

INFLUÊNCIA DE DIFERENTES PROCESSOS DE USINAGEM NA QUALIDADE SUPERFICIAL DE AMOSTRAS DE ER70S-6 OBTIDAS POR MANUFATURA ADITIVA

Guilherme Tomé Sampaio, Universidade de Brasília, guilhermesamt@gmail.com

Maksym Ziberov, Universidade de Brasília, mziberov@unb.br

Déborah de Oliveira, Universidade de Brasília, oliveira.deborah@unb.br

Resumo. A manufatura aditiva (MA), também conhecida como impressão 3D, tem várias vantagens em relação aos métodos tradicionais de fabricação, como a capacidade de criar peças altamente personalizadas e complexas com rapidez e precisão. No entanto, peças fabricadas pela MA muitas vezes precisam passar por pós processamento afim de melhorar o acabamento superficial e atingir as tolerâncias dimensionais e geométricas de projeto. Com o intuito de avaliar a melhor maneira de se realizar o pós-processamento, este trabalho tem como proposta avaliar o impacto da utilização de métodos de usinagem diferentes no pós-processamento de peças produzidas com o arame ER70S-6 através manufatura aditiva por deposição a arco, sendo eles: serramento, corte com disco abrasivo e fresamento. Para verificar a influência dos processos, foi avaliada a qualidade superficial, através da medição da rugosidade e do perfil de microdureza em duas amostras. Ao final verificou-se que o fresamento como esperado por ser um processo com geração de cavacos maiores do que os processos abrasivos, apresentou maior estabilidade entre os valores de microdureza e rugosidade para as duas amostras, o corte abrasivo apresentou baixos valores de rugosidade, porém menor estabilidade para os valores de microdureza e o serramento foi o menos contante apresentado variações muito grandes de rugosidade e microdureza entre as duas amostras.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva, Fresamento, Corte abrasivo, Serramento, Qualidade superficial

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva por deposição a arco (MADA) é o processo de fabricação de peças 3D metálicas que se dá através da utilização de um arco elétrico como fonte de energia para a fusão do material de deposição na forma de um cordão depositado camada sobre camada (Norrish, 2021). A qualidade das peças produzidas pode variar consoante às configurações implementadas como velocidade de deslocamento da tocha e velocidade de alimentação de arame, além dos parâmetros de deposição. Devido ao acabamento superficial não uniforme das diversas camadas, as peças produzidas pela MADA são muitas vezes usinadas após a fabricação, para que ao final haja um componente que atenda às tolerâncias dimensionais e geométricas especificadas no projeto.

As peças produzidas pela manufatura aditiva (MA) ao contrário das fabricadas por métodos tradicionais em que a rugosidade da superfície é uniforme, as fabricadas através de métodos da MA possuem uma superfície com rugosidade variável e um acabamento superficial muito irregular devido ao efeito escada e aos parâmetros de deposição do processo (Zhang *et al.*, 2019). Processos abrasivos e de usinagem são métodos tradicionais muito usados para dar acabamento superficial e precisão dimensional a peças fabricas para diversos setores. Eles também são muito usados para o pós processamento de peças produzidas pela MA devido a qualidade final gerada pelos processos além da sua alta repetibilidade (Peng *et al.*, 2021).

