UFRGS

MESTRADO
MESTRADO
MESTRADO
MESTRADO
MESTRADO
MESTRADO
MESTRADO
MESTRADO
MESTRADO
MESTRADO
MESTRADO
MESTRADO
MESTRADO
MESTRADO
MESTRADO
MESTRADO
MESTRADO
MESTRADO
MESTRADO
MESTRADO
MESTRADO
MESTRADO
MESTRADO
MESTRADO
MESTRADO
MESTRADO

UFRGS
UFRGS
UFRGS
UFRGS
UFRGS
UFRGS
UFRGS
UFRGS
UFRGS
UFRGS
UFRGS
UFRGS
UFRGS
UFRGS
UFRGS
UFRGS
UFRGS
UFRGS
UFRGS
UFRGS
UFRGS
UFRGS
UFRGS
UFRGS
UFRGS
UFRGS

FACULDADE DE ODONTOLOGIA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE ODONTOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ODONTOLOGIA
MESTRADO EM ODONTOLOGIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO CLÍNICA ODONTOLÓGICA –
MATERIAIS DENTÁRIOS E PRÓTESE DENTÁRIA

DESENVOLVIMENTO DE UMA RESINA DE IMPRESSÃO 3D REFORÇADA COM PARA-ARAMIDA

JOÃO VITOR ZANATTA

ORIENTADORA: PROF. DRA. GABRIELA DE SOUZA BALBINOT

Porto Alegre
2026

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ODONTOLOGIA
MESTRADO EM ODONTOLOGIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO CLÍNICA ODONTOLÓGICA –
MATERIAIS DENTÁRIOS E PRÓTESE DENTÁRIA

DESENVOLVIMENTO DE UMA RESINA DE IMPRESSÃO 3D REFORÇADA COM PARA-ARAMIDA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Odontologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Odontologia.

JOÃO VITOR ZANATTA

ORIENTADORA: PROFA. DRA. GABRIELA DE SOUZA BALBINOT

Porto Alegre
2026

CIP - Catalogação na Publicação

Zanatta, João Vitor
DESENVOLVIMENTO DE UMA RESINA DE IMPRESSÃO 3D REFORÇADA COM PARA-ARAMIDA / João Vitor Zanatta. -- 2026.
52 f.
Orientadora: Gabriela de Souza Balbinot.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Odontologia, Programa de Pós-Graduação em Odontologia, Porto Alegre, BR-RS, 2026.

1. Materiais Dentários. 2. Impressão 3D. 3. Fibras. 4. Para-aramida. 5. Restaurações. I. de Souza Balbinot, Gabriela, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

DESENVOLVIMENTO DE UMA RESINA DE IMPRESSÃO 3D REFORÇADA COM PARA-ARAMIDA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Odontologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Odontologia.

Porto Alegre, 17 de abril de 2026.

Prof. Dr. Fabricio Mezzomo Collares - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Odontologia.

Prof. Dr. Fabricio Luiz Faita - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Física.

Profa. Dra. Sara Fraga - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Odontologia.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe, como uma forma de demonstrar toda a gratidão que sinto, pelas tantas vezes que renunciou ao seu próprio instante, para que eu pudesse construir o meu futuro.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe **Silvana,** por todo o apoio prestado e pelo suporte dado diante das oportunidades que surgiram; ao meu irmão **João Paulo**, pelo companheirismo e incentivo; e ao meu avô **Jurandir,** pelo exemplo de força, perseverança e lucidez.

À minha fiel companheira **Ingrid,** por tornar a minha vida mais vívida e por estar presente, mesmo com ventos desfavoráveis, alimentando a esperança que vive em mim.

Aos profissionais **Fernando** e **Dr. Henrique**, que sempre estiveram comigo e cumpriram a sua missão de me manter lutando, mesmo quando estive sem forças.

Ao **Felipe**, **Rafael**, **Adriel**, **Eduarda** e **Sarahi**, por tornarem a convivência mais leve durante o processo. E aos demais colegas, pela convivência e pela oportunidade de aprendizado com o próximo.

Ao **Laboratório de Materiais Dentários**, pelo ambiente de aprendizado intenso, pelo método científico e por tornar minha interpretação do mundo mais neutra.

À **Profa. Dra. Gabriela de Souza Balbinot**, por todos os ensinamentos passados durante a orientação, e por sua participação ativa, que fez despertar em mim habilidades que compõem um valioso alicerce profissional, como organização, consistência, otimização de processos, disciplina e resiliência; e, adicionalmente, por todas as oportunidades que me forneceu, nas quais pude expandir meus conhecimentos em ambientes novos, levando-me até o potencial que não conhecia em mim.

À **Profa. Dra. Susana Maria Werner Samuel**, pela confiança em me orientar inicialmente e por todo o conhecimento compartilhado durante as discussões e nas cadeiras ministradas.

Ao **Prof. Dr. Fabricio Mezzomo Collares**, por todo o conhecimento compartilhado nas discussões de artigos, nas aulas ministradas, nas contribuições conceituais ao desenvolvimento do presente trabalho e nas oportunidades no ambiente acadêmico.

