

ESTUDO DA VIABILIDADE DA MANUFATURA ADITIVA DIRETA DE MULITA POR LASER ENGINEERED NET SHAPING (LENS)

Thiago Calabreze de Azevedo

Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP. Trabalhador São Carlense, 400. São Carlos, SP. Brasil
azevedo.thiago@usp.br

Italo Leite de Camargo

Instituto Federal de São Paulo – IFSP. Primeiro de Maio, 500. Itaquaquecetuba, SP, Brasil
Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP. Trabalhador São Carlense, 400. São Carlos, SP. Brasil
italo.camargo@ifsp.edu.br

Johan Sebastian Grass Nuñez

Fabio Edson Mariani

Reginaldo Teixeira Coelho

Carlos Alberto Fortulan

Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP. Trabalhador São Carlense, 400. São Carlos, SP. Brasil
jsgrassn@usp.br
mariani.fabio@usp.br
rtcoelho@sc.usp.br
fortulan@usp.br

Resumo. O processo de manufatura aditiva direta de materiais cerâmicos tem sido amplamente estudado nos últimos anos devido às características únicas obtidas nas peças fabricadas por meio deste processo, como fabricação de geometrias complexas, flexibilidade de produção em baixa escala e economia de material. Contudo, muitos desafios ainda limitam a utilização comercial deste processo, visto que ainda é difícil fabricar peças densas, com baixa porosidade e isentas de trincas, fatores estes fundamentais para o desempenho mecânico do material em serviço. As relações entre os parâmetros de processo e as propriedades da peça são fundamentais para tornar o resultado do processo previsível. Desta forma, propõe-se o estudo preliminar do processo de manufatura aditiva direta de mulita por laser engineered net shaping (LENS). Um agregado de mulita preparado foi exposto a luz de laser onde obteve-se a densidade do cordão por meio de ensaio de imersão e, além disto, é apresentado o comportamento e padrão geométricos das peças fabricadas. O resultado obtido é considerado satisfatório, sendo que foi possível obter densidade relativa de 91% no núcleo do material fundido, referente à potência aplicada de 350 W na amostra de agregado de mulita preparada com concentração de 8% de ácido fosfórico.

Palavras chave: Laser Engineered Net Shaping. Mulita. Manufatura Aditiva. Densidade. Parâmetros de Processo.

1. INTRODUÇÃO

Mulita é um aluminossilicato amplamente utilizado na produção de cerâmicas tradicionais e avançadas devido às suas excelentes propriedades, onde se destacam: alta estabilidade térmica, resistência à fluência, corrosão e choque térmico, baixos coeficientes de expansão térmica e de condutividade, associadas a propriedades mecânicas aceitáveis de resistência e tenacidade à fratura. A Mulita é aplicada em vários segmentos da indústria em produtos tradicionais como porcelanas e estruturas refratárias e em cerâmicas avançadas como envoltório eletrônico, equipamentos óticos, filtros e trocadores de calor (Kalita et al., 2013; Krenzel et al., 2019). Em geral a formulação de mulita é produzida em relação à proporção de alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2) na mistura, sendo utilizado para fins técnicos composições de 72 – 77% (m/m) de Al_2O_3 na composição sólida, cujo limite inferior e superior, respectivamente, são chamados de mulita 3/2 ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) e mulita 2/1 ($2Al_2O_3 \cdot SiO_2$) (Schneider; Schreuer; Hildmann, 2008; Schneider; Fischer; Schreuer, 2015).

Nos últimos cinco anos surgiram trabalhos que utilizam a Manufatura Aditiva (MA) para fabricação de mulita (Chen et al., 2018; Gorjan et al., 2019; Huo et al., 2020; Lee et al., 2017; Schmidt et al., 2019). Manufatura aditiva tem sido considerada uma técnica promissora para fabricação de peças cerâmicas devido às suas vantagens em relação aos processos convencionais, tais como menor tempo de preparação de processo (Niu et al., 2018), flexibilidade de design de peças com geometrias complexas e minimização de resíduo e perda de matéria prima (Li et al., 2017; Niu et al., 2014). A MA pode ser dividida entre os modos diretos e indiretos de fabricação, e tal divisão está relacionada com a forma do material processado. A fabricação por via direta é realizado com pó puro e a sinterização do material ocorre durante a deposição, enquanto a fabricação por via indireta é realizada com uma mistura entre o material cerâmico e substâncias

aglutinantes, sendo necessário realizar etapas de pós-processamento para eliminação dos aglutinantes e a sinterização da peça verde (Camargo et al., 2020; Niu et al., 2015).

