

ESTUDO DA MICROESTRUTURA E PERFIL DE MICRODUREZA DO AISI 316L FABRICADO POR MANUFATURA HÍBRIDA

Gabriel Uchida, 19.00969-0@maua.br¹

Vanessa Seriacopi, vanessa.seriacopi@maua.br¹

Adalto de Farias, adalto.farias@maua.br-mail¹

Marcelo Otávio dos Santos, marcelo.santos@maua.br¹

Sergio Luis Rabelo de Almeida, prof.sergio@mackenzie.br²

Éd Claudio Bordinassi, ecb@maua.br¹

¹Instituto Mauá de Tecnologia, Praça Mauá, 01 – São Caetano do Sul/SP – 09580-900

²Universidade Presbiteriana Mackenzie, Rua da Consolação, 930 - São Paulo/SP - 01302-907

Resumo: A demanda do século XXI para inovar em direção a revolução nos produtos é percebida claramente e a manufatura aditiva, amplamente conhecida como impressão 3D, é um processo de fabricação com tecnologia digital direta, onde um componente pode ser produzido camada por camada a partir do modelo 3D. 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 acabamento superficial, e dependendo da utilização da peça, um processo posterior, que pode ser polimento ou usinagem, por exemplo, é necessário para melhorar o acabamento superficial. O processo neste caso passa a ser chamado de manufatura híbrida. O objetivo deste trabalho foi estudar os efeitos dos parâmetros de fabricação em amostras feitas a partir de manufatura híbrida (manufatura aditiva + fresamento) por meio da caracterização microestrutural e medição do perfil de microdureza Vickers, da superfície usinada para o núcleo do material. As peças foram impressas com duas potências de laser (160 W e 190 W) e usinadas em um Centro de Usinagem com dois conjuntos de parâmetros: (vc: 170 m/min; f: 0,1 mm/rot; ap: 0,35 mm) e (vc: 210 m/min; f: 0,2 mm/rot; ap: 0,7 mm). Os ataques utilizados para revelar a microestrutura foram uma solução persulfato de amônio e outra com 10% de ácido oxálico, e as análises foram feitas através de microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura. Os resultados da microestrutura não indicaram alterações de fases significativas ao longo da microestrutura, mas foram observadas poças de fusão em diversas áreas e a presença de uma tendência ao refino da microestrutura próximo à superfície usinada. As medições de microdureza mostraram discreta diferença em função da potência de laser utilizada ao longo do núcleo do material e aumento na região próxima à superfície usinada. As conclusões mostram que a usinagem afeta o perfil de microdureza e tem pouca influência na microestrutura do material. A potência de laser utilizada também afeta os valores de microdureza.

Palavras-chave: manufatura aditiva, usinagem, perfil de microdureza, aço AISI 316L

1. INTRODUÇÃO

Na sociedade contemporânea, onde cada vez mais se faz necessário discutir técnicas e tecnologias de manufatura, processos mais eficientes, que atendam as mais complexas geometrias e que passem nos mais rigorosos processos de controle de qualidade, o avanço de tecnologias inovadoras como o processo de manufatura aditiva e o aprimoramento de técnicas mais tradicionais de manufatura como usinagem, demonstram-se extremamente pertinentes.

Nas duas últimas décadas, foi observado um notório crescimento na diversificação de aplicações de aços inoxidáveis austeníticos, dentre eles pode-se citar aplicações na indústria petroquímica, automotiva, na indústria de geração de energia e bicomponentes. Esse crescimento é um reflexo de suas características físico-químicas, já que são aços de estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC), e possuem excelentes propriedades como resistência à corrosão intergranular, sua resistência mecânica, ductilidade e capacidade de encruamento.

Tecnologias tradicionais para manufaturar componentes, como soldagem, fundição e técnicas de deformação plástica como a extrusão e forjamento são usadas em aços inoxidáveis, mas essas não são capazes de produzir componentes com altos níveis de complexidade geométrica (Saboori et al., 2020).