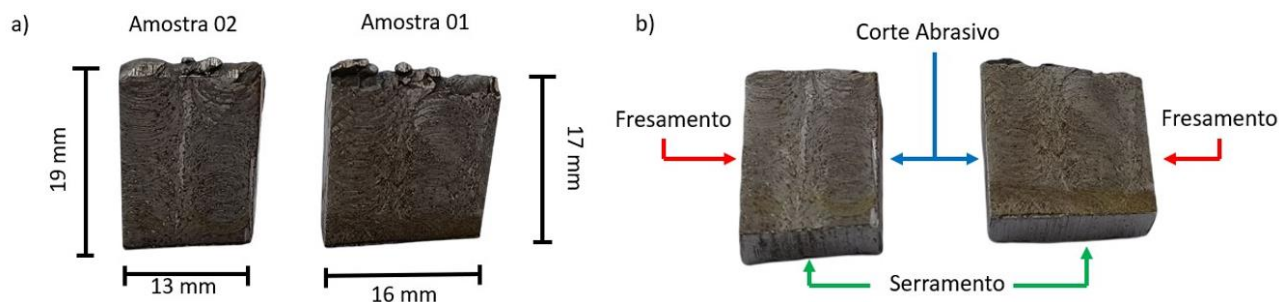
O objetivo do trabalho é estudar o impacto de diferentes processos de usinagem na qualidade superficial de peças metálicas fabricadas através de manufatura aditiva pelo processo MADA, especificamente utilizando o método *Cold Metal Transfer* (CMT). Para isso, foram avaliados métodos de usinagem usuais em indústrias como o serramento, fresamento e corte por disco abrasivo. Como objetivos específicos têm-se a avaliação das superfícies das peças através da rugosidade e da microdureza na sub-superfície.

2. METODOLOGIA

O corpo de prova que foi objeto de estudo foi fabricado pelo autor Novelino (2021) pelo método MADA, empregando o processo CMT para a fabricação da peça. Esta amostra foi processada em cima de um substrato feito de aço carbono 1020, sendo que o material utilizado para a peça foi o arame ER70S-6. O procedimento experimental foi realizado seguindo as etapas de preparação da amostra, verificação de defeitos superficiais, ensaio de rugosidade, embutimento, lixamento e ensaio de microdureza.

A Figura 1 a) mostra as duas amostras utilizadas nos ensaios, a que se encontra a esquerda foi chamada de amostra 02 e a direita é chamada de amostra 01. A amostra 01 possui 16 mm de largura e 17 mm de altura, já a amostra 02, 13 mm de largura e 19 mm de altura, estas passaram por três métodos de usinagem, sendo eles fresamento, serramento e corte abrasivo, na Figura 1 b) é possível identificar as indicações de quais processos de usinagem as superfícies das amostras foram submetidas.

O fresamento foi realizado no centro de usinagem vertical VEGA modelo XH7132, utilizando um fresa de topo aço rápido Amatoools Rocast DIN 844A 10 mm de diâmetro, com 4 arestas de corte, comprimento total de 72 mm sem revestimento. Com relação aos parâmetros usinagem usados, o fresamento foi feito com uma profundidade de corte axial de 0,25 mm, um avanço por dente de 0,005 mm/dente, e uma velocidade de corte de 15,7 m/min.

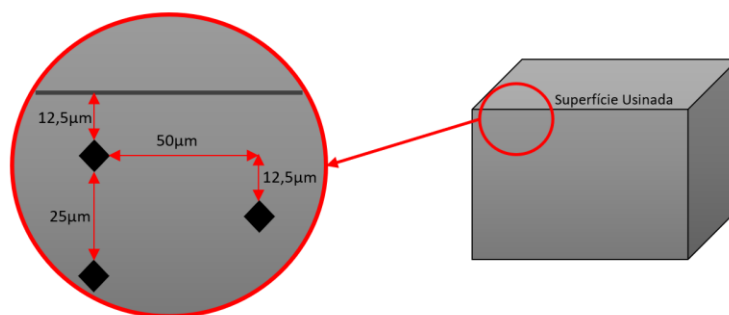


O serramento foi feito com a Serra Fita Franho FM-500, com uma serra bi-alfa cobalt 27x0,9 x 4/6 x 3,87 e uma velocidade de corte de 55 m/min. Com realção ao corte abrasivo, foi utilizada uma Policorte da fabricante Makita modelo maktec MT240 em conjunto com um disco de corte da fabricante Pereira abrasivos de modelo DCA aços com dimensões 305 x 3,2 x 25,4 mm que possui rotação máxima de 5.000 RPM, utilizando uma velocidade de corte de 60m/s.

