

INFLUÊNCIA DO FRESAMENTO TANGENCIAL NA RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE DE AMOSTRAS FABRICADAS POR MANUFATURA ADITIVA METÁLICA EM AÇO MARAGING C300 SOB DIFERENTES MEIOS LUBRIRREFRIGERANTES

Franciele Juliana Rebelo
Márcio Piecha dos Santos
André João de Souza

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC), Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS), Rua Sarmento Leite, nº425, Porto Alegre, RS, CEP 90050-170
franciele_rebelo@hotmail.com; marcio_piecha@hotmail.com; ajsouza@ufrgs.br

Resumo: Os sistemas de manufatura aditiva de materiais metálicos vêm ganhando destaque nos últimos anos pela possibilidade de produzir peças metálicas com geometrias complexas, as quais não poderiam ser fabricadas por processos de usinagem convencional. Outro benefício é a redução no desperdício de matéria-prima devido a não geração de cavacos neste processo, o que o torna mais amigável ao meio ambiente. O aço maraging C300, obtido por manufatura aditiva metálica (MAM), é uma alternativa eficaz para os setores aeroespacial, naval, médico, odontológico e de fabricação de moldes & matrizes devido às suas excelentes propriedades mecânicas. Contudo, processos de fresamento podem ser necessários para proporcionar um melhor acabamento da superfície e uma menor tendência para deformação residual na seção transversal da peça usinada, visto que a maioria das aplicações do aço maraging C300 exigem um acabamento com ótima qualidade para não comprometer a aplicação do produto final. Sabe-se que a aplicação de técnicas lubrirrefrigerantes pode afetar o desempenho do processo de usinagem. Com isso, o trabalho visa comparar diferentes meios lubrirrefrigerantes aplicados ao processo de fresamento tangencial concordante e discordante em amostras de aço maraging C300 fabricadas através do método de fusão seletiva a laser (SLM), a fim de identificar a melhor combinação entre as técnicas de fresamento e lubrirrefrigeração e aliviar o impacto da fabricação ao meio ambiente. Para esse propósito, o fresamento foi executado com corte a seco, mínima quantidade de lubrificante (MQL) e ar comprimido resfriado a 0 °C, mantendo os parâmetros de corte constantes (rotação e avanço por volta). Para cada condição lubrirrefrigerante, foi usinada uma amostra no sentido concordante e uma no sentido discordante. A qualidade do acabamento foi verificada por meio da análise da textura da superfície usinada com um microscópio universal e pela medição da rugosidade através de um perfilômetro. Os resultados mostraram que uma peça fabricada por MAM apresenta valores de rugosidade média elevados ($R_a = 5,317 \pm 0,536 \mu\text{m}$), mostrando a necessidade de uma operação de usinagem posterior para obter um bom acabamento. Após o fresamento frontal, o valor médio obtido foi $R_a = 0,766 \mu\text{m}$ (redução de aproximadamente 86%, em que a melhor condição foi encontrada aplicando a técnica MQL para o fresamento concordante ($R_a = 0,516 \pm 0,184 \mu\text{m}$), seguido pelo ar refrigerado. Os valores foram, respectivamente, 46% e 34% menores que no corte a seco.

Palavras-chave: manufatura aditiva metálica; aço maraging C300; fresamento tangencial; meio lubrirrefrigerante; rugosidade da superfície usinada.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a indústria tem buscado alternativas para melhorar seus processos produtivos, principalmente em relação à redução de custo. Com isso, a manufatura aditiva metálica (MAM – *Metal Additive Manufacturing*) tem-se mostrado uma solução para o desenvolvimento de produtos mais complexos, possibilitando novos modelos de negócio. A MAM é um processo que permite produzir peças metálicas com elevada densidade, com redução de poros e imperfeições no seu interior, possibilitando obter propriedades mecânicas similares a outros processos de beneficiamento. Uma grande vantagem da MAM é a fabricação de peças com formas complexas, as quais não poderiam ser fabricadas por processos de usinagem convencional (Horst et al., 2018; Lindemann et al., 2012).

De acordo com a ISO/ASTM 52900 (2021), há sete tipos de manufatura aditiva, sendo que quatro destas são aplicadas a materiais metálicos: *Powder Bed Fusion* (PBF), *Direct Energy Deposition* (DED), *Binder Jetting* (BJT) e *Sheet Lamination* (SHL). O PBF é uma das técnicas mais utilizadas, que consiste na fusão do pó metálico através de um feixe de laser, com foco na fabricação de peças altamente complexas e em pequenos lotes. Para essa técnica, há métodos específicos de fusão do pó metálico, destacando-se o *Selective Laser Melting* (SLM) (Gomes e Wiltgen, 2020). Na tecnologia SLM, a matéria-prima metálica é utilizada em forma de pó ou pequenas partículas. As peças são formadas

gradativamente através da deposição de camadas de pó fundidas por meio de um laser de alta potência, conforme ilustrado na Fig. 1. A varredura percorrida por este feixe de laser é definida a partir de um modelo CAD (*Computer Aided Design*), projetado previamente conforme especificações que a peça ou protótipo deve conter (Gibson et al., 2021; Lin, 2016; Venkatesh e Nandini, 2013).

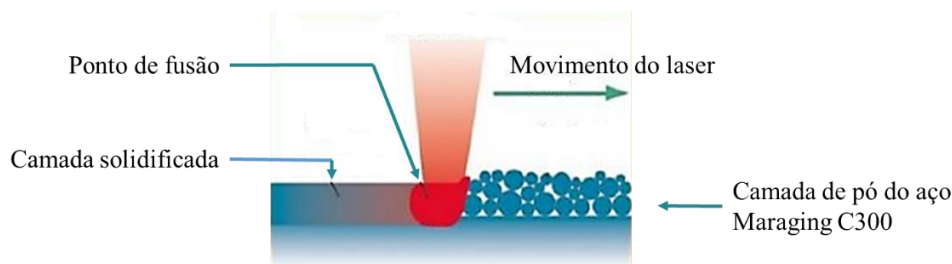


Figura 1. Feixe do laser (adaptada de Rebelo, 2016); (b) superfície gerada por deposição de camadas

Como a peça é elaborada a partir de um modelo 3D, é necessário que o arquivo esteja em um formato STL, criado pela 3D Systems, e que hoje é um formato de domínio público. Este formato de arquivo cria uma réplica do modelo projetado em vários triângulos, que variam de tamanho e qualidade, de acordo com a complexidade da superfície e a resolução requerida. Desta forma, a qualidade da superfície da peça está atrelada à espessura das camadas de material depositadas (Fig. 2a) e de acordo com o tamanho e quantidade dos triângulos (Fig. 2b) (Araújo, 2018; Gibson et al., 2021).

