

INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE CRIOGENIA/MQL DURANTE FRESAMENTO NO ACABAMENTO SUPERFICIAL DO AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX ASTM A890

Murilo Calegari Pinheiro ¹; Éd Claudio Bordinassi ²

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

² Professor do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT).

Resumo. *Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência de diferentes métodos de lubrificação/refrigeração na usinagem do aço inoxidável super duplex ASTM A890. Foram realizados ensaios de fresamento comparando as condições a seco (DRY), fluido em abundância (WET), mínima quantidade de lubrificante (MQL), mistura de nanopartículas de bissulfeto de molibdênio (MoS_2) ao fluido do MQL (MQL.P), criogenia (CRY) e a junção dos métodos MQL e CRY (MQL.CRY). Para análise, consideraram-se os esforços de corte, a rugosidade superficial e a superfície das amostras observadas por microscópio eletrônico de varredura (MEV). Os ensaios foram realizados em um centro de usinagem ROMI e os parâmetros de corte foram fixados ($v_f = 190$ mm/min, $v_c = 150$ m/min, $a_p = 0,5$ mm). Os resultados indicaram que o método MQL.CRY apresentou desempenho superior em relação à qualidade superficial, com valores de rugosidade menores que os demais e superfície mais homogênea. As condições utilizando MQL.P apresentaram os piores resultados, combinando rugosidade elevada, marcas de usinagem mais profundas e esforços de corte significativamente maiores que as demais condições, as quais mantiveram valores de força semelhantes entre si.*

Introdução

O aço é o material mais utilizado na construção de equipamentos e máquinas, por ter baixo custo e ser versátil, já que é possível mudar completamente suas propriedades mecânicas adicionando poucos elementos de liga ou por meio de tratamentos térmicos. Com isso, a indústria, ao longo do tempo, vem estudando e criando diferentes tipos de aços para empregá-los nas mais diversas áreas da construção fabril.

Os estudos de aços inoxidáveis tiveram início há mais de 100 anos com o metalurgista Harry Brearley, e desde então novas ligas vêm sendo desenvolvidas e aplicadas em diferentes setores industriais. Os aços inoxidáveis são definidos como ligas ferro-carbono contendo no mínimo 11% de cromo, elemento responsável pela formação de uma camada passiva de óxido que garante elevada resistência à corrosão (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Dentro desse grupo, destaca-se o aço inoxidável super duplex (SDSS), que contém diversos elementos de liga, concedendo-lhe características especiais.

Esse tipo de aço possui características altamente vantajosas, como elevada resistência à corrosão em ambientes agressivos, alta resistência mecânica e boa soldabilidade, o que o torna uma escolha promissora para aplicações nas indústrias química e petrolífera. No entanto, essas mesmas propriedades podem dificultar sua usinagem. A elevada resistência mecânica, embora contribua para aumentar a vida útil dos equipamentos, acelera o desgaste das ferramentas de corte e prolonga o tempo de usinagem em comparação a outros aços. Além disso, sua baixa condutividade térmica dificulta a dissipação do calor, favorecendo fenômenos de abrasão e intensificando ainda mais o desgaste das ferramentas (RAJAGURU; ARUNACHALAM, 2020). Apesar das vantagens mecânicas do SDSS, a usinagem apresenta desafios que ainda não foram totalmente solucionados, tornando essencial a busca por novas soluções.

Outro fator fundamental no momento da usinagem de qualquer aço é a escolha do meio de refrigeração que será usado, já que a lubrificação adequada aumenta o desempenho do processo e ajuda a resfriar a peça. O método mais empregado na indústria é o uso do fluido em abundância (WET), que apresenta alto impacto ambiental. No estudo de Miranda et al. (2023),

foi feita uma comparação entre o método WET e o da mínima quantidade de lubrificante (MQL), que consiste em usar uma quantidade muito reduzida de fluido, misturada com ar comprimido, fazendo com que haja uma nebulização do fluido de corte. O método MQL mostra-se eficiente mesmo com baixo consumo de fluido, pois as partículas do óleo penetram entre a aresta de corte da ferramenta e a superfície do material, formando uma fina camada de lubrificação (TASDELEN et al., 2018). Essa camada reduz o atrito na zona de corte, diminuindo os esforços necessários para a usinagem. Assim, o MQL mostrou desempenho superior, menor impacto ambiental e menor custo quando comparado ao método tradicional WET.

