

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA TÉRMICA DO REVESTIMENTO EM FERRAMENTAS DE CORTE DURANTE TORNEAMENTO

Fernando Viana Avelar Dutra ¹

Diego Corrêa Ferreira ¹

Rodrigo Gustavo Dourado da Silva ¹

José Veríssimo Ribeiro de Toledo ¹

João Roberto Ferreira ¹

Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva ¹

¹ Laboratório de Transferência de Calor – LabTC, Instituto de Engenharia Mecânica – IEM, Universidade Federal de Itajubá, Campus Prof. José Rodrigues Seabra, Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, Itajubá – MG, CEP 37500-903.

fernandovianadutra@unifei.edu.br

diegoc.ferreira@yahoo.com.br

rodrigogdourado@unifei.edu.br

verissimo@unifei.edu.br

jorofe@unifei.edu.br

metrevel@unifei.edu.br

Resumo: Dentre os processos de fabricação a usinagem tem presença marcante. Ela é aplicável desde a retirada considerável de material à acabamentos superficiais. Dos componentes atuando na usinagem, a ferramentas de corte é aquela que sofre as maiores exigências em temperatura e em esforço. É esperado no processo ocorrer um desgaste na região de corte, mas dependendo dessas exigências o desgaste é acelerado e diminui a vida da ferramenta, e isso afeta o lucro. O lucro afetado não se restringe ao custo de outro inserto, estende-se por exemplo a pausas para troca da ferramenta e a integridade da peça usinada. Para evitar esses impactos, as ferramentas de corte foram sujeitas a aperfeiçoamentos geométricos e em material ao longo dos anos. Quanto a aperfeiçoamentos materiais, pode-se pontuar o uso de ferramentas mais resistentes e o uso de ferramentas revestidas. O objetivo deste trabalho é indicar os efeitos desses revestimentos no fluxo de calor e nas temperaturas desenvolvidas na região de corte, isso, durante o torneamento. Na região de corte, restringiu-se em avaliar a superfície de saída, precisamente no contato cavaco-ferramenta. Como essa região é de difícil acesso, o problema foi tratado como um problema inverso. A técnica usada no problema foi a Função Especificada Sequencial, mas abordada de forma iterativa. Um dos dados de entrada na técnica são temperaturas obtidas em regiões acessíveis da ferramenta. Para obter essas temperaturas foram usados termopares, esses eram soldados na superfície dos insertos. Essas temperaturas eram posteriormente comparadas a temperaturas estimadas, para então obter o fluxo de calor atuando na região desejada. Com o cavaco sendo capaz de desprender o termopar, para amenizar esse problema, optou-se por usar o ferro fundido como peça usinada. Os resultados apresentam o desempenho da técnica na estimação do fluxo de calor. Constata-se que o uso de revestimento na ferramenta de corte afeta o campo de temperaturas no inserto. Este trabalho contribui em estudos sobre o aumento da vida útil das ferramentas de corte.

Palavras-chave: Torneamento; Temperatura; Ferramentas de corte; Problema inverso

1. INTRODUÇÃO

No processo de torneamento ocorrem três zonas importantes quanto a geração de calor: zona primária, secundária e terciária de deformação. Os fenômenos que atuam nessas zonas e são os principais na geração de calor são a deformação plástica e atrito (Dogu *et al.*, 2006). Este trabalho concentra-se na zona secundária de deformação, a qual se refere ao contato inserto-cavaco. Por essa área de contato ser pequena e pelas elevadas forças necessárias para deformar a peça, tem-se altas temperaturas nessa região (Guimarães *et al.*, 2022).

A temperatura desenvolvida no contato inserto-cavaco é uma característica comum do processo, mas valores altos dessa pode consideravelmente diminuir a vida do inserto (Dimla, 2000 e Lotfi *et al.*, 2016). Apenas a compra de outro inserto não tem grande influência na rentabilidade, entretanto, o desgaste do inserto afeta todo o processo: acabamento superficial da peça, paradas para troca da ferramenta, outros (Davim, 2019). Portanto, ter uma estimativa das temperaturas de corte e parâmetros que a afetam são de interesse para melhor controle do processo.

Métodos analíticos, numéricos e experimentais podem ser usados para estimação da temperatura de corte no torneamento. García-Martínez *et al.* (2022) usaram uma metodologia que combinava experimentos e simulações para avaliar a temperatura desenvolvida no contato ferramenta-peça usinada. Entretanto, como a temperatura era obtida em um contexto de termopares naturais, sua metodologia se limitava a insertos não revestidos. Gupta *et al.* (2022) estimaram

temperaturas de corte por simulações com elementos finitos. Möhring *et al.* (2018), por sua vez, usaram meios analíticos e numéricos para estimar as temperaturas de corte. Eles notaram que altas velocidade de corte podem aumentar a temperatura na superfície de saída da ferramenta de corte.

