

RESSALVA

Atendendo a solicitação do(a) autor(a), o texto completo desse trabalho será disponibilizado no repositório a partir de 02/06/2028.



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

JULIANA DE FREITAS GOUVEIA SILVA

**IMPRESSÃO 3D DE PEÇAS DENSAS E TRANSLÚCIDAS DE
ZIRCÔNIA PARCIALMENTE ESTABILIZADA COM 5MOL% DE ÍTRIA:
efeito da sobreposição de filamentos**

JULIANA DE FREITAS GOUVEIA SILVA

**IMPRESSÃO 3D DE PEÇAS DENSAS E TRANSLÚCIDAS DE ZIRCÔNIA
PARCIALMENTE ESTABILIZADA COM 5MOL% DE ÍTRIA: efeito da
sobreposição de filamentos**

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

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

Orientadora: Profa. Dra. Renata Marques de Melo Marinho
Coorientadora: Profa. Dra. Susana Maria Henriques Olhero
Coorientador: Prof. Dr. Tiago Moreira Bastos Campos

São José dos Campos

2026

Instituto de Ciência e Tecnologia [internet]. Normalização de tese e dissertação [acesso em 2026]. Disponível em <http://www.ict.unesp.br/biblioteca/normalizacao>

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

De Freitas Gouveia Silva, Juliana

Impressão 3D de peças densas e translúcidas de zircônia parcialmente estabilizada com 5mol% de ítria: efeito da sobreposição de filamentos / Juliana De Freitas Gouveia Silva. - São José dos Campos : [s.n.], 2026. 112 f. : il.

Tese (doutorado) - Pós-Graduação em Ciências Aplicadas à Saúde Bucal - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, 2026.

Orientador: Renata Marques de Melo Marinho
Coorientador: Susana Maria Henriques Olhero
Coorientador: Tiago Moreira Bastos Campos

1. Manufatura aditiva. 2. Propriedades reológicas. 3. Propriedades mecânicas. 4. Materiais dentários. 5. 5Y-PSZ. I. Marques de Melo Marinho, Renata, orient. II. Henriques Olhero, Susana Maria, coorient. III. Moreira Bastos Campos, Tiago, coorient. IV. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos. IV. Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho' - UNESP. V. Universidade Estadual Paulista (UNESP). VI. Título.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O principal impacto desta pesquisa reside na consolidação da manufatura aditiva por Extrusão de Material (MEX), nomeadamente a tecnologia Direct Ink Writing (DIW), como alternativa viável e eficiente à manufatura subtrativa de zircônia odontológica, técnica tradicionalmente associada a elevado desperdício de material e limitações geométricas. Ao demonstrar alta densificação, propriedades mecânicas confiáveis, desempenho tribológico adequado e personalização cromática dentro de padrões clínicos aceitáveis, este estudo contribui para o avanço de tecnologias mais sustentáveis e versáteis na odontologia restauradora. A capacidade de produzir geometrias complexas, como coroas totais, abre perspectivas para a fabricação personalizada de dispositivos cerâmicos, com potencial de otimizar fluxos digitais, reduzir custos de produção e ampliar o acesso a soluções protéticas de alta qualidade.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The primary impact of this research lies in establishing Direct Ink Writing (DIW) additive manufacturing as a viable and efficient alternative to subtractive manufacturing of dental zirconia — a technique traditionally associated with high material waste and geometric constraints. By demonstrating high densification, reliable mechanical properties, suitable tribological performance, and clinically acceptable chromatic customization, this study advances the development of more sustainable and versatile technologies in restorative dentistry. The ability to fabricate complex geometries, such as full crowns, opens new avenues for the personalized production of ceramic devices, with the potential to streamline digital workflows, reduce production costs, and broaden access to high-quality prosthetic solutions.

BANCA EXAMINADORA

Pesq III. Dra. Renata Marques de Melo Marinho (Orientador)

Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Instituição de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

Prof. Dr. Tiago Moreira Bastos Campos (Coorientador)

Universidade Federal de Pelotas (UFPel)

Faculdade de Odontologia

Campus de Pelotas

Profa. Dra. Susana Maria Henriques Olhero (Coorientador)

Universidade de Aveiro (UA)

Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica

Campus de Santiago

Profa. Dra. Nathalia de Carvalho Ramos Ribeiro

Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Instituição de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

Profa. Dra. Camila da Silva Rodrigues

Universidade Estadual Paulista (Unesp)

Instituição de Ciência e Tecnologia

Campus de São José dos Campos

Profa. Dra. Susana Salazar Marocho

University of Mississippi Medical Center

Department of Biomedical Materials Science

School of Dentistry

Prof. Dr. Ernesto Byron Benalcázar Jalkh

Universidade de São Paulo

Departamento de Prótese e Periodontia

Campus de Bauru

São José dos Campos, 02 de junho de 2026.

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese à minha família — ao meu pai, à minha mãe, ao Bruno, à minha tia Tatiana e ao meu avô Helson — que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, meu Pai, que com Seu imenso amor me sustenta e é a rocha da minha vida. Obrigada meu Deus, por ter me fortalecido ao longo de toda a minha caminhada e durante cada etapa da realização deste trabalho.

À minha mãe, agradeço o amor incondicional, por ter sido tão forte por mim e por ter me colocado como prioridade em sua vida tantas e tantas vezes, sempre cuidando para que nada me faltasse. Seu amor, dedicação e cuidado foram essenciais para que eu chegasse até aqui. Eu te amo, mãe, com todo o meu coração.

Ao meu pai, agradeço por todo o apoio, incentivo e suporte de sempre, e por ser exemplo de força e perseverança mesmo diante das adversidades. Muito obrigada por estar ao meu lado em todos os momentos. Eu te amo, pai.

Ao Bruno, meu segundo pai, agradeço por todo o apoio, pelos conselhos nas mais diversas áreas da vida e pela presença constante ao longo da minha trajetória. Acima de tudo, obrigada por cuidar tão bem da minha mãe. Eu te amo, Bruno.

Ao meu avô Helson, agradeço por sempre acreditar em mim, por toda a torcida, carinho e apoio ao longo da minha vida. Eu te amo, avô.

À minha tia Tatiana, agradeço por todo o amor, carinho e suporte ao longo de toda a minha vida. Muito obrigada pelos conselhos, pelo cuidado e por sempre estar presente. Eu te amo, tia, minha segunda mãe.

À professora Renata Marques de Melo Marinho, agradeço pela orientação conduzida com tanta excelência, pelo apoio ao longo de toda a minha trajetória acadêmica e por me permitir tomar decisões tão importantes para o meu crescimento profissional e pessoal. Sua confiança e incentivo foram fundamentais nessa caminhada.

À professora Susana Maria Henriques Olhero, agradeço por ter me acolhido em Portugal, por toda a dedicação e empenho na orientação e execução deste trabalho. Sua confiança e suporte foram essenciais para o meu crescimento profissional.

Ao professor Tiago Moreira Bastos Campos, agradeço a orientação, amizade e por sempre se preocupar genuinamente com o meu crescimento acadêmico e profissional. Muito obrigada por toda a dedicação e incentivo.

Ao meu amigo Manuel Alves, agradeço por toda a paciência em me ensinar e por toda a ajuda durante a execução deste trabalho. Sua colaboração foi extremamente importante ao longo dessa trajetória.

Aos meus amigos Karina Barbosa, Antonio Torres, Clarisse Silva, Ana Carolina, Natália Carvalho, Elisa Aboucauch, Bia Serra e Soraia Coelho, agradeço por todo o apoio, amizade, companheirismo e pelos momentos compartilhados ao longo desses anos. Obrigada por tornarem essa caminhada mais leve, feliz e especial.

