

ANÁLISE DE TEMPERATURA NO TORNEAMENTO A SECO DO AÇO ABNT 1045 UTILIZANDO TERMOPAR E ARDUINO

¹André Luis Ribeiro Araújo, andrelu@ufpi.edu.br

¹Marcus Vinícios Sousa do Vale, marcus.vale@ufpi.edu.br

¹Patrick Abreu de Oliveira, patrick@ufpi.edu.br

²George Lucas da Silva Oliveira Soares, georgelucas23.gl@gmail.com

¹Kleber Lima César, kleber@ufpi.edu.br

¹Marcos Guilherme Carvalho Braulio Barbosa, marcosguilherme@ufpi.edu.br

¹Raphael Lima de Paiva, raphaellimap@ufpi.edu.br

¹Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Piauí

²Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas

Resumo. A usinagem é um processo de fabricação com remoção de material a fim de conferir a uma peça forma, dimensões e acabamento conforme requisitos de projeto. Desse modo, o contato ferramenta-peça gera deformação plástica e cisalhamento do material, e boa parte da energia envolvida no processo se transforma em calor, gerando elevadas temperaturas na região de contato entre a ferramenta e a peça. Tais temperaturas exercem influência direta na vida da ferramenta, nos esforços de corte e na qualidade da superfície usinada. Dessa forma, a medição e análise da temperatura durante o processo de corte do material é importante. Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um dispositivo com a plataforma Arduino para a medição de temperatura com termopar durante o processo de torneamento. Para isso, foi escolhido um termopar do tipo K e módulo de leitura MAX6675, o qual já possui uma biblioteca própria na IDE do Arduino. Para verificar a eficácia do dispositivo, foram realizadas medições de temperatura durante ensaios de torneamento do aço ABNT 1045 com ferramentas de metal duro, em que o termopar foi posicionado entre o calço e a superfície inferior da ferramenta. Diferentes condições de corte foram testadas em termos de velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. Todos os ensaios foram realizados a seco (sem aplicação de fluido de corte). Os resultados obtidos evidenciaram tendência de elevação da temperatura com a taxa de remoção de material, com coeficiente de correlação de 0,81 e 0,67 para as temperaturas máximas e médias durante o intervalo de corte, respectivamente. A máxima temperatura medida durante os ensaios foi de 179,25 °C, para a condição de maior taxa de remoção de material ($v_c = 98,20$ m/min, $a_p = 0,90$ mm e $f = 0,23$ mm/rot). A profundidade de corte foi o parâmetro que apresentou maior influência nos valores de temperatura para as condições de corte testadas neste trabalho.

Palavras chave: temperatura de corte, torneamento, termopar, Arduino.

1. INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo de fabricação com remoção de material de uma peça a fim de conferir a ela forma, dimensões e acabamento conforme requisitos de projeto (Degarmo *et al.*, 2010). Desse modo, o contato ferramenta-peça gera deformação plástica e cisalhamento da material e grande parte da energia envolvida no processo se transforma em calor, contribuindo para o desenvolvimento de elevadas temperaturas na zona de corte (Guimarães *et al.*, 2023; Pagotto, 2022). Caso essa geração de calor seja excessiva, isso pode trazer problemas para o processo, como a diminuição da vida útil da ferramenta, o aumento dos esforços de corte e a qualidade da superfície usinada (Machado *et al.*, 2015; Ravikanth *et al.*, 2022).

No que diz respeito à avaliação de temperatura durante o processo de torneamento, Han *et al.* (2021) utilizaram um pirômetro de fibra ótica para investigar o comportamento da temperatura de corte no torneamento do aço AISI 316L. No estudo, foi analisado cinco valores para velocidade de corte, profundidade de corte e avanço. Os pesquisadores concluíram que com o aumento dos parâmetros de corte, a temperatura também aumentou. Além disso, confirmaram que o pirômetro demonstrou boa eficácia e capacidade de resposta em tempo real. Ravikanth *et al.* (2022) realizaram um estudo de otimização de parâmetros de corte a fim de obter as condições de corte com as menores temperaturas durante o torneamento da liga de alumínio AA2219, utilizando um termômetro de radiação infravermelha como método de medição. Os autores investigaram a influência do avanço, rotação da peça, profundidade de corte e o raio de ponta da ferramenta nos valores de temperatura durante o processo. Os resultados mostraram que o raio de ponta e o avanço foram os parâmetros mais influentes e os autores observaram boa correlação entre a predição da análise estatística (análise de regressão) com dados experimentais e teóricos.

