

ANÁLISE NUMÉRICA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO PROCESSO DE USINAGEM DE AÇO LIVRE-CORTE COM FERRAMENTA DE AÇO-RÁPIDO

Heitor Alves Falqueto¹ (IC), Rogério Fernandes Brito (PQ)¹
¹Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: COMSOL. Condução de calor tridimensional. Métodos inversos. Torneamento.

Introdução

No processo de usinagem por torneamento, a energia mecânica fornecida à peça de trabalho é transformada em calor por conta do atrito presente entre a ferramenta de corte e peça, que resulta na deformação plástica do material usinado, originando assim o cavaco. Dessa forma, o processo de torneamento pode ser caracterizado como um problema de natureza térmica devido ao fato de o calor gerado promover um gradiente de temperatura elevado ao longo da ferramenta. Portanto, a partir dos estudos realizados, pode-se relacionar os parâmetros de corte utilizados no processo aos efeitos térmicos gerados na ferramenta de corte, o que por sua vez favorece a descoberta de condições específicas desses parâmetros a fim de aumentar a eficiência e vida útil da ferramenta mesmo sob condições mais severas. Porém, um grande empecilho para se obter a temperatura na interface de corte é o movimento e o contato físico que ocorre, impossibilitando a realização de medições experimentais. Sendo assim, torna-se necessário a utilização de técnicas numéricas eficientes para que se torne possível a análise do problema térmico. Com isso, desenvolveu-se ao longo do tempo programas computacionais específicos por parte dos laboratórios de transferência de calor da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), que juntamente com a utilização de pacotes comerciais, munidos com técnicas inversas, determinam o fluxo de calor e a distribuição de temperatura nos processos de fabricação e em especial os processos de usinagem. Dentre as embalagens comerciais existentes, utiliza-se o COMSOL Multiphysics 6.0, que baseado na solução numérica, e o uso do método de elementos, de um modelo térmico transitório tridimensional usando uma malha tetraédrica não estruturada, realiza a solução de problemas de transferência direta e inversa de calor. Para tanto, no presente trabalho utilizou-se a técnica Levenberg-Marquardt (LM), que foi validada utilizando os dados experimentais dos trabalhos realizados por

Carvalho (2005) e Santos (2008).

Metodologia

Para o desenvolvimento deste trabalho foi realizado inicialmente uma descrição do modelo físico e matemático utilizado pelo *software* comercial utilizado, que por sua vez utiliza-se da equação da difusão de calor para alcançar os resultados estimados de fluxo de calor e campo de temperatura. Com isso, desenvolveu-se a validação da técnica utilizada para a realização do trabalho, tendo em vista que esta é uma das maiores dificuldades que envolvem a resolução de problemas de condução de calor de maneira inversa. Tal dificuldade se justifica pelo fato da necessidade do conhecimento prévio do fluxo de calor experimental para que se consiga fazer a comparação com os resultados encontrados via simulação numérica. Uma vez que, é praticamente impossível realizar a medição precisa das informações de temperatura na ferramenta de corte devido as condições físicas de contato entre a mesma e a peça que está sendo usinada durante o processo de torneamento. Portanto, utilizou-se do experimento realizado por Carvalho (2005), que realizou um experimento controlado para se obter os valores de fluxo de calor e campo de temperatura através da utilização de uma ferramenta de corte de dimensões específicas, um aquecedor elétrico, um transdutor de fluxo e dois termopares. A partir dos dados experimentais resultantes desse experimento, pode-se realizar a simulação de validação da técnica inversa de transferência de calor Levenberg-Marquardt (LM), através da comparação entre o campo de temperatura e fluxo de calor estimados e aqueles obtidos através do experimento. Com isso, tornou-se possível a utilização dos dados experimentais contidos no trabalho de Santos (2008), para se comparar aos resultados obtidos através da utilização do *software* comercial COMSOL Multiphysics® - que dispôs de uma modelagem 3D da ferramenta de corte realizada no *software* SolidWorks® - a fim de comprovar a eficácia da técnica inversa LM para

a solução do problema térmico tratado neste trabalho. Que por sua vez, pode-se utilizar das informações geradas pelo *software* para determinar os parâmetros mais adequados para garantir um aumento da vida-útil da ferramenta de corte, resultando em benefícios econômicos.