Os fluidos de corte de corte usados foram o fluido solúvel sintético biodegradável para usinagem BIO100e, da Biolub Química para o fresamento, já para o caso do serramento e do corte abrasivo foi usado o fluido de corte VONDER óleo solúvel biodegradável.

Após as etapas de preparação da amostra e verificação de defeitos superficiais, foi realizado o ensaio de rugosidade. As amostras foram devidamente preparadas estando livre de qualquer contaminação na superfície. Antes de fazer as aferições no rugosímetro, foi escolhido o comprimento de amostragem (cut off) igual 0,8 mm, com 3 repetições (n=3) para cada superfície usinada das amostras. Além disso, as medições foram realizadas em ambiente com temperatura controlada em $24^{\circ}\text{C} \pm 1,5^{\circ}\text{C}$. Os parâmetros de rugosidade escolhidos foram baseados na pesquisa de Todhunter et al.(2017), na qual os 3 parâmetros R_a , R_q e R_z , foram os mais utilizados nas indústrias pelo mundo no ano de 2016. Para obter os valores de rugosidade nas superfícies usinadas das duas amostras, foram realizadas três medições em cada sentido de fora para dentro da amostra com o auxílio do Rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-201.

Em seguida das etapas de , embutimento, lixamento, foi realizado o experimento de microdureza utilizando o equipamento DuraScan da EMCO TEST, com lentes de aproximação de 10x, um indentador de diamante piramidal de base quadrada e ângulo entre faces de 136, a velocidade do indentador foi de 0,200 mm/s com duração de 7s para penetração e a carga escolhida aplicada foi de 0,5 kgf. Os parâmetros usados no ensaio foram retirados da NBR ISO 6507-1 (TÉCNICAS, 2008) para obtenção da microdureza Vickers para materiais metálicos. As medições foram realizadas a 12,5 μm a partir da interface amostra - resina e, a partir desta, com intervalos de 50 μm , realizados de maneira sequencial, respeitando a distância mínima de duas vezes o comprimento da endentação, como mostrado na Figura 2, foram realizadas dezoito medições para cada distância das superfícies usinadas. Antes do ensaio as duas amostras foram embutidas a frio e em seguida lixadas na sequência: 220, 320, 400, 600, 800, 1200.



3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Rugosidade

Para as análises das superfícies submetidas aos processos de usinagem, foi realizado um ensaio de rugosidade, usando os parâmetros R_a , R_q e R_z , no sentido de fora para dentro das peças, a partir dos valores obtidos foi construídas as tabelas da Figura 3(a) e (b) sendo possível obter as médias e desvios padrão de cada superfície das duas amostras. Os valores de rugosidade para os três parâmetros medidos mostram um comportamento semelhante para os diferentes processos de usinagem utilizados.

O fresamento foi o que apresentou maiores valores de rugosidade para os critérios usados, esse valor elevado pode estar relacionado a fatores geométricos, como a geometria da ferramenta e o avanço usado, deformação plástica do material na superfície e as possíveis vibrações do sistema durante o fresamento. De acordo com Mezline et. al., (2021) processos de fresamento com função de desbaste, normalmente são os que possuem maiores valores de rugosidade.

Segundo Barreto (2021) em seu estudo sobre superfícies de canais feitos por fresamento em um corpo de prova produzido através da MADA usando o arame ER70S-6, a autora aponta as causas dos altos valores como sendo as vibrações do conjunto máquina ferramenta e deformações plásticas nas paredes dos canais, que ficaram visíveis pelas marcas de arrancamento. Já o autor Ávila (2022) que estudou a usinagem de peças impressas por manufatura aditiva a arco, com foco no acabamento, observou

que os menores valores de rugosidade foram encontrados nos canais onde o fresamento foi realizado com a menor velocidade de corte, o que contrasta a teoria que prevê que com maior velocidade de corte a temperatura no material aumenta alterando a resistência do material e facilitando a usinagem, os dados apresentados no trabalho do autor, mostram que as peças produzidas pela MADA possuem um comportamento diferente. O que leva a crer que os parâmetros de entrada usados no ensaio podem ter sido outra causa da elevada rugosidade apresentada nas regiões do fresamento, além das possíveis vibrações do sistema.

