



MANUFATURA ADITIVA DE COMPONENTE CERÂMICO PARA DISPOSITIVOS DE ASSISTÊNCIA VENTRICULAR ATRAVÉS DE PROCESSO DE FUSÃO E DEPOSIÇÃO

Dias LCC, Bock EGP and Camargo IL*

* *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, Brasil*

Abstract. This article is a literature review aimed at exploring the feasibility of producing ceramic parts using a non-dedicated 3D printer (FDM - Fused and Deposition Modeling) for ceramic materials. It is inspired by the need to manufacture components of this material in Ventricular Assist Devices, thereby impacting the growing biomaterials market by providing a cost-effective alternative to established processes.

Keywords. *Manufatura aditiva, Impressão 3D, Cerâmica, Modelagem por Fusão e Deposição (FDM), Dispositivo de Assistência Ventricular (DAV).*

Introdução. As doenças cardiovasculares são a principal causa de morte no Brasil. Em 2021, a Covid-19 temporariamente ultrapassou essas doenças, resultando em 411 mil mortes, mas as enfermidades do coração e do sistema circulatório voltaram a ocupar o primeiro lugar. Segundo o relatório mais recente "Carga global de doenças e fatores de risco cardiovasculares", publicado em dezembro de 2023 no *Journal of the American College of Cardiology*, um grupo de 18 doenças cardiovasculares foi responsável por cerca de 400 mil mortes no Brasil em 2022, quase igualando o número de óbitos no pior ano da pandemia de Covid-19. Globalmente, esse número chegou a 19,8 milhões de mortes.

Os Dispositivos de Assistência Ventricular (DAV), frequentemente ligados à ideia de corações artificiais, são bombas que auxiliam na circulação sanguínea, podendo suportar o ventrículo esquerdo, o ventrículo direito ou ambos (MILLER, 2006). A função do DAV é aliviar o trabalho mecânico que o miocárdio do paciente precisa realizar. A Insuficiência Cardíaca (IC), uma síndrome clínica complexa com diversas causas e prognósticos, é a principal condição associada ao uso desses dispositivos (BACAL, SOUZA-NETO, FIORELLI, MEJIA, MARCONDES-BRAGA, & MANGINI, 2009) (DRIGO, 2018).

A maioria das pesquisas atuais sobre Dispositivos de Assistência Ventricular (DAVs) é focada em bombas centrífugas, que operam em rotações mais baixas do que as bombas axiais de fluxo contínuo. Essas bombas oferecem vantagens como menores taxas de hemólise, o que significa



menos danos aos componentes do sangue, dimensões adequadas para implante total, e uma vida útil estimada de até 02 anos em operação (NOSÉ, 1998) (NOSÉ, 1999; BOCK, 2007).

Por ser um dispositivo implantado no corpo humano, os componentes do DAV precisam ser biocompatíveis. Atualmente, a zircônia (ZrO_2) é o biomaterial com maior potencial para aplicações médicas. Essa cerâmica avançada se destaca por sua alta resistência à corrosão, desgaste e abrasão, sendo que, entre as diferentes formas de zircônia, a estabilizada com ítria apresenta as melhores propriedades (CHO et al., 2015; MANICONE, IOMMETTI, & RAFFAELLI, 2007). Em comparação com a alumina, a zircônia estabilizada com ítria possui melhor resistência a flexão, menor módulo de elasticidade e maior resistência à fratura (KELLY & DENRY, 2008). Essas características mecânicas e a biocompatibilidade tornam as cerâmicas ideais para uso nas peças rotativas dos DAV's.

Existem vários processos disponíveis para moldar peças cerâmicas, e a escolha entre eles depende principalmente de fatores econômicos, da geometria e das características desejadas do produto. Os métodos mais comuns incluem colagem, prensagem, extrusão e torneamento (ABCERAM, 2024). Com o aumento da demanda por peças cerâmicas personalizadas (ou em pequena escala) com geometrias complexas, como as que compõem os DAVs, a manufatura aditiva ganha destaque. Essa tecnologia oferece liberdade geométrica e a capacidade de produzir peças sem a necessidade de moldes (GALANTE; FIGUEREDO-PINA; SERRO, 2019; SCHWENTENWEIN; HOMA, 2015), o que reduz custos e prazos de entrega (LAKHDAR et al., 2021).

Manufatura aditiva ou impressão 3D é um conjunto de tecnologias que fabricam peças pela adição de materiais, geralmente camada por camada, a partir de um modelo 3D (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015; ISO, 2015). Manufatura aditiva é conhecida pela sua habilidade de produzir peças complexas (liberdade de projeto) e por reduzir significativamente o tempo e custos relacionados ao desenvolvimentos de produtos (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015; NGO et al., 2018). Por outro lado, a manufatura aditiva ainda apresenta desafios significativos relacionados à baixa disponibilidade de materiais adequados para aplicações diversas, propriedades mecânicas limitadas e anisotropia (NGO et al., 2018).

