impresso não for fiel ao modelo digital, a aplicação odontológica desse tipo de impressão está fadada ao fracasso. Baseado nos resultados, a acurácia de impressão foi afetada por todas as variáveis de estudo. De maneira geral, maiores tempos de exposição causaram aumento do volume dos objetos impressos, independentemente da espessura de fatiamento, e, desta forma, a primeira hipótese testada foi aceita.

O aumento do volume do espécime com o aumento do tempo de exposição provavelmente está relacionado com a emissão de luz durante a polimerização da camada (Alharbi et al., 2016). Supõem-se que, durante a polimerização quando ocorre hiperexposição

e a emissão de luz se mantem por mais tempo que o necessário, devido à característica de reação em cadeia da polimerização, monômeros adjacentes à região de exposição à luz emitida pelo LCD são incorporados à cadeia polimérica, e, desta forma, o objeto impresso tem volume superior ao projetado no software CAD. Entretanto, a magnitude desse aumento de volume depende do tipo / composição da resina, pois observou-se que o aumento de volume em função da hiperexposição foi significativamente maior para a resina Standard. De acordo com a Tabela 2, observa-se valores de discrepância extremamente altos (variando de 13 a 76% de aumento) para os tempos de 3s, 4s e 6s, quando a espessura de fatiamento de 0,025mm foi avaliada e também para os tempos de 4s e 6s, com a espessura de fatiamento de 0,05mm, inviabilizando a aplicação dessas combinações para a impressão. Pelo fato desta conter carga em sua composição (Tabela 1), durante a polimerização essas partículas podem ter sido envolvidas pela matriz polimérica, e por consequência, aumentaram o volume do espécime.

Já para a resina Clear, na espessura de 0,05mm, todos os tempos de exposição acarretaram discreta redução de volume do objeto impresso. O aumento excessivo de volume associado à hiperexposição só foi observado nas combinações de espessura de fatiamento de 0,025mm com os tempos de exposição de 4 e 6s. Como esse tipo de resina é composto basicamente por monômeros de baixa viscosidade e não há partículas de carga (Tabela 1), os efeitos da contração de polimerização são mais evidentes. Associa-se, portanto, a diminuição do volume do objeto com a contração de polimerização do material (Unkovskiy, et al., 2018; Castro, et al., 2022). Embora deva-se salientar a excelente acurácia, especialmente nas combinações 3s/0,05mm, 4s/0,05mm, 6s/0,05mm e 2s/0,025mm.

Ao analisar as propriedades mecânicas, bem como as características de polimerização dos objetos impressos, observa-se que a variação dos parâmetros de impressão (tempo de exposição e espessura de fatiamento) afeta diferentemente as resinas, de modo que a segunda hipótese pode ser aceita. Para todos os testes realizados envolvendo essas propriedades (resistência à flexão, módulo de elasticidade, dureza e grau de conversão), observou-se que a interação tripla dos fatores tempo de exposição, espessura de fatiamento e tipo de resina foi significativa.

Quanto a resistência à flexão, o tipo de resina, o tempo de exposição e espessura de fatiamento afetaram essa propriedade. Comparando as resinas, observa-se que a resina Standard (75MPa, em média) apresenta resistência significativamente superior à Clear (60MPa, em média), e isso pode ser explicado pela presença de carga na resina Standard (Braem, et al., 1989). Apesar da diferença significativa entre as resinas, é conveniente salientar que ambas apresentaram resistência à flexão superior a 50 MPa, cumprindo assim o requisito mínimo

exigido pela ISO 10477, que trata de resinas acrílicas para uso odontológico. Adicionalmente, todas as combinações dos parâmetros de impressão considerados adequados no teste de acurácia, para ambas as resinas, apresentaram a resistência a flexão adequada, sendo que para a resina Clear, a combinação 4s/0,05mm apresentou o maior valor de resistência e para a resina Standard não houve diferença entre as combinações 2s/0,025mm, 2s/0,05mm e 3s/0,05mm. Os resultados de módulo de elasticidade e dureza acompanharam os resultados de resistência à flexão, e a resina Standard mostrou-se significativamente mais rígida e mais dura que a resina Clear, fato também explicado pela presença de carga na resina Standard. A incorporação de carga aumenta a resistência mecânica de materiais polimérico (Braem, et al., 1989). O mesmo foi observado em demais estudos com compósitos que continham carga na composição (Quan, et al., 2020). As partículas de carga podem, durante o processo de impressão, se agrupar e causar o aumento da dureza de uma área do espécime (Halvorson, et al., 2003; Harlow, et al., 2016), ou até mesmo um espécime ficar com maior quantidade de carga do que outros. Enfatiza-se, portanto, que a resina destinada a impressão 3D deve ser adequadamente homogeneizada para possa conter carga em todo o objeto. Neste mesmo raciocínio, o conglomerado de partículas de carga na superfície do espécime pode causar a difração da luz, impedindo a uniforme polimerização do espécime, resultando na variação da dureza (Leprince, et al., 2013; Quan, et al., 2020).

Em ambas as resinas testadas os parâmetros de impressão foram semelhantes. Analisando cada resina individualmente, pode-se verificar que não houve diferenças significativas entre todas as combinações de tempo de exposição e espessura de fatiamento considerados adequados no teste de acurácia. Algumas diferenças significativas nessas propriedades foram observadas apenas nos grupos que apresentaram distorção exagerada, como é o caso da combinação 6s/0,025mm para a resina Clear, que apresentou resistência à flexão significativamente superior, entretanto, e nesse contexto, esse ganho de resistência é irrelevante, pois o objeto impresso foi extremamente alterado, inviabilizando sua aplicação.