A MA via método direto pode ser realizada pelas técnicas *powder bed fusion* (PBF) e *laser engineered net shaping* (LENS). O princípio de funcionamento da técnica PBF é promover a fusão do pó cerâmico através do direcionamento de um feixe de laser em uma cama bidimensional de pó, sendo a geometria da peça modelada pela trajetória do laser. Após a conclusão do percurso do laser, outra camada de pó é depositada e fundida (aderida) sobre a anterior, de maneira sucessiva até o fim da fabricação. A outra opção de fabricação por metodologia direta é a utilização da técnica LENS, cujo princípio de fabricação baseia-se na simultaneidade entre a aplicação do pó e a fusão do material, isto é, realiza-se a sinterização do pó concomitante com sua deposição.

Em geral, a fabricação de corpos cerâmicos pelos métodos diretos geram produtos mais densos e puros, mas os processos são muito desafiadores devido à fragilidade intrínseca da cerâmica e aos elevados gradientes térmicos ocasionados pela fonte de energia focalizada que tendem a originar trincas.

Neste artigo, propõe-se utilizar um método de fabricação parcial e preliminar com a técnica LENS, sendo distinto desta pela diferença em relação ao alvo do feixe de laser, sendo este, sobre a superfície de um agregado sólido de sílica endurecido pela adição de ácido fosfórico, sílica amorfa e água, sobre os quais foram variados potência de incidência do feixe de laser. Desta forma, permite-se iniciar o teste de parâmetros de processo sem depender de que o pó apresente a fluidez exigida pelo processo (Camargo; Erbereli; Fortulan, 2019). Assim, o presente trabalho procura estabelecer premissas (*setup*) de equipamento/material para trabalhos futuros de fabricação cerâmica por LENS com pó em deposição com fluxo contínuo.

2. METODOLOGIA

O trabalho trata de um estudo preliminar de viabilidade e ajustes de potência pela técnica LENS, utilizando o equipamento de manufatura aditiva *BeAM Modulo 250 (AddUp)*. Nesta fase experimental foi idealizado a aplicação do laser sobre um compactado do pó de mulita como base de impressão para não ocorrer o espalhamento do pó pelo fluxos de gases *nozzle* (3 l/min) e *shield* (6 l/min), utilizados para proteção do laser e da poça de fusão. A Fig. 1, ilustra esquematicamente o experimento.