Uma alternativa não convencional para lubrificação seria a criogenia (CRY), que consiste na aplicação de um líquido sub-zero para resfriar a peça/interface de corte antes da usinagem. Segundo os estudos de Kanagaraju et al. (2022), o método CRY, em passes curtos, atingiu temperaturas mais baixas e proporcionou um acabamento superficial mais refinado (rugosidade menor) quando comparada com os métodos MQL e WET.

Outra forma de usinagem não convencional seria a utilização de nanopartículas dissolvida no fluido do MQL (MQL.P), essas nanopartículas possuem a função de diminuir o atrito e melhorar o acabamento superficial da peça. Em um estudo realizado por Uysal et al. (2015), no qual 1% de MoS₂ foi adicionado ao fluido do MQL, observou-se uma melhoria tanto no acabamento superficial da peça quanto no prolongamento da vida útil da ferramenta de corte. A utilização de criogenia juntamente com o método MQL (MQL.CRY) é uma alternativa pouco comum, mas que traz excelentes resultados. No estudo de Iruj et al. (2024), o método MQL.CRY se mostrou eficiente em reduzir o atrito e melhorar o resfriamento do material durante a usinagem.

Diante disso, este trabalho tem como objetivo avaliar a usinagem do aço inoxidável super duplex A890 utilizando os métodos tradicionais WET e DRY em comparação aos não tradicionais (MQL, MQL.P, CRY e MQL.CRY), analisando os esforços gerados durante o fresamento e a qualidade superficial das peças.

Materiais e Métodos

O material utilizado neste estudo foi o aço inoxidável super duplex ASTM A890, o mesmo utilizado por Bordinassi (2006). Esse material possui dureza de 290 HB e passou por processo de fundição seguido de solubilização a 1130 °C com resfriamento em água. O aço em questão é composto de cerca de 60% de ferro e os principais elementos de liga estão apresentados na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Principais elementos de liga do aço ASTM A890

Elemento	C	Cr	Ni	Mo	Cu	Si	W	Mn	N	Sn	Zr
%wt	0,02	24,8	7,49	3,37	0,8	0,8	0,79	0,65	0,24	0,082	0,059

Fonte: Bordinassi (2006)

Os ensaios foram realizados no Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, utilizando um centro de usinagem vertical Romi Discovery 560 equipado com cabeçote CoroMill 245 (45°) de 63 mm de diâmetro e 5 insertos Sandvik R245-12 T3 K-MM 2030. Para padronização, adotaram-se parâmetros de corte próximos aos propostos pelo fabricante, sendo eles:

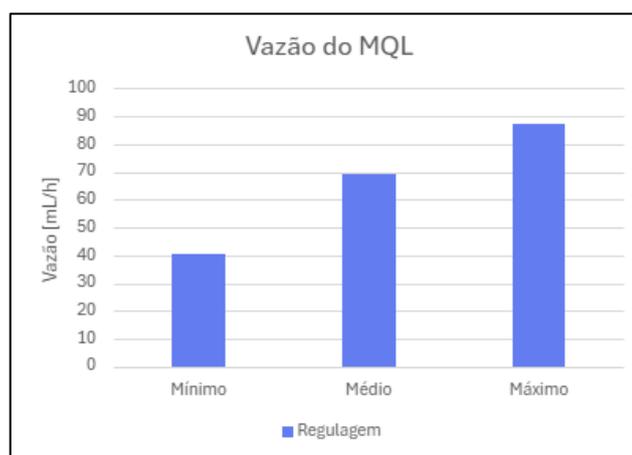
- v_f (velocidade de avanço): 190 mm/min;
- v_c (velocidade de corte): 150 m/min;
- a_p (profundidade de corte): 0,5 mm;

Para avaliar a influência na rugosidade e na qualidade superficial das amostras, com dimensões de 17(b) × 17(l) × 23(h) mm, foram comparados seis métodos de refrigeração/lubrificação: usinagem a seco (DRY), com fluido em abundância (WET), com mínima quantidade de lubrificante (MQL), MQL com nanopartícula de MoS₂ (MQL.P), com criogenia (CRY) e MQL com criogenia (MQL.CRY). Antes de cada ensaio, foi realizado um passe de regularização para eliminar eventuais imperfeições superficiais e nivelar a superfície a ser fresada.

