

UM COMPARATIVO DA ENERGIA ESPECÍFICA NO TORNEAMENTO DO AÇO AISI 1045 PARA DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE LUBRI-REFRIGERAÇÃO

Pedro Eduardo Oliveira de Andrade, pedro.andrade@academico.ifpb.edu.br¹

Leonardo Pereira de Lucena Silva, lucena.leonardo@ifpb.edu.br¹

João Vitor de Queiroz Marques, joao.marques@ifpb.edu.br¹

Francisco Augusto Vieira da Silva, francisco.vieira@ifpb.edu.br¹

Martiliano Soares Filho, martiliano.soares@ifpb.edu.br¹

Tayla Fernanda Serantoni da Silveira, tayla.silveira@ifpb.edu.br¹

Joab Sobreira de Andrade, joab.andrade@ifpb.edu.br¹

¹Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia da Paraíba (IFPB), Laboratório Cajazeirense de Processos de Produção (LC2P), Campus Cajazeiras, Paraíba, Brasil.

Resumo: Ao longo dos anos, os processos industriais se tornaram recursos indispensáveis à sociedade. No entanto, para transformar a matéria-prima em produto, vários resíduos são despejados no meio ambiente e grandes quantidades de energia são consumidas durante esse procedimento. Dessa forma, o setor industrial busca utilizar técnicas que propõem um gasto mais eficiente de energia, além de reduzir os danos causados à natureza. Assim, atentando-se para o ramo da usinagem, este trabalho apresenta um comparativo entre a energia específica consumida no torneamento a seco e com aplicação da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL). Todos os parâmetros de corte foram mantidos constantes com exceção da velocidade de corte (V_c) que variou em 8 níveis para cada estratégia de lubri-refrigeração. Destaca-se ainda que a estratégia MQL é aplicada para duas condições, sendo a primeira condição com os bicos direcionados para as superfícies de saída e de folga da ferramenta e, a segunda condição, os bicos são direcionados para a superfície de saída da ferramenta. Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram confeccionados a partir do aço carbono AISI 1045. A partir disto, pode-se analisar as diversas potências consumidas durante o torneamento das peças, bem como, as energias necessárias para a remoção do volume unitário do material. Assim, concluiu-se que a usinagem a seco só apresenta potência e energia específica inferior às estratégias MQL na faixa de 174 m/min a 193 m/min. Consoante a isso, notou-se que ao utilizar velocidades de corte intermediárias, de 212 m/min a 250 m/min, as estratégias MQL manifestaram valores inferiores comparados aos da usinagem a seco. Por fim, constatou-se que, a partir da velocidade de corte de 231 m/min, a energia específica de usinagem sofreu um aumento considerável independentemente da estratégia adotada.

Palavras-chave: Estratégias de lubri-refrigeração, energia específica de usinagem, aço AISI 1045.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de produção têm desempenhado um papel vital na economia global (Elmaraghy, 2021). Porém, a fabricação causa impactos mensuráveis no meio ambiente devido a quantidades significativas de consumo de energia, além de liberar fluxos de resíduos sólidos, líquidos e gasosos que podem resultar em danos ao meio ambiente (Yingjie, 2014).

Nesse sentido, o consumo energético e a utilização de fluidos lubri-refrigerantes em operações de manufatura, como a usinagem, precisam ser revistos. Estima-se que o setor industrial seja responsável por cerca de 37% do consumo da energia total no mundo, além de contribuir diretamente com 24% da emissão global de CO₂ (International Energy Agency, 2020). Consoante a isso, Ramesh *et al.* (2013) afirma que a técnica de lubri-refrigeração convencional (a jorro) é tida como um dos principais poluidores ambientais dentro do processo de usinagem. Tal técnica impacta também nos custos da produção, uma vez que, segundo Walker (2013), pode representar cerca de 8 a 16% do custo total do procedimento.

Consequentemente, Debnath *et al.* (2014) afirmam que as indústrias vêm buscando maneiras de reduzir os custos e os impactos ambientais causados pela produção, sem que a produtividade do processo e a qualidade do produto final sejam reduzidas.