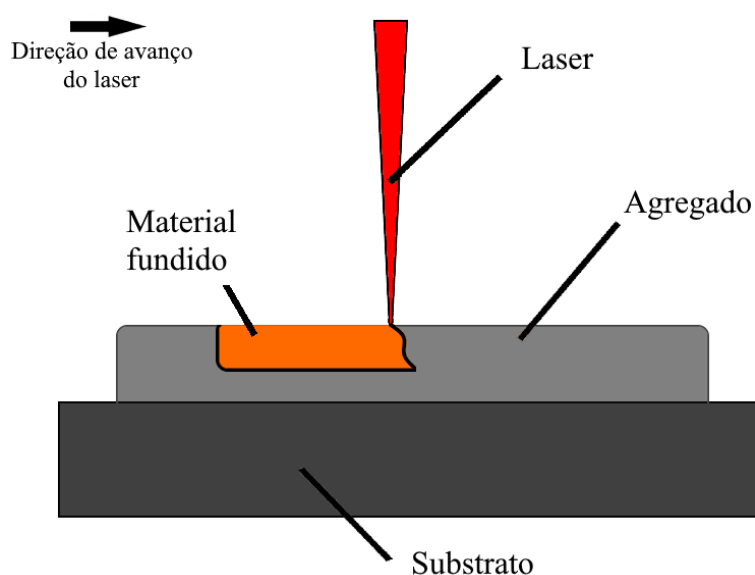


Figura 1: Desenho esquemático do processo de deposição

Considerando ainda que o processo de MA pela técnica de LENS é realizado com a dispensação de alta taxa de energia e que as cerâmicas em geral apresentam alta fragilidade quando submetidas a choque térmico, foram selecionadas para este estudo mulita eletro-fundida (*Elfusa MUB mesh # 35 –70*), por ser um material refratário de baixa expansão térmica porém com alta temperatura de fusão, respectivamente, $4,5 \times 10^{-6} \text{ m/m } ^\circ\text{C}^{-1}$ e 1800°C (Hosseinzadeh; Akbari; Bashiri, 2015), assim, um material que tecnicamente apresenta maior viabilidade exploratória da fabricação pela técnica. A sílica amorfa em estado de gel (10% de sólido) (*Daicel*), assim como o Ácido Fosfórico (PA) (*Synth*) e a água (temporária) tiveram a função de fornecer um estado de adesão entre as partículas no estado pré-laser, eliminando a participação de orgânicos no agregado que desenvolveriam gases durante a aplicação da energia laser.

A seleção dos agregados, planejamento de trilhas de trajetória e potência do laser são ilustrados pela Fig. 2a. Os agregados de mulita eletro-fundida foram preparados em solução aquosa de pó cerâmico e ácido fosfórico, sendo divididos

em duas amostras com variações de concentração de sílica amorfa e ácido, sendo submetidas à compactação em mesa vibratória por três minutos, aquecidas em estufa por 24 horas à temperatura de 80°C e por mais 24 horas em uma segunda etapa de aquecimento à temperatura de 120°C. A Tab. 1. apresenta as formulações das amostras experimentadas.

Tabela 1: composição dos agregados de mulita e propriedades do pó

Formulação	Mulita [g]	Sílica amorfa gel (10%) [g]	Ácido fosfórico [g]	Água [g]	Densidade [g/cm ³]
1	149,99	0	12,02	47,46	3,13 ^(a)
2	149,99	45,00	7,51	73,32	3,20

^(a) Medido em picnômetro de gás hélio *AccuPyc™ 1330* (Micromeritics)

As amostras secas foram submetidas ao processamento por LENS com incidência de passe único de laser, variando-se a potência aplicada ao longo de diferentes regiões do agregado, formando assim, os cordões de material processado. A velocidade de avanço do cabeçote foi mantida em 150 [mm/min] ao longo de todo o experimento. Na Fig. 2, são apresentadas as potências aplicadas para formação dos cordões nas formulações (1) e (2), onde, para cada valor de potência o experimento foi realizado em duplicata. A potência de incidência do laser foi variada entre os valores de 250 W, 350 W e 450 W, sendo estes valores adotados de acordo com padrões utilizados nos trabalhos citados por Camargo et al. (2020) em processos de LENS em alumina.

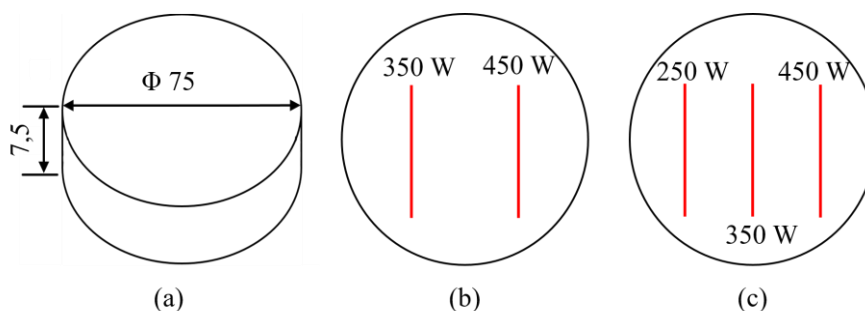


Figura 2: Agregado de mulita e cordões produzidos em passe único de laser, em (a) representação geométrica e dimensional do agregado, em (b) passes na formulação (1) e em (c) passes na formulação (2).

A extração dos cordões foi realizada mecanicamente com uma espátula, separando o material fundido pelo foco de laser do restante do pó verde. O material apresentou um padrão de solidificação característico, sendo analisado geometricamente através do *software ImageJ* e por medidas de paquímetro digital (*Capiler*) com resolução de 0,1 mm. As medidas realizadas são apresentadas, em corte transversal, pela Fig. 3.