Dessa forma, o objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia numérica a qual utiliza-se de técnicas numéricas inversas em transferência de calor, buscando a determinação do fluxo de calor na interface ferramenta-peça e o campo de temperatura gerado na ferramenta como um todo utilizando o pacote comercial COMSOL Multiphysics® 6.0. Para tanto, será utilizada uma ferramenta de corte de aço-rápido, para se obter a geração de calor e campo de temperatura que ocorre em um processo de usinagem por torneamento de aço livre corte. Com isso, este estudo irá contribuir com a redução do desgaste da ferramenta e por consequência na redução de custos de produção.

Resultados e discussão

Para este trabalho foram utilizados os dados experimentais de Santos (2008) para os valores de rotação de 900 e 28 rpm, a fim de abordar um caso mais extremo e um caso mais brando no quesito geração de calor. Com isso, utilizou-se dos valores de temperatura colhidos experimentalmente com o passar do tempo de usinagem para alimentar o *software* que estimou o campo de temperatura e fluxo de calor gerados na ferramenta de corte.

Notou-se, portanto, que para o caso de 900 rpm foi encontrado valores mais satisfatórios de fluxo de calor, obtendo um desvio percentual reduzido para o período efetivo de corte, como mostra as Figuras 1 e 2.

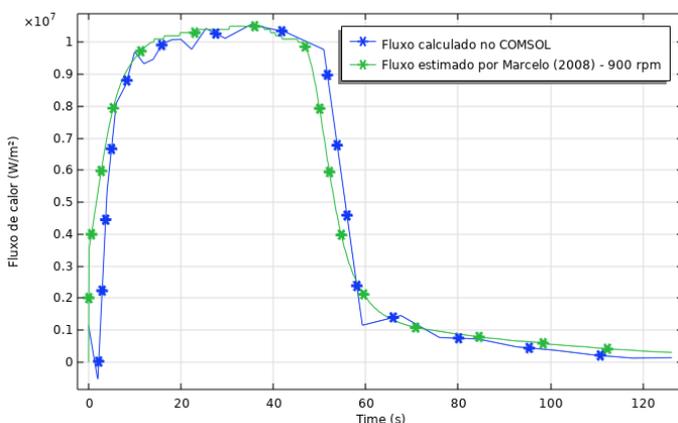


Figura 1 - Comparação entre o fluxo de calor experimental obtido por Santos (2008) e estimado a partir da técnica inversa LM para a rotação de 900 rpm.

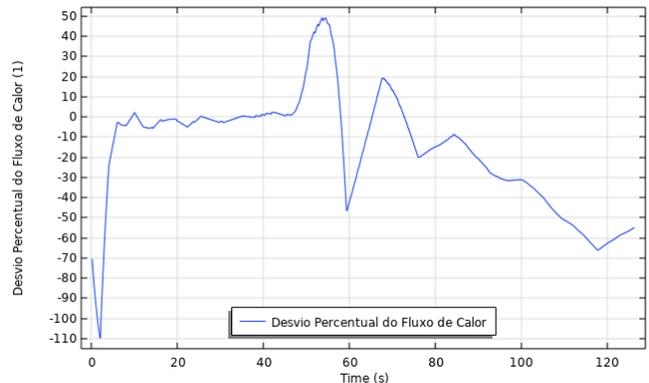


Figura 2 - Desvio percentual entre o fluxo estimado e o experimental.

Além disso, também foi estimado a temperatura resultante do atrito e deformação plástica do cavaco gerado durante o processo de corte, gerando resultados satisfatórios devido à proximidade daqueles obtidos experimentalmente para dois dos três termopares configurados na simulação, como mostra as Figuras 3 e 4.

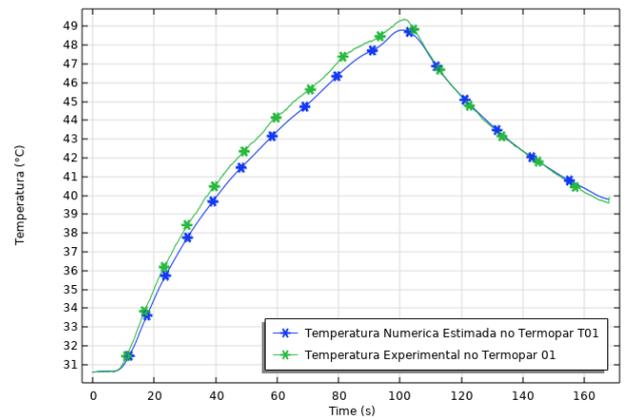


Figura 3 - Comparação das temperaturas numéricas obtidas a partir do fluxo de calor estimado pela técnica LM e as temperaturas experimentais para a rotação de 900 rpm. Termopar 01.