Em sua breve história, várias conceitualizações do fenômeno da manufatura aditiva foram utilizadas, empregando suas próprias terminologias, muitas vezes ambíguas e confusas. Alguns dos termos utilizados foram fabricação aditiva, processos aditivos, técnicas aditivas, manufatura aditiva por camadas, manufatura por camadas, fabricação de forma livre sólida, fabricação de forma livre, entre outros. Em 2015, a norma ISO/ASTM 52900 estabeleceu um quadro claro para a manufatura aditiva, definindo-a como o "processo de unir materiais para fazer peças a partir de dados de modelos 3D, geralmente camada por camada, em oposição às metodologias de manufatura subtrativa e formativa", e impressão 3D como a "fabricação de objetos através da deposição de um material usando uma cabeça de impressão, bocal ou outra tecnologia de impressão" (ISO/ASTM 52900, 2015). O processo envolvido na fabricação digital de uma peça é



conduzido em diferentes etapas dentro de um sistema, cujo núcleo é a própria máquina de impressão, onde ocorre o processo de construção com base na adição sucessiva de material na forma de camadas, que é precisamente o que distingue a manufatura aditiva das metodologias subtrativas e formativas. As ações anteriores são aquelas realizadas sobre os dados do modelo 3D em um software que permite que a peça sólida seja seccionada em planos sucessivos e calcule as trajetórias necessárias com base na carga dos parâmetros pelo operador. Após a impressão 3D, várias operações são realizadas que podem envolver modificações nas propriedades do material ou a finalização da geometria da peça.

A maneira particular como as várias técnicas aditivas resolvem o ciclo de construção aditiva caracteriza cada uma; portanto, o principal critério para categorizá-las é a metodologia tecnológica adotada, considerando os seguintes critérios (TRAVITZKY et al., 2014): de acordo com o tipo de elemento geométrico utilizado como módulo (ponto, linha e plano); caracterizando o material não tanto por sua composição, mas pelo seu estado e apresentação como entrada do processo (líquido, suspensão, pó, folha, pasta, filamento); e de acordo com o método utilizado para uni-lo (sinterização/fusão, polimerização, laminação, extrusão e deposição por injeção). A norma ISO/ASTM 52900 estabelece uma classificação geral, organizando o vasto universo da manufatura aditiva em sete categorias: I) jateamento de ligante: processo no qual um agente de ligação líquido é depositado seletivamente para unir materiais em pó; II) deposição de energia direta: processo no qual energia térmica focada é utilizada para fundir materiais por meio de fusão à medida que estão sendo depositados; III) extrusão de material: processo no qual o material é dispensado seletivamente através de um bocal ou orifício; IV) jateamento de material: processo no qual gotas de material de construção são depositadas seletivamente; V) fusão em leito de pó: processo no qual a energia térmica funde seletivamente regiões de um leito de pó; VI) laminação de folhas: processo no qual folhas de material são coladas para formar uma peça; e VII) fotopolimerização em cuba: processo no qual um fotopolímero líquido em uma cuba é curado seletivamente por polimerização ativada por luz. Dentro de cada categoria, a Tabela 4 mostra o segundo nível de classificação que responde às denominações que os fabricantes deram ao princípio operacional particular de seus equipamentos.

Peças de cerâmica podem ser produzidas por uma variedade de tecnologias de manufatura aditiva (GALANTE; FIGUEIREDO-PINA; SERRO, 2019) como jateamento de aglutinante, deposição de pastas, deposição de material fundido, fotopolimerização em cuba, etc. (CAMARGO; FORTULAN; COLORADO, 2022). Escolher o tipo de manufatura aditiva adotada deve levar em consideração os requisitos da aplicação e as características das tecnologias.

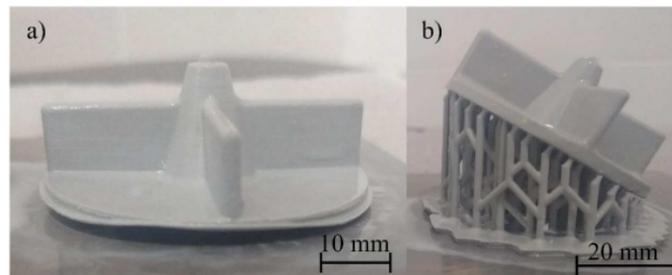
Os Professores Ítalo de Camargo e Eduardo Bock, ambos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, trabalharam em um experimento de construção de rotor cerâmico através de manufatura aditiva por fotopolimerização em cuba (CAMARGO; LOVO; ERBERELLI; BOCK; FORTULAN, 2022), normalmente utilizada para fabricar peças de cerâmica usando suspensões fotossensíveis de baixa viscosidade. Este processo de manufatura

aditiva se destaca pela resolução de impressão e qualidade de superfície na fabricação de cerâmicas.