Percebe-se por essas pesquisas uma preocupação quanto a temperatura de corte, e que essas empregam as mais variadas metodologias para avaliá-la. É relevante pontuar que existem diferentes tecnologias para medição das temperaturas. Algumas formas de medir as temperaturas na usinagem envolvem o uso de termopares e câmeras termográficas. Um exemplo de aplicação de termopares é de Kovac *et al.* (2019). Quanto ao uso de câmera termográfica, deve-se ter cautela com o cavaco, seu formato pode afetar as medições de temperatura (Heigel *et al.*, 2017). Um outro detalhe sobre o uso da câmera termográfica é quanto a estimativa da emissividade, que é a fonte principal de incerteza em técnicas infravermelhas (Soler *et al.*, 2018).

Independente do sensor empregado na medição das temperaturas, as áreas em que o inserto entra em contato com o cavaco ou com a peça usinada são de difícil acesso. Essas áreas, são também aquelas que alcançam as maiores temperaturas. Nesse contexto, os aparelhos de medição coletam dados em regiões acessíveis. Esses dados podem ser, por exemplo, usados em problemas inversos (Silva *et al.*, 2021).

Este trabalho trata um problema inverso não linear em condução de calor para estimar o fluxo de calor na interface inserto-cavaco. Termopares foram usados para medir as temperaturas. Eles foram posicionados em regiões acessíveis do inserto. As temperaturas medidas foram então usadas em uma técnica inversa para estimativa do fluxo de calor. A técnica usada foi a Função Especificada Sequencial Iterativa. Com o fluxo de calor estimado, um problema direto fornecia as temperaturas desenvolvidas no inserto.

O calor gerado na interface inserto-cavaco é afetado por parâmetros como velocidade de corte, profundidade de corte, avanço, material da peça usinada e material do inserto. Para cada aplicação tem-se os insertos mais adequados. Algo amplamente usado são insertos revestidos, tal que os revestimentos influenciam na distribuição de temperatura durante o corte (Zhang *et al.*, 2022).

Neste trabalho, dois insertos de metal duro são explorados, um sem revestimento e o outro com revestimento de TiN, Al_2O_3 e TiCN. O objetivo era indicar os efeitos do revestimento nas temperaturas desenvolvidas no contato inserto-cavaco durante o torneamento. Foi avaliado o quanto o revestimento protege termicamente o inserto. Este estudo acrescenta sobre o tratamento e sobre benefícios do uso de revestimento em insertos.

2. DESCRIÇÃO DO MODELO

O modelo estudado aborda cinco domínios: grampo (Ω_1), o revestimento do inserto quando considerado (Ω_2), inserto (Ω_3), calço (Ω_4) e suporte (Ω_5). Esses domínios estão indicados na Figura 1, juntamente com detalhes quanto as restrições atuando no inserto. A região de contato inserto-cavaco (S_1) é considerado o local de maior importância neste trabalho. Em S_1 é estudado o fluxo de calor desenvolvido durante o torneamento. O contato do inserto com o grampo, suporte e calço são representados por S_2 , S_3 e S_4 , respectivamente. A observar que a circunferência em S_4 é pelo furo passante presente no calço. As superfícies diretamente expostas ao ar estavam sujeitas a convecção natural e radiação.

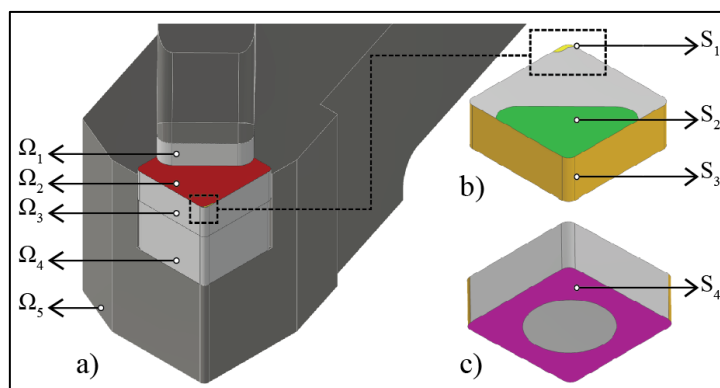


Figura 1. Modelo computacional considerado nas análises numéricas: a) indicação dos domínios, b) parte superior do inserto e c) parte inferior do inserto.

Duas configurações foram avaliadas quanto ao inserto de metal duro: sem revestimento e revestido em multicamada por TiN, Al_2O_3 e TiCN. Como indicado na seção experimental, as espessuras dos revestimentos foram obtidas usando um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Usou-se os valores médios das espessuras no modelo numérico. Seleccionada a superfície, os revestimentos eram tratados como malhas unidimensionais antes de converter os resultados para modelo 3D. O fluxo de calor foi considerado atuando em todos os sentidos no revestimento.