Pagotto (2022) mediu a temperatura de corte no torneamento a seco do aço ABNT 1045 com uma câmera termográfica e analisou o comportamento da temperatura com a variação da velocidade de corte, avanço e profundidade de corte. O

autor observou que a velocidade de corte foi o parâmetro mais influente, de forma que seu aumento proporcionou um aumento da temperatura de corte. Guimarães *et al.* (2023) compararam os dados de temperatura medidos por dois métodos diferentes: termopar embutido na ferramenta e termografia. Os resultados mostraram que a temperatura da ferramenta medida pela câmera termográfica apresentou valores inferiores à temperatura medida pelo termopar, o que, segundo os autores, pode estar associado ao valor de emissividade utilizado para as medições via termografia.

Apesar muitos estudos sobre a temática, o monitoramento da temperatura de corte é uma tarefa complexa e desafiadora. De acordo com Guimarães *et al.* (2023), os principais motivos dessa complexidade são o movimento da peça ou da ferramenta de corte, as mínimas áreas de contato envolvidas e a geração de cavaco que pode atrapalhar o acesso à região de interesse. Leonidas *et al.* (2022) realizaram um estudo de levantamento da literatura de caráter comparativo dos métodos de medição de temperatura por termopar e termografia, em que mostra que as características de cada processo de corte são determinantes para escolha do método de medição de temperatura.

Nesse sentido, e considerando a importância do monitoramento de temperatura durante os processos de usinagem, bem como alternativas de sistemas de medição de baixo custo, este trabalho tem como objetivo medir a temperatura de corte no processo de torneamento a seco do aço ABNT 1045 com ferramentas de metal duro com auxílio de um dispositivo simples composto por termopar, módulo de leitura e microcontrolador Arduino, analisando o comportamento da temperatura medida em função da variação dos parâmetros de corte.

2. METODOLOGIA

Os ensaios de torneamento foram realizados no torno mecânico convencional TVK 1660ECO, da fabricante Veker, com potência nominal de 4,4 kW. O material usinado nos ensaios foi o aço ABNT 1045 em estado normalizado, com dureza de 180 a 300 HB e geometria cilíndrica com diâmetro de 35 mm e comprimento de 300 mm.

A ferramenta de corte utilizada foi de metal duro revestido da classe P, com designação ISO TNMG160408R-M, que indica o formato triangular da ferramenta, o ângulo de folga (0°), a classe de tolerância, a fixação, o tamanho (16 mm), a espessura (4,76 mm), o raio de ponta (0,8 mm), sentido de corte e o tipo de quebra cavaco presente, respectivamente. O porta-ferramenta utilizado foi o MTJNR 2020K 16, da fabricante PRAMET.

Cinco diferentes condições de corte foram testadas pela variação do avanço, profundidade de corte e velocidade de corte, resultando em diferentes taxas de remoção de material (TRM) conforme especificado na Tab. (1). Cada ensaio de torneamento consistiu na usinagem de 71,50 mm de comprimento na direção de avanço.

Tabela 1. Condições de corte utilizadas nos ensaios de torneamento.

Condição de corte	Avanço (f) – mm/rot	Profundidade de corte (a_p) – mm	Velocidade de corte (v_c) – m/min	Taxa de remoção de material (TRM) – mm ³ /s
C1	0,11	0,50	98,20	90,0
C2	0,11	0,90	98,20	162,0
C3	0,11	0,90	122,03	201,3
C4	0,11	0,50	122,03	111,9
C5	0,23	0,90	98,20	338,8

Para monitoramento da temperatura durante o processo, foi utilizado um sistema de aquisição dos dados feito com o auxílio da plataforma Arduino UNO juntamente com o termopar do tipo k e o módulo de leitura MAX 6675. O termopar do tipo k é feito das ligas Cromel (90 % níquel e 10% cromo) e Alumel (94% níquel, 2% alumínio e 1% silício) e consegue medir temperatura na faixa de -200°C a 1260°C (Fraden, 2010), com uma resolução de $0,25^\circ\text{C}$. A ponta do termopar (junta quente) foi fixada no porta-ferramenta entre o calço e a superfície inferior da ferramenta de corte conforme o desenho esquemático e setup da máquina-ferramenta apresentados na Fig. (1). O módulo de leitura MAX 6675 realiza a amplificação de sinal, compensação da junta fria e conversão analógico-digital da tensão, que é proporcional à diferença de temperatura das junções quente e fria.

