

O CONFORMAÇÃO DE MATERIAIS CERÂMICOS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE IMPRESSÃO DIRETA DE TINTA NA MANUFATURA ADITIVA: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

BRUNA PASSOS DA SILVA¹, HUYRÁ ESTEVÃO DE ARAÚJO²

¹ Graduanda em Engenharia Mecânica, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Câmpus Piracicaba, brunapassosilva@gmail.com

² Professor Doutor, IFSP, Câmpus Piracicaba, huyraestevao@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.03.05.02-0 Materiais Cerâmicos

RESUMO: A habilidade de fabricar componentes cerâmicos com formas complexas tem sido extremamente desafiadora sem a impressão 3D. Essa revisão bibliográfica visa enaltecer os últimos avanços da manufatura aditiva das cerâmicas focando na técnica de impressão direta de tinta. Evidenciando a origem histórica e evolução da técnica relatada, seus principais aspectos, incluindo matéria prima, controle de processamento e características posteriores. Também foram discutidas as propriedades reológicas das pastas cerâmicas para a utilização dessa técnica.

PALAVRAS-CHAVE: Impressão 3D, Impressão direta de tinta, Reologia, Cerâmicas.

THE FORMING OF CERAMICS MATERIALS THROUGH DIRECT INK WRITING TECHNIQUE IN THE ADDITIVE MANUFACTURING: A REVIEW

ABSTRACT: The ability to fabricate ceramic components of arbitrarily complex shapes has been extremely challenging without 3D printing. This review focuses on the advances in the 3D printing of ceramics in the direct ink writing technique and presents the historical origins and evolution of the related technique. The main technical aspects, including feedstock properties, process control, post-treatments. Also, it was discussed the rheological properties for using this technique

KEYWORDS: 3D printing, Direct ink writing, rheology, ceramics

INTRODUÇÃO

Devido as suas propriedades variadas, as cerâmicas são usadas em vastas aplicações, as propriedades que faz esse grupo de material ser tão versátil, são sua alta força mecânica e dureza elevada, boa estabilidade térmica e química e performance viável em aplicações térmicas, óticas, elétricas e magnética. Componentes cerâmicos são, geralmente, fabricados em formatos desejados. O processamento se inicia na mistura de pó cerâmico com ligante ou outros aditivos, moldado através de prensagem seca ou molhada ou moldagem por camadas (*tape casting*), e então sinterizada em altas temperaturas para obter alta densificação (BENGISU, 2013).

O termo “fabricação aditiva” (FA), rapidamente ganhou atenção nas comunidades de ciência e engenharia (CHEN e colab., 2019). A FA é dita como o processo com capacidade de fabricar uma ampla gama de estruturas e geometrias complexas, tornando uma técnica de ponta cada vez mais aplicada a campos da engenharia, medicina e afins (WU e colab., 2019). A emergência da impressão 3D, também referida como manufatura aditiva, é considerada como a revolução manufatura. A impressão 3D é uma série de tecnologias, usada para fabricar partes físicas ponto por ponto, linha por linha, previamente projetados em algum software de desenho 3D (GIBSON e colab, 2014). Esse método de conformação permite a fabricação de estruturas muito elaboradas e complexas, com alto grau de precisão.

A introdução da impressão 3D, na manufatura de componentes cerâmicos, oferece novas possibilidades de conformação. Esse estudo visa através da revisão bibliográfica discutir a técnica de impressão direta de tinta (DIW) e a reologia adequada para esse tipo de processamento.

MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo constitui uma revisão bibliográfica de caráter analítico a respeito da impressão 3D de cerâmicas através da técnica de impressão direta de tinta e suas características reológicas. A coleta de dados foi realizada no período do primeiro semestre de 2020, e utilizou-se para a pesquisa as bases de dados Literatura Periódica da Capes (CAPES), Scientific Eletronic Library Online (SCIELO), Journal of American Ceramic Society e Elsevier. Foi definido como critério de inclusão: artigos publicados entre os anos de 1980 até 2019, pois estudos entorno da impressão 3D de cerâmicas datam a partir da década de 80. Todos os textos selecionados estão publicados em inglês.