Ao se tratar de manufatura aditiva, pode-se citar que esta vem crescendo ao longo do tempo, uma vez que este método possui algumas vantagens em relação aos processos mais convencionais, sobretudo a usinagem, como a grande liberdade geométrica na fabricação, o desperdício quase nulo de matéria-prima, a não necessidade de trocas de ferramentas e dispositivos de fixação durante a concepção de uma peça, dentre outros. Mas tal técnica também tem suas limitações, fatores esses que muitas vezes impedem uma maior difusão na produção comercial de peças, dessa maneira, pode-se citar

a pouca produtividade desse processo, seu custo relativamente elevado ainda, e o pobre acabamento superficial obtido, principalmente se comparada à usinagem (Volpato et al., 2017).

Ainda sobre manufatura aditiva, explorando esse setor aplicado aos metais, existem três processos mais relevantes, sendo eles o de 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, é aplicada sobre um substrato uma fina camada de pó metálico, e após, um laser de alta energia funde localmente esta fina camada, formando a primeira camada da peça de acordo com a geometria tridimensional dela. Assim, o substrato é rebaixado e mais uma camada de pó é aplicada, sendo rapidamente fundida e solidificada (Montuori et al., 2020).

Dentro do campo de estudo da manufatura aditiva de metais, diferentes parâmetros de fabricação são utilizados para processos específicos e diferentes tipos de pó. Para produzir uma peça maciça e densa da maneira desejada, o processo de seleção de parâmetros como potência do laser, velocidade de varredura, foco do laser, espaçamento entre camadas, avanço lateral, taxa de alimentação de pó e atmosfera protetora têm papéis importantes e, portanto, devem ser otimizados cuidadosamente (Saboori et al., 2020). De fato, defeitos como porosidade residual, trincas e a oxidação são intrínsecos ao processo e têm uma influência significativa nos aspectos termofísicos e mecânicos dos componentes, bem como sua resistência à corrosão (Saboori et al., 2020).

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 (Tapoglou et al., 2020). A rigidez 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 mais grosseira (Li et al., 2019).

Combinar a Manufatura Aditiva e CNC em um processo de hibridização de manufatura (aditiva e subtrativa), demonstra-se um passo lógico para atingir tecnologias “Multi-tasking”. (Lorenz et al., 2015). A premissa dessa união é realizar, de maneira mais eficiente, produtos com maior qualidade, especialmente em parâmetros de geometria e acabamento superficial, uma vez que a hibridização une as vantagens de ambos os processos (Zhu et al., 2019).

Este trabalho, tem como objetivo estudar os efeitos dos parâmetros de fabricação em amostras feitas a partir de manufatura híbrida (manufatura aditiva + fresamento) por meio da caracterização microestrutural e medição do perfil de microdureza Vickers, da superfície usinada para o núcleo do material.

2. MATERIAIS 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 20x20x15 mm, com potências de laser de 160 W e 190 W. A Figura 1 mostra uma das peças fabricadas.



Figura 1. Corpo de prova fabricado pelo processo de manufatura aditiva.

A usinagem das peças foi feita no Centro de Usinagem Romi Discovery 560, no Instituto Mauá de Tecnologia, com cabeçote de faceamento CoroMill 245 com 60 mm de diâmetro e 5 arestas de corte, e insertos SANDVIK R245-12 T3 K-MM 2030. O fluido de corte utilizado foi o Boreal BL da YPF, diluído na proporção de 1/19 em água, direcionado na superfície da peça no ponto de contato entre a peça/ferramenta.

Foram utilizados dois conjuntos de parâmetros de corte para os ensaios:

- 1) **Moderados:** - Velocidade de corte: 170 m/min; Avanço: 0,1 mm/dente; Profundidade de corte: 0,35 mm; -Fluido de corte: fluido em abundância e sem fluido;

- 2) **Severos:** - Velocidade de corte: 210 m/min; Avanço: 0,1 mm/dente; Profundidade de corte: 0,7 mm; Fluido de corte: fluido em abundância e sem fluido;

Para as análises de microestrutura e microdureza, as peças foram embutidas, lixadas e polidas. O embutimento foi feito à quente em baquelite com retenção de borda, e o lixamento úmido foi feito com lixas de SiC com as seguintes granas: #220 (5 min); #320 (4 min); #600 (4 min). O polimento foi feito com pasta de diamante com os seguintes tamanhos de abrasivos: 9 μm (5 min); 6 μm (5 min); 3 μm (5 min).

