

DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE INCONEL 625 REFORÇADOS COM NbC VIA FUSÃO EM LEITO DE PÓ

Amanda da Cunha Lemos¹

Gabrielle Kretzer²

Guilherme Maziero Volpato³

Erick Cardoso Costa⁴

Fábio Antônio Xavier⁵

Milton Pereira⁶

Márcio Celso Fredel⁷

^{1,2,3,4,5,6,7} Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil

³ Technische Hochschule Ingolstadt, Alemanha

¹ amandacllemos@gmail.com

² gabriellekretzer88@gmail.com

³ guilhermemvolpato@gmail.com

⁴ erickcardoso.eng@gmail.com

⁵ f.xavier@ufsc.br

⁶ eng.milton@gmail.com

⁷ m.fredel@ufsc.br

Resumo: A fusão em leito de pó a laser é uma tecnologia de manufatura aditiva em amplo desenvolvimento ao longo das últimas décadas, visando a flexibilidade e produção controlada de componentes, cuja fabricação por outros métodos torna-se difícil ou dispendiosa. Uma variedade de tais componentes inclui aqueles feitos de superligas de níquel, materiais empregados em condições que exigem alta temperatura como as impostas por aplicações aeroespaciais, como nas turbinas a gás. No entanto, considerando todos os materiais envolvidos na produção de sistemas de engenharia aeroespacial, as superligas de níquel possuem uma densidade relativamente alta. Esta propriedade do material eleva as forças centrípetas que atuam nos componentes da turbina, contribuindo para o principal fator de indução de falhas por fluência em materiais associados. Dessa forma, a produção de compósitos de matriz metálica apresenta-se como uma rota promissora para a redução de tais cargas nas turbinas, uma vez que se espera, com a introdução de reforços cerâmicos numa matriz metálica, não só se reduz a densidade do material, mas transfere-se uma fração da carga da matriz para o reforço. Tendo em vista a capacidade de o processo de fusão em leito de pó a laser de produzir materiais compósitos com confiabilidade, pesquisas têm se concentrado no uso da técnica para a produção de componentes com reforços, em geometrias próximas à forma final, reduzindo o grau de pós-processamento necessário e otimizando a topologia dos componentes. No entanto, não só o número de estudos na literatura sobre sistemas com compósitos de superligas à base de níquel é limitado, como as técnicas de manufatura aditiva tendem a consumir muito tempo para a produção de componentes grandes. Nesse contexto, o presente estudo teve como foco a produção e caracterização microestrutural de compósitos de Inconel 625 reforçados com partículas de NbC, visando a parametrização de variáveis do processo de fusão em leito de pó a laser, em relação à densidade do compósito, a avaliação da distribuição das partículas de reforço, e a detecção, e caracterização da microestrutura induzida pelo processo. A produção de materiais compósitos foi parametrizada utilizando uma espessura de camada de 100 µm, tendo sido variados a potência do laser e a velocidade de varredura. A avaliação dos materiais produzidos mostrou que a fusão em leito de pó a laser é capaz de produzir compósitos com reforços bem distribuídos, gerando materiais promissores para o desenvolvimento de componentes de turbinas a gás.

Palavras-chave: manufatura aditiva; fusão em leito de pó a laser; Inconel 625, compósitos de matriz metálica.

1. INTRODUÇÃO

A Fusão em Leito de Pó, do inglês “Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)”, é um processo de manufatura aditiva em constante desenvolvimento e de aplicação em diferentes segmentos das indústrias automotiva, aeroespacial e biomédica. Permite a fabricação de componentes com geometria complexa, flexibilidade de design e precisão dimensional (GAO *et al.*, 2015), sendo tipicamente utilizado para aquecimento e fusão completa de pós-metálicos, por meio de uma fonte laser de alta densidade de energia (YAP *et al.*, 2015). O processo inicia-se a partir de um modelo tridimensional do componente desejado, feito em *Computer-aided Design* (CAD), a partir do qual é feito um fatiamento do componente, gerando camadas individuais que são associadas a parâmetros de processamento adequados ao equipamento e aos resultados desejados na consolidação do componente produzido. A produção do componente inicia-se com a deposição de uma

camada de pó na plataforma de processamento e sua posterior fusão por meio de um feixe concentrado de laser, que varre uma trajetória 2D conforme o perfil daquela camada. Quando a varredura a laser é concluída, a plataforma de construção desce até uma altura pré-definida como espessura de camada, fornecendo espaço para a deposição de uma nova camada de pó a ser fundida (YU *et al.*, 2019). A camada é uniformemente disposta sobre a camada anterior e o feixe de laser varre a trajetória 2D dessa nova camada, que pode apresentar variações geométricas com relação à camada anterior. O processo segue de forma cíclica, sendo repetido para as camadas seguintes, até completar a manufatura do componente, cuja geometria final é resultado da sobreposição de geometrias 2D consolidadas camada a camada. Ao fim da última camada, faz-se a remoção de pó solto não fundido e, se necessário, realizam-se etapas de pós-processamento para dar o acabamento final ao componente. A Figura 1 ilustra o princípio de funcionamento do processo L-PBF.