Após a seleção dos artigos conforme os critérios de inclusão previamente definidos, foram seguidos, nessa ordem, os seguintes passos: leitura exploratória; leitura seletiva e escolha do material que se adequam aos objetivos e tema deste estudo; leitura analítica e análise dos textos, finalizando com a realização de leitura interpretativa e redação. Após estas etapas, constituiu-se um corpus do estudo agrupando os temas mais abordados nas seguintes categorias: Impressão 3D de cerâmicas, Técnica de impressão direta de tinta e reologia das pastas cerâmicas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Impressão 3D de cerâmicas

Os anos recentes vem sendo marcado pelo crescente avanço tecnológico através da disseminação de conhecimentos e experiências, que são constantemente trocados entre as pessoas ao redor do mundo, transição essa alavancada principalmente pelos avanços que a internet e desenvolvimento de softwares complexos possibilitaram. Adjunto a esse crescimento, mais especificamente aos anos 1980s, o termo adotado “fabricação aditiva”, rapidamente ganhou atenção nas comunidades de ciência e engenharia (CHEN e colab., 2019).

A manufatura aditiva é dita como o processo com capacidade de fabricar uma ampla gama de estruturas e geometrias complexas, tornando uma técnica de ponta cada vez mais aplicada a campos como engenharia de tecidos, eletrônica, softwares botânicos, armazenamento de energia e compósitos de alto desempenho (WU e colab., 2019). A manufatura aditiva (do inglês *Additive Manufacturing*), também conhecida como prototipagem rápida (do inglês *Rapid Prototyping*) ou impressão 3D, é uma técnica de fabricação na qual uma peça é produzida diretamente a partir de um modelo gerado por computador, adicionando material camada por camada de forma precisa e ordenada. (REVELO e COLORADO, 2018)

A introdução da impressão 3D, na manufatura de componentes cerâmicos, oferece novas possibilidades de conformação. A primeira manufatura aditiva de cerâmicas reportada, foi feita por Marcus e colaboradores e por Sachs e colaboradores na década de 90. Com os atuais avanços na ciência dos materiais e computacional, uma enorme variedade de técnicas de impressão 3D foram desenvolvidas para a manufatura de cerâmicas. Essas técnicas podem ser categorizadas como pasta-base, pó-base e massa sólida- base, como sumarizado na tabela 1 (CHEN e colaboradores, 2019).

A técnica de manufatura aditiva por pasta-base, geralmente, envolve sistemas líquidos ou semilíquidos disperso com finas partículas de cerâmica como matéria prima, podendo ser em formas de tintas ou pastas, dependendo da carga sólida e da viscosidade do material cerâmico (JACOBS, 1992).

A partir de inúmeros estudos, notou-se que para tornar possível a impressão, a pasta cerâmica deve possuir uma viscosidade baixa, tintas com baixa carga cerâmica (maior que 30% do volume total) para alta viscosidade e pastas com boa carga cerâmica (maior do que 60% do volume total) (GRIFFITH e colaboradores, 1996).

TABELA 1. Tecnologias utilizadas na impressão 3D de cerâmicas.

Modo de abastecimento	Tipo de impressão	Sigla
Pasta-base	Estereolitografia	SL
	Processamento de luz digital	DLP
	Polimerização de 2 fótons	TPP
	Impressão de tinta	IJP
	Impressão direta de tinta	DIW

	Impressão tridimensional	3DP
Pó-base	Sinterização por laser seletivo	SLS
	Fundição por laser seletivo	SLM
Massa sólida-base	Manufatura de objeto laminado	LOM
	Modelo de deposição fundida	FDM

A pasta contida pode ser impressa por fotopolimerização, impressão de tinta ou extrusão. Avanços na ciência de materiais têm tornado possível fotopolimerizar polímeros pré cerâmicos para transformá-los em cerâmica derivada de um polímero através de um tratamento térmico. As técnicas de stereolitografia (SL), Processamento de luz digital (DLP), Polimerização de 2 fótons (TPP), Impressão de tinta (IJP) e Impressão direta de tinta (DIW) utilizam desse conceito.

Técnica de Impressão direta de tinta

Impressão direta de tinta, também conhecida como moldagem por robôs, foi primeiramente patenteado por Cesarano e colaboradores no laboratório nacional de Sandia em 1997. A técnica foi originalmente desenvolvida pelo processamento de materiais concentrados como pastas cerâmicas com pouco material orgânico, previamente desenhado em um software de desenho 3D que é passado para uma máquina que utiliza como tinta a pasta cerâmica e cria, através de deposição, designs estruturais.

