

ANÁLISE DE AMOSTRAS FABRICADAS EM AÇO INOX 316L POR L-PBF VARIANDO AS ESTRATÉGIAS DE VARREDURA

Maicow Roney Fiedler da Costa Machado

Neri Volpato

Ricardo Dutra da Silva

João Victor Laskoski

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Rua Heitor Alencar Furtado, 5000 – Curitiba -PR

maicow@alunos.utfpr.edu.br, nvolpato@utfpr.edu.br, ricardodutra@gmail.com, laskoski@alunos.utfpr.edu.br

Arthur Kretzer

José Maria Mascheroni

Alkimat Tecnologia Ltda, Rua Abelardo Manoel Peixer, 142 - Barreiros, São José - SC

arthur.kretzer@alkimat.com.br, jose@alkimat.com.br

Resumo:

Entre os processos de manufatura aditiva para metal, se destaca o princípio de Fusão em Leito de Pó por laser (Laser Powder Bed Fusion - L-PBF), que consiste em varrer um leito de pó metálico, fundindo o material, seguindo uma trajetória de preenchimento. Entre os principais problemas do processo L-PBF está o aparecimento de poros e vazios, o que afeta a resistência mecânica do material. Este estudo focou na avaliação do efeito de algumas estratégias de varredura do laser na porosidade do material. As estratégias analisadas foram: zigue-zague com linhas simples (vetores longos) e a tabuleiro de xadrez (chessboard), sendo que entre camadas analisou-se o tabuleiro fixo, com giro e com deslocamento. As estratégias foram geradas por um software comercial e um de pesquisa, sendo o segundo um desenvolvimento interno no grupo, apresentando alguns diferenciais em relação ao software comercial. O pó metálico escolhido para o estudo foi o 316L e as amostras foram fabricadas na máquina Alkimat 200. As amostras foram analisadas em microscópio óptico, onde se obteve as imagens digitalizadas das seções de interesse. Com o objetivo de analisar a porosidade do material, utilizou-se a análise através da medição de pixel das imagens coletadas. Os resultados revelaram a influência das estratégias estudadas no aparecimento de poros sistemáticos e isso mostra a importância da definição da estratégia de varredura no planejamento do processo com L-PBF de aço 316L.

Palavras-chave: Fusão em Leito de Pó por laser; 316L; Estratégia de varredura; Manufatura aditiva, Porosidade

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (AM) de metais vem se desenvolvendo consideravelmente nos últimos anos, sendo denominada um dos pilares da indústria 4.0, onde se une o projeto digital com a produção automatizada. Uma das principais categorias de tecnologia AM para metal é conhecida como de fusão em leito de pó por laser (*Laser Powder Bed Fusion - L-PBF*), que usa a energia do laser para fundir seletivamente partículas em um leito de pó Gouveia et al. (2020). Algumas denominações comerciais de L-PBF bastante difundidas são a fusão seletiva a laser (*Selective Laser Melting - SLM*) e *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS).

Existem vários parâmetros de processo para controlar a L-PBF, no entanto os três principais são a potência, velocidade de varredura e distância entre as linhas de varredura do laser. Esses influenciam muito a ligação entre as camadas, a estrutura da superfície e no desenvolvimento da porosidade em amostras fabricadas Pokorný et al. (2021). Estudos revelaram que a fusão instável desempenha um papel importante na formação de poros em uma camada recém fundida e no desenvolvimento da estrutura da superfície Qiu et al. (2019). O fluxo de fusão instável tende a levar a respingos do material, ao desenvolvimento de maiores porosidade e estrutura de superfície de formato irregular na camada recém construída. Recentemente, usando imagens de raios-X de alta velocidade, (Luo e Zhao, 2018) observaram que o jato de gás/vapor induzido por laser promove a formação de trilhas de fusão e áreas sem respingos. Eles também demonstraram a migração de poros por fluxo acionado pelo efeito Marangoni, que faz uma dissolução e dispersão de poros por refusão a laser.

