

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DO USO DE MQL PARA UM TORNEAMENTO SUSTENTÁVEL DO AÇO AISI D6

Eric Ramalho Ferreira de Carvalho

Anderson Clayton Alves de Melo

Salete Martins Alves

eng.ericramalho@gmail.com, anderson@ufrnet.br, saletealves@ect.ufrn.br.

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Campus Universitário Lagoa Nova. CEP 59078-970, Caixa postal 1524. Natal/RN – Brasil.

Resumo. A utilização de fluidos de corte convencionais (à base de óleo mineral), embora vantajosa ao processo de usinagem, vem sendo questionada devido à toxicidade de substâncias presentes em sua composição, prejudiciais ao meio ambiente e à saúde do trabalhador. Este trabalho tem como principal objetivo apresentar uma alternativa aos fluidos de corte convencionais avaliando o desempenho em usinagem, do óleo de soja epoxidado, aplicado por MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante), no torneamento do aço-ferramenta AISI D6 temperado e revenido. Foram realizados testes de faceamento com parâmetros de corte constantes ($v_c = 100$ m/min, $a_p = 0,3$ mm e $f = 0,1$ mm/rot.) com insertos de PCBN. Para fins de comparação, foram realizados testes com uma emulsão (10%) de óleo mineral aplicada por jorro. Investigou-se o desgaste de flanco (VBc) das ferramentas de corte e o grau de recalque (R_c) dos cavacos gerados. Os resultados indicam que não houve diferença significativa das condições de lubrificação para os critérios avaliados, podendo-se concluir que a utilização do óleo de soja aplicado por MQL se mostrou viável em substituição ao jorro, pois, além de ser ambientalmente sustentável, não apresentou prejuízo ao desempenho do processo.

Palavras chave: Torneamento duro. Aço AISI D6. Óleo vegetal. MQL.

1. INTRODUÇÃO

Os processos de usinagem convencionais são caracterizados pela retirada de material da peça na forma de cavaco através de movimentos relativos entre esta e uma ferramenta de corte, visando à obtenção de formas e dimensões pré-determinadas. Durante esse processo uma grande quantidade de energia térmica surge devido ao atrito nas zonas de cisalhamento primária, secundária e de interface peça-ferramenta. Segundo Trent e Wright (2000), a energia térmica que se desenvolve nas operações de usinagem contribui diretamente na taxa de desgaste e na redução da vida útil da ferramenta de corte, sendo um fator que pode limitar a taxa de remoção de material.

Os fluidos de corte são comumente utilizados nos processos de usinagem por auxiliarem na redução do atrito, da temperatura e do desgaste, acarretando assim uma maior produtividade e qualidade dos produtos usinados (Talib e Rahim, 2016). Esses fluidos atuam de forma significativa na lubrificação e refrigeração das interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça, além de auxiliarem no processo de remoção dos cavacos (Sharma et al., 2017).

Mesmo com as indiscutíveis vantagens obtidas com o uso de fluidos de corte nos processos de usinagem, existem também problemas relacionados à sua utilização que motivam diversos estudos em busca de formas alternativas para substituí-los ou melhor adequá-los às exigências atuais (Darminesh et al., 2017). Tais problemas estão associados principalmente à toxicidade presente na maioria destes fluidos (Aggarwal et al., 2008) e ao alto consumo (Abdalla et al., 2007), este último, impulsionado principalmente pelo desenvolvimento industrial e pela busca crescente por alta produtividade.

Além de efeitos nocivos ao meio ambiente, o uso de fluidos de corte convencionais também gera problemas relacionados à saúde humana. Segundo o Instituto Nacional de Saúde e Segurança Ocupacional dos EUA (NIOSH) (2013), as exposições ocupacionais a fluidos de usinagem podem causar uma variedade de efeitos nocivos para a saúde. Os trabalhadores podem ser expostos aos fluidos respirando aerossóis gerados no processo de usinagem ou pelo contato com a pele ao manusear peças, ferramentas e equipamentos cobertos com os fluidos.

