

Calor gerado e fresamento tangencial: estudos iniciais sobre a abordagem computacional e simulação

Heat generation and side milling: initial studies on the computational approach and simulation

RESUMO

Nicollas Vivaldini
nicollasvivaldini@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil.

Rodrigo Henriques Lopes da Silva
rodrigolopes@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procopio, Paraná, Brasil

O trabalho estuda a modelagem pelo Método de Elementos Finitos (MEF) para a formação de cavacos, possibilitando avaliar a distribuição de temperatura na região de corte, utilizando as mais recentes ferramentas oferecidas pelos *softwares* de simulação por elementos finitos. Na simulação, a ferramenta foi modelada como metal duro e a peça como AISI 4340, utilizando-se da metodologia de Johnson-Cook. Quatro modelos foram simulados para possibilitar o estudo da influência da velocidade de corte e avanço por dente na geração de calor durante o fresamento, com isso possibilitando verificar a precisão do modelo. A comparação é realizada para as velocidades de corte de 100 e 200 m/min e para os avanços por dente de 0,16 e 0,25 mm/dente. Os resultados obtidos mostram que conforme se eleva a velocidade de corte e/ou o avanço, a temperatura de corte também se eleva, convergindo com a literatura, também foi possível verificar como a temperatura se comporta nas três zonas de cisalhamento. Por fim, o modelo apresentou ótimos resultados, uma vez que possibilitou o estudo do comportamento da temperatura na zona de corte, durante o fresamento.

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



PALAVRAS-CHAVE: Temperatura de corte. Usinagem. Elementos Finitos.

ABSTRACT

The present work studies the Finite Element Method (FEM) modeling for chip formation, making it possible to evaluate the temperature distribution in the cutting region, using the most recent tools offered by finite elements software. In the simulation, the cutting tool was modeled as carbide and the workpiece as AISI 4340, using the Johnson-Cook Methodology. Four models were simulated to enable the study of the influence of cutting speed and feed rate on the heat generation during side milling. Thus, it is possible to verify the accuracy of the model. The comparison has been made for 100 and 200 m/min cutting speeds and 0,16 and 0,25 mm/tooth feeds. The results show that as the cutting speed and/or the feed increase, the cutting temperature also rises, which converges to the literature. It was also possible to verify how the temperature behaves in the three shear zones. Finally, the model presented excellent results, and it was possible to study the temperature behavior in the cutting zone during side milling.

KEYWORDS: Cutting temperature. Machining. Finite Elements.

INTRODUÇÃO

Segundo Trent e Wright (2000), o custo de fabricação na usinagem é dependente da taxa de remoção do material, podendo-se reduzir o custo quando se aumenta essa taxa, principalmente com o aumento da velocidade de corte. Entretanto, há um limite para o crescimento da velocidade de corte, pois a vida da ferramenta é extremamente reduzida, de modo semelhante ao que ocorre com o avanço.

Nesse sentido, conforme Ozel (2006), existem pesquisas voltadas ao desenvolvimento de métodos analíticos e numéricos para descrever o processo de usinagem. Entre essas metodologias há a simulação em elementos finitos, cujo intuito é estudar e prever o modo que ocorre a formação de cavaco, a taxa de deformação, as temperaturas e as forças de corte durante a usinagem. Essas previsões são de grande utilidade para indústria, podendo otimizar a geometria da ferramenta e o processo de corte, contribuindo com o aumento da produtividade.

Portanto, o objetivo do trabalho foi estudar o gradiente de temperatura na superfície de corte, com foco na peça, por meio do modelamento térmico de usinagem utilizando elementos finitos para o aço AISI 4340 durante o fresamento tangencial, com simplificação para o corte ortogonal. Podendo comparar o comportamento da temperatura quando se aumenta a velocidade de corte e/ou o avanço.

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico será detalhado como foi modelado o sistema proposto em *software* comercial e os dados de entrada utilizados na obtenção dos resultados que embasaram as conclusões posteriores.

