

Manufatura Aditiva de Cerâmica Utilizando Processamento de Luz Digital (DLP)

Letícia Bueno do Amaral, lbamaral@usp.br

Cíntia Rejane Consonni, cintiarconsonni@gmail.com

Jorge Luis Faneco Paschoa, jorge.paschoa@usp.br

Carlos Alberto Fortulan, cfortula@sc.usp.br

Jonas Carvalho, prjonas@sc.usp.br

Daniel Varela Magalhães, daneil@sc.usp.br

Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo,
Av. Trab. São Carlense, 400, São Carlos-SP, Brazil, 13565-090

Resumo: O processo de manufatura aditiva (AM) por fotopolimerização, em cuba, apresenta resolução dimensional superior aos demais processos de AM, no entanto, é mais disseminado e em maior escala os equipamentos capazes de produzir corpos em materiais poliméricos. Este trabalho objetiva o projeto de uma impressora por projeção (DLP), em manufatura aditiva, para impressão de peças cerâmicas. Foi desenvolvido um projeto de um equipamento e construído um protótipo de bancada onde o principal diferencial com relação às máquinas para polímeros está relacionada à viscosidade da matéria prima, que para cerâmicas, se assemelha a uma pasta. Foram desenvolvidas formulações poliméricas supersaturada em pó cerâmico. O protótipo foi validado inicialmente pela impressão de corpos sólidos e vazados em polímeros, em seguida pela impressão de resina supercarregada em cerâmica. Após impressão os corpos foram queimados para remoção da resina e sinterizados para consolidação do corpo cerâmico. Foram obtidas peças de zircônia de baixa porosidade utilizando misturas com concentração de até 50 % em volume de pó cerâmico. A projeção em camadas favorece a laminação em camadas, que para cerâmica o processo contínuo de movimentação do eixo z foi necessária.

Palavras Chaves: impressão 3D, fotopolimerização, manufatura aditiva de cerâmicas.

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (*Additive Manufacturing*) refere-se à fabricação tridimensional a partir de um desenho 3D pela montagem sequencial de camadas individuais do objeto (Schwentenwein, Homa, 2015). O processo de fabricação por manufatura aditiva é dado por etapas, primeiramente é obtido ou criado uma imagem computacional em 3D do componente, em seguida o modelo 3D é convertido no formato STL que é fatiado gerando-se imagens da seccionais de cada camada. Então, as camadas são construídas uma a uma iniciando por um suporte ou camada de adesão na plataforma, seguindo-se a construção das próximas camada subsequentemente. Em geral, a produção das camadas pode ser feita por: deposição de material; projeção de imagem em resina fotopolimerizável; sinterização de uma camada de pó; entre outros princípios. A motivação para o desenvolvimento de processos de fabricação para produtos individuais por AM é a redução do prazo entre projeto, teste e implementação (Zocca, et al., 2015). As tecnologias mais comuns de impressão 3D incluem os grupos de fotopolimerização, deposição de camada por fusão (FDM) e sinterização a laser (SLS).

Dos métodos de fotopolimerização onde é empregado resinas líquidas curáveis (polimerizáveis) por radiação, o Processo de Luz Digital (*Digital Light Processing - DLP*) tornou-se uma tecnologia mais acessível em comparação com outros processos de maior custo (Monzón, et al., 2017), além disso apresenta melhor resolução e velocidade de impressão cerca de 100 vezes mais rápida e assim apresenta potencial para a fabricação de objetos cerâmicos (Schwentenwein, Homa, 2015). Nesse processo é utilizado um projetor de imagem que emite luz com quantidade da banda ultravioleta suficiente para prover o processo de polimerização, a imagem do projetor é concentrada por um jogo de lentes que converge o feixe luz sobre a superfície da resina (Gibson, Rosen, Stucker, 2015) como mostra o esquema da Figura 1.

Para a manufatura aditiva de peças cerâmicas por DLP a matéria prima consiste na mistura de resina fotopolimerizável com supercarregamento de pó cerâmico que, após impressão, a resina solidificada é removida por queima e uma peça verde remanescente é submetida à sinterização em único de queimo.

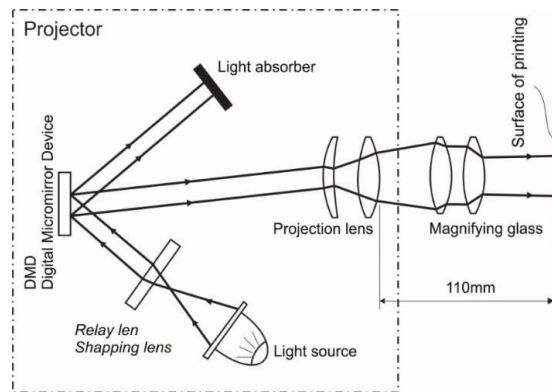


Figura 1. Esquemática do Processo de Luz Digital.