Baseado nos problemas oriundos da utilização dos fluidos de corte convencionais na indústria, países como Canadá, Japão, Suíça, EUA e ainda a União Europeia (UE), vêm criando regulamentações que visam restringir o uso destes, gerando assim uma demanda por métodos de lubrificação considerados sustentáveis e não-prejudiciais ao meio ambiente (Bartz, 2006). Na esteira dessa demanda surge o conceito de manufatura sustentável que consiste em:

Fabricação de produtos por processos economicamente viáveis, que minimizem os efeitos negativos no meio ambiente, conservem energia e recursos naturais, garantindo a segurança dos empregados, da comunidade e dos consumidores (Agência de Proteção Ambiental dos EUA, 2019).

Seguindo o conceito de manufatura sustentável, a usinagem sustentável busca apresentar formas alternativas aos métodos convencionais de lubrificação, tais como a remoção total dos fluidos de corte do processo (usinagem a

seco), a redução do consumo destes fluidos (aplicação da técnica MQL – Mínima Quantidade de Lubrificação) ou na substituição de fluidos convencionais por outros considerados menos agressivos (nitrogênio líquido, nanofluidos, óleos vegetais, etc.).

A usinagem de aços endurecidos, a exemplo do aço AISI D6, é um desafio para a usinagem sustentável em virtude da inviabilidade, em muitos casos, de se utilizar a usinagem a seco, que seria a mais correta do ponto de vista ambiental, devido as altas taxas de desgaste e altas temperaturas nas quais as ferramentas de corte ficam sujeitas durante o processo, o que acarreta na diminuição significativa da vida útil da ferramenta. Segundo Sadeghi *et al.* (2009), a alta taxa de desgaste na usinagem a seco se torna crítica particularmente quando se deseja atingir tolerâncias dimensionais mais estreitas e quando se usina materiais com baixo índice de usinabilidade.

Uma opção aos métodos convencionais de lubrificação na usinagem é a técnica MQL, que consiste na aplicação de um fluido lubrificante na zona de corte com mínima quantidade (de 50 a 500 ml/h) (Autret e Liang, 2003). O fluido é misturado com ar comprimido e entregue à zona de corte por meio de bocais com orifícios de pequeno diâmetro a pressões que variam de 4 a 6,5 bar (Jia *et al.*, 2014). Assim, o fluido de corte é atomizado e despejado na forma de névoa. Essa técnica vem sendo bastante estudada nas últimas décadas e tem mostrado grande eficiência, conseguindo apresentar resultados semelhantes e, em alguns casos, superiores à usinagem com aplicação de fluido em abundância em critérios tais como: vida útil da ferramenta de corte, rugosidade da superfície usinada, força de usinagem e temperatura de corte (Hada e Sadegui, 2013; Tazehkandi *et al.*, 2015; Lohar e Nanavaty 2013). O fato de aliar boas qualidades lubrificantes a um consumo mínimo de fluido de corte faz deste método uma alternativa viável ao uso de fluidos convencionais.

Mesmo sendo uma boa alternativa como método de lubrificação, a técnica MQL tem algumas desvantagens do ponto de vista operacional. O fato do fluido lubrificante ser despejado em forma de névoa faz com que o ambiente operacional fique “poluído”, podendo prejudicar a visibilidade do operador aumentando assim os riscos de acidente. A névoa também aumenta os riscos para a saúde do operador, visto que segundo Zhang *et al.* (2015), a forma pulverizada na qual o fluido é aplicado facilita a inalação de componentes tóxicos por parte dos trabalhadores.

Por esses fatores, existe a necessidade de se adequar o ambiente e os equipamentos, com a utilização de exaustores capazes de remover essa névoa. O custo dessa adaptação, somado ao custo da compra do sistema MQL pode ser considerado como a principal desvantagem desta técnica.

Devido a seus componentes tóxicos, a substituição dos fluidos de corte convencionais se faz necessária, mesmo quando aplicados em quantidades mínimas. Na busca por essa substituição, os óleos de base vegetal vêm se mostrando uma boa alternativa. Esses óleos possuem boa biodegradabilidade (Luna *et al.*, 2011), não são tóxicos, apresentam alto rendimento e fontes de obtenção abundantes. Comparado com o óleo mineral, o óleo vegetal tem ponto de ebulição e peso molecular mais elevados, o que diminui de forma relevante sua perda durante a atomização e gaseificação (Zhang *et al.*, 2015).

