

ANÁLISE MICROESTRUTURAL E PERFIL DE MICRO-DUREZA DE PEÇAS DE AISI 316L FABRICADAS POR MANUFATURA HÍBRIDA

Gabriel Takehisa Uchida ¹; Ed Claudio Bordinassi ²

¹ Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

² Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *O crescimento da manufatura aditiva em metais se dá pela constante procura e pesquisa por processos de fabricação mais eficientes, ainda mais quando esta busca é impulsionada por um grande mercado e pela chamada Indústria 4.0. Dentre as vantagens da manufatura aditiva pode-se citar: a rápida prototipagem, a grande liberdade geométrica, entre outros. Contudo, uma de suas maiores limitações é o fator acabamento superficial, sendo insuficiente com relação a alguns padrões exigidos. O objetivo deste trabalho foi estudar os efeitos da usinagem em amostras feitas a partir de manufatura híbrida (manufatura aditiva + fresamento) por meio da caracterização microestrutural, medição de microdureza e análise estatística dos resultados através de software Minitab. O ataque utilizado para as amostras não mostrou muito sobre as possíveis fases presentes, tanto em análise por microscópio quanto em microscópio eletrônico de varredura, uma vez que a microestrutura obtida difere daquela obtida por processos convencionais, mas foram percebidas poças de fusão e presença de maclas na região mais próxima da superfície. Já a análise em Minitab revelou que a microdureza variou em função dos parâmetros de usinagem e a potência de laser utilizadas.*

Introdução

A manufatura aditiva vem crescendo com o decorrer dos anos devido às novas necessidades nos processos de desenvolvimento de produtos. Pode-se citar, para tal processo, algumas vantagens em relação aos métodos convencionais de manufatura, em especial a usinagem: a grande liberdade geométrica na fabricação, o pouco desperdício de material, a dispensa de dispositivos de fixação e troca de ferramentas durante a fabricação. No entanto, a manufatura aditiva possui algumas limitações que impedem uma maior difusão na produção de peças comerciais, sendo uma delas o seu acabamento superficial, que, em grande parte das vezes é inferior aos das peças obtidas por processos convencionais, tal como a usinagem (VOLPATO et al, 2017).

Dentre os diferentes processos de manufatura aditiva, ao se tratar de materiais metálicos, os mais relevantes na indústria são: a Fusão por Feixe de Elétrons, a Deposição de Metal a Laser e a Fusão Seletiva a Laser (FSL), sendo esta última a mais difundida e utilizada no mundo (MONTUORI et al, 2020). No processo FSL, o pó metálico é aplicado na forma de uma fina camada sobre um substrato, onde um laser de alta energia funde localmente esta fina camada, formando a primeira camada da peça de acordo com um desenho tridimensional dela. O substrato, sobre o qual a camada foi formada, é rebaixado e uma nova camada de pó é aplicada, sendo seletivamente fundida e rapidamente solidificada no formato desejado (MONTUORI et al, 2020). Ao final, o pó não fundido é removido, e parte pode ser reutilizado, visando reduzir o desperdício de matéria-prima. A desvantagem, em geral, de todos os processos de manufatura aditiva baseados em laser é o custo relativamente elevado dos equipamentos necessários ao processo e sua baixa produtividade (MONTUORI et al, 2020).

Os processos de manufatura híbrida permitem produzir de maneira mais eficiente produtos com maior qualidade, com relação à geometria e acabamento superficial, pois esta técnica aproveita as vantagens de combinar processos de manufatura aditiva e subtrativa (ZHU, DHOKIA, & NEWMAN, 2019). Em termos de desenvolvimento de plataformas e estudos de manufatura híbrida, existe uma área emergente com poucos trabalhos reportados até a data, todavia, existem alguns estudos sobre o uso de robôs com capacidade para combinar técnicas de adição e remoção de material (KEATING & OXMAN, 2013; LI, HAGHIGHI, & YANG, 2018).

Aços inoxidáveis, como o AISI 316L, são amplamente utilizados em indústria devido à sua alta resistência mecânica, ductilidade, capacidade de encruamento e resistência à corrosão. No entanto,

quando se trata de manufatura aditiva, devido à matéria-prima usada e o rápido resfriamento envolvido com o processo, a microestrutura do material varia muito em comparação ao material convencional, além disso os diferentes tipos de manufatura aditiva também influenciam em sua microestrutura (NIKOLAOS TAPOGLOU & JOSEPH CLULOW, 2020).

Parâmetros confiáveis são utilizados para processos específicos e diferentes tipos de pó. A potência de laser, velocidade de varredura e a taxa de deposição de pó são fatores que determinam a qualidade de construção e propriedades físicas do material (NIKOLAOS TAPOGLOU & JOSEPH CLULOW, 2020). Segundo Zhang et al, 2019, a elasticidade e a resistência à tração diminuem ao aumentar a potência do laser. Diminuir a velocidade de varredura, assim como uma maior entrada de calor e uma taxa de resfriamento mais lenta levam à formação de uma microestrutura grosseira.