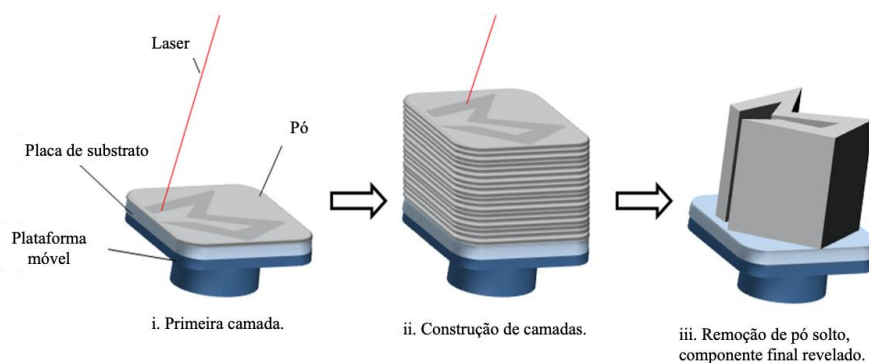


Figura 1. Funcionamento do processo L-PBF: (i) O laser funde áreas selecionadas ao longo do leito de pó. (ii) O mesmo processo é repetido para todas as camadas subsequentes. (iii) O pó não fundido é removido e o componente final é revelado. (YAP *et al.*, 2015)

Dentro do espectro de componentes possíveis de serem obtidos por manufatura via fusão em leito de pó a laser, estão os fabricados em superligas de níquel, materiais resistentes a altas temperaturas e utilizados em aplicações aeroespaciais. Um dos sistemas mais importantes de uma aeronave é a turbina a gás, constituída por lâminas que são consideradas elementos críticos devido à susceptibilidade à falha, principalmente por fluência e corrosão (BOYCE, 2002). Embora vantajosas, as superligas de níquel possuem densidade relativamente alta, dificultando o princípio de funcionamento da turbina, uma vez que o movimento circular de giro das lâminas resulta em uma alta força centrípeta, um importante fator para redução da resistência à fluência. Uma abordagem para diminuir a densidade do material e a força centrípeta à qual ele está sujeito considera a inserção de reforços cerâmicos na matriz metálica, constituindo assim um compósito de matriz metálica (do inglês *Metal Matrix Composites* – MMCs).

Constatou-se que os MMCs fabricados em superligas de níquel e reforçados com partículas cerâmicas na forma policristalina, possuem maior facilidade de manufatura quando comparados aos constituídos de cristais únicos, além de elevar a resistência a fluência e reduzir a densidade do material (LEMOS *et al.*, 2017). A fase de reforço diminui a taxa de fluência e atua como um mecanismo de sustentação recebendo os esforços mecânicos antes absorvidos por parte da matriz metálica (LEMOS *et al.*, 2022). Estudos sobre manufatura de MMCs comparando os processos de prensagem a quente convencional e sinterização por plasma, aliados a moagem de alta e baixa energia, relatam o impacto de processos de fabricação na estabilidade microestrutural a altas temperaturas por longos períodos de tempo (LEMOS *et al.*, 2019). Considerando essas necessidades, a técnica de fusão em leito de pó a laser se mostra promissora para fabricação de materiais compósitos com alta confiabilidade, baixa necessidade de pós-processamento e otimização da topologia de componentes.

Entretanto, a aplicação da manufatura aditiva em compósitos à base de superligas, além de restrita na literatura, possui limitações de tempo, demandando um grande período para a produção de componentes de grandes dimensões. Para contornar essa limitação, são utilizados valores maiores de espessura de camada, entre 100 e 200 μm , para aumentar a eficiência do processo e a taxa de construção do componente. Uma alta espessura de camada requer pós de maiores granulometrias e, por isso, mais acessíveis. Por esse motivo, a fabricação do componente ocorre em condições de tempo e custo reduzidos (SHI *et al.*, 2016).