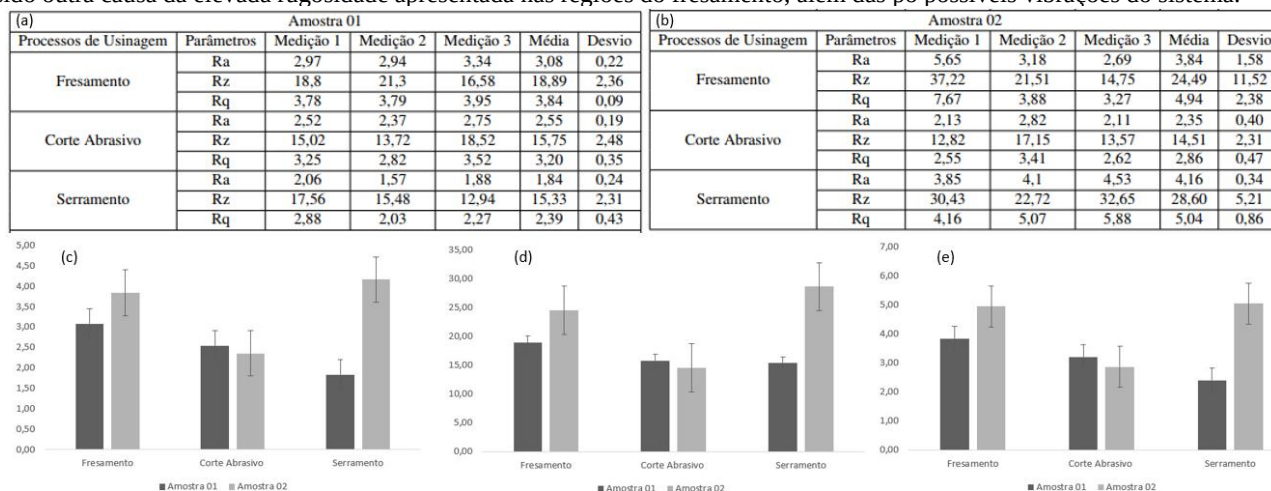


Figura 3 - Valores obtidos de Ra, Rz e Rq para as Amostra 01(a) e 02(b), (c) Relação entre os processos de usinagem e a Rugosidade Média (Ra), (d) Relação entre os processos de usinagem e a Altura Máxima (Rz), (e) Relação entre os processos de usinagem e a Rugosidade Média Quadrática (Rq)

O serramento assim como o fresamento é um processo de usinagem com aresta de corte definida, logo seu comportamento esperado era de que as duas amostras possuísem valores semelhantes de rugosidade, como visto no fresamento, porém os resultados do ensaio apresentaram o contrário visto que a rugosidade entre as duas amostras foi muito diferente, tal diferença pode estar relacionada ao fato de que a serra da serrafita é angulada, logo a amostra não foi usinada de maneira uniforme e sim começou por uma das extremidades e terminou em outra, provavelmente acumulando calor na ferramenta ao longo do corte o que pode ter levado a uma mudança na resistência do material e consequentemente facilitando o serramento e reduzindo assim a rugosidade entre as amostras

Um resultado semelhante foi encontrado pela autora Moreira (2011) em seu trabalho sobre o serramento do aço abnt 1045 utilizando serras circulares com insertos de metal duro e cermet, na qual a rugosidade Ra na peça, usando a serra de denominação MD VN com inserto de metal duro, diminuiu com o aumento da velocidade de corte, o que de acordo com o autor está relacionado com a elevação de temperatura que gera uma redução ao cisalhamento da peça reduzindo assim as forças de corte resultando em um melhor acabamento, porém em seu ensaio foi verificado que, o aumento do avanço, gera um aumento na rugosidade pois altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço tendem a diminuir com a redução do avanço. Assim uma elevação de temperatura pela serra quando iniciado o serramento na amostra 02 pode ter sido a causa da melhoria da rugosidade na amostra.