Uma das alternativas para reduzir ou até eliminar os efeitos adversos causados pelos fluidos de corte é a implementação do corte a seco. Nesse método, nenhum meio lubri-refrigerante é utilizado e a remoção de material da peça ocorre em contato direto com a ferramenta utilizada. Todavia, conforme Shokrani *et al.* (2012), devido ao desgaste excessivo da ferramenta de corte e a baixa qualidade superficial da área usinada, essa técnica não é adequada para todos os processos de usinagem.

Assim, nos processos em que esse tipo de técnica é inadequada, a aplicação mínima de lubrificantes (MQL) surge como uma alternativa sustentável, proporcionando refrigeração às superfícies cavaco-ferramenta-peça. Esse procedimento consiste, segundo Astakhov (2008), na aplicação de pequenas quantidades de óleo lubrificante na região do corte. A aplicação dessa técnica é realizada, geralmente, através de um nebulizador que mistura o óleo com o ar e libera o fluido em forma de névoa. Ginting *et al.* (2015) estimam que a substituição de um sistema de lubri-refrigeração a jorro pela MQL, pode reduzir em até 4% os custos operacionais de empresas de médio e pequeno porte.

À vista disso, o presente trabalho tem por objetivo comparar o comportamento da energia específica de corte no torneamento do aço AISI 1045 para diferentes condições de lubri-refrigeração: corte a seco, aplicação de MQL com os bicos direcionados para a superfície de folga e de saída da ferramenta e aplicação de MQL com ambos os bicos direcionados para a superfície de saída. Dessa forma, variando a velocidade de corte (V_c) em oito níveis e mantendo o avanço (f) e a profundidade de corte (a_p) constantes, foi possível determinar zonas onde ocorre ganho energético para cada condição de lubri-refrigeração.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização dos experimentos, foi utilizado o aço AISI 1045. Tal aço possui ótima usabilidade, seja na indústria ou na construção civil, uma vez que a boa resistência à tração, a boa tenacidade e o baixo custo, são características primordiais deste. Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram confeccionados obedecendo o seguinte padrão: 34 mm de diâmetro e 57 mm de comprimento usinável.

Antes de iniciar as campanhas experimentais, foi instalado um analisador de energia, modelo Fluke 430-II, em um torno CNC Diplommat, modelo LOGIC 195 III, utilizado para tornear os corpos de prova. A campanha experimental foi dividida em três etapas:

1. Torneamento a seco: sem a utilização de fluidos de corte.
2. Estratégia MQL 1: aplicação da técnica de mínima quantidade de fluido, com um bico direcionado para a superfície de saída e o outro para a superfície de folga da ferramenta, ilustrado pela Fig. 1.
3. Estratégia MQL 2: aplicação da técnica de mínima quantidade de fluido com ambos os bicos direcionados para a superfície de saída da ferramenta, como pode ser visto na Fig. 2.



Figura 1. Estratégia MQL 1 (Bico direcionado para superfície de saída e de folga da ferramenta).

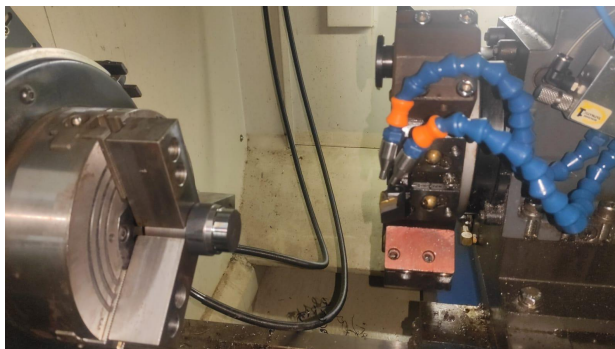


Figura 2. Estratégia MQL 2 (Bicos direcionados para superfície de saída da ferramenta).

A execução dessas estratégias só tornou-se possível com a instalação de um nebulizador da Quimatic, modelo V Tapmatic, capaz de trabalhar com pressão de ar comprimido de 0,5 a 4 bar, em que o fluxo de fluido é controlado

através de 2 válvulas para cada bico, sendo uma de ar e outra de fluido. O fluido utilizado foi o Quimatic Jet, um fluido sintético para corte de metais fabricado a base de água, propiciando uma ótima refrigeração, lubrificação e proteção anticorrosiva à ferramenta.