Os ataques utilizados foram:

- Eletrolítico com solução de persulfato de amônio – 6 V durante aproximadamente 15 s;
- Eletrolítico com solução a 10 % de ácido oxálico a 4,5 V durante aproximadamente 50 s;

A análise da microestrutura foi feita utilizando microscópio óptico Modelo Olympus BX60M no Instituto Mauá de Tecnologia, com aumentos de 50X, 100X e 200X da superfície e de regiões do núcleo dos corpos de prova.

As medições de microdureza Vickers, foram feitas utilizando Microdurômetro Mitutoyo HM-100, com carga de 25 g, em ambiente com temperatura controlada de 20°C, e seguindo a norma ABNT NBR ISO 6507-1. Foram realizadas 12 medições de microdureza em cada peça, iniciando no topo usinado da peça, com distanciamento de 20 μm até a décima medição. Após 10 medições feitas, o passo foi de 50 μm 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.

As análises por microscópio eletrônico de varredura (MEV) foram feitas pelo equipamento Modelo Vega 3 LMS, da Tescan, com tensão de 15 Kv.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise da microestrutura dos corpos de prova revelou a presença de alguns poros esféricos ao longo do substrato do material, defeitos comuns em peças geradas por MA, possivelmente por aprisionamento de gás, gerado durante o processo de DLMS e fusão incompleta. Nas peças geradas com potência de laser de 160 W a presença destes poros foi mais acentuada. Nas Figuras 2 e 3, é possível também identificar as linhas de fusão (essas sendo bem contínuas) que demarcam a troca de nível da máquina de manufatura aditiva e fusão.

Foram utilizados ataques do tipo “oxálico” e na sequência se tentou outro tipo de ataque utilizando persulfato de amônio, conforme descrito previamente, e nenhum deles revelou alterações microestruturais significativas ao longo do substrato e na comparação deste com a superfície usinada. A estrutura mostrada basicamente é austenítica alongada, que revela a microestrutura típica de um aço inoxidável austenítico, obtido a partir de processos convencionais de manufatura e relatados por Senatore et al, 2007. Os resultados das amostras feitas a partir da Manufatura Híbrida também foram semelhantes aos relatados por Valente, Somers e Christiansen (2018), com imagens metalográficas bem parecidas. Chimmatt e Srinivasan (2019) também mostram imagens metalográficas de mesmo conteúdo. Ainda assim, é possível observar que há uma tendência ao refino da microestrutura nos topos usinados a partir de parâmetros mais altos, especialmente em corpos onde não foi utilizado fluido lubrificante, como pode-se observar na Fig. 4.

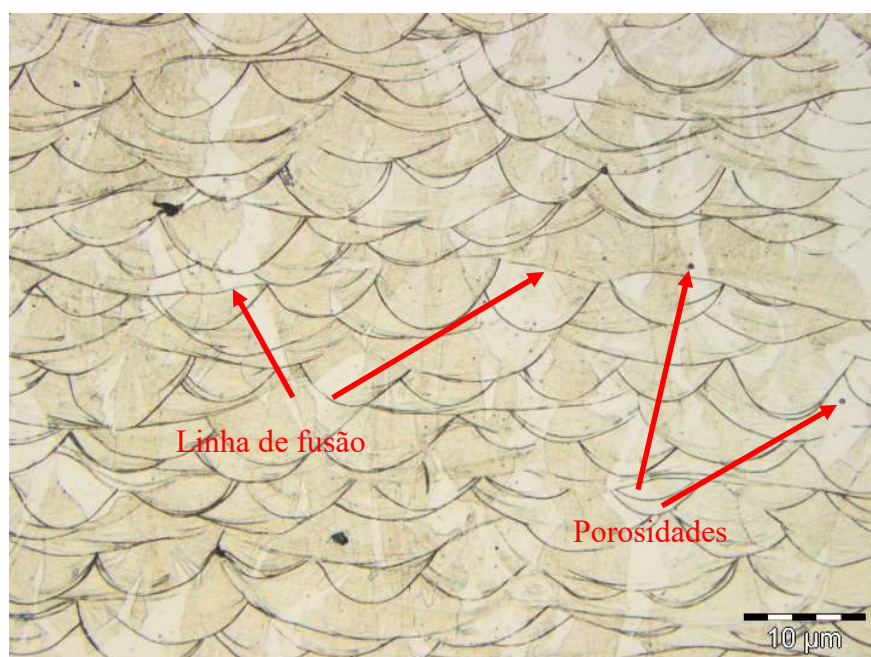


Figura 2. Núcleo da amostra feita com potência de 160W (aumento de 200 x) – ataque oxálico.