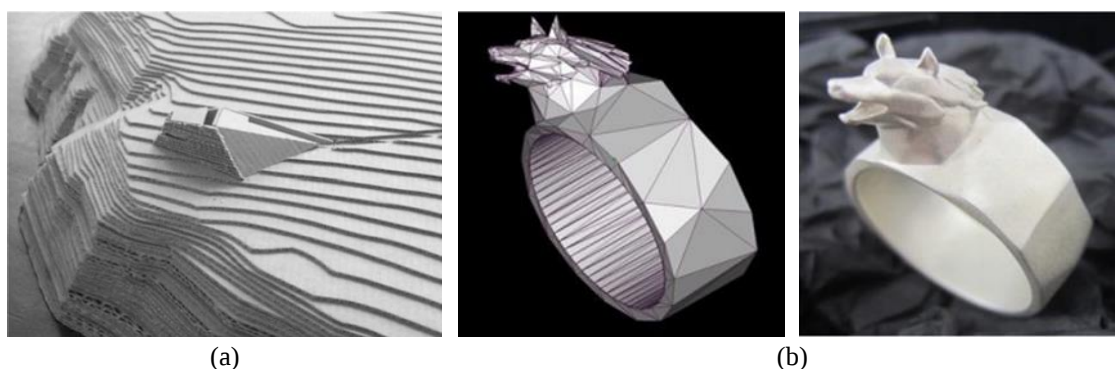


Figura 2. (a) superfície gerada por deposição de camadas (Gibson et al., 2021); (b) comparativo do arquivo STL com a peça pronta (Araújo, 2018).

Este método de MAM permite trabalhar com vários tipos de materiais, dispensa pós-processamento e pós-cura, não necessita de estrutura de suporte e possibilita a fabricação de várias peças simultaneamente, maximizando o volume de trabalho (Gomes e Wiltgen, 2020).

Basicamente a fabricação das peças pode ser dividida nas seguintes etapas (Lin, 2016):

- O desenvolvimento da informação geométrica e estrutural da peça, que é definido como o modelo CAD 3D;
- A adição da matéria-prima ou mistura no depósito de pó no interior da câmara de alimentação;
- Deposição de uma fina camada de pó sob uma plataforma de impressão;
- Fusão do material depositado através de um feixe laser, cuja trajetória é determinada no software da máquina a partir do modelo CAD 3D;
- Repetição do processo até a obtenção da peça completa;
- A fabricação da peça é finalizada com o acabamento da superfície, realizado em uma etapa subsequente.

O acabamento, após a MAM, torna-se necessário para otimizar a rugosidade e corrigir dimensões, de modo a garantir a integridade do componente durante sua utilização. Desta forma, diferentes processos, técnicas, ferramentas, parâmetros de corte e meios lubrificadorrefrigerantes podem ser empregados para obter o melhor resultado. Dos principais processos de usinagem, o fresamento é a operação mais adequada para produzir, de maneira eficiente, formas geométricas complexas. O fresamento também é comumente utilizado como um processo secundário para adicionar ou refinar recursos em peças que foram fabricadas usando algum outro processo (Jozic et al., 2015).

O fresamento é um processo mecânico de usinagem que tem por característica a obtenção de superfícies prismáticas com a utilização de ferramentas multicortantes (fresas) a partir de operações de corte tangencial e/ou frontal. Neste estudo será aprofundado o fresamento tangencial, em que se obtém uma superfície plana, paralela ao eixo de rotação da ferramenta, no qual podem ser aplicados dois sentidos de corte (Dib et al., 2015; Sandvik, 2020):

- Concordante (Fig. 3a): no movimento relativo ferramenta-peça, o vetor velocidade de avanço é no mesmo sentido do vetor velocidade de corte. Neste caso, a espessura do cavaco gerado varia de um máximo para um mínimo. O choque da aresta de corte com a peça no contato inicial é maior. Entretanto, o acabamento gerado tende a ser melhor, além de a fresa apresentar uma vida mais longa, menor força e potência para o avanço e um caminho mais curto da aresta durante o corte.
- Discordante (Fig. 3b): o vetor velocidade de avanço é no sentido contrário ao vetor velocidade de corte no movimento relativo ferramenta-peça. Tem-se a variação da espessura do cavaco de um mínimo para um máximo. O atrito elevado no contato inicial ferramenta-peça aumenta a temperatura, ocasionando um aumento da taxa de desgaste e a consequente diminuição da vida da fresa. Além disso, o acabamento tende a ser inferior que no concordante.

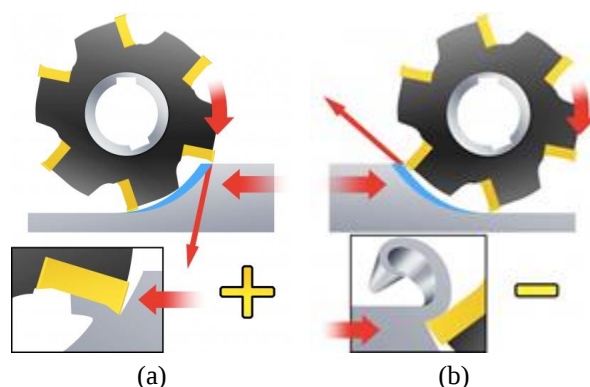


Figura 3. Tipos de fresamento tangencial: (a) concordante; (b) discordante (Sandvik, 2020).

Uma das formas de aprimorar ainda mais a usinabilidade e melhorar o acabamento da superfície das peças é com a escolha de um lubrificador adequado. Sabe-se que o lubrificante tem como principais funções: a refrigeração da peça, ferramenta e zona de corte; a lubrificação da interface peça/ferramenta e ferramenta/cavaco; e ainda, a expulsão do cavaco da zona de corte. Dentre as principais técnicas amigáveis ao meio ambiente, podem ser citados o corte a seco, a mínima quantidade de lubrificação (MQL) e a utilização de ar resfriado (Fratila, 2013; Debnath et al., 2014).