Uma das principais vantagens do aço 316L é o fato de suas propriedades mecânicas tornarem este adequado para diferentes aplicações de engenharia. O inoxidável 316L conta com uma estrutura cristalina cúbica de face centrada, demonstrando alta resistência em diversas condições. Isso faz com que tenha uma alta ductilidade (40% de alongamento na tração) (M.A. BEVAN ET AL, 2017). Ademais, sua resistência à corrosão torna-o adequado para aplicações marinhas quando comparado com outros tipos de aço inoxidável austeníticos, como o austenítico AISI 304.

O diferencial deste aço é ser uma alternativa de baixo carbono desejável para grandes aplicações de soldagem, dado a sua imunidade às precipitações de carbonetos de contorno de grão. (M.A. BEVAN ET AL, 2017).

O objetivo deste trabalho é estudar a influência da manufatura híbrida (manufatura aditiva + fresamento) na microestrutura e perfil de microdureza em peças de AISI 316L.

Material e Métodos

Os corpos de prova foram gerados na máquina de manufatura aditiva “3D Direct Metal Laser Sintering” Modelo EOSINT M280, localizada no Centro de Pesquisas SEAM da Waterford Institute of Technology – Irlanda.

Foram geradas peças nas dimensões de (20 x 20 x 15) mm, com potências de laser de 160 W e 190 W.

A usinagem das peças foi feita no Centro de Usinagem Romi Discovery 560, no Instituto Mauá de Tecnologia-São Caetano do Sul, com cabeçote de faceamento CoroMill 245 com 60 mm de diâmetro e 5 arestas de corte, com insertos SANDVIK R245-12 T3 K-MM 2030. A análise da microestrutura foi feita utilizando microscópio óptico Modelo Olympus BX60M no Instituto Mauá de Tecnologia-São Caetano do Sul, assim como medições de microdureza, utilizando Microdurômetro Mitutoyo HM-100.

Após receber os corpos de prova do Waterford Institute of Technology, esses foram usinados variando os seguintes padrões para realizar os ensaios:

- Velocidade de corte: 170 e 210 m/min;
- Avanço: 0,1 e 0,2 mm/rot;
- Profundidade de corte: 0,35 e 0,7 mm;
- Fluido de corte: fluido em abundância e sem fluido;

A microestrutura, das peças que tiveram a curva de microdureza levantada, foi investigada a fim de verificar influências da usinagem e altura da camada afetada. Para a preparação metalográfica das amostras a seguinte:

- Embutimento a quente em baquelite com retenção de borda;
- Lixamento úmido: lixa de SiC com as seguintes granas: #220 (5 min); #320 (4 min); #600 (4 min);
- Polimento: pasta de diamante com os seguintes tamanhos de abrasivos: 9 µm (5 min); 6 µm (5 min); 3 µm (5 min);
- Ataque eletrolítico para revelar a microestrutura com solução a 10 % de persulfato de amônio – 6 V durante aproximadamente 15 s;
- Testes iniciais: solução a 10 % de ácido oxálico a 4,5 V durante aproximadamente 50 s;

-Observação da microestrutura com aumentos de 50X, 100X e 200X da superfície e de regiões do núcleo dos corpos de prova;

A análise da microestrutura foi do topo usinado para o núcleo das peças, comparando os efeitos dos diferentes padrões de usinagem e manufatura aditiva utilizados. Posteriormente algumas amostras foram levadas ao laboratório de caracterização de materiais-LCM, localizado no SENAI Mario Amato-São Bernardo do Campo. As amostras foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura (TESCAN). Tal equipamento permite obter imagem de elétrons retro espalhados (análise de composição química) e de elétrons secundários (análise topográfica). As avaliações de estrutura dos materiais podem ser avaliadas com capacidade de aumento de até 30.000X

Foram realizadas 12 medições de microdureza Vickers em cada corpo de prova, com carga de 25gf, iniciando no topo usinado da peça, com um passo de 20 micrometros até a décima medição. Após 10 medições feitas, o passo foi de 50 micrometros e terminando no seu núcleo. Esse processo foi repetido 4 vezes para cada amostra. Após a medição das microdurezas, os dados foram tratados e analisados estatisticamente através de software Minitab.