Para haver uma compreensão detalhada sobre a técnica, a explicação da DIW é centralizada no método de extrusão utilizando filamento com uma pasta de alta viscosidade em temperatura ambiente. A deposição é feita pela extrusão do material a partir de um bico que necessita ser muito mais largo que o da IJP graças a alta viscosidade do material extrudado. Objetos são contruídos, através do movimento do bico, ponto por ponto, linha por linha, camada por camada até que o objeto final se forme. Seguido então de secagem e sinterização, para se livrar dos compostos orgânicos. Na figura 6 há o diagrama esquemático do DIW.

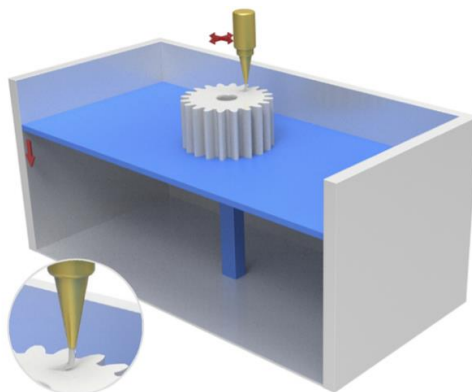


FIGURA 6- Diagrama esquemático do DIW

DIW possibilita um processo de manufatura rápido e barato comparado com as outras técnicas de impressão 3D. O uso de pastas semilíquidas permite a obtenção de formas complexas para alta carga sólida e propriedades viscoelásticas. Além disso, DIW possibilita fabricar estruturas independentes com boa qualidade, o que não é possível em qualquer outra técnica de impressão 3D de cerâmicas (HABIBOVIC e colaboradores, 2007). Uma enorme gama de estruturas pode ser criada usando essa técnica, como partes sólidas monolíticas (FEILDEN e colaboradores, 2016), materiais de estruturas complexas e porosas (LEWIS e colaboradores, 2006) e materiais compostos (EELSAYED e colaboradores, 2017). Além desses, componentes eletrônicos, bem como piezoelétricos e para outras aplicações nas engenharias foram fabricados através desse método.

Su e colaboradores (2013) foram os pioneiros em utilizar DIW para preparar eletrodos para baterias de íons de lítio. Altas densidades e energia foram alcançadas com a impressão, posterior, de um cátodo e ânodo. Mais recentemente, Liu e colaboradores (2017) reportaram o uso de baixa temperatura para a fabricação de LiFePO₄ eletrodos através da técnica DIW. Seus resultados mostraram performance satisfatória na impressão de eletrodos como resultado de uma impressão em baixa temperatura.

Sendo assim, A técnica de impressão direta de tinta é adequada para fabricação de cerâmicas de estruturas porosas, com baixa qualidade superficial e resolução. Nesse cenário, cerâmicas densas são difíceis de serem obtidas através dessa técnica de impressão, limitando assim sua aplicação.

Reologia das pastas cerâmicas para extrusão

Em comparação com outros métodos, o *DIW* depende da viscosidade das suspensões, bem como de sua reologia, controladas através do controle do fluxo e do material utilizado. Parâmetros como carga, tensões e fadiga suportada dependem das propriedades da pasta, mas também das condições de borda entre a pasta e equipamento de processamento (ÖZKAN, 1999). As pastas cerâmicas são materiais elasto-viscoplásticos e exibem uma complexidade relativamente alta, a principal característica do seu processamento é a sua vasta aplicação, ou o deslocamento do material provocado pela pressão transmitida pelas paredes rígidas.

Simulações computadorizadas podem providenciar informações para determinação dos parâmetros de processo e ajuda a otimizar a manufatura desses materiais. Essas simulações têm sido o método mais efetivo na formulação de pastas para facilitar o desenvolvimento e o controle exigido, além de determinar as deformações mecânicas envolvidas no processo.

Os efeitos dos parâmetros de processamento são detalhes durante o escoamento da pasta difíceis de serem investigados devido às suas interações complexas. Pasta de materiais particulados se comportam, com uma boa aproximação, aos fluidos viscoplásticos (KAYLON, 1993), o qual fluxo de volume e as propriedades interfaciais são semelhantes. Determinações corretas de mecanismos de deformação são possíveis quando o método de elementos finitos é aplicado para análise do processo de formação da pasta. Para examinar a validade das técnicas numéricas, é desejável investigar e estabilizar o comportamento de escoamento de volume e interfacial como compressão e configurações de perturbações (ADAMS, 1997).