Ao **Prof. Dr. Vicente Castelo Branco Leitune**, por estar à disposição quanto a técnicas e equipamentos, e pelo conhecimento adquirido em cadeiras ministradas e em discussões.

À **Profa. Dra. Camila Cristina De Foggi**, por todo o conhecimento compartilhado nas disciplinas, nas discussões de artigos e nos ensinamentos sobre prótese fixa.

À **Profa. Dra. Stéfani Becker Rodrigues**, pelo auxílio e disponibilidade na orientação da cadeira de normas e ensaios mecânicos, e pelos conhecimentos em discussões de artigos.

À **Profa. Dra. Sara Fraga**, pela disponibilidade e ensinamentos sobre prótese fixa, ensaios de fadiga e análises fractográficas.

À **Profa. Dra. Rafaela Oliveira Pilecco**, pelo conhecimento compartilhado sobre cerâmicas, análises fractográficas, ensaios de fadiga e pela disponibilidade para esclarecer dúvidas.

Ao **Prof. Dr. Fabricio Luiz Faita**, por disponibilizar a estrutura necessária para a realização da Difração de Raios X no laboratório CNANO, e por toda a paciência, compreensão e disponibilidade durante a Pós-Graduação.

Ao **Programa de Pós-Graduação em Odontologia**, pela oportunidade de realizar uma etapa de formação acadêmica tão sonhada, em um programa de grande prestígio e reconhecimento.

Ao **Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico**, pela bolsa concedida por meio do Programa Institucional de Bolsas de Pós-Graduação, e por permitir que atingisse o máximo aproveitamento da formação durante o mestrado.

À **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, pela oportunidade de estudo e aprendizado com pesquisadores de grande prestígio e excelente infraestrutura.

RESUMO

Este estudo teve como objetivo desenvolver uma resina de impressão 3D para uso de longa duração, contendo fibras de para-aramida (PA) como reforço. As fibras de PA foram moídas, tratadas com hipoclorito de sódio, silanizadas com γ-MPTS e caracterizadas por FTIR, DRX e MEV. A resina base foi preparada em massa, com 70% de UDMA, 20% de Bis-EMA, 10% de TEGDMA e 2% de TPO. No preparo do compósito, partículas de 0,7 µm de vidro de bário (VB) e PA foram empregadas em massa em quatro resinas experimentais: 50%VB (50% partículas e sem PA); 1%PA (49% partículas e 1% fibras); 2%PA (48% partículas e 2% fibras) e 3%PA (47% partículas e 3% fibras). Depois de impresso, foram avaliados aspectos químicos e biológicos por meio do grau de conversão (GC) e citotoxicidade (SRB e MTT). A rugosidade superficial foi avaliada; posteriormente, propriedades mecânicas foram avaliadas com testes técnica de indentação instrumentada (TII) (ISO 14577-1:2015), resistência à flexão (ISO 4049:2019) e tenacidade à fratura (ISO 20795-1:2013) foram realizados nos espécimes. O DRX e o FTIR das fibras foram analisados descritivamente; para resultados quantitativos, Shapiro-Wilk, ANOVA de uma via, ANOVA de duas vias e teste de Tukey foram usados com significância de $\alpha = 0,05$ e erro $\beta = 0,20$. As análises de FTIR e DRX não indicaram alteração na integridade da PA; a relação de aspecto média observada no MEV foi de 10,2 (± 6,7). Para os testes químicos/mecânicos maiores adições de PA reduziram o GC, viabilidade celular de SRB, entretanto os resultados MTT não foram alterados. Nos testes de superfície 3%PA mostrou aumento na rugosidade pós-polimento, e redução da dureza Martens e módulo de indentação. Para os ensaios mecânicos, 3%PA demonstrou maior resistência à flexão imediata, 97,8 (±10,1) MPa, enquanto 1%PA foi o menor valor, com 86,5 (±9,9) MPa; após o envelhecimento, 3%PA teve a resistência à flexão reduzida em 40%; 1%PA foi o único grupo a elevar a tenacidade à fratura, com 1,38 (±0,19) $MPa \cdot m^{1/2}$, enquanto, no trabalho total de fratura, 1%PA e 3%PA obtiveram os maiores valores. Em síntese, as fibras de PA usadas na resina experimental não apresentaram danos estruturais; além disso, apresentam alongamento curto (AR = 10). A adição de 1% m/m de PA resultou em maior tenacidade à fratura na resina desenvolvida, sem comprometer as propriedades químicas e biológicas.

Palavras-chave: Materiais Dentários; Fibras; Propriedades Mecânicas.