Também, para o teste de dureza, o comportamento dos grupos aprovados no teste de acurácia foi similar. Apesar da variação no tempo de exposição, que poderia levar a espécimes mais bem polimerizados e com dureza superior em tempos de exposição maiores, todos os espécimes foram submetidos ao mesmo protocolo de pós-cura. Esse fato pode ter igualado a dureza superficial dos espécimes (Leprince, et al., 2013; Harlow, et al., 2016).

A resina Clear não apresenta carga e pigmento em sua composição, assim a polimerização durante a protocolo de pós-cura ocorreu de forma homogênea e semelhante, levando a resultados de dureza que não diferem estatisticamente entre si (Leprince, et al., 2011;

Harlow, et al., 2016). Entretanto, o mesmo não foi observado no grau de conversão, esta apresentou diferença estatística entre os tempos de exposição no mesmo fatiamento.

Na resina Standard, diferenças estatísticas foram observadas entre o tempo de exposição na mesma espessura de fatiamento. Porém, não houve diferença entre as espessuras de fatiamento em todos os tempos de exposição avaliados. O grau de conversão de resinas é significativamente afetado pela composição do material (Leprince, et al., 2013). Tanto os monômeros quanto as suas proporções na matriz orgânica do compósito afetam a eficiência da polimerização (Lovell, et al., 1999).

Neste estudo, diferentes resinas foram utilizadas, por isso diferentes picos foram analisados. Para resina Clear, os picos de 1610 cm^{-1} e 1640 cm^{-1} foram selecionados, estes referem as ligações aromáticas e alifáticas, respectivamente (Xu, et al., 2020). Dentre os monômeros dimetacrilato utilizados para esse tipo de material, BisEMA e BisGMA correspondem a esses picos (Ogliari, et al., 2008). A viscosidade de BisGMA é incompatível para utilização em resinas para impressão 3D (Choi, et al., 2022). Desta forma, presume-se que o monômero constituinte desta resina Clear seja BisEMA. Para resina Standard, os picos de 1640 cm^{-1} e 1720 cm^{-1} foram selecionados, estes referem as ligações alifáticas e carbonila, respectivamente (Xu, et al., 2020; Chen, et al., 2020). Correspondem a esses picos os monômeros UDMA e TEGDMA. Ambos possuem baixa viscosidade e são compatíveis para elaboração de resinas destinadas à impressão 3D (Lin, et al., 2020; Ling, et al., 2022).

Observou-se que a espessura de camada é um fator significativo para o grau de conversão (Tabela 6). Para resina Clear, a espessura de camada de 0,025 mm resultou em maior grau de conversão, exceto no tempo de 6 segundos. Entretanto, na resina Standard, o grau de conversão em todos os tempos de exposição em ambas as espessuras de fatiamento não se diferiu, o que pode estar relacionado a composição, principalmente quanto ao pigmento e carga (Leprince, et al., 2011; Leprince, et al., 2013). A resina Clear apresentou resultados de grau de conversão significativamente maiores do que a resina Standard, isso se também se justifica pela composição. A não presença de carga e pigmentos resulta em maiores médias.

A polimerização, tanto na impressão quanto na pós-cura, se dá através de luz violeta e ultravioleta. Este tipo de luz possui comprimento de onda curto, que limita a sua penetração em profundidade no material (Rocha, et al., 2022). Partículas de carga e pigmentos aumentam a atenuação e dispersão da luz, restringindo-a as camadas superficiais do espécime (Harlow, et al., 2016).

Ressalta-se que a análise do grau de conversão foi realizada apenas na superfície do espécime. Estudos relatam a redução da polimerização em profundidade nos compósitos

resinosos de uso direto (Leprince, et al., 2012; Soto-Montero, et al., 2020; Mendonça, et al., 2021), desta forma, espera-se a resultados semelhantes em resinas para impressão 3D.

Outro fator de relevância para odontologia na impressão 3D é a topografia dos objetos impressos. Nesse estudo, observou-se que a rugosidade foi afetada somente pela espessura de fatiamento, os demais fatores de estudo não foram significativos, de modo que a terceira hipótese também foi aceita. Fatias de espessuras maiores resultaram em objetos com maior média de rugosidade. Corroborando com os dados apontados em estudo anterior, no qual a espessura de fatiamento menor resultou em objetos menos rugosos (Kessler, et al., 2020). Essa propriedade também pode ser afetada por outros fatores como a angulação de impressão (Brenes, et al. 2020). Entretanto, neste estudo todos os espécimes foram impressos na mesma angulação, assim, somente a espessura de fatiamento exerceu influência nesta propriedade.

Apesar de fatiamentos menores resultarem em objetos menos rugoso, deve-se levar em consideração que quanto menor a espessura do fatiamento, maior será o tempo de impressão (Kessler, et al., 2020). Clinicamente isso pode se tornar uma desvantagem. Recomenda-se, em um ambiente clínico optar por fatiamentos maiores e submeter a peça final ao acabamento e polimento.