MODELO DE JOHNSON-COOK

Segundo Cervelin (2009), na simulação de corte de metais é importante modelar corretamente o comportamento dos materiais, a fim de obter resultados próximos dos reais.

Nesse contexto, estudou-se o modelo de material de Johnson-Cook, que segundo Coelho et al. (2006) é um dos métodos mais convenientes e um dos que gera excelentes resultados ao descrever o comportamento do material na formação de cavaco. Com isso, o material da peça foi modelado como isotrópico termo-elasto-plástico seguindo a curva de Johnson-Cook para o aço AISI 4340. Como a ferramenta não foi o foco da análise, ela foi modelada como perfeitamente elástica.

A ruptura do material foi modelada seguindo o critério de ruptura de Johnson-Cook, em que o material se rompe quando a deformação plástica equivalente atinge um valor crítico. Segue nos quadros 1 e 2 os parâmetros de Johnson-Cook para o aço AISI 4340.

Quadro 1 – Parâmetros de Johnson-Cook que descrevem o comportamento do material.

A (MPa)	B (MPa)	C	n	m	T _{room} (°C)	T _{melt} (°C)
792	510	0,014	0,26	1,03	30	1520

Fonte: Johnson-Cook (1985).

Quadro 2 – Parâmetros de Johnson-Cook que descrevem a ruptura do material.

D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅
0,05	3,44	-2,12	0,002	0,61

Fonte: Johnson-Cook (1985).

Em que T_{room} é a temperatura ambiente, T_{melt} é a temperatura de fusão. As constantes são: “A” a tensão de cisalhamento equivalente, “B” o módulo de encruamento, “n” o expoente do trabalho a frio, “C” o coeficiente da taxa de deformação, “m” o coeficiente térmico. E D₁, D₂, D₃, D₄ e D₅ são constantes de ruptura do material.

CALOR NO PROCESSO DE USINAGEM

Segundo Knysh e Korkolis (2015), a maior parte do trabalho plástico aplicado é dissipado em calor aos arredores do material deformado. Portanto, com referência em bibliografias estudadas, para o presente trabalho considerou-se que 90% da deformação plástica gerada durante a usinagem será convertida em calor.

O atrito na região de corte possui elevada complexidade, gerando limitações de sua modelagem no *software*. Portanto, modelou-se o atrito de maneira mais simples, mas que gera resultados consideráveis, conforme o trabalho de Hui (2007), que em sua pesquisa utilizou o coeficiente de atrito de $\mu = 0,65$ e obteve bons resultados. Portanto utilizou-se do mesmo coeficiente de atrito do autor.

Por fim, segundo Nascimento (2011), para o corte ortogonal em duas dimensões, a equação 1 é a que governa a transferência de calor:

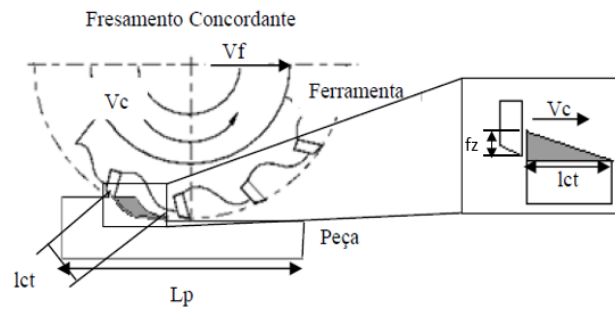
$$\rho C_p \left(v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \dot{Q} = 0 \quad (1)$$

Em que k é condutividade térmica [W/m°C], v_y é a componente da velocidade em y [m/s], v_x é a componente da velocidade em x [m/s], T é a temperatura [°C], ρ é a densidade do material [kg/m³], C_p é o calor específico [J/Kg°C] e $\dot{Q}$ é a geração de calor por unidade de volume [W/m³].