ABSTRACT

This study aimed to develop a long-term 3D printing resin reinforced with para-aramid (PA) fibers. The PA fibers were milled, treated with sodium hypochlorite, silanized with γ-MPTS, and characterized by FTIR, XRD, and SEM. The base resin was prepared by weight using 70% UDMA, 20% Bis-EMA, 10% TEGDMA, and 2% TPO. For composite preparation, 0.7 μm barium glass (VB) particles and PA were used in four experimental resins: 50%BG (50% particles, no PA); 1%PA (49% particles, 1% fibers); 2%PA (48% particles, 2% fibers); and 3%PA (47% particles, 3% fibers). After 3D printing, chemical/biological aspects were evaluated through the degree of conversion (DC) and cytotoxicity (SRB and MTT) assays. The roughness was evaluated, while mechanical properties were tested with the instrumented indentation technique (IIT) (ISO 14577-1:2015), flexural strength (ISO 4049:2019), and fracture toughness (ISO 20795-1:2013) tests. XRD and FTIR data were analyzed descriptively; for quantitative results, Shapiro-Wilk, one-way ANOVA, two-way ANOVA, and Tukey's test were used ($\alpha = 0.05$, $\beta = 0.20$). FTIR and XRD analyses showed no change in PA integrity; the average aspect ratio observed via SEM was 10.2 (±6.7). The result found in chemical/mechanical tests showed higher PA concentrations reducing the DC and SRB cell viability, while MTT results remained unchanged. For surface tests, 3%PA has increased the post-polishing roughness, while reducing Martens hardness and indentation modulus. According to the mechanical evaluation, 3%PA shows the highest immediate flexural strength with 97.8 (±10.1) MPa, while 1%PA had the lowest at 86.5 (±9.9) MPa; the flexural strength of 3%PA decreased by 40% after aging. For fracture toughness, 1%PA has the highest value with 1.38 (±0.19) $MPa \cdot m^{1/2}$, while in total fracture work, 1%PA and 3%PA achieved the highest values. In summary, the PA employed in experimental resins did not show structural damage and had a short aspect ratio (AR = 10); the addition of 1% wt. PA resulted in higher fracture toughness in the developed resin without compromising chemical or biological properties.

Keywords: Dental Materials; Fibers; Mechanical Properties.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 11
2 ARTIGO CIENTÍFICO 17
3 CONCLUSÃO 18
REFERÊNCIAS 20

1 INTRODUÇÃO

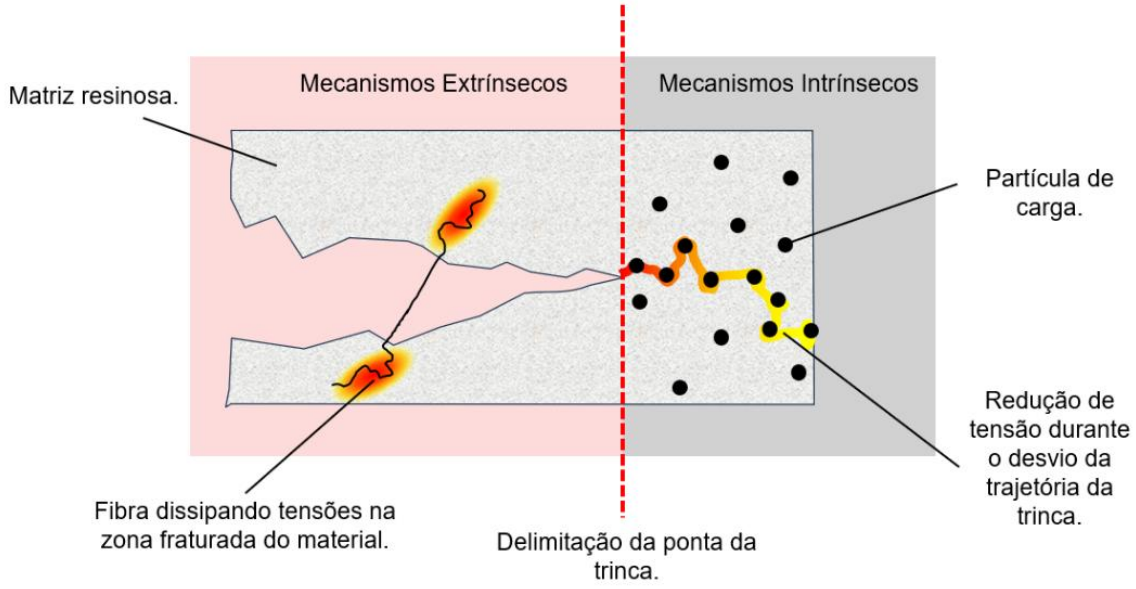
A impressão 3D é uma técnica de manufatura aditiva, com promissora aplicação na Odontologia devido à sua capacidade de adequação diferentes demandas requeridas por cada especialidade clínica (Balhaddad *et al.*, 2023). A produção de restaurações indiretas de longa duração é uma demanda que vem sendo suprida por meio da impressão 3D, possibilitando a criação de múltiplas peças simultaneamente, de maneira automatizada, com a possibilidade de minimizar o desperdício de material. Para desenvolver materiais que tenham propriedades compatíveis com sua indicação, mudanças na composição da resina, substituindo monômeros ou partículas de carga podem ser realizadas (Mudhaffer *et al.*, 2024). Considerando as vantagens da produção de restaurações impressas de longa duração, a resina VarseoSmile Crown Plus (BEGO GmbH & Co. KG, Bremen, Alemanha) possui uma relevância inserida nesse contexto, sendo uma das primeiras resinas a serem aprovas pela U.S. Food and Drug Administration (FDA) em 2020, como uma resina de impressão 3D oficialmente indicada para restaurações oclusais definitivas de longa duração. A comercialização desse produto, denotou um início para a expansão no desenvolvimento de compósitos restauradores indicados para restauração de longa duração (FDA Summary: VarseoSmile Crown plus, 2020).