A análise combinada de todos as variáveis estudadas mostra que o tempo de exposição deve ser ajustado para cada tipo de resina e impressora, a falta desse ajuste pode acarretar redução da acurácia de impressão.

Deste modo, mais pesquisas devem ser feitas com o objetivo da melhora da acurácia de impressão e aprimoramento das propriedades físicas dos materiais através de novos protocolos de pós-cura e elaboração de novas resinas.

Conclusão

Pode-se concluir que:

1. O tempo de exposição e a espessura de camada afetam a acurácia de impressão. O aumento do tempo de exposição causa aumento no objeto impresso;
2. Menores espessuras de camada tendem a potencializar a polimerização de resinas para impressão 3D sem carga e pigmento, bem como imprimir objetos com superfície menos rugosa;
3. A composição da resina, em especial as partículas de carga e pigmentos, interfere diretamente nas propriedades mecânicas das resinas para impressão 3D impressas em impressora 3D com tecnologia LCD.

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 Jun;37(6):e360-e374. doi: 10.1016/j.dental.2021.02.010.
- Alharbi N, Osman RB, Wismeijer D. Factors Influencing the Dimensional Accuracy of 3D-Printed Full-Coverage Dental Restorations Using Stereolithography Technology. *Int J Prosthodont.* 2016 Sep-Oct;29(5):503-10. doi: 10.11607/ijp.4835. PMID: 27611757.
- Alshamrani AA, Raju R, Ellakwa A. Effect of Printing Layer Thickness and Postprinting Conditions on the Flexural Strength and Hardness of a 3D-Printed Resin. *Biomed Res Int.* 2022 Feb 21;2022:8353137. doi: 10.1155/2022/8353137.
- Braem M, Finger W, Van Doren VE, Lambrechts P, Vanherle G. Mechanical properties and filler fraction of dental composites. *Dent Mater.* 1989 Sep;5(5):346-8. doi: 10.1016/0109-5641(89)90128-0. PMID: 2638279.
- Brenes C, Renne W, Tolbert T, Fantaski L. Effect of Print Angulation on Surface Roughness of 3D-Printed Models. *Compend Contin Educ Dent.* 2020 Nov;41(10):e1-e4. PMID: 33350846.
- Castro EF, Nima G, Rueggeberg FA, Giannini M. Effect of build orientation in accuracy, flexural modulus, flexural strength, and microhardness of 3D-Printed resins for provisional restorations. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2022 Dec;136:105479. doi: 10.1016/j.jmbbm.2022.105479. Epub 2022 Sep 29. PMID: 36279743.
- Chen H, Lee SY, Lin YM. Synthesis and Formulation of PCL-Based Urethane Acrylates for DLP 3D Printers. *Polymers (Basel).* 2020 Jul 5;12(7):1500. doi: 10.3390/polym12071500. PMID: 32635639; PMCID: PMC7407232.
- Choi Y, Yoon J, Kim J, Lee C, Oh J, Cho N. Development of Bisphenol-A-Glycidyl-Methacrylate- and Trimethylolpropane-Triacrylate-Based Stereolithography 3D Printing Materials. *Polymers (Basel).* 2022 Nov 29;14(23):5198. doi: 10.3390/polym14235198. PMID: 36501591; PMCID: PMC9736893.
- Della Bona A, Cantelli V, Britto VT, Collares KF, Stansbury JW. 3D printing restorative materials using a stereolithographic technique: a systematic review. *Dent Mater.* 2021 Feb;37(2):336-350. doi: 10.1016/j.dental.2020.11.030.
- Dewaele M, Leprince JG, Fallais I, Devaux J, Leloup G. Benefits and limitations of adding hyperbranched polymers to dental resins. *J Dent Res.* 2012 Dec;91(12):1178-83. doi: 10.1177/0022034512463578. Epub 2012 Oct 5. PMID: 23042125.

Emami N, Söderholm KJ. How light irradiance and curing time affect monomer conversion in light-cured resin composites. *Eur J Oral Sci.* 2003 Dec;111(6):536-42. doi: 10.1111/j.0909-8836.2003.00082.x. PMID: 14632692.

Guerra AJ, Lammel-Lindemann J, Katko A, Kleinfehn A, Rodriguez CA, Catalani LH, Becker ML, Ciurana J, Dean D. Optimization of photocrosslinkable resin components and 3D printing process parameters. *Acta Biomater.* 2019 Oct 1;97:154-161. doi: 10.1016/j.actbio.2019.07.045. Epub 2019 Jul 26. PMID: 31352105.

Halvorson RH, Erickson RL, Davidson CL. Energy dependent polymerization of resin-based composite. *Dent Mater.* 2002 Sep;18(6):463-9. doi: 10.1016/s0109-5641(01)00069-0. PMID: 12098575.

Halvorson RH, Erickson RL, Davidson CL. The effect of filler and silane content on conversion of resin-based composite. *Dent Mater.* 2003 Jun;19(4):327-33. doi: 10.1016/s0109-5641(02)00062-3. PMID: 12686298.

Harlow JE, Rueggeberg FA, Labrie D, Sullivan B, Price RB. Transmission of violet and blue light through conventional (layered) and bulk cured resin-based composites. *J Dent.* 2016 Oct;53:44-50. doi: 10.1016/j.jdent.2016.06.007. Epub 2016 Jun 30. PMID: 27373167.

Hull CW., Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography, United States patent 4575330. 11 Mar 1986.