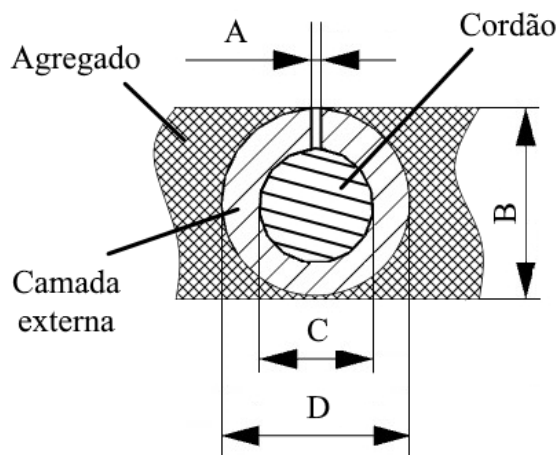


Figura 3: Padrão geométrico dos cordões produzidos durante o processo e dimensões avaliadas

Por fim, as peças foram submetidas ao ensaio de densidade e porosidade por imersão, baseado no princípio de Arquimedes. O ensaio consiste em medir a massa das peças em três diferentes cenários, sendo estes, respectivamente, peça seca, imersa e úmida. Água deionizada foi utilizada como meio líquido para os ensaios imerso e úmido. O ensaio foi realizado em uma balança analítica (AUW220D, Shimadzu) com resolução de 0,01 mg.

Os cálculos de densidade experimental (d_{exp}) e porosidade total (P_t) são apresentados abaixo, nas Eq. (1) e Eq. (2), de acordo com a norma C373 – 88 do órgão *American Society for Testing and Materials* (ASTM).

$$d_{exp} = \frac{D_{mas}}{M-S} * d_{meio} \quad (1)$$

$$P_t = 1 - \frac{d}{d_{ref}} \quad (2)$$

Em que:

- D_{mas} é a massa seca;
- S é a massa imersa;
- M é a massa úmida (saturada);
- d_{meio} é a densidade do meio líquido;
- d_{ref} é a densidade de referência do pó cerâmico.

Por fim, calcula-se a densidade relativa (d_{rel}) através da Eq. (3), abaixo:

$$d_{rel} = \frac{d_{exp}}{d_{ref}} \quad (3)$$

3. RESULTADOS

Os resultados são divididos em duas seções, sendo a primeira referente à geometria das peças e a segunda referente à densidade obtida pelo processo de fabricação. Na seção de geometria propõe-se a apresentar o comportamento geométrico típico observado na peça após a incidência do feixe de laser, bem como as medidas citadas na Fig. 3. Na segunda seção, propõe-se apresentar os valores de densidade relativa das peças produzidas através do método LENS.

3.1. Geometria

O agregado de mulita formado no processo de preparação mostrou-se com aspecto homogêneo e alto esfarelamento, isto é, as amostras são capazes de se sustentar fora do invólucro de produção mas apresentam fragmentação de material.

Após a formação do aglomerado sólido foi possível observar o padrão geométrico apresentado na Fig. 3, sendo as regiões A, B, C e D, chamadas respectivamente de, canal, altura da peça, cordão e camada externa. O canal foi formado pela fusão da mulita na amostra, até a formação de uma poça maciça no interior do agregado, denominada de cordão. A altura da peça é a dimensão que compreende o início do canal até a fim camada externa, sendo esta uma região formada por pó que foi capaz de criar adesão com a parte externa do cordão. A adesão entre a camada externa e o cordão não é completa, apresentando esfarelamento em certas regiões. Um exemplo deste fenômeno é apresentado na Fig. 4.



Figura 4: Canal formado na face superior da agregado (esquerda) e poça maciça no interior do agregado (direita)

As peças são então classificadas quanto à potência de incidência laser e, para cada potência, dois tipos de espécimes são analisados: o agregado bruto (C_i); e o cordão (C_n). As dimensões A, B, C e D são apresentadas na Tab. 2. Para referência das amostras produzidas, utiliza-se a seguinte notação: (formulação X ou form.X/potência de laser em W).