Para avaliar as propriedades mecânicas de materiais restauradores, são realizados ensaios laboratoriais controlados. A resistência à flexão é frequentemente utilizada na literatura para a caracterização de novos materiais e produtos, demonstrando a capacidade do material de resistir a forças multiaxiais (Chung *et al.*, 2004; De Angelis *et al.*, 2024; Mudhaffer *et al.*, 2024). Para resinas de impressão 3D, a resistência à flexão é comumente avaliada conforme a norma ISO 4049:2019, sendo indicada para compósitos poliméricos restauradores indiretos ativados por energia extraoral. É observado que em resinas de impressão 3D indicadas para longa duração, a resistência à flexão varia entre 87 e 125 Megapascal (MPa) (Borella *et al.*, 2023), indicando que algumas resinas podem ultrapassar o limiar de 100 MPa estabelecido pela ISO 4049:2019, utilizado como indicador de material de longa duração. Entretanto, aspectos como os defeitos estruturais específicos causados pelo processo de impressão 3D (Borella et al., 2023; Prause et al., 2024) podem ter seu impacto mascarado em ensaios laboratoriais, devido às condições controladas do teste.

Considerando isso, a melhora das propriedades mecânicas, pode ser obtida com maiores concentrações de partículas de carga, como observado em impressão 3D demonstrando valores acima de 30% em massa de carga (Hoffmann; Coldea; Stawarczyk, 2025; Tayeb *et al.*, 2025). Entre as partículas usadas estão a zircônia, sílica e vidro de bário (Zattera *et al.*, 2024), aumentando propriedades como a rigidez, resistência ao desgaste, resistência à flexão e tenacidade à fratura dos compósitos (Šimunović *et al.*, 2025). A melhora nas propriedades mecânicas de compósitos reforçados com partículas esféricas é majoritariamente associada à mudança na trajetória de propagação da trinca (Kim *et al.*, 1994). Um dos fatores relacionado a ocorrência dos mecanismos para o aumento da tenacificação, é a fração de volume das partículas na resina, onde em a volumes maiores que 23%, o mecanismo de deflexão já é observado, desviando a trajetória de propagação da trinca (Kim *et al.*, 1994). Adicionalmente, em volumes entre 41% e 51%, são reportados mecanismos de deflexão e de ponteamento da trinca, resultando em maior energia necessária à sua propagação (Kim *et al.*, 1994). Considerando a aplicação em resinas para impressão 3D, deve-se levar em conta que concentrações mais altas aumentam a viscosidade do compósito, o que facilita a formação de defeitos no objeto impresso. O menor escoamento de resina resulta em tempos de impressão mais longos, maior rugosidade e erros dimensionais na peça, causados pela superexposição e delaminações (Cao *et al.*, 2023; Šimunović *et al.*, 2025).

Com base na descrição, elevar a concentração de partículas de reforço como única estratégia pode levar à formação de defeitos na estrutura do material impresso. Uma alternativa para melhorar o reforço é a inclusão de fibras, que continuam a dissipar energia mesmo após a fratura. Essa vantagem ocorre porque as fibras exercem mecanismos extrínsecos de tenacificação, complementando os intrínsecos já presentes nos reforços com partículas (Ritchie, 2021). Considerando isso, é possível se obter um efeito sinérgico dos mecanismos tenacificantes extrínsecos e intrínsecos, como exemplificado na Figura 1.