International Organization for Standardization. ISO 10477:2004(E): dentistry: Polymer-based crown and bridge materials. Geneva: ISO; 2004. 28 p.

International Organization for Standardization. ISO 4049:2019(E): dentistry: Polymer-based restorative materials. Geneva: ISO; 2019. 36 p

Kessler A, Hickel R, Reymus M. 3D Printing in Dentistry-State of the Art. *Oper Dent.* 2020 Jan/Feb;45(1):30-40. doi: 10.2341/18-229-L. Epub 2019 Jun 7. PMID: 31172871.

Leprince JG, Hadis M, Shortall AC, Ferracane JL, Devaux J, Leloup G, Palin WM. Photoinitiator type and applicability of exposure reciprocity law in filled and unfilled photoactive resins. *Dent Mater.* 2011 Feb;27(2):157-64. doi: 10.1016/j.dental.2010.09.011. Epub 2010 Nov 9. PMID: 21067803.

Leprince JG, Leveque P, Nysten B, Gallez B, Devaux J, Leloup G. New insight into the "depth of cure" of dimethacrylate-based dental composites. *Dent Mater.* 2012 May;28(5):512-20. doi: 10.1016/j.dental.2011.12.004. Epub 2012 Jan 2. PMID: 22217607.

Leprince JG, Palin WM, Hadis MA, Devaux J, Leloup G. Progress in dimethacrylate-based dental composite technology and curing efficiency. *Dent Mater.* 2013

Feb;29(2):139-56. doi: 10.1016/j.dental.2012.11.005. Epub 2012 Nov 27. Erratum in: Dent Mater. 2013 Apr;29(4):493. PMID: 23199807.

Lin CH, Lin YM, Lai YL, Lee SY. Mechanical properties, accuracy, and cytotoxicity of UV-polymerized 3D printing resins composed of Bis-EMA, UDMA, and TEGDMA. J Prosthet Dent. 2020 Feb;123(2):349-354. doi: 10.1016/j.prosdent.2019.05.002. Epub 2019 Jun 12. PMID: 31202550.

Ling L, Taremi N, Malyala R. A Novel Low-Shrinkage Resin for 3D Printing. J Dent. 2022 Mar;118:103957. doi: 10.1016/j.jdent.2022.103957. Epub 2022 Jan 14. PMID: 35038476.

Loflin WA, English JD, Borders C, Harris LM, Moon A, Holland JN, Kasper FK. Effect of print layer height on the assessment of 3D-printed models. Am J Orthod Dentofacial Orthop. 2019 Aug;156(2):283-289. doi: 10.1016/j.ajodo.2019.02.013.

Lovell LG, Stansbury JW, Syrpes DC, Bowman CN. Effects of composition and reactivity on the reaction kinetics of dimethacrylate/dimethacrylate copolymerizations. Macromolecules 1999;32:3913–21. doi: 10.1021/ma990258d

Marković MP, Cingesar IK, Grčić I, Žaja K, Vrsaljko D. Investigating the thermal and mechanical properties of novel LDPE/TiO₂ and LDPE/TiO₂/CNT composites for 3D printing applications. Environ Sci Pollut Res Int. 2023 Jul 28. doi: 10.1007/s11356-023-28926-7. Epub ahead of print. PMID: 37505387.

Melisaris A, Pang T, Renyi W. Liquid, radiation-curable composition, especially for producing flexible cured articles by stereolithography, United States patent US 20020177073A1. 2002 Nov 28.

Mendonça BC, Soto-Montero JR, de Castro EF, Pecorari VGA, Rueggeberg FA, Giannini M. Flexural strength and microhardness of bulk-fill restorative materials. J Esthet Restor Dent. 2021 Jun;33(4):628-635. doi: 10.1111/jerd.12727. Epub 2021 Mar 5. PMID: 33675162.

Miletic V, Santini A. Micro-Raman spectroscopic analysis of the degree of conversion of composite resins containing different initiators cured by polywave or monowave LED units. J Dent. 2012 Feb;40(2):106-13. doi: 10.1016/j.jdent.2011.10.018. Epub 2011 Nov 6. PMID: 22094322.

Musanje L, Darvell BW. Curing-light attenuation in filled-resin restorative materials. Dent Mater. 2006 Sep;22(9):804-17. doi: 10.1016/j.dental.2005.11.009. Epub 2005 Dec 20. PMID: 16364419.

van Noort R. The future of dental devices is digital. *Dent Mater.* 2012 Jan;28(1):3-12. doi: 10.1016/j.dental.2011.10.014. Epub 2011 Nov 26. PMID: 22119539.

Ogliari FA, Ely C, Zanchi CH, Fortes CB, Samuel SM, Demarco FF, Petzhhold CL, Piva E. Influence of chain extender length of aromatic dimethacrylates on polymer network development. *Dent Mater.* 2008 Feb;24(2):165-71. doi: 10.1016/j.dental.2007.03.007. Epub 2007 May 24. PMID: 17531312.

Piedra-Cascón W, Krishnamurthy VR, Att W, Revilla-León M. 3D printing parameters, supporting structures, slicing, and post-processing procedures of vat-polymerization additive manufacturing technologies: A narrative review. *J Dent.* 2021 Jun;109:103630. doi: 10.1016/j.jdent.2021.103630.