As propriedades calor específico e condutividade térmica foram consideradas dependentes da temperatura. A emissividade do metal duro foi considerada variável com a temperatura enquanto a do revestimento mais externo TiN foi assumida como constante e igual a 0.73 (Hou *et al.*, 2013). A emissividade do aço AISI 4340 também foi considerado

constante e igual à 0.7 (Fakir *et al.*, 2018). As propriedades térmicas variando com a temperatura estão indicadas na Figura 2. Os valores de densidade foram considerados constantes, Tabela 1.

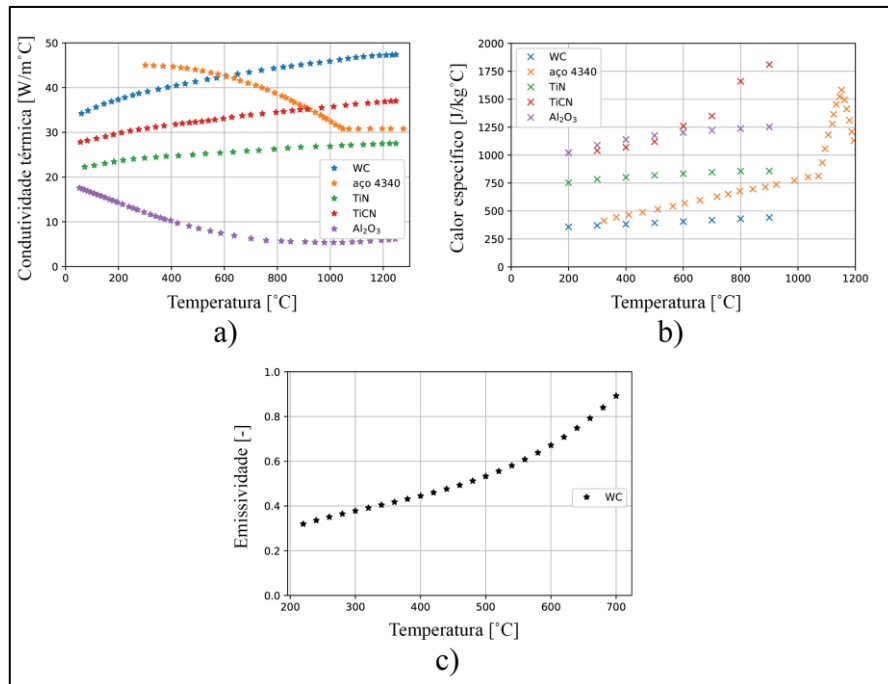


Figura 2. Propriedades térmicas variando com a temperatura: (a) Condutividade térmica, (b) Calor específico e (c) Emissividade.

[Fahad *et al.*, 2011; Jiang *et al.*, 2016; Fakir *et al.*, 2018]

Tabela 1. Valores de densidade em ordem decrescente.
[Fahad *et al.*, 2011, Fakir *et al.*, 2018]

Material	ρ [kg/m ³]	Material	ρ [kg/m ³]
WC	11900	TiCN	4180
4340 Steel	7870	Al ₂ O ₃	3780
TiN	5420	-	-

As simulações numéricas deste trabalho foram realizadas utilizando o programa comercial COMSOL Multiphysics 5.6 e seu pacote adicional LiveLink para MATLAB. O problema era abordado em duas partes: problema direto e problema inverso.

3. PROBLEMA DIRETO

O modelo térmico é descrito pela equação da difusão de calor. O problema é tridimensional, transiente e as propriedades variando com a temperatura estão indicadas:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

onde T é a temperatura, x , y , e z as coordenadas Cartesiana, ρ a densidade, t é o tempo e $k(T)$ e $c(T)$ são a condutividade térmica e calor específico, respectivamente.

A condição de contorno de fluxo de calor imposto no contato ferramenta-cavaco é dada por:

$$-k(T) \frac{\partial T}{\partial z} = q(t), \quad \text{em } S_1 \quad (2)$$

Para todas as superfícies expostas diretamente ao ar foi considerado as condições de convecção natural e radiação:

$$-k(T) \frac{\partial T}{\partial \eta} = h(T - T_{\infty}) + \sigma \varepsilon(T) (T^4 - T_{\infty}^4) \quad (3)$$

onde $q(t)$ é o fluxo de calor imposto, η a direção normal à superfície, ε a emissividade, h o coeficiente de transferência de calor por convecção e σ a constante de Stefan-Boltzmann.

A temperatura inicial é definida como a temperatura ambiente (T_{∞}):

$$T(x, y, z, 0) = T_{\infty} \quad (4)$$

Para todas as regiões de contato entre os domínios da ferramenta de corte (Figura 1), foi considerado um contato perfeito.

4. PROBLEMA INVERSO

O contato inserto-cavaco é de difícil acesso durante a usinagem. Queria-se avaliar a condição de contorno de fluxo de calor atuando nesse contato. Para essa avaliação usa-se um conceito de aproximação entre temperaturas experimentais e estimadas; as temperaturas experimentais eram coletadas em locais acessíveis. Esse problema se caracteriza como um problema inverso em condução de calor.