Os principais benefícios associados à usinagem a seco estão relacionados ao fator ambiental, pois caracteriza uma fabricação mais limpa, não gera contaminação e resíduos nocivos ao ambiente e à saúde dos operadores. A redução do impacto ambiental é um tópico importante na produção sustentável. Além disso, é possível reduzir o custo com fluidos de corte e com o tratamento dos mesmos para posterior descarte. Estes custos na década de 1980 representavam cerca de 3% dos custos de usinagem, e agora atingem o patamar de 17% (Jozic et al., 2015). Comparativamente, os custos de compra e substituição de ferramentas representam uma parcela de 2% a 4% dos custos de produção. Dependendo do tipo de fluido de corte, da sua quantidade e da aplicação inadequada do mesmo em um determinado processo de usinagem, isso pode diminuir a eficiência da lubrificação, reduzir a vida da ferramenta e aumentar a rugosidade da superfície usinada, promovendo assim queda na produtividade do processo (Sreejith e Ngoi, 2000). Além disso, a usinagem a seco apresenta resultados promissores nos processos de torneamento e fresamento. No entanto, a técnica está geralmente associada à geração de altas temperaturas na zona de corte, o que reduz a vida da ferramenta devido à diminuição da sua dureza a quente, e cujas falhas ainda comprometem o acabamento. Tais obstáculos podem ser contornados com a utilização de ferramentas com alta resistência ao desgaste e baixo coeficiente de atrito (Goindi e Sarkar, 2017), ou com a aplicação de MQL (Debnath et al., 2014).

O MQL é uma técnica de lubrificação que mistura ar comprimido e o lubrificante, aplicados sob pressão, com vazão muito baixa, e na forma de névoa ou pequenas gotículas. Os principais benefícios do MQL são a redução no consumo de lubrificante devido a vazão reduzida, a possibilidade de combinação com óleos biodegradáveis, e a facilidade de penetração na zona de corte, de modo que a redução no atrito e a extração do calor sejam feitas o mais próximo possível da zona. Com uma pressão de aplicação adequada, o MQL também pode auxiliar na quebra e remoção do cavaco. Porém, em processos de usinagem com a geração de cavaco longo e que esteja muito concentrado próximo à zona de corte, o MQL pode ser bloqueado por este acúmulo de cavaco, o que é uma desvantagem para este método. (Sharma et al., 2015). Liew (2010) analisou o desempenho de ferramentas de metal-duro com nanorevestimento TiAlN/AlCrN, revestimento TiAlN e sem revestimento no fresamento em baixa velocidade de corte (50 m/min) do aço inoxidável martensítico modificado (STAVAX) com fluido de corte em abundância e em MQL. O autor concluiu que as ferramentas com nanorevestimento e o fresamento com MQL apresentaram os melhores resultados quanto às falhas da ferramenta.

A refrigeração a ar comprimido atua sobre a peça para evitar sua dilatação e com isto possibilitar uma maior obtenção da precisão dimensional. Na ferramenta, a refrigeração é importante para manter as características de resistência e dureza. O ar frio é mais favorável em termos de desgaste da ferramenta quando os parâmetros de corte apresentam níveis mais baixos. O ar frio também é mais favorável em termos de rugosidade da superfície se as condições de corte forem definidas

para níveis mais altos. As forças de corte são mais baixas em muitos casos ao usar ar refrigerado do que ao usar o fluido de corte em abundância (Jozić et al., 2015). Assim, o ar comprimido refrigerado pode melhorar a precisão dimensional da peça e a qualidade do acabamento da superfície, além de não ter nenhum efeito adverso sobre a saúde do operador.

Deste modo, o objetivo do trabalho consiste em investigar, de maneira comparativa, a influência do fresamento tangencial na rugosidade média (Ra) da superfície de amostras fabricadas por manufatura aditiva metálica em aço maraging C300 aplicando corte a seco, MQL e ar comprimido refrigerado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O aço maraging C300 foi escolhido por ser um aço martensítico (liga a base de Fe-Ni) que apresenta boas propriedades mecânicas, tais como alta resistência mecânica (pode ultrapassar 2000 MPa), alta tenacidade à fratura, boa soldabilidade, boa resistência a corrosão e boa usinabilidade, quando comparado com aços convencionais de alta resistência (Floreen, 1968; Guo et al., 2022; Kempen et al., 2011). A martensita não é causada por um alto teor de carbono, comumente encontrada em outros aços ferramenta, mas sim por uma alta concentração de níquel (Azizi et al., 2019; Solberg et al., 2021). Os aços mais comuns das classes de 18 Ni são C200, C250, C300 e C350, onde a designação numérica representa o limite de escoamento (em KSI) da classe de aço (Moshka et al., 2015). Suas principais aplicações são na área aeroespacial, militar, naval, médica, odontológica e na fabricação de moldes e matrizes (Azizi et al., 2019; Floreen, 1968; Guo et al., 2022; Kempen et al., 2011; Solberg et al., 2021; Van Swan et al., 1974). Como a MAM é efetivamente um processo de microsoldagem de alta velocidade, são as propriedades favoráveis de soldabilidade do aço maraging que o tornam um candidato perfeito para este processo (Azizi et al., 2019). A composição química deste aço é apresentada na Tab. 1 e a Fig. 4 ilustra o setup experimental.

Tabela 1. Composição do aço maraging C300 (% massa) (Ben-Artzy et al., 2021).

Ni	Co	Mo	Ti	Al	Cr	C	Mn, Si	P, S	Fe
17 - 19	8,5 - 9,5	4,5 - 5,2	0,6 - 0,8	0,05 - 0,15	< 0,50	< 0,03	< 0,10	< 0,01	Rest.



Figura 4. Setup experimental.

Seis amostras de aço maraging C300 em formato cúbico com 20 mm de aresta foram fabricadas em MAM pela tecnologia SLM através da máquina de impressão 3D Systems modelo ProX300. Após a fabricação, as peças foram removidas da plataforma pelo processo de eletroerosão a fio. Na sequência, foram capturadas imagens da superfície por meio de um microscópio óptico universal Omo modelo YNM-21, com o objetivo de analisar o aspecto da textura da peça. Além disso, foi realizada a medição da dureza da amostra através do durômetro Reicherter aplicando uma carga de ensaio de 150 kgf, com penetrador em cone de diamante 120° e tempo de força aplicada de 10 s. A média de cinco medições apresentou uma dureza de 36,7 HRC, sem nenhum tratamento térmico na amostra.