Considerando o contexto de aplicação para componentes da indústria aeroespacial, o presente trabalho visa a produção e a caracterização microestrutural de compósitos de Inconel 625 reforçados com partículas de carbeto de nióbio (NbC) e espessura de camada de 100 μm , via fusão em leito de pó a laser. Visou-se a análise da influência de parâmetros do processo como potência do laser e velocidade de varredura, com relação à densidade, distribuição das partículas de reforço e caracterização microestrutural.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, são apresentados detalhes sobre a preparação do pó, já que não é um pó comercial, o planejamento dos experimentos e das análises realizadas.

2.1. PREPARAÇÃO DO PÓ, MISTURA E HOMOGENEIZAÇÃO

Para síntese dos compósitos, utilizou-se pó de Inconel 625 disponível comercialmente, com composição química conforme a Tabela 1 e distribuição do tamanho de partícula com diâmetro entre 106 e 150 μm .

Tabela 1. Composição química da liga de Inconel 625 utilizada nas amostras, onde bal. significa a composição de balanço (*balance composition*).

Elemento	Ni	Cr	Mo	Fe	Nb + Ta	Ti	Al	Si	Mn	Co	C
Fração [w%]	Bal.	22.30	8.50	2.80	3.50	0.10	0.10	0.15	0.10	1.00	0.03

O carbeto de nióbio do tipo 551 (NbC 551) foi fornecido pela CBMM. Conforme fichas de informação de segurança CAS: 12069-94-2 e CE: 235-117-8. Na Figura 2, observam-se as micrografias dos pós de Inconel 625 e carbeto de nióbio, com suas respectivas ampliações.

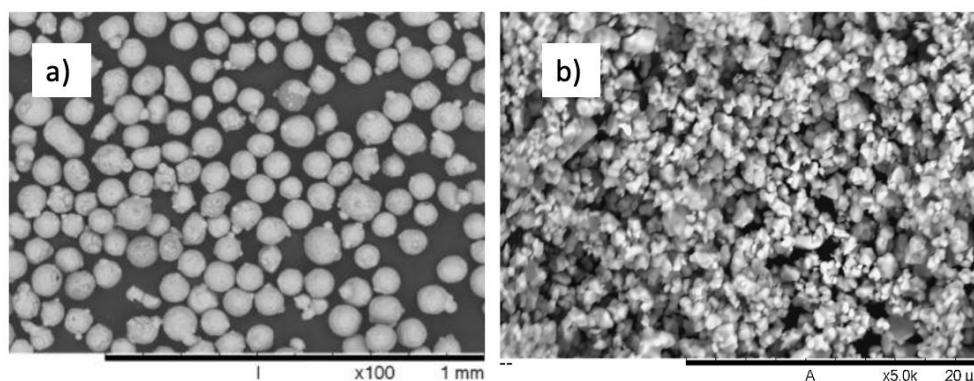


Figura 2. Micrografias de microscópio eletrônico de varredura, dos pós utilizados no processo: (a) pó de Inconel 625 (MACHADO,2019); (b) pó de carbeto de nióbio.

A mistura e homogeneização do carbeto de nióbio na proporção de 10 w% ao Inconel 625, foi realizada em um moinho de bolas tipo gira jarros Cienlab (CE-300/120), do Núcleo de Pesquisas em Materiais Cerâmicos e Compósitos (CERMAT) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), representado na Figura 3. O tempo de mistura foi de 24h.



Figura 3. Moinho de bolas do tipo gira jarros.

2.2. PROCESSAMENTO POR L-PBF

Para fabricação dos compósitos, utilizou-se o sistema de fusão seletiva a laser, modelo laser funde 200, da empresa Alkimat, com volume de trabalho cilíndrico de 170 x 200 mm (diâmetro x altura) e atmosfera inerte de nitrogênio. O sistema, equipado com laser de fibra dopado com itérbio e emissão de luz no comprimento de onda de 1064 μm , opera com potência máxima de 200 W e diâmetro de feixe no foco de 70 a 100 μm .

Um total de 5 cubos de Inconel 625/NbC com dimensões de 10 x 10 x 4 mm (comprimento x largura x altura) foi fabricado, variando os parâmetros de potência do laser (P) e velocidade de varredura (v), conforme a Tabela 2. A espessura de camada foi mantida constante no valor de 100 μm , assim como a distância entre linhas vizinhas, na medida de 100 μm e o diâmetro de feixe no foco também em 100 μm . A estratégia de varredura empregada foi do tipo unidirecional, com rotação de 67° entre camadas.