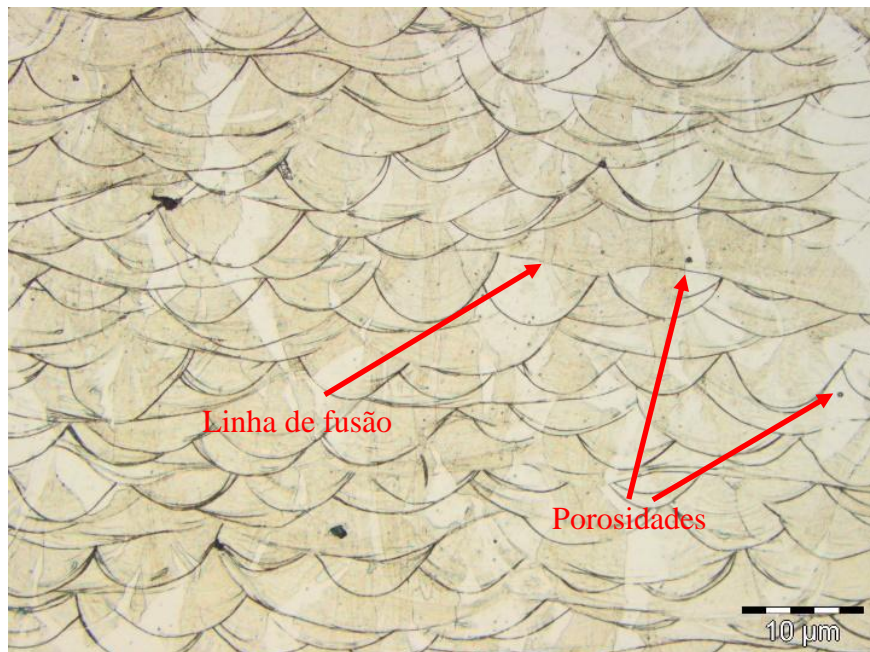
Resultados e Discussões

A análise da microestrutura dos corpos de prova revelou uma maior presença de poros (pequenos pontos esféricos de porosidades, possivelmente de gás, gerados durante o processo de DLMS e fusão incompleta), nos corpos que utilizaram potência de laser 160 W (Figura 1 e Figura 2), é possível também identificar as linhas de fusão (essas sendo bem contínuas) que demarcam a troca de nível da máquina de manufatura aditiva (Figura 1 e Figura 2).

O ataque utilizado não resultou em grandes revelações acerca das fases presentes no material. Ainda assim, pode-se alegar que a estrutura mostrada basicamente é austenítica γ alongada, assim como pode-se visualizar na Figura 3, que revela a microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico, obtido a partir de processos convencionais de manufatura (SENATORE, FINZETTO E PEREA, 2007). Os resultados das amostras feitas a partir da Manufatura Híbrida foram semelhantes aos relatados por VALENTE, SSOMERS e CHRISTIANSEN (2018), com imagens metalográficas muito semelhantes, que diferem ligeiramente das imagens vistas em uma microestrutura típica de um austenítico 316L por apresentar poças de fusão, e porosidades por conta do processo de manufatura aditiva, por exemplo. CHIMMAT e SRINIVASAN (2019) também mostram imagens metalográficas de mesmo conteúdo. Ainda assim, é possível observar que há uma presença maior de maclas nos topos usinados a partir de parâmetros mais altos, especialmente em corpos onde não foi utilizado fluido lubrificante, como pode-se observar na Figura 4.

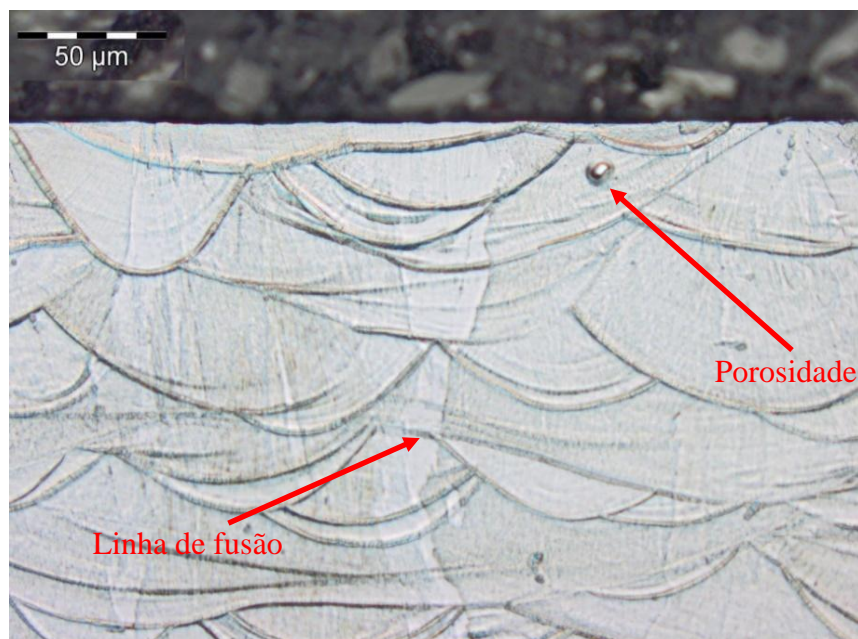
Inicialmente foram feitos ataques do tipo “oxálico” e não foram reveladas alterações significativas na microestrutura. Na sequência se tentou outro tipo de ataque utilizando persulfato de amônia, também sem grandes revelações. Na Figura 5 é possível observar a microestrutura com ataque oxálico e na Figura 6 com ataque com persulfato de amônia. Não foi possível perceber nenhuma alteração comparando a superfície usinada com o núcleo do material.