A maioria dos óleos vegetais tem sua estrutura química formada por triglicerídeos, que se associam a diferentes cadeias de ácidos graxos. A complexa associação de moléculas de ácidos graxos com uma única estrutura de triglicerídeo resulta na composição desses óleos vegetais (Sevim, 2005 apud Osama *et al.*, 2017). Ácidos graxos são principalmente ácidos não ramificados de cadeia longa alifáticos compostos de átomos ligados ao carbono. Na natureza os ácidos graxos são mais frequentemente compostos por um número par de átomos de carbono (Osama *et al.*, 2017).

A estrutura química dos óleos vegetais tem grande influência nas suas propriedades físico-químicas, possuindo, em sua grande maioria, boas propriedades lubrificantes, tais como: alta viscosidade, alto coeficiente de transferência de calor e estabilidade térmica, ou seja, a capacidade de manter suas propriedades químicas mesmo quando sujeitos a elevadas temperaturas. Por serem biodegradáveis, os óleos vegetais não são uma ameaça ao meio ambiente (Tazehkandi *et al.* 2015).

Como fluido de corte, os óleos vegetais apresentam, além das propriedades já citadas, a capacidade de formar uma camada espessa e durável na superfície usinada que pode absorver significativamente as pressões impostas a esta superfície. Pode-se concluir que, eventualmente, a utilização desses fluidos de corte, possibilita que parâmetros de corte mais severos possam ser utilizados na operação de usinagem (Tazehkandi *et al.*, 2015). Por outro lado, como desvantagem dos lubrificantes vegetais, pode-se destacar sua susceptibilidade à degradação por oxidação e sua propensão a sofrer hidrólise em meio ácido. Estas desvantagens podem ser facilmente contornadas através da utilização de aditivos antioxidantes (Huang *et al.*, 2003 apud Trajano, 2013).

Os óleos vegetais podem ainda ser modificados quimicamente com a finalidade de melhorar suas propriedades através dos seguintes métodos: epoxidação, esterificação e hidrogenação. Os óleos vegetais epoxidados têm como vantagem a excelente biodegradabilidade e sua fonte de origem renovável. Comparado com os óleos minerais, estes apresentam baixa volatilidade, alto índice de viscosidade, fácil miscibilidade com outros fluidos, reduzida toxicidade, melhores propriedades anti-corrosivas e maior afinidade com superfícies metálicas (Kleinová *et al.*, 2007).

Devido aos bons resultados da técnica MQL e as boas propriedades dos óleos vegetais, vários pesquisadores vem estudando essa combinação como um método de lubrificação alternativo aos métodos convencionais nos processos de usinagens. Tazehkandi *et al.* (2015) investigaram o desempenho de um óleo vegetal aplicado por MQL no torneamento da liga de níquel Inconel 706 com ferramenta de metal duro. Comparada com a aplicação de fluido convencional em abundância, a técnica MQL resultou em menores valores de força de corte, rugosidade da superfície usinada e temperatura de corte. Khan *et al.* (2009) apresentaram em seu trabalho o estudo do torneamento de um aço AISI 9310 com ferramenta

de metal duro, sob diferentes condições de lubrificação (seca, molhada e MQL usando óleo vegetal). O melhor desempenho foi obtido pela condição em que se utilizou o óleo vegetal com MQL, nessa condição foram obtidas as temperaturas mais baixas para diferentes taxas de avanço e velocidade de corte e também maiores valores de grau de recalque (R_c). Srikant e Ramana (2015) estudaram o desempenho de uma emulsão de óleo de gergelim com um emulsificante de base vegetal (óleo de coco) no torneamento um aço AISI 1040. A ferramenta utilizada era de metal duro e os parâmetros de corte foram mantidos constante. Os resultados foram comparados com a usinagem a seco e com o uso de um fluido mineral convencional. O fluido de corte de base vegetal apresentou valores bastante próximos ao fluido convencional e em certos momentos se mostrou superior, apresentando, por exemplo, os mais baixos valores de rugosidade superficial. Quando comparado com a usinagem a seco o desempenho foi bastante superior apresentando reduções de 40, 25 e 35% para temperatura, rugosidade superficial e desgaste da ferramenta respectivamente.