Price RB, Labrie D, Whalen JM, Felix CM. Effect of distance on irradiance and beam homogeneity from 4 light-emitting diode curing units. *J Can Dent Assoc.* 2011;77:b9. PMID: 21507291.

Quan H, Zhang T, Xu H, Luo S, Nie J, Zhu X. Photo-curing 3D printing technique and its challenges. *Bioact Mater.* 2020 Jan 22;5(1):110-115. doi: 10.1016/j.bioactmat.2019.12.003. Erratum in: *Bioact Mater.* 2020 Dec 04;6(6):1789-1790. PMID: 32021945; PMCID: PMC6992881.

Rocha MG, Oliveira DCRS, de Menezes LR, Roulet JF, Sinhoreti MAC, Correr AB. The use of an elastomeric methacrylate monomer (Exothane 24) to reduce the polymerization shrinkage stress and improve the two-body wear resistance of bulk fill composites. *Dent Mater.* 2022 Feb;38(2):e43-e57. doi: 10.1016/j.dental.2021.12.017. Epub 2021 Dec 23. PMID: 34953625.

Sinhoreti MA, Oliveira DC, Rocha MG, Roulet JF. Light-curing of resin-based restorative materials: an evidence-based approach to clinical practice application. *J Clin Dent Res.* 2018;15(1):44-53. doi: <https://doi.org/10.14436/2447-911x.15.1.044-053.oar>.

Soto-Montero J, Nima G, Rueggeberg FA, Dias C, Giannini M. Influence of Multiple Peak Light-emitting-diode Curing Unit Beam Homogenization Tips on Microhardness of Resin Composites. *Oper Dent.* 2020 May/Jun;45(3):327-338. doi: 10.2341/19-027-L. Epub 2019 Dec 3. PMID: 31794346.

Spitznagel FA, Boldt J, Gierthmuehlen PC. CAD/CAM Ceramic Restorative Materials for Natural Teeth. *J Dent Res.* 2018 Sep;97(10):1082-1091. doi: 10.1177/0022034518779759. Epub 2018 Jun 15. PMID: 29906206.

Stansbury JW, Idacavage MJ. 3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities. *Dent Mater.* 2016 Jan;32(1):54-64. doi: 10.1016/j.dental.2015.09.018. Epub 2015 Oct 20. PMID: 26494268.

Tahayeri A, Morgan M, Fugolin AP, Bompolaki D, Athirasala A, Pfeifer CS, Ferracane JL, Bertassoni LE. 3D printed versus conventionally cured provisional crown and bridge dental materials. *Dent Mater.* 2018 Feb;34(2):192-200. doi: 10.1016/j.dental.2017.10.003.

Tay YW, Panda B, Paul SC, Tan MJ, Qian S, Leong KF, Chua CK, Processing and properties of construction materials for 3D printing, *Mater. Sci. Forum* 861 (2016) 177–181.

Turssi CP, Ferracane JL, Vogel K. Filler features and their effects on wear and degree of conversion of particulate dental resin composites. *Biomaterials.* 2005 Aug;26(24):4932-7. doi: 10.1016/j.biomaterials.2005.01.026. PMID: 15769527.

Ogliari FA, Ely C, Zanchi CH, Fortes CB, Samuel SM, Demarco FF, Petzhold CL, Piva E. Influence of chain extender length of aromatic dimethacrylates on polymer network development. *Dent Mater.* 2008 Feb;24(2):165-71. doi: 10.1016/j.dental.2007.03.007. Epub 2007 May 24. PMID: 17531312.

Unkovskiy A, Bui PH, Schille C, Geis-Gerstorfer J, Huettig F, Spintzyk S. Objects build orientation, positioning, and curing influence dimensional accuracy and flexural properties of stereolithographically printed resin. *Dent Mater.* 2018 Dec;34(12):e324-e333. doi: 10.1016/j.dental.2018.09.011.

Wang J, Goyanes A, Gaisford S, Basit AW. Stereolithographic (SLA) 3D printing of oral modified-release dosage forms. *Int. J. Pharm.* 503 (2016) 207–212.

Xu T, Li X, Wang H, Zheng G, Yu G, Wang H, Zhu S. Polymerization shrinkage kinetics and degree of conversion of resin composites. *J Oral Sci.* 2020 Jun 23;62(3):275-280. doi: 10.2334/josnusd.19-0157. Epub 2020 Jun 4. PMID: 32493864.

Zhu X, Zhou Y, Yan D. Influence of branching architecture on polymer properties. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics* 2011;49:1277–86.

3 CONCLUSÃO

Pode-se concluir que, há relação entre tempo de exposição e espessura de fatiamento, esta é resina dependente e afeta significativamente as propriedades mecânicas do material, além de interferir na acurácia de impressão. Utilizando a impressora tridimensional selecionada no estudo, os parâmetros de impressão que obtiveram maior acurácia de impressão e melhor desempenho mecânico é, para resina Clear, espessura de fatiamento de 0,05 mm com tempo de exposição de 4 segundos, e para resina Standard, espessura de fatiamento de 0,05 mm com tempo de exposição de 2 segundos.

REFERÊNCIAS

Alshamrani AA, Raju R, Ellakwa A. Effect of Printing Layer Thickness and Postprinting Conditions on the Flexural Strength and Hardness of a 3D-Printed Resin. *Biomed Res Int*. 2022 Feb 21;2022:8353137. doi: 10.1155/2022/8353137.