PARÂMETROS DE ENTRADA PARA A SIMULAÇÃO

O modelo de elementos finitos foi realizado conforme o modelo físico real para o fresamento concordante, realizando algumas considerações/simplificações necessárias para que seja possível a implementação do modelo no *software*. Com isso conforme a figura 1 apresenta, o modelo real com as simplificações.

Figura 1 – Simplificação do perfil do material retirado, sendo triangular ou trapezoidal.



Fonte: Nascimento (2011).

Em que V_f é a velocidade de avanço, V_c é a velocidade de corte, f_z é o avanço por dente, l_{ct} é o comprimento do material removido e L_p é o comprimento da peça.

Com as propriedades estruturais do material da peça já apresentadas, conforme o modelo de Johnson-Cook, vê-se necessário apresentar as propriedades físicas do material da peça e da ferramenta, conforme o quadro 3 apresenta.

Quadro 3 – Propriedades físicas dos materiais.

Propriedades Físicas	Metal Duro	AISI 4340
Condutividade Térmica [W/m°C]	20	38
Densidade [kg/m³]	14950	7830
Calor Específico [J/Kg°C]	210	477
Módulo de Young [GPa]	400	200
Coefficiente de Poisson	0,21	0,29
Coefficiente de Expansão Térmica [µm/m°C]	---	0,000032

Fonte: Adaptado de Johnson-Cook (1985).

Por fim o quadro 4 apresenta as combinações dos parâmetros de usinagem utilizados para a simulação, sendo a penetração de trabalho de 0,55 mm que resulta em um comprimento de material removido de 3mm.

Quadro 4 – Parâmetros de corte utilizados na simulação.

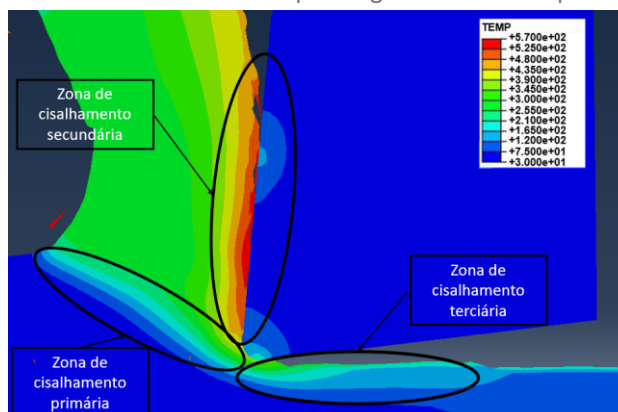
Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/dente)	Peça (AISI)
100	0,16	4340
100	0,25	4340
200	0,16	4340
200	0,25	4340

Fonte: Autoria própria (2020).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a simulação finalizada e os resultados obtidos iniciou-se as análises referentes aos objetivos do trabalho. Portanto, é possível observar na figura 2 as três zonas de cisalhamento durante a usinagem, sendo a primária, secundária e terciária. Com isso, o modelo converge com a teoria ao demonstrar as três principais regiões de geração de calor já cientificamente conhecidas.

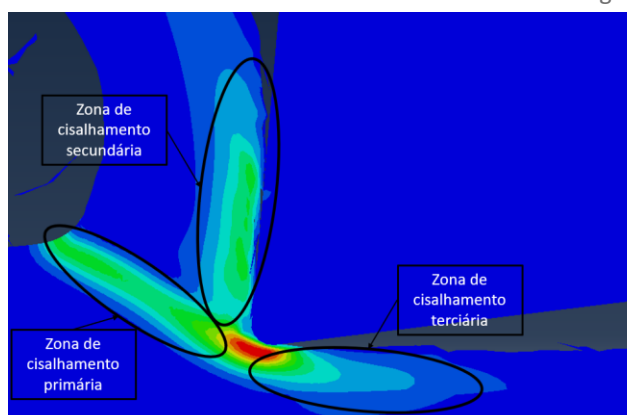
Figura 2 – Zonas de cisalhamento para o gradiente de temperatura.