Tabela 2. Parâmetros de potência e velocidade de varredura utilizados para fabricação das amostras.

Amostra	A1	A2	A3	A4	A5
Potência do Laser (W)	150	150	150	150	190
Velocidade de varredura (mm/s)	30	80	130	180	230

2.3. CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

Para a etapa de preparação metalográfica, o corte das amostras foi realizado com a máquina de corte com fio diamantado contínuo desenvolvida no Laboratório de Mecânica de Precisão da Universidade Federal de Santa Catarina (LMP-UFSC), dedicada à usinagem de materiais de difícil usinabilidade (alta dureza e elevada fragilidade). Como ferramenta de corte, utilizou-se um fio diamantado eletrodepositado com diâmetro externo de 350 μm e comprimento de 1,9 m. O corte foi feito com os seguintes parâmetros: velocidade de corte de 10 m/s, velocidade de avanço de 3 mm/min e tensão do fio de 20 N. Todos os cortes foram executados sem o uso de fluido lubrificante.

Em seguida, realizou-se o lixamento e polimento das amostras conforme procedimentos-padrão de metalografia. A microestrutura foi caracterizada utilizando um microscópio óptico (Zeiss Axio Lab. A1, do Laboratório de Materiais UFSC).

2.4. COMPORTAMENTO DE DENSIFICAÇÃO

As análises de densidade, esfericidade, área e diâmetro do poro foram realizadas a partir das imagens obtidas em microscópio óptico e processadas em um programa para medição de porosidade, desenvolvido em Python com base no pacote OpenCV, no Laser Zentrum Hannover e. V (Alemanha).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4 representa-se uma das amostras consolidada após processo de fabricação L-PBF.

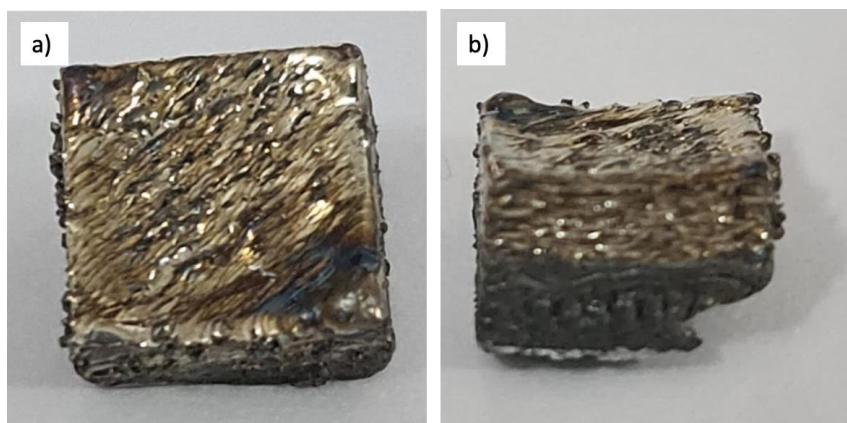


Figura 4. Amostra obtida via L-PBF: vista superior (a) e lateral (b).

Na Figura 5, estão representadas as micrografias obtidas em microscópio óptico das amostras selecionadas, utilizadas nas análises de densidade.

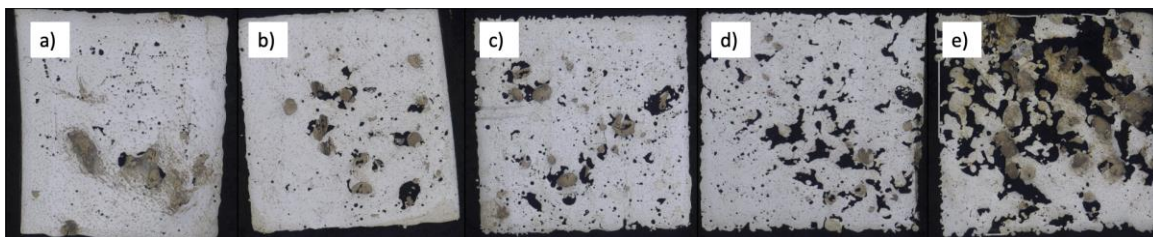


Figura 5. Micrografias em microscopia ótica das amostras: (a) A1; (b) A2; (c) A3; (d) A4; (e) A5 para análise de densidade.