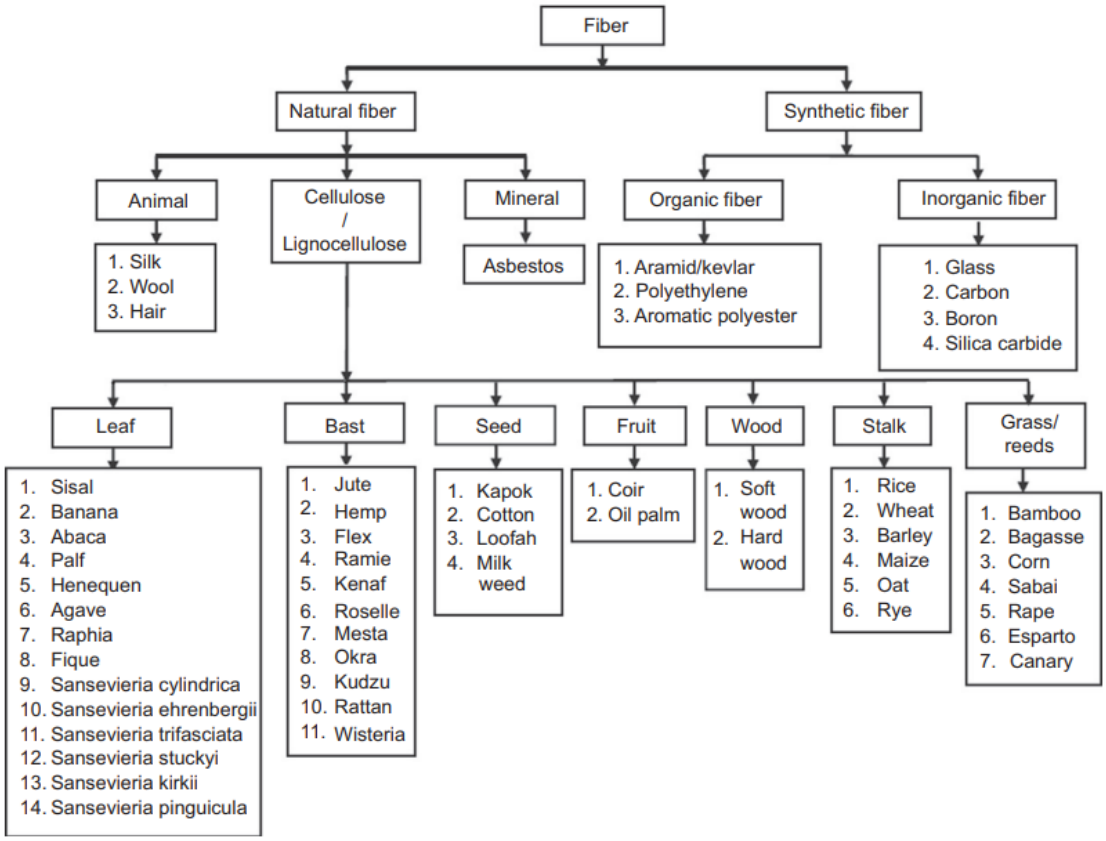
Figura 1 – Esquema da dissipação de tensões nas zonas fraturadas e não fraturadas da matriz resinosa, utilizando fibras e partículas como método de reforço.



Fonte: Adaptado de Ritchie, 2021.

Existem diversos tipos de fibras com potencial de uso em compósitos (Figura 2). O reforço relacionado à presença de fibras apresenta uma dependência de diversos fatores, como as próprias propriedades mecânicas da fibra, sua capacidade de transmitir tensões de acordo com a matriz resinosa selecionada, e a dispersão e orientação das fibras na resina (Ghalia; Abdelrasoul, 2019). Adicionalmente, aspectos como custo, densidade, aparência e outros são relevantes para determinar a fibra a ser utilizada. Considerando isso, a escolha de uma fibra que apresente o máximo de compatibilidade apresenta um determinado grau de complexidade devido à quantidade e à influência entre os fatores (Ghalia; Abdelrasoul, 2019).

Figura 2 – Classificação das fibras sintéticas e naturais.



Retirado de: Ghalia; Abdelrasoul, 2019.

Partindo do pressuposto em desenvolver uma resina de impressão 3D que apresentam polimerização em VAT, deve-se levar em consideração que as fibras irão uma orientação e distribuição aleatória na resina. O potencial de reforço relacionado às características dessas fibras é majoritariamente relacionado com dois conceitos: a relação de aspecto (AR), definida como a razão entre o comprimento e o diâmetro da fibra, e o comprimento crítico (L_C), que determina o comprimento mínimo necessário para se obter a máxima transmissão de tensão na interface fibra-matriz (Petersen, 2005). Com maior frequência, apenas o AR é reportado na literatura odontológica, o que pode ser explicado pelo fato de que, à medida que o AR da fibra aumenta, maior área de superfície é ocupada, resultando em maior capacidade de dissipar tensões advindas da matriz resinosa (Monette; Anderson; Grest, 1994; Shouha; Swain; Ellakwa, 2014). Além disso, os valores de L_C podem refletir a qualidade da união entre a fibra e a matriz.

À medida que o comprimento da fibra (L) se aproxima ou se afasta do L_C, diferentes mecanismos de dissipação de tensões podem atuar, impactando o reforço promovido pela fibra no material (Maas et al., 2017; Fara, 2003). Quando $L < L_C$, os mecanismos de descolamento e de arrancamento das fibras são mais pronunciados durante a fratura; consequentemente, a energia é dissipada por cisalhamento na interface fibra-matriz, sem atingir a resistência intrínseca máxima da matriz nem utilizar todo o potencial de reforço (Maas et al., 2017; Fara, 2003). Entretanto, quando $L > L_C$, a fibra permanece fixa, formando pontes entre as paredes da trinca até ser rompida, atuando como pontos de ancoragem que levam à redução de tensão na ponta da trinca. Nesse cenário, a dissipação de energia é maior, pois o reforço se limita à resistência à tração da fibra, e não à sua capacidade de dissipar energia por cisalhamento, como observado em $L < L_C$ (Fara S, 2003; Maas *et al.*, 2017).