Tem-se um problema não-linear, diante disso optou-se por usar uma técnica fundamentada no Método de Minimização de Gauss (Woodbury, 2003) para solucionar o problema inverso. A técnica é a Função Especificada Sequencial Iterativa. Trata-se de um método iterativo que trabalha com incrementos de fluxo de calor (5). Onde descobre-se o fluxo de calor da iteração seguinte, apenas se o incremento é próximo de zero. Ter uma convergência dessa é difícil de assegurar, logo optou-se por outra condição. A condição considerada restringia-se ao fluxo de calor atual: a razão entre incremento e próprio valor do fluxo de calor sendo menor que uma tolerância $tol = 0.001$ (6).

$$\Delta q_M = \frac{\sum_{n=1}^r \chi_{qn} (Y_n - T_n)}{\sum_{n=1}^r \chi_{qn}^2} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta q_M}{q_M} \leq tol \quad (6)$$

Y refere-se a valores de temperatura obtidos experimentalmente, no caso, a partir de regiões acessíveis do inserto. Designa-se T aos valores de temperatura estimados, q_M é o fluxo de calor no instante atual M , e χ_{qn} refere-se aos elementos do vetor de sensibilidades χ (7). A regularização da técnica é assegurada abordando fluxos de calor constantes em r tempos futuros.

$$\chi_q|_M = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_1}{\partial q} \\ \frac{\partial T_2}{\partial q} \\ \vdots \\ \frac{\partial T_r}{\partial q} \end{bmatrix} \quad (7)$$

5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Apresenta-se nesta sessão os materiais, equipamentos e procedimentos utilizados para validar a metodologia proposta. Para avaliação da temperatura durante o torneamento, utilizou-se um torno convencional NARDINI Logic 175. Foi usada como peça a ser usinada o ferro fundido nodular GGG40. Foram avaliados dois tipos de insertos de metal duro, dizendo de outra forma, de carboneto de tungstênio (WC): um sem revestimento ISO K10 SNGN 120408 e o outro SNUN 120408 revestido com TiN, Al₂O₃ e TiCN. O suporte era o BT25-CSRNR-2540-12-IC, feito de aço AISI 4340. O grampo e o calço eram feitos de metal duro. Na Figura 3 encontram-se indicados alguns desses componentes.

Termopares tipo K foram usados para as medições de temperatura no inserto. A cada experimento, quatro termopares eram soldados por descarga capacitiva. A descarga capacitiva foi desenvolvida no Laboratório de Transferência de Calor (Lab-TC) da UNIFEI. Os sinais dos sensores eram tratados pela aquisição Keysight modelo 34970A. Os termopares foram nomeados como T2, T3, T5 e T6, sendo que os três primeiros foram posicionados em região similar de sensibilidade (os três frontais percebidos no inserto revestido, à direita, na Figura 3). O termopar T6 é um de avaliação complementar, sendo o mais afastado no inserto.



Figura 3. Posicionamento dos termopares na ferramenta de corte.

Foram feitos quatro experimentos para cada inserto. Desses quatro, metade foi avaliada com velocidade de corte (V_c) a 150 m/min e a outra metade avaliada a 200 m/min. Os outros parâmetros de corte foram mantidos constantes em todas as análises: avanço (f) de 0,2 mm/rot e profundidade de corte (a_p) de 1,5 mm. O comprimento das peças trabalhadas era de 65 mm. Quanto aos códigos usados no trabalho, “MD” refere-se à “Metal Duro”, o inserto sem revestimento, e “MDR” refere-se a “Metal Duro Revestido”, já tratando do inserto revestido. Os números que seguem esses códigos são quanto a V_c , sendo “1” para 150 m/min e “2” para 200 m/min. As letras minúsculas ao fim dos códigos são apenas para indicar em ordem alfabética qual experimento foi realizado primeiro.

Finalizado o torneamento, o contato inserto-cavaco era visualizado experimentalmente e reproduzido em modelo numérico. Quanto ao inserto de metal duro revestido, a configuração e as espessuras dos revestimentos foram avaliadas pelo Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Na Tabela 2 encontra a média ($\bar{x}$) e desvio padrão (SD) quanto às espessuras dos revestimentos, sendo que esses estão dispostos em ordem da camada externa para a mais interna.

Tabela 2. Espessura dos revestimentos.

Coating	$\bar{x}$ [μm]	SD [μm]
TiN	1.5	0.3
Al_2O_3	6.5	0.3
TiCN	4.5	0.2
Total	12.6	0.5

6. RESULTADOS

6.1 Temperaturas experimentais

Para investigar o efeito do revestimento no inserto, em primeiro instante, compara-se as temperaturas obtidas pelos termopares. Na Figura 4 encontra as temperaturas obtidas quanto a $V_c = 150$ m/s. Ao analisar a Figura 4 percebe que as temperaturas medidas no inserto revestido são predominantemente superiores àquelas dos inserts não revestidos. Vê-se necessária uma avaliação similar a $V_c = 200$ m/s, Figura 5, para verificar se esse mesmo comportamento é observado. Na Figura 5 não se observa temperaturas predominantemente mais elevadas para o inserto revestido, como no caso de $V_c = 150$ m/s. Em vez disso percebe-se que as temperaturas não se distanciaram muito.

