

INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE NANOFLUIDOS DURANTE FRESAMENTO NA RUGOSIDADE E TENSÃO RESIDUAL DO AÇO AISI 316L FABRICADO POR MANUFATURA ADITIVA

Lucas de Souza Teixeira Rocha ¹; Ed Claudio Bordinassi ²

¹ Aluno de Iniciação Científica do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT);

² Professor do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT).

Resumo. *Um dos obstáculos à adoção da manufatura aditiva de metais é a elevada rugosidade superficial das peças, que demanda pós-processamento para melhorar o acabamento e as tensões residuais geradas no processo, devido ao ciclo de aquecimento/resfriamento. Dentre as possibilidades para melhorar o acabamento superficial encontra-se o fresamento, que comumente utiliza fluidos para resfriamento/lubrificação. O objetivo desse trabalho foi estudar a influência do resfriamento utilizando nanofluidos durante o fresamento do aço AISI 316L, fabricadas por manufatura aditiva e pelo processo de laminação. Os métodos de resfriamento foram: à seco, ar comprimido refrigerado, fluido convencional em abundância, nanofluido de grafeno e nanofluido de dióxido de silício. A análise dos resultados constituiu-se por 3 avaliações principais: medição da rugosidade superficial, por meio de rugosímetro óptico, obtenção da tensão residual das amostras, com a utilização de um difratômetro de raios-x, e análise por microscopia eletrônica de varredura, da superfície das amostras. Os resultados mostraram que o uso de nanofluidos possibilitou, devido ao seu potencial de aumento da suavidade do processo, a obtenção de rugosidades 38% menores em relação ao pior resultado (usinagem com fluido convencional em abundância) menores valores de tensão residual, e conversão dessa de tratativa para compressiva paralelamente ao avanço da ferramenta.*

Introdução

Manufatura aditiva (MA) é a denominação da técnica de fabricação de objetos por meio da sobreposição progressiva de um material em camadas, com base em um modelo digital, feito por *Computer Aided Design* (CAD) ou escaneamento 3D. Esse tipo de manufatura popularizou-se com o advento das impressoras 3D, baseadas na técnica de modelagem de deposição fundida (FDM), que utilizam filamentos de polímeros para produzir pequenas peças. Na indústria, todavia, os métodos comumente utilizados para metais são a fusão seletiva a laser (SLM), a sinterização direta de metal a laser (DMLS), dentre outros (GOMES e WILTGEN, 2020).

Segundo Dilberoglu et al. (2017), a existência da Indústria 4.0 depende das capacidades da manufatura aditiva de metais, uma vez que, nesse método de manufatura, diferentemente dos tradicionais, é possível criar objetos com geometrias complexas, limitando a manufatura, nas palavras do autor, apenas à imaginação dos projetistas. Tal dependência é evidenciada pela sua crescente aplicação em diversos ramos da indústria, como o setor aeronáutico (CERUTI, MARZOCCA, et al., 2019) e de saúde (ZHANG e GUAN, 2023).

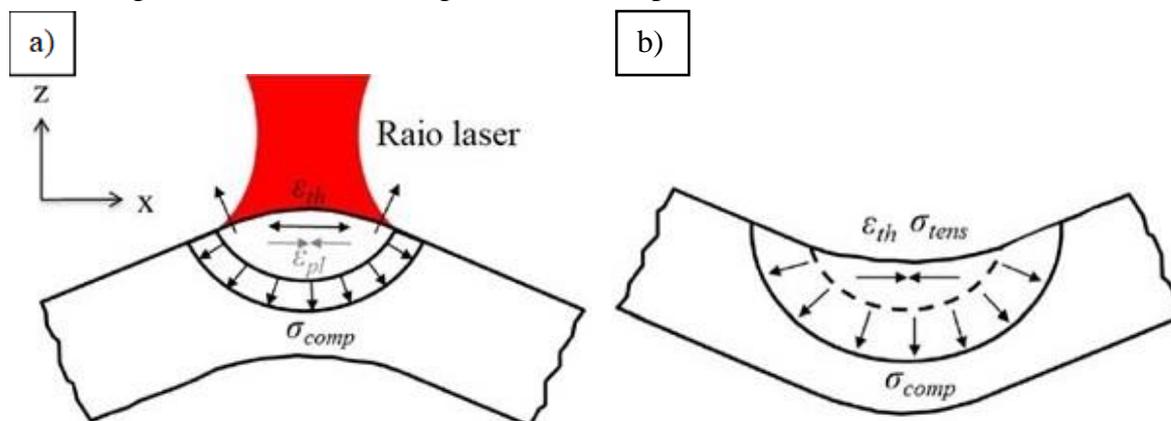
No setor de saúde inclusive, um dos metais mais utilizados e que pode ser fabricado por manufatura aditiva, é o Aço Inoxidável AISI 316L, objeto de investigação deste estudo. O material recebe essa nomenclatura por ser um aço inoxidável da série 300, de aços inoxidáveis austeníticos, ou seja, formados por uma solução sólida de Ferro, Níquel e Carbono e suas principais propriedades são: é um material não ferromagnético e que não é endurecido por têmpera. Já o “L” da denominação deriva da palavra “*Low*” (em português, “baixo”) e refere-se ao baixo teor de carbono do material. À título de comparação, o Aço Inox 316 possui um teor máximo de carbono de 0,08%, enquanto o mesmo na liga 316 L é de no máximo 0,03%. A principal vantagem da liga 316L em relação à 316, como visto em Bunchoo et al. (2022) em aplicações em que o material fica continuamente exposto a altas temperaturas, uma vez que o maior teor de carbono deixa o material mais suscetível à sensitização, que é um fenômeno no