A compreensão dos comportamentos de escoamento e comportamento dos materiais em pasta, a qual podem ser aplicadas em outras técnicas de processamento, foram mensuradas, preditas nos campos de escoamento e aplicadas. Para o sistema de pastas cerâmicas foi encontrado ótima concordância (ÖZKAN, 1999). A evolução da estrutura interna durante a deformação foi estudada em detalhes por ÖZKAN (1999). Além disso, o fluxo das amostras de pasta cerâmicas é fortemente influenciadas pelas condições de interface entre a pasta cerâmica e as paredes dos recipientes (BRISCOE e ÖZKAN, 1997).

CONCLUSÕES

Nas décadas recentes, desafios de pesquisa e necessidades industriais promoveram o surgimento massivo das aplicações cerâmicas na manufatura aditiva. Nesta revisão bibliográfica foi feita uma pesquisa precisa sobre as técnicas de impressão 3D tendo pasta como base para a fabricação de materiais cerâmicos pela técnica de impressão direta de tinta com complexidade estrutural impossíveis de serem obtidas no método tradicional, mostrando o devido potencial e valor da técnica apresentada além de discutir a reologia necessária da pasta cerâmica.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao instituto federal de São Paulo, campus Piracicaba

REFERÊNCIAS

ADAMS, M. J., AYDIN, I., BRISCOE, B. J., SINHA, S. K., A finite element analysis of the squeeze flow of an elastoviscoplastic paste material. *J. Non-Newtonian Mechanics*, 1997, 71, 41.

BENGISU, Murat *Engineering ceramics*, Springer Science & Business Media, 2013.

BRISCOE, B. J., ÖZKAN, N., Characterisation of ceramic pastes by an indentation hardness test. *J. Euro. Cer. Soc.*, 1997, 17, 1675±1683.

CHEN, Zhangwei e colab. 3D printing of ceramics: A review. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 39, n. 4, p. 661–687, 2019.

ELSAIED, Hamada; COLOMBO, Paolo; BERNARDO, Enrico. Direct ink writing of wollastonite-diopside glass-ceramic scaffolds from a silicone resin and engineered fillers. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 37, n. 13, p. 4187-4195, 2017.

FEILDEN, Ezra et al. Robocasting of structural ceramic parts with hydrogel inks. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 36, n. 10, p. 2525-2533, 2016.

GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent. Direct digital manufacturing. In: *Additive manufacturing technologies*. Springer, New York, NY, 2015. p. 375-397.

HORNE Richard. Universal Paste extruder - Ceramic, Food, and Real Chocolate 3D Printing, 2012. Disponível em: <<https://richrap.blogspot.com/2012/04/universal-paste-extruder-ceramic-food.html>>.

J.P. LI, P. HABIBOVIC, M. VAN DEN DOEL, C.E. WILSON, J.R. DE WIJIN, C.A. VAN BLITTERWISCH, K. DE GROOT. Bone ingrowth in porous titanium implants produced by 3D fiber deposition, *Biomaterials* 28 (18) (2007) 2810–2820.

KAYLON, D. M., YARAS, P., ARAL, B., YILMAZER, U., Rheological behaviour of a concentrated suspension. *J. Rheo.*, 1993, 37(1), 35.

LEWIS, Jennifer A. et al. Direct ink writing of three-dimensional ceramic structures. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 89, n. 12, p. 3599-3609, 2006.

ÖZKAN, Necati et al. Rheological analysis of ceramic pastes. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 19, n. 16, p. 2883-2891, 1999.

REVELO, Carlos F. e COLORADO, Henry A. 3D printing of kaolinite clay ceramics using the Direct Ink Writing (DIW) technique. *Ceramics International*, v. 44, n. 5, p. 5673–5682, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.12.219>>.

SUN, Ke et al. 3D printing of interdigitated Li-Ion microbattery architectures. *Advanced materials*, v. 25, n. 33, p. 4539-4543, 2013.

WU, Tao e colab. Additively manufacturing high-performance bismaleimide architectures with ultraviolet-assisted direct ink writing. *Materials and Design*, v. 180, p. 107947, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107947>>.