No experimento WET, utilizou-se o óleo BOREAL BL, dissolvido em água na proporção de 1:20. Para realizar o teste, o fluido foi aplicado em abundância sobre a superfície de corte da peça durante o processo de fresamento.

O equipamento MQL utilizado foi o modelo da Manutex CNC, juntamente com fluido específico para essa aplicação, o Vascomill MMS FA2, doado pela Blaser. Foi realizado um levantamento experimental para determinar os pontos de ajuste correspondentes às vazões desejadas, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Gráfico da vazão do MQL Manutex CNC



Fonte: Próprio autor

Para preparar o ensaio com nanopartículas (MQL.P) foi preparada uma mistura de 500 mL do fluido Vascomill e 2 g de bissulfeto de molibdênio. Essa mistura foi levada para o misturador Ultra-turrax e foi agitada por 5 min. Na sequência, essa solução foi levada para a lavadora ultrassônica da linha ecosonics, na qual agitou por mais 10 min o fluido. Por fim, essa solução ficou por 2 min no sonificador ultrassônico Q700 da Qsonica. Desse modo, é esperado que as nanopartículas de MoS₂ fique bem dissolvida no fluido do MQL. Não foi necessário realizar um novo ensaio de vazão no MQL, visto que a vazão não se alterou.

O ensaio de criogenia (CRY) foi realizado utilizando nitrogênio líquido aplicado diretamente na amostra durante a usinagem. Foi utilizado o compressor de ar Air Plus Schulz 12v Duo para pressurizar o recipiente com nitrogênio e, por outra saída, o líquido foi direcionado para o corpo de prova. Para o ensaio de MQL com criogenia (MQL.CRY) as duas técnicas foram empregadas simultaneamente.

Vale salientar que todos os ensaios envolvendo MQL foram realizados nas três vazões possíveis (mínimo, médio e máximo). Foram realizadas 3 etapas de captação de dados durante o trabalho:

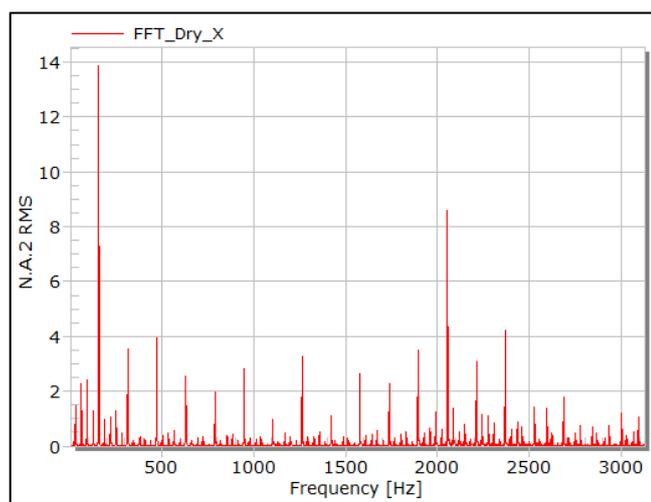
- Medição dos esforços de corte;
- Medição da rugosidade das peças;
- Obtenção de imagens topográficas no microscópio eletrônico de varredura;

Os corpos de prova foram fixados à célula de carga tridimensional Kistler 9367C, com o objetivo de medir os esforços de corte transmitidos à peça durante o processo de fresamento.

Os sinais foram coletados com frequência de 6250 Hz. Posteriormente, os dados foram exportados para planilhas e processados no software catmanEasy 5.4 da HBM, onde se aplicou a Transformada Rápida de Fourier (FFT) para identificar as frequências predominantes dos esforços. Como é possível ver na Figura 2, o segundo pico mais alto de frequência ocorre próximo de 2100 Hz, porém é possível notar o maior valor em 60 Hz. Isso ocorre devido à frequência da rede elétrica do Brasil ser de 60 Hz, portanto esse valor é puramente ruído captado pelo sensor.

Por fim, utilizou-se o filtro Butterworth band-pass para eliminar os ruídos indesejados e preservar as frequências de interesse. Para todos os experimentos foram encontradas frequências predominantes próximas de 2100 Hz e se aplicou o mesmo filtro, mitigando frequências que não estavam entre 2000 Hz e 2200 Hz. É necessário considerar uma faixa de valores próximos ao pico para não serem descartadas nenhuma frequência útil.