O monitoramento da temperatura foi realizado por meio da IDE do Arduino UNO utilizado, os dados do monitor serial foram coletados e monitorados em tempo real pelo Excel via PLX DAQ, sendo captados valores de temperatura a uma taxa de 2 Hz (0,5 s). A Figura (2) mostra a configuração do sistema de aquisição de temperatura proposto.

As curvas obtidas em cada ensaio apresentam comportamento característico de um corte contínuo e semelhante ao observado por Plogmeyer *et al.* (2024), contendo três regiões bem definidas, as quais são mostradas na Fig. (3). A região 1 é a etapa inicial do processo, em que a ferramenta de corte se aproxima da peça, sem remoção de cavaco. Na região 2, tem-se a etapa de corte com aumento de temperatura e na região 3, após a usinagem de 71,50 mm de comprimento na direção de avanço, ocorre o afastamento da ferramenta da peça com conseqüente resfriamento.

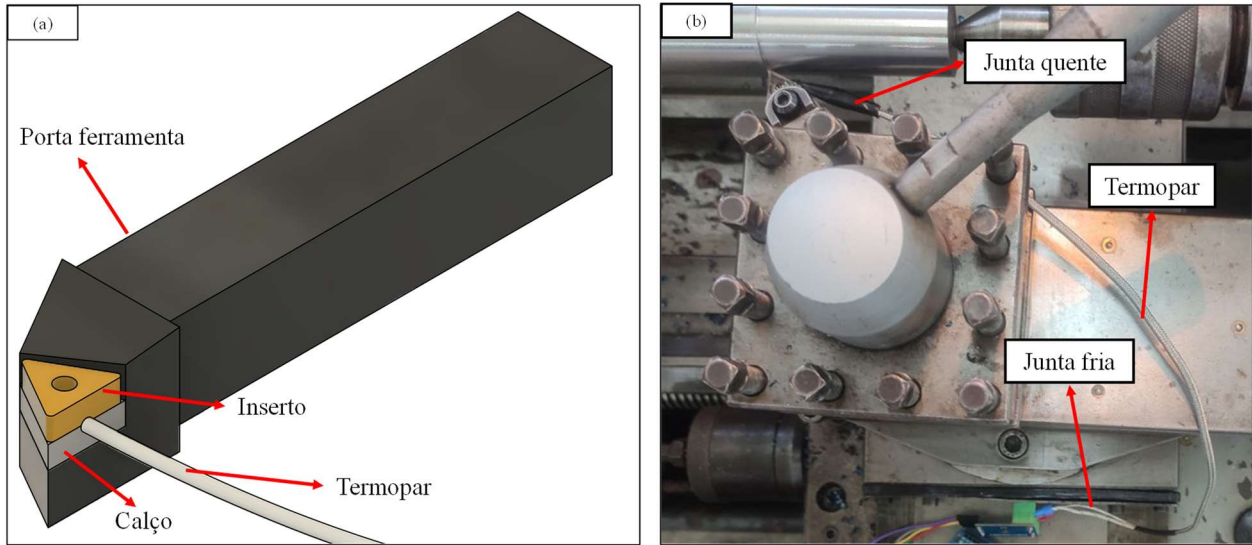


Figura 1. Junta quente do termopar fixado no porta ferramentas. (a) Desenho esquemático. (b) setup na máquina-ferramenta para ensaios de torneamento.