Quanto aos parâmetros utilizados, foram selecionadas oito (8) velocidades de corte (V_c) a partir dos valores recomendados para o corte dos aços hipoeutetóides com o inserto TNMG160408-MF1 CP500. O avanço da ferramenta (f) e a profundidade de corte (a_p) foram mantidos constantes, apresentando valores iguais a 0,05 mm/rot e 1 mm, respectivamente.

Para garantir o funcionamento ideal dos bicos de lubrificação, antes de iniciar os experimentos, a vazão total do nebulizador foi mensurada durante 30 minutos. Nesse procedimento, um becker de 500 mL foi utilizado para armazenar o fluido e, em seguida, com auxílio de uma proveta de 50 mL, o volume foi aferido. A partir disso, constatou-se que a vazão total do fluido (Q_f) utilizada nos ensaios foi de 76 mL/h, um valor que, segundo Krolczik *et al.* (2019), está dentro da faixa de vazão descrita pela literatura, onde a taxa média de fluido no sistema MQL se situa entre 10 a 500 mL/h. Assim, a Tabela 1 sintetiza todas as variáveis de entrada empregadas durante o torneamento dos corpos de prova.

Tabela 1. Parâmetros de corte e vazão do nebulizador utilizados durante os ensaios.

Parâmetros	Aço AISI 1045							
Ensaios	A	B	C	D	E	F	G	H
V_c (m/min)	155	174	193	212	231	250	270	289
a_p (mm)	1	1	1	1	1	1	1	1
f (mm/rot)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Q_f (mL/h)	76	76	76	76	76	76	76	76

Destaca-se ainda que, para cada estratégia de lubri-refrigeração adotada, foram realizados oito (8) ensaios, totalizando vinte e quatro (24) corridas experimentais, sem replicação.

A potência consumida pelo torno CNC durante cada ensaio foi monitorada pelo analisador de energia programado com uma taxa de amostragem de 0,25 s. Ao final do processo, os dados foram analisados através de gráficos potência x tempo, gerados pelo software recomendado pelo fabricante do analisador. Dessa forma, a partir desses gráficos pôde-se obter três indicações de potência: a potência em vazio (P_{wg}), a potência de usinagem (P_u) e a potência total (P_t).

Assim, o valor médio dessas potências foi calculado e, em seguida, as energias específicas foram obtidas a partir da Eq. (1), onde, ε é a energia específica em J/mm³, P é a potência escolhida em Watts (W) e MRR é a taxa de volume de cavaco removido em mm³/s. Essa taxa pode ser calculada através da Eq. (2), onde V_c é a velocidade de corte dada em mm/s, f é o avanço em mm/rot e a_p a profundidade de corte em mm.

$$\varepsilon = \frac{P}{MRR} \quad (1)$$

$$MRR = V_c \cdot f \cdot a_p \quad (2)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 4 apresenta o gráfico da potência de usinagem pela velocidade de corte para as três condições de lubri-refrigeração. Observa-se que as potências apresentam um comportamento não-linear para a faixa de velocidades adotada. Inicialmente, pode-se notar que para velocidades de corte inferiores a 174 m/min, a potência de usinagem para qualquer condição adotada apresenta um comportamento verossímil. É possível notar que ao utilizar velocidades de corte baixas, mais especificamente de 212 m/min, a potência consumida no corte a seco foi inferior às potências empregadas nas técnicas de MQL.