qual ocorre a precipitação de carbonetos de cromo no contorno dos grãos, tornando o material passível de corrosão intergranular.

Contudo, apesar da progressiva adoção pela indústria da manufatura aditiva, estudos como Stavropoulos et al. (2023), evidenciam que a indústria ainda tem ressalvas quanto ao seu emprego. Entre as reservas apontadas, problemas de qualidade representam um terço, estando entre os mais comuns, a elevada rugosidade superficial, o que torna imperativa a realização de pós-tratamentos das peças para que atinjam a rugosidade definida em projeto.

Outro problema comum encontrado no processo de MA é a geração de tensões residuais de tração. Cada local depositado durante a fabricação aditiva sofre uma rápida solidificação inicial e sofre repetidos ciclos térmicos conforme as camadas são adicionadas, levando ao acúmulo de tensões residuais que resultam na distorção dos componentes, de modo que sua geometria se desvia das dimensões construtivas necessárias durante a fabricação e gera tensões residuais trativas (MOAT, PINKERTON, *et al.*, 2011). Além disso, tensões residuais podem levar à falha nos níveis de tensão aplicados abaixo do ótimo, e podem introduzir microfissuras que reduzem ainda mais a resistência da peça e o desempenho em serviço. Wang et al. (2017) descrevem o princípio esquemático do mecanismo de gradiente de temperatura que pode ser visto na Figura 1, devido à inserção de energia pelo feixe de laser, o material se expande termicamente. Essa expansão é limitada por causa do material circundante mais frio, que induz tensões compressivas elásticas na zona afetada pelo calor. Com o excedente da tensão de escoamento à temperatura, as tensões resultantes são reduzidas por deformação plástica (Figura 1 (a)) ou alterando o material na direção da fonte de energia. Se não houver mais calor, a área esticada termicamente esfria e contrai. Durante o resfriamento, tensões de tração são geradas na área deformada plasticamente, o que leva a uma flexão na direção oposta (Figura 1 (b)).

Figura 1 - Mecanismo do gradiente de temperatura induzindo tensão residual



Fonte: (SIMSON, EMMEL, *et al.*, 2017)

Diante desse cenário, engenheiros do mundo todo tem se debruçado sobre possíveis tratamentos de superfície que melhorem o acabamento dos objetos fabricados por MA, que tem demonstrado resultados promissores, como evidenciado em Maleki et al. 2021. Existem estudos, inclusive, voltados aos processos de acabamento da liga 316L em si, como é o caso de Behjat et al. 2022

A maioria dos pós-processamentos realizados necessitam de meios para resfriamento durante o processo de acabamento. Os meios convencionais de resfriamento, entretanto, limitam a produtividade, uma vez que a velocidade de corte deve ser proporcional à capacidade de resfriamento para que a peça/ferramenta não atinja temperaturas que possam danificá-la. O tempo maior de produção por peça acarreta maiores custos e maior gasto de energia.