Figura 1-Núcleo da amostra feita com potência de 160W (aumento de 200 vezes)



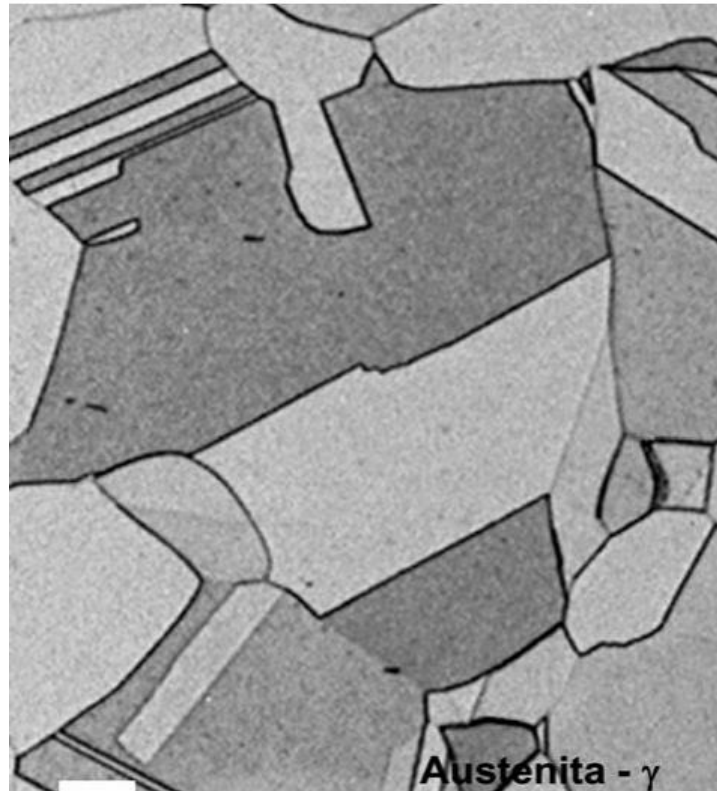
Fonte: Próprio autor

Figura 2–Amostra com usinagem moderada 160 W – a seco – ataque oxálico – aumento de 500X