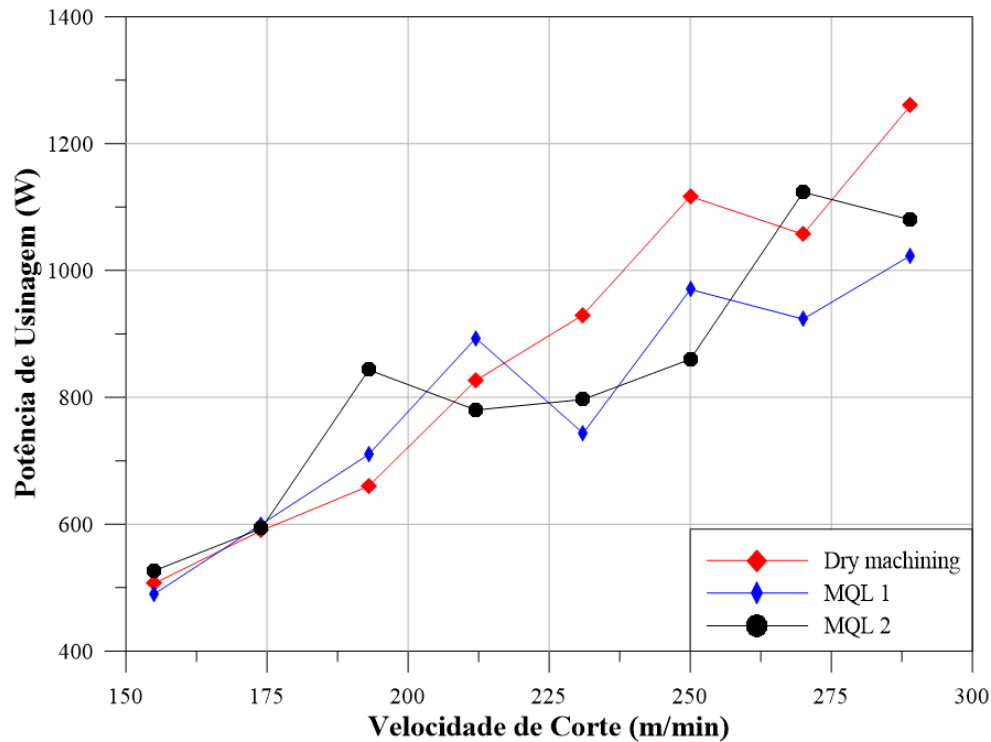


Figura 4. Curva da potência de usinagem x velocidade de corte para as três condições de lubri-refrigeração.

Não obstante, na faixa entre 212 m/min e 270 m/min, as potências consumidas pelas estratégias de mínima quantidade de lubrificante foram inferiores às da usinagem a seco, com o método de utilizar ambos os bicos direcionados para a superfície de saída da ferramenta (MQL 2) apresentando um sutil aumento na potência de usinagem, enquanto a estratégia MQL 1 obteve o menor valor de potência nessa escala, mais especificamente ao utilizar a velocidade de corte igual a 231 m/min. Na porção final do gráfico, nota-se que a potência de usinagem no torneamento a seco e em MQL 1 adotaram um comportamento crescente, à medida que a potência em MQL 2 decaiu.

Tais resultados corroboram com as conclusões obtidas por Jayal e Balaji (2009), onde a técnica MQL apresenta melhor poder lubrificante quando aplicada em maiores velocidades de corte (V_c). Dessa forma, com a região de corte lubrificada, o atrito entre as superfícies de contato é reduzido, aliviando as tensões de corte e, conseqüentemente, as potências de usinagem.

Os resultados da energia específica de usinagem para as diferentes estratégias de lubri-refrigeração estão expostos na Figura 5, através da variação dos valores da velocidade de corte. Inicialmente, ao utilizar a velocidade de corte mínima, igual a 155 m/min, nota-se que as energias específicas apresentam um comportamento discrepante, onde a usinagem a seco obteve valores intermediários em relação às estratégias de aplicação de MQL.