A densidade obtida para cada amostra está representada na Tabela 3. Observa-se que a amostra A1 possui a maior densidade, 98,65%, e a amostra A5 a menor densidade, 71,02%. Conclui-se que, para esse conjunto de amostras, a densidade se mostra inversamente proporcional à potência e à velocidade de varredura do processo L-PBF, sendo 150 W e 30 mm/s a melhor combinação de parâmetros (VOLPATO *et al.*, 2022).

Tabela 3. Resultados de densidade das amostras					
Amostra	A1	A2	A3	A4	A5
Densidade [%]	98.65	96.38	93.33	88.94	71.02

O programa também proporcionou uma análise visual através das imagens de microscópio óptico, com delimitação de poros e descontinuidades, com suas respectivas áreas, identificadas como “Pore area”. Complementando com uma abordagem gráfica, o programa reúne histogramas referentes à frequência de poros e descontinuidades, e porosidade acumulada, ambos relacionados ao diâmetro dos defeitos, identificados como “Average pore diameter”. A amostra A1, representada na Figura 6, possui 1,35% de porosidade, sendo maior a frequência de poros e descontinuidades até 100 μm .

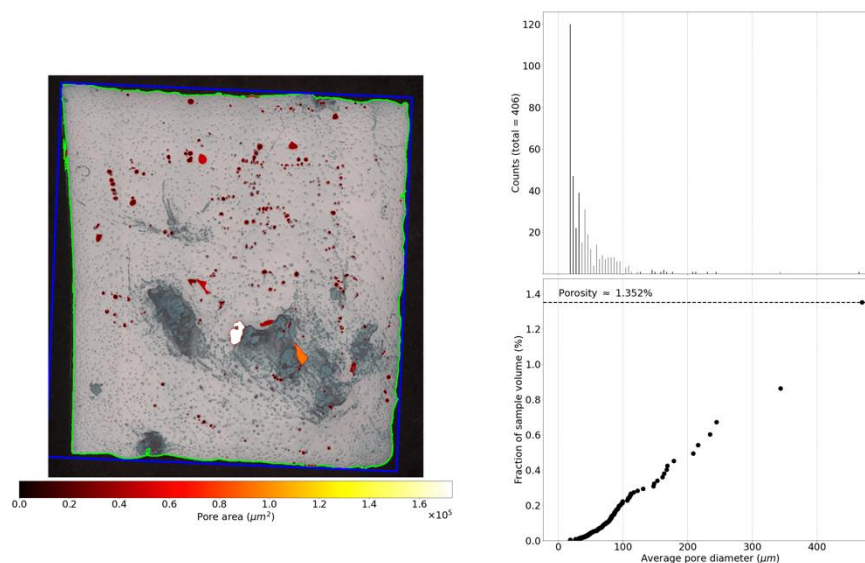


Figura 6. Análise de porosidade da amostra A1.

Em concordância com os resultados de densidade, as amostras A2 (Figura 7), A3 (Figura 8) e A4 (Figura 9), apresentaram aumento na porosidade de 3,62, 6,67 e 11,07% respectivamente. Percebe-se também um aumento no diâmetro dos poros e descontinuidades, presentes em maior quantidade entre 200 e 400 μm .

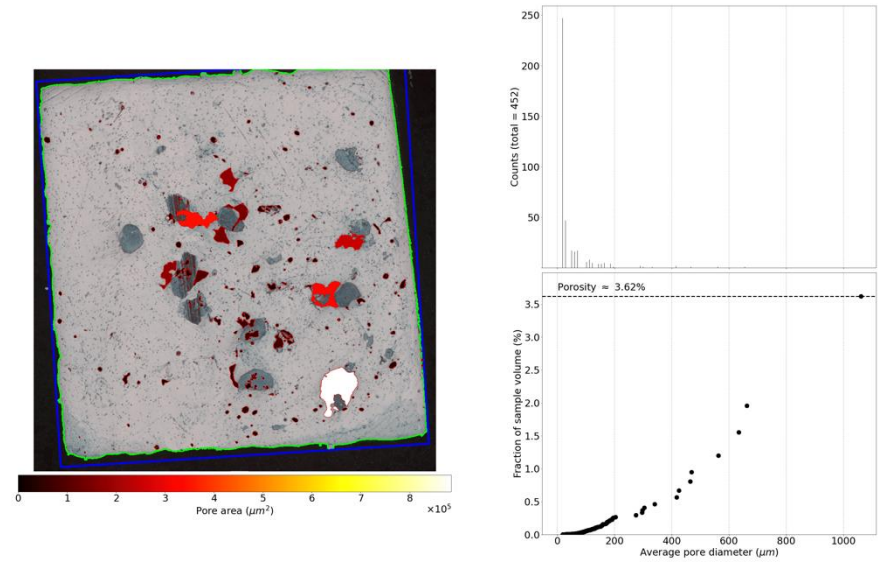


Figura 7. Análise de porosidade da amostra A2.