A fabricação de um componente inspirado em um rotor de uma bomba centrífuga de sangue (seção transversal máxima de 1500 mm²) falhou, conforme mostrado na Figura 1a. A falha está associada ao desprendimento periódico entre a peça que está sendo fabricada e a superfície inferior da cuba, que introduz tensões e deformações indesejadas na peça que está sendo fabricada. Para reduzir as forças de desprendimento, a peça foi inclinada (30°), diminuindo significativamente a área máxima de uma seção e obtendo assim sucesso na impressão 3D do rotor (Fig. 1b).

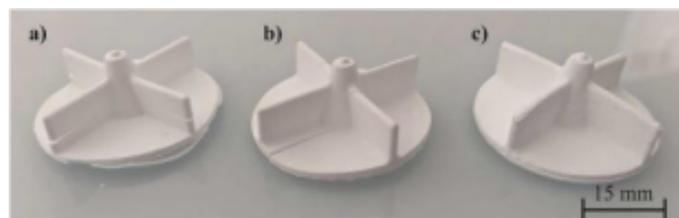
Os rotores de mulita sinterizada são mostrados na Figura 2. Ambas as peças fabricadas aditivamente apresentaram rachaduras e delaminação visíveis. Além disso, o rotor impresso em 3D com orientação inclinada apresentou distorção que pode ser devido à diferença de contração entre a direção do edifício e o plano de projeção, que é a anisotropia intrínseca desse processo em camadas.

Figura 1: Manufatura aditiva de mulita em diferentes configurações.



Fonte: CAMARGO, 2022

Figura 2: Rotores de mulita sinterizada



Fonte: CAMARGO, 2022



Concluimos portanto, que o processo de fotopolimerização em cuba apresentou problemas para peças com grandes seções transversais. Esse problema pode ser parcialmente resolvido girando a direção da construção. Essa abordagem permitiu que peças grandes fossem impressas em 3D sem defeitos visíveis, entretanto, trincas, delaminações e distorções foram observadas nas peças após a sinterização.

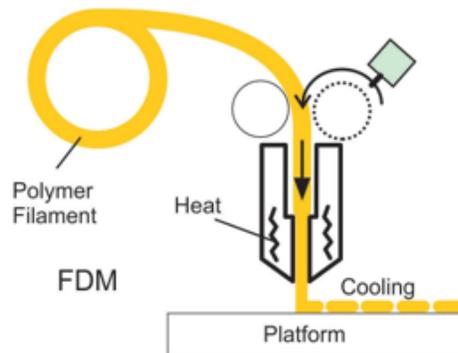
Diante disso, confecção do rotor através da modelagem por fusão e deposição se apresenta como uma alternativa para correção ou diminuição dos problemas encontrados no processo de fotopolimerização em cuba.

Metodologia. Princípio de operação da impressão 3D por extrusão de material: consiste na deposição seletiva de qualquer material no estado plástico através de um orifício, em uma plataforma que suporta a primeira camada, a qual se move automaticamente no espaço em relação ao bocal, em um sistema de coordenadas XYZ. O material é extrudado através do bocal com uma seção transversal circular e, quando depositado, adota uma seção transversal alongada, que pode ser descrita como um retângulo terminando em dois semicírculos para o cálculo de sua área, deformando-se contra a plataforma ou a camada inferior (Fig. 8). A altura do material depositado é fixada para cada camada pela separação no eixo Z, e o sólido formado pelo movimento translacional da seção de deposição é gerado pela trajetória do bocal graças à interpolação dos eixos X e Y. A largura da seção depositada está, sem dúvida, relacionada à proporção das velocidades de extrusão e de avanço em XY. O controle dessa relação é fundamental para garantir tanto a precisão dimensional geral quanto a espessura das paredes, bem como a constituição homogênea de uma camada pela correta adjacência das linhas depositadas. Enquanto as variáveis geométricas e cinemáticas do processo são definidas por parâmetros no momento da programação do processo e, portanto, podem ser executadas com precisão, o fluxo de extrusão varia dependendo das propriedades reológicas do material e de seu comportamento no dispositivo de extrusão. Para construir volume por extrusão de material usando filamentos de material depositado, a estratégia utilizada consiste em decompor a geometria em:

- Camadas horizontais: uma superfície é gradualmente formada depositando uma linha de filamento adjacente a outra, em forma de zigue-zague ou concêntrica, cuja altura total é um múltiplo da altura da camada;
- Paredes verticais: uma casca é gradualmente formada depositando continuamente linhas de filamento adjacentes ao longo dos perímetros externos ou internos; a espessura da casca é um múltiplo da largura do filamento;
- Estrutura de preenchimento: com vários padrões, tipicamente zigue-zague ou colmeia,

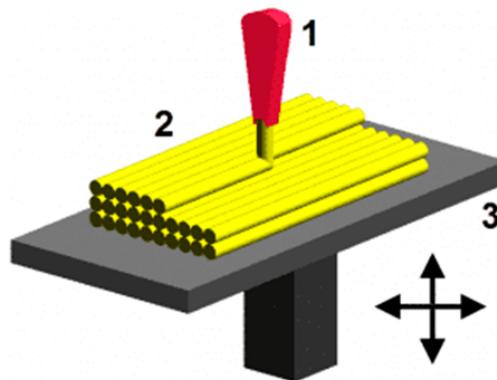
linhas não adjacentes são depositadas, exceto para partes completamente sólidas, que formam uma estrutura de grade de densidade programável.

Figura 3: Esquemático processo de modelagem por fusão e deposição.



Fonte: Adaptado de RUSCITTI, 2020

Figura 4: Esquemático processo FDM camada por camada



Fonte: Adaptado de 3DLAB, 2024

Em teoria, qualquer material que possa ser levado ao estado pastoso e depois endurecido por ação física ou química pode ser processado com esse princípio (VOLPATO, 2021). Cabe ressaltar que para cada material de extrusão é recomendado que uma temperatura de extrusão seja utilizada a fim de obter melhores acabamentos sejam obtidos (CUNICO, 2015).

Para o processamento de matérias cerâmicas devem ser incorporados na mistura diferentes aditivos de modo a conferir propriedades adequadas à pasta para proporcionar um processo de conformação eficiente. Só depois de escolhido o pó cerâmico a usar, e consoante a tecnologia de conformação a aplicar, é que se deve proceder à seleção dos aditivos.

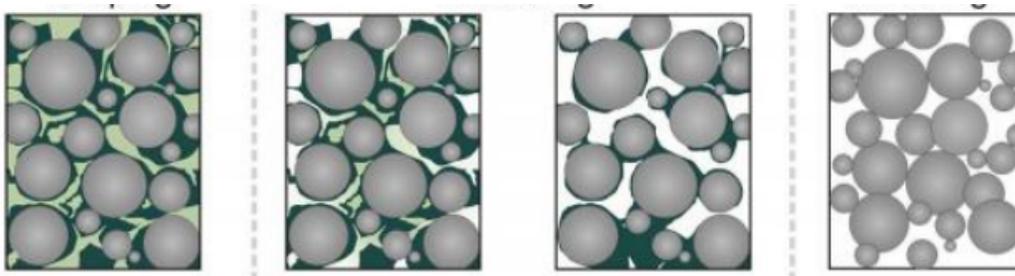
No que diz respeito ao ligante, pode dizer-se que este é um aditivo que confere resistência mecânica às peças conformadas (resistência em verde), permitindo manuseá-las sem que estas fracturem antes de ocorrer a sinterização. São normalmente moléculas poliméricas, sais ou partículas coloidais coaguladas que são adsorvidas no cerâmico e se ligam entre as partículas deste, modificando algumas das propriedades do sistema, como por exemplo: o molhamento das partículas cerâmicas; aumentando a viscosidade aparente; atuando como agente de suspensão, pois retardam a sedimentação das partículas (REED, 1995).

Alguns dos processos de fabricação aditiva não incorporam a capacidade de consolidar na totalidade as peças que vão originando, sendo necessário recorrer a etapas de consolidação indireta. Após a impressão da peça, esta encontra-se ainda em verde, bastante frágil e contém ainda um vasto conjunto de aditivos que anteriormente foram adicionados à pasta cerâmica.

A remoção de ligantes e outros aditivos deve ser realizada com eficácia, caso contrário as peças podem sofrer quebras, fissuras, distorção ou contaminação. Muitas vezes é imprescindível remover todos estes constituintes através de mais do que uma etapa, de forma a minimizar possíveis defeitos (GERMAN & BOSE, 1997). Assim, seguem-se duas etapas decisivas: o debinding e a sinterização.