Diante do que foi exposto, este trabalho tem por objetivo avaliar o desempenho do óleo de soja epoxidado, aplicado por MQL, no torneamento do aço ferramenta AISI D6 temperado e revenido, buscando assim apresentar alternativas que possam substituir métodos convencionais de lubrificação de forma sustentável e tecnicamente eficiente na usinagem de aços de difícil usinabilidade.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos realizados para o desenvolvimento deste trabalho consistiram em ensaios de faceamento de um corpo de prova cilíndrico com ferramenta de PCBN com diferentes condições de lubrificação (jorro e MQL) e parâmetros de corte constantes. O faceamento foi adotado visando o melhor aproveitamento do material e principalmente a conservação das condições de usinagem ao longo dos ensaios. Os testes de usinagem foram realizados num torno CNC marca ROMI e modelo Centur 30D pertencente ao Laboratório de Manufatura do Núcleo de Tecnologia Industrial da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Para critério de comparação foram feitos testes em duas condições de lubrificação: jorro e MQL. Nos testes com jorro foi utilizado uma emulsão aquosa de óleo LUBRAX UTILE PE (10% na escala Brix). Nos testes com MQL foi utilizado o óleo de soja epoxidado produzido e fornecido pela INBRA LTDA, cujas propriedades estão descritas na Tab. 1. O sistema MQL utilizado foi o mini Lubetool da SONED.

Tabela 1. Propriedades do óleo de soja epoxidado (Inbra LTDA, 2019).

Parâmetros	Especificações
Densidade	0,990 g/ml
Índice de acidez	0,70 mg KOH/g máx.
Índice de Iodo	3,50 g I/100 g máx.
Índice de epóxi	6,50 g O/100 g min.
Viscosidade (25°)	380 cP
Ponto de fulgor	280°C
Voláteis	0,20 % máx.

O material do corpo de prova é o aço-ferramenta AISI D6 temperado e revenido, com dureza média de 57 HRC (Leadebal Jr., 2017). Como ferramenta de corte foram utilizados insertos de PCBN da Sandvik Coromant, modelo SNGN120412 S02520M fixado em um suporte Sandvik Coromant modelo DSBNR 2525M 12.

Os parâmetros avaliados para a comparação de desempenho foram o desgaste de flanco (VB_c) da ferramenta de corte e o grau de recalque (R_c) dos cavacos obtidos. A medição de desgaste de flanco e da espessura do cavaco (h'), necessária para o cálculo do (R_c), se deu com auxílio de um microscópio óptico digital USB Smile Optical SW 1008 e o software de medição Micro-Measure. Os valores de R_c foram calculados através da Eq. (1) (Trent e Wright, 2004), onde o valor de h foi considerado igual ao h_m obtido através das Eqs. (2), (3) e (4) (Grzesik *et al.*, 2015):

$$R_c = \frac{h}{h'} \quad (1)$$

$$K_{re} = \frac{1}{2} \arccos \left(\frac{r_\varepsilon - a_p}{r_\varepsilon} \right) \quad (2)$$

$$l_k = 2k_{re}r_e \quad (3)$$

$$h_m = a_p f / l_k \quad (4)$$

Onde:

K_{re} é o ângulo de corte da ferramenta;

r_ϵ é o raio de ponta da ferramenta;

l_k é o comprimento efetivo de contato;

h_m é a espessura média de corte.

Ficou estabelecido o desgaste de 0,3 mm como critério de fim de vida. As medições de desgaste foram realizadas a cada passe de faceamento. O fluxograma do experimento pode ser observado na Fig. 1. Os ensaios foram repetidos 3 vezes para cada condição. Após os ensaios de torneamento, foram realizadas as medições do grau de recalque dos cavacos, com o auxílio do microscópio óptico digital, e análises da aresta desgastada, com o equipamento MEV-FEG Zeiss Auriga 40 pertencente ao Laboratório de Caracterização Estrutural de Materiais (LCEM) da UFRN.