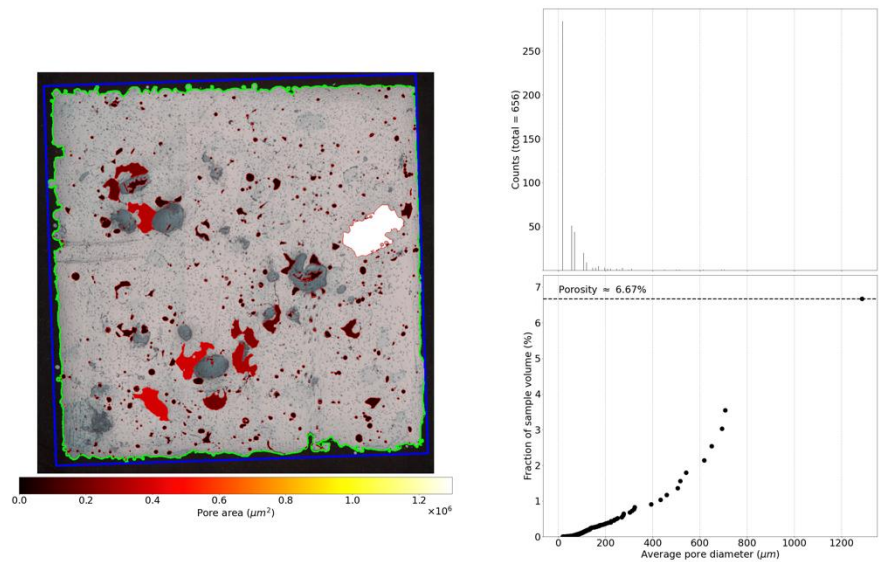


Figura 8. Análise de porosidade da amostra A3.

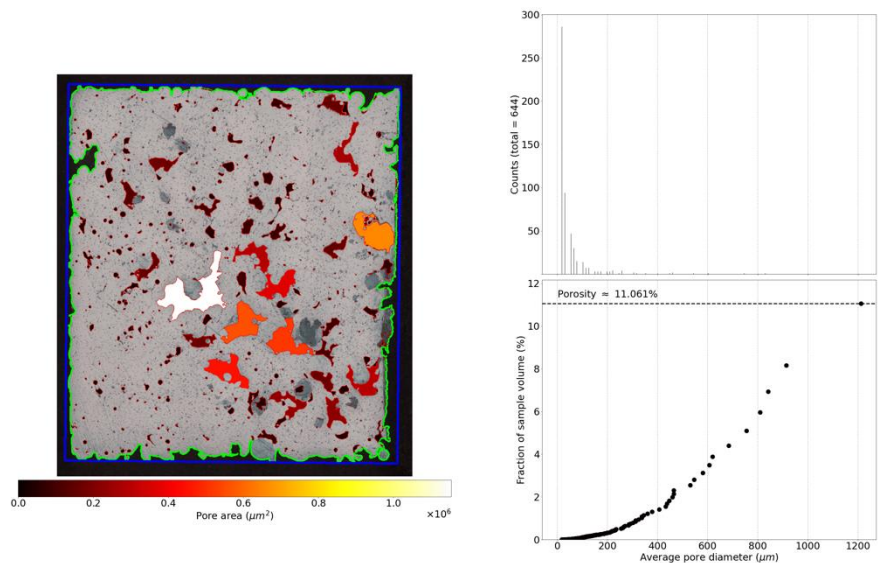


Figura 9. Análise de porosidade da amostra A4.

Por fim, a amostra A5, mostrada na Figura 10, caracterizou-se com a maior porcentagem de porosidade (28,99%) e maior frequência de poros e descontinuidades até 500 μm .