Figura 2 - Gráfico da FFT com as frequências da força Y no ensaio DRY



Fonte: Próprio autor

A rugosidade das amostras foi medida utilizando o rugosímetro Mitutoyo SJ-301. Cada peça foi avaliada três vezes, com pequenas variações na posição de medição próxima ao centro. A média dos parâmetros obtidos foi calculada para cada amostra. Os parâmetros registrados foram o Ra (rugosidade média aritmética), Rq (rugosidade quadrática média), Rz (profundidade média máxima de rugosidade) e Rt (altura máxima total de rugosidade). As medições foram realizadas com cut-off $\lambda_c = 0,8$ mm ($5 \times \lambda_c$). Entretanto, o parâmetro principal para comparar a qualidade superficial das peças é o Ra, por ser amplamente utilizado no controle de qualidade de superfícies usinadas, conforme a NBR ISO 4287, e estar presente em diversos artigos.

Na terceira e última etapa, foi utilizado o MEV Tescan Vega LMU, com o objetivo de avaliar qualitativamente o acabamento superficial. A análise buscou identificar fissuras, marcas de usinagem e riscos, complementando os dados de rugosidade. As imagens foram obtidas com ampliações progressivas de 100x, 200x, 500x, 1000x e 4000x.

Resultados e Discussão

1ª Análise – Esforços de corte

A análise da Figura 3 mostra que as condições MQL.P apresentaram os maiores valores de RMS (Root Mean Square – valor quadrático médio), tanto na força de avanço (X) quanto na de corte (Y), enquanto a condição DRY registrou os menores valores. Embora a maioria dos resultados tenham ficado muito próximos (variando em X de 16,39 N até 21,12 N), os resultados com a utilização da nanopartícula foram, de 46% até 114%, maiores na direção da força de

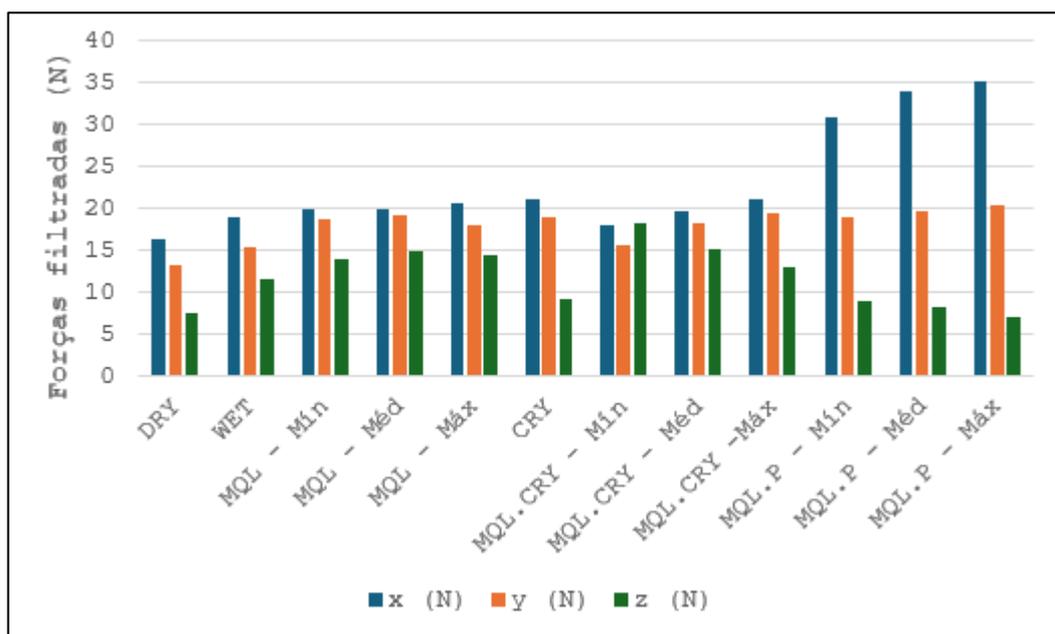
corde. A causa mais provável para esse efeito é que a nanopartícula de bissulfeto de molibdênio não tenha diminuído o atrito da maneira esperada durante a usinagem.

Outro comportamento a ser destacado é o ensaio DRY, que obteve os menores valores de força, a possível causa seria o efeito térmico. No corte a seco, o aumento de temperatura local reduz a resistência ao cisalhamento do material, facilitando sua deformação plástica. Já nos outros ensaios, principalmente no WET e os que utilizam CRY, o resfriamento intenso mantém o material mais encruado, aumentando a resistência ao corte. Esse fenômeno já foi relatado em estudos utilizando o próprio SDSS (RAJAGURU; ARUNACHALAM, 2020).