Agradeço ao Instituto de Ciências e Tecnologia (Universidade Estadual Paulista) e ao Departamento de Engenharia Materiais e Cerâmica (Universidade de Aveiro), por permitirem a execução deste trabalho.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento desta pesquisa e pelo suporte concedido durante meu doutorado no Brasil e no exterior, por meio do programa de doutorado sanduíche realizado na Universidade de Aveiro.

"Aprendi o segredo de me sentir contente em todo lugar e em qualquer situação, quer tenha muito ou tenha pouco. Tudo posso por meio de Cristo que me fortalece".

Filipenses 4:12-13

RESUMO

Silva J.F.G. Impressão 3D de peças densas e translúcidas de zircônia parcialmente estabilizada com 5mol% de ítria: efeito da sobreposição de filamentos [tese]. São José dos Campos (SP): Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia; 2026.

A zircônia 5Y-PSZ é amplamente utilizada na manufatura subtrativa de restaurações protéticas, técnica que, contudo, implica no elevado desperdício de material. Para contornar essa limitação, o presente trabalho desenvolveu uma pasta de zircônia 5Y-PSZ para manufatura aditiva por extrusão via Direct Ink Writing (DIW), com o objetivo de produzir componentes cerâmicos densos para aplicações odontológicas, empregando abordagem coloidal com pó nanométrico de zircônia (47 vol%) combinado com agentes dispersantes, espessantes e flocculantes. Amostras impressas com diferentes percentagens de sobreposição entre filamentos (20%, 25% e 30%) foram comparadas a um controle prensado uniaxialmente, sinterizadas e caracterizadas quanto à densidade relativa, microestrutura, composição de fases, translucidez e resistência à flexão, sendo que a sobreposição de 30% proporcionou densificação superior a 99%, translucidez comparável ao grupo controle, dureza de 13.33 GPa, tenacidade a fratura de $3.6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ e resistência à flexão de $432 \pm 37 \text{ MPa}$ — com resistência característica de Weibull de 420 MPa e módulo de 7.0, valores próximos aos do grupo prensado (658 MPa; $m = 7.3$). Nos ensaios tribológicos, não foram observadas diferenças significativas entre os grupos prensado e impresso, sendo o ambiente de ensaio — seco ou úmido — o fator de maior influência sobre o desgaste. A otimização cromática da pasta, realizada pela adição de 0.05% em massa de Fe_2O_3 e 0.4% em massa de Er_2O_3 , resultou em cor compatível com a dentição natural, com $\Delta E_{00} \leq 1.8$, dentro do limiar de aceitabilidade clínica; coroas totais coloridas e não coloridas foram impressas com sucesso, apresentando densidade relativa ligeiramente inferior (~96–98%) à das amostras em disco, reflexo da maior complexidade geométrica da estrutura. Em conjunto, os resultados demonstram que a formulação e a rota de processamento desenvolvidas viabilizam a impressão de zircônia 5Y-PSZ por DIW com alta densificação, translucidez adequada e boa confiabilidade mecânica, em conformidade com a norma ISO 6872, além de desempenho tribológico satisfatório e possibilidade de personalização cromática, configurando uma alternativa viável à manufatura subtrativa para aplicações odontológicas.

Palavras-chave: manufatura aditiva; propriedades reológicas; propriedades mecânicas; materiais dentários; 5Y-PSZ.

ABSTRACT

Silva JFG. 3D printing of dense and translucent zirconia partially stabilized with 5 mol% yttria: effect of filament overlap [research project]. São José dos Campos (SP): São Paulo State University (UNESP), Institute of Science and Technology; 2026.

5Y-PSZ zirconia is widely used in subtractive manufacturing of prosthetic restorations; however, this technique entails substantial material waste. To address this limitation, the present study developed a 5Y-PSZ zirconia paste for additive manufacturing by extrusion via Direct Ink Writing (DIW), aiming to produce dense ceramic components for dental applications, using a colloidal approach with nanometric zirconia powder (47 vol%) combined with dispersing, thickening, and flocculating agents. Specimens printed with varying filament overlap percentages (20%, 25%, and 30%) were compared to a uniaxially pressed control, sintered, and characterized for relative density, microstructure, phase composition, translucency, and flexural strength; the 30% overlap condition yielded densification exceeding 99%, translucency comparable to the control group, hardness of 13.33 GPa, fracture toughness of 3.6 MPa.m^{1/2} and flexural strength of 432 ± 37 MPa — with a Weibull characteristic strength of 420 MPa and modulus of 7.0, values close to those of the pressed group (658 MPa; m = 7.3). Tribological testing revealed no significant differences between the pressed and printed groups, with the testing environment — dry or wet — being the predominant factor influencing wear behavior. Chromatic optimization of the paste, achieved by the addition of 0.05 wt% Fe₂O₃ and 0.4 wt% Er₂O₃, yielded a color compatible with natural dentition, with $\Delta E_{00} \leq 1.8$, within the clinically acceptable threshold; colored and uncolored full crowns were successfully printed, exhibiting slightly lower relative density (~96–98%) than disc-shaped specimens, reflecting the greater geometric complexity of the structure. The developed formulation and processing route enables the printing of 5Y-PSZ zirconia by DIW with high densification, adequate translucency, and good mechanical reliability, in compliance with ISO 6872, alongside satisfactory tribological performance and the possibility of chromatic customization — establishing DIW as a viable alternative to subtractive manufacturing for dental applications.

Keywords: Additive manufacturing; Rheological properties; Mechanical properties; Dental materials; 5Y-PSZ.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1 Zircônia policristalina estabilizada com 5mol% de ítria.....	17
2.2 Técnica de manufatura aditiva	19
2.3 Estabilidade da pasta – Potencial Zeta.....	20
2.4 Propriedades Reológicas das pastas	22
2.4.1 Comportamento Viscoso do Material em Relação à Tensão de Cisalhamento	24
2.4.2 Comportamento Viscoso do Material em Relação ao Tempo.....	25
2.4.3 Comportamento Viscoelástico do Material	26
2.4.4 Capacidade de impressão da pasta	28
2.5 Processo de <i>debinding</i> da pasta.....	29
3 PROPOSIÇÃO	31
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	32
4.1 Preparação das amostras e caracterização das pastas	32
4.2 Processo de impressão por <i>Direct Ink Writing (DIW)</i>	34
4.3 Caracterização e propriedades mecânicas das amostras sinterizadas de 5Y-PSZ.....	36
4.3.1 Densidade relativa	36
4.3.2 Propriedade Óptica (Parâmetro de Translucidez e Razão de Contraste)	37
4.3.3 Resistência à flexão biaxial	38
4.3.4 Difração de Raios X (DRX)	38
4.3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	39
4.3.6 Dureza e Tenacidade à Fratura (K_c)	39
4.4 Teste de Desgaste em seco e úmido	40
4.5 Otimização da cor na pasta previamente formulada	41
4.6 Impressão da coroa.....	42

4.7 Precisão dimensional de coroas dentárias	43
4.8 Microtomografia computadorizada da coroa total impressa	44
4.9 Análise estatística	44
5 RESULTADO	46
ETAPA A.....	46
5.1 Estabilização eletrostática e reológica de suspensões nanométricas de 5Y-PSZ.....	46
5.2 Desenvolvimento de pastas 5Y-PSZ com alto teor de sólidos e adequada printabilidade	50
ETAPA B.....	57
5.3 Microestrutura, densidade relativa e translucidez das cerâmicas de 5Y-PSZ sinterizadas.....	57
5.4 Efeito da sobreposição de filamentos nas propriedades mecânicas	60
ETAPA C.....	64
5.5 Análise de Desgaste em Úmido e Seco	64
5.6 Otimização da zircônia 5Y-PSZ impressa com cor.....	77
5.7 Impressão de coroas anatômicas	80
5.8 Análise das dimensões das coroas impressas	81
5.10 Análise de microtomografia computadorizada (Micro-CT)	85
6 DISCUSSÃO	87
7 CONCLUSÃO	98
REFERÊNCIAS.....	99

1 INTRODUÇÃO

A zircônia parcialmente estabilizada com 5 mol% de ítria (5Y-PSZ) é amplamente utilizada na odontologia para a fabricação de coroas unitárias e pontes fixas de até três elementos em região anterior, devido à combinação entre adequada translucidez e resistência mecânica, de acordo com a classe 3 da norma ISO 6872-2015 (Mao et al., 2018). A técnica *Computed Aided Design and Computed Aided Manufacturing (CAD/CAM)* consiste no desenho da peça protética no computador seguida da fresagem da peça final através da manufatura subtrativa. Essa técnica de processamento é atualmente utilizada como abordagem padrão para a confecção de restaurações dentárias de zircônia estabilizada com ítria ($Y_2O_3-ZrO_2$) (da Silva Rodrigues et al., 2024).