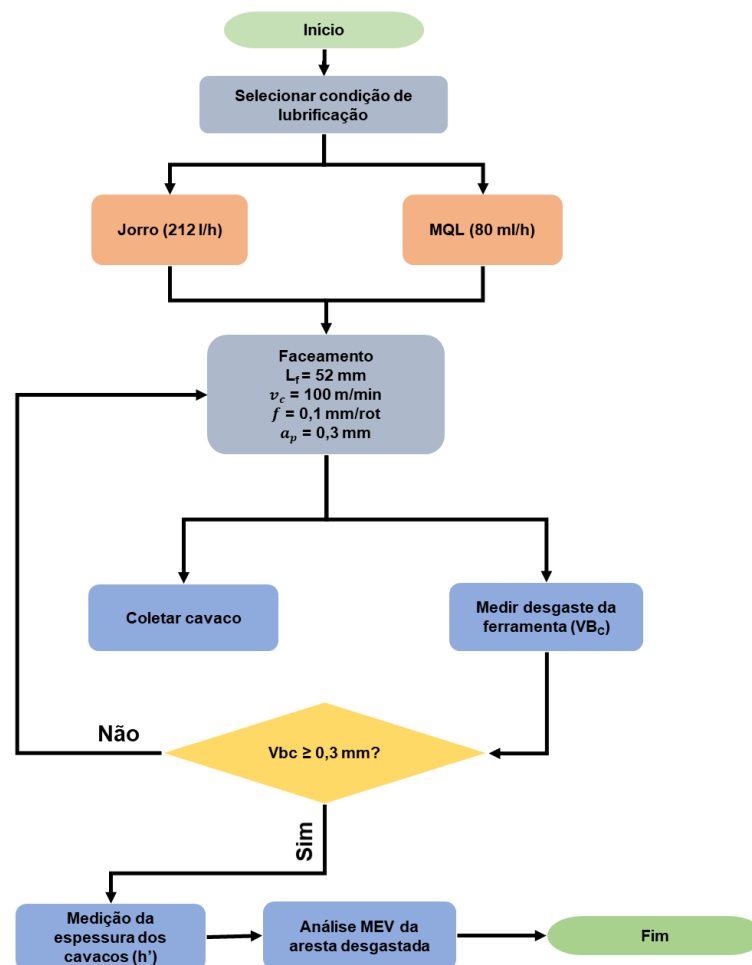


Figura 1. Fluxograma dos testes e análises realizadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores obtidos da medição do desgaste de flanco (VB_C) da aresta de corte, indicaram uma tendência de desgaste semelhante para ambas as condições avaliadas (Fig. 2), isso ocorreu em todas as repetições.

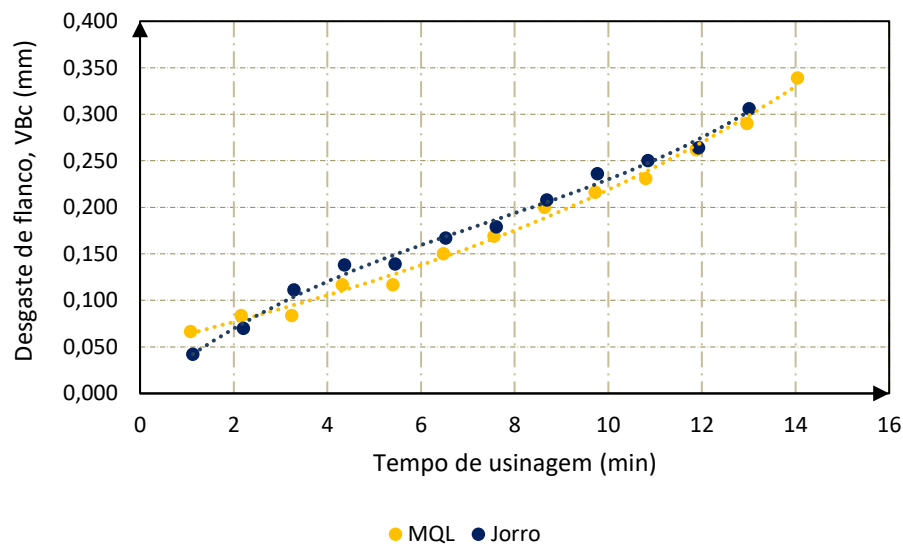


Figura 2. Evolução do desgaste de flanco VB_c das arestas usinadas sob diferentes condições de lubrificação (2ª repetição).

Através dos gráficos de desgaste e da regressão polinomial da curva de tendência dos pontos, foi possível localizar a vida útil, em minutos, das arestas de corte para cada condição de lubrificação. Com esses valores foi feita uma análise com base no intervalo de confiança (IC), com 95% de confiabilidade, que demonstrou, vide Fig. 3, que não houve diferença significativa, do ponto de vista estatístico, entre a condição jorro e a condição MQL, o que sugere que mesmo aplicado em quantidades mínimas, o óleo de soja epoxidado foi capaz de promover lubrificação semelhante ao da condição jorro. Isso pode ser explicado pela capacidade da técnica MQL em promover maior acesso do lubrificante às regiões próximas da zona de aderência, devido a forma de névoa na qual o fluido é aplicado.