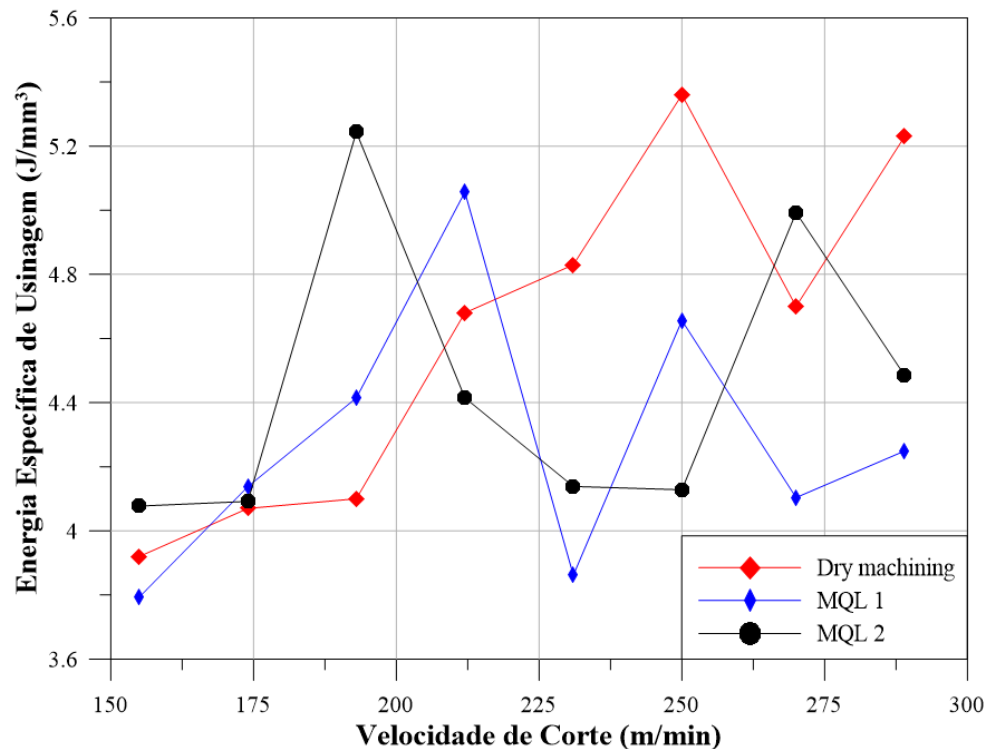


Figura 5. Curva da energia específica de usinagem x velocidade de corte para as três condições de lubri-refrigeração.

Analisando o comportamento isolado da usinagem a seco do aço AISI 1045, verifica-se que a zona de validação para essa estratégia, onde a energia específica de usinagem apresenta um comportamento estável em função da variável de corte, está localizada entre 155 e 193 m/min. Embora haja um decaimento da energia específica ao utilizar a velocidade de corte igual a 270 m/min, a energia consumida, neste caso, ainda é muito alta, comparada aos valores obtidos inicialmente.

Quanto à estratégia MQL 1, pode-se observar um comportamento instável da sua energia específica. Porém, foi ao adotar esse método, que se obteve os menores valores de energia consumida durante a usinagem das peças, como identificou-se para as velocidades de 155 m/min e 231 m/min. Em comparação com as demais estratégias, ao definir a velocidade de corte igual a 212 m/min, esta consumiu a maior quantidade de energia.

Por fim, ao utilizar a condição MQL 2, constatou-se que esta apresentou duas zonas de validação, uma em velocidades baixas, de 155 a 174 m/min, e outra em velocidades intermediárias, entre 231 m/min e 250 m/min.

4. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos experimentalmente, pode-se concluir que:

1. Ao utilizar velocidades de cortes baixas, de 174 m/min a 193 m/min, tanto a potência quanto a energia específica consumida durante o torneamento dos corpos de prova apresentaram menores valores quando a estratégia de usinagem a seco foi empregada.
2. As estratégias de MQL obtiveram melhor desempenho quando aplicadas em conjunto com velocidades de corte inferiores a 174 m/min, bem como para velocidades intermediárias, com valores entre 212 m/min e 250 m/min. Foram nessas faixas que obteve uma maior eficiência, se tratando da quantidade de energia consumida durante a remoção de material da peça.
3. A partir da velocidade de corte de 231 m/min, houve um acréscimo considerável na energia específica de usinagem. Tal fato pode ter ocorrido devido ao emprego de velocidades de corte muito altas, uma vez que estas podem impactar diretamente no desgaste da ferramenta, dificultando assim a usinagem dos corpos de prova. Consoante a isso, recomenda-se que velocidades de corte superiores a 290 m/min não sejam utilizadas no torneamento do aço AISI 1045 nessas condições de lubri-refrigeração.