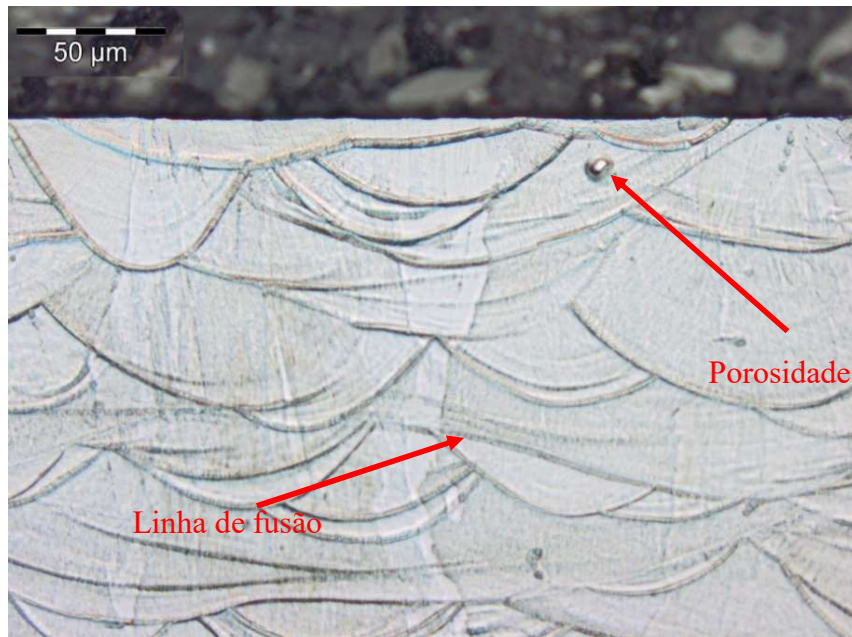


Figura 3 . Amostra com usinagem moderada 160 W – a seco – ataque oxálico – aumento de 500 X – ataque oxálico.

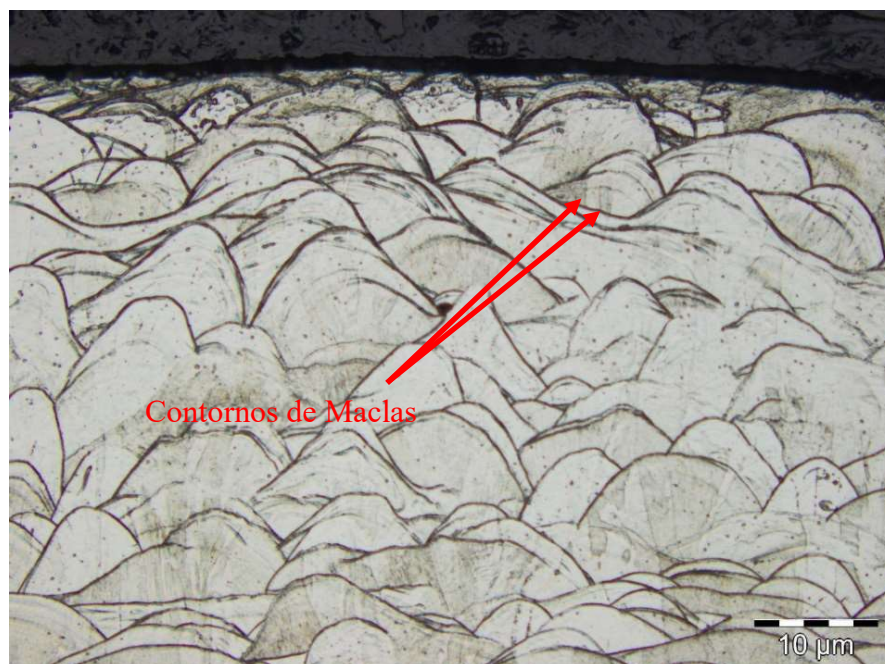


Figura 4. Amostra com usinagem moderada 160 W – a seco – aumento de 500 X – ataque oxálico.