Grande parte das pesquisas sobre L-PBF se concentraram na otimização de parâmetros de processo visando a melhoria da estrutura metalográfica, a análise de defeitos, teste de propriedades mecânicas e assim por diante. Apesar dos inúmeros trabalhos da literatura, o estudo com o aço inoxidável 316 L ainda está em desenvolvimento. Na pesquisa de Lu et al., (2019) os autores analisaram a influência dos parâmetros de processo na porosidade e nas propriedades de tração do material visando identificar os parâmetros de processamento otimizados. No estudo de Feng et al. (2017) foram

Maicow Machado, Neri Volpato, Ricardo Silva, João Laskoski, Arthur Kretzer, José Maria Mascheroni
 Análise de amostras fabricadas em aço inox 316L por L-PBF variando as estratégias de varredura.
 investigados a porosidade e a microdureza de amostras de aço inoxidável 316 L, demonstrando a relação entre a porosidade e a perda de propriedades mecânicas.

Além dos parâmetros citados acima, outro ponto importante no processo L-PBF é a escolha da estratégia de varredura do laser. Entre as estratégias mais utilizadas está a conhecida como tabuleiro de xadrez (*chessboard strategy*) ou também denominada de ilhas (*island*). Essa estratégia emprega menor comprimento de vetor de varredura, reduzindo a diferença de temperatura de uma região da peça para outra. Desta maneira, reduz-se as tensões superficiais que podem causar trincas e deformações durante o processo de fabricação Hajnys et al. (2020). Para evitar a formação de poros entre uma ilha e outra, se aplica um deslocamento do tabuleiro de xadrez entre as camadas sucessivas. No entanto, ainda não foi completamente investigado sobre a possível formação de poros entre as ilhas nesta estratégia.

Neste sentido, este estudo objetivou avaliar a porosidade de amostras fabricadas pelo processo L-PBF com o material de aço inox 316L, verificando o efeito causado por estratégias de varreduras diferentes e obtidas em dois softwares de planejamento de processo.

2. METODOLOGIA

2.1 Fabricação das amostras

O corpo de prova utilizado neste estudo tem um formato de um cubo de 10 mm de lado e para a fabricação das amostras foi utilizado o material 316L em pó, fornecido pela empresa Heraeus, lote 9005709484 data 10/12/2020, tendo tamanho de partículas de 0,020 mm – 0,053 mm. As amostras foram fabricadas na máquina da Alkimat 200 em São José/SC, equipada com um laser de fibra máximo de 200W no comprimento de onda de 1060 nm, cabeça de varredura de dois eixos com lente f-theta com tamanho de ponto próximo a 80 µm, em uma atmosfera de nitrogênio. A temperatura da câmara é mantida a 100 °C com aquecedores infravermelhos, mesma temperatura do reservatório de pó. Os parâmetros foram definidos e mantidos constantes conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Também foi padronizado o emprego de uma linha de contorno (perímetro), com os mesmos parâmetros do processo de varredura.

Tabela 1. Parâmetros padronizados na construção das amostras (fonte: Autor)

Potência do laser	165 W
Velocidade de varredura do laser	650 mm/s
Espessura de camada	0,030 mm
Distância entre linhas de varredura do laser (<i>hatch distance</i>)	0,110 mm

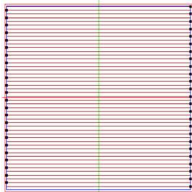
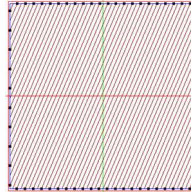
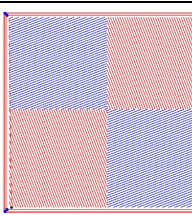
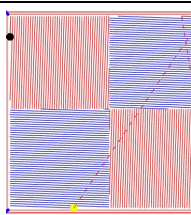
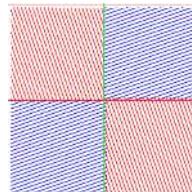
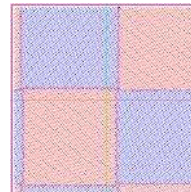
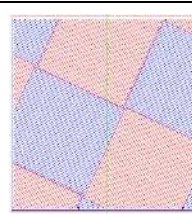
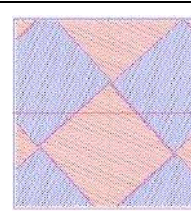
Foram utilizados dois sistemas de geração de estratégias de varredura, o NetFabb da Autodesk, e o RP3 do NUFER/UTFPR. Estes dois sistemas foram utilizados com intuito de comparar o sistema comercial e o sistema em desenvolvimento, que tem a possibilidade de criar e variar parâmetros de controle além dos disponíveis no sistema comercial.