Com isso, sugere-se, para trabalhos futuros, que uma análise integrada seja realizada nas ferramentas de corte utilizadas, a fim de entender as influências que as condições de lubri-refrigeração exercem sobre a vida útil destas. Além disso, julga-se importante obter dados sobre aspectos-chaves da integridade superficial das peças usinadas, tais como, camadas brancas induzidas na superfície e tensões residuais circunferenciais.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio financeiro concedido através do Edital nº 36/2021 - Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação - PIBITI, fomentada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

6. REFERÊNCIAS

- ASTAKHOV, V.P., 2008. Ecological machining: near-dry machining. In: Davim, J.P. Machining: *Fundamentals and Recent Advances*, Springer-Verlag, London, Cap.7, p.195-223.
- DEBNATH, S.; REDDY, M.M.; YI, Q.S., 2014. Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review, *Journal of Cleaner Production*, v.83, p.33-47.
- ELMARAGHY, H. et al. 2021. Evolution and future of manufacturing systems. *CIRP Annals*, v. 70, n. 2, p. 635-658.
- GINTING, Y.R. et al., 2015. Investigation into alternative cooling methods for achieving environmentally friendly machining process, *Procedia CIRP*, v.29, p.645-650.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), 2020. *Tracking Industry 2020*, IEA, Paris. Disponível em: Acesso em: 15 de março de 2022.
- JAYAL, A.D.; BALAJI, A.K., 2009. Effects of cutting fluid application on tool wear in machining: interactions with tool-coatings and tool surface features, *Wear*, v.267, n.9-10, p.1723-1730.
- KROLCZYK, G.M. et al., 2019. "Ecological trends in machining as a key factor in sustainable production – A review." *Journal of Cleaner Production*, Vol. 218 , p. 601-615.
- RAMESH, K. et al., 2003. Ecological grinding with chilled air as coolant. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: *Journal of Engineering Manufacture*, v. 217, n. 3, p. 409-419.
- SHOKRANI, A.; DHOKIA, V.; NEWMAN, S.T., 2012. Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v.57, p.83-101.
- WALKER, T., 2013. The MQL Handbook – A Guide to Machining With Minimum Quantity Lubrication.[s.l.]. UnistInc.
- YINGJIE, Z., 2014. Energy efficiency techniques in machining process: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 71, n. 5, p. 1123-1132.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

A COMPARISON OF SPECIFIC ENERGY IN TURNING AISI 1045 STEEL FOR DIFFERENT LUBRICATION-REFRIGERATION STRATEGIES

Pedro Eduardo Oliveira de Andrade, pedro.andrade@academico.ifpb.edu.br¹

Leonardo Pereira de Lucena Silva, lucena.leonardo@ifpb.edu.br¹

João Vitor de Queiroz Marques, joao.marques@ifpb.edu.br¹

Francisco Augusto Vieira da Silva, francisco.vieira@ifpb.edu.br¹

Martiliano Soares Filho, martiliano.soares@ifpb.edu.br¹

Tayla Fernanda Serantoni da Silveira, tayla.silveira@ifpb.edu.br¹

Joab Sobreira de Andrade, joab.andrade@ifpb.edu.br¹

¹Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia da Paraíba (IFPB), Laboratório Cajazeirense de Processos de Produção (LC2P), Campus Cajazeiras, Paraíba, Brasil.

Abstract. *Over the years, industrial processes have become indispensable resources for society. However, in order to transform the raw material into a product, various wastes are dumped into the environment and large amounts of energy are consumed during this procedure. In this way, the industrial sector seeks to use techniques that propose a more efficient use of energy, in addition to reducing the damage caused to nature. Thus, paying attention to the machining field, this work presents a comparison between the specific energy consumed in dry turning and with application of the Minimum Quantity of Lubricant (MQL) technique. All cutting parameters were kept constant with the exception of the cutting speed (V_c) which varied by 8 levels for each lubrication-cooling strategy. It is also worth noting that the MQL strategy is applied for two conditions, the first condition being with the nozzles directed towards the tool exit and clearance surfaces and, the second condition, the nozzles being directed towards the tool exit surface. The specimens used in the tests were made from AISI 1045 carbon steel. Therefore, it is possible to analyze the different energy powers during the turning process and the specific energies necessary to remove a unit volume of the material. Thus, it was concluded that dry machining has lower power and specific energy cutting than MQL strategies in the range of 174 m/min to 193 m/min. Moreover, it should be noted that MQL strategies point out lower results than dry cutting for cutting speeds between 212 to 250 m/min. Finally, it was found that at the cutting speed of 231 m/min, the specific energy cutting increased considerably regardless of the used strategy.*

Keywords: *Lubrication-cooling strategies, specific machining energy, AISI 1045 steel.*