Analisando as imagens obtidas por microscopia óptica, percebe-se que a microestrutura revelada é bastante semelhante à obtida por processos convencionais, conforme relatado, porém dentro das poças de fusão é possível perceber que existem orientações diferentes em determinadas regiões. Estas orientações diversas também foram percebidas durante as medições de microdureza Vickers e foi percebido que elas influenciam nos valores de medidos. As medições de microdureza foram feitas a partir do topo para o núcleo do material, conforme Fig. 4, o topo (superfície que foi usinada) aparece no alto da imagem na interface com o baquelite. A intenção das medições de microdureza foi entender o comportamento do possível encruamento do material, comum em processos deste tipo na superfície e como os valores variaram em direção ao núcleo. Foi percebido durante as medições que medições na mesma linha (tomando como referência o topo da peça) apresentaram diferentes valores de microdureza e desta forma se tentou durante as medições trabalhar com regiões de mesma característica e orientação. Para tentar entender melhor estas orientações foram feitas algumas imagens por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), conforme Fig. 5.

Os resultados encontrados foram muito semelhantes aos vistos no microscópio óptico. A Figura 6 mostra uma imagem mais ampliada, onde aparecem algumas endentações, os contornos das maclas e as regiões circulares que mostram diferentes orientações e relevo na microestrutura. Para as medições de microdureza foram selecionadas regiões semelhantes e foram evitados os contornos das maclas que dificultaram as medições das endentações. Para melhor interpretação da microestrutura análises mais aprofundadas e novas imagens devem ser feitas usando MEV-FEG-FIB.

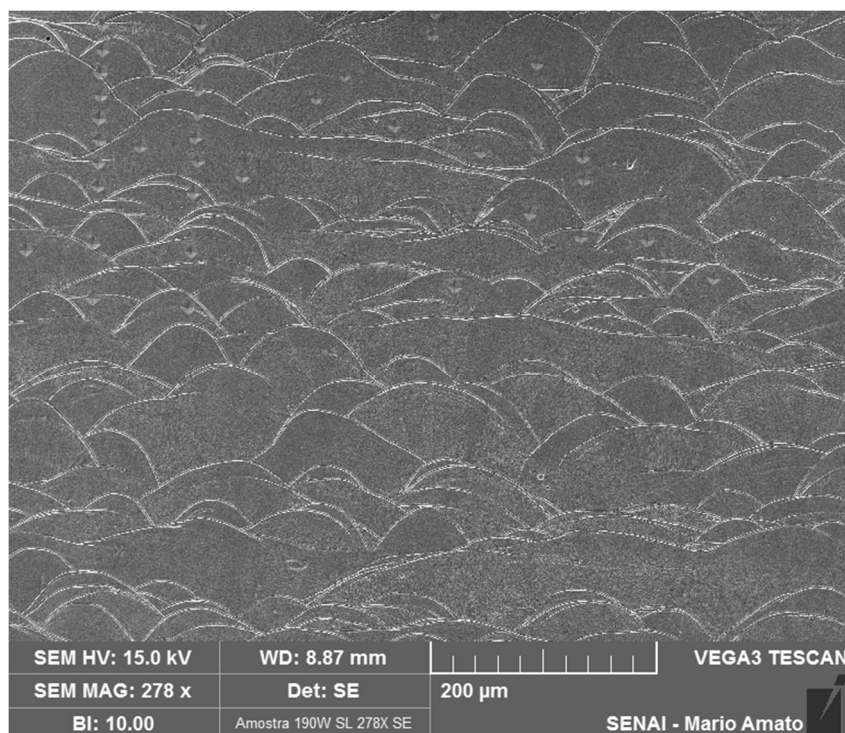


Figura 5. Micrografia obtida por MEV – elétrons secundários: Núcleo da amostra feita com potência de 190W (aumento de 278 x) – ataque oxálico.