Nas regiões onde foi realizado o corte abrasivo, é possível verificar um comportamento constante, na qual as duas amostras possuem valores muito próximos para os parâmetros usados, além de terem rugosidades inferiores ao fresamento e levemente superiores ao serramento. Os processos abrasivos são caracterizados por não terem um número de arestas de corte definidas, assim os pequenos grãos presentes no disco fazem a retirada de material de maneira simultânea, devido à pequena granulometria desses grãos há uma pequena geração de cavaco no processo, logo se tem uma pequena retirada de material feita por cada grão, por conta disso a rugosidade superficial deixada pelos processos abrasivos tende a ser baixa, e esses procedimentos são comumente usados para dar bom acabamento superficial em peças, como no processo de retificação, o que pode explicar a baixa rugosidade encontrada na região do corte abrasivo.

A autora Lima (2016) em seu trabalho sobre a retificação plana tangencial dos ferros fundidos nodular, vermicular e cinzento em várias condições de corte, verificou que para o ferro fundido FC 250, os parâmetros Ra e Rz aumentaram com a penetração de trabalho, os valores de rugosidade aumentam com o aumento da penetração na peça, independente da velocidade aplicada, assim a rugosidade aumenta a medida se remove mais material, o aumento da penetração também implica em uma maior geração de cavaco os quais juntamente com a progressão do corte podem se acumular e empastar o rebolo, esse excesso de material alojado no rebolo diminui a eficiência da retificação aumentando os esforços na peça comprometendo a qualidade da superfície retificada. Já Paiva (2016) ao estudar a aplicação de fluido de corte a baixas temperaturas na retificação plana tangencial do aço SAE 52100, percebeu um aumento de rugosidade Ra com aumento da penetração, onde de maneira geral, a rugosidade aumentou com a penetração para todas as condições de fluido de corte empregadas, o mesmo comportamento se apresentou para os parâmetros Rq e Rz, exceto para a condição de temperatura do fluido em 10°C e 15°C. Logo pela amostra se trata de uma peça de espessura pequena, não possível se verificar um valor muito elevado, mas ainda sim é possível notar que mesmo com uma baixa espessura os valores de rugosidade tiveram uma elevação se aproximando dos altos valores de rugosidade do fresamento.

3.2 Microdureza

O objetivo da análise desta propriedade mecânica é relacioná-la às microestruturas encontradas nas superfícies usinadas de cada amostra, assim, a microdureza Vickers foi mensurada de forma a avaliar uma possível espessura afetada pelos diferentes

processos de corte. Assim, os valores foram obtidos à partir da superfície, com espaçamento uniforme, no sentido do centro da peça. Essa medição foi realizada 3 vezes, para cálculo da média com desvio padrão. Ressalta-se ainda que ela foi realizada em cada uma das 4 faces da amostra, sendo: fresamento, serramento, corte abrasivo e superfície sem usinagem. As tabelas e os gráficos da contém os valores de microdureza Vickers para cada um dos processos de usinagem realizados na amostra 01 e 02. As linhas pontilhadas em preto representam os valores de microdureza da região central da amostra, em que não houveram processos de usinagem, a microestrutura dessa região não sofreu modificação desde o processo de deposição, logo foi considerada como valor de referência para fins de comparação.