No sistema NetFabb, foram selecionadas duas estratégias. A primeira é uma estratégia Simples do NetFabb (NS), que se caracteriza por não utilizar a ideia do *chessboard*, empregando linhas de varredura que percorrem toda a área a ser construída sem segmentação. Entre camadas foi aplicado a rotação das linhas de varredura de 67°. A segunda estratégia é denominada de NetFabb com *chessboard* fixo (NCF). Esta estratégia consiste em aplicar uma segmentação da área em ilhas formando um tabuleiro de tamanho 5mm x 5mm (tamanho das ilhas), sendo que a posição desse tabuleiro continua a mesma (fixa) de uma camada para a outra. Já para as linhas de varreduras, aplica-se uma rotação de 90° entre as ilhas da mesma camada e, entre as camadas, foi aplicada uma rotação de 67° em relação a posição da camada anterior.

No sistema RP3, foram testadas duas estratégias de *chessboard*. A primeira denominada de RP3 com *chessboard* deslocado (RCD). Nesse caso, a estratégia utilizou também um tabuleiro de 5mm x 5mm, mas entre as camadas o mesmo tem um deslocamento de 0,5 mm em X e Y. Quanto as linhas de varredura, foi aplicado uma rotação de 90° entre as ilhas na mesma camada e uma rotação de 67° em relação à camada anterior. A estratégia de RCD é uma das estratégias mais estudadas em L-PBF, conforme o artigo (Botha et al., 2021). A segunda estratégia é definida como do RP3 com *chessboard* rotacionado (RCR). Com tamanho das ilhas também de 5mm x 5mm, esta estratégia se difere pelo fato de se aplicar uma rotação de 67° do tabuleiro entre as camadas. As linhas de varredura possuem uma rotação de 90° entre as ilhas na mesma camada e uma rotação de 67° em relação à camada anterior. Adicionalmente, nas duas estratégias elaboradas pelo RP3 foi introduzido um parâmetro adicional à estratégia que é uma sobreposição entre as ilhas da mesma camada de 0,1 mm em X e 0,1 mm em Y. Este parâmetro foi definido para melhorar a amarração entre as ilhas. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta em detalhes as estratégias analisadas. Foram fabricadas 3 amostras de cada tipo de estratégia de varredura.

Tabela 2. Quadro com o resumo dos processos de fabricação das amostras (fonte: Autor)

Programa	Cod	Estratégia	Ângulo de Varredura	Camada n	Camada n+1
----------	-----	------------	---------------------	----------	------------

NetFabb	NS	Simple (Zigue-zague)	67° entre camadas		
NetFabb	NCF	Chessboard fixo e sem sobreposição entre as ilhas	90° Entre ilhas da mesma camada. 67° em relação a camada anterior		
RP3	RCD	Chessboard deslocado 0,5 mm no X-Y e sobreposição das ilhas de 0,1 mm	90° Entre ilhas da mesma camada. 67° em relação a camada anterior		
RP3	RCR	Chessboard com rotação 67° e sobreposição das ilhas de 0,1 mm	90° Entre ilhas da mesma camada. 67° em relação a camada anterior		

2.2 Preparação das amostras

Após fabricadas, as amostras foram retiradas da plataforma e cortadas transversalmente em dois planos, XZ e XY, conforme esquema da Figura 1. Foi utilizada a máquina Isomet 4000 e disco de corte Buehler código 10-4061-010 para fazer a divisão das amostras. O corte de cada amostra gerou duas faces para a análise, denominadas de lado 1 e lado 2, mostradas na Figura 1.