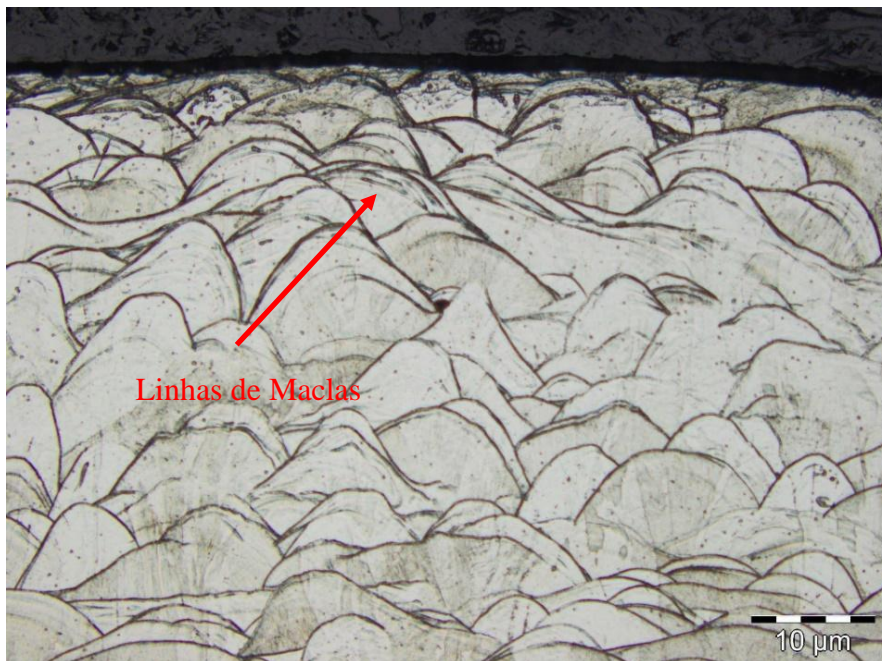
Fonte: Próprio Autor

Figura 3-Microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico AISI 316L



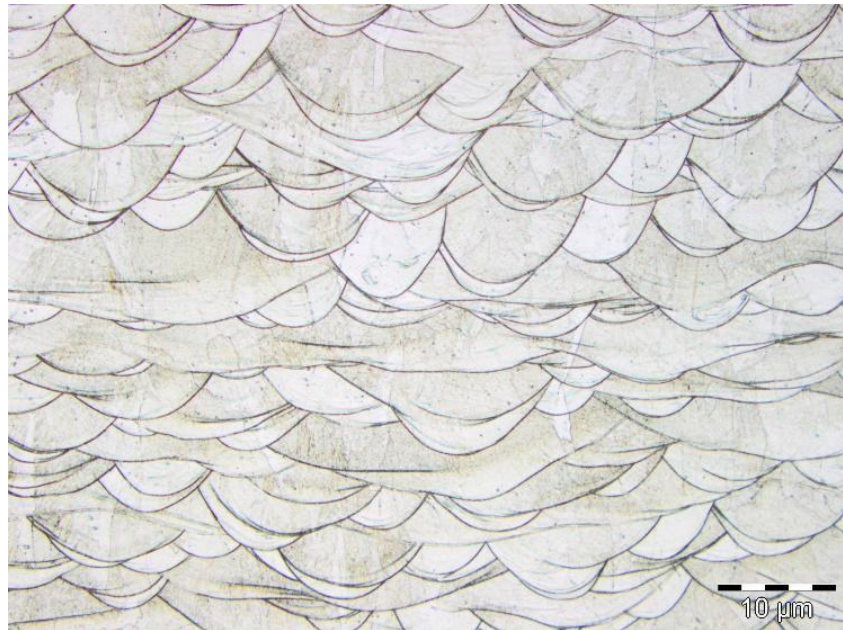
Fonte: Senatore, Finzetto e Perea (2007)

Figura 4- Maclas de amostra com usinagem severa 190 W – Aumento de 200x – Ataque persulfato de Amônio



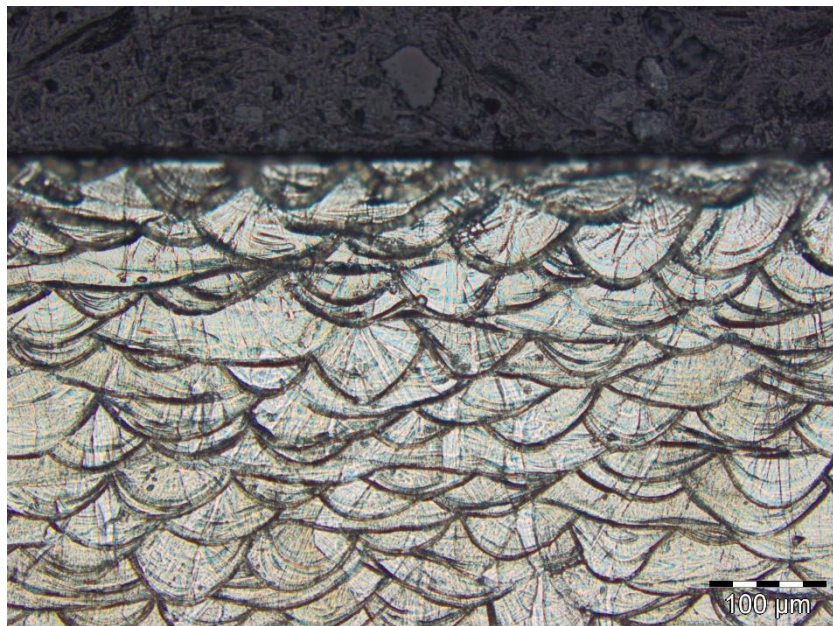
Fonte: Próprio Autor

Figura 5-Núcleo da amostra feita com potência de 190W (aumento de 200 vezes)



Fonte: Próprio Autor

Figura 6-Amostra com usinagem severa 160 W – a seco – ataque persulfato de amônia – aumento de 200X