Ao analisar a componente Z das forças, observa-se que seus valores seguem o mesmo comportamento geral das direções X e Y, porém em escala menor. Em praticamente todas as condições, a força Z permaneceu baixa e estável, destacando-se apenas o ensaio MQL.CRY – Mín., que apresentou um leve aumento em relação às demais. Já nas condições com nanopartículas (MQL.P), a força Z não apresentou o mesmo aumento observado nas forças X e Y, manteve-se em níveis reduzidos.

De modo geral, os métodos de refrigeração apresentaram influência limitada sobre os esforços de corte, pois a maior parte das condições permaneceu dentro de um intervalo estreito. Entretanto, a condição MQL.P destoou desse comportamento, exibindo forças significativamente maiores devido ao provável aumento de atrito. Isso mostra que, embora a refrigeração geralmente tenha impacto reduzido nos esforços de usinagem, seu efeito ainda é menor quando comparado ao aumento expressivo que seria observado com a variação dos parâmetros de corte.

Figura 3 - RMS das ondas filtradas



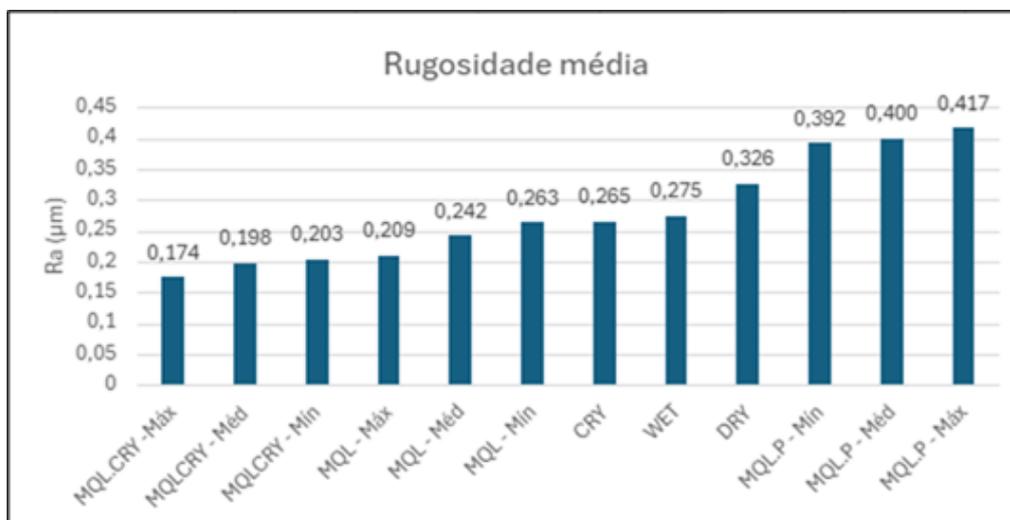
Fonte: próprio autor

2ª Análise – Rugosidade superficial

A análise da Figura 4 indica que a combinação do método da mínima quantidade de lubrificante com a criogenia (MQL.CRY), apresentou desempenho superior em relação a todos os outros métodos avaliados. Mesmo quando o MQL.CRY foi utilizado com a vazão mínima, o acabamento superficial obtido superou o alcançado com o uso do MQL na vazão máxima. Cabe destacar que o método CRY isolado apresentou desempenho inferior ao do MQL, porém, quando foram combinados, obteve-se ganhos expressivos.

A utilização do MQL, em geral, se mostrou muito eficiente e, exceto no ensaio com nanopartícula, foram obtidos resultados que mostram a sua eficiência quando utilizado junto com a criogenia ou sozinho. Os ensaios utilizando MQL obtiveram rugosidade média mais baixas (melhor acabamento) que os ensaios com criogenia, com fluido em abundância e a seco, mostrando sua superioridade e eficiência.