O debinding ocorre assim que a peça cerâmica está contruída, por aumento de temperatura. Em primeiro lugar dá-se a remoção da água, a temperaturas inferiores a 100°C, e a partir de temperaturas entre os 200-300°C já é possível eliminar parte do ligante presente na mesma por evaporação ou degradação térmica (Figura 11; Tabela 4). Durante esta etapa também é pretendido que possíveis impurezas, tais como C e S, que normalmente se combinam com o oxigénio originando CO, CO₂ e SO₂ se difundam para o exterior.

Figura 5: Secagem e remoção de ligante



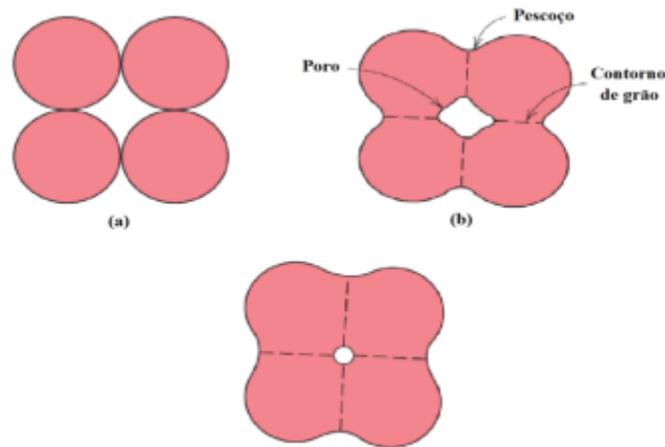
Fonte: Adaptado de LOTFZAREI, 2022

Antes de se dar a sinterização de uma peça, esta não apresenta baixa resistência mecânica, ou porque está em estado verde, ou porque previamente foi sujeita ao processo de debinding estando assim toda a estrutura fragilizada.

A sinterização é um processo complexo que depende do material a processar. No caso deste estudo, introduz-se o processo de sinterização em estado sólido, o processo presente na sinterização da alumina.

Este processo permite que as partículas de um dado material se liguem entre si por difusão no estado sólido, tal como ilustrado na Figura 22. Por norma, esta etapa conduz à densificação da peça cerâmica, aumentando também a resistência mecânica à corrosão, bem como a dureza.

Figura 6: Mudanças que ocorrem durante a queima em um pó compactado. a) partículas de pó após a prensagem. b) coalescência de partículas e formação de poros quando a sinterização começa. c) com o decorrer da sinterização, os poros mudam o tamanho e forma.



Fonte: FERNANDES, 2012

Toda a etapa de sinterização ocorre a altas temperaturas (GERMAN & BOSE, 1997), no entanto o ponto de fusão do cerâmico que se está a processar nunca é ultrapassado. Desta forma as partículas vão sendo forçadas a juntarem-se, por difusão, de modo a reduzir a energia de superfície do sistema. Depois, a difusão atômica vai ocorrer entre a superfície de contacto das partículas fazendo com que fiquem quimicamente ligadas entre si.

Assim sendo, ao longo da sinterização vão surgindo partículas com dimensões cada vez maiores, ficando reduzida a porosidade do cerâmico (Figura 13) (REED, 1995). Há, portanto, uma retração significativa da peça.



É de notar que todo o perfil de temperaturas durante a sinterização (velocidades de aquecimento e tempos nos patamares de temperatura) deve ser levado em conta e deve ser ajustado sempre que necessário, pois as variações de temperatura ao longo do ciclo de sinterização influenciam as propriedades da peça final (JORGE, 2008).

Resultados e Análises. A expectativa é que os resultados obtidos nos experimentos tenham validação do setor produtivo, pois desta forma, a impressão 3D não dependerá mais das custosas impressoras dedicadas para tal propósito, tornando a fabricação de componentes cerâmicos através da modelagem por fusão e deposição acessível a laboratórios e pequenos fabricantes de produtos cerâmicos. Tal processo poderá atender demandas de diversos setores da indústria e das áreas da saúde, entre outras. A tabela a seguir apresenta os impactos esperados por esse projeto, bem como as respectivas métricas de avaliação:

Impactos Esperados	Métrica de Avaliação
Manufatura de peças que seriam inviáveis por outros processos de fabricação	Peças fabricadas através do processo FDM
Conscientização do setor produtivo, por meio da apresentação dos resultados do projeto em feiras e eventos científicos, sobre a possibilidade do uso da impressão 3D na fabricação de componentes cerâmicos	Quantidade de projetos desenvolvidos em parceria com o setor produtivo.

Tabela 1 - Métrica de avaliação de impacto

Conclusão. A manufatura aditiva de peças cerâmicas por meio de impressora 3D não dedicada, utilizando a técnica de modelagem por deposição e fusão, revela-se como uma abordagem promissora e inovadora. Ao longo deste estudo, exploramos os desafios e as oportunidades associadas a essa metodologia, buscando compreender seu potencial e suas limitações.