Fonte: OLMOS, *et al.*, 2017.

Este trabalho tem como objetivo a construção de uma impressora DLP 3D para fabricar peças de Zircônia e a realização de experimentos com formulação de resina/pó cerâmico com vistas para obtenção de peças com as regiões sólidas em alta densidade.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Desenvolveu-se um mecanismo de manufatura aditiva em cuba do tipo DLP com projeção de imagem por cima (top-down). Foi utilizado um projetor InFocus DLP, lentes convergentes, atuador linear THK KR33A, motor de passo, peças prototipadas (Figura 3), e para o sistema de controle foi usado uma placa Arduino Mega 2560, driver para motor de passo modelo TB6560, firmware de impressão 3D Marlin e software de fatiamento Creation Workshop. A montagem do mecanismo é apresentada na Figura 2.

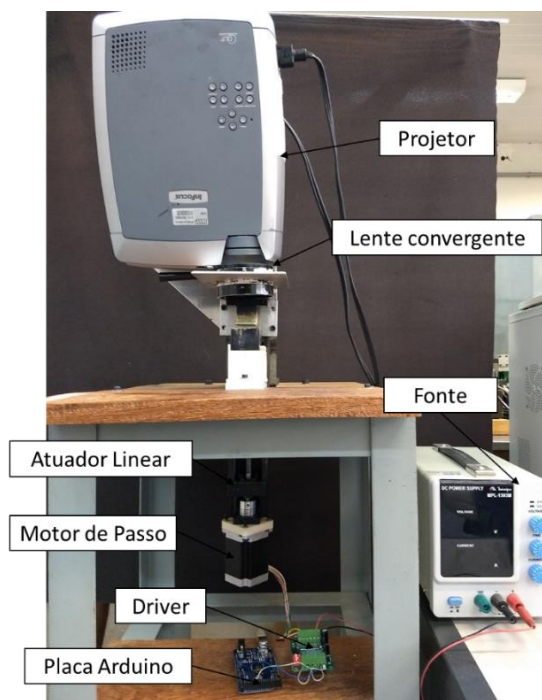


Figura 2. Banco experimental.

Fonte: O autor.

O processo de impressão utilizado é baseado no sistema top-down e consiste em introduzir a mistura de resina e pó cerâmico na cuba, dentro da cuba e nivelada nas bordas superiores se tem uma plataforma de construção que se desloca para baixo, adentro da cuba de forma que a resina emerge através de uma folga entre plataforma e cuba, a imagem da Figura 3a mostra o momento em que a pasta de resina com pó cerâmico emerge. Na sequência o material é espalhado para formar uma fina camada que é exposta à luz do projetor, Figura 3b mostra uma seção da peça sendo projetada. Continuamente, a base de construção desce e uma nova camada de material é distribuída sobre a anterior para ser polimerizada. Há ainda o conceito CLIP (*Continuous Liquid Interface Production*) onde o movimento da plataforma é contínuo com a exposição das seções ainda discreta. A Figura 3c mostra a peça sendo retirada da cuba, esta peça em questão é constituída apenas por resina este experimento foi realizado para validação do funcionamento do banco experimental. A etapa subsequente tratou da impressão, das peças de cerâmicas.