Em seguida, as amostras foram submetidas às operações de fresamento concordante e discordante, com diferentes meios lubrificadorrefrigerantes. Para tanto, foi utilizado o centro de usinagem Hermle modelo C30 U Dynamic e a fresa de topo inteiraça de metal-duro Franken TiNox-Cut 2649TZ.010 com revestimento TiN/TiAlN, quatro arestas, 10 mm de diâmetro, 22 mm de comprimento de corte e ângulo de hélice de 45°. Os parâmetros de corte utilizados no fresamento tangencial foram velocidade de corte $v_c = 120$ m/min, avanço por dente $f_z = 0,04$ mm/dente, profundidade de corte axial $a_p = 1$ mm e profundidade de corte radial $a_e = 4$ mm. Os meios lubrificadorrefrigerantes utilizados foram o corte a seco, o ar comprimido refrigerado por tubo de vórtice a 0 °C direcionado na zona de corte a uma pressão de 400 kPa, e o fluido de corte Ecocut Mikro Plus 20 aplicado em MQL a uma vazão de 80 ml/h e pressão de 156 kPa. Foi efetuado um passe sentido concordante e um no sentido discordante para cada meio lubrificadorrefrigerante com os parâmetros de corte fixos, totalizando seis amostras analisadas.

Com a finalização do processo de fresamento, as amostras passaram por nova captura de imagens da superfície usinada, de modo a analisar possíveis diferenças no aspecto da superfície. Posteriormente, foram submetidas à análise de rugosidade, com o objetivo de verificar qual meio lubrificadorrefrigerante promoveu um melhor acabamento, considerando-se o fresamento tangencial concordante e discordante. Nesta avaliação, foi considerado o parâmetro de rugosidade média (R_a), conforme a norma ABNT NBR ISO 4288 (2008). Os valores foram adquiridos através do medidor de rugosidade e contorno Mitutoyo Formtracer SV-C300 CNC sob condições controladas de temperatura ($20,0 \pm 0,5$ °C) e umidade do ar (abaixo de 65%). A análise de R_a foi realizada com filtro de onda Gaussiana, comprimento de amostragem $l_r = 0,8$ mm e comprimento de avaliação $l_n = 4,0$ mm. As medições foram realizadas com a utilização de um apalpador com raio de 2 μ m, ângulo da ponta de 60°, força de medição de 0,75 mN e velocidade de avanço de 1,0 mm/s.

Foram realizadas cinco medições em diferentes posições distribuídas na superfície de cada amostra. Basicamente, essas posições de medição concentram-se nas extremidades e na região central da amostra, proporcionando um resultado com maior confiabilidade em relação às variações da superfície. A Figura 5a representa as posições e deslocamentos de avanço do apalpador nos sentidos de medição A e B, e a Fig. 5b ilustra os sentidos representados na amostra. No caso, o sentido A é perpendicular à direção de avanço da ferramenta e o sentido B é paralelo a esta direção. Após as medições, os resultados para cada combinação entre meio lubrificadorrefrigerante e sentido de fresamento foram avaliados para propor qual a melhor alternativa para a condição analisada. Por fim, a textura da superfície das amostras também foi analisada por meio de um microscópio óptico universal com o objetivo de identificar possíveis falhas resultantes do fresamento.

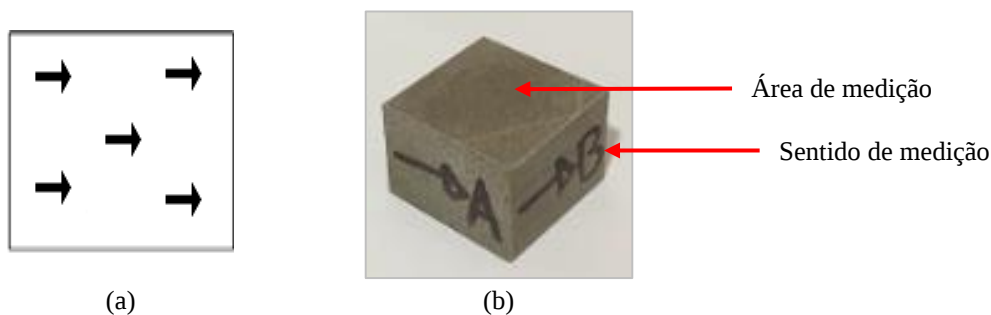


Figura 5. Medição da rugosidade da superfície usinada: (a) posições de medição; (b) indicação dos sentidos A e B.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 6 mostra a imagem da textura da amostra gerada por MAM observada por meio do microscópio óptico universal. Observam-se porosidades na superfície da amostra devido às camadas de pó sequenciais (ver Fig. 2a), bem como o caminho percorrido pelo laser para realizar a fusão seletiva do pó (SLM), o que faz com que a porosidade seja localizada, principalmente, na fronteira entre as camadas.

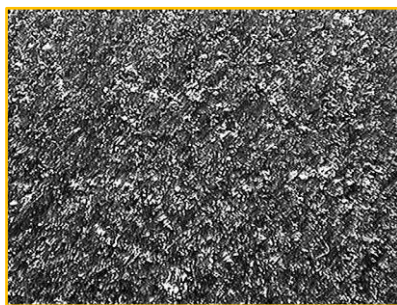


Figura 6. Imagem da textura da amostra obtida por MAM antes do fresamento tangencial.

Azizi et al. (2019) citam que a microestrutura e as reações de precipitação no C300 durante o SLM mostraram que uma estrutura celular-dendrítica muito fina se desenvolve durante o processo, juntamente com austenita revertida. Como resultado da distribuição não homogênea dos elementos de liga, o material apresenta porosidade limitada (menos de 1,0 vol.%) por toda parte, juntamente com alguns detalhes da estrutura.