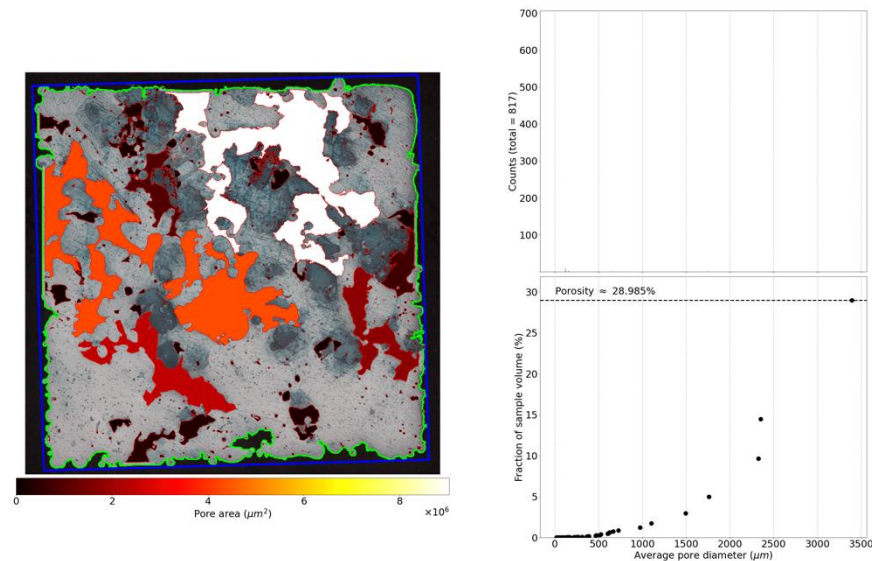


Figura 10. Análise de porosidade da amostra A5

Observam-se na Tabela 4 os resultados de esfericidade, diâmetro e área dos poros e descontinuidades. Em média, a área das regiões defeituosas aumenta conforme o aumento da quantidade de poros e descontinuidades, sendo os extremos de menor e maior valor referentes às amostras A1 e A5. A média de diâmetro dos poros e descontinuidades segue o mesmo padrão da média de área, exceto para a amostra A5 com média abaixo do esperado (60,95 μm).

Tabela 4. Medidas de esfericidade do poro e descontinuidades no primeiro (25%), segundo (50%) e terceiro (75%) quartis; medidas de diâmetro e área do poro e descontinuidades.

Amostra	Esfericidade				Diâmetro (μm)			Área (μm^2)		
	Média	D _{v25}	D _{v50}	D _{v75}	Média	Mediana	Maior poro	Média	Mediana	Maior poro
A1	0.89	0.90	0.90	0.93	46.6	33.4	469.6	3159.0	878.9	173204.5
A2	0.87	0.88	0.90	0.90	57.5	26.2	1061.4	8943.0	540.8	885087.2
A3	0.87	0.87	0.90	0.93	64.8	38.2	1286.8	10028.9	1149.3	1300453.5
A4	0.86	0.86	0.90	0.91	70.2	34.7	1212.4	14334.9	946.5	1154493.9
A5	0.88	0.90	0.90	0.93	60.9	26.2	3391.9	34288.4	540.8	9036177.6

A esfericidade dos poros e descontinuidades possui pouca variação de uma amostra para a outra, permanecendo em média entre 0.86 e 0.89.

4. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos no presente trabalho, é possível concluir que:

- O processo L-PBF mostrou-se efetivo e promissor para fabricação de amostras de Inconel 625/NbC com 100 μm de espessura de camada;
- A maior densidade obtida foi de 98,65%, associada à combinação de parâmetros do processo L-PBF de 150 W de potência laser e 30 mm/s de velocidade de varredura;
- Comprova-se que, para uma mesma potência de laser dentro do intervalo de parâmetros analisado, o aumento da velocidade de varredura tende a reduzir a densidade do componente e aumentar o número e o diâmetro dos poros e descontinuidades;
- A esfericidade dos poros e descontinuidades não parece ser afetada significativamente por parâmetros do processo L-PBF, pertencentes a janela de processamento avaliada.

5. AGRADECIMENTOS

Agradece-se à empresa Alkimat por disponibilizar a utilização da máquina e a Daniel Auri Schaefer por registros de imagem das amostras em microscópio óptico. M. Fredel agradece ao CNPq pelos recursos disponibilizados através do Projeto Universal [436296/2018-7].