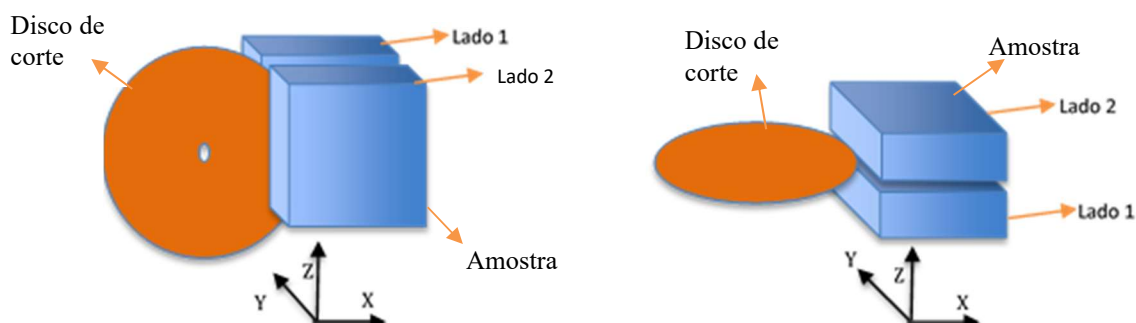


Figura 1. Cortes das amostras no plano XZ (a) e XY (b) (fonte: Autor)

As amostras foram embutidas em resina e depois lixadas nas granulometrias 120, 220, 320, 400, 600 e 1200. Após a etapa de lixamento foi feito um polimento com alumina grau 4.

2.3 Métodos de análise de porosidade por imagem

Inicialmente, para se ter uma visão geral das peças, foi feita análise em um microscópio ótico modelo DP25 da UTFPR com pequena ampliação (2X), visando verificar defeitos sistêmicos, ou defeitos pontualmente grandes.

A porosidade foi determinada pela técnica de medição por imagem, conforme artigo de (Wits et al., 2016). O método de imagem consiste em computar os pixels relativos aos poros de uma imagem da seção analisada. A imagem obtida em um microscópio ótico modelo SC30 da UTFPR é transformada em bicolor (pixel pretos e brancos) pelo software analySIS versão 5.1. Após esta separação, esse mesmo software faz a avaliação da quantidade de pixels de cada cor e os valores são gravados em uma planilha Excel. Foi utilizada a ampliação de 50X para as imagens do estudo de porosidade e, com esta ampliação, o tamanho real da imagem é de 2,50 mm na horizontal e 2,00 mm na vertical.

Cada lado da amostra seccionada foi analisado em 9 posições diferentes, sendo 3 imagens na parte superior, 3 imagens na central e 3 imagens na parte inferior (base da peça). Para auxiliar na localização das imagens capturadas das amostras, a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra, esquematicamente, as posições que cada uma no plano de corte em questão. A ideia foi avaliar a existência de alguma anomalia na quantidade de poros na fabricação em diferentes alturas da peça.

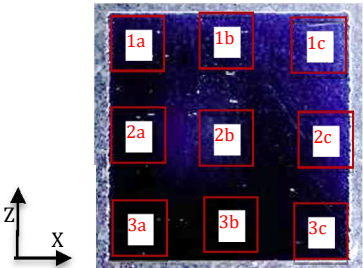


Figura 2 – Esquema de localização das imagens de cada lado da amostra cortada (Ampliação 2x), (fonte: Autor).

3. RESULTADOS

As seções a seguir apresentam os resultados das micrografias e de porosidade das amostras.