Considerando os sentidos de medição A (perpendicular ao avanço da fresa) e B (paralelo ao avanço da fresa), os valores de rugosidade média registrados foram $Ra_A = (5,201 \pm 0,330) \mu\text{m}$ e $Ra_B = (5,432 \pm 0,710) \mu\text{m}$, antes do processo de fresamento. Os maiores valores em B se devem provavelmente à orientação da construção das amostras. A microestrutura fabricada aditivamente é tipicamente anisotrópica, com uma textura de grão direcional. A deposição de pó multicamada, em conjunto com as cargas de aquecimento cíclico aplicadas às camadas previamente solidificadas resulta em uma microestrutura totalmente diferente. Assim, as propriedades mecânicas são diferentes nas direções horizontal e vertical. Devido à rápida taxa de resfriamento durante a solidificação, os grãos tendem a se alongar perpendicularmente aos limites da poça de fusão (Solberg, K et al., 2021). Amostras orientadas verticalmente têm mais concentração de tensão do que orientadas horizontalmente devido ao fluxo de calor nas baixas temperaturas o que, provavelmente, também impactou nos resultados da medição de rugosidade encontrados neste estudo, em que a direção B apresenta uma rugosidade superior a direção A (Bhardwaj e Shukla, 2018).

O comportamento de deformação de aços maraging tem sido investigado na literatura, mostrando plasticidade induzida por transformação (TRIP). Tensões internas resultantes de gradientes de temperatura acentuados e altas taxas de resfriamento são os fatores que afetam fortemente as propriedades mecânicas, a microestrutura resultante e a ocorrência de poros e falhas. Os vales no perfil de rugosidade da superfície atuam como elevadores de tensão, tornando-os propensos ao início da fadiga (Shamsdini et al., 2021). Até o momento, não foi encontrada literatura que mostre o efeito da orientação da construção na rugosidade e microdureza da superfície na direção da construção.

Solberg et. al (2021) analisaram um estudo que indica que o efeito da orientação do crescimento da trinca (ou seja, paralela e perpendicular às camadas de construção) tem relação com defeitos internos, como falta de regiões de fusão ou poros, uma vez que os defeitos da superfície são removidos com a usinagem, identificaram também que o crescimento da trinca por fadiga é mais rápido paralelamente às camadas de construção do que perpendicularmente. Bhardwaj e Shukla (2018), mencionam um estudo em que encontraram o efeito de duas direções de construção (horizontal e vertical) na rugosidade da superfície e precisão dimensional para componentes de aço inoxidável fabricados em DMLS. Elas relataram que as direções de construção têm um grande efeito na rugosidade da superfície e na precisão dimensional. Kempen et al. (2011) investigaram o efeito da espessura da camada e da velocidade de varredura no SLM do aço maraging C300 e encontraram diminuição na densidade e na dureza com o aumento de ambos. Os autores também relataram o efeito de refusão, que leva ao aumento da densidade devido ao envelhecimento natural. A orientação mostrou um papel significativo na rugosidade e na dureza da superfície devido à mudança no fluxo de calor para regiões fundidas a laser.

A Figura 7 apresenta o gráfico dos valores de rugosidade média mensurados para as diferentes condições de operação no fresamento tangencial do aço maraging C300. A linha pontilhada amarela indica a média das médias ($Ra = 0,766 \mu\text{m}$). Os menores valores de rugosidade média (Ra) foram produzidos nos cortes concordantes com MQL ($0,516 \pm 0,184 \mu\text{m}$) e com ar comprimido refrigerado a 0°C ($0,638 \pm 0,201 \mu\text{m}$). O corte a seco gerou os maiores valores ($0,962 \pm 0,355 \mu\text{m}$). De acordo com Sandvik (2020), a espessura de corte varia de máximo para mínimo e o acabamento gerado tende a ser melhor que no discordante. Ademais, a penetração dos fluidos na interface ferramenta-peça favoreceu a usinagem, principalmente devido à ação lubrificante do MQL e à redução do atrito pelo ar refrigerado.

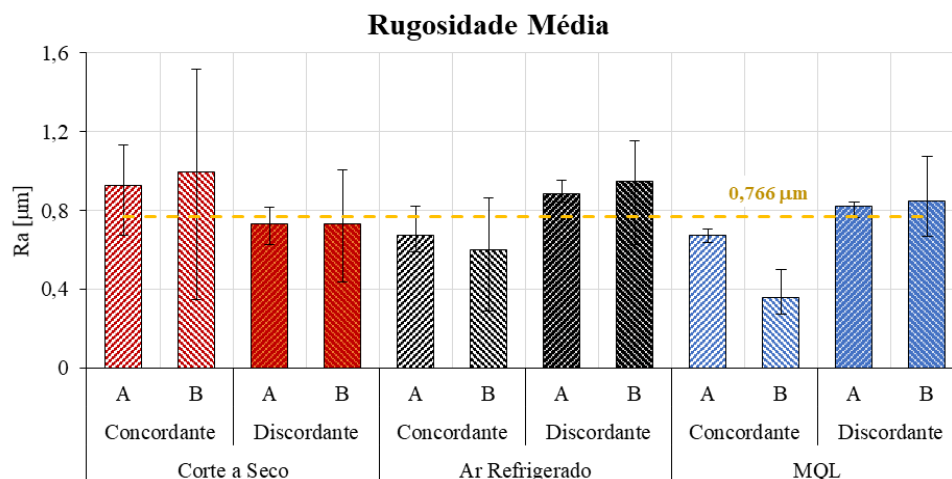


Figura 7. Gráfico dos valores de rugosidade média para as diferentes condições de operação no fresamento tangencial. As barras de erros representam as amplitudes máxima e mínima de Ra .

No fresamento a seco e com MQL de ferro fundido vermicular, Tu et al. (2022) concluíram que a vida mais longa da ferramenta e os menores valores de rugosidade foram alcançados no MQL. Rahman et al. (2003) investigaram o fresamento a seco, com ar comprimido refrigerado e com fluido de corte em abundância, do aço-ferramenta ASSAB 718HH usando insertos de metal-duro não revestidos. Constataram que o ar refrigerado proporciona menor taxa de desgaste com baixos níveis de parâmetros de corte e menor rugosidade com altos níveis destes. As forças de usinagem foram menores em muitos casos com ar refrigerado que com fluido em abundância. Esses resultados são semelhantes aos encontrados neste estudo.