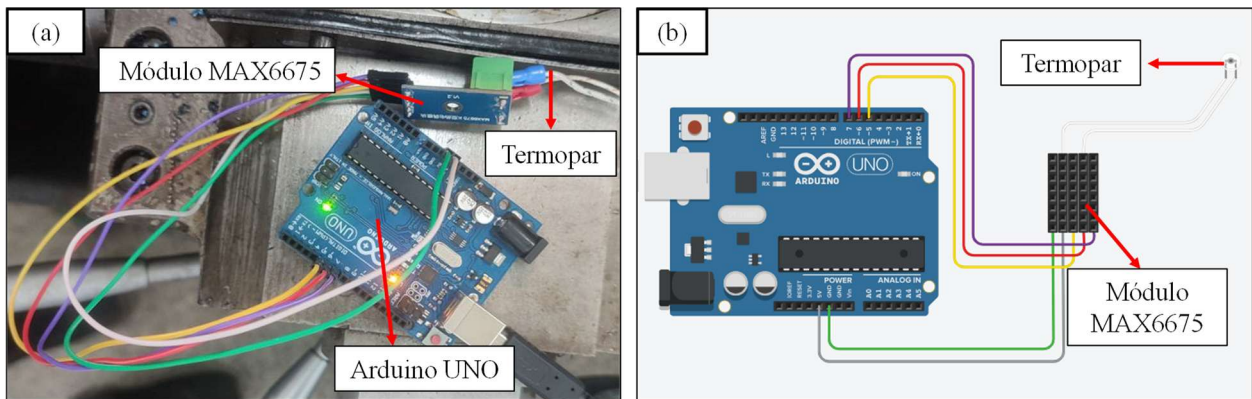


Figura 2. Sistema de medição de temperatura utilizado neste trabalho (a) e esquema ilustrativo detalhado (b).