Os mecanismos de fratura descritos, demonstram que as fibras apresentam a vantagem de continuarem dissipando tensões de maneira extrínseca durante a fratura (Ritchie, 2021), juntamente com a possibilidade de reduzir a concentração de tensões comparada a partículas irregulares ou facetadas (Di Fiore *et al.*, 2024). A partir do exposto, algumas resinas compostas convencionais apresentam fibras inorgânicas em sua composição, tendo como exemplo a EverX Posterior (GC Dental), que demonstra possuir propriedades de maior resistência à flexão, rigidez e tenacidade à fratura, relacionadas à adição de fibras de vidro (Garoushi *et al.*, 2024; Shouha; Swain; Ellakwa, 2014). De maneira alternativa, a para-aramida (PA) e o carbono também podem ser empregadas em compósitos, o que demonstra uma oportunidade para o desenvolvimento de compósitos restauradores com diferentes composições (Gad & Fouda, 2023; Zattera et al., 2024).

Sendo conhecida por sua notável resistência mecânica e coloração amarelada, a PA é uma poliamida descoberta por Stephanie Louise Kwolek no início da década de 60, enquanto trabalhava na DuPont® (Benninga *et al.*, 2025). Após sucessivos aprimoramentos em seus processos de síntese, em 1971, a patente do poli(p-fenileno tereftalamida) (PPTA) foi depositada, descrevendo uma fibra com estrutura de poliamida aromática e alta fração cristalina (Kwolek, 1971). A partir disso, a DuPont® comercializou uma linha de fibras chamada Kevlar®, na qual cada tipo (como Kevlar-29, Kevlar-49 e outros) mantinha o PPTA como estrutura química-base, mas apresentava variantes com características como o grau de cristalinidade e alterações

moleculares. Como resultado, a estrutura da PPTA foi adaptada para que a PA se tornasse mais adequada às exigências de sua aplicação final, mantendo esse padrão até os dias atuais (Fei, 2018). A alta resistência observada na PA deve-se às longas cadeias aromáticas alinhadas entre si, conferindo elevada cristalinidade no centro da fibra e agregando rigidez à estrutura molecular. De modo geral, a fibra de PA apresenta propriedades macroscópicas, como elevada resistência à tração, baixa deformação sob tensão e estabilidade química (Kabir; Ferdous, 2012; Sabir, 2018). Além disso, possui maior capacidade intrínseca de absorver energia em comparação às fibras inorgânicas, sendo relevante para potencializar a resistência ao impacto de compósitos (Kerche *et al.*, 2021).

O desenvolvimento de um compósito para impressão 3D contendo fibras de PA e partículas inorgânicas, oferece a oportunidade de aprimorar propriedades mecânicas, como a tenacidade à fratura e a energia absorvida (Petersen, 2005), reduzindo o lascamento das restaurações devido à presença das fibras de PA (Escobar; Pereira da Silva; Manarte-Monteiro, 2023; Silva, 2010). Adicionalmente, a presença de partículas está melhorando propriedades como a resistência à flexão, o módulo de elasticidade, a dureza e a tenacidade à fratura do material (Šimunović *et al.*, 2025; Zattera *et al.*, 2024), que demonstram relevância para o desempenho clínico de longa duração da restauração (Tennert *et al.*, 2024). Sendo assim, este trabalho tem como objetivo desenvolver uma resina de impressão 3D para aplicações de longo prazo com para-aramida (PA) como carga de reforço.

2 ARTIGO CIENTÍFICO

O presente artigo foi editado conforme as normas de formatação do periódico Dental Materials, indexado no ISSN 1879-0097, ao qual será submetido.

3 CONCLUSÃO

A partir dos resultados, observou-se que o tratamento de superfície não alterou a estrutura química e cristalina da PA, permitindo seu uso com menor aglomeração e, possivelmente, sem redução de suas propriedades mecânicas. A combinação de fibras curtas e tratadas permitiu a impressão dos espécimes, entretanto a redução nos valores de AR da PA, se mostrou um fator limitante em aprimorar transmissão de tensões considerando os princípios envolvidos em compósitos reforçados com fibras (Fara S, 2003; Maas *et al.*, 2017). A baixa relação de aspecto (AR = 10) é inferior quando comparada ao mínimo reportado na literatura odontológica (AR = 50), sendo estimado a partir do comportamento de fibras inorgânicas que por sua vez apresentam ligações químicas com a matriz resinosa (Shouha; Swain; Ellakwa, 2014).

Considerando isso, levando em consideração a qualidade da interface fibra-matriz formada, possivelmente a PA necessitaria de um AR mínimo consideravelmente maior que 50, devido à natureza inerte de sua superfície, o que dificulta sua comparação com os valores de fibras inorgânicas (Garfias; Hakkarainen; Odelius, 2024; Kumar *et al.*, 2024). A união do baixo AR e a ausência de união química na interface fibra-matriz possivelmente reduziram drasticamente a ocorrência de dissipação de energia por meio de mecanismos dependentes de cisalhamento, que por sua vez afetam a eficácia dos mecanismos extrínsecos de fratura de descolamento e arrancamento de fibras ($L < L_C$) (Monette; Anderson; Grest, 1994; Petersen, 2005; Ritchie, 2021).