Por outro lado, o melhor resultado para R_a no fresamento discordante foi no corte a seco ($0,731 \pm 0,165 \mu\text{m}$), seguido pelo corte com MQL ($0,835 \pm 0,121 \mu\text{m}$). Os piores resultados foram na usinagem com ar refrigerado ($0,917 \pm 0,146 \mu\text{m}$). Neste caso, a espessura varia de mínimo para máximo, e o atrito elevado no contato inicial ferramenta-peça aumenta a temperatura (Dib et al., 2015). Além disso, o maior calor gerado pela ausência de lubrificação reduziu a resistência ao corte do material, favorecendo a penetração da ferramenta (Sharma et al., 2022). Portanto, acredita-se que o efeito refrigerante do ar comprimido tenha sido prejudicial ao acabamento no fresamento discordante do aço maraging C300.

A análise de variância (ANOVA) comprovou estatisticamente a influência do meio lubrificante, do método de fresamento e do sentido de medição sobre os valores de rugosidade média. A Figura 8 mostra o gráfico dos efeitos principais sobre R_a e a Fig. 9 o gráfico da interação de fatores. Avaliando os efeitos principais e considerando os meios lubrificantes, os menores valores de R_a foram gerados no fresamento com MQL ($0,676 \pm 0,223 \mu\text{m}$), seguido pela usinagem com ar refrigerado ($0,777 \pm 0,223 \mu\text{m}$); por conseguinte, os maiores valores foram resultantes do corte a seco ($0,847 \pm 0,294 \mu\text{m}$) pelos motivos supracitados. No caso do sentido de corte, conforme esperado, o fresamento concordante apresentou menores valores de rugosidade ($0,705 \pm 0,315 \mu\text{m}$) em comparação ao discordante ($0,828 \pm 0,160 \mu\text{m}$). Em relação ao sentido de medição, o B indicou valores menores ($0,747 \pm 0,338 \mu\text{m}$) que o A ($0,786 \pm 0,132 \mu\text{m}$). Contudo as diferenças não foram significativas.

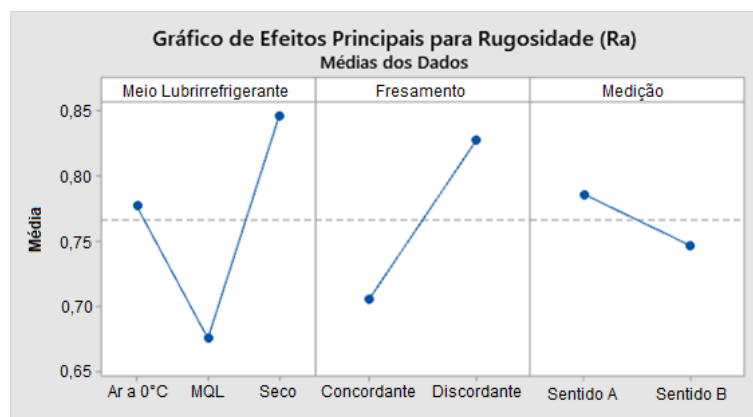


Figura 8. Efeitos principais para a rugosidade média (R_a).

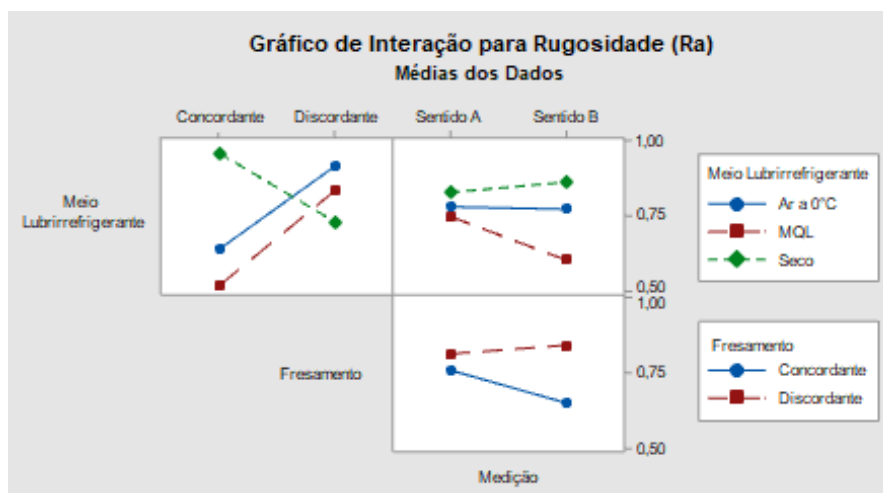


Figura 9. Gráfico de interação dos fatores para a rugosidade média (R_a).

A Figura 10 ilustra as imagens das texturas das superfícies usinadas nas seis amostras avaliadas. Observa-se que a condição de corte concordante com aplicação da técnica MQL, combinação que gerou o menor resultado para de

rugosidade média ($R_a = 0,516 \pm 0,184 \mu\text{m}$), apresenta uma homogeneidade na textura e marcas superficiais mais suaves causadas pela ferramenta de corte, favorecida pela ação lubrificante. Já no caso corte concordante a seco, que proporcionou o pior resultado para R_a ($0,962 \pm 0,355 \mu\text{m}$), observam-se marcas acentuadas na superfície da amostra causadas pela ferramenta de corte sem ação lubrificadorante, o que por conseguinte interferiu nos resultados de medição.