No entanto, o processo de manufatura subtrativa apresenta limitações significativas, como o desgaste acentuado das ferramentas e a considerável perda de material (Campos et al., 2024). Estima-se que cerca de 80% da massa inicial do material seja perdida — aproximadamente 30% como partículas finas geradas durante a fresagem e cerca de 50% como material residual não usinado (Benalcázar-Jalkh et al., 2025; Campos et al., 2024; Tao et al., 2017). Em consequência, as tecnologias de manufatura aditiva (*Additive Manufacturing - AM*), frequentemente denominadas como impressão 3D, têm emergido como uma alternativa promissora aos métodos convencionais de CAD/CAM na odontologia moderna (Jung et al., 2023; Lamnini et al., 2022; Olhero et al., 2022).

Entre as diversas técnicas de impressão 3D atualmente disponíveis, o *Direct Ink Writing (DIW)* — também conhecido como *Robocasting* — insere-se na categoria de extrusão de material (MEX) e permite a confecção de peças com geometrias complexas a partir de pastas cerâmicas com alto teor de sólidos e baixa quantidade de aditivos orgânicos, quando comparado a outras tecnologias de manufatura aditiva para cerâmicas (C. dos Santos et al., 2024; V. I. dos Santos et al., 2024; Peng et al., 2018a). Esse processo geralmente se baseia na confecção de uma suspensão coloidal com uma dispersão homogênea dos pós cerâmicos e adequadas propriedades reológicas o que permite a obtenção de estruturas cerâmicas densas (Peng et al., 2018a; Shojai et al., 2000).

No entanto, alcançar alta densificação e desempenho mecânico adequado em amostras de 5Y-PSZ ainda constitui um grande desafio, tendo em vista que a literatura sobre a impressão 3D desse material é notavelmente escassa (C. dos Santos et al., 2024; C. Santos et al., 2022; Teegen et al., 2023). Essa limitação pode ser atribuída, em parte, ao desenvolvimento das pastas, já que normalmente são obtidos baixos teores de sólidos — possivelmente devido à elevada área superficial dos pós de cerâmica utilizados (Maillard et al., 2025). Além disso, a formação de vazios entre os filamentos durante o processo de impressão compromete tanto a integridade estrutural quanto as propriedades ópticas das peças finais, aspectos críticos para aplicações odontológicas (Baltazar et al., 2022; C. dos Santos et al., 2024).

Diversos estudos identificaram fatores-chave que podem ser controlados no processo de DIW para alcançar estruturas cerâmicas densas (Baltazar et al., 2021a, 2022; Faria et al., 2023; M'Barki et al., 2017; Rau et al., 2023), nomeadamente: (i) a otimização da formulação da pasta, de modo a apresentar propriedades reológicas adequadas à impressão, e (ii) o ajuste dos parâmetros de impressão, como o diâmetro do bico, a velocidade de impressão e o padrão de preenchimento (Baltazar et al., 2022; Faria et al., 2023; M'Barki et al., 2017; Rau et al., 2023). No que diz respeito à otimização reológica, a capacidade de impressão (*printability*) de pastas cerâmicas com alto teor de sólidos é garantida quando esta apresenta um estado semelhante a um sólido (*solid-like material*) quando está em repouso, um comportamento semelhante a um líquido (*liquid-like material*) sob aplicação de tensão de cisalhamento, e a recuperação do estado sólido após a remoção da tensão (Inês dos Santos et al., 2024; Lu et al., 2025; M'Barki et al., 2017; Rau et al., 2023; Strasser et al., 2023). Esse comportamento assegura a estabilidade estrutural antes e depois da impressão, além de permitir o escoamento adequado durante a extrusão (Peng et al., 2018a; Shojai et al., 2000).

Essas características podem ser descritas por parâmetros reológicos como o módulo de armazenamento (G') e a tensão de escoamento (τ_f – *flow stress*) ou tensão de cedência (τ_y – *yield stress*). Um equilíbrio adequado entre esses parâmetros é essencial para garantir ideal rigidez e fluidez, a fim de evitar a separação de fases (sólido/líquido) durante a impressão (Maillard et al., 2025; Shojai et al., 2000; Teegen et al., 2023). Além disso, a adequada otimização da pasta ajuda a prevenir a aglomeração antes da confecção do corpo verde, que é fundamental para um

processo de impressão eficiente. A presença de aglomerados pode obstruir o bico de extrusão e reduzir a fidelidade e a precisão geométrica das peças, especialmente quando se utilizam pós de tamanho nanométrico (C. dos Santos et al., 2024; Shojai et al., 2000). Além disso, é essencial determinar a concentração adequada dos aditivos na pasta, com o intuito de minimizar a quantidade de material orgânico necessária, facilitar o processo de eliminação de ligantes (*debinding*) e reduzir a retração durante a secagem (Peng et al., 2018a).

Um fator crítico na fabricação de estruturas cerâmicas densas por DIW é garantir que os filamentos cilíndricos depositados pelo bico fluam o suficiente após a extrusão para preencher os vazios inevitáveis formados durante a sobreposição de camadas, ao mesmo tempo em que resistam ao colapso da estrutura impressa (Baltazar et al., 2021a; Göksel, Koos, et al., 2024; Jang et al., 2021; M'Barki et al., 2017). Caso a deformação ou o espalhamento dos filamentos não seja adequadamente controlado, a fidelidade dimensional e a precisão das peças podem ser comprometidas, o que prejudicaria a reprodução fiel do modelo tridimensional (M'Barki et al., 2017). A sobreposição de filamentos tem sido apontada como um parâmetro de impressão capaz de minimizar defeitos em processos baseados em extrusão (H. Yoon et al., 2025), embora ainda pouco explorado para cerâmicas, especialmente para a zircônia 5Y-PSZ. Uma sobreposição adequada entre filamentos adjacentes pode promover uma ligação interfacial mais forte e reduzir a formação de vazios interfilamentares, o que contribui para a densificação das cerâmicas.

Essa otimização é fundamental para viabilizar a fabricação de estruturas anatômicas complexas, como coroas totais, garantindo que os filamentos extrudados possuam estabilidade suficiente para sustentar a construção tridimensional ao longo do processo de impressão (Alves et al., 2024; C. dos Santos et al., 2024). A validação da qualidade da pasta por meio da impressão de geometrias complexas constitui, portanto, uma etapa indispensável, pois permite avaliar simultaneamente sua processabilidade e integridade estrutural em condições próximas às da aplicação clínica (Tu et al., 2024).