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*. 2021 Nov;126(5):703-708. doi: 10.1016/j.prosdent.2020.09.003. Epub 2020 Oct 9. PMID: 33041074.

Chen H, Lee SY, Lin YM. Synthesis and Formulation of PCL-Based Urethane Acrylates for DLP 3D Printers. *Polymers (Basel)*. 2020 Jul 5;12(7):1500. doi: 10.3390/polym12071500. PMID: 32635639; PMCID: PMC7407232.

Coelho AWF, Araujo AC, Thiré RMSM. Manufatura aditiva por estereolitografia: análise da geometria da peça e da influência da posição e orientação de fabricação. *Matéria (Rio de Janeiro)*. 2018;23(4):12266. doi: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180004.0600>.

Corazza PH, de Castro HL, Feitosa SA, Kimpara ET, Della Bona A. Influence of CAD-CAM diamond bur deterioration on surface roughness and maximum failure load of Y-TZP-based restorations. *Am J Dent*. 2015 Apr;28(2):95-9. PMID: 26087575.

Dawood A, Marti B, Sauret-Jackson V, Darwood A. 3D printing in dentistry. *Br Dent J*. 2015 Dec;219(11):521-9. doi: 10.1038/sj.bdj.2015.914. Erratum in: *Br Dent J*. 2016 Jan 22;220(2):86. PMID: 26657435.

Della Bona A, Cantelli V, Britto VT, Collares KF, Stansbury JW. 3D printing restorative materials using a stereolithographic technique: a systematic review. *Dent Mater*. 2021 Feb;37(2):336-350. doi: 10.1016/j.dental.2020.11.030. Epub 2021 Jan 19. PMID: 33353734; PMCID: PMC7855936.

Dikici BA, Dikici S, Karaman O, Oflaz H. The effect of zinc oxide doping on mechanical and biological properties of 3D printed calcium sulfate based scaffolds. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*. 2017;37:733-41. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bbe.2017.08.007>.

Dunn WJ, Bush AC. A comparison of polymerization by light-emitting diode and halogen-based light-curing units. *J Am Dent Assoc*. 2002 Mar;133(3):335-41. doi: 10.14219/jada.archive.2002.0173. PMID: 11934189.

Harlow JE, Rueggeberg FA, Labrie D, Sullivan B, Price RB. Transmission of violet and blue light through conventional (layered) and bulk cured resin-based composites. *J Dent*. 2016 Oct;53:44-50. doi: 10.1016/j.jdent.2016.06.007. Epub 2016 Jun 30. PMID: 27373167.

Hull CW., Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography, United States patent 4575330, 11 Mar 1986.

Kessler A, Hickel R, Reymus M. 3D Printing in Dentistry-State of the Art. *Oper Dent*. 2020 Jan/Feb;45(1):30-40. doi: 10.2341/18-229-L. Epub 2019 Jun 7. PMID: 31172871.

Liu Q, Leu M, Schmitt S. Rapid prototyping in dentistry: technology and application. *Int J Adv Manuf Technol* 29, 317–335 (2006). <https://doi.org/10.1007/s00170-005-2523-2>

Loflin WA, English JD, Borders C, Harris LM, Moon A, Holland JN, Kasper FK. Effect of print layer height on the assessment of 3D-printed models. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2019 Aug;156(2):283-289. doi: 10.1016/j.ajodo.2019.02.013.

Mousawi AA, Garra P, Sallenave X, Dumur F, Toufaily J, Hamieh T, Graff B, Gigmes D, Fouassier JP, Lalevée J. π -Conjugated Dithienophosphole Derivatives as High Performance Photoinitiators for 3D Printing Resins. *Macromolecules*. 2018 51 (5), 1811-1821. doi: 10.1021/acs.macromol.8b00044.

Quan H, Zhang T, Xu H, Luo S, Nie J, Zhu X. Photo-curing 3D printing technique and its challenges. *Bioact Mater*. 2020 Jan 22;5(1):110-115. doi: 10.1016/j.bioactmat.2019.12.003. Erratum in: *Bioact Mater*. 2020 Dec 04;6(6):1789-1790. PMID: 32021945; PMCID: PMC6992881.

Spitznagel FA, Boldt J, Gierthmuehlen PC. CAD/CAM Ceramic Restorative Materials for Natural Teeth. *J Dent Res*. 2018 Sep;97(10):1082-1091. doi: 10.1177/0022034518779759. Epub 2018 Jun 15. PMID: 29906206.

APÊNDICE 1

Análises de Variância dos testes realizados.

Tabela 1 – Análise de variância dos dados de Acurácia de Impressão.

Fator de Variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Fator 1 (Resina)	1	113899,56	13899,56	286,89**
Fator 2 (Tempo de Exposição)	3	15489,06	5166,02	106,62**
Fator 3 (Espessura de Camada)	1	5999,96	5999,96	123,84**
Interação F1xF2	3	9140,96	3046,98	62,89**
Interação F1xF3	1	1824,3	1824,3	37,91**
Interação F2xF3	3	5365,85	1788,61	36,91**
Interação F1xF2xF3	3	3651,4	1217,13	25,12**
Tratamentos	15	55380,12	3692,008	76,2**
Resíduo	144	6976,64	48,44	
Total	159	62356,77		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

Tabela 2 – Análise de variância dos dados de Resistência à Flexão.