Os resultados, caso positivos, podem indicar avanços significativos na capacidade de produzir peças cerâmicas complexas e personalizadas, destacando a versatilidade da impressão 3D nesse contexto.



Em suma, a manufatura aditiva de peças cerâmicas por meio de impressora 3D não dedicada, utilizando a técnica de modelagem por deposição e fusão, oferece uma perspectiva emocionante para o futuro. À medida que superamos desafios técnicos, aprimoramos os processos e expandimos a gama de materiais disponíveis, acredita-se que essa abordagem continuará a desempenhar um papel crucial na evolução da fabricação de peças cerâmicas, abrindo caminho para aplicações inovadoras e personalizadas.

Agradecimentos. Quero expressar minha profunda gratidão ao meu orientador, Eduardo Bock, e ao Co-orientador Ítalo Leite de Camargo pelas orientações valiosas, paciência e insights cruciais ao longo deste processo. A dedicação e expertise deles têm sido fundamentais para o desenvolvimento deste estudo.

Divulgação. Os autores deste trabalho asseguram, de maneira transparente e direta, que não há conflitos de interesse associados a esta pesquisa. Não existem ligações financeiras, pessoais ou profissionais que possam influenciar indevidamente a condução, interpretação ou apresentação dos resultados aqui expostos. Comprometemo-nos a preservar a integridade e a confiabilidade da pesquisa realizada, reafirmando nosso compromisso com a imparcialidade e transparência na divulgação dos resultados deste estudo.

Referências.

- (1) 3DLAB Soluções em Impressão 3D. “Impressora 3D Ender 3 S1”. Acessado em 28 de maio de 2024. <https://3dlab.com.br/produto/impressora-3d-ender-3-s1/>
- (2) BACAL, F., SOUZA-NETO, J. D., FIORELLI, A. I., MEJIA, J., MARCONDES-BRAGA, F. G., & MANGINI, S. (2009). II Diretriz Brasileira de Transplante Cardíaco. Arq Bras Cardiol, São Paulo.
- (3) BOCK, E. Engenharia de Materiais e Dispositivos de Assistência Ventricular. São Paulo: The Academic Society, 2020. Cap. 1, p. 1-7
- (4) BOCK, E. G., FONSECA, J., LEÃO, T., & ANDRADE, A. (2016). Left Ventricle Failure and Blood Flow Estimation for Centrifugal Blood Pumps. Journal of Mechanics Engineering and Automation, 6, pp. 162-166.
- (5) BOCK, E. G. (2021). Fifteen years of the first Brazilian Centrifugal Ventricular Assist Device for long term Mechanically Assisted Circulatory Support. The Academy Society Journal (TASJ), 5(1), 01-12. doi:doi.org/10.32640/tasj.2021.5.1



- (6) BOCK, E.G.P., ed.; *Bioengineering and Biomaterials in Ventricular Assist Devices: Bioceramics for VADs*, Boca Raton: CRC Press, 2021.
- (7) BOCK, E.G.P., Projeto, Construção e Testes de Desempenho “In Vitro” de uma Bomba de Sangue Centrífuga Implantável, Dissertação de Mestrado. UNICAMP, 2007.
- (8) BOCK, E., RIBEIRO, A., SILVA, M., ANTUNES, P., FONSECA, J., LEGENDRE, D., et al. (2008). New Centrifugal Blood Pump With Dual Impeller and Double Pivot Bearing System: Wear Evaluation in Bearing System, Performance Tests, and Preliminary Hemolysis Tests. *Artificial Organs*, 32(4), pp. 329-333.
- (9) CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 9. ed. [s.l.] John Wiley & Sons, 2013. KODAMA, H. Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. *Review of Scientific Instruments*, v. 52, n. 11, p. 1770–1773, 1981.
- (10) CAMARGO, I. L. DE et al. 3Y-TZP DLP additive manufacturing: solvent-free slurry development and characterization. *Materials Research*, v. 24, n. 2, p. e20200457, 2021b.
- (11) CAMARGO, I. L. DE et al. A review on the rheological behavior and formulations of ceramic suspensions for vat photopolymerization. *Ceramics International*, v. 47, n. 9, p. 11906–11921, 2021a.
- (12) CAMARGO, I. L. DE et al. DLP 3D Printer with Innovative Recoating System. [s.l.: s.n.]. v. 233
- (13) CAMARGO, I. L. DE; ERBERELI, R.; FORTULAN, C. A. Additive manufacturing of electrofused mullite slurry by digital light processing. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 41, n. 14, p. 7182–7188, jul. 2021.
- (14) CAMARGO, I. L. DE; FORTULAN, C. A.; COLORADO, H. A. A review on the ceramic additive manufacturing technologies and availability of equipment and materials. *Cerâmica*, v. 68, n. 387, p. 329–347, set. 2022.
- (15) CAMARGO, I. L. et al. Manufatura aditiva de mullita em impressora 3D comercial de baixo custo (Additive manufacturing of mullite in a low-cost commercial 3D printer). 65o Congresso Brasileiro de Cerâmica (65 CBC). *Anais...Águas de Lindóia*: 2022.
- (16) CAMARGO, I.L. DE; LOVO, J. F. P.; ERBERELI, R; BOCK, E.; FORTULAN, C. A., Fabrication of ceramics using photosensitive slurries: A comparison between UV-casting replication and vat photopolymerization 3D printing. *Processing and Application of Ceramics* 2022 16(2) 153–159. <https://doi.org/10.2298/PAC2202153C>
- (17) CARTER, C. B.; NORTON, M. G. *Ceramic Materials - Science and Engineering*. 2. ed. [s.l.] Springer-Verlag New York, 2013.
- (18) CUNICO, M. W. M. *Impressoras 3D: O novo Meio Produtivo: Tecnologias a base de fusão e deposição (extrusão)*. Curitiba: Concep3D, 2015.