Além do desafio relacionado à impressão de uma coroa dentária, a obtenção de propriedades ópticas clinicamente aceitáveis representa outro requisito fundamental para a aplicação da zircônia produzida por manufatura aditiva na odontologia restauradora, uma vez que o material deve reproduzir a cor natural dos

dentos (Shahmiri et al., 2018; Theis et al., 2024). Na manufatura subtrativa, a coloração é geralmente alcançada pela incorporação de óxidos cromóforos ao pó de zircônia antes da fabricação dos blocos. Entre os óxidos mais comumente utilizados destacam-se Fe_2O_3 , Bi_2O_3 , CeO_2 , Er_2O_3 , MnO_2 e Pr_6O_{11} (Balabanov et al., 2020; Balica et al., 2020; Sadeq & Abdo, 2021; Theis et al., 2024; Yakovlev et al., 2020)

A incorporação desses óxidos metálicos altera o perfil de absorção e a resposta espectral do material por meio da substituição parcial dos íons de zircônio na rede cristalina, influenciando diretamente a aparência final da restauração (Tabatabaian, 2019). Diante disso, torna-se essencial avaliar a incorporação de óxidos metálicos — especificamente óxido de ferro (Fe_2O_3) e óxido de érbio (Er_2O_3) — a fim de compreender sua influência nas propriedades ópticas e na cor final de próteses em 5Y-PSZ obtidas por impressão (Sadeq & Abdo, 2021; Yakovlev et al., 2020). O estabelecimento de correlações entre características microestruturais e comportamento espectral pode fornecer informações relevantes para a otimização dos parâmetros de processamento, permitindo alcançar resultados estéticos mais previsíveis em restaurações produzidas por manufatura aditiva.

Além de toda a formulação adequada da pasta, a fim de viabilizar a confecção de peças anatômicas, é importante assegurar que a peça final apresente desempenho satisfatório frente às demandas mecânicas do ambiente oral, sobretudo em relação ao desgaste tribológico (Dal Piva et al., 2020; De Angelis et al., 2022) resultante do contato contínuo durante a mastigação — fator determinante para a longevidade das restaurações odontológicas.

Dessa forma, destaca-se a importância de uma otimização adequada da composição e das propriedades reológicas da pasta cerâmica, uma vez que esses fatores influenciam diretamente a qualidade de impressão, a densificação após a sinterização e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas e ópticas do material resultante. Diante disso, este estudo tem como objetivo analisar o comportamento do material desenvolvido em relação às propriedades supracitadas.

7 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos permitem concluir que a rota de manufatura aditiva por Direct Ink Writing (DIW), associada a uma formulação coloidal otimizada de zircônia 5Y-PSZ, é capaz de produzir componentes cerâmicos com elevada densificação, microestrutura homogênea e propriedades ópticas e mecânicas compatíveis com aplicações odontológicas. A condição com 30% de sobreposição entre filamentos destacou-se como a mais eficiente, proporcionando densidade relativa superior a 99%, translucidez comparável à do material prensado e resistência à flexão com boa confiabilidade estatística — atendendo aos requisitos estabelecidos pela norma ISO 6872 e demonstrando que a manufatura aditiva, quando devidamente otimizada, pode alcançar desempenho próximo ao de técnicas convencionais.

O comportamento tribológico da zircônia 5Y-PSZ não foi significativamente influenciado pelo método de processamento, revelando-se, contudo, dependente do ambiente de ensaio. Em condição seca, observaram-se maiores taxas de desgaste, associadas à abrasão severa e à microfratura, ao passo que o meio úmido promoveu redução significativa do desgaste volumétrico, porém resultou em superfícies mais heterogêneas, com aumento da rugosidade e indícios de fadiga superficial e ação de terceiro corpo. As análises microestruturais e por difração de raios X confirmaram a ocorrência de transformação de fase induzida por tensão — mais pronunciada em ambiente seco —, evidenciando a interação entre resposta estrutural e mecanismos de desgaste.

Por fim, a adição de agentes cromóforos — Fe_2O_3 e Er_2O_3 — mostrou-se eficaz na obtenção de coloração compatível com a dentição natural, sem comprometimento das propriedades funcionais do material. A fabricação bem-sucedida de coroas totais reforça a viabilidade prática da técnica, ainda que desafios relacionados à densificação em geometrias complexas persistam. Em conjunto, os resultados consolidam a manufatura aditiva por DIW como alternativa promissora à manufatura subtrativa de zircônia odontológica, com potencial para redução de desperdício de material, maior liberdade de design e desempenho funcional satisfatório para aplicações clínicas.

REFERÊNCIAS

- Alqutaibi, A. Y., Ghulam, O., Krsoum, M., Binmahmoud, S., Taher, H., Elmalky, W., & Zafar, M. S. (2022). Revolution of Current Dental Zirconia: A Comprehensive Review. In *Molecules* (Vol. 27, Number 5). MDPI. <https://doi.org/10.3390/molecules27051699>
- Alves, M. F. R. P., de Campos, L. Q. B., Simba, B. G., da Silva, C. R. M., Strecker, K., & dos Santos, C. (2022). Microstructural Characteristics of 3Y-TZP Ceramics and Their Effects on the Flexural Strength. *Ceramics*, 5(4), 798–813. <https://doi.org/10.3390/ceramics5040058>
- Alves, M. F. R. P., dos Santos, C., Duarte, I., Fernandes, M. H. F. V., & Olhero, S. M. (2024). Complex shapes of lithium disilicate glass-ceramics developed by material extrusion. *Additive Manufacturing*, 80. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.103973>
- Alves, M. F. R. P., dos Santos, C., Elias, C. N., Amarante, J. E. V., & Ribeiro, S. (2023). Comparison between different fracture toughness techniques in zirconia dental ceramics. *Journal of Biomedical Materials Research - Part B Applied Biomaterials*, 111(1), 103–116. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.35137>
- Ang, X., Tey, J. Y., Yeo, W. H., & Shak, K. P. Y. (2023). A review on metallic and ceramic material extrusion method: Materials, rheology, and printing parameters. In *Journal of Manufacturing Processes* (Vol. 90, pp. 28–42). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.01.077>
- Balabanov, S., Filofeev, S., Ivanov, M., Kaigorodov, A., Krugovykh, A., Kuznetsov, D., Permin, D., Popov, P., & Rostokina, E. (2020). Fabrication and characterizations of erbium oxide based optical ceramics. *Optical Materials*, 101. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.109732>
- Balica, N. M. P., Campelo, T. de S., Filho, E. C. da S., Santos, M. R. de M. C., & Santos, R. L. P. (2020). Pigmented zircônia-yttria obtained by pechini method for dental applications. *Revista Materia*, 25(4), 1–13. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1175>
- Baltazar, J., Rodrigues Pais Alves, M. F., Martins, M. A., Torres, P. M. C., Santos, C., & Olhero, S. (2022). Flexural strength of 3Y-TZP bioceramics obtained by direct write assembly as function of residual connected-porosity. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.105035>
- Baltazar, J., Torres, P. M. C., Dias-de-Oliveira, J., Pinho-da-Cruz, J., Gouveia, S., & Olhero, S. (2021a). Influence of filament patterning in structural properties of dense alumina ceramics printed by robocasting. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 569–582. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.043>
- Baltazar, J., Torres, P. M. C., Dias-de-Oliveira, J., Pinho-da-Cruz, J., Gouveia, S., & Olhero, S. (2021b). Influence of filament patterning in structural properties of