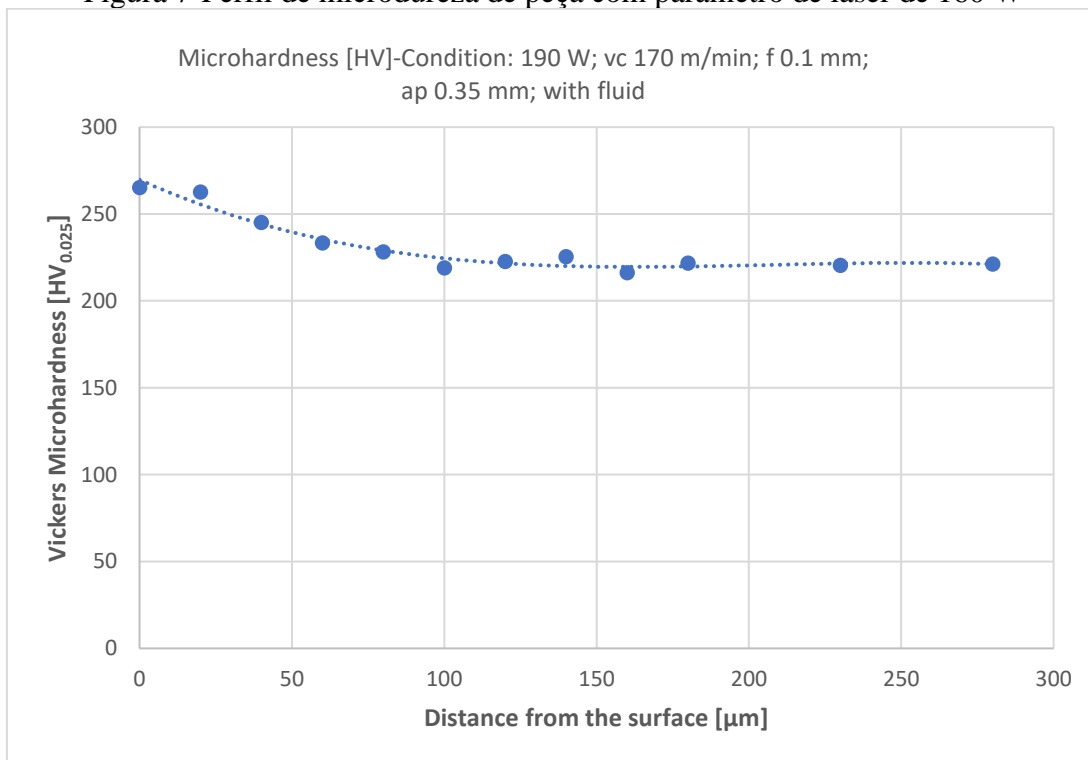
Fonte: Próprio Autor

Sobre a aferição da microdureza foi possível observar um padrão diferente para cada parâmetro de potência de Laser

A partir da obtenção da média no topo usinado (até 100 micrometros da superfície) e do núcleo (de 120 a 280 micrometros da superfície), nota-se que, para a potência de 190 W, as microdurezas das peças que não utilizaram fluido lubrificante são expressivamente maiores que as que utilizaram o fluido. Já para a potência de 160 W a utilização do fluido demonstra que proporciona um crescimento na microdureza. A Figura 7, demonstra o comportamento da microdureza ao longo do

perfil de uma peça que utilizou a potência de laser de 160 W.

Figura 7-Perfil de microdureza de peça com parâmetro de laser de 160 W



Fonte: Próprio Autor

Tabela 1 – Médias das aferições de microdureza para todas as amostras (Vickers)

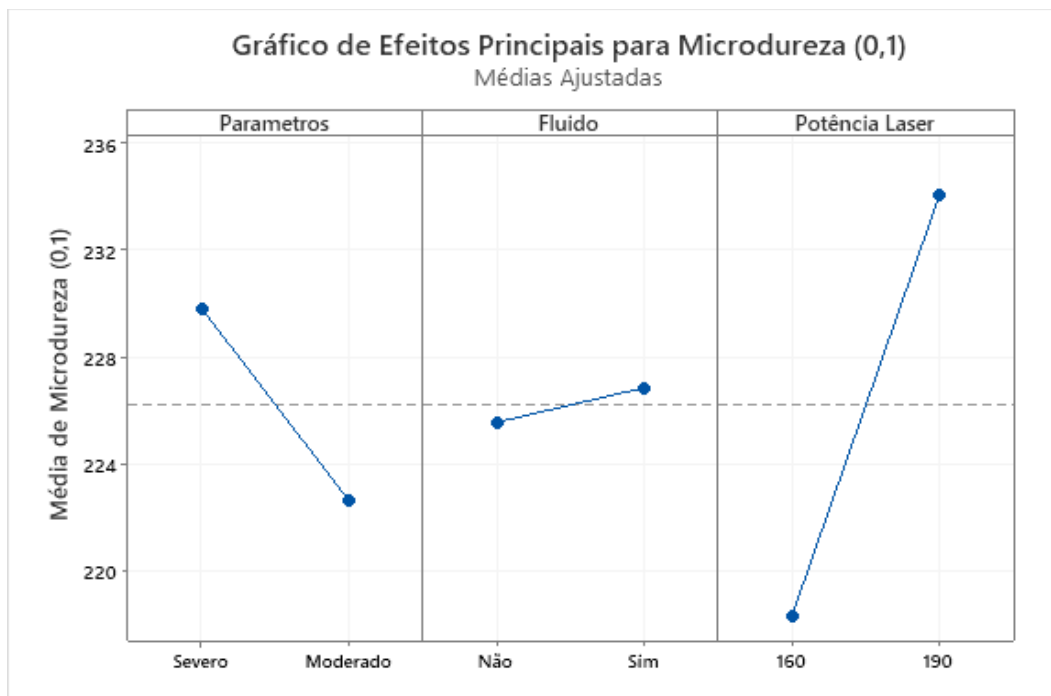
	Topo Usinado	Núcleo	Desvio Padrão
Condição: 190 W; vc 210 m/min; f 0,2 mm/rev; ap 0,70 mm; sem fluido	250,67	231,39	13,75
Condição: 190 W; vc 210 m/min; f 0,2 mm/rev; ap 0,70 mm; com fluido	242,33	221,33	17,8
Condição: 190 W; vc 170 m/min; f 0,1 mm/rev; ap 0,35 mm; sem fluido	236,28	241,33	6,28
Condição: 190 W; vc 170 m/min; f 0,1 mm/rev; ap 0,35 mm; com fluido	207,00	201,92	11,04
Condição: 160 W; vc 210 m/min; f 0,2 mm/rev; ap 0,70 mm; sem fluido	205,33	209,50	6,98
Condição: 160 W; vc 210 m/min; f 0,2 mm/rev; ap 0,70 mm; com fluido	220,89	221,33	5,13
Condição: 160 W; vc 170 m/min; f 0,1 mm/rev; ap 0,35 mm; sem fluido	209,92	210,96	3,32
Condição: 160 W; vc 170 m/min; f 0,1 mm/rev; ap 0,35 mm; com fluido	237,17	226,71	13,02