Ante essa conjuntura Choi e Eastman (1995) propuseram uma alternativa: os nanofluidos. Choi os definiu como suspensões estáveis de nanopartículas em líquidos. Por meio dessa tecnologia, por exemplo, é possível suspender nanopartículas de metais — que, como é

conhecido, possuem, à temperatura ambiente, condutividade térmica de magnitudes mais elevadas em relação aos fluidos — em fluidos de troca de calor, como água ou óleo, convertendo-os em nanofluidos, o que aumenta substancialmente a eficiência destes. Os efeitos positivos do uso dos nanofluidos para resfriamento dos processos de acabamento superficial já foram evidenciados por diversos estudos, aplicando a técnica à peças fabricadas com os mais diversos fins (MANIKANTA e SARAVANAN, 2022) (CHINCHANIKAR, KORE e Hujare, 2021) (KULKARNI, NADAKATTI, *et al.*, 2020) (CHOWDARY e SARAVANAN, 2022).

Estudos mostram que a utilização de um meio criogênico, durante a usinagem, em grande parte dos estudos, também contribui para a redução das tensões residuais e rugosidade na maioria dos casos, tema este em estudo atualmente pelo grupo de pesquisa de Processos de Fabricação e Projeto Mecânico do próprio IMT. A utilização de nanofluidos, entretanto, parece ser uma técnica mais viável do ponto de vista financeiro do que a criogenia, desde que tenha eficácia comprovada.

O presente trabalho tem como objetivo, portanto, analisar a influência na rugosidade, na qualidade da superfície, e na tensão residual da utilização de nanofluidos como meio de resfriamento/lubrificação, durante o fresamento em amostras de aço inoxidável AISI 316L obtidas através de manufatura aditiva e de laminação.

Materiais e métodos

Os corpos de prova utilizados são todos do mesmo material, que é um aço inox AISI 316L, mas estão divididos em dois grupos: laminados e impressos por manufatura aditiva nas dimensões (20 x 20 x 20). Os parâmetros utilizados para fabricação por MA foram:

- Potência de laser: 160 W;
- Velocidade do laser: 1000 mm/s;
- Espessura da camada: 20 μm ;
- Eficiência do laser: 100%;
- Foco do laser: 72 μm ;
- Largura do laser: 5 mm;
- Temperatura da base: 81 °C;
- Rotação do laser a cada passada: 67°.

Os corpos de prova fabricados por manufatura aditiva possuem as seguintes propriedades mecânicas:

- Rugosidade:
 - Ra: (13 \pm 5) μm ;
 - Rz: (80 \pm 20) μm .
- Tensão de ruptura:
 - Direção XY: (640 \pm 50) MPa;
 - Direção Z: (540 \pm 55) MPa.
- Tensão de cisalhamento:
 - Direção XY: (530 \pm 60) MPa;
 - Direção Z: (470 \pm 90) MPa.
- Módulo de Elasticidade:
 - Direção XY: 185 MPa;
 - Direção Z: 180 MPa.
- Alongamento:
 - Direção XY: (40 \pm 15) %;
 - Direção Z: (50 \pm 20) %.
- Dureza: 89 HB.

O fresamento foi realizado no Centro de Usinagem Romi, Discovery 560 (Figura 2), no Instituto Mauá de Tecnologia, em São Caetano do Sul – SP. Foi utilizada uma fresa inteiriça de metal duro fabricada pela Dormer Pramet® de 25 mm de diâmetro.

Figura 2 - Centro de Usinagem Romi Discovery 560



Fonte: Próprio autor

O ensaio consistiu no fresamento superficial das amostras, à 1082 rpm, com velocidade de corte de 85 m/min e avanço de 0,08 mm/dente, na seguinte sequência:

1. Fresamento de 0,5mm para normalizar a superfície da amostra;
2. Fresamento de 0,5mm definitivo para avaliar cada tipo de resfriamento.

As amostras foram usinadas com os seguintes tipos de fluidos, totalizando 10 ensaios (5 com peças laminadas e 5 com peças de MA):

- Seco (sem resfriamento);
- Ar comprimido refrigerado;
- Fluido convencional (óleo solúvel) em abundância;
- Nanofluido de Grafeno;
- Nanofluido de Dióxido de Silício (SiO₂).