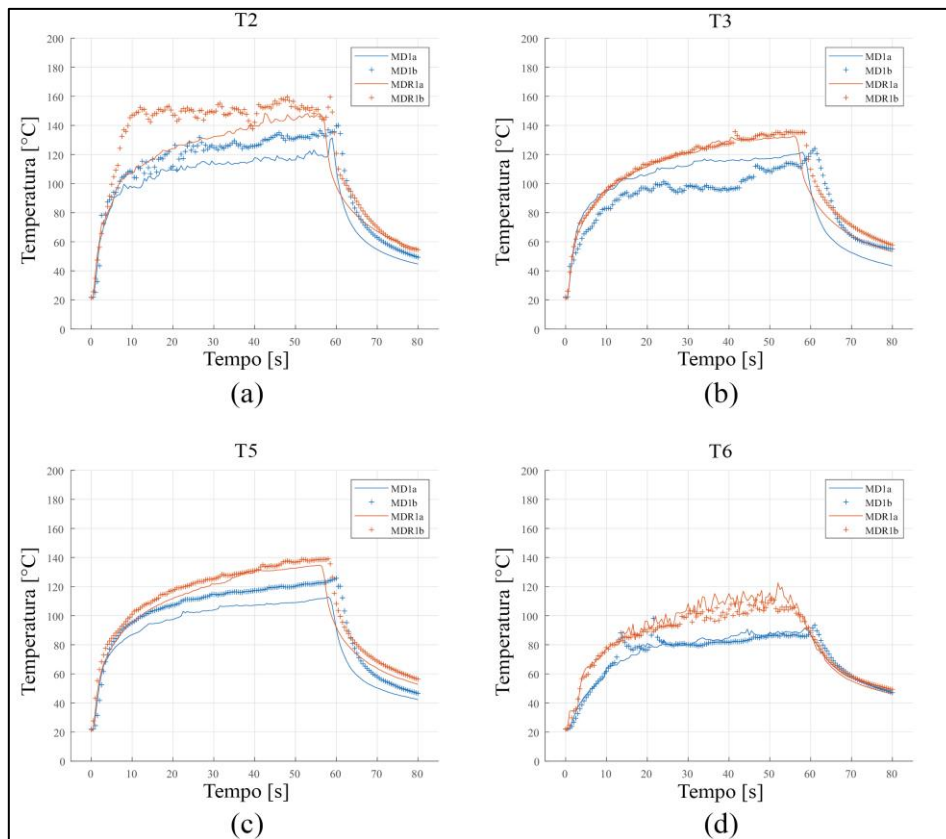


Figura 4. Temperaturas medidas pelos termopares quando $V_c = 150$ m/s.

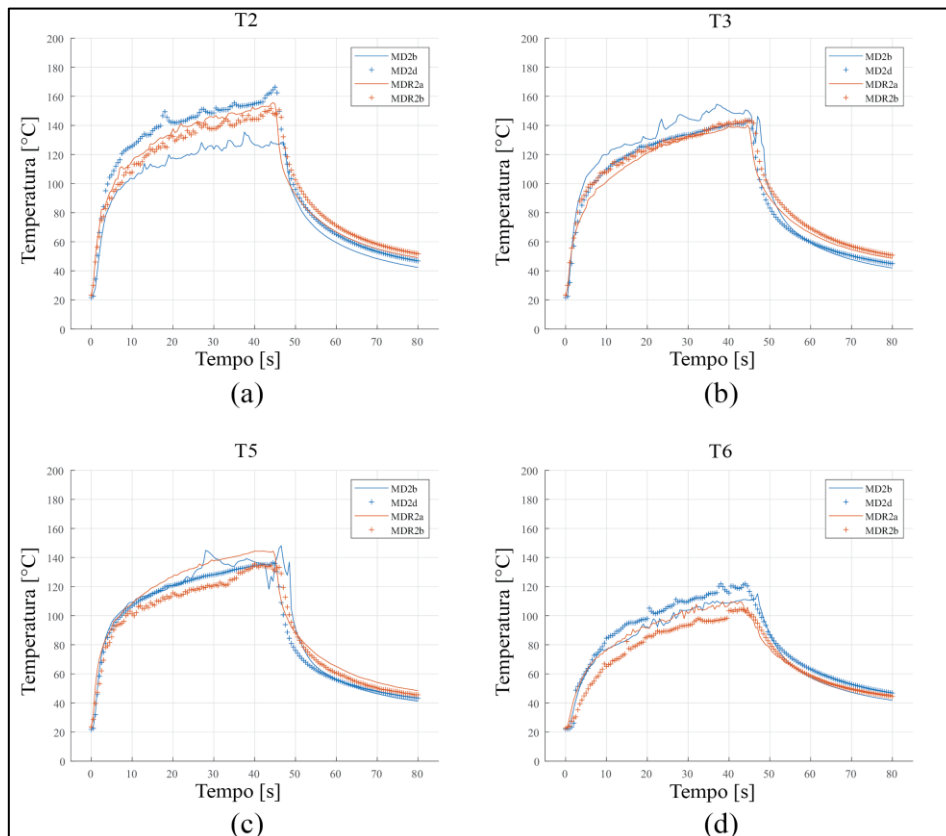


Figura 5. Temperaturas medidas pelos termopares quando $V_c = 200$ m/s.