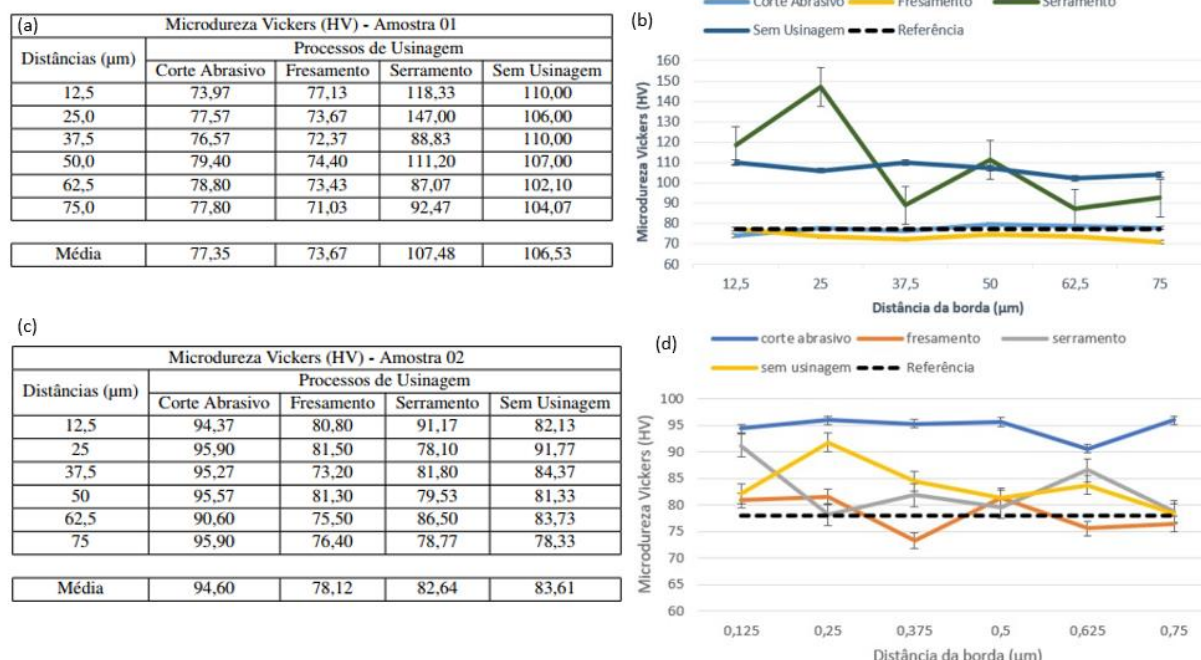


Figura 4 - (a) Tabela com valores de Microdureza Vickers nas regiões usinadas para Amostra 01, (b) Gráfico de microdureza dos valores coletados da Amostra 01, (c) Tabela com valores de Microdureza Vickers nas regiões usinadas para Amostra 02, (d) Gráfico de microdureza dos valores coletados da Amostra 02

Menores valores de microdureza eram esperados por se tratar de um material com baixo teor de carbono, no entanto a amostra 01 apresentou valores altos para a região do serramento, o que pode representar uma mudança na estrutura cristalina da região, para a amostra 02, é possível verificar uma mudança em comparação a amostra 01, a região do corte abrasivo apresentou os maiores valores de microdureza, e a região do serramento teve uma queda em relação amostra 01.

Nas duas amostras foi possível verificar uma variação nos valores de dureza para regiões que sofreram o mesmo processo de usinagem, o que pode ter sido causado pela diferença na estrutura cristalina que o material possui, Oliveira (2022) aponta em seu trabalho que para um amostra com deposição de 100 camadas, que é possível verificar 4 regiões com diferentes configurações microestruturais, neste trabalho não se realizou uma análise microestrutural para avaliar as diferentes microestruturas presentes na amostra, porém, no estudo realizado por Cervantes, *et al.*, (2019), o autor comenta a variação de microestrutura ao longo da peça, sendo essa dividida em 3 partes, região próxima ao substrato, parte central e região superior. O autor aponta que no próximo ao substrato se tem uma microestrutura de finas camadas de perlita, a parte do central apresentava bainita laminar e na região superior obteve uma microestrutura de grãos equiaxiais de ferrita e perlita, motivo pelo qual a peça possuía diferentes durezas ao longo dela.