Fator de Variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Fator 1 (Resina)	1	9497,79	9497,79	467,54**
Fator 2 (Tempo de Exposição)	3	513,3	171,10	8,42**
Fator 3 (Espessura de Camada)	1	217,01	217,01	10,68**
Interação F1xF2	3	216,26	72,08	3,54*
Interação F1xF3	1	22,42	22,42	1,10 ^{ns}
Interação F2xF3	3	219,07	73,02	3,59*
Interação F1xF2xF3	3	425,06	141,68	6,97**
Tratamentos	15	11110,94	740,73	36,46**
Resíduo	144	2925,22	20,31	
Total	159	14036,17		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)

^{ns} não significativo ($p \geq .05$)

Tabela 3 – Análise de variância dos dados de Módulo de Elasticidade.

Fator de Variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F
Fator 1 (Resina)	1	0,79	0,79	33,89**
Fator 2 (Tempo de Exposição)	3	0,10	0,03	1,46 ^{ns}
Fator 3 (Espessura de Camada)	1	0,0008	0,0008	0,03 ^{ns}
Interação F1xF2	3	0,60	0,20	8,62**
Interação F1xF3	1	0,02	0,02	1,00 ^{ns}
Interação F2xF3	3	0,13	0,04	1,85 ^{ns}
Interação F1xF2xF3	3	0,27	0,09	3,93**
Tratamentos	15	1,93	0,12	5,5**
Resíduo	144	3,37	0,023	
Total	159	5,31		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)

^{ns} não significativo ($p \geq .05$)

Tabela 4 – Análise de variância dos dados de Dureza Knoop.

Fator de Variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	p
Fator 1 (Resina)	1	97,13	97,13	257,08**	<0,0001
Fator 2 (Tempo de Exposição)	3	7,55	2,51	6,66**	0,0005
Fator 3 (Espessura de Camada)	1	4,08	4,08	10,81**	0,0044
Interação F1xF2	3	5,44	1,81	4,80**	0,0016
Interação F1xF3	1	0,01	0,01	0,044 ^{ns}	0,8334
Interação F2xF3	3	2,89	0,96	2,55 ^{ns}	0,0634
Interação F1xF2xF3	3	11,32	3,77	9,98**	<0,0001
Tratamentos	15	128,45	8,56	22,66**	<0,0001
Resíduo	64	24,18	0,37		
Total	79	152,63			

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)^{ns} não significativo ($p \geq .05$)**Tabela 5** – Análise de variância dos dados de Grau de Conversão.

Fator de Variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	p
Fator 1 (Resina)	1	12917,53	12917,53	7988,41**	<0,0001
Fator 2 (Tempo de Exposição)	3	222,53	74,17	45,87**	<0,0001
Fator 3 (Espessura de Camada)	1	52,8	52,8	32,65**	<0,0001
Interação F1xF2	3	159,52	53,17	32,88**	<0,0001
Interação F1xF3	1	77,76	77,76	48,09**	<0,0001
Interação F2xF3	3	73,36	24,45	15,12**	<0,0001
Interação F1xF2xF3	3	73,08	24,36	15,06**	<0,0001
Tratamentos	15	13576,62	905,1	559,73**	<0,0001
Resíduo	32	51,74	1,61		
Total	47	13628,36			

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)**Tabela 6** – Análise de variância dos dados de Rugosidade de Superfície.

Fator de Variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	p
Fator 1 (Resina)	1	0,19	0,19	0,43 ^{ns}	0,5125
Fator 2 (Tempo de Exposição)	3	2,22	0,74	1,62 ^{ns}	0,1919
Fator 3 (Espessura de Camada)	1	5,45	5,45	11,96**	0,4117
Interação F1xF2	3	1,32	0,44	0,97 ^{ns}	0,0009
Interação F1xF3	1	0,19	0,19	0,41 ^{ns}	0,5194
Interação F2xF3	3	0,47	0,15	0,34 ^{ns}	0,7917
Interação F1xF2xF3	3	1,48	0,49	1,08 ^{ns}	0,3629
Tratamentos	15	11,35	0,75	1,65^{ns}	0,0828
Resíduo	64	29,15	0,45		
Total	79	40,52			

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)^{ns} não significativo ($p \geq .05$)

ANEXO 1

Relatório de verificação de originalidade

Turnitin Originality Report	
Processed on: 24-May-2024 16:10 -03 ID: 2387449318 Word Count: 6709 Submitted: 1	
stabile By Americo Correr	
Similarity Index 13%	Similarity by Source Internet Sources: 12% Publications: 7% Student Papers: 1%

1% match (Internet from 21-Sep-2019)
http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/256393/1/Pazinatto_Caroline_M.pdf

1% match ()
[Fugolin, Ana Paula Piovezan, 1987-. "Influence of irradiance on Knoop hardness, degree of conversion and shrinkage of the different composites". \[s.n.\], 2018](#)

1% match (Internet from 16-Mar-2022)
<http://docplayer.com.br/82639317-Universidade-anhanguera-de-sao-paulo-fabiana-barbara-piveta-flores.html>

1% match (Internet from 16-Oct-2021)
<https://sigaa.ufrn.br/sigaa/public/programa/defesas.jsf?id=5670>