- dense alumina ceramics printed by robocasting. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, 569–582. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.05.043>
- Ban, S. (2021). Classification and properties of dental zirconia as implant fixtures and superstructures. In *Materials* (Vol. 14, Number 17). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma14174879>
- Benalcázar-Jalkh, E. B., Campos, T. M. B., dos Santos, C., Alves, L. M. M., Carvalho, L. F., Bergamo, E. T. P., Tebcherani, S. M., Witek, L., Coelho, P. G., Thim, G. P., Yamaguchi, S., Sousa, E. O., Marcolino, G. A., & Bonfante, E. A. (2025). Novel bilayered zirconia systems using recycled 3Y-TZP for dental applications. *Dental Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2024.12.013>
- Benchabane, A., & Bekkour, K. (2008). Rheological properties of carboxymethyl cellulose (CMC) solutions. *Colloid and Polymer Science*, 286(10), 1173–1180. <https://doi.org/10.1007/s00396-008-1882-2>
- Brookes, C. A., & Parry, A. R. (1988). Some Fundamental Aspects of the Mechanical Wear of Hard Ceramic Crystals due to Sliding* The resolution of shear stresses on the active slip systems in crystals subjected to point loading. In *Materials Science and Engineering* (Vol. 105).
- Bučevac, D., Kosmač, T., & Kocjan, A. (2017). The influence of yttrium-segregation-dependent phase partitioning and residual stresses on the aging and fracture behaviour of 3Y-TZP ceramics. *Acta Biomaterialia*, 62, 306–316. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2017.08.014>
- Buckley, D. H., & Miyoshi, K. (1984). FRICTION AND WEAR OF CERAMICS. In *Wear* (Vol. 100).
- Campos, T. M. B., dos Santos, C., Alves, L. M. M., Benalcázar-Jalkh, E. B., Strazzi-Sahyon, H. B., Bergamo, E. T. P., Tebcherani, S. M., Witek, L., Coelho, P. G., Yamaguchi, S., Thim, G. P., & Bonfante, E. A. (2024). Minimally processed recycled yttria-stabilized tetragonal zirconia for dental applications: Effect of sintering temperature on glass infiltration. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.106311>
- Čelko, L., Gutiérrez-Cano, V., Casas-Luna, M., Matula, J., Oliver-Urrutia, C., Remešová, M., Dvořák, K., Zikmund, T., Kaiser, J., & Montufar, E. B. (2021). Characterization of porosity and hollow defects in ceramic objects built by extrusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102272>
- Cesar, P. F., Miranda, R. B. de P., Santos, K. F., Scherrer, S. S., & Zhang, Y. (2024). Recent advances in dental zirconia: 15 years of material and processing evolution. In *Dental Materials* (Vol. 40, Number 5, pp. 824–836). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2024.02.026>
- Chen, H., Wang, X., Xue, F., Huang, Y., Zhou, K., & Zhang, D. (2018). 3D printing of SiC ceramic: Direct ink writing with a solution of preceramic polymers. *Journal of the European Ceramic Society*, 38(16), 5294–5300. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.08.009>

- Chevalier, J., Deville, S., Münch, E., Jullian, R., & Lair, F. (2004). Critical effect of cubic phase on aging in 3 mol% yttria-stabilized zirconia ceramics for hip replacement prosthesis. *Biomaterials*, 25(24), 5539–5545. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2004.01.002>
- Coffigniez, M., Gremillard, L., Balvay, S., Lachambre, J., Adrien, J., & Boulnat, X. (2021). Direct-ink writing of strong and biocompatible titanium scaffolds with bimodal interconnected porosity. *Additive Manufacturing*, 39. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101859>
- Cohen Stuart, M. (1991). Adsorbed Polymers in Colloidal Systems: from Statics to Dynamics. *Polymer Journal*, 23(5), 669–682.
- Cooke, M. E., & Rosenzweig, D. H. (2021). The rheology of direct and suspended extrusion bioprinting. In *APL Bioengineering* (Vol. 5, Number 1). American Institute of Physics Inc. <https://doi.org/10.1063/5.0031475>
- Costakis, W. J., Rueschhoff, L. M., Diaz-Cano, A. I., Youngblood, J. P., & Trice, R. W. (2016). Additive manufacturing of boron carbide via continuous filament direct ink writing of aqueous ceramic suspensions. *Journal of the European Ceramic Society*, 36(14), 3249–3256. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2016.06.002>
- da Silva, A. C., de Freitas Gouveia Silva, J., da Silva Rodrigues, C., Santos, E. L. de S., Junqueira, J. C., Campos, T. M. B., Thim, G. P., Jodha, K. S., Marocho, S. M. S., Griggs, J. A., & de Melo Marinho, R. M. (2025). Unraveling the antimicrobial mechanisms and multifunctional performance of boron-doped glass coatings on dental zirconias. *Ceramics International*. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.11.432>
- da Silva Rodrigues, C., da Silva, A. C., Sabino, C. F., de Melo, R. M., & Campos, T. M. B. (2024). Borosilicate glass as a surface finishing alternative for improving the mechanical properties of third-generation zirconia. *Dental Materials*, 40(3), 477–483. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2023.12.012>
- Dal Piva, A. M. O., Tribst, J. P. M., Werner, A., Anami, L. C., Bottino, M. A., & Kleverlaan, C. J. (2020). Three-body wear effect on different CAD/CAM ceramics staining durability: Staining durability after wear. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 103. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103579>
- Davies, J., & Binner, J. G. P. (2000). *The role of ammonium polyacrylate in dispersing concentrated alumina suspensions*.
- De Angelis, F., Buonvivere, M., Sorrentino, E., Rondoni, G. D., & D’Arcangelo, C. (2022). Wear Properties of Conventional and High-Translucent Zirconia-Based Materials. *Materials*, 15(20). <https://doi.org/10.3390/ma15207324>
- del-Mazo-Barbara, L., & Ginebra, M. P. (2021). Rheological characterisation of ceramic inks for 3D direct ink writing: A review. In *Journal of the European Ceramic Society* (Vol. 41, Number 16, pp. 18–33). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2021.08.031>

- Derjaguin, B. V., & Landau, L. D. (1941). Theory of the Stability of Strongly Charged Lyophobic Sols and of the Adhesion of Strongly Charged Particles in Solutions of Electrolytes. *Acta Physicochimica*, 633–662. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0079-6816\(93\)90013-L](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0079-6816(93)90013-L)
- Dinkgreve, M., Paredes, J., Denn, M. M., & Bonn, D. (2016). On different ways of measuring “the” yield stress. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 238, 233–241. <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2016.11.001>
- dos Santos, C., Baltazar, J., Alves, M. F. R. P., & Olhero, S. M. (2024). Translucent zirconia dental prosthesis processed by Direct Ink Writing: Updates and challenges. *Journal of Manufacturing Processes*, 131, 1656–1666. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.09.105>
- dos Santos, V. I., Chevalier, J., Fredel, M. C., Henriques, B., & Gremillard, L. (2024). Ceramics and ceramic composites for biomedical engineering applications via Direct Ink Writing: Overall scenario, advances in the improvement of mechanical and biological properties and innovations. In *Materials Science and Engineering R: Reports* (Vol. 161). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2024.100841>
- Duty, C., Ajinjeru, C., Kishore, V., Compton, B., Hmeidat, N., Chen, X., Liu, P., Hassen, A. A., Lindahl, J., & Kunc, V. (2018). What makes a material printable? A viscoelastic model for extrusion-based 3D printing of polymers. *Journal of Manufacturing Processes*, 35, 526–537. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.008>
- Faria, M. S., Alves, M. F. R. P., Cintra, R., Oliveira, F. J., Fernandes, C. M., Figueiredo, D., & Olhero, S. M. (2023). Influence of ink rheology and post processing in the structural performance of silicon nitride-based ceramics fabricated by robocasting. *Ceramics International*, 49(12), 20968–20979. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.03.231>
- Fernández-Oliveras, A., Ño, M. R., & Pérez, M. M. (2013). Scattering and absorption properties of biomaterials for dental restorative applications. *Journal of the European Optical Society*, 8. <https://doi.org/10.2971/jeos.2013.13056>
- Fernández-Oliveras, A., Rubiño, M., & Perez, M. M. (2012). Scattering anisotropy measurements in dental tissues and biomaterials. *Journal of the European Optical Society*, 7. <https://doi.org/10.2971/jeos.2012.12016>
- Glymond, D., & Vandeperre, L. J. (2018). Robocasting of MgO-doped alumina using alginic acid slurries. *Journal of the American Ceramic Society*, 101(8), 3309–3316. <https://doi.org/10.1111/jace.15509>
- Göksel, B., Koos, E., Vleugels, J., & Braem, A. (2024). Optimizing dispersants for direct ink writing of alumina toughened zirconia (ATZ) ceramics: Insights into suspension behavior and rheological properties. *Ceramics International*, 50(19), 37010–37022. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.07.090>
- Göksel, B., Schulte, N. A., Kovač, M., Koos, E., Van Meerbeek, B., Vleugels, J., & Braem, A. (2024). Rheology and printability of alumina-toughened zirconia pastes for high-density strong parts via direct ink writing. *Journal of the European*