Tabela 2: Dimensões de canal (A), altura (B), cordão (núcleo) (C) e camada externa (D)

Descrição		Agregado bruto		Cordão	
Formulação	Potência do laser [W]	A [mm]*	B [mm]*	C [mm]*	D [mm]*
1	350	0,6	6,1	2,7	3,9
1	450	0,5	8,1	2,7	4,6
2	250	N/A	N/A	2,4	4,1
2	350	N/A	N/A	2,2	3,3
2	450	0,8	13,1	2,6	3,4

(*) incerteza de medição de $\pm 0,1$ mm

As dimensões de (form.2/250) e (form.2/350) marcadas como “não se aplica (N/A)” não puderam ser medidas devido à impossibilidade de manter a sua integridade ao extraí-lo do agregado. As visões macroscópicas dos agregados brutos e dos cordões são apresentadas nas Fig. 5 e Fig. 6, respectivamente. No caso da formulação (1), não foi possível produzir espécimes por meio da potência de 250 W com dimensões e resistências mínimas que possibilitassem o manuseio e, em consequência, a coleta dos dados para resultados.

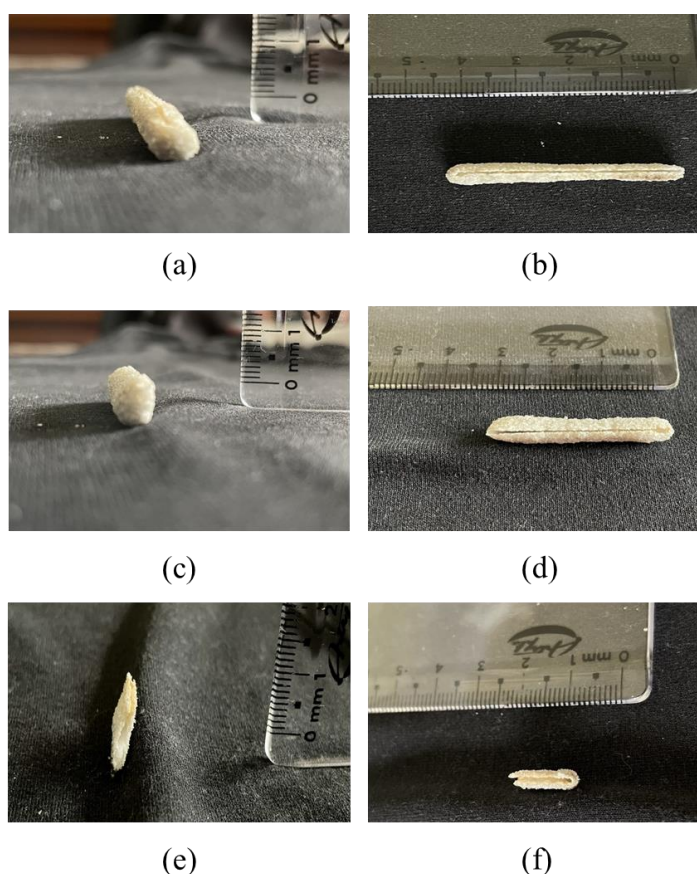


Figura 5: Agregados brutos de mulita eletro-fundida extraídos integralmente. (a) vista frontal – form.1/350; (b) vista superior – form.1/350; (c) vista frontal – form.1/450; (d) vista superior – form.1/450; (e) vista frontal – form.2/450 e (f) vista superior – form.2/450;