1% match (Phebus Altamirando Pinheiro Araripe. "Efeito do estresse hídrico em dois cultivares de feijoeiro (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)", Universidade de São Paulo, Agência USP de Gestão da Informação Acadêmica (AGUIA), 1984)
[Phebus Altamirando Pinheiro Araripe. "Efeito do estresse hídrico em dois cultivares de feijoeiro \(<i>Phaseolus vulgaris</i> L.\)", Universidade de São Paulo, Agência USP de Gestão da Informação Acadêmica \(AGUIA\), 1984](#)

1% match (Internet from 31-Jan-2024)
<https://1library.org/document/gmwwdn5z-suffering-during-the-course-of-life.html>

1% match (Internet from 11-Jan-2023)
<https://repositorio.qgskroton.com/bitstream/123456789/3403/1/PAULO%20HIROSHI%20IGAWA.pdf>

1% match (Internet from 02-Dec-2020)
<https://idoc.pub/documents/anais-higienistas-2017-34m7z9v1pm46>

< 1% match ()

ANEXO 2

Comprovante de submissão do artigo ao periódico *Dental Materials*

24/05/2024, 16:05

Gmail - Confirming submission to Dental Materials



Victor Stabile <victor.stabile2@gmail.com>

Confirming submission to Dental Materials

1 mensagem

Dental Materials <em@editorialmanager.com>

24 de maio de 2024 às 15:58

Responder a: Dental Materials <dentistry.biomaterials@manchester.ac.uk>

Para: Victor Martins Stabile <victor.stabile2@gmail.com>

"This is an automated message."

Mastering 3D Printing Precision: Unveiling the Crucial Factors of Exposure Time, Layer Thickness and Resin Composition

Dear DDS Stabile,

We have received the above referenced manuscript you submitted to Dental Materials.

To track the status of your manuscript, please log in as an author at <https://www.editorialmanager.com/dentma/>, and navigate to the "Submissions Being Processed" folder.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,
Dental Materials

More information and support

You will find information relevant for you as an author on Elsevier's Author Hub: <https://www.elsevier.com/authors>

FAQ: How can I reset a forgotten password?

https://service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/28452/supporthub/publishing/

For further assistance, please visit our customer service site: <https://service.elsevier.com/app/home/supporthub/publishing/>

Here you can search for solutions on a range of topics, find answers to frequently asked questions, and learn more about Editorial Manager via interactive tutorials. You can also talk 24/7 to our customer support team by phone and 24/7 by live chat and email

At Elsevier, we want to help all our authors to stay safe when publishing. Please be aware of fraudulent messages requesting money in return for the publication of your paper. If you are publishing open access with Elsevier, bear in mind that we will never request payment before the paper has been accepted. We have prepared some guidelines (<https://www.elsevier.com/connect/authors-update/seven-top-tips-on-stopping-apc-scams>) that you may find helpful, including a short video on identifying fake acceptance letters (<https://www.youtube.com/watch?v=o5l8thD9XiE>). Please remember that you can contact Elsevier's Researcher Support team (<https://service.elsevier.com/app/home/supporthub/publishing/>) at any time if you have questions about your manuscript, and you can log into Editorial Manager to check the status of your manuscript (https://service.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/29155/c/10530/supporthub/publishing/kw/status/).

In compliance with data protection regulations, you may request that we remove your personal registration details at any time. (Use the following URL: <https://www.editorialmanager.com/dentma/login.asp?a=r>). Please contact the publication office if you have any questions.

Dental Materials

Mastering 3D Printing Precision: Unveiling the Crucial Factors of Exposure Time, Layer Thickness and Resin Composition --Manuscript Draft--

Manuscript Number:	
Article Type:	Full Length Article
Keywords:	Three-Dimensional Printing; Polymerization; Dental Materials
Corresponding Author:	Victor Martins Stabile, DDS State University of Campinas Dentistry School of Piracicaba Piracicaba, São Paulo BRAZIL
First Author:	Victor Martins Stabile, DDS
Order of Authors:	Victor Martins Stabile, DDS Isabella Ribeiro do Valle de Paiva, DDS Américo Bortolazzo Corrêa, DDS, MSc, PhD Roberta Caroline Brushci Alonso, DDS, MSc, PhD Regina Maria Puppini-Rontani, DDS, MSc, PhD
Abstract:	Objectives This paper assesses how exposure time and layer thickness impact polymerization, printing accuracy, and mechanical properties of LCD-printed resins with and without filler particles and pigment. Methods Two types of resins were evaluated (Standard and Clear), varying exposure time (2, 3, 4, and 6 seconds) and layer thickness (0.025 and 0.05 mm). Printing accuracy (n=10), flexural strength (FS) and flexural modulus (E) (n=10), Knoop microhardness (KHN) (n=5), roughness (Ra) (n=5), and degree of conversion (DC) (n=3) were evaluated. Data were subjected to ANOVA three-way and by Tukey's test ($\alpha=0.05$). Results For accuracy, increasing exposure time resulted in volumetric expansion of specimens. Slicing thickness, exposure time, and resin composition significantly affected FS, E, KHN, and DC properties, as well as the interaction between these factors. Ra was affected only by slicing thickness, with smaller thicknesses resulting in smoother objects. Therefore, exposure time, layer thickness, and resin composition affect the mechanical properties and quality of objects printed by 3D LCD technology. Significance Extended exposure time results in volumetric expansion influenced by resin composition and layer thickness. It's crucial to adjust parameters accurately for the resin and printer, as any changes can reduce accuracy and alter the mechanical properties of the printed object.