- Ceramic Society*, 44(11), 6565–6575.
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.04.031>
- Griffith, A. A. (1920). *The Phenomena of rupture and flow in solids* (F. R. S. G.I. Taylor, Ed.; pp. 163–198).
- Gupta, P., Mundra, R., & Jha, S. K. (2024). Stabilization of Al₂O₃ dispersed slurry by controlling pH. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 685. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.133251>
- Herschel, W. H., & Bulkley, R. (1926). Consistency measurements of rubber-benzene solutions. *Colloid Polym Sci*, (39), 291.
- Hetzler, S., Hinzen, C., Rues, S., Schmitt, C., Rammelsberg, P., & Zenthöfer, A. (2025). Biaxial Flexural Strength and Vickers Hardness of 3D-Printed and Milled 5Y Partially Stabilized Zirconia. *Journal of Functional Biomaterials*, 16(1). <https://doi.org/10.3390/jfb16010036>
- Hu, F., Mikolajczyk, T., Pimenov, D. Y., & Gupta, M. K. (2021). Extrusion-based 3d printing of ceramic pastes: Mathematical modeling and in situ shaping retention approach. *Materials*, 14(5), 1–22. <https://doi.org/10.3390/ma14051137>
- Hwang, D. H., & Zum Gahr, K. H. (2003). Transition from static to kinetic friction of unlubricated or oil lubricated steel/steel, steel/ceramic and ceramic/ceramic pairs. *Wear*, 255(1–6), 365–375. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00063-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00063-2)
- Inês dos Santos, V., Celso Fredel, M., Henriques, B., & Gremillard, L. (2024). Rheological characterization of pastes of Alumina-Toughened Zirconia with additions of carbon nanofibers and evaluation of their printability via Material Extrusion. *Journal of Manufacturing Processes*, 1784–1801. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.09.094>
- J. Mewis, & N.J. Wagner. (2012). *Colloidal Suspension Rheology* (Cambridge University Press, Ed.). Knovel.
- Jang, S., Boddorff, A., Jang, D. J., Lloyd, J., Wagner, K., Thadhani, N., & Brettmann, B. (2021). Effect of material extrusion process parameters on filament geometry and inter-filament voids in as-fabricated high solids loaded polymer composites. *Additive Manufacturing*, 47. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102313>
- Jung, J. M., Kim, G. N., Koh, Y. H., & Kim, H. E. (2023). Manufacturing and Characterization of Dental Crowns Made of 5-mol% Yttria Stabilized Zirconia by Digital Light Processing. *Materials*, 16(4). <https://doi.org/10.3390/ma16041447>
- Karakurt, I., & Lin, L. (2020). 3D printing technologies: techniques, materials, and post-processing. In *Current Opinion in Chemical Engineering* (Vol. 28, pp. 134–143). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.coche.2020.04.001>
- Kaya, G. (2013). Production and characterization of self-colored dental zirconia blocks. *Ceramics International*, 39(1), 511–517.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.06.056>

- Kontonasaki, E., Giasimakopoulos, P., & Rigos, A. E. (2020). Strength and aging resistance of monolithic zirconia: an update to current knowledge. In *Japanese Dental Science Review* (Vol. 56, Number 1, pp. 1–23). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jdsr.2019.09.002>
- Lamnini, S., Elsayed, H., Lakhdar, Y., Baino, F., Smeacetto, F., & Bernardo, E. (2022). Robocasting of advanced ceramics: ink optimization and protocol to predict the printing parameters - A review. In *Heliyon* (Vol. 8, Number 9). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10651>
- Lerner, H., Nagy, K., Pranno, N., Zarone, F., Admakin, O., & Mangano, F. (2021). Trueness and precision of 3D-printed versus milled monolithic zirconia crowns: An in vitro study. *Journal of Dentistry*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2021.103792>
- Lim, C. H., Vardhaman, S., Reddy, N., & Zhang, Y. (2022). Composition, processing, and properties of biphasic zirconia bioceramics: Relationship to competing strength and optical properties. *Ceramics International*, 48(12), 17095–17103. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.02.265>
- Lu, Y., van Steenoven, A., Dal Piva, A. M. de O., Tribst, J. P. M., Wang, L., Kleverlaan, C. J., & Feilzer, A. J. (2025). Additive-manufactured ceramics for dental restorations: a systematic review on mechanical perspective. In *Frontiers in Dental Medicine* (Vol. 6). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/fdmed.2025.1512887>
- Luo, J., & Stevens, R. (1999). Porosity-dependence of elastic moduli and hardness of 3Y-TZP ceramics. *Ceramics International*, 25, 281–286.
- Luo, M. R., Cui, G., & Rigg, B. (2000). The Development of the CIE 2000 Colour-Difference Formula: CIEDE2000. *Color Research and Application*, 340–350.
- Luz, A. P., Moreira, M. H., Braulio, M. A. L., Parr, C., & Pandolfelli, V. C. (2021). Drying behavior of dense refractory ceramic castables. Part 1 – General aspects and experimental techniques used to assess water removal. In *Ceramics International* (Vol. 47, Number 16, pp. 22246–22268). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.05.022>
- M. Elimelech, J. Gregory, & X. Jia. (1995). Surface interaction potentials. In R.A.F. Williams (Ed.), *Particle Deposition and Aggregation* (3).
- M Elimelech, J Gregory, X Jia, & R Williams. (1995). *Particle Deposition and Aggregation - measurement, modelling and simulation*.
- Maillard, M., Fournier, S., García-Tuñón, E., & Courtial, E. J. (2025). Advances and obstacles to unify the concept of “printability” in Ceramics Direct Ink Writing. In *Open Ceramics* (Vol. 23). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2025.100808>
- Mao, L., Kaizer, M. R., Zhao, M., Guo, B., Song, Y. F., & Zhang, Y. (2018). Graded Ultra-Translucent Zirconia (5Y-PSZ) for Strength and Functionalities. *Journal of*