6.2 Contato inserto-cavaco

Como indicado na sessão experimental, após cada experimento era medida a área de contato inserto-cavaco. A Figura 6 ilustra a diferença desse contato para o inserto não revestido e revestido para $V_c = 150$ m/s.

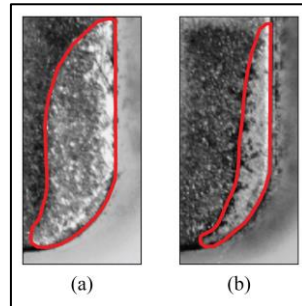


Figura 6. Contato inserto-cavaco para os experimentos: (a) MD1a e (b) MDR1a.

Na Figura 7 encontram-se os valores das áreas de contato tanto para os inserts não revestidos, quanto para os revestidos. Em primeira avaliação, constata-se pela Figura 7, que a presença do revestimento provocou uma diminuição da área de contato. Ao avaliar individualmente o agrupamento dos inserts não revestidos e revestidos, percebe que a mudança da velocidade de corte não provoca alterações tão visíveis na área quanto ocorre pela presença ou não de revestimento.

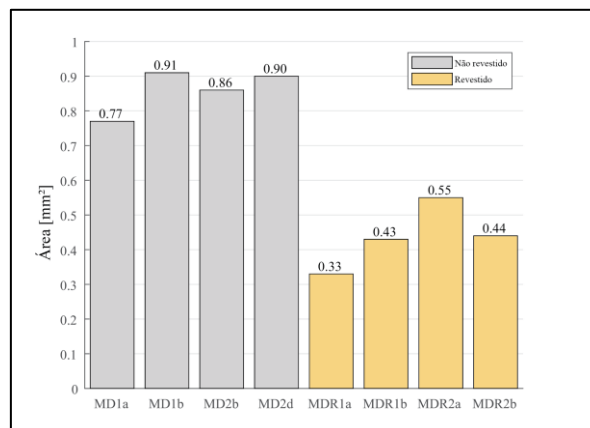


Figura 7. Áreas do contato inserto-cavaco para inserts revestidos e não revestidos.

6.3 Estimação do fluxo de calor e temperatura

Com as temperaturas experimentais obtidas e as áreas de contato medidas, utiliza-se a metodologia inversa para estimar o fluxo de calor na área de contato inserto-cavaco para todos os experimentos. Na Figura 8 (a) são apresentados os fluxos de calor para os experimentos com inserts não revestidos, enquanto na Figura 8 (b) são apresentados os fluxos de calor para os experimentos com inserts revestidos.

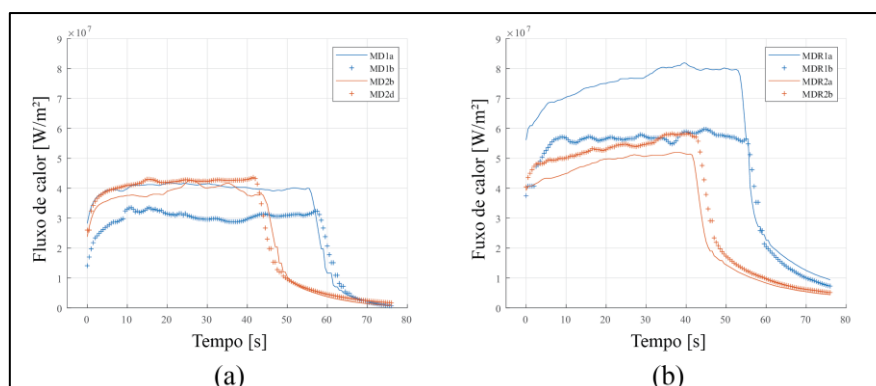


Figura 8. Fluxos de calor estimados para os inserts: (a) Não revestidos e (b) Revestidos.

Percebe-se pela Figura 8 que os fluxos de calor alcançados para o inserto revestido são maiores que os para o inserto não revestido. É visível que a mudança de velocidade de corte não afetou consideravelmente os fluxos de calor, e que até mesmo em velocidades menores observou-se um fluxo maior. A observar que esse fluxo maior é devido essencialmente a área de contato inserto-cavaco. Na Tabela 3, indica-se o quanto obteve-se em média de temperatura máxima para 10 s antes do fim da operação (diminuição do fluxo de calor).