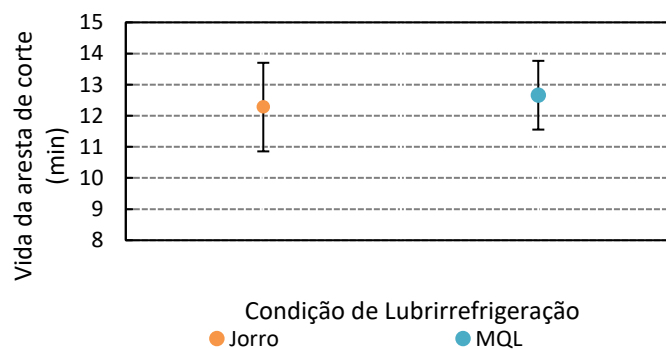


Figura 3. Intervalo de confiança para a vida útil da aresta de corte para as diferentes condições de lubrificação investigadas.

A Figura 4 apresenta imagens das arestas de corte desgastadas após atingirem o critério de fim de vida para cada condição de lubrificação. Percebe-se a presença de dois tipos de desgaste independentemente da condição de lubrificação: (i) de cratera e (ii) de flanco abaixo da curvatura da ponta do inserto (VB_c), não sendo possível identificar diferenças significativas. Marcas de riscamento nos flancos e no interior das crateras, fornecem um forte indício de que o mecanismo de desgaste por abrasão, provocado pelos carbonetos duros do material usinado, teve um papel importante na produção dos dois tipos de desgastes observados. Além da abrasão, para todas as condições de lubrificação nota-se a presença de microlascamentos da aresta na região de encontro da superfície da cratera com a superfície do flanco desgastado e evidências de adesão de material da peça em ambas as superfícies desgastadas, indicando que o mecanismo de desgaste por também ter sido importante na evolução do desgaste das arestas.



Figura 4. Imagens obtidas por MEV das arestas desgastadas sob as diferentes condições de lubrificação estudadas.

A ocorrência de microlascamentos ocorre principalmente devido à fragilização do gume de corte provocada pelo desgaste de cratera, que modifica a geometria da ferramenta deixando-a com um menor ângulo de cunha, o que a torna mais suscetível a este fenômeno. Pode-se notar que a presença de microlascamentos foi mais acentuada na aresta que usinou com MQL. Isso se explica pelo fato dessa condição ter proporcionado o maior tempo de usinagem.

Há evidências de ocorrência de desgaste por *attrition*, em que material da peça aderido é arrancado subitamente, podendo assim remover partículas da ferramenta e arrastá-las através das superfícies de saída e de flanco devido ao movimento da peça e dos cavacos, contribuindo para o aumento da cratera e a presença das ranhuras de desgaste observadas.

As ranhuras observadas para todas as condições, têm suas orientações na direção de saída do cavaco (região da cratera) e na direção do movimento de corte (região do flanco), o que caracteriza o mecanismo de desgaste abrasivo. Segundo Machado e Diniz (2017), a presença do mecanismo de *attrition* na usinagem com ferramentas de PCBN, faz com que grãos de CBN se desprendam e risquem as superfícies da ferramenta, ocasionando uma maior severidade no mecanismo de abrasão. Além disso, a presença de partículas de elevada dureza (carbonetos do tipo Cr23C6 e Cr7C3) na microestrutura do material usinado, certamente contribuíram para o desgaste por abrasão.

As mesmas evidências descritas acima foram encontradas por Fernandes (2019) utilizando os mesmos parâmetros de corte e o mesmo par ferramenta-peça, porém, comparando as condições de lubrificação por jorro e criogênica (LN2). Bonfá *et al.* (2019), também observaram mecanismos semelhantes de desgaste com o mesmo par ferramenta-peça, utilizando a condição de lubrificação por MQL.

Além das análises de desgaste, também foram avaliados os graus de (R_c) dos cavacos, para as diferentes condições de lubrificação. Com base nos valores medidos chegou-se ao gráfico da Fig. 5. Nele pode-se observar que não houve diferença significativa entre as condições analisadas.