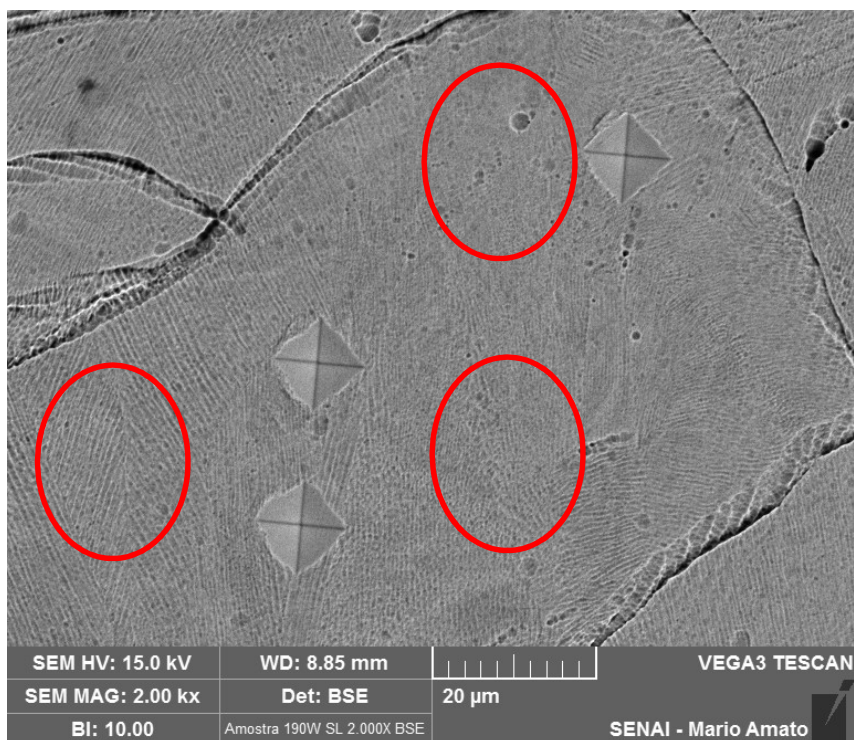


Figura 6. Micrografia obtida por MEV – elétrons retroespalhados: Núcleo da amostra feita com potência de 190W (aumento de 2000 x) – ataque oxálico.

A Tabela 1 mostra os resultados obtidos nas medições de microdureza Vickers e a diferença entre o topo da peça e o núcleo. É possível perceber que as maiores diferenças ocorreram nas peças onde foi utilizado fluido de corte na usinagem. Alguns valores ficaram negativos, o que indicar uma redução da dureza local que pode ser decorrente das orientações cristalográficas distintas.

Tabela 1 – Médias das medições de microdureza para todas as amostras [HV_{0,025}]

Condição	Topo Usinado	Núcleo	Diferença
190 W; parâmetros severos; sem fluido	279,8	267,3	4,7%
190 W; parâmetros severos; com fluido	265,3	216,3	22,7%
190 W; parâmetros moderados; sem fluido	249,0	245,3	1,5%
190 W; parâmetros moderados; com fluido	212,5	198,5	7,1%
160 W; parâmetros severos; sem fluido	204,5	213,3	-4,1%
160 W; parâmetros severos; com fluido	215,3	225	-4,3%
160 W; parâmetros moderados; sem fluido	204,8	209,8	-2,4%
160 W; parâmetros moderados; com fluido	270	230,8	17%

Analisando somente o núcleo do material, existem apenas duas variações: peças geradas com 160 W e 190 W. A média das peças de 160 W, considerando todas as medições foi de 219 HV e das peças de 190 W foi de 231,8 HV. Estes dados mostram que a combinação de parâmetros utilizados e potência de laser de 190 W produziram peças com maior dureza na estrutura do material.

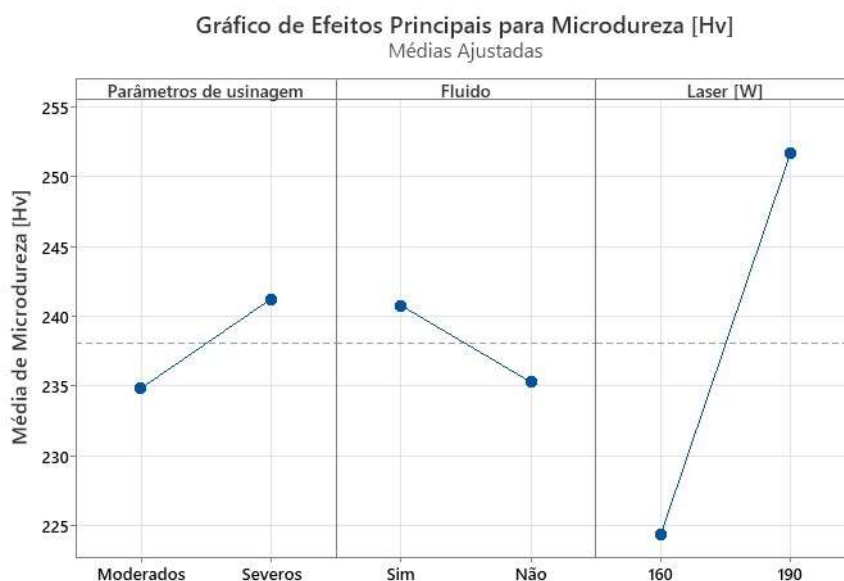


Figura 7. Influência das variáveis na microdureza na região da superfície da peça.