O corte abrasivo se difere do serramento e do fresamento de duas formas, uma por ser um processo de usinagem sem um número de arestas de corte definida, e a outra por não produzir cavaco, assim a maior parte do calor gerado no processo tende a se encaminhar para a peça, logo é esperado que possam haver tido alteração da microestrutura nas regiões do corte abrasivo devido a forma como o calor é dissipado, processos abrasivos como a retificação apresentam características muito semelhantes. Alguns autores verificaram a influência do tamanho dos grãos, presentes no rebolo, na microdureza vickers do ferro fundido nodular FE 45012, one foi possível identificar um distanciamento dos valores medidos do valor de referência para o maior grão usado, com grãos maiores se tem uma maior remoção de material, esse pode se alojar no rebolo durante a retificação, fazendo com que o rebolo se atrite contra a peça reduzindo a eficiência dos grãos abrasivos e consequentemente aumento a temperatura na zona de corte, o que pode gerar uma mudança na microestrutura mudando a dureza da região. A taxa de transferência de calor por convecção entre o fluido de corte e a peça é influenciada pela diferença de temperatura entre eles, sendo que o uso refrigerado do fluido ajuda a evitar variações na dureza da peça. O acúmulo de material e a não eficiente atuação do fluido de corte podem ter induzido maior gradiente de temperatura na superfície da peça, resultando em alterações microestruturais que podem explicar a diferença de dureza entre as amostras do corte abrasivo.

Já o fresamento é um processo de usinagem onde há geração de cavaco de maiores dimensões, assim a maior parte do calor gerado no processo é transferida para o cavaco, impedindo que esse calor seja direcionado para a peça. Os parâmetros de entrada no fresamento são parte fundamental para que se obtenha uma bom resultado no processo, assim uma configuração equivocada pode resultar em danos a peça e a ferramenta, outro ponto importante a ser levado em conta é o uso do fluido de corte, visto que

esse não só ajuda na lubrificação do processo, como também atua refrigerando a peça e removendo os cavacos de região de corte. Analisando os resultados das durezas para as regiões fresadas, é possível notar a proximidade dos valores obtidos com relação ao valor de referência, isso mostra que não houve mudanças significativas na microestrutura das regiões fresadas, pois para que haja uma transformação metalúrgica na peça é necessário temperaturas elevadas, como no fresamento o calor gerado é majoritariamente passado para o cavaco e foi utilizado fluido de corte, era esperado que a temperatura gerada não fosse o suficiente para que houvesse uma mudança na microestrutura da amostra na região do fresamento. Por isso os valores de rugosidade para o fresamento nas duas amostras tem médias muito próximas à do valor de referência.

Já o serramento apresentou uma certa instabilidade nos valores de microdureza para as duas amostras, a amostra 01 apresentou uma variação muito grande com uma média de 107,48 HV para um valor de referência de 77,10 HV, a amostra 02 teve uma estabilidade um pouco maior, com o valor médio de 82,64 HV próximo à referência, 77,90 HV. Essa mudança entre as amostras pode ter sido causada por uma mudança na microestrutura, Oliveira (2022) mostra em seu trabalho as diferentes configurações microestruturais para a amostra de 100 camadas, no caso das amostras de estudo, elas se encontram em uma faixa entre a parte superior (amostra 02) e uma parte da região central (amostra 02), logo as duas amostras devem possuir microestruturas diferentes. Moreira (2016) em seu estudo sobre a usinabilidade do aço inoxidável supermartensítico durante o serramento circular utilizando serras com insertos intercambiáveis de metal duro revestidos e sem revestimento, fez uma análise de microdureza para os 3 tipos de serra usados, onde estas cortaram o aço inoxidável supermartensítico com velocidade 250 m/min, e pode se observar que não houve mudanças significativas nos valores de dureza, o que indica que não houve mudança na microestrutura da amostra devido a matriz martensítica e austenita retida em sua estrutura. Logo para certas microestruturas o calor gerado no processo não é suficiente para que haja uma mudança, diferente do que ocorreu nas amostras 01 e 02.