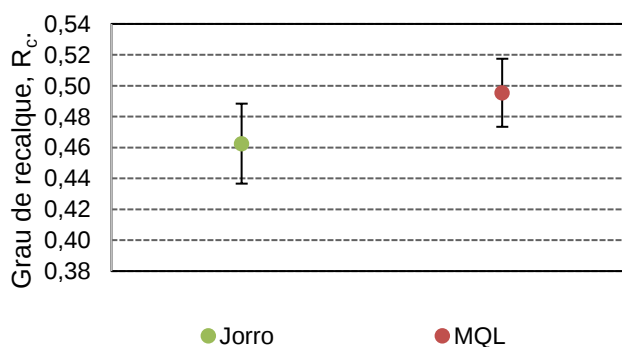


Figura 5. Intervalo de confiança para os graus de recalque (R_c), obtidos para as diferentes condições de lubrificação.

4. CONCLUSÕES

Com base nos testes realizados e resultados obtidos, pôde-se concluir que não houve diferença significativa entre as condições de lubrificação estudadas para os parâmetros utilizados. Tanto a lubrificação com jorro quanto a lubrificação com MQL, proporcionaram valores de desgaste semelhantes ao longo do ensaio, o que foi observado também em relação aos mecanismos de desgastes aos quais foram submetidas as arestas usinadas. O mecanismo de abrasão foi o que teve maior efeito para os desgastes apresentados (de flanco e de cratera), embora também tenham sido identificados indícios de ocorrência de *attrition*.

A análise da vida útil da aresta de corte com base no intervalo de confiança demonstrou não haver diferença significativa entre as condições estudadas, o que também foi observado para a análise do grau de recalque dos cavacos.

O desempenho técnico do óleo de soja epoxidado aplicado por MQL, observado nesse estudo, comprova sua viabilidade como substituto aos fluidos convencionais aplicados em abundância, no torneamento duro do aço AISI D6 com ferramentas de PCBN. Além de demonstrar resultados praticamente iguais à técnica convencional, o uso do óleo vegetal aplicado por MQL atende a demanda por técnicas sustentáveis de fabricação.

5. REFERÊNCIAS

- Abdalla, H.S. et al., 2007. Development of novel sustainable neat-oil metal working fluids for stainless steel and titanium alloy machining. Part 1. Formulation development. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 34, p. 21-33.
- Aggarwal, A. et al., 2008. Optimization of multiple quality characteristics for CNC turning under cryogenic cutting environment using desirability function. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 205, p. 42–50.
- Autret, R. e Liang, S.Y., 2003. Minimum quantity lubrication in finish hard turning. *Proceedings of International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management*, Manila, Philippines, p. 1-9.
- Bartz, W.J., 2006. Ecotribology: environmentally acceptable tribological practices. *Tribology International*, v. 39, n.8, p. 728-733.
- Bonfá, M.M. et al., 2019. Evaluation of tool life and workpiece surface roughness in turning of AISI D6 hardened steel using PCBN tools and minimum quantity of lubricant (MQL) applied at different directions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. v. 103, p. 971-984.
- Darminesh, S.P. et al., 2017. Recent development on biodegradable nanolubricant: A review. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 86, p. 159-165.
- EPA. Sustainable Manufacturing. 15 de jun. de 2019 <<https://www.epa.gov/sustainability/sustainablemanufacturing#:~:text=Sustainable%20manufacturing%20is%20the%20creation,employee%2C%20community%20and%20product%20safety.>>.
- Fernandes, M. E. P. *Torneamento do aço-ferramenta AISI D6 temperado e revenido nas condições seco, jorro e LN2: uma análise técnico-econômica*. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2019.
- Hadad, M. e Sadeghi, B., 2013. Minimum quantity lubrication-MQL turning of AI-SI4140 steel alloy. *Journal of Cleaner Production*, v. 54, p. 332-343.
- Inbra Indústrias Químicas LTDA. 19 de jul. de 2019 < <https://www.inbra.com.br/>>.
- Jia, D. et al., 2014. Experimental verification of nanoparticle jet minimum quantity lubrication effectiveness in grinding. *Journal of Nanoparticle Research*. v.16, p.2758-7.
- Khan, M.; Mithu, M.; Dhar, N.R., 2009. Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 209, p. 5573–5583.
- Kleinová, A. et al., 2007. Substituted esters of stearic acid as potential lubricants. *Biomass & Bioenergy*. v. 32, p.366-371.
- Leadebal Jr, W.V. *Influência da refrigeração criogênica na vida da ferramenta de PCBN e na integridade superficial do aço ferramenta D6*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2017.
- Lohar, D.V., Nanavaty, C.R., 2013. Performance evaluation of minimum quantity lubrication (MQL) using CBN during hard turning of AISI 4340 and its comparison with dry and wet turning. *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science*. v. 3, p. 102-106.
- Luna, F.M.T. et al., 2011. Assessment of biodegradability and oxidation stability of mineral, vegetable and synthetic oil samples. *Industrial Crops and Products*, v.33, p. 579-583.
- Machado, A.R. e Diniz, A.E., 2017. Tool wear analysis in the machining of hardened steels. *The international Journal of Advanced Manufacturing Technology*. v. 92, p. 4095– 4109.
- NIOSH. Metalworking Fluids. 25 de ago. de 2020 . <<https://www.cdc.gov/niosh/topics/metalworking/default.html>>.
- Osama, M. et al., 2017. Recent developments and performance review of metal working fluid. *Tribology International*, v. 114, p. 389-401.
- Sadeghi, M.H. et al., 2009. Minimal quantity lubrication-MQL in grinding of Ti-6Al-4V titanium alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 44, p. 487-500.
- Sharma, A.K. et al., 2017. Novel uses of alumina-MoS₂hybrid nanoparticle enriched cutting fluid in hard turning of AISI 304 steel. *Journal of Manufacturing Processes*, v. 30, p. 467–482.
- Srikant, R.R. e Ramana, V.S.N.V., 2015. Performance evaluation of vegetable emulsifier based green cutting fluid in turning of American Iron and Steel Institute (AISI) 1040 steel e an initiative towards sustainable manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, v.108, p. 104-109.
- Talib, N. e Rahim, E. A., 2016. The Effect of Tribology Behavior on Machining Performances When Using Bio-based Lubricant as a Sustainable Metalworking Fluid. *Procedia CIRP*, v. 40, p. 504–508.