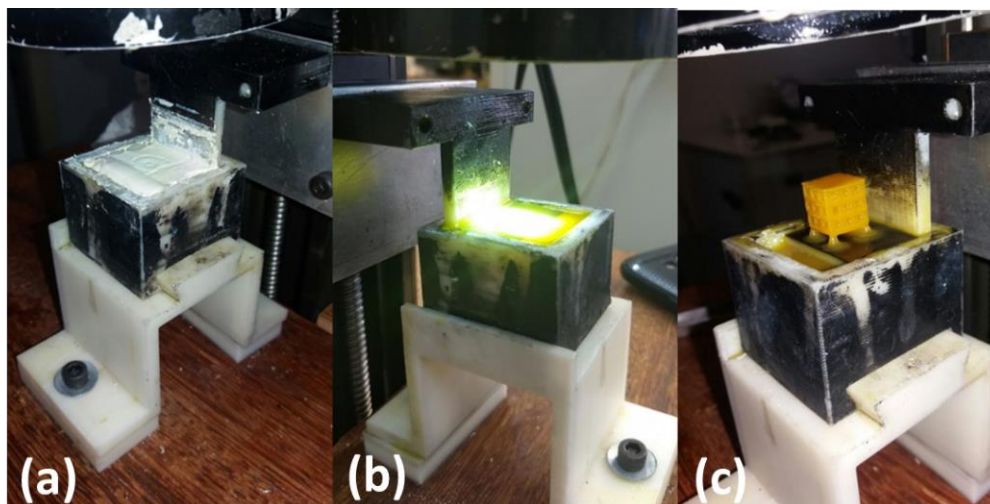


Figura 3. Processo de Manufatura Aditiva.

Fonte: O autor.

Foram realizadas diferentes composições da mistura de resina e pó cerâmico observando as que apresentaram melhor homogeneidade e boa viscosidade para o espalhamento de camada. As composições utilizadas foram obtidas variando a quantidade de zircônia com resina, na primeira parte do experimento utilizou-se a resina DELO PHOTOBOND, tipo PB437 e na sequência foi utilizada a resina LS 600. Percebeu-se a necessidade do uso de solventes devido a insolubilidade de altas concentrações de zircônia na resina, assim utilizou-se álcool isopropílico e n-metil-2-pirrolidona variando-se também as suas concentrações. Também foi estudado variações com a adição de PVB e PABA. A Tabela 1 mostra algumas das amostras que apresentaram melhores resultados.

Tabela 1. Concentrações das Amostras

Formulação	Concentração em porcentagem de volume			Quantidade em gramas	
	Zircônia	Resina DELO	Resina LS 600	Álcool Isopropílico	n-metil-2-pirrolidona
A	50	50	-	-	2,4
B	50	-	50	-	1,2
C	50	-	50	1,5	-
D	50	-	50	1,7	-

Fonte: O autor.

Depois de polimerizado o conjunto de amostras das misturas realizadas foi levado para a estufa por onde permaneceram por 6h à 60°C, 12h à 80°C e por fim, 12h à 100°C. Após esta etapa as amostras foram sinterizadas com uma rampa de 1°C/min até 150°C; 1,5°C/min de 150°C à 600°C; 5°C/min de 600°C à 900°C e 6°C/min de 900° à 1500°C sendo mantido neste patamar por 1h; por fim, o aquecimento do forno foi desligado e as peças se esfriaram naturalmente dentro do forno.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As misturas com 50% (em volume) de zircônia, com a resina LS 600 e que usaram o n-metil-2-pirrolidona como solvente apresentaram melhor homogeneidade e facilidade de espalhamento sobre o eixo de impressão.

As amostras com PABA e PVB não apresentaram boa aparência após a queima, foi observado bolhas em sua superfície e houve fragmentação do interior das amostras.

A macro e microestrutura da suspensão que continha apenas zircônia com o solvente e a resina foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Nesta análise, foi estudado a seção transversal e longitudinal do interior das peças. Para tal, selecionou-se as amostras que apresentaram melhor aspecto após a sinterização indicadas na Tabela 1, e estas foram preparadas com lixamento, polimento e também com ataque térmico.

As imagens da micrografia das amostras revelam que as misturas feitas com a resina LS 600 apresentaram menor porosidade e com poros menores, a Figura 4 mostra a comparação entre as amostras A e B sendo a Figura 4a representante da formulação A (resina DELO PHOTOBOND) e a Figura 4b da formulação B (resina LS 600), ambas usando como o solvente a n-metil-2-pirrolidona.

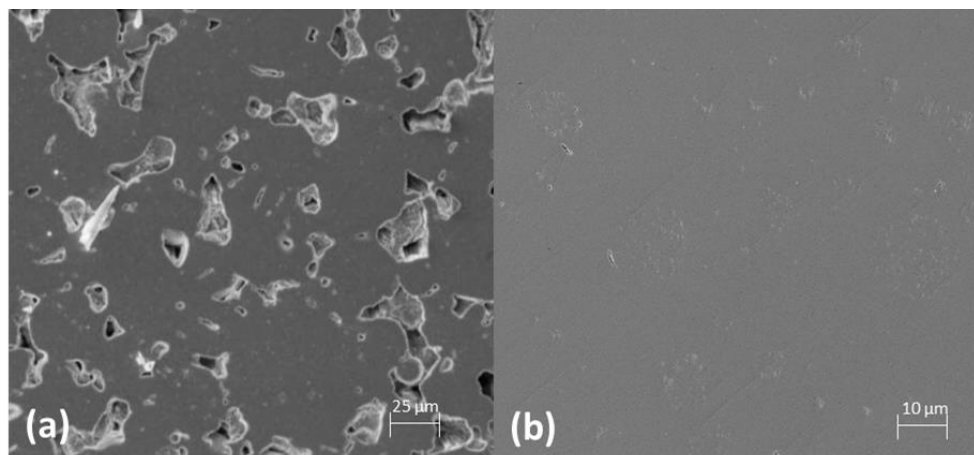


Figura 4. Micrografia com ampliação de 1000x, em (a) formulação A e em (b) formulação B.