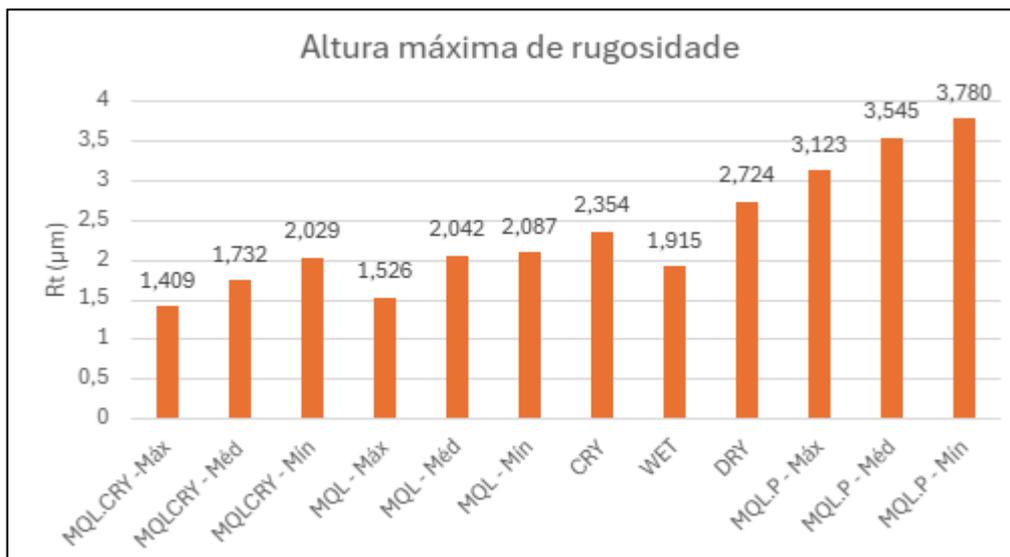
Figura 4 - Valores do Ra de todos os ensaios



Fonte: Próprio autor

Um aspecto relevante observado nos ensaios MQL.P foi o aumento significativo da altura máxima de rugosidade (Rt), observado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.5**, dando indícios da ocorrência de riscos na superfície da peça, possivelmente associados à presença das nanopartículas de MoS₂. Como mostrado por Uniyal et al. (2024) e Kulkarni et al. (2024), quando nanopartículas aglomeram ou sedimentam, elas alteram seu comportamento tribológico e podem aumentar atrito e desgaste. Além disso, Akchurin et al. (2016) destacam que partículas maiores/aglomeradas podem produzir sulcos e arranhões significativos, funcionando como corpos de desgaste.

Figura 5 - Valores do Rt de todos os ensaios



Fonte: Próprio autor

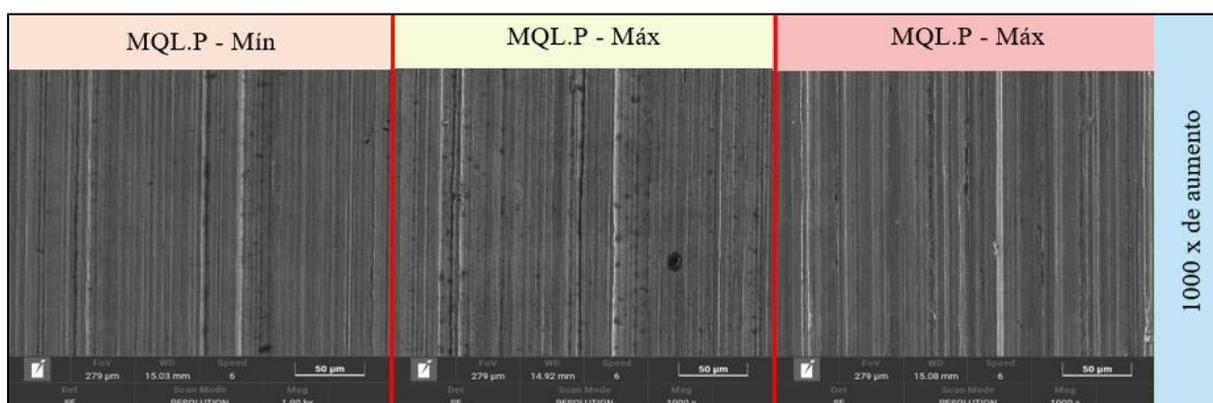
3ª Análise – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

Comparando apenas as imagens dos ensaios MQL.P da **Erro! Fonte de referência não encontrada.6**, é possível observar que as amostras apresentaram poucos defeitos, porém com algumas marcas profundas de usinagem. Além disso, constatou-se que, à medida que a vazão aumentava (mín → máx), as marcas de usinagem tornavam-se mais evidentes. Conforme esperado na análise anterior, o uso de nanopartículas, apesar de em geral ter uma superfície com menos defeitos e bem homogênea, tornou as marcas de usinagem mais profundas (R_t alto) e um aumento da rugosidade média nas amostras (R_a alto). Dessa forma, a utilização de MoS_2 , nessas condições e métodos de preparação, não apresentou resultados eficientes, ocasionando em uma rugosidade média superior.