- Dental Research*, 97(11), 1222–1228.
<https://doi.org/10.1177/0022034518771287>
- Matsui, K., Horikoshi, H., Ohmichi, N., Ohgai, M., Yoshida, H., & Ikuhara, Y. (2003). Cubic-formation and grain-growth mechanisms in tetragonal zirconia polycrystal. *Journal of the American Ceramic Society*, 86(8), 1401–1408.
<https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2003.tb03483.x>
- Matsui, K., Ohmichi, N., Ohgai, M., Yoshida, H., & Ikuhara, Y. (2006). Grain Boundary Segregation-Induced Phase Transformation in Yttria-Stabilized Tetragonal Zirconia Polycrystal. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 114, 230–237.
- Matsui, K., Yoshida, H., & Ikuhara, Y. (2010). Phase-transformation and grain-growth kinetics in yttria-stabilized tetragonal zirconia polycrystal doped with a small amount of alumina. *Journal of the European Ceramic Society*, 30(7), 1679–1690.
<https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2010.01.007>
- Matsui, K., Yoshida, H., & Ikuhara, Y. (2018). Review: microstructure-development mechanism during sintering in polycrystalline zirconia. In *International Materials Reviews* (Vol. 63, Number 6, pp. 375–406). Taylor and Francis Ltd.
<https://doi.org/10.1080/09506608.2017.1402424>
- M'Barki, A., Bocquet, L., & Stevenson, A. (2017). Linking Rheology and Printability for Dense and Strong Ceramics by Direct Ink Writing. *Scientific Reports*, 7(1).
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-06115-0>
- Nelson, A. Z., Schweizer, K. S., Rauzan, B. M., Nuzzo, R. G., Vermant, J., & Ewoldt, R. H. (2019). Designing and transforming yield-stress fluids. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 23(5).
<https://doi.org/10.1016/j.cossms.2019.06.002>
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. In *Composites Part B: Engineering* (Vol. 143, pp. 172–196). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- Olhero, S. M., Torres, P. M. C., Mesquita-Guimarães, J., Baltazar, J., Pinho-da-Cruz, J., & Gouveia, S. (2022). Conventional versus additive manufacturing in the structural performance of dense alumina-zirconia ceramics: 20 years of research, challenges and future perspectives. In *Journal of Manufacturing Processes* (Vol. 77, pp. 838–879). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.02.041>
- Pallas, N. R., & Ica, B. A. P. (1983). The surface tension of water. *Colloids and Surfaces*, 6, 221–227.
- Paravina, R. D., Ghinea, R., Herrera, L. J., Bona, A. D., Igiel, C., Linninger, M., Sakai, M., Takahashi, H., Tashkandi, E., & Del Mar Perez, M. (2015). Color difference thresholds in dentistry. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 27(S1), S1–S9. <https://doi.org/10.1111/jerd.12149>

- Paravina, R. D., Majkic, G., Imai, F. H., & Powers, J. M. (2007). Optimization of tooth color and shade guide design: Clinical research. *Journal of Prosthodontics*, 16(4), 269–276. <https://doi.org/10.1111/j.1532-849X.2007.00189.x>
- Paravina, R. D., Pérez, M. M., & Ghinea, R. (2019). Acceptability and perceptibility thresholds in dentistry: A comprehensive review of clinical and research applications. In *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry* (Vol. 31, Number 2, pp. 103–112). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/jerd.12465>
- Park, S. J., & Seo, M. K. (2011). Intermolecular Force. In *Interface Science and Technology* (Vol. 18). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375049-5.00001-3>
- Peng, E., Zhang, D., & Ding, J. (2018a). Ceramic Robocasting: Recent Achievements, Potential, and Future Developments. In *Advanced Materials* (Vol. 30, Number 47). Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/adma.201802404>
- Peng, E., Zhang, D., & Ding, J. (2018b). Ceramic Robocasting: Recent Achievements, Potential, and Future Developments. In *Advanced Materials* (Vol. 30, Number 47). Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/adma.201802404>
- Rainforth, W. M. (1996). The Sliding Wear of Ceramics. In *Elsevier Science Limited and Techna S.r* (Vol. 22, Number 95).
- Ramesh Babu, A., & Yusub, S. (2020). Ascendancy of iron ions on lithium ion conductivity, optical band gap, Urbach energy and topology of LiF-SrO-B₂O₃ glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 533. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2020.119906>
- Rau, D. A., Williams, C. B., & Bortner, M. J. (2023). Rheology and printability: A survey of critical relationships for direct ink write materials design. In *Progress in Materials Science* (Vol. 140). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101188>
- Rice, R. W., Cm Wu, C., & Borchelt, F. (1994). Hardness-Grain-Size Relations in Ceramics. *J. Am. Ceram. Soc*, 77, 2539–2553.
- Romberg, S. K., Islam, M. A., Hershey, C. J., DeVinney, M., Duty, C. E., Kunc, V., & Compton, B. G. (2021). Linking thermoset ink rheology to the stability of 3D-printed structures. *Additive Manufacturing*, 37. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101621>
- Rueda, M. M., Auscher, M. C., Fulchiron, R., Périé, T., Martin, G., Sonntag, P., & Cassagnau, P. (2017). Rheology and applications of highly filled polymers: A review of current understanding. In *Progress in Polymer Science* (Vol. 66, pp. 22–53). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2016.12.007>
- Ruggiero, M. M., Lim, C. H., Giugliano, T. S., Choi, M., Cury, A. A. D. B., & Zhang, Y. (2025). Balancing strength and translucency: The role of microstructure in additive and subtractive dental zirconia. *Dental Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2025.03.310>
- Sadeq, M. S., & Abdo, M. A. (2021). Effect of iron oxide on the structural and optical properties of alumino-borate glasses. *Ceramics International*, 47(2), 2043–2049. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.09.036>

- Salopek, B., Krasi, D., & Filipovic, S. (1992). Measurement and application of Zeta-potential. *Rud. Geol. Naft. Zb.*, 4, 147–151.
- Santos, C., Baltazar, J., F.R.P. Alves, M., & Olhero, S. M. (2022). Development of translucent zirconia by robocasting. *Materials Letters*, 325. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132785>
- Schwab, A., Levato, R., D'Este, M., Piluso, S., Eglin, D., & Malda, J. (2020). Printability and Shape Fidelity of Bioinks in 3D Bioprinting. In *Chemical Reviews* (Vol. 120, Number 19, pp. 11028–11055). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00084>
- Shahmiri, R., Standard, O. C., Hart, J. N., & Sorrell, C. C. (2018). Optical properties of zirconia ceramics for esthetic dental restorations: A systematic review. In *Journal of Prosthetic Dentistry* (Vol. 119, Number 1, pp. 36–46). Mosby Inc. <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2017.07.009>
- Shojai, F., Pettersson, A. B. A., Mantyla, T., & Rosenholm, J. B. (2000). Electrostatic and electrosteric stabilization of aqueous slips of 3Y±ZrO₂ powder. *Journal of the European Ceramic Society*, 277–283.
- Singh, B. P., Menchavez, R., Takai, C., Fuji, M., & Takahashi, M. (2005). Stability of dispersions of colloidal alumina particles in aqueous suspensions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 291(1), 181–186. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.04.091>
- Smay, J. E., Cesarano, J., & Lewis, J. A. (2002). Colloidal inks for directed assembly of 3-D periodic structures. *Langmuir*, 18(14), 5429–5437. <https://doi.org/10.1021/la0257135>
- Solá-Ruíz, M. F., Rico-Coderch, A., Montiel-Company, J. M., Fons-Badal, C., Verdejo-Solá, B., & Agustín-Panadero, R. (2022). Influence of the chemical composition of monolithic zirconia on its optical and mechanical properties. Systematic review and metaregression. *Journal of Prosthodontic Research*, 66(2), 193–207. https://doi.org/10.2186/jpr.JPR_D_20_00218
- Stenkamp, V. S., & Berg, J. C. (1997). The Role of Long Tails in Steric Stabilization and Hydrodynamic Layer Thickness. *Langmuir*, 3827–3832. <https://pubs.acs.org/sharingguidelines>
- Strasser, T., Wertz, M., Koenig, A., Koetzs, T., & Rosentritt, M. (2023). Microstructure, composition, and flexural strength of different layers within zirconia materials with strength gradient. *Dental Materials*, 39(5), 463–468. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2023.03.012>
- Tabatabaian, F. (2018). Color in Zirconia-Based Restorations and Related Factors: A Literature Review. In *Journal of Prosthodontics* (Vol. 27, Number 2, pp. 201–211). Blackwell Publishing Inc. <https://doi.org/10.1111/jopr.12740>
- Tabatabaian, F. (2019). Color Aspect of Monolithic Zirconia Restorations: A Review of the Literature. In *Journal of Prosthodontics* (Vol. 28, Number 3, pp. 276–287). Blackwell Publishing Inc. <https://doi.org/10.1111/jopr.12906>