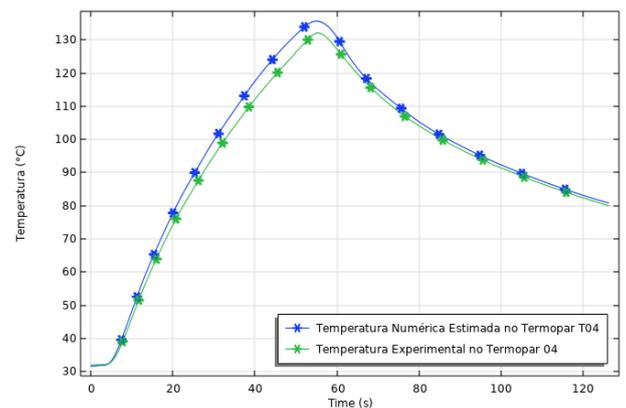


Figura 4 - Comparação das temperaturas numéricas obtidas a partir do fluxo de calor estimado pela técnica LM e as temperaturas experimentais para a rotação de 900 rpm. Termopar 04.

Por fim, foi obtido o campo de temperatura e o desvio percentual das temperaturas estimadas em relação a aquelas obtidas experimentalmente por Santos (2008), a qual resultou em um desvio percentual superior máximo de aproximadamente 1,4% para o caso de rotação de 900 rpm.

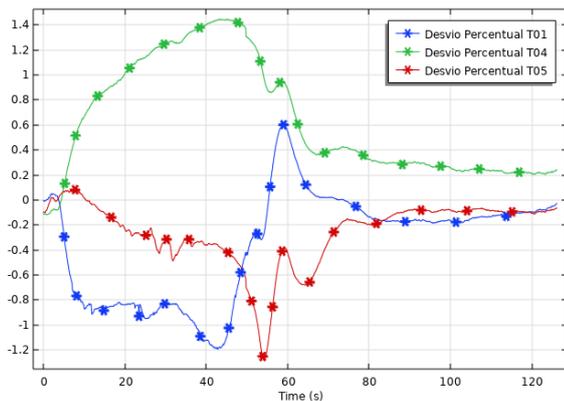


Figura 5 - Desvios percentuais de temperatura gerados em relação aos termopares utilizados no caso de rotação de 900 rpm.

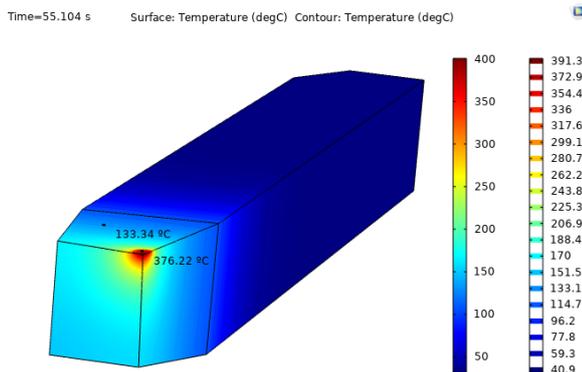


Figura 6 – Campo de temperatura na ferramenta de corte no caso de 900 rpm para $t = 55,104$ s.

Conclusões

No presente trabalho, verificou-se que é abordado temas interdisciplinares que envolvem duas das grandes áreas da engenharia mecânica: os processos de usinagem – em especial o torneamento – e a transferência de calor. Dessa forma, foi desenvolvido um estudo e validação da utilização do pacote comercial COMSOL Multiphysics® com o auxílio da técnica inversa de transferência de calor LM presente no *software* para se

estimar o fluxo de calor gerado e campos de temperatura na ferramenta de aço-rápido durante o processo de usinagem por torneamento, baseado nos dados experimentais obtidos presentes no trabalho desenvolvido por Santos (2008), resolvendo dessa forma o problema da transferência de calor aplicado ao processo de fabricação em questão no presente trabalho.

A partir disso, pode-se obter resultados em relação ao campo de temperatura gerado na peça tridimensional confeccionada no *software* de desenho Dassault Systèmes SolidWorks®, além disso, saber a temperatura na interface ferramenta-peça, o que é totalmente inviável fisicamente devido o contato físico realizado entre as duas peças. Ademais, também foi obtido e analisado o fluxo de calor gerado na interface de contato entre a ferramenta e a peça, a fim de tornar possível uma posterior análise quantitativa da energia térmica advinda do processo de usinagem realizado.