A Figura 7 mostra um gráfico dos efeitos principais nas medições de microdureza feitas no topo das amostras (região afetada pela usinagem do material da superfície). A utilização de fluido teve pouca influência nos resultados e a usinagem

feita com parâmetros “severos” tiveram valores de microdureza médios maiores. O comportamento do núcleo do material onde potências de 190 W produziram peças com maiores microdurezas prevaleceram aqui também.

A Figura 8 mostra o comportamento de uma das medições de microdureza ao longo do perfil de uma peça que utilizou a potência de laser de 190 W. Percebe-se neste caso que a usinagem propiciou um aumento da microdureza na superfície da peça com relação ao núcleo.

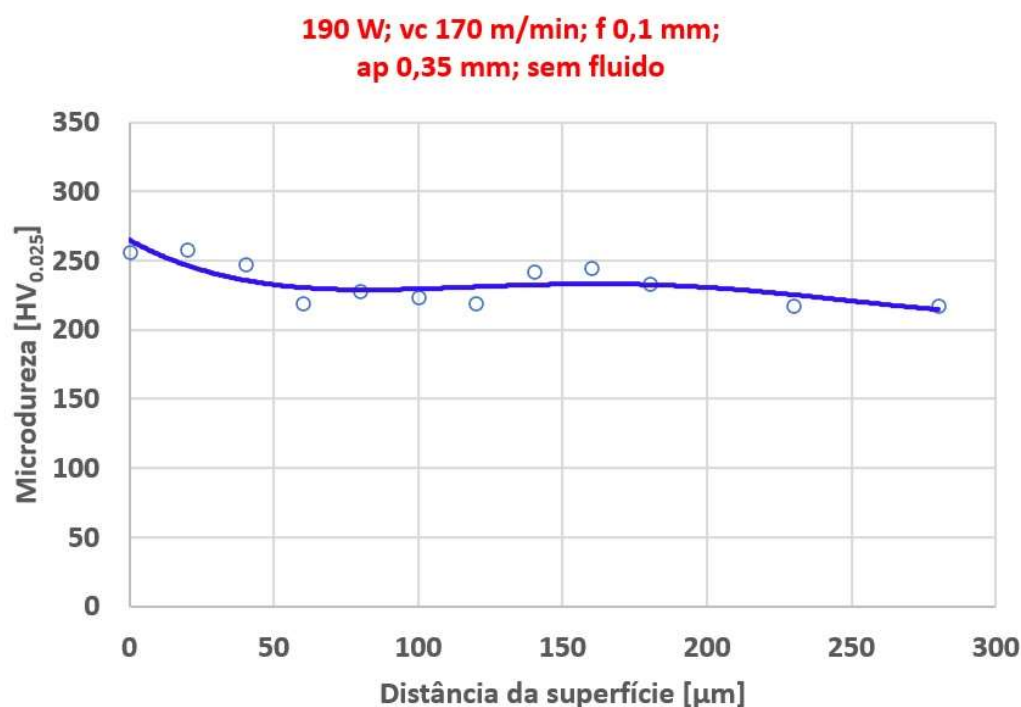


Figura 8. Perfil de microdureza típico das medições efetuadas.

4. CONCLUSÕES

Após o desenvolvimento deste trabalho é possível concluir que:

- A análise microestrutural mostrou as linhas de fusão geradas pelo processo, poucos poros e a estrutura austenítica esperada em um aço inoxidável gerado por MA;
- Não foi possível perceber alterações microestruturais tão significativas comparando a região usinada e o núcleo do material, porém percebeu-se uma tendência ao refino na região submetida à usinagem;
- Potências de laser de 190 W geraram peças com maiores valores de microdureza Vickers;
- Em algumas peças, houve aumento da microdureza na região usinada, principalmente quando se utilizou fluido de corte;
- Parâmetros de corte mais severos, utilização de fluido e potência de laser de 190 W aumentaram a microdureza na região usinada das peças;

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Instituto Mauá de Tecnologia pelo patrocínio do trabalho e o WaterFord Institute of Technology pela impressão das peças.