Entretanto, de maneira antagônica ao comportamento esperado, a adição de 1% em massa de PA mostrou-se o único grupo com tenacidade à fratura aprimorada, levando à investigação de fatores independentes dos mecanismos extrínsecos de tenacidade discutidos. Com base na literatura disponível, uma hipótese a ser abordada é que a concentração de 1% em massa de PA possa ter reduzido a formação de defeitos internos causados pelo processo de impressão 3D, que atuam como pontos de concentração de tensões e diminuem a resistência mecânica macroscópica do material (Cao *et al.*, 2023; Ritchie, 2021; Šimunović *et al.*, 2025). Adicionalmente, a concentração descrita apresentou melhor desempenho mecânico geral entre os grupos testados, sem comprometer os aspectos químicos e biológicos do compósito (Hickel *et al.*, 2010). Entretanto, observou-se que, em concentrações

mais altas, houve declínio em quase todas as propriedades testadas, inclusive após o envelhecimento.

Com base nos resultados observados e com o objetivo de utilizar todo o potencial das fibras de PA como reforço em resinas para impressão 3D, alguns pontos devem ser considerados. Inicialmente, o seu L_C deveria ser estabelecido com base na resina de metacrilato utilizada, considerando o cenário em que os valores de L_C se mostrasse grande suficientes para ocasionar aglomeração das fibras na matriz resinosa, a estratégia de promover união química com a resina deve ser empregada, com objetivo de melhorar a transmissão de tensões na interface fibra-matriz, sem aumentar o comprimento das PA (Garfias; Hakkarainen; Odelius, 2024; Kumar *et al.*, 2024). Adicionalmente, é possível explorar a produção de compósitos com concentrações inferiores a 1% em massa de PA e fibras de maior AR, o que reduz a complexidade em comparação aos processos de tratamento de superfície voltados a melhorar a união fibra-matriz. Sendo essa uma opção para aumentar o impacto do reforço promovido pelos mecanismos extrínsecos de tenacidade à fratura, mas dependente da aglomeração causada por maiores comprimentos de fibra (Fara S, 2003; Petersen, 2005).

REFERÊNCIAS

BALHADDAD, A. A. *et al.* Three-dimensional (3D) printing in dental practice: Applications, areas of interest, and level of evidence. **Clinical Oral Investigations**, [*s. l.*], v. 27, n. 6, p. 2465–2481, 2023.

BENNINGA, J. *et al.* Rapid Microwave-Assisted Chemical Recycling of Poly(*p* -Phenylene Terephthalamide). **Journal of the American Chemical Society**, [*s. l.*], v. 147, n. 9, p. 7191–7195, 2025.

BORELLA, P. S. *et al.* Physical and mechanical properties of four 3D-printed resins at two different thick layers: An in vitro comparative study. **Dental Materials**, [*s. l.*], v. 39, n. 8, p. 686–692, 2023.

CAO, L. *et al.* Waiting time prediction for bottom-up vat photopolymerization. **Additive Manufacturing**, [*s. l.*], v. 74, p. 103693, 2023.

CHUNG, S. M. *et al.* Flexural strength of dental composite restoratives: Comparison of biaxial and three-point bending test. **Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials**, [*s. l.*], v. 71B, n. 2, p. 278–283, 2004.

DE ANGELIS, F. *et al.* Flexural Properties of Three Novel 3D-Printed Dental Resins Compared to Other Resin-Based Restorative Materials. **Prosthesis**, [*s. l.*], v. 6, n. 3, p. 619–630, 2024.

DI FIORE, A. *et al.* Comparison of mechanical and surface properties of two 3D printed composite resins for definitive restoration. **The Journal of Prosthetic Dentistry**, [*s. l.*], v. 132, n. 4, p. 839.e1-839.e7, 2024.

ESCOBAR, L. B.; PEREIRA DA SILVA, L.; MANARTE-MONTEIRO, P. Fracture Resistance of Fiber-Reinforced Composite Restorations: A Systematic Review and Meta-Analysis. **Polymers**, [*s. l.*], v. 15, n. 18, p. 3802, 2023.

FARA S, P. A. Fracture Mechanisms in Short Fibre Polymer Composites: The Influence of External Variables on Critical Fibre Angle. *In*: EUROPEAN STRUCTURAL INTEGRITY SOCIETY. [*S. l.*]: Elsevier, 2003. v. 32, p. 387–398. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1566136903801115. Acesso em: 23 fev. 2026.

FDA SUMMARY: VARSEOSMILE CROWN PLUS. . Silver Spring, MD: U.S. Food and Drug Administration (FDA), 2020. Disponível em: https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfpmn/pmn.cfm?ID=K201668. .

FEI, B. High-performance fibers for textiles. *In*: ENGINEERING OF HIGH-PERFORMANCE TEXTILES. [*S. l.*]: Elsevier, 2018. p. 27–58. Disponível em:

https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081012734000020. Acesso em: 23 fev. 2026.

GAD, M. M.; FOUDA, S. M. Factors affecting flexural strength of 3D-printed resins: A systematic review. **Journal of Prosthodontics: Official Journal of the American College of Prosthodontists**, [*s. l.*], v. 32, n. S1, p. 96–110, 2023.

GARFIAS, K.; HAKKARAINEN, M.; ODELIUS, K. Mechanical recycling of epoxy composites reinforced with short-cut aramid fibers: Surface functionalization – The missing piece of the puzzle. **Polymer**, [*s. l.*], v. 295, p. 126747, 2024.