Fonte: Próprio Autor

As análises em software Minitab dos gráficos fatoriais demonstram que há uma tendência estatística de variação de microdureza ao se alterar os parâmetros de usinagem (severo e moderado) e quando há diferentes potência de Laser. No entanto, não se pode afirmar que o uso do fluido

lubrificante tenha interferência, uma vez que seu gráfico fatorial tem um comportamento praticamente linear em relação aos outros parâmetros que possam interferir nas medições, como demonstrado na Figura 8.

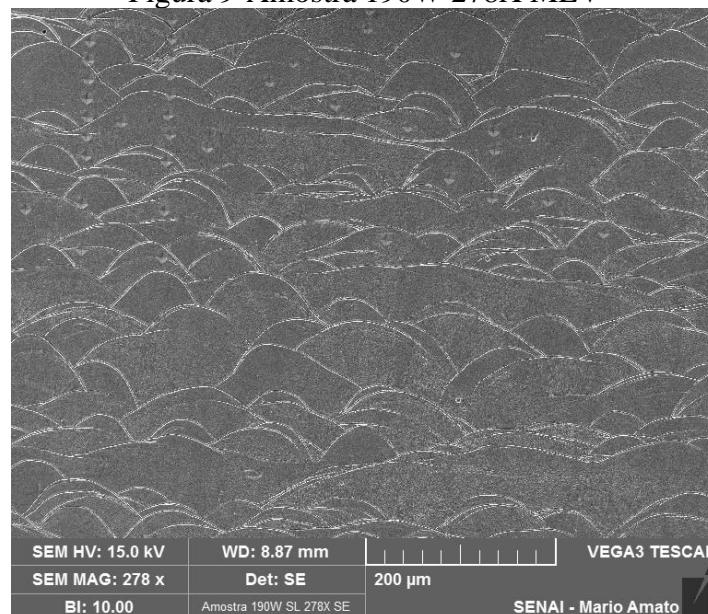
Figura 8– Efeitos estatísticos dos parâmetros de usinagem



Fonte: Próprio Autor

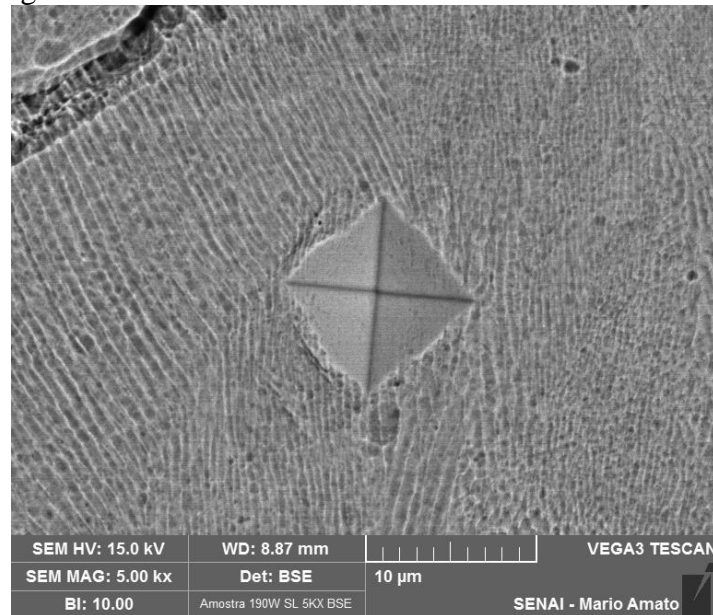
As análises das amostras feitas em MEV não revelaram novidades com relação à análise feita anteriormente em microscópio metalográfico. Foi possível identificar microestrutura do tipo austenítica alongada γ como mostrado na Figura 9 e Figura 10.