- Tazehkandi, A. H., Shabgard, M., Pilehvarian, F., 2015. On the feasibility of a reduction in cutting fluid consumption via spray of biodegradable vegetable oil with compressed air in machining Inconel 706, *Journal of Cleaner Production*. v. 104, p. 422–435.
- Trajano, M.F. *Estudo tribológico de Biolubrificantes com adição de Nano Partículas de óxidos (Zinco e Cobre)*. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2013.
- Trent, E. M. e Wright, P. K., 2000. *Metal Cutting* Oxford: Butterworth Heinemann, 4. ed.
- Zhang, Y. *et al.*, 2015. Experimental evaluation of MoS₂ nanoparticles in jet MQL grinding with different types of vegetable oil as base oil. *Journal of Cleaner Production*. v. 87, p. 930-940.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MQL FOR SUSTAINABLE TURNING OF AISI D6 STEEL

Eric Ramalho Ferreira de Carvalho

Anderson Clayton Alves de Melo

Salete Martins Alves

eng.ericramalho@gmail.com, anderson@ufrnet.br, saletealves@ect.ufrn.br.

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Campus Universitário Lagoa Nova. CEP 59078-970, Caixa postal 1524. Natal/RN – Brasil.

Abstract. *The use of conventional cutting fluids (based on mineral oil), although advantageous to the machining process, has been questioned due to the toxicity of substances present in its composition, harmful to the environment and the health of the worker. This work has as main objective, to present an alternative to conventional cutting fluids, evaluating the performance of epoxidized soybean oil, applied by MQL (minimum amount of lubricant) in the turning of the quenched and tempered AISI D6 tool steel. Thus, turning tests at constant cutting parameters ($v_c = 100$ m/min, $a_p = 0.3$ mm and $f = 0.1$ mm/rot.) with solid PCBN inserts were performed. For comparison purposes, tests were performed with an emulsion (10%) of mineral oil applied by wet condition. The output variables investigated were the flank wear (VBc) of the cutting tools and the thickness ratio (Rc) of the chips. The results indicate that there was no significant difference between the lubrication conditions for the evaluated parameters, it can be concluded that the use of soybean oil applied by MQL proved to be feasible as an alternative to the conventional method, in addition to being environmentally sustainable, did not present any disadvantage to the process performance.*

Keywords: *hard turning, AISI D6 tool steel, vegetable oil, MQL.*

RESPONSIBILITY NOTICE

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