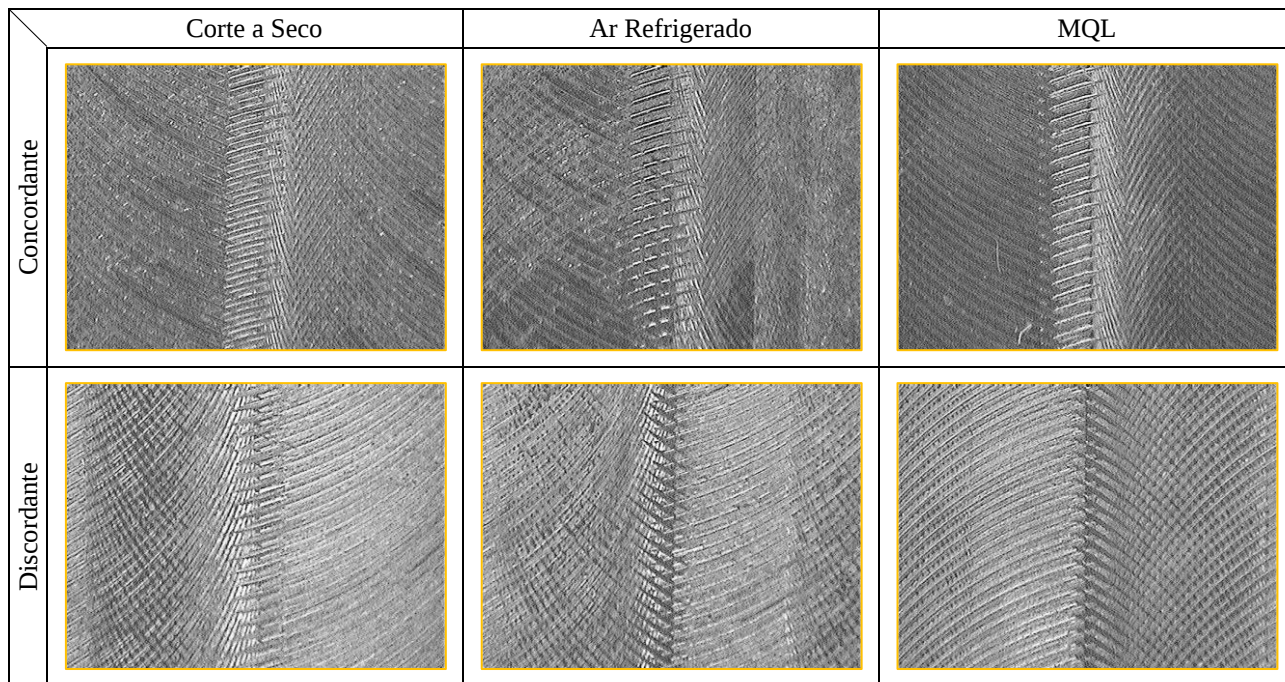


Figura 10. Imagens das texturas das amostras usinadas.

4. CONCLUSÕES

Este estudo propôs avaliar a combinação entre as operações tangenciais de fresamento concordante e discordante utilizando fresa inteiraça de metal-duro, parâmetros de corte constantes ($v_c = 120 \text{ m/min}$, $f_z = 0,04 \text{ mm/dente}$, $a_p = 1 \text{ mm}$ e $a_e = 4 \text{ mm}$) e diferentes condições de lubrificação (corte a seco, com ar comprimido refrigerado a 0°C , e mínima quantidade de lubrificação) de amostras de aço maraging C300 fabricadas por meio de manufatura aditiva metálica (MAM). Para as análises foram considerados alguns requisitos a serem observados, como a rugosidade média (R_a) e o aspecto da superfície. Diante disso, os seguintes pontos podem ser destacados:

- A peça fabricada por MAM apresentou valores de rugosidade média elevados ($R_a = 5,317 \pm 0,536 \mu\text{m}$), mostrando a necessidade de uma operação de usinagem posterior para obter um bom acabamento. Após o fresamento frontal, o valor médio obtido foi $R_a = 0,766 \mu\text{m}$ (redução de aproximadamente 86%).
- O fresamento no sentido concordante gerou valores de R_a cerca de 15% menores que no sentido discordante.
- O MQL resultou em menores valores de rugosidade média para o fresamento concordante ($R_a = 0,516 \pm 0,184 \mu\text{m}$), seguido pelo ar refrigerado. Os valores foram respectivamente 46% e 34% menores que no corte a seco.
- O corte a seco possibilitou alcançar os melhores resultados para o fresamento discordante, seguido pelo MQL. Os valores foram respectivamente 20% e 9% menores que na usinagem com ar refrigerado.
- Os sentidos de medição paralelo e perpendicular ao avanço da fresa geraram valores de rugosidade distintos, porém não significativos. As diferenças ficaram em torno de 5%.
- As texturas mostraram que o corte concordante com aplicação da técnica MQL propiciou uma superfície mais homogênea e marcas suaves da ferramenta de corte; em contrapartida, o corte concordante a seco gerou marcas acentuadas na superfície da amostra.

5. REFERÊNCIAS

- ABNT NBR ISO 4288, 2008 *Especificação geométrica de produto (GPS) – Rugosidade: método do perfil – Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, 16p.
- Araújo, G. G., 2018. Fabricação Aditiva: Tecnologias e Parâmetros. *Regrad – Revista Eletrônica de Graduação do UNIVEM*, v. 10, n. 1, p. 417-432.
- Azizi, H. et. al., 2019. Metallurgical and mechanical assessment of hybrid additively-manufactured maraging tool steels via selective laser melting. *Additive Manufacturing*, v. 27, p. 389-397.