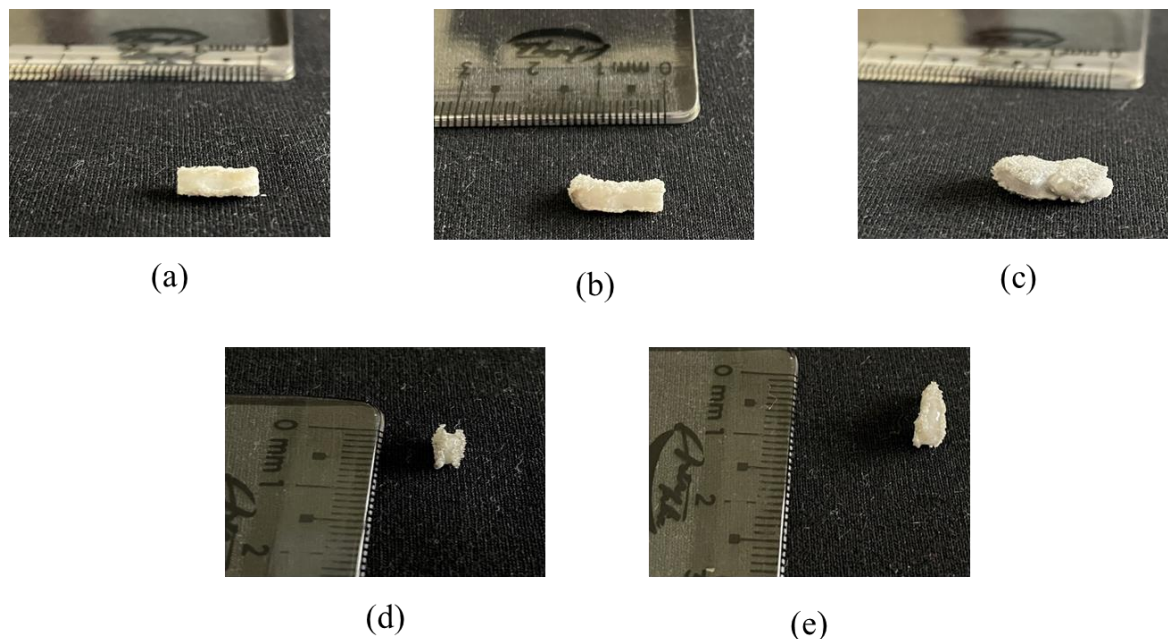


Figura 6: Cordões de mulita eletro-fundida produzidos por LENS. (a) form.1/350; (b) form.1/450; (c) form.2/250; (d) form.2/350 e (e) form.2/450

As peças preparadas pela formulação (1) apresentam a formação de agregados brutos maiores na direção de deposição e mais resistentes em relação às peças preparadas pela formulação (2), sendo que o único experimento onde foi possível extrair o agregado bruto integral desta última formulação foi referente à aplicação mais alta de potência (450 W).

Em relação ao cordão e à camada externa da peça, é visto que a variação da potência aplicada causou pouco impacto nas dimensões destes.

3.2. Densidade obtida

Por fim, mediu-se a massa das peças obtidas pelo processo de LENS por meio do ensaio de imersão e o calculou-se a densidade experimental, porosidade total e densidade relativa. Os resultados de densidade relativa obtidas para as amostras de Ci e C_n, são apresentados na Tab. 3, a saber:

Tabela 3: Valores calculados de densidade relativa dos agregados brutos e dos cordões

Descrição		Agregado bruto	Cordão
Formulação	Potência do laser [W]	Densidade relativa	Densidade relativa
1	350	70%	91%
1	450	74%	74%
2	250	N/A	58%
2	350	N/A	59%
2	450	59%	72%

Os valores preenchidos por “não se aplica (N/A)” na Tab. 3 são resultado do mesmo fenômeno explicado nos dados da Tab. 2. A diferença entre a porosidade obtida pelo grupo de peças de agregados brutos e os cordões explica-se pela diminuição da espessura da camada externa neste último, composta por pó com baixa adesão ao material fundido. Dentre as peças analisadas, atingiu-se a maior densidade relativa, igual a 91%, na amostra de mulita preparada com 8% de ácido fosfórico e 350 W de potência de incidência. A formulação 1 apresentou densidade relativa entre 70% e 91%, enquanto a formulação 2 apresentou densidade relativa entre 58% e 72%.

Na maior parte dos casos, o aumento da potência de laser proporcionou acréscimo na densidade da peça final, como observado nas amostras (form.1/350), (form.1/450), (form.2/250), (form.2/350) e (form.2/450). O fenômeno pode não ter

sido observado no caso da amostra (form.1/450) devido a fatores externos durante a manufatura, onde pode ser citado, por exemplo, uma situação em que o aumento excessivo da potência em regiões focalizadas do agregado gerou a formação de poças grandes e concentradas de material fundido, levando a pequenos “estouros” da poça nas suas vizinhanças, causando possíveis falhas no interior do cordão.