Fonte: O autor.

Analisando as imagens da superfície transversal das amostras notou-se a presença de trincas menores e em menor concentração nas amostras em que foi utilizado a n-metil-2-pirrolidona como solvente. A Figura 5 mostra a comparação entre as duas imagens, além disso nessas imagens pode ser observado a morfologia da superfície lateral das amostras que revela as camadas da manufatura aditiva.

Com o MEV também foi possível observar os grãos de zircônia com uma ampliação de vinte mil vezes como pode ser observado na Figura 6.

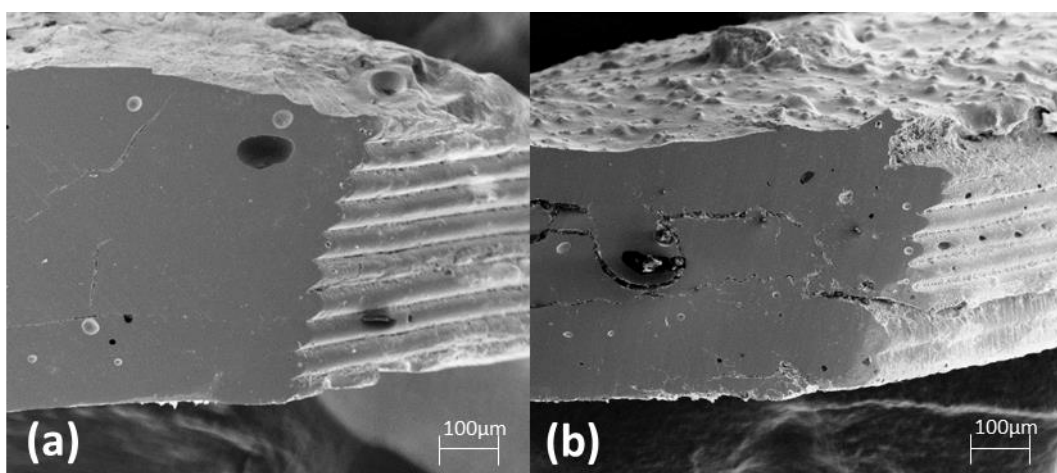


Figura 5. Micrografia com ampliação de 119x, a esquerda com n-metil-2-pirrolidona e a direita com álcool isopropílico como solvente utilizado.

Fonte: O autor.

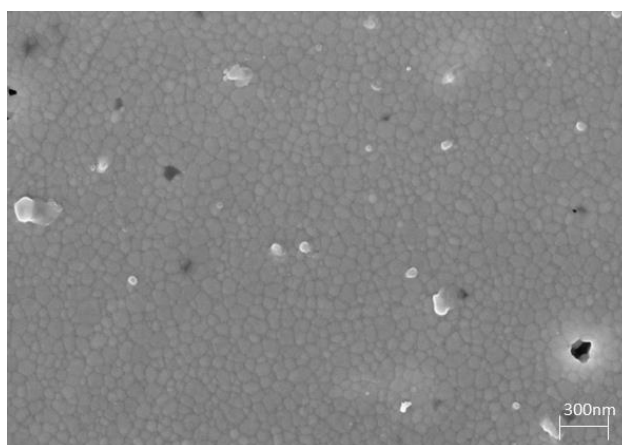


Figura 6. Micrografia com ampliação 20000x de ampliação.

Fonte: O autor.