6. REFERÊNCIAS

- GAO, Wei et al., 2015. *The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering*. Computer-Aided Design, Vol. 69, p. 65-89.
- LEMO, Georges et al. *Creep resistance improvement of a polycrystalline Ni-based superalloy via TiC particles reinforcement*. Materials Science and Engineering: A, v. 854, p. 143821, 2022.
- LEMO, Georges et al. *Development of a TiCp reinforced Ni-based superalloy MMC, with high creep resistance and reduced weight*. In: Key Engineering Materials. Trans Tech Publications Ltd, 2017. p. 189-196.
- LEMO, Georges et al. *Influence of distinct manufacturing processes on the microstructure of ni-based metal matrix composites submitted to long thermal exposure*. In: Key Engineering Materials. Trans Tech Publications Ltd, 2019. p. 79-86.
- M.P. Boyce, 2002. *Gas Turbine Engineering Handbook*, 2nd ed., Gulf Professional Publishing.
- MACHADO, Letielli Ramos., 2019. *Compósito de matriz metálica de Inconel 625 com reforço de carbeto de tungstênio por Laser Cladding*. Trabalho de conclusão de curso - Engenharia de materiais, Departamento de Engenharia Mecânica, Curso de graduação em engenharia de materiais, Universidade Federal de Santa Catarina.
- SHI, Xuezhong et al., 2016. *Performance of high layer thickness in selective laser melting of Ti6Al4V*. Materials, Vol. 9, n. 12, p. 975.
- SILVA, Rafael Gomes Nunes et al., 2020. *Tribological comparison of Inconel 625 coatings deposited via laser metal deposition and tungsten inert gas welding process*. Journal of Laser Applications, Vol. 32, n. 2, p. 022034.
- VOLPATO, Guilherme Maziero; TETZLAFF, Ulrich; FREDDEL, Márcio Celso. *A comprehensive literature review on laser powder bed fusion of Inconel superalloys*. Additive Manufacturing, p. 102871, 2022.
- YAP, Chor Yen et al., 2015. *Review of selective laser melting: Materials and applications*. Applied physics reviews, Vol. 2, n. 4, p. 041101.
- YU, Wen Hui et al., 2019. *Particle-reinforced metal matrix nanocomposites fabricated by selective laser melting: A state of the art review*. Progress in Materials Science, Vol. 104, p. 330-379.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

DEVELOPMENT OF INCONEL 625 COMPOSITES REINFORCED WITH NBC USING LASER POWDER BED FUSION AT 100µm LAYER THICKNESS

Amanda da Cunha Lemos¹

Gabrielle Kretzer²

Guilherme Maziero Volpato³

Erick Cardoso Costa⁴

Fábio Antônio Xavier⁵

Milton Pereira⁶

Márcio Celso Fredel⁷

^{1,2,3,4,5,6,7} Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil

³ Technische Hochschule Ingolstadt, Alemanha

¹ amandacllemos@gmail.com

² gabriellekretzer88@gmail.com

³ guilhermemvolpato@gmail.com

⁴ erickcardoso.eng@gmail.com

⁵ f.xavier@ufsc.br

⁶ eng.milton@gmail.com

⁷ m.fredel@ufsc.br

Abstract. *Laser powder bed fusion is an additive manufacturing technology that has been widely developed in the past decades, aiming at the flexible and controlled production of components that would be otherwise difficult or costly to manufacture. One variety of such components include those made of Ni-based superalloys, materials employed in the demanding high-temperature conditions imposed by aerospace applications. However, when one considers all the materials involved in the production of aerospace engineering systems, Ni-based superalloys have a relative high density. This material property leads to high centripetal forces acting on turbine components, which are a main factor inducing creep damage in associated materials. Thus, the production of metal matrix composites is a promising route for the reduction of such turbine loads, since the introduction of ceramic reinforcements in a metal matrix is expected to not only reduce material density but also transfer a fraction of the matrix load to said reinforcements. As laser powder bed fusion is able to produce composite materials with reliability, research has been concentrated on the use of the technique for the production of reinforced components in near-net-shape geometries, thus reducing the degree of necessary post-processing and optimizing components' topology. However, not only is the number of superalloy composite systems researched in the literature limited, but additive manufacturing techniques have the limitation of lasting a long time to produce particularly large components. In this context, the present study focused on the production and microstructural characterization of Inconel 625 composites reinforced with NbC particles, aiming at the parametrization of powder bed fusion parameters in regard to composite density, the evaluation of the distribution of reinforcement particles, and the detection and characterization of microstructural artifacts induced by the additive manufacturing technique. The production of the composite materials has been parameterized using a layer thickness of 100 μm , in order to optimize build rates and reduce processing time. The evaluation of the materials produced have shown that laser powder bed fusion is capable of producing dense composites with well-distributed reinforcements, which are promising materials for the development of turbine engine components.*

Keywords: *additive manufacturing; laser powder bed fusion; Inconel 625; layer thickness; metal matrix composites*

RESPONSIBILITY NOTICE

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