- Tanurdjaja, S., Tallon, C., Scales, P. J., & Franks, G. V. (2011). Influence of dispersant size on rheology of non-aqueous ceramic particle suspensions. *Advanced Powder Technology*, 22(4), 476–481. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2011.04.011>
- Tao, J., Chen, Z., Yu, S., & Liu, Z. (2017). Integration of Life Cycle Assessment with computer-aided product development by a feature-based approach. *Journal of Cleaner Production*, 143, 1144–1164. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.005>
- Teegen, I. S., Schadte, P., Wille, S., Adelung, R., Siebert, L., & Kern, M. (2023). Comparison of properties and cost efficiency of zirconia processed by DIW printing, casting and CAD/CAM-milling. *Dental Materials*, 39(7), 669–676. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2023.05.001>
- Test Methods for Determination of Water Absorption and Associated Properties by Vacuum Method for Pressed Ceramic Tiles and Glass Tiles and Boil Method for Extruded Ceramic Tiles and Non-tile Fired Ceramic Whiteware Products.* (2018). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/C0373-18>
- Theis, L., Duarte, V., Roque, J. C., Santos, T., & Martins, R. F. (2024). Additively Manufactured Zirconia for Dental Applications with In Situ Color Gradation Control. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 11(3), e1356–e1365. <https://doi.org/10.1089/3dp.2023.0006>
- Tiraferri, A., & Borkovec, M. (2015). Probing effects of polymer adsorption in colloidal particle suspensions by light scattering as relevant for the aquatic environment: An overview. *Science of the Total Environment*, 535, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.11.063>
- Travitzky, N., Bonet, A., Dermeik, B., Fey, T., Filbert-Demut, I., Schlier, L., Schlördt, T., & Greil, P. (2014). Additive manufacturing of ceramic-based materials. *Advanced Engineering Materials*, 16(6), 729–754. <https://doi.org/10.1002/adem.201400097>
- Trombetta, R., Inzana, J. A., Schwarz, E. M., Kates, S. L., & Awad, H. A. (2017). 3D Printing of Calcium Phosphate Ceramics for Bone Tissue Engineering and Drug Delivery. *Annals of Biomedical Engineering*, 45(1), 23–44. <https://doi.org/10.1007/s10439-016-1678-3>
- Tu, Y., Hassan, A., Siadat, A., & Yang, G. (2024). Study on influence of ink material properties on deposited filaments in direct ink writing based on numerical simulations. *Procedia CIRP*, 126, 698–703. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.08.291>
- Udofia, E. N., & Zhou, W. (2018). Microextrusion Based 3D Printing-A Review. *Proceedings of the 29th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference*, 2033–2060.
- Vafadar, A., Guzzomi, F., Rassau, A., & Hayward, K. (2021). Advances in metal additive manufacturing: A review of common processes, industrial applications, and current challenges. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 11, Number 3, pp. 1–33). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app11031213>

- Vardhaman, S., Borba, M., Kaizer, M. R., Kim, D. K., & Zhang, Y. (2025). Optical and Mechanical Properties of the Multi-Transition Zones of a Translucent Zirconia. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, 37(2), 525–532. <https://doi.org/10.1111/jerd.13319>
- Verwey, E. J. W. (1947). Theory of the stability of lyphobic colloids. *J. Phys. Chem.*, 51, 631–636. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/j150453a001>
- Viazzi, C., Bonino, J. P., Ansart, F., & Barnabé, A. (2008). Structural study of metastable tetragonal YSZ powders produced via a sol-gel route. *Journal of Alloys and Compounds*, 452(2), 377–383. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.10.155>
- Webber, J., Zorzi, J. E., Segadães, A. M., Mantas, P. Q., & Cruz, R. C. D. (2022). Understanding the electrosteric dispersion of α -alumina particles using a sulfonated tannin of natural origin. *Powder Technology*, 399. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117164>
- Wiederhorn, S. M. (1984). Brittle fracture and toughening mechanisms in ceramics. *Annual Review of Materials Science*, 14, 373–403. <https://doi.org/10.1146/annurev.ms.14.080184.002105>
- Woodcock, L. V. (1989). Predicting the Rheology of Complex Fluids. *Molecular Simulation*, 2(4–6), 253–279. <https://doi.org/10.1080/08927028908034605>
- Xu, C., Quinn, B., Lebel, L. L., Therriault, D., & L'espérance, G. (2019). Multi-Material Direct Ink Writing (DIW) for Complex 3D Metallic Structures with Removable Supports. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 11(8), 8499–8506. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b19986>
- Yakovlev, A., Balabanov, S., Permin, D., Ivanov, M., & Snetkov, I. (2020). Faraday rotation in erbium oxide based ceramics. *Optical Materials*, 101. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.109750>
- Yamamoto, T., Olssonb, M., & Hogmarkb, S. (1994). *Three-body abrasive wear of ceramic materials* (Vol. 174).
- Yarahmadi, M., Del Mazo-Barbara, L., Roa, J. J., Llanes, L., Giebra, M. P., & Fargas, G. (2025). Optimizing rheological characterization for extrusion-based additive manufacturing of Zirconia ceramic inks with varied Ytria content stabilization. *Journal of the European Ceramic Society*, 45(1). <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.116797>
- Yoon, H., Azimi Yancheshme, A., Butler, R., Palmese, G. R., & Alvarez, N. J. (2025). Minimizing defects in extrusion-based additive manufacturing through controlled filament spreading and overlapping. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 720. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.136879>
- Yoon, S. W., Shin, M. W., Lee, W. G., & Jang, H. (2012). Effect of surface contact conditions on the stick-slip behavior of brake friction material. *Wear*, 294–295, 305–312. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.07.011>

- Yoshimura, H. N., & Goldenstein, H. (2009). Light scattering in polycrystalline alumina with bi-dimensionally large surface grains. *Journal of the European Ceramic Society*, 29(2), 293–303. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.03.008>
- Yuk, H., & Zhao, X. (2018). A New 3D Printing Strategy by Harnessing Deformation, Instability, and Fracture of Viscoelastic Inks. *Advanced Materials*, 30(6). <https://doi.org/10.1002/adma.201704028>
- Yust, C. S., & Carignan, F. J. (1985). Observations on the sliding wear of ceramics. *ASLE Transactions*, 28(2), 245–252. <https://doi.org/10.1080/05698198508981618>
- Zhang, L., Zuo, W., Qian, T., Xu, W., Jiang, Z., & She, W. (2022). Viscosity transition from dilute to concentrated cementitious suspensions: the effect of colloidal interactions and flocs percolation. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 55(10). <https://doi.org/10.1617/s11527-022-02075-8>
- Zhang, Y. (2014a). Making yttria-stabilized tetragonal zirconia translucent. *Dental Materials*, 30(10), 1195–1203. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2014.08.375>
- Zhang, Y. (2014b). Making yttria-stabilized tetragonal zirconia translucent. *Dental Materials*, 30(10), 1195–1203. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2014.08.375>
- Zhang, Y., & Lawn, B. R. (2018). Novel Zirconia Materials in Dentistry. *Journal of Dental Research*, 97(2), 140–147. <https://doi.org/10.1177/0022034517737483>
- Zhao, J., Shen, Z., Si, W., & Wang, X. (2013). Bi-colored zirconia as dental restoration ceramics. *Ceramics International*, 39(8), 9277–9283. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.05.036>
- Zhou, H., Wang, X., Wang, X., Peng, C., Wang, R., & Zhou, K. (2021). Principles of dispersing powders for 3d printing. In *Colloids and Interfaces* (Vol. 5, Number 2). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/COLLOIDS5020025>
- Zocca, A., Colombo, P., Gomes, C. M., & Günster, J. (2015). Additive Manufacturing of Ceramics: Issues, Potentialities, and Opportunities. *Journal of the American Ceramic Society*, 98(7), 1983–2001. <https://doi.org/10.1111/jace.13700>