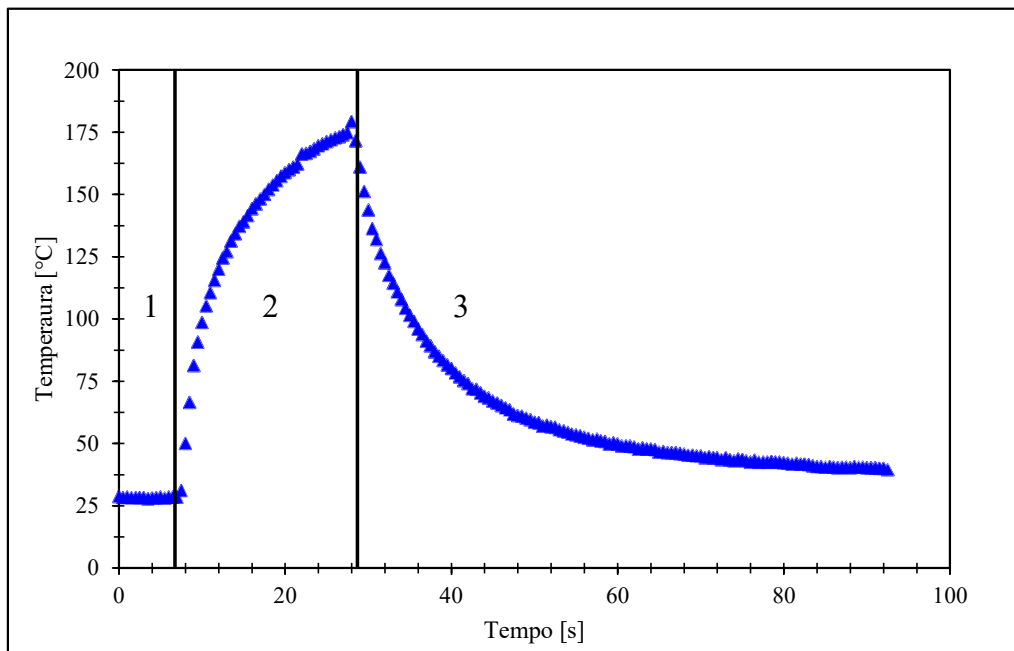


Figura 3. Curva de temperatura em função do tempo obtida durante o ensaio de torneamento com a condição de corte C5 ($v_c = 98,20$ m/min, $f = 0,23$ mm/rot e $a_p = 0,90$ mm).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela (2) são apresentados os resultados de temperatura máxima e média para cada condição de corte testada neste trabalho. Os valores de temperaturas médias correspondem à média aritmética de todos os valores de temperatura medidos no intervalo de corte [região 2 na Fig. (3)]. O tempo de corte para cada ensaio foi considerado como sendo o período em que o sinal de temperatura começou a aumentar, momento no qual se inicia o contato ferramenta/peça, seguindo até a temperatura máxima registrada. Conforme pode ser observado na Tab. (2), nota-se uma tendência de aumento de temperatura máxima e média durante o corte com a taxa de remoção de material (TRM), apresentando coeficiente de correlação de Pearson de 0,81 e 0,67, respectivamente. Esse comportamento pode ser explicado pelo maior calor gerado na interface cavaco–ferramenta–peça em função do aumento da potência de corte, já que, segundo Machado et al. (2015), a geração de calor cresce com a velocidade e a força de corte, sendo esta última diretamente influenciada pelo avanço e pela profundidade de corte que compõem a TRM.

Tabela 2. Temperaturas máximas e médias registradas nos ensaios de torneamento.

Condição de corte	TRM – mm ³ /s	Temperatura máxima (°C)	Temperatura média (°C)
C1	90,0	124,75	103,99
C2	162,0	174,50	147,97
C3	201,3	161,50	131,02
C4	111,9	125,25	105,60
C5	338,8	179,25	139,96

Na Figura (4) é apresentada a curva de temperatura em função do tempo para os ensaios de torneamento com as condições de corte C1 e C4 [Fig. (4a)] e C2 e C3 [Fig. (4b)], para a análise do efeito da velocidade de corte. Conforme pode ser observado na Fig. (4a), a condição com maior velocidade de corte (C4, $v_c = 122,03$ m/min) obteve uma maior taxa de crescimento da temperatura se comparado com a condição com menor velocidade de corte (C1, $v_c = 98,20$ m/min). Por outro lado, quando utilizado $a_p = 0,90$ mm [Fig. (4b)], comportamento oposto foi observado. Ademais, na Tabela (2), a temperatura máxima registrada para a condição C4 foi de 125,25 °C e 124,75 °C para C1, enquanto a temperatura máxima para C2 foi de 174,50 °C e 161,50 °C para C3. Nesse contexto, infere-se que a velocidade de corte exerceu influência limitada sobre os resultados, embora seja o parâmetro que normalmente mais apresenta impacto no aumento da temperatura de corte, conforme apontado por Naves *et al.* (2006) e David *et al.* (2022). Possivelmente, a baixa influência observada nos resultados deste trabalho é devido à pequena variação entre os valores testados. É importante mencionar que as curvas obtidas pelo sinal de temperatura dos ensaios sofreram ainda com o efeito da diminuição do tempo de corte, o que pode ter dificultado ou impedido o equilíbrio de temperatura, uma vez que todos os ensaios apresentaram o mesmo comprimento de usinagem.