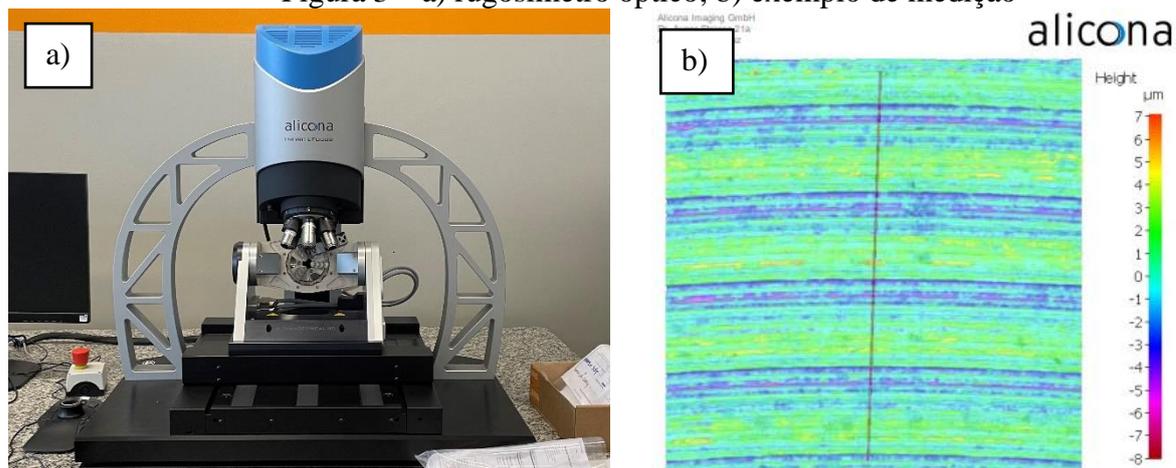
O equipamento Cold Gun foi utilizado para refrigerar o ar com temperatura de $-1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Os nanofluidos utilizados consistem na solubilização das nanopartículas (de Grafeno e Dióxido de Silício) em óleo solúvel convencional, utilizando-se 0,3% em massa. O óleo solúvel utilizado, Boreal BL da YPF por sua vez, é obtido com a solubilização de 1 parte de óleo para 19 partes de água

Após o ensaio no centro de usinagem, a próxima etapa do trabalho consistia na identificação das características superficiais obtidas.

Para medição da rugosidade, utilizou-se o rugosímetro óptico Alicona Infinite Focus (Figura 3a), nas dependências da Dormer Pramet®, em São Paulo. A medição consistiu no posicionamento do foco no centro da amostra, com um zoom óptico de 10x e a medição da rugosidade perpendicularmente ao avanço da ferramenta, conforme Figura 3b. O equipamento mede a rugosidade tanto de maneira linear (Ra), ao longo do eixo central da amostra, como também na área (Sa). Optou-se para análise dos resultados em utilizar a medição alar (Sa) por ser mais fidedigna, já que considera uma superfície maior da amostra.

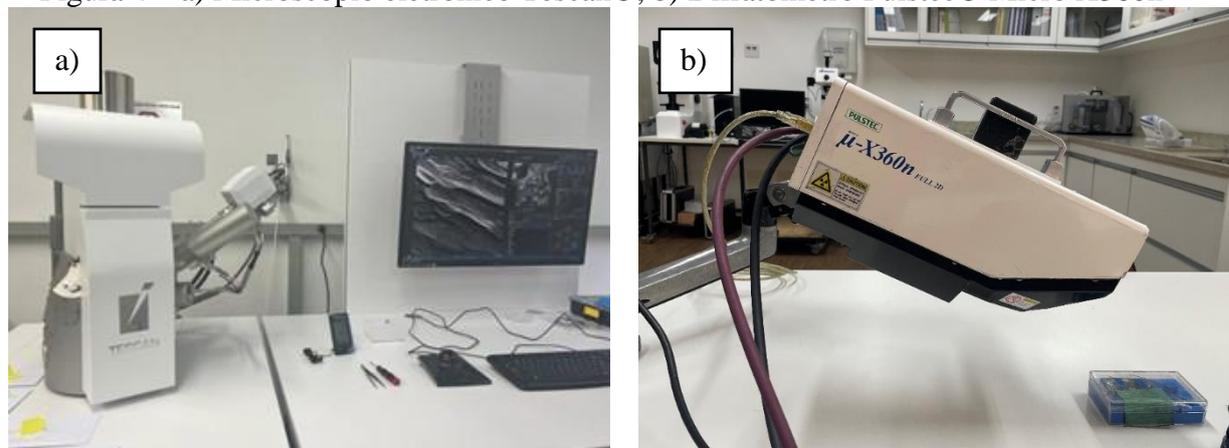
Figura 3 – a) rugosímetro óptico; b) exemplo de medição



Fonte: Próprio autor

Foi feita a obtenção de imagens com a utilização do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo Veja LMU da Tescan® (Figura 4a), no Instituto Mauá de Tecnologia em São Caetano do Sul – SP. Todas as amostras tiveram fotos captadas pelo detector SE e análise de composição química por Energy-Dispersive X-ray Spectrometry (EDS). Para medição da tensão residual das amostras, foi utilizado o Difratorômetro modelo Micro-X360n Full 2D da Pulstec® (Figura 4b), nas instalações da Nova ND, também em São Caetano do Sul – SP. O método utilizado foi a difração de raios-x.