A literatura aponta que o desempenho de nanolubrificantes está diretamente relacionado à eficiência do processo de dispersão das nanopartículas. Segundo Lu et al. (2023), nanopartículas de MoS_2 possuem alta energia superficial e possuem forte tendência a se aglomerar, sendo necessária ultrassonização eficiente para “quebrar e dispersar as partículas suspensas” (Lu et al., 2023). Entretanto, esses autores destacam que energia ultrassônica insuficiente pode não romper aglomerados, enquanto energia excessiva pode aumentar colisões entre partículas e favorecer nova aglomeração. Da mesma forma, Asadi et al. (2020) observaram que o aumento do tempo de ultrassonização até 60 min melhora a estabilidade, eleva o potencial zeta (mede a estabilidade da dispersão) e reduz a viscosidade, indicando melhor distribuição e menor tendência à sedimentação.

Adicionalmente, Wang et al. (2020) mostram que protocolos de preparação mais rigorosos, envolvendo ultrassonização de 1 h, tratamento químico, secagem e posterior moagem ultrassônica seguida de moagem assistida por micro-ondas, resultaram em nanolubrificantes mais estáveis e com desempenho superior ao preparo direto em óleo. Portanto, o tempo reduzido de ultrassonização empregado neste estudo (10 min) pode ter sido insuficiente para promover a desaglomeração e estabilização do MoS_2 , favorecendo a presença de aglomerados que atuam como abrasivos.

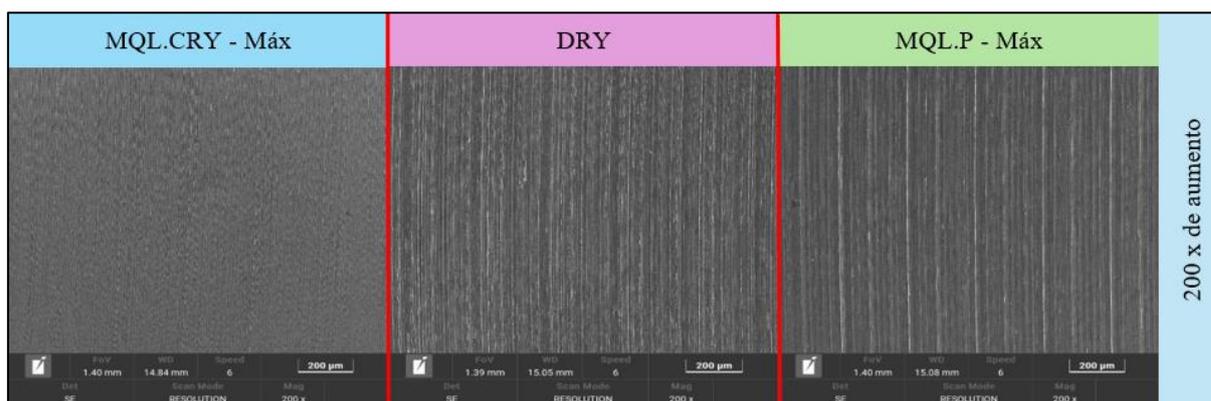
Figura 6 - Imagens do ensaio MQL.P com 1000x de aumento



Fonte: Próprio autor

Contrastando as imagens apresentadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.7**, é possível observar que a imagem do MQL.CRY - Máx apresenta uma superfície bastante homogênea e com praticamente nenhum defeito, enquanto a imagem do ensaio DRY evidencia uma superfície menos homogênea e com marcas do fresamento mais evidentes. Por outro lado, a imagem do ensaio com nanopartícula tornou as marcas do processo de usinagem bastante evidentes, embora apresentem menos defeitos quando comparada com o ensaio DRY.