3.1 Avaliação das micrografias das amostras

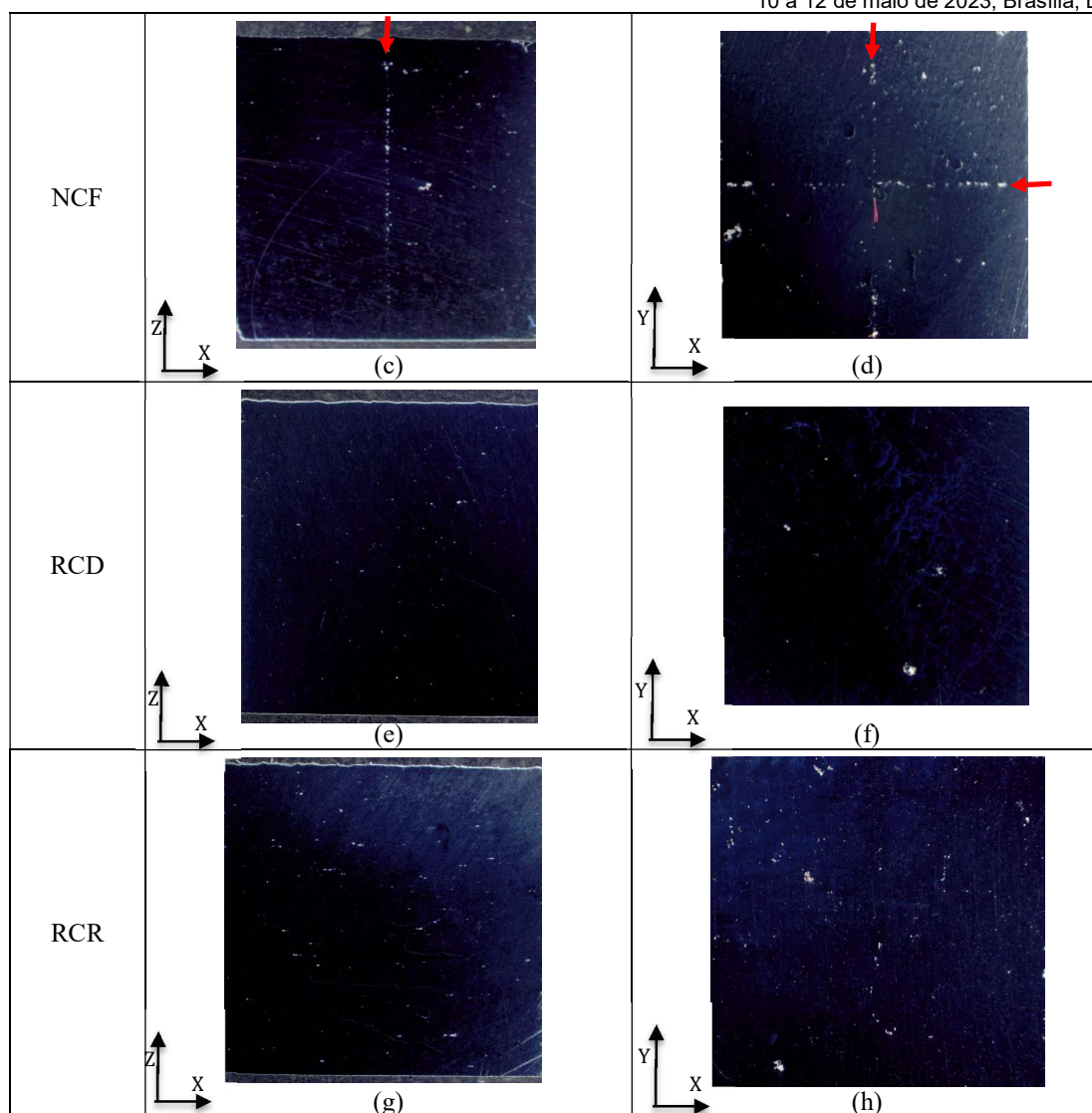
A Tabela 3 apresenta a micrografia das amostras que foram fabricadas. Como pode ser visto, a amostra NS apresenta uma diferença de tamanho e quantidade de poros entre a parte inferior e a parte superior (Tab. 3 NS a). Esta diferenciação pode também ser observada nos resultados numéricos de porosidade apresentados na Tabela 4. A razão da diferença entre a porosidade superior e inferior, é um ponto a ser investigado. No artigo Hajnys et al. (2020), pode se verificar uma possibilidade da relação de vetores longos relacionados a deformações durante a fabricação. Este problema não apareceu nas estratégias de varredura do tipo *chessboard*.

As amostras fabricadas com a estratégia NCF (NetFabb com *chessboard* fixo) não apresentaram concentração de defeitos distintos ao longo da coordenada Z (Tab. 3 NCF c e d). As peças com essa estratégia em que as ilhas ficaram alinhadas entre camadas, causou maior incidência de poros alinhados nas áreas de encontro das ilhas, que pode ser visto claramente nas imagens da Tabela 3 NCF c e d. Esses poros alinhados revelam que não houve uma fusão eficiente na região de interface entre as ilhas.

As amostras da estratégia RCD (RP3 com *cheesboard* deslocado) estão com menos poros que as demais peças, existindo somente problemas pontuais e não ocorreu porosidades centrais. Na estratégia RCR (RP3 com *cheesboard* rotacionado de 67°) também não ocorreu porosidades centrais e a dispersão dos poros seguiram o padrão da RCD.