GAROUSHI, S. *et al.* A comparative evaluation of commercially available short fiber-reinforced composites. **BMC Oral Health**, [*s. l.*], v. 24, n. 1, p. 1573, 2024.

GHALIA, M. A.; ABDELRASOUL, A. Compressive and fracture toughness of natural and synthetic fiber-reinforced polymer. *In*: MECHANICAL AND PHYSICAL TESTING OF BIOCOMPOSITES, FIBRE-REINFORCED COMPOSITES AND HYBRID COMPOSITES. [*S. l.*]: Elsevier, 2019. p. 123–140. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081022924000072. Acesso em: 28 abr. 2026.

HICKEL, R. *et al.* FDI World Dental Federation: clinical criteria for the evaluation of direct and indirect restorations—update and clinical examples. **Clinical Oral Investigations**, [*s. l.*], v. 14, n. 4, p. 349–366, 2010.

HOFFMANN, M.; COLDEA, A.; STAWARCZYK, B. Mechanical Properties of Novel 3D-Printed Restorative Materials for Definitive Dental Applications. **Materials**, [*s. l.*], v. 18, n. 20, p. 4662, 2025.

KABIR, E. R. B.; FERDOUS, E. N. Kevlar-The Super Tough Fiber. **International Journal of Textile Science**, [*s. l.*], v. 1, n. 6, p. 78–83, 2012.

KERCHE, E. F. *et al.* Epoxy-based composites reinforced with imidazolium ionic liquid-treated aramid pulp. **Polymer**, [*s. l.*], v. 226, p. 123787, 2021.

KIM, K. H. *et al.* Microf racture Mechanisms of Dental Resin Composites Containing Spherically-shaped Filler Particles. **Journal of Dental Research**, [*s. l.*], v. 73, n. 2, p. 499–504, 1994.

KUMAR, K. *et al.* A Comprehensive Review on Enhancing the Strength of CFRPs Through Nano-reinforcements: Applications, Characterization, and Challenges. **Journal of Failure Analysis and Prevention**, [*s. l.*], v. 24, n. 4, p. 1588–1627, 2024.

KWOLEK, S. L. **Poly(p-benzamide) composition,process and product**. Concessão: 17 ago. 1971.

MAAS, M. S. *et al.* Trends in restorative composites research: what is in the future?. **Brazilian Oral Research**, [*s. l.*], v. 31, n. suppl 1, 2017. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-83242017000500200&lng=en&tlng=en. Acesso em: 23 fev. 2026.

MONETTE, L.; ANDERSON, M. P.; GREST, G. S. Effect of volume fraction and morphology of reinforcing phases in composites. **Journal of Applied Physics**, [*s. l.*], v. 75, n. 2, p. 1155–1170, 1994.

MUDHAFFER, S. *et al.* Effects of print orientation and artificial aging on the flexural strength and flexural modulus of 3D printed restorative resin materials. **The Journal of Prosthetic Dentistry**, [*s. l.*], 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022391324005730. Acesso em: 13 nov. 2024.

PETERSEN, R. C. Discontinuous Fiber-reinforced Composites above Critical Length. **Journal of Dental Research**, [*s. l.*], v. 84, n. 4, p. 365–370, 2005.

RITCHIE, R. O. Toughening materials: enhancing resistance to fracture. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, [*s. l.*], v. 379, n. 2203, p. 20200437, 2021.

SABIR, T. 2 - Fibers used for high-performance apparel. *In*: MCLOUGHLIN, J.; SABIR, T. (org.). **High-Performance Apparel**. [*S. l.*]: Woodhead Publishing, 2018. p. 7–32. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978008100904800002X.

SHOUHA, P.; SWAIN, M.; ELLAKWA, A. The effect of fiber aspect ratio and volume loading on the flexural properties of flowable dental composite. **Dental Materials**, [*s. l.*], v. 30, n. 11, p. 1234–1244, 2014.

SILVA, B. M. H. **Efeito do tratamento térmico sobre a sorção e solubilidade, tenacidade à fratura e grau de conversão de compósitos restauradores diretos**. 2010. text - Universidade de São Paulo, [*s. l.*], 2010. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/23/23140/tde-22122010-114112/. Acesso em: 14 nov. 2024.

ŠIMUNOVIĆ, L. *et al.* Rheology of Dental Photopolymers for SLA/DLP/MSLA 3D Printing. **Polymers**, [*s. l.*], v. 17, n. 19, p. 2706, 2025.

TAYEB, H. K. *et al.* Flexural Strength and Hardness Analysis of 3D-Printed vs. Milled Resin Composites Indicated for Definitive Crowns. **Journal of Functional Biomaterials**, [*s. l.*], v. 16, n. 12, p. 468, 2025.

TENNERT, C. *et al.* Longevity of posterior direct versus indirect composite restorations: A systematic review and meta-analysis. **Dental Materials**, [*s. l.*], v. 40, n. 11, p. e95–e101, 2024.

ZATTERA, A. C. A. *et al.* The influence of filler load in 3D printing resin-based composites. **Dental Materials**, [*s. l.*], v. 40, n. 7, p. 1041–1046, 2024.