- (19) DEHURTEVENT, M. et al. Stereolithography: A new method for processing dental ceramics by additive computer-aided manufacturing. *Dental Materials*, v. 33, n. 5, p. 477–485, 2017.
- (20) DEHURTEVENT, M. et al. Effect of build orientation on the manufacturing process and the properties of stereolithographic dental ceramics for crown frameworks. *The Journal of Prosthetic Dentistry*, v. 125, n. 3, p. 453–461, mar. 2021.
- (21) DENRY, I; KELLY, J. R., State of the art of zirconia for dental applications, *Dent. Mater.* 24 (2008) 299.
- (22) DIPTANSHU; MIAO, G.; MA, C. Vat photopolymerization 3D printing of ceramics: Effects of fine powder. *Manufacturing Letters*, v. 21, n. July, p. 20–23, 2019.
- (23) DRIGO, E. Nova abordagem na transmissão de energia transcutânea para dispositivos de assistência ventricular implantáveis. Tese de Doutorado - Programa de Medicina, Tecnologia e Intervenção em Cardiologia. Instituto Dante Pazzanese de Cardiologia – Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil, 2018.
- (24) FERNANDES, T. S. M. “Estudo da Estabilidade Térmica da Liga $\text{Ca}(\text{Nb}_{1/2}\text{Bi}_{1/2})_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3:(\text{B}_2\text{O}_3)_y$ para uso em Antena Ressoradora Dielétrica (DRA)”. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Teleinformática da Universidade Federal do Ceará, 2012.
- (25) FIORELLI, A. et al. Assistência circulatória mecânica: porque e quando. *Revista de Medicina da FMUSP*, São Paulo, vol.87(1) jan.-mar. 2008, p.1-15.
- (26) FILAMENT2PRINT. “Zetamix Zircônia Branca”. Acesso em 28 de maio de 2024. <https://filament2print.com/pt/metlicos-ceramicos/1462-zetamix-zirconia-branca.html#:~:text=A%20p%C3%B3s%20o%20debinding%20a%20pe%C3%A7a,1475%20%C2%BAC%20durante%20%20horas>
- (27) FORTELAB. “Fornos Combinados Debinding (extração de ligante) e Sinterização”. Acesso em 28 de maio de 2024. <https://www.fortelab.com.br/index.php/produtos/ceramica/fornos-combinados-debinding-extracao-de-ligante-e-sinterizacao>
- (28) GALANTE, R.; FIGUEIREDO-PINA, C. G.; SERRO, A. P. Additive manufacturing of ceramics for dental applications: A review. *Dental Materials*, v. 35, n. 6, p. 825–846, 2019.
- (29) GERMAN, R.; BOSE, A. (1997). *Injection molding of metals and ceramics*. Princeton, New Jersey: Metal Powder Industries Federation.
- (30) GIBSON, I.; ROSEN, D.; STUCKER, B. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. 2. ed. New York: Springer Science, 2015.
- (31) GUYTON, A. C.; HALL, J. E. *Tratado de fisiologia médica*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 9. ed., 1997, p. 421-430.