Foi feito também uma imagem da grade 2D (Figura 7a) para avaliação superficial, a imagem permite observar a precisão da impressão, ou seja, locais em que ocorreu a polimerização da resina por dispersão da luz. Estas regiões encontram-se nas arestas dos furos internos da grade, as quais tornaram-se arredondadas. Observa-se também uma superfície irregular e com provável presença de produtos da degradação da resina (pontos brancos). Um corpo cilíndrico (Figura 7b) foi obtido com a formulação A utilizando o acionamento contínuo da plataforma de impressão (CLIP) onde não foi observado o processo de laminação das camadas

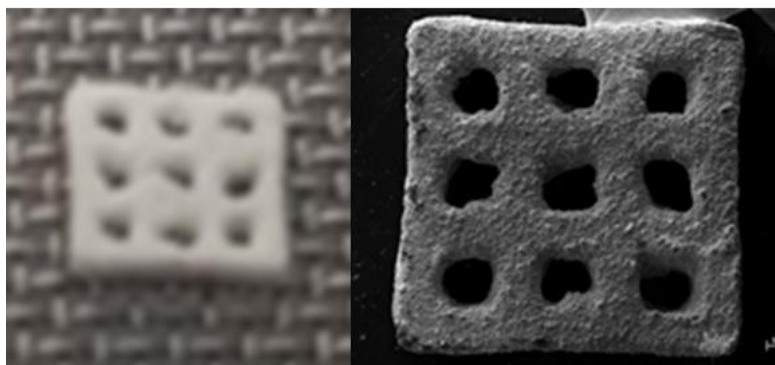


Figura 7. Imagens da a grade e MEV à 50x.

Fonte: O autor.



Figura 7. Imagens dos cilindros e MEV.

Fonte: O autor.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvido um protótipo de impressora 3D DLP para a fabricação de peças de zircônia, para isso foram experimentadas várias amostras variando a quantidade de zircônia com resina e aditivos. Assim este trabalho permitiu desbravar a manufatura aditiva cerâmica por DLP, e possibilitou a fabricação de peças de zircônia com ausência pronunciada de trincas, bolhas, laminações e grandes deformações. Estes resultados motivam o estudo da fabricação de peças cerâmicas com impressão 3D bem como testes com outros tipos de resinas e materiais cerâmicos para melhorar as propriedades, e também avaliar o tempo de cura da camada e o tamanho da camada na qualidade do material produzido.

5. REFERÊNCIA

- Schwentenwein, M.; Homa, J., 2015, "Additive manufacturing of dense alumina ceramics." *International Journal of Applied Ceramic Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 1–7.
- Zocca, A.; Colombo, P.; Gomes, C. M.; Günster, J., 2015, "Additive Manufacturing of Ceramics: Issues, Potentialities, and Opportunities." *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 98, no. 7, pp. 1983–2001.
- Monzón, M.; Ortega, Z.; Hernández, A.; PAZ, R.; ORTEGA F., 2017, "Anisotropy of photopolymer parts made by digital light processing." *Materials (Basel)*, vol. 10, no. 1, pp. 1–15.
- Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B., 2015, "Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing." 2. ed. [s.l.] Springer.
- Olmos, L. G.; Lovo, J. F. P.; Camargo, I. L.; Consonni, C. R.; Fortulan, C. A., 2017, "3D DLP Additive Manufacturing: Printer And Validation." 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, December 3-8, Curitiba, PR, Brazil.

CERAMIC ADDITIVE MANUFACTURING USING DIGITAL LIGHT PROCESSING (DLP)

Letícia Bueno do Amaral, lbamaral@usp.br
Cíntia Rejane Consonni, cintiarconsonni@gmail.com
Jorge Luis Faneco Paschoa, jorge.paschoa@usp.br
Carlos Alberto Fortulan, cfortula@sc.usp.br
Jonas Carvalho, prjonas@sc.usp.br
Daniel Varela Magalhães, daneil@sc.usp.br

Department of Mechanical Engineering, Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, Av. Trab. Saocarlene, 400, São Carlos-SP, Brazil, 13565-090

Abstract. *The additive manufacturing process (AM) by vat photopolymerization presents higher dimensional resolution than the other AM processes, However it is greater dissemination and larger scale to the equipment capable of producing bodies in polymeric materials. This work aims to design a projector 3D printer (DLP) in additive manufacture, for the printing of ceramics. It was developed a project of an equipment and built a prototype bench where the main differential with respect to the machines for polymers is related to the viscosity of the raw material, which for ceramics, it resembles a paste. Polymeric supersaturated ceramic powder formulations have been developed. The prototype was initially validated by the printing of solid bodies and cast bodies in polymers, followed by the impression of supercharged resin in ceramic. After printing, the bodies were burned for resin removal and sintered for consolidation of the ceramic body. Low porosity zirconia pieces were obtained using mixtures with a concentration of up to 50% by volume of ceramic powder. The projection in layers favors lamination in layers, which for ceramics the continuous process of movement of the z axis was necessary*

Keywords: 3D printing, photopolymerization, additive manufacture of ceramics.