Fonte: Autoria própria (2020).

Além do gradiente de temperatura, pode-se observar também o gradiente de fluxo líquido de calor, conforme a figura 3 apresenta.

Figura 3 – Zonas de cisalhamento para o gradiente de fluxo de calor líquido, podendo ser verificado também a influência do raio de arredondamento de aresta na geração de calor.



Fonte: Autoria própria (2020).

Após o exame dos resultados nos planos de cisalhamento, por meio das imagens obtidas pelas simulações, e da influência do raio de arredondamento da aresta de corte, analisou-se as respostas referentes às temperaturas geradas nas condições de usinagem propostas. Com isso elaborou-se o quadro 5 com as temperaturas máximas obtidas das simulações para os parâmetros de corte propostos.

Quadro 5 – Temperaturas obtidas para cada parâmetro de corte.

Temperatura máxima (°C)	Velocidade de corte	Avanço
530	100	0,16
570	100	0,25
579	200	0,16
610	200	0,25

Fonte: Autoria própria (2020).

Podendo verificar-se que, conforme a bibliografia sugere, ao aumentar a velocidade de corte e/ou o avanço a temperatura de corte também se eleva.

CONCLUSÕES

Com os resultados finalizados, pode-se concluir que:

- a) A utilização da simulação, por elementos finitos, no processo de corte é um método eficaz para avaliação da temperatura e fluxo de calor na zona de corte, possibilitando o estudo e escolha do uso de parâmetros de usinagem que proporcionem uma maior produtividade, garantindo a qualidade da peça usinada;
- b) Pode-se pontuar como qualidade do método FEM: a economia de material e de tempo em relação aos experimentos, podendo avaliar a distribuição da temperatura nas zonas de cisalhamento. O modelo proposto indica que a temperatura gerada é mais elevada na zona de cisalhamento secundária do que na zona de cisalhamento primária, por elevar-se o calor durante o deslizamento do cavaco;
- c) Com o presente modelo, pode-se afirmar que o avanço e a velocidade de corte possuem papéis importantes, devido a sua influência na geração de calor nas zonas de cisalhamento primária, secundária e terciária;
- d) Foi possível observar as três zonas de cisalhamento indicadas pela teoria e como a temperatura se distribui em cada uma delas. Os resultados também mostram como cavaco se forma na interface cavaco-ferramenta.

REFERÊNCIAS

CERVELIN, J. E. **Estudo teórico-experimental das forças de corte no processo de torneamento**. 2009. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18140/tde-28092009-152513/pt-br.php>. Acesso em: 11 fev. 2020.

COELHO, R. T.; NG, E. -G.; ELBESTAWI, M. A. Tool wear when turning hardened AISI 4340 with coated PCBN tools using finishing cutting conditions. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. v.47, p.263-272, 2006.

HUI, H. H. **Simulação da formação de cavacos usando FEM (Finite Element Method) – Temperatura e força**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18145/tde-11122007-162007/pt-br.php>. Acesso em: 20 Jan. 2020.

JOHNSON G. R.; COOK, W. H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. **Engineering Fracture Mechanics**. v.21, n. 1, p. 31-48, 1985.

KNYSH, P.; KORKOLIS, Y. P. Determination of the fraction of plastic work converted into heat in metals. **Mechanics of Materials**. v. 86, p.71-80, 2015.

NASCIMENTO, C. H. **Estudo da distribuição de temperatura na região de formação de cavacos usando Métodos dos Elementos Finitos**. 2011. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18156/tde-03062011-091310/pt-br.php>. Acesso em: 15 Jan. 2020.

OZEL, T. The influence of friction models on finite element simulations of machining. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. Vol. 46, p. 518-530, 2006.

TRENT, E.M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**. 4ª ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000.