Tabela 3. Média das temperaturas máximas ($\bar{T}_{m\acute{a}x}$) desenvolvidas no torneamento.

Experimento	$\bar{T}_{m\acute{a}x}$ [°C]	Experimento	$\bar{T}_{m\acute{a}x}$ [°C]
MD1a	864	MDR1a	1014
MD1b	669	MDR1b	866
MD2b	841	MDR2a	847
MD2d	837	MDR2b	848

Nota-se pela tabela que as temperaturas alcançadas para o inserto revestido são maiores. Entretanto a diferença entre insertos revestidos e não revestidos fica menor com o aumento da velocidade de corte. Essas maiores temperaturas são devidas a um conjunto de fatores: o revestimento Al_2O_3 age como um bom protetor térmico do substrato, e TiN favorece pequenas áreas de contato inserto-cavaco. Uma maior temperatura na ponta de corte facilita a usinagem, porém pode conduzir a um desgaste maior do inserto. Melhores avaliações precisam ser feitas sobre o quanto dessa temperatura afeta o substrato, pois se ela se condensa na ponta de corte ela não seria um problema tão considerável.

7. CONCLUSÃO

Este trabalho aborda o processo de torneamento. Foi apresentado uma metodologia para determinar o fluxo de calor no contato inserto-cavaco. Dentre os diferenciais deste trabalho podem-se destacar: possibilidade de modelar o revestimento térmico e verificar seu efeito no campo de temperaturas da ferramenta de corte, utilização de uma técnica que resolve problemas inversos não-lineares o que possibilita a utilização de propriedades térmicas variando com a temperatura.

Realizou-se experimentos controlados em laboratório. Foram utilizadas ferramentas de corte de metal duro sem revestimento e revestidas. Após cada experimento foram tratados os dados da área de contato inserto-cavaco e das temperaturas dos termopares.

Para a realização da análise numérica foi feito primeiramente um estudo em modelo numérico 3D representando o conjunto ferramenta de corte, mas sem revestimento. Em seguida desenvolveu-se um segundo estudo, considerando agora o revestimento. No estudo do revestimento considerou-se três camadas da ordem de micro metros posicionadas na superfície de saída da ferramenta de corte.

A resolução do problema foi dividida em duas partes: primeiro, solucionava-se o problema inverso para a obtenção do fluxo de calor e em seguida soluciona-se o problema direto para a obtenção do campo de temperatura em todo o conjunto.

Experimentos com ferramentas de corte revestidas tiveram menores áreas de contato inserto-cavaco, comparando-se com os experimentos usando ferramentas não revestidas. Para a ferramenta de corte revestida, os valores de fluxo de calor e as temperaturas máximas médias 10 s antes do fim do processo, foram superiores aos da ferramenta sem revestimento.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES e à FAPEMIG pelo apoio financeiro.

9. REFERÊNCIAS

- Davim J.P., 2019. *Measurement in Machining and Tribology*. Springer Nature, Cham.
- Trindade, M.A. e Benjeddou, A., 2011a. Finite element homogenization technique for the characterization of d15 shear piezoelectric macro-fibre composites. *Smart Materials and Structures*, Vol. 20, p. 07-12.
- Dimla D.E., 2000. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations—a review of methods. *The International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol., 40, p. 1073-1098. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00122-4](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00122-4).
- Dogu Y., Aslan E. e Camuscu N., 2006. A numerical model to determine temperature distribution in orthogonal metal