Figura 4 – a) Microscópio eletrônico Tescan®; b) Difratorômetro Pulstec® Micro X360n

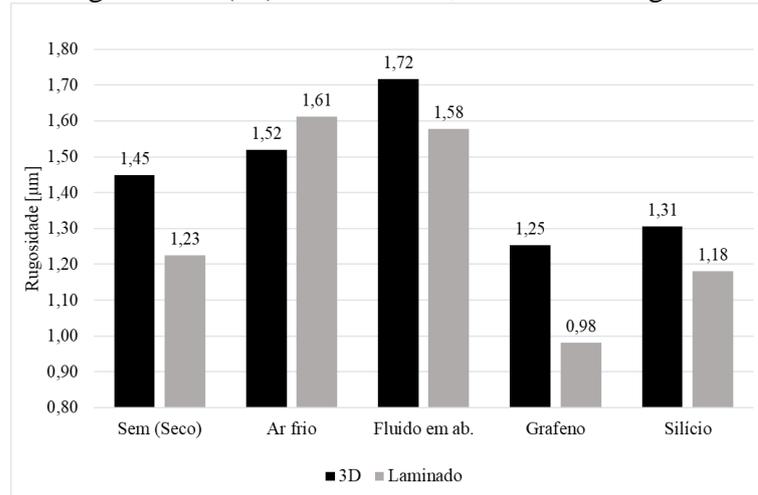


Fonte: Próprio autor

Resultados e discussões

Seguindo a sequência de análises feitas ao longo do desenvolvimento do trabalho, os dados da rugosidade superficial das amostras estão dispostos na Figura 5. A partir dele, é possível notar que as amostras usinadas com os nanofluidos, tanto de grafeno como de silício, obtiveram resultados substancialmente melhores em relação aos fluidos tradicionais.

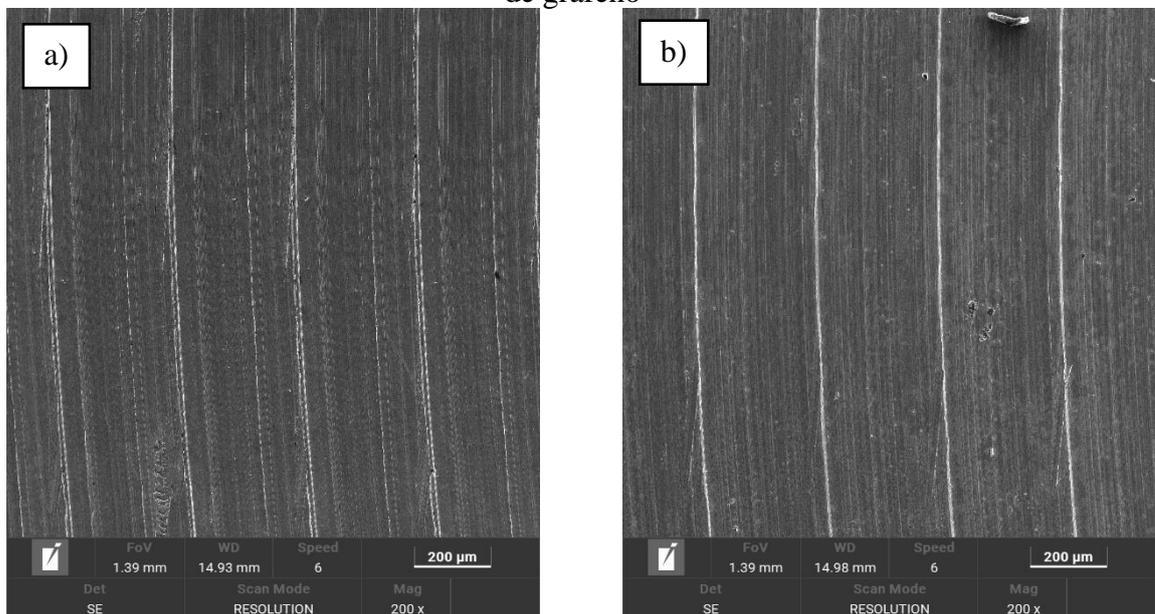
Figura 5 - Rugosidades (S_a) das amostras, medidas no rugosímetro óptico