Figura 7 - Imagens dos ensaios MQL.CRY - Máx, DRY e MQL.P - Máx com 200x de aumento



Fonte: Próprio autor

Conclusão

Com base nos ensaios realizados, verificou-se que o método MQL.CRY apresentou o melhor desempenho global dentre todas as condições avaliadas, especialmente no que se refere à qualidade superficial, alcançando os menores valores de rugosidade Ra e uma superfície homogênea observada no MEV. O método MQL convencional também demonstrou resultados satisfatórios, com acabamento e desempenho superior aos métodos WET, DRY e CRY, reforçando as vantagens da utilização da mínima quantidade de lubrificação para a usinagem do aço inoxidável super duplex ASTM A890.

A utilização de nanopartículas de MoS₂ no fluido do MQL (MQL.P) não apresentou o desempenho esperado e resultou nos maiores valores de rugosidade (Ra e Rt) dentre todas as condições avaliadas. As análises por MEV revelaram marcas de usinagem mais profundas e evidências compatíveis com desgaste abrasivo, possivelmente associadas à aglomeração das nanopartículas, conforme indicado pela literatura. Assim, conclui-se que, nas condições de preparação empregadas neste estudo, aglomerando as nanopartículas, comprometeu seu efeito lubrificante, prejudicando seu efeito e piorando a qualidade superficial.

Com base nos resultados, recomenda-se a aplicação do método MQL com criogenia em processos industriais que utilizem o aço ASTM A890. Esse método é altamente eficiente e sustentável para a usinagem, visto que não deixam resíduos. E vale salientar que a utilização do método MQL convencional traz ótimos resultados.

Referências

Akchurin, A.; Tennekus, H.; Löwen, H.; Baart, P.; Schipper, D.J. (2016) Analysis of wear particles formed in boundary-lubricated contacts. *Tribology Letters*, **62**, 1–14. DOI: 10.1007/s11249-016-0701-z.

Asadi, A.; Al-Arifi, I.M.; Ali, V.; Nguyen, H.M. (2020) Investigating the effects of ultrasonication time on stability, dynamic viscosity and pumping power management of MWCNT–water nanofluid: an experimental study. *Scientific Reports*, **10**, 15182. DOI: 10.1038/s41598-020-71978-9.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2002) *NBR ISO 4287:2002*. Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro.

Bordinassi, E.C. (2006) Contribuição ao estudo da integridade superficial de um aço inoxidável super-duplex após usinagem. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Callister, W.D.; Rethwisch, D.G. (2016) *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 9. ed. Rio de Janeiro, LTC.

- Krolczyk, G.M.; Maruda, R.W.; Krolczyk, J.B.; Nieslony, P.; Wojciechowski, S.; Legutko, S. (2018) Parametric and nonparametric description of the surface topography in the dry and MQCL cutting conditions. *Measurement*, **121**, 225–239.
- Kulkarni, A.; Pariti, S.K.R.; Kumar, S.; Rao, G.M. (2024) Optimizing nanoparticle attributes for enhanced anti-wear performance in nano-lubricants. *Journal of Engineering and Applied Science*, **71(1)**, 1–24.
- Lu, Z.; Lin, Q.; Cao, Z.; Li, W.; Gong, J.; Wang, Y.; Hu, K.; Hu, X. (2023) MoS₂ nanomaterials as lubricant additives: A review. *Lubricants*, **11(12)**, 527.
- Miranda, L.R. (2023) Investigação de métodos não-convencionais de lubrificação no torneamento do aço inoxidável super duplex ASTM A182 F55. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Rajaguru, J.; Arunachalam, N. (2020) A comprehensive investigation on the effect of flood and MQL coolant on the machinability and stress corrosion cracking of super duplex stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, **276**, 116417.
- Tasdelen, B.; Thordenberg, H.; Olofsson, D. (2008) An experimental investigation on contact length during minimum quantity lubrication (MQL) machining. *Journal of Materials Processing Technology*, **203**, 221–231.
- Uniyal, S.; Maheshwari, M.; Thakur, P.; Kumar, A. (2024) A review on the effect of metal oxide nanoparticles on mechanical and tribological properties. *ACS Omega*, **9(5)**, 6148–6164.
- Uysal, A.; Demiren, F.; Altan, E. (2015) Applying minimum quantity lubrication (MQL) method on milling of martensitic stainless steel by using nano MoS₂ reinforced vegetable cutting fluid. *Procedia. Social and Behavioral Sciences*, **195**, 2742–2747.
- Wang, S.; Chen, D.; Chen, Y.; Zhu, K. (2020) Dispersion stability and tribological properties of additives introduced by ultrasonic and microwave assisted ball milling in oil. *RSC Advances*, **10(42)**, 25177–25185.