Deste modo, o presente trabalho pode contribuir para com o aprofundamento dos estudos realizados que envolvem os efeitos térmicos desenvolvidos durante o processo de usinagem por torneamento, que além disso, também pode futuramente ser utilizados para outros processos de usinagem em que a temperatura e transferência de calor para a ferramenta utilizada seja um parâmetro crítico. Portanto, verificou-se que, conforme as literaturas que envolvem o assunto abordado neste trabalho, a temperatura resultante na interface de corte aumenta proporcionalmente à intensidade e grau de agressividade dos parâmetros de corte selecionados.

Por fim, destaca-se a importância da obtenção dos parâmetros de campo de temperatura e fluxo de calor gerado na ferramenta de corte para o processo de usinagem por torneamento. Tal importância se dá devido ao fato de tais fatores estarem diretamente ligados e relacionados à eficiência e preservação da vida útil e características de corte da ferramenta utilizada durante este processo. Dessa forma, pode-se, a partir da fácil obtenção dessas informações via utilização do *software* comercial mencionado e utilizado nesse trabalho, realizar os ajustes de parâmetros e condições de corte do processo de usinagem por torneamento. O que faz com que o processo seja mais eficiente e que promova a conservação das características da ferramenta de corte por um período maior de utilização, ampliando dessa forma a sua vida útil. O que por fim, pode trazer grandes benefícios econômicos ao ramo industrial que se utiliza desse processo de usinagem no seu processo de fabricação.

Agradecimentos

Agradeço ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) por financiar

e proporcionar subsídios para a realização desta e das demais pesquisas realizadas no Brasil. Além disso, agradeço a UNIFEI pela oportunidade de realização desta pesquisa.

Referências

- BASTEN, S., Kirsch, B., Merz, R., Kopnarski, M., Hasse, H., & Aurich, J. C. (2020). Adsorption and reaction layers when turning AISI 304 using various cooling strategies. *Procedia CIRP*, 87, 125–130. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.100>
- BRITO, R. F., Carvalho, S. R., & Lima E Silva, S. M. M. (2015). Experimental investigation of thermal aspects in a cutting tool using comsol and inverse problem. *Applied Thermal Engineering*, 86, 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.083>
- CARVALHO, S. R. Determinação do campo de temperatura em ferramentas de corte durante um processo de torneamento, 2005, 123f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- DOURADO DA SILVA, R. G., Ferreira, D. C., Avelar Dutra, F. V., & 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*, 28(August), 101352. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101352>
- FRANCHI, R., Giannuzzi, M., & Papadia, G. (2019). Thermal characterization methodology for dry finishing turning of SAF 2507 stainless steel based on finite element simulations and surrogate models. *Procedia CIRP*, 82, 383–388. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.155>
- GOSTIMIROVIC, M., Sekulic, M., Trifunovic, M., Madic, M., & Rodic, D. (2021). Stability analysis of the inverse heat transfer problem in the optimization of the machining process. *Applied Thermal Engineering*, 195(June), 117174. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117174>
- KANELLOS, P., Karkalos, N. E., & Markopoulos, A. P. (2019). Numerical simulation of machining using a coupled FEM-CFD approach. *Procedia Manufacturing*, 41, 795–802. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.09.072>
- KASHANI, M. M., Movahhedy, M. R., Ahmadian, M. T., & Razavi, R. S. (2016). Analytical Prediction of the Temperature Field in Laser Assisted Machining. *Procedia CIRP*, 46, 575–578. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.071>
- KRYZHANIVSKYY, V., Bushlya, V., Gutnichenko, O., Petrusha, I. A., & Ståhl, J. E. (2015). Modelling and experimental investigation of cutting temperature when rough turning hardened tool steel with PCBN tools. *Procedia CIRP*, 31, 489–495. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.079>
- KSHETRI, R., & Ajay. (2020). Heat flux and heat transfer coefficient model analysis during turning of al (7068) alloy. *Materials Today: Proceedings*, 46, 6757–6769. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.299>
- LI, T., Shi, T., Tang, Z., Liao, G., Han, J., & Duan, J. (2020). Temperature monitoring of the tool-chip interface for PCBN tools using built-in thin-film thermocouples in turning of titanium alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 275(January 2019), 116376. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116376>
- QIAN, N., Wang, X., Fu, Y., Zhao, Z., Xu, J., & Chen, J. (2020). Predicting heat transfer of oscillating heat pipes for machining processes based on extreme gradient boosting algorithm. *Applied Thermal Engineering*, 164(July 2019), 114521. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114521>
- SANTOS, M. R. Desenvolvimento de modelo térmico para a solução de problemas inversos em transferência de calor com aplicação em um processo de usinagem por torneamento de aço de livre corte com ferramenta de aço-rápido. 2008, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, mg.