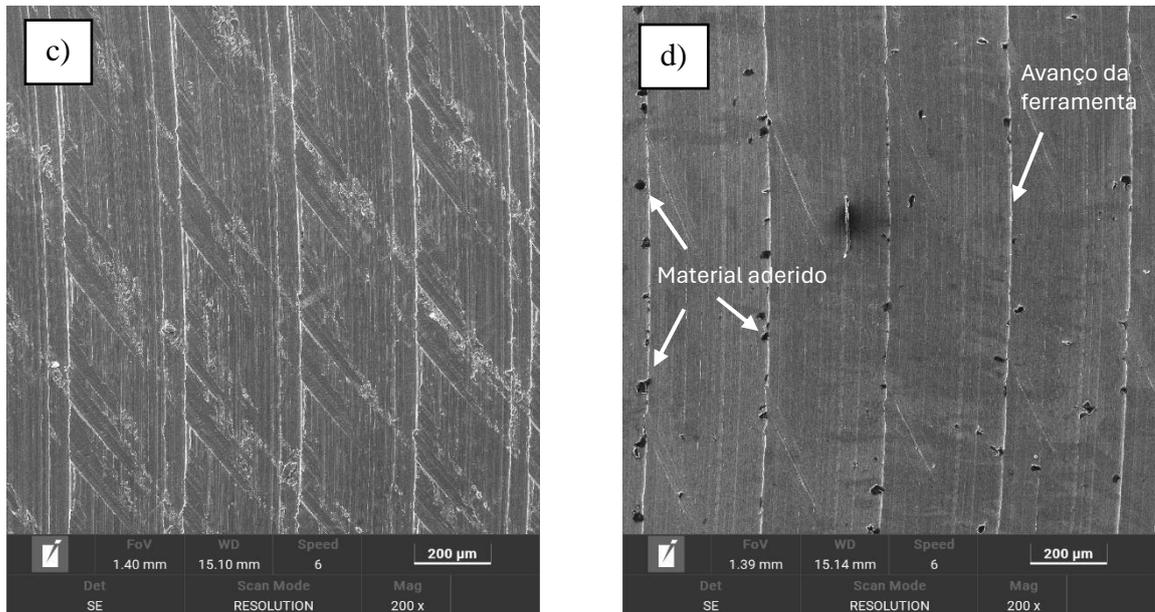


Fonte: Próprio autor

A Figura 6 mostra a comparação da superfície das amostras com o maior e menor valor de rugosidade, tanto para as fabricadas por manufatura aditiva quanto as por laminação. Na amostra laminada resfriada com ar frio (Figura 6c), por exemplo, é possível perceber riscos de grande porte em toda a superfície, diferentemente da amostra laminada resfriada com nanofluido de grafeno, que apresenta apenas alguns leves riscos. No caso das amostras fabricadas por MA, nota-se na amostra resfriada com nanofluido de grafeno uma superfície completamente livre de riscos, o que ratifica o valor baixo da sua rugosidade S_a , de $1,25 \mu\text{m}$.

Figura 6 – Imagens das amostras no MEV com ampliação de 200x: a) MA – fluido em abundância; b) MA – nanofluido de grafeno; c) Laminado – ar frio; d) Laminado – nanofluido de grafeno