Em geral, considera-se que foram obtidos satisfatoriamente os resultados propostos pelo trabalho, sendo possível fabricar cordões densos de mulita através do processo de manufatura direta LENS. O processo demonstrou viabilidade para produção de peças com pequenas dimensões (entre 10 a 40 mm), porém com desafios concretos em relação às tolerâncias geométricas e de dimensões de projeto, principalmente devido à formação do núcleo fundido no interior do agregado, e não em sua superfície.

3. CONCLUSÕES

Cordões de mulita densa foram produzidos pelo processo de fabricação de manufatura aditiva direta através do método *Laser Engineered Net Shaping*, onde foi possível obter espécimes com 91% de densidade relativa e 9% de porosidade total aplicando potência de laser de 350 W no agregado de mulita com 8% (m/m) de ácido fosfórico. Em média, obteve-se a densidade relativa nas formulações (1) e (2) de, respectivamente, 77% e 62%.

A adição de sílica amorfa gel demonstrou-se uma boa alternativa para a produção do agregado bruto, sendo que o agregado preparado por esta rota demonstrou aspecto mais estável em relação à formulação sem sílica, apresentando aspecto compacto, maior resistência ao manuseio e com menos esfrelamento superficial.

Pela primeira rota obteve-se maior densidade em valores máximo e médio, sendo estes, respectivamente, 91% e 77%. Os agregados brutos produzidos nas amostras preparadas com a formulação (1) apresentaram maiores dimensões na direção de deposição e maior resistência em relação às preparadas com a formulação (2).

O controle geométrico das peças cerâmicas produzidas por LENS e a adesão entre camadas são ainda grandes desafios para utilização do processo em larga escala. A produção de cordões com mais de 40 mm de comprimento foi dificultada pela fragilidade do material fabricado e pela formação do cordão no interior do agregado, exigindo a remoção de uma grande camada externa frágil e com baixa adesão ao núcleo do cordão, que pode comprometer a peça final.

4. AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) [processo 133205/2020-7]. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Processos nº 2016/11309-0 e 2019/26362-2, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

4. REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials (ASTM) C737 - 88, 2006. “Standard Test Method for Water Absorption, Bulk Density, Apparent Porosity, and Apparent Specific Gravity of Fired Whiteware Products”.
- Camargo, I.L.De, Erbereli, R, e Fortulan, C.A., 2019. “Fluidez de Matéria Prima Cerâmicas Para o Processo DED de Manufatura Aditiva”. In *Proceedings of the 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*. São Carlos, Brasil.
- Camargo, I.L.De, Lovo, J.F.P., Erbereli, R, Coelho, R.T., Da Silva, I.B. e Fortulan, C.A., 2020. “An Overview of Laser Engineered Net Shaping of Ceramics”. *Materia (Rio de Janeiro)*, Vol. 25, n.01.
- Chen, A., Li, M., Xu, J., Lou, C., Wu, J., Cheng, L., Shi, Y., Li, C., 2018. “High-porosity mullite ceramic foams prepared by selective laser sintering using fly ash hollow spheres as raw materials”. *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 38, p. 4553-4559.
- Gorjan, L., Tonello, R., Sebastian, T., Colombo, P., Clemens, F., 2019. “Fused deposition modeling of mullite structures from a preceramic polymer and γ -alumina”. *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 39, n. 7, p. 2463-2471.
- Hosseinizadeh, M., Akbari, M. e Bashiri, F., 2015. “The effect of fused and sintered mullite on properties of ceramic heat shield in V94.2 gas turbines”. In *Proceedings of the 30th Power System Conference (PSC2015)*. Tehran, Iran.
- Huo, C., Tian, X., Nan, Y., Li, D., 2020. “Hierarchically porous alumina ceramic catalyst carrier prepared by powder bed fusion”. *Journal of the European Ceramic Society*. Vol. 40, n.12, p. 4253-4264.
- Kalita, P. E., Schneider, H., Lipinska, K., Sinogeikin, S., Hemmers, O.A., Cornelius, A., 2013. “High-Pressure Behavior of Mullite: An X-Ray Diffraction Investigation”. *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 96, n. 5, p. 1635-1642.
- Krenzel, T.F., Schreuer, J., Laubner, D., Cichocki, M., Schneider, H., 2019. “Thermo-mechanical properties of mullite ceramics: New data”. *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 102, n. 1, p. 416-426.
- Lee, R., Cheng, W., Lee, C., Lin, F., Liu, F., 2017. “Mullite ceramic fabrication by 3D printing”. In *Proceedings of the 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design*. Albufeira, Portugal.
- Li, Y., Hu, Y., Cong, W., Zhi, L., Guo, Z., 2017. “Additive manufacturing of alumina using laser engineered net shaping:

- Effects of deposition variables”. *Ceramics International*, Vol. 43, n. 10, p. 7768–7775.
- Niu, F., Wu, D., Lu, F., Liu, G., Ma, G., Jia, Z., 2018. “Microstructure and macro properties of Al₂O₃ ceramics prepared by laser engineered net shaping”. *Ceramics International*, Vol. 44, n. 12, p. 14303–14310.
- Niu, F., Wu, D., Ma, G., Zhang, B., 2015. “Additive manufacturing of ceramic structures by laser engineered net shaping”. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 28, n. 6, p. 1117–1122.
- Niu, F., Wu, D., Zhou, S., Ma, G., 2014. “Power prediction for laser engineered net shaping of Al₂O₃ ceramic parts”. *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 34, n. 15, p. 3811–3817.
- Schmidt, J., Altun, A.A., Schwentenwein, M., Colombo, P., 2019. “Complex mullite structures fabricated via digital light processing of a preceramic polysiloxane with active alumina fillers”. *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 39, n. 4, p. 1336–1343, 2019.
- Schneider, H., Schreuer, J., Hilmann, B., 2008. “Structure and properties of mullite—A review”. *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 28, n. 2, p. 329–344.
- Schneider, H., Fischer, R.X., Schreuer, J., 2015. “Mullite: Crystal Structure and Related Properties”. *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 98, n. 10, p. 2948–2967.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

STUDY OF THE FEASIBILITY OF THE DIRECT ADDITIVE MANUFACTURING OF MULLITE BY ENGINEERED NET SHAPING (LENS)

Thiago Calabreze de Azevedo

São Carlos School of Engineering – University of São Paulo – USP. Trabalhador São Carlense, 400. São Carlos, SP. Brasil
azevedo.thiago@usp.br

Italo Leite de Camargo

Federal Institute of Education, Science and Technology of São Paulo - IFSP. Primeiro de Maio, 500. Itaquaquecetuba, SP, Brasil
São Carlos School of Engineering – University of São Paulo – USP. Trabalhador São Carlense, 400. São Carlos, SP. Brasil
Italo.camargo@ifsp.edu.br

Johan Sebastian Grass Nuñez

Fabio Edson Mariani

Reginaldo Teixeira Coelho

Carlos Alberto Fortulan

São Carlos School of Engineering – University of São Paulo – USP. Trabalhador São Carlense, 400. São Carlos, SP. Brasil
jsgrassn@usp.br
mariani.fabio@usp.br
rtcoelho@sc.usp.br
fortulan@usp.br

Abstract. The additive manufacturing process of ceramic materials has been widely researched in recent years due to the unique characteristics obtained in the parts manufactured by this process, such as fabrication of complex geometries, the flexibility of low scale production and material savings. However, many challenges still limit the commercial use of this process, as it is still difficult to manufacture dense parts, low porosity, dimensional accuracy, and free cracks, which are fundamental to the mechanical performance of the material used. The correlation process parameters and the part properties are fundamental to make the process result predictable. Thus, a preliminary study of the direct additive manufacturing process of mullite by Laser Engineered Net Shaping (LENS) is proposed. A specimen of mullite aggregate prepared was exposed to laser beam where the density of the bead was obtained using immersion test and, furthermore, the behavior and geometric pattern of the manufactured parts are presented. The result obtained is considered satisfactory, and it was possible to obtain a relative density of 91% in the core of the melted material, referring to the applied power of 350 W in the sample of mullite aggregate prepared with a concentration of 8% phosphoric acid.

Palavras chave: Laser Engineered Net Shaping, Mullite, Additive Manufacturing, Density, Process Parameters

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.