- Ben-Artzy, A. et al., 2021. Compositionally graded SS316 to C300 maraging steel using additive manufacturing. *Materials & Design*, v. 201, p. 109500.
- Bhardwaj, T. e Shukla M., 2018. Direct metal laser sintering of maraging steel: effect of building orientation on surface roughness and microhardness. *Materials Today: Proceedings*, v. 5, n. 9, p. 20485-20491.
- Debnath, S., Reddy, M. e Yi, Q., 2014. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 83, p. 33-47.
- Dib, M. H. M., Benjamin, G. M. e Jasinevicius, R. G., 2015. Uma análise experimental do fresamento discordante e concordante. *Revista Iluminart*, v. 7, n. 13, p. 113-128.
- Floreen, S., 1968. The physical metallurgy of maraging steel. *Metallurgical Reviews*, v. 13, n. 1, p. 115-128.
- Fratila, J. P., 2013. Sustainable manufacturing through environmentally-friendly machining. In: *Green Manufacturing Processes and Systems*, Springer Berlin, Heidelberg, p. 1-21.
- Gibson, I., Rosen, D. e Stucker, B., 2021. *Additive Manufacturing Technologies*, Springer, New York, 498 p.
- Goindi, G. S. e Sarkar, P., 2017. Dry machining: A step towards sustainable machining – Challenges and future directions. *Journal of Cleaner Production*, v. 165, p. 1557-1571.
- Gomes, J.; Wiltgen, F., 2020. Avanços na Manufatura Aditiva em Metais: Técnicas, Materiais e Máquinas. *Revista Tecnologia*, v. 41, p. 1-16.
- Guo, L. et al., 2022. Additive manufacturing of 18% nickel maraging steels: Defects, structure and mechanical properties: A review. *Journal of Materials Science & Technology*, v. 120, p. 227-252.
- Horst, D. J., Duvoisin, C. A. e Vieira, R. A., 2018. Additive manufacturing at industry 4.0: A review. *International Journal of Engineering and Technical Research*, v. 8, n. 8, p. 3-8.
- ISO/ASTM 52900, 2021. *Additive Manufacturing – General Principles – Fundamentals and Vocabulary*. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 28 p.
- Jozic, S., Bajić, D. e Celent, L., 2015. Application of compressed cold air cooling: achieving multiple performance characteristics in end milling process. *Journal of Cleaner Production*, v. 100, p. 325-332.
- Kempen, K. et al., 2011. Microstructure and mechanical properties of selective laser melted 18Ni-300 steel. *Physics Procedia*, v. 12, p. 255-263.
- Liew, W. Y. H., 2010. Low-speed milling of stainless steel with TiAlN single-layer and TiAlN/AlCrN nano-multilayer coated carbide tools under different lubrication conditions. *Wear*, v. 269, n. 7-8, p. 617-631.
- Lin, W., 2016. *Desenvolvimento de um Sistema de Deposição de Pó Metálico Aplicável para os Processos SLS/SLM*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 142 p.
- Lindemann, C. et al., 2012. Analyzing product lifecycle costs for a better understanding of cost drivers in additive manufacturing. *International Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX, USA, v. 23, p. 177-188.
- Moshka, O. et al., 2015. Addressing the issue of precipitates in maraging steels – Unambiguous answer. *Materials Science and Engineering: A*, v. 638, p. 232-239.
- Rahman, M. et al., 2003. Effect of chilled air on machining performance in end milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 21 p. 787-795.
- Sandvik, 2020. *Fresamento Concordante vs. Fresamento Discordante*. Sandvik Coromant, 23 Mai. 2020 <www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/pages/up-milling-vs-down-milling.aspx>.
- Shamsdini, S. A. R. et al., 2021. A relationship between the build and texture orientation in tensile loading of the additively manufactured maraging steels. *Additive Manufacturing*, v. 41, p. 101954.
- Sharma, R. et al., 2022. Evaluation of machinability on duplex stainless steel 2205 under dry and wet condition. *Materials Today: Proceedings*, v. 65, p. 3357-3361.
- Sharma, V. S., Singh, G. R. e Sørby, K., 2015. A review on minimum quantity lubrication for machining processes. *Materials and Manufacturing Processes*, v. 30, n. 8, p. 935-953.
- Solberg, K. et al., 2021. Directional fatigue behaviour of maraging steel grade 300 produced by laser powder bed fusion. *International Journal of Fatigue*, v. 149, p. 106229.
- Sreejith, P.S. e Ngoi B. K. A., 2000. Dry machining: machining of the future. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 101, n. 1-3, p. 287-291.
- Tu, L. et al., 2022. Surface layer microstructure and mechanical characteristics analysis of cast iron during milling process under supercritical CO₂-MQL. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 82, p. 722-737.
- Van Swan, L. F., Pelloux, R. M. e Grant, N. J., 1974. Properties of maraging steel 300 produced by powder metallurgy. *Powder Metallurgy*, v. 17, n. 33, p. 33-45.
- Venkatesh, K. V. e Nandini, V. V., 2013. Direct metal laser sintering: A digitised metal casting technology. *The Journal of Indian Prosthodontic Society*, v. 13, n. 4, p. 389-392.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

INFLUENCE OF PERIPHERAL MILLING ON THE SURFACE ROUGHNESS OF SAMPLES MANUFACTURED BY METALLIC ADDITIVE MANUFACTURING IN C300 MARAGING STEEL UNDER DIFFERENT LUBRICOOING CONDITIONS

Franciele Juliana Rebelo

Márcio Piecha dos Santos

André João de Souza

Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), Department of Mechanical Engineering (DEMEC), Laboratory of Automation in Machining (LAUS), 425 Sarmiento Leite St., Zip Code 90050-170, Porto Alegre, RS, Brazil.

franciele_rebelo@hotmail.com; marcio_piecha@hotmail.com; ajsouza@ufrgs.br

Abstract. In recent years, additive manufacturing systems for metallic materials have been gaining prominence due to the possibility of producing metallic parts with complex geometries, which conventional machining processes could not manufacture. Another benefit is reducing raw material waste due to the non-generation of chips in this process, making it more environmentally friendly. C300 maraging steel, obtained by metallic additive manufacturing (MAM), is an effective alternative for the aerospace, naval, medical, dental, and mold & die manufacturing sectors due to its excellent mechanical properties. However, milling processes may be required to provide a better surface finish and less tendency for residual deformation in the cross-section of the machined part since most applications of C300 maraging steel require a high-quality finish not to compromise the application of the final product. It is known that applying lubricooling techniques can affect the performance of the machining process. Thus, this work aims to compare different lubricooling environments used for up and down tangential milling of C300 maraging steel samples manufactured through selective laser melting (SLM) to identify the best combination between milling and lubricooling techniques and reduce the impact of manufacturing on the environment. For this purpose, milling was performed with dry cutting, minimum quantity lubrication (MQL), and cooled compressed air at 0 °C, keeping the cutting parameters constant (speed and feed per revolution). For each lubricooling condition, a sample was machined in the conventional (up) and climb (down) direction. The quality of the surface finish was checked by analyzing the texture of the machined surface with a universal microscope and measuring the surface roughness with a profilometer. The results showed that a part manufactured by MAM presents high average roughness values ($R_a = 5,317 \pm 0,536 \mu\text{m}$), showing the need for a subsequent machining operation to obtain a good finish. After milling, the average value measured was $R_a = 0.766 \mu\text{m}$ (a reduction of approximately 86%), in which the best condition was found by applying the MQL in down milling ($R_a = 0.516 \pm 0.184 \mu\text{m}$), followed by cooled air. These values were, respectively, 46% and 34% lower than in the dry cutting.

Keywords: metallic additive manufacturing; C300 maraging steel; peripheral milling; lubricooling conditions; surface roughness

RESPONSIBILITY NOTICE

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