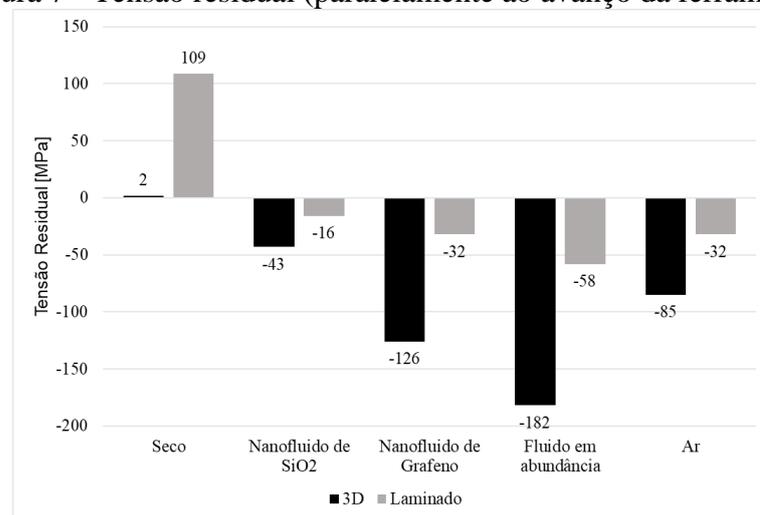




Fonte: Próprio autor

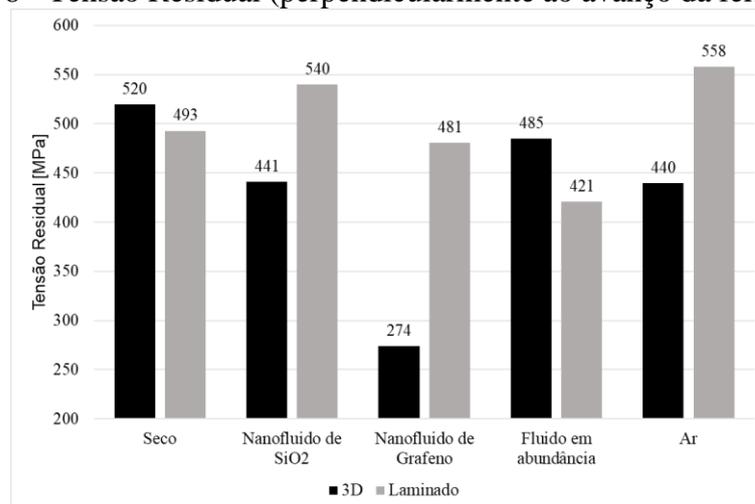
Também a partir das imagens do MEV, é possível constatar alguns detalhes na superfície das amostras, que são inerentes ao processo de usinagem. O primeiro detalhe que pode ser citado são essas pequenas manchas pretas, que, segundo Li, Liu e Liang (2019) são, provavelmente, partículas de material aderido. As linhas brancas verticais, são as marcas da ponta da ferramenta, no sentido do seu avanço. A análise da tensão residual, exposta na Figura 7 e na Figura 8, demonstrou uma relação parecida com os resultados da rugosidade, ou seja, as amostras resfriadas com nanofluidos apresentaram tensões residuais menores.

Figura 7 - Tensão residual (paralelamente ao avanço da ferramenta)



Fonte: Próprio autor

Figura 8 - Tensão Residual (perpendicularmente ao avanço da ferramenta)



Fonte: Próprio autor

Os resultados de tensão residual positivos demonstram que o material possui tensão de tração na superfície, que, mesmo após a remoção de uma carga externa, tende a tracionar o material, o que pode diminuir sua vida em serviço, facilitando a propagação de fraturas por falhas ou por fadiga. Portanto, a minimização da tensão residual tratativa é benéfica, o que foi observado, na Figura 7, entre as amostras 3D resfriadas com nanofluidos.

Já quando a tensão residual é negativa demonstra-se o contrário. Ou seja, o material possui tensão residual de compressão, que tende a ser benéfica para a vida em serviço da peça.

Apesar de a tração residual tratativa ser preterida e a compressiva ser desejada em alguns casos, a melhor situação é de uma baixa tensão residual em módulo, o que conseguiu-se obter nas amostras laminadas e 3D resfriadas com nanofluidos.

A utilização dos nanofluidos para resfriamento teve um papel crucial na redução da rugosidade e tensões residuais, uma vez que, como demonstrado por Khandekar et al (2012), uma melhora das condições de lubrificação e resfriamento durante o fresamento leva a uma conservação da dureza da aresta de corte da ferramenta, deixando o processo de usinagem mais suave, o que, por sua vez, permite: a) uma redução no atrito, que contribui para a suavidade e controle do corte; b) evita o superaquecimento e, por consequência, possíveis deformações térmicas e tensões residuais associadas à estas na superfície da peça; c) uma melhor evacuação dos cavacos.

Conclusões

A partir do trabalho, é possível concluir que a utilização dos nanofluidos é bem-vinda para diminuição da rugosidade e tensão residual e melhorias do acabamento superficial geral após a usinagem, devido a seu potencial de melhora das condições de lubrificação e resfriamento do processo, o que abre um leque muito maior para utilização da manufatura aditiva de metais, uma vez que permite a utilização dessa em aplicações onde essas características superficiais são mais vitais.