Tabela 3 – Resultados da micrografia de cada estratégia, (fonte: Autor)

Estratégia	Micrografia	
NS		
	(a)	(b)



3.2 Avaliação da porosidade

Os valores das médias das porosidades para cada estratégia estão contidos na Tabela 4. Para facilitar a localização dos resultados, essa tabela está organizada conforme as respectivas posições das medidas definidas na Figura 2. Pode-se verificar que as amostras de NS tem uma diferença significativa entre a parte superior e a parte inferior da peça.

No geral, as estratégias de *chessboard* tiveram uma média com porosidade abaixo de 1%. A estratégia NCF obteve maior porosidade média nas áreas centrais. Conforme pode ser observado na Tab. 3 (NCF c e d) foi nessa região que os poros alinhados foram observados. Nas estratégias RCR e RCD não houve identificação de nenhum padrão de variação da porosidade.

Tabela 4. Média de porosidade por posição na seção de corte das amostras, as posições da medição estão conforme a Figura 2, somente amostras com plano XZ. (fonte: Autor)

(1a)	(1b)	(1c)	(1a)	(1b)	(1c)
0,96%	2,03%	2,12%	0,33%	0,93%	0,63%
(2a)	(2b)	(2c)	(2a)	(2b)	(2c)
1,70%	1,32%	1,55%	0,39%	0,72%	0,44%
(3a)	(3b)	(3c)	(3a)	(3b)	(3c)
0,99%	0,59%	0,79%	0,38%	0,92%	0,48%
NS			NCF		
(1a)	(1b)	(1c)	(1a)	(1b)	(1c)
0,41%	0,36%	0,72%	0,06%	0,39%	0,14%

(2a)	(2b)	(2c)	(2a)	(2b)	(2c)
0,38%	0,33%	0,60%	0,14%	0,12%	0,12%
(3a)	(3b)	(3c)	(3a)	(3b)	(3c)
0,20%	0,17%	0,46%	0,12%	0,14%	0,055%
RCR			RCD		

Na Tabela 5, pode se observar as médias de densidade relativa e o desvio padrão das medições das amostras produzidas nas 4 estratégias. Em NS o desvio padrão foi o maior, sendo causado pela diferença entre as partes inferior e superior das amostras.

Neste estudo a estratégia RCD obteve o menor valor de porosidade média de 0,17%.

Tabela 5. Média geral da porosidade de cada estratégia (fonte: Autor)

Estratégia de varredura	Média geral da densidade relativa	Desvio Padrão
NS	1,21%	0,23%
NCF	0,67%	0,11%
RCR	0,40%	0,07%
RCD	0,17%	0,08%

4. CONCLUSÕES

Neste estudo se avaliou a porosidade das amostras fabricadas em quatro estratégias de varredura para o processo produtivo L-PBF, com o material 316L. Pode se concluir, conforme análise dos resultados, que das estratégias avaliadas, a que teve a menor porosidade média foi a RCD (RP3 com *chessboard* deslocado) com 0,17% e a estratégia NS (NetFabb simples) obteve a maior porosidade média com 1,21%.

Na estratégia NCF (NetFabb com *chessboard* fixo) ocorreram linhas de poros no centro entre as ilhas do tabuleiro devido a incompleta fusão do material nas áreas entre as ilhas. Porém, as amostras das estratégias RCR e RCD, não apresentaram esta mesma falha.

Estudo futuros vão investigar novas variações de parâmetros das estratégias de ilhas e propor métodos de reduzir a porosidade nas amostras fabricadas por L-PBF.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, o laboratório de materiais da UTFPR, pela disponibilização dos equipamentos e dependências, e a empresa Alkimat, pela produção das amostras.