Figura 9-Amostra 190W 278X MEV



Fonte: Próprio Autor

Figura 10-Detalhe entalhe ensaio de Microdureza Vickers



Fonte: Próprio Autor

Conclusões

Com os ataques utilizados neste trabalho não foi possível identificar alterações microestruturais do núcleo do material, com relação a superfície usinada, nem quanto a microestrutura de 316L manufaturado por métodos mais convencionais. Porém foi possível notar as linhas de fusão do material e uma quantidade maior de maclas na parte superior da peça, próxima à superfície usinada e pequenos poros ao longo da amostra.

Os parâmetros de corte influenciaram nos valores de microdureza. Para parâmetros moderados e potência de laser de 160W menores valores de microdureza foram encontrados.

Referências Bibliográficas

- Bevan, M. A., Ameri, A. A. H., East, D., Austin, D. C., Brown, A. D., Hazell, P. J., & Escobedo-Diaz, J. P. (2017). Mechanical Properties and Behavior of Additive Manufactured Stainless Steel 316L. *Minerals, Metals and Materials Series, Part F7*(February), 577–583.
- CHIMMAT, Manojakumar; SRINIVASAN, Dheepa. Understanding the Residual Stress in DMLS CoCrMo and SS316L using X-ray diffraction. 2nd International Conference on Structural Integrity and Exhibition 2018, [S. l.], p. 746-757, 14 ago. 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/333705957_Understanding_the_Residual_Stress_in_DMLS_CoCrMo_and_SS316L_using_X-ray_diffraction. Acesso em: 10 dez. 2021.
- DebRoy, T., Wei, H. L., Zuback, J. S., Mukherjee, T., Elmer, J. W., Milewski, J. O., Beese, A. M., Wilson-Heid, A., De, A., & Zhang, W. (2018). Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science*, 92, 112–224.
- Li, J., Cheng, X., Li, Z., Zong, X., Chen, X. H., Zhang, S. Q., & Wang, H. M. (2019). Microstructures and mechanical properties of laser additive manufactured Al-5Si-1Cu-Mg alloy with different layer thicknesses. *Journal of Alloys and Compounds*, 789, 15–24.
- Li, L., Haghighi, A., & Yang, Y. (2018). A novel 6-axis hybrid additive-subtractive manufacturing process: Design and case studies. *Journal of Manufacturing Processes*, 33(May), 150–160.
- Montuori, R. A. M., Figueira, G., Cataldi, T. P., Alcântara, N. G. de, Bolfarini, C., Coelho, R. T., & Gargarella, P. (2020). Manufatura Aditiva de Aço Inoxidável 316L por Fusão Seletiva a Laser. *Soldagem & Inspeção*, 25, 1–15.

- Volpato, N, Munhoz, A. L. J., Costa, C. A., Ahrens, C. H., Carvalho, J. de, Santos, J. R. L. dos, Silva, J. V. L. da Foggiatto, J. A., Lima, M. S. F. de. (2017). Manufatura aditiva (3D Printing). Manufatura Aditiva Tecnologias e Aplicações Da Impressão 3D, 400.
- SENATORE, Marcelo; FINZETTO, Leandro; PEREA, Eduardo. Estudo comparativo entre os aços inoxidáveis dúplex e os inoxidáveis AISI 304L/316L. Ligas Inoxidáveis, Ouro Preto, p. 175-181, 18 jan. 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/p6mS8Dm8YptMBckbjqPCwmM/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 26 nov. 2021.
- Tapoglou, N., & Clulow, J. (2021). Investigation of hybrid manufacturing of stainless steel 316L components using direct energy deposition. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 235(10), 1633–1643.
- Tapoglou, N., & Clulow, J. (2021). Investigation of hybrid manufacturing of stainless steel 316L components using direct energy deposition. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 235(10), 1633–1643.
- Valente, E. H., Christiansen, T. L., & Somers, M. A. J. (2018). High-temperature solution nitriding and lowtemperature surface nitriding of 3D printed stainless steel. Paper presented at 2018 European Conference on Heat Treatment (ECHT 2018), Friedrichshafen, Germany.