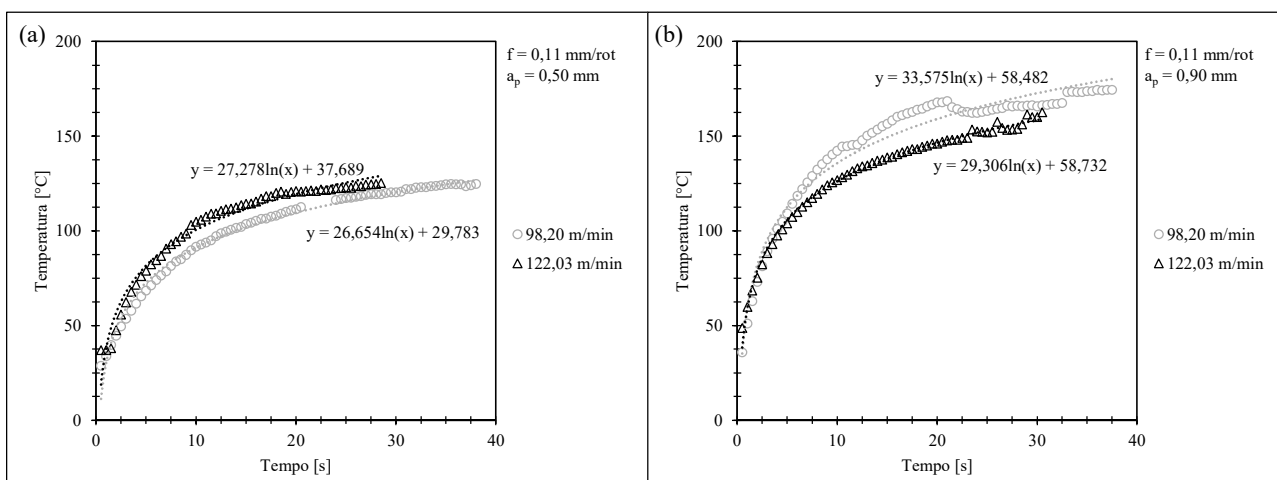


Figura 4. Temperatura em função do tempo para diferentes condições de velocidade de corte. (a) $a_p = 0,5$ mm. (b) $a_p = 0,9$ mm.

Na Figura (5) é apresentada a curva de temperatura em função do tempo para os ensaios de torneamento com as condições de corte C1 e C2 [Fig. (5a)] e C3 e C4 [Fig. (5b)], para a análise do efeito da profundidade de corte. Na Figura (5a), a curva ajustada para a condição com maior profundidade de corte, C2, obteve um aumento mais rápido na temperatura de corte do que a condição com menor profundidade de corte, C1. Comportamento similar ao observado na Fig. (5b), em que a condição C3, com maior profundidade de corte, teve um crescimento na temperatura mais rápido do que a condição C4. Além disso, na Tab. (2), as temperaturas máximas alcançadas pelos ensaios realizados com a maior profundidade de corte (C2 e C3) superaram as temperaturas máximas dos ensaios com menor profundidade de corte (C1

e C4). De acordo com Guimarães *et al.* (2023), o aumento da profundidade de corte provoca um aumento na temperatura da ferramenta, por efeito do aumento da penetração na peça o que contribui para uma maior geração de calor na zona de corte. A comparação entre C1 e C2, bem como C3 e C4, comprovam a elevação da temperatura de corte com o aumento da profundidade de corte, assim como no estudo citado.

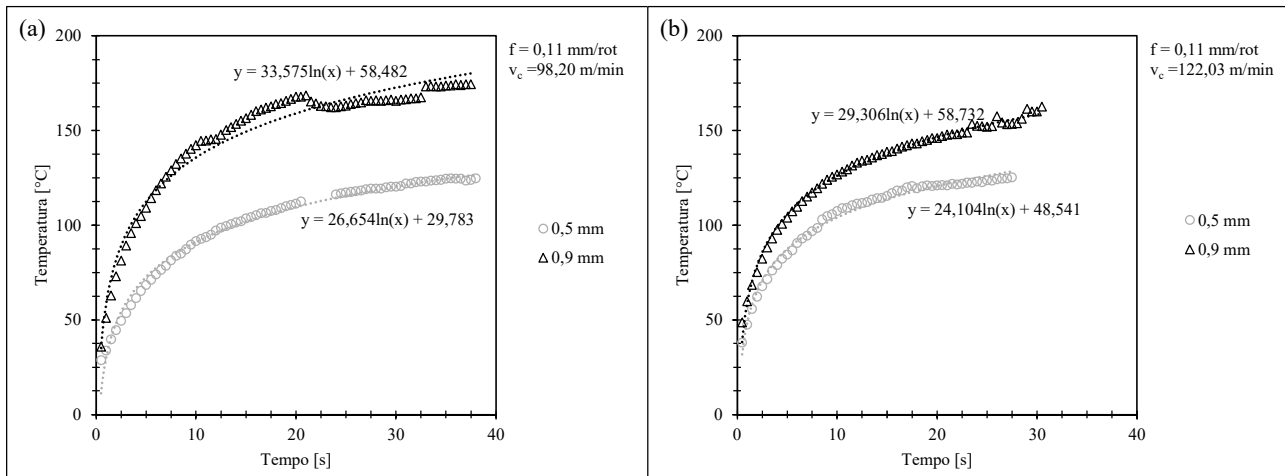


Figura 5. Temperatura em função do tempo para diferentes condições de profundidade de corte. (a) $v_c = 98,20$ m/min. (b) $v_c = 122,03$ m/min.