6. REFERÊNCIAS

- Botha, H., Marais, D., & Kloppers, C. P. (2021). THE EFFICACY OF THE INHERENT STRAIN METHOD IN DETERMINING RESIDUAL STRESS IN IN718 SLM SPECIMENS. *South African journal of industrial engineering*, 32(3), 264–278.
- Feng, S. C., Witherell, P., Ameta, G., & Kim, D. B. (2017). Activity model for homogenization of data sets in laser-based powder bed fusion. *Rapid prototyping journal*, 23(1), 137–148.
- Gouveia, R. M., Silva, F. J. G., Atzeni, E., Sormaz, D., Alves, J. L., & Pereira, A. B. (2020). Effect of Scan Strategies and Use of Support Structures on Surface Quality and Hardness of L-PBF AlSi10Mg Parts. *Materials*, 13(10), 2248.
- Hajnys, J., Pagáč, M., Měsíček, J., Petru, J., & Król, M. (2020). Influence of Scanning Strategy Parameters on Residual Stress in the SLM Process According to the Bridge Curvature Method for AISI 316L Stainless Steel. *Materials*, 13(7), 1659.
- Lu, P., Cheng-Lin, Z., Liang, W., Tong, L., & Xiao-Cheng, L. (2019). Research on mechanical properties and microstructure by selective laser melting of 316L stainless steel. *Materials Research Express*, 6(12), 1265.
- Luo, Z., & Zhao, Y. (2018). A survey of finite element analysis of temperature and thermal stress fields in powder bed fusion additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 21, 318–332.
- Pokorný, P., Václav, Š., Petru, J., & Kritikos, M. (2021). Porosity Analysis of Additive Manufactured Parts Using CAQ Technology. *Materials*, 14(5), 1142.
- Qiu, C., Wang, Z., Aladawi, A. S., Kindi, M. Al, Hatmi, I. Al, Chen, H., & Chen, L. (2019). Influence of Laser Processing Strategy and Remelting on Surface Structure and Porosity Development during Selective Laser Melting of a Metallic Material. *Metallurgical and materials transactions. A, Physical metallurgy and materials science*, 50(9), 4423–4434.

Wits, W. W., Carmignato, S., Zanini, F., & Vaneker, T. H. J. (2016). Porosity testing methods for the quality assessment of selective laser melted parts. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65(1), 201–204. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.054>

Yusuf, S., Chen, Y., Boardman, R., Yang, S., & Gao, N. (2017). Investigation on Porosity and Microhardness of 316L Stainless Steel Fabricated by Selective Laser Melting. *Metals (Basel)*, 7(2), 64.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

ANALYSIS OF SAMPLES MANUFACTURED IN 316L STAINLESS STEEL BY L-PBF VARYING SCANNING STRATEGIES

Maicow Roney Fiedler da Costa Machado

Neri Volpato

Ricardo Dutra da Silva

João Victor Laskoski

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Rua Heitor Alencar Furtado, 5000 – Curitiba -PR
maicow@alunos.utfpr.edu.br, nvolpato@utfpr.edu.br, ricardodutr@gmail.com, laskoski@alunos.utfpr.edu.br

Arthur Kretzer

José Maria Mascheroni

Alkimat Tecnologia Ltda, Rua Abelardo Manoel Peixer, 142 - Barreiros, São José - SC
arthur.kretzer@alkimat.com.br, jose@alkimat.com.br

Abstract. Among the additive manufacturing processes for metal, the Laser-Powder Bed Fusion (L-PBF) technology stands out, which consists of sweeping a laser over a bed of metallic powder, melting the material, following a toolpath. Among the main problems of the L-PBF process is the appearance of pores and voids, which affect the mechanical strength of the material. This study focused on evaluating the effect of some laser scanning strategies on the relative density of the material, evaluating its porosity. The strategies analyzed were: zigzag with simple lines (long vectors) and chessboard, maintaining it fixed, and applying rotation and displacement between layers. The strategies were generated by a commercial software and a research one, the second being an internal development in the group, presenting some differences in relation to the commercial software. The metallic powder chosen for the study was 316L and the samples were manufactured in an Alkimat 200 machine. The samples were analyzed under an optical microscope, where the digitized images of the sections of interest were obtained. In order to analyze the porosity of the material, the analysis of relative density was used by measuring the pixel of the collected images. The results revealed the influence of the strategies studied in the appearance of systematic pores and this shows the importance of defining the scanning strategy in the process planning of the L-PBF of 316L steel.

Keywords: Laser Powder Bed Fusion; 316L; Scanning strategy; Additive manufacturing; Porosity

RESPONSIBILITY NOTICE

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