O uso de nanofluidos nas amostras feitas por MA e laminadas, reduziu a rugosidade, por exemplo, para valores próximos a $1\mu\text{m}$, requisito para aplicações que necessitam de peças retificadas. Já para a tensão residual, as amostras usinadas com esse tipo de resfriamento apresentaram valores em módulo muito menores em relação aos outros tipos de resfriamento, próximos a 0, sendo estes de tração no sentido perpendicular ao avanço da ferramenta e de compressão no sentido paralelo. Esse resultado é satisfatório, uma vez que a minimização da tensão residual é altamente desejável. Peças com altos valores de tensão residual estão mais sujeitas a propagação de trincas, falhas por fadiga e deformações indesejadas, que comprometem o seu uso em aplicações com baixos níveis de tolerância dimensional.

Referências

- Behjat, A. et al. (2022) Enhanced surface properties and bioactivity of additively manufactured 316L stainless steel using different post-treatments. *Materials Today: Proceedings*, v. 70, p. 188-194.
- Bunchoo, N. et al. (2022) Effects of thermal history on sensitization behavior and Charpy. *Engineering Failure Analysis*, v. 141.
- Ceruti, A. et al. (2019) Maintenance in aeronautics in an Industry 4.0 context: The role of Augmented Reality and Additive Manufacturing. *Journal of Computational Design and Engineering*, v. 6, p. 516-526.
- Chinchanikar, S.; Kore, S.; Hujare, P. (2021) A review on nanofluids in minimum quantity lubrication machining. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 68, p. 56-70.
- Choi, S. U. S.; Eastman, J. A. (1995) Enhancing Thermal Conductivity of Fluids With Nanoparticles. *Argonne National Lab. (ANL)*, Argonne, IL (United States).
- Chowdary, P. P.; Saravanan, R. (2022) Novel application of SiO₂ nanofluid coolant for enhancing machinability over inconel 706 CNC end milling with conventional coolant. *Materials Today: Proceedings*, v. 69, p. 1019-1024.
- Dilberoglu, U. M. et al. (2017) The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, v. 11, p. 545-554.
- Gomes, J. F. B.; (2020) Wiltgen, F. Avanços na manufatura aditiva em metais: técnicas. *Revista Tecnologia*, v. 41.
- Khandekar, S. et al. (2012) Nano-cutting fluid for enhancement of metal cutting performance. *Materials and manufacturing processes* 27.9: 963-967
- Kulkarni, H. B. et al. (2020) Investigations on effect of nanofluid based minimum quantity lubrication technique for surface milling of Al7075-T6 aerospace alloy. *Materials Today: Proceedings*, v. 27, p. 251-256.
- Li, X.; Liu, Z.; Liang, X. (2019) Tool wear, surface topography, and multi-objective optimization of cutting parameters during machining AISI 304 austenitic stainless steel flange. *Metals*, v. 9, p. 972.
- Maleki, E. et al. (2021) Surface post-treatments for metal additive manufacturing: Progress, challenges, and opportunities. *Additive Manufacturing*, v. 37.
- Manikanta, C. D.; Saravanan, R. (2022) Comparison of SiO₂ nanofluid and conventional coolant for flood cooling in CNC turning of INCONEL 800 to improve surface finish and machining rate. *Materials Today: Proceedings*, v. 69, p. 1048-1054.
- Moat, R. J. et al. (2011) Residual stresses in laser direct metal deposited Waspaloy. *Materials Science and Engineering: A*, v. 528, p. 2288-2298.
- Simson, T. et al. (2011) Residual stress measurements on AISI 316L samples manufactured by selective laser melting. *Additive Manufacturing*, v. 17, p. 183-189.
- Stavropoulos, P. et al. (2023) Increasing the industrial uptake of additive manufacturing processes: A training framework. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, v. 6.
- Urlea, V.; Brailovski, V. (2017) Electropolishing and electropolishing-related allowances for powder bed selectively laser-melted Ti-6Al-4V alloy components. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 242, p. 1-11.
- Wang, Z. et al. (2017) Residual stress mapping in Inconel 625 fabricated through additive manufacturing: Method for neutron diffraction measurements to validate thermomechanical model predictions. *Materials & Design*, v. 113, p. 169-177.
- Webster, S. et al. (2021) Physical mechanisms in hybrid additive manufacturing: A process design framework. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 291.
- Zhang, Q.; Guan, Y. (2023) Application of metal additive manufacturing in oral dentistry. *Current Opinion in Biomedical Engineering*, v. 25.
- Zhu, Z. et al. (2016) Investigation of part distortions as a result of hybrid manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 37, p. 23-32.