6. REFERÊNCIAS

Chimmat, M., Srinivasan, D., 2019. “Understanding the Residual Stress in DMLS CoCrMo and SS316L using X-ray diffraction”. *Procedia Structural Integrity*, Volume 14, 746-757, ISSN 2452-3216, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.05.093>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S245232161930099X>)

- 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.
- Lorenz, K., 2015. "A review of hybrid manufacturing". *North Central Expressway*, Dallas, Texas, EUA, p. 1-13, 1 ago.
- 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.
- Saboori, A., Toushekhah, M., Aversa, A. et al., 2020. "Critical Features in the Microstructural Analysis of AISI 316L Produced By Metal Additive Manufacturing". *Metallogr. Microstruct. Anal.* 9, 92–96 (2020). <https://doi.org/10.1007/s13632-019-00604-6>
- Senatore, M.; Finzetto, L.; Perea, E., 2021. "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.
- Valente, E. H., Christiansen, T. L., & Somers, M. A. J., 2018. "High-temperature solution nitriding and low-temperature surface nitriding of 3D printed stainless steel". *Paper presented at 2018 European Conference on Heat Treatment (ECHT 2018)*, Friedrichshafen, Germany.
- 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.
- Zhu, Z.; Dhokia, V. G.; Nassehi, A.; Newman, S. T., 2013 "A review of hybrid manufacturing processes - state of the art and future perspectives". *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. Vol. 26, No. 7. pp. 596-615.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

STUDY OF MICROSTRUCTURE AND MICROHARDNESS PROFILE OF AISI 316L MANUFACTURED BY HYBRID MANUFACTURING

Gabriel Uchida, 19.00969-0@maua.br¹

Vanessa Seriacopi, vanessa.seriacopi@maua.br¹

Adalto de Farias, adalto.farias@maua.br-mail¹

Marcelo Otávio dos Santos, marcelo.santos@maua.br¹

Sergio Luis Rabelo de Almeida, prof.sergio@mackenzie.br²

Éd Claudio Bordinassi, ecb@maua.br¹

¹Instituto Mauá de Tecnologia, Praça Mauá, 01 – São Caetano do Sul/SP – 09580-900

²Universidade Presbiteriana Mackenzie, Rua da Consolação, 930 - São Paulo/SP - 01302-907

Abstract. *The 21st century demand to innovate towards product revolution is clearly perceived and additive manufacturing, widely known as 3D printing, is a direct digital manufacturing process where a component can be produced layer by layer from the model 3D. Among the advantages of additive manufacturing, some mainly of them can be cited: rapid prototyping and great geometric freedom. However, one of its biggest limitations is the surface finish, and depending on the use of the component, a subsequent process, which can be polishing or machining, for example, is necessary to improve the surface finish. The process in this case is called hybrid manufacturing. The objective of this work was to study the effects of manufacturing parameters on samples made from hybrid manufacturing (additive manufacturing + milling) through microstructural characterization and microhardness profile measurement, from the machined surface to the material core. The parts were printed with two laser powers (160 W and 190 W) and machined in a Machining Center with two sets of parameters: (vc: 170 m/min; f: 0.1 mm/rev; ap: 0, 35 mm) and (vc: 210 m/min; f: 0.2 mm/rev; ap: 0.7 mm). The etchings used to reveal the microstructure were a solution of ammonium persulfate and 10% oxalic acid, and the analyzes were performed using an optical microscope and scanning electron microscope. The microstructure results did not show significant phase changes along the microstructure, but melting pools were observed in several areas and a trend to the microstructure refinement close to the machined surface. The Vickers microhardness measurements showed a slight difference as a function of the laser power used along the core of the material and an increase in the region close to the machined surface. The conclusions show that machining affects the microhardness profile and has little influence on the microstructure of the material. The laser power used also affects the microhardness values.*

Keywords: *additive manufacturing, machining, microhardness profile, AISI 316L steel*