- (32)ISO/ASTM 52900, “Additive manufacturing, general principles, terminology”, ISO (2015).
- (33)JORGE, H. (2008) Compounding and Processing of a Water Soluble Binder for Powder Injection Moulding. PhD (Universidade do Minho, School of Engineering).
- (34)LAKHDAR, Y. et al. Additive manufacturing of advanced ceramic materials. Progress in Materials Science, v. 116, n. September 2020, p. 100736, 2021.
- (35)LOTFZAREI et al. Additive Manufacturing: Overview of Debinding Methods For Parts Manufactured Using Powder Material Extrusion, v. 61, n. 5 (january 2023), 103335. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103335>
- (36)LOPES JR., G. B., CABEZAS-GÓMEZ, L., BOCK, E. G., & GONÇALVES, J. C. (2021). Physiological Stress Modelling and Hemolysis Prediction for High Shear Stress Flows using Computacional Hemodynamics. Journal of Applied Fluid Mechanics (JAFM), 14(4), 1237-1248. <https://doi.org/10.47176/jafm.14.04.32211>
- (37)MANICONE, P. F.; ROSSI IOMMETTI, P.; RAFFAELLI, L. An overview of zirconia ceramics: Basic properties and clinical applications. Journal of Dentistry, v. 35, n. 11, p. 819–826, 2007.
- (38)MILLER, G. Artificial Organs (1^a ed.). Virginia: Morgan & Claypool, 2006
- (39)NGO, T. D. et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Composites Part B: Engineering, v. 143, n. December 2017, p. 172–196, 2018.
- (40)NOSÉ Y. Design and Development Strategy for the Rotary Blood Pump. Artif Organs 22:438-446, 1998. <https://doi.org/10.1046/j.1525-1594.1998.06098.x>
- (41)NOSÉ, Y. et al. Development of a Totally Implantable Biventricular Bypass Centrifugal Blood Pump System. Ann Thorac Surg, 68:775-9, 1999.
- (42)REED, J. (1995). Principles of ceramics processing. 2^a ed. New York: John Wiley. REIS, D. “Processamento avançado de materiais cerâmicos: Aplicação de alumina em robocasting”. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Química, apresentada ao Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2017.
- (43)ROCHA, J. A. (2017). Microusinagem de óxido de Zircônio pré-sinterizado e PEEK no desenvolvimento de Dispositivos de Assistência Ventricular. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Materiais e Processos de Fabricação, IFSP Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo. São Paulo, Brasil.
- (44)RUSCITTI, A.; TAPIA, C.; RENDTORFF, N.M. A review on additive manufacturing of ceramic materials based on extrusion processes of clay pastes. v. 66, n. 3 (2020), 354-366. <https://doi.org/10.1590/0366-69132020663802918>



- (45)STOETERAU, R. L. (2021). Tribology in Ceramic Biomaterials in Bioengineering and Biomaterials in Ventricular Assist Devices (1^a ed.). (T. & Group, Ed.) Boca Raton, Florida, EUA: CRC Press. doi: <https://doi.org/10.1201/9781003138358>
- (46)TRAVITZKY, N. et al. Additive manufacturing of ceramic-based materials. *Advanced Engineering Materials*, v. 16, n. 6, p. 729–754, 2014.
- (47)TRUER. “Tipos de Impressão 3D”. Acessado em 28 de maio de 2024. <https://am-material.com/pt/news/types-of-3d-printing/>
- (48)UEBELHART et al., Coração Artificial e Dispositivos de Assistência Circulatória no Brasil e no Mundo. *Sinergia*, v. 11, n. 2, p. 151-155, jul./dez., 2010, 151
- (49)UEBELHART, B., UTIYAMA, B., FONSECA, J., BOCK, E., LEME, J., SILVA, C., et al. (2013). Study of a centrifugal blood pump in a mock loop system. *Artificial Organs*, 37(11), pp. 946-949.
- (50)VOLPATO, N. *Manufatura aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D: Processos de AM por Extrusão de Material*. São Paulo: Edgard Blücher, 2017.
- (51)WEI, L. et al. A novel fabrication of yttria-stabilized-zirconia dense electrolyte for solid oxide fuel cells by 3D printing technique. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 44, n. 12, p. 6182–6191, 2019.
- (52)XING, B. et al. Dense 8 mol% yttria-stabilized zirconia electrolyte by DLP stereolithography. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 40, n. 4, p. 1418– 1423, 2020.
- (53)ZHENG, W. et al. Fabrication of high-performance silica-based ceramic cores through selective laser sintering combined with vacuum infiltration. *Additive Manufacturing*, v. 48, n. PA, p. 102396, 2021.

Authors ORCID

Leandro de Campos Carahyba Dias - orcid.org/0009-0000-1474-1035

Eduardo Guy Perpetuo Bock - orcid.org/0000-0003-3962-9052

Ítalo Leite de Camargo - orcid.org/0000-0001-8329-6799