Em relação ao efeito do avanço, observa-se da Figura (6) que a condição de corte com maior avanço (C5, $f = 0,23$ mm/rot) apresentou uma taxa de aumento de temperatura levemente maior que aquela observada para a condição de menor avanço (C2, $f = 0,11$ mm/rot) é apresentada a curva de temperatura em função do tempo para os ensaios de torneamento com as condições de corte C2 e C5, para a análise da variação do avanço. Adicionado a isso, é observado que, na Tab. (2), a temperatura máxima registrada em C5 foi um pouco maior que a temperatura máxima em C2 (179,25 °C e 174,50 °C, respectivamente). Segundo o estudo de Naves *et al.* (2006), a variação do avanço não provoca grandes alterações na temperatura da interface cavaco-ferramenta. Para as condições C2 e C5, a proximidade entre as curvas ajustadas e entre as temperaturas máximas alcançadas, constata-se a baixa influência do avanço na temperatura de corte. Além disso, as condições de corte para análise da variação do avanço também sofreram com a diminuição do tempo de corte, haja vista que o aumento do avanço diminui o tempo de corte e, conseqüentemente, o tempo para troca de calor na interface peça-ferramenta-cavaco, limitando o aumento de temperatura na região em que o termopar foi fixado.

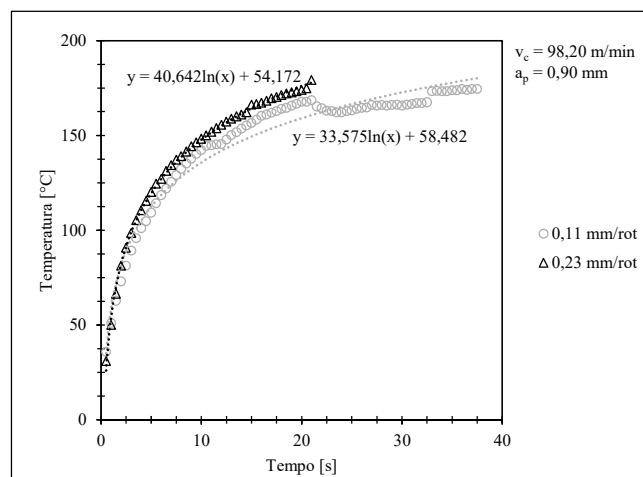


Figura 6. Temperatura em função do tempo para diferentes condições de avanço, com $v_c = 98,20$ m/min e $a_p = 0,9$ mm.

Na Figura (7) são apresentadas as curvas de resfriamento de cada ensaio, o qual foi considerado a partir das temperaturas máximas registradas em cada ensaio até a temperatura de 45 °C. Conforme pode ser observado, todas as curvas apresentaram comportamento similar, o que era esperado uma vez que em todos os ensaios não houve aplicação de fluido de corte, nem variação brusca na temperatura ambiente. Além disso, nota-se que as condições de corte que alcançaram maiores temperaturas levaram mais tempo para resfriar até 45 °C, o que é intuitivo considerando as mesmas condições de resfriamento.

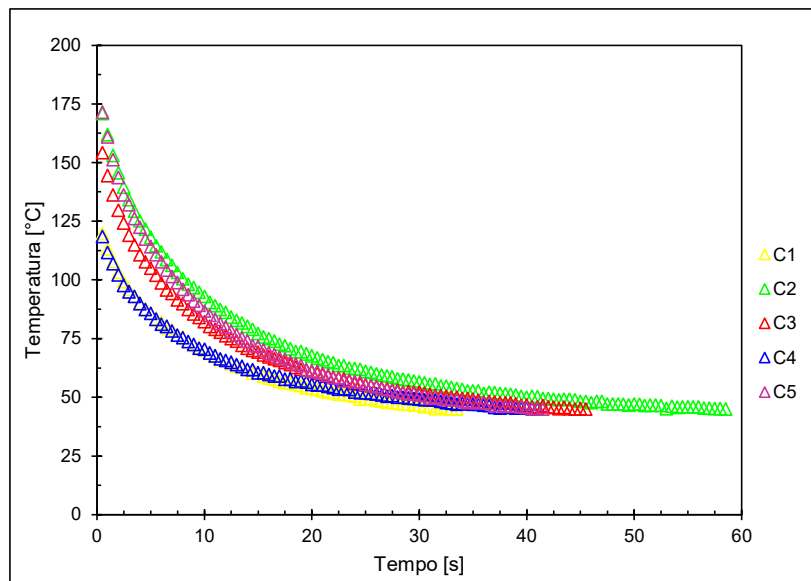


Figura 7. Curvas de resfriamento dos ensaios de torneamento para cada condição de corte testada neste trabalho.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, pode-se concluir que:

- O sistema de medição composto pela plataforma Arduino e termopar mostrou-se eficiente e economicamente viável para monitoramento da temperatura de corte. As curvas obtidas apresentaram três estágios característicos de um corte contínuo.
- A temperatura medida nos ensaios apresentou tendência de aumento com a taxa de remoção de material (TRM), com coeficiente de correlação de Pearson de 0,81 e 0,67 para as temperaturas máximas e médias durante o corte, respectivamente.
- A profundidade de corte foi o parâmetro de maior influência sobre os valores de temperatura medidos, enquanto a velocidade de corte e avanço apresentaram efeito reduzido para as condições testadas neste trabalho.
- A redução de temperatura após os ensaios de torneamento apresentou comportamento similar para todas as condições de corte testadas haja visto as mesmas condições de resfriamento.

5. REFERÊNCIAS

- David, J. P. C.; Pagotto, C. R.; Marcomini, R. F. Usando o planejamento de experimentos para a predição da temperatura de usinagem através da técnica do termopar acoplado à ferramenta de corte. *Brazilian Journal of Development*, v.8, n.6, p. 48587-48608, 2022.
- Degarmo, E. Paul; Black, J. T.; Kohser, Ronald A. *Materiais e Processos de Fabricação*. Tradução da 10ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- Fraden, J. *Handbook of Modern Sensors*. 4. ed. New York: Springer, 2010.
- Guimarães, B., Rosas, J., Fernandes, C. M., Figueiredo, D., Lopes, H., Paiva, O.C., Silva, F. S., Miranda, G. Real-Time Cutting Temperature Measurement in Turning of AISI 1045 Steel through an Embedded Thermocouple — A Comparative Study with Infrared Thermography. *Journal Of Manufacturing and Materials Processing*, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 50, 2023.
- Han, Jinghui Et Al. In-situ measurement of cutting-edge temperature and its effect on tool wear in turning by a near-infrared fiber-optic two-color pyrometer. *Procedia CIRP*, v. 101, p. 89-92, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 25 abr. 2025.
- Leonidas, E.; Ayvar-Soberanis, S.; Laalej, H.; Fitzpatrick, S.; Willmott, Jon R. A Comparative Review of Thermocouple and Infrared Radiation Temperature Measurement Methods during the Machining of Metals. *Sensors*, [S.L.], v. 22, n. 13, p. 4693, 2022.
- Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., & da Silva, M. B. (2015). *Teoria da usinagem dos materiais* (3rd ed.). Blücher.
- Naves, V. T. G.; Luiz, N. E.; Machado, Á. R.; Dantas, N. O. Calibração de um sistema termopar ferramenta-peça para medição de temperatura de usinagem. In: *Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC)*, 16., 2006, Uberlândia. Anais [...]. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

- Pagotto, C. R. Medição da temperatura no torneamento convencional a seco do aço ABNT 1045 através de câmera termográfica. *South American Development Society Journal*, v. 8, n. 24, p. 131-147, 2022.
- Plogmeyer, M.; González, G.; Pongratz, C.; Schott, A.; Schulze, V.; Bräuer, G. Tool-integrated thin-film sensor systems for measurement of cutting forces and temperatures during machining. *Production Engineering*, 18:207-217, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11740-023-01251-1>.
- Ravikanth, D.; Reddy, K. P.; Murthy, V.S. S. Influence of tool geometry on cutting zone temperature during turning of aluminium alloy AA2219. *Materials Today: Proceedings*, p. 2277-2282, 2022.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Curso de Engenharia Mecânica, ao Centro de Tecnologia e à Universidade Federal do Piauí (UFPI) pelo suporte institucional oferecido ao desenvolvimento deste trabalho. Agradecem também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado Piauí (FAPEPI) pelo financiamento de bolsas de iniciação científica PIBIC (2024–2025) e FAPEPI-PBIC (Edital N° 005/2024), respectivamente.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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