- cutting. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 171, p. 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.05.019>.
- El-Wardany T.I., Mohammed E. e Elbestawi M.A., 1996. Cutting temperature of ceramic tools in high speed machining of difficult-to-cut materials. *The International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 36, p. 611-634. [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(95\)00043-7](https://doi.org/10.1016/0890-6955(95)00043-7).
- Fahad M., Mativenga P.T. e Sheikh M.A., 2011. An investigation of multilayer coated (TiCN/Al₂O₃-TiN) tungsten carbide tools in high speed cutting using a hybrid finite element and experimental technique. *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 225, p. 1835-1850. [10.1177/0954405411404504](https://doi.org/10.1177/0954405411404504).
- Fakir R., Barka N. e Brousseau J., 2018. Case study of laser hardening process applied to 4340 steel cylindrical specimens using simulation and experimental validation. *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 11, p. 15-25. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2017.12.002>.
- García-Martínez E., Martínez-Martínez A., Manjabacas-Tendero M.C. e Miguel-Eguía V., 2022. Proposal of a combined experimental-simulation methodology for the evaluation of machining temperature in turning processes. *Measurement*, Vol. 189, p. 110632. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110632>.
- Guimarães B.M.P., Fernandes C.M.S., Figueiredo D.A., Silva F.S.C.P. e Miranda M.G.M., 2022. Cutting temperature measurement and prediction in machining processes: comprehensive review and future perspectives. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 120, p. 2849–2878. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08957-z>.
- Gupta M.K., Korkmaz M.E., Sarıkaya M., Krolczyk G.M. e Günay M., 2022. In-process detection of cutting forces and cutting temperature signals in cryogenic assisted turning of titanium alloys: An analytical approach and experimental study. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 169, p. 108772. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108772>.
- Heigel J.C., Whitenton E., Lane B., Donmez M.A., Madhavan V. e Moscoso-Kingsley W., 2017. Infrared measurement of the temperature at the tool–chip interface while machining Ti–6Al–4V. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 243, p. 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.11.026>.
- Hou J., Zhou W., Duan H., Yang G., Xu H. e Zhao N., 2013. Influence of cutting speed on cutting force, flank temperature, and tool wear in end milling of Ti-6Al-4V alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 70, p. 1835-1845. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5433-8>.
- Jiang F., Zhang T. e Yan L., 2016. Estimation of temperature-dependent heat transfer coefficients in near-dry cutting. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 86, p. 1207–1218. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8293-6>.
- Kovac P., Gostimirovic M., Rodic D. e Savkovic B., 2019. Using the temperature method for the prediction of tool life in sustainable production. *Measurement*, Vol. 133, p. 320-327. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.09.074>.
- Lotfi M., Jahanbakhsh M. e Farid A.A., 2016. Wear estimation of ceramic and coated carbide tools in turning of Inconel 625: 3D FE analysis. *Tribology International*, Vol. 99, p. 107-116. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.03.008>.
- Möhring H.C., Kushner V., Storchak M. e Stehle T., 2018. Temperature calculation in cutting zones. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 67, p. 61-64. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.03.009>.
- Silva R.G.D., Ferreira D.C., Dutra F.V.A. e Lima e Silva S.M.M., 2021. Simultaneous real time estimation of heat flux and hot spot temperature in machining process using infrared camera. *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 28, p. 101352. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101352>.
- Soler D., Aristimuño P.X., Saez-de-Buruaga M. e Garay A, Arrazola P.J., 2018. New calibration method to measure rake face temperature of the tool during dry orthogonal cutting using thermography. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 137, p. 74-82. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.03.056>.
- Woodbury K.A., 2003. *Inverse Engineering Handbook*. CRC Press, Boca Raton.
- Zhang J., Zhang G. e Fan G., 2022. Effects of tool coating materials and coating thickness on cutting temperature distribution with coated tools. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, Vol. 19, p. 2276-2284. <https://doi.org/10.1111/ijac.14038>.

10. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

EVALUATING THE THERMAL INFLUENCE OF COATING ON CUTTING TOOLS DURING TURNING

Fernando Viana Avelar Dutra¹

Diego Correa Ferreira¹

Rodrigo Gustavo Dourado da Silva¹

José Veríssimo Ribeiro de Toledo¹

João Roberto Ferreira¹

Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva¹

¹ Laboratório de Transferência de Calor – LabTC, Instituto de Engenharia Mecânica – IEM, Universidade Federal de Itajubá, Campus Prof. José Rodrigues Seabra, Av. BPS, 1303, Bairro Pinheirinho, Itajubá – MG, CEP 37500-903.

fernandovianadutra@unifei.edu.br

diegoc.ferreira@yahoo.com.br

rodrigogdourado@unifei.edu.br

verissimo@unifei.edu.br

jorofe@unifei.edu.br

metrevel@unifei.edu.br

Abstract: Among the manufacturing processes, machining has a strong presence. It is applicable from considerable material removal to surface finishing. In the group of components involved in machining, the cutting tool is the one subjected to the greatest requirements in terms of temperature and effort. Wear in the cutting region is expected during the process, but depending on these requirements, wear is accelerated and reduces tool life, and this affects profit. The affected profit is not restricted to the cost of another insert, it extends for example to the breaks in the process for tool changes and to the integrity of the machined part. For avoiding these impacts, cutting tools have undergone geometric and material improvements over the years. Exemplifying material improvements, the use of more resistant tools and employment of coatings can be highlighted. The goal of this work is to point effects of these coatings on the heat flux and on the temperatures developed on the cutting zone during turning. In the cutting region, the analysis was restricted to the rake surface, precisely in the tool-chip contact. As this region is difficult to access, the problem was treated as an inverse problem. The technique used in the problem was the Sequential Function Specification Method, but used iteratively. One of the input data in the technique is the temperatures in accessible regions of the tool. To obtain these temperatures, thermocouples were used, which were welded on insert's surface. These temperature values were later compared to estimated ones, in order to obtain the heat flux developed in the evaluated region. With the chip being able to detach the thermocouple, to minimize this problem, it was decided to use cast iron as workpiece. The results show the performance of the technique in estimating the heat flux. It was verified that the use of coating on the cutting tool affects the temperature field on the insert. This work contributes to studies about tool life increment.

Keywords: Turning; Temperature; Cutting tool; Inverse problem

RESPONSIBILITY NOTICE

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