4. CONCLUSÃO

Após a realização dos experimentos e medições, verificou-se que o processo abrasivo foi o que se mostrou mais estável para obtenção de valores baixos de rugosidade (R_a igual a 2,35 μm para a amostra 02) e o fresamento maiores valores (R_a de 3,34 μm), enquanto o serramento foi o mais instável, foi verificada uma variação de 226% para o valor de R_a quando comparadas as superfícies da amostra 02 com a 01. Para a microdureza o processo abrasivo apresentou uma variação entre os valores entre as amostras 01 e 02 de 18,23%. Já o fresamento como esperado por ser um processo com geração de cavacos maiores do que os processos abrasivos, apresentou maior estabilidade entre os valores de microdureza para as duas amostras. Além disso, o serramento, assim como na rugosidade, também apresentou instabilidade nos valores de microdureza, variando 23,08% entre a média da amostra 01 em relação a amostra 02, o que foi associado ao acúmulo de calor durante o processo. Por fim, para minimizar possíveis danos térmicos sugere-se o uso de fresamento, por outro lado o corte por disco abrasivo pode ser utilizado para redução na rugosidade, porém resultando em variação na dureza. Finalmente, o processo de serramento, caso seja utilizado, deve ser acompanhando de fluido de corte em abundância combinado com um percurso de corte curto, para evitar o acúmulo de calor.

5. REFERÊNCIAS

- Ávila, C., 2022, Estudo da usinagem de peças impressas por manufatura aditiva a arco, com foco no acabamento. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, p. 97.
- Barreto, T.S., 2021, Estudo das características de usinagem de peças metálicas obtidas por manufatura aditiva a arco. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, p. 59.
- Cervantes, J.J., Balderas, A., Sánchez, A., Rodríguez, J., Espinoza, J.L., Barba, A., Ruiz, L., 2019, "Determinación de parámetros óptimos para un proceso de manufatura aditiva de acero ER70S-6, aplicado mediante proceso mig-router cnc".
- Korkut, I., Boy, M., Karacan, I., Seker, U., 2007, Investigation of chip-back temperature during machining depending on cutting parameters. Materials & design, Elsevier, pp. 2329-2335.
- Lima, M.L., 2016, Retificação plana tangencial dos ferros fundidos nodular, vermicular e cinzento em várias condições de corte. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Uberlândia.
- Mezlini, S., Mzali, S., Sghaier, S., Braham, C., Kapsa, P. (2014). Effect of a combined machining/burnishing tool on the roughness and mechanical properties. Lubrication Science, Wiley Online Library, pp. 175-187.
- Moreira, M.C., 2011, Serramento do aço abnt 1045 utilizando serras circulares com insertos de metal duro e cermet. Universidade Federal de Minas Gerais.
- Moreira, M.C., 2016, "Usinabilidade do aço inoxidável supermartensítico durante o serramento circular utilizando serras com insertos intercambiáveis de metal duro revestidos e sem revestimento". Universidade Federal de Minas Gerais.
- Norrish, J., 2021, A review of wire arc additive manufacturing: Development, principles, process physics implementation and current status. Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 54 473001.
- Novelino, A.L., 2021, Estudo da geometria dos cordões fabricados pelo processo de manufatura aditiva por deposição a arco. Projeto de graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, p. 80.
- Oliveira, C.C., 2022, Análise da microestrutura de peças impressas de arame ER70S-6 obtidas através de manufatura aditiva por deposição a arco via processo GMAW-CMT. Projeto de graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, p. 83.
- Paiva, R. L. (2016). Aplicação de fluido de corte a baixas temperaturas na retificação plana tangencial do aço SAE 52100. Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Uberlândia.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, Departamento da Engenharia Mecânica (ENM), Faculdade de Tecnologia (FT) da Universidade de Brasília (UnB) pelo apoio e suporte laboratorial/financeiro.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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