

SIMULAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS DO CORTE ORTOGONAL DO AÇO AISI 4140

P. Faria¹, A. Abrão¹, J. C. Rubio¹, J. Paulo Davim², C. Maranhão², L. R. Silva³,

¹Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, Campus Pampulha, 31.270-901, Belo Horizonte, Minas Gerais, BRASIL.

²Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193, Aveiro, PORTUGAL.

³Departamento de Engenharia Mecânica, CEFET/MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Av. Amazonas, 5253, Nova Suíça, 30.480-000, Belo Horizonte, Minas Gerais, BRASIL.

Resumo: O artigo apresenta uma análise da simulação bidimensional pelo método de elementos finitos do corte ortogonal do aço AISI 4140. A simulação FEM utiliza a modelação Lagrangiana do software AdvantedgeTM. Este software é aplicado para prever forças de corte e avanço, distribuição de temperatura, tensão de von Mises, tensão máxima de cisalhamento, deformação plástica, velocidade de deformação plástica e etc. Simulações de corte com diferentes avanços ao longo do comprimento de corte foram realizadas. Os resultados mostram aumento considerável da força de corte com o aumento do avanço, enquanto que para a força de avanço não se pode dizer o mesmo. A diferença entre as forças de corte e avanço pode estar relacionada com a seção de corte do cavaco, que influencia fortemente a força de corte. A temperatura cresce quase linearmente com o avanço e está diretamente relacionado com a quantidade de energia gasta para cisalhar um volume maior de material. A simulação também mostrou um aumento da tensão máxima na interface peça-cavaco-ferramenta com o aumento do avanço. Por fim mapas com a evolução da deformação plástica para diferentes avanços mostraram que as maiores deformações plásticas se concentram na superfície externa do cavaco, ou seja, na região tracionada do cavaco e na superfície da peça.

Palavras-Chaves: Método dos Elementos Finitos, Corte Ortogonal, Aço ABNT 4140, Forças de Corte, Temperatura de Corte

1. INTRODUÇÃO

O método por elementos finitos aplicado às operações de usinagem auxilia na compreensão do comportamento dos metais sujeitos ao corte oferecendo informações completas sobre a formação do cavaco, ângulo de cisalhamento, espessura do cavaco e sua interação com a ferramenta de corte, distribuição de temperatura na interface da peça-cavaco-ferramenta, forças de corte e avanço, deformação na região de corte e na ponta da ferramenta, que conduzem à avaliação do desgaste da ferramenta segundo Kumbera et al (2001). O modelo do coeficiente de atrito é baseado na lei de Coulomb. Um estudo numérico e experimental foi feito por Kim et al (1999) para o torneamento do aço baixo carbono com o objetivo de simular o desgaste da ferramenta. Grzesik et al (2004) analisaram a variação do gradiente de temperatura usando os métodos de elementos finitos e experimental durante o torneamento do aço AISI 1045 com ferramentas de corte com e sem revestimento. Um estudo sobre a interface ferramenta-cavaco usando ferramenta de metal duro não revestida no torneamento a seco do aço AISI 1045 em alta velocidade foi feito por Iqbal et al (2007). Esta simulação mostrou que o método de elementos finitos depende muito do valor do coeficiente de atrito empregado (μ) para obter valores reais. De acordo com Ozel (2008) e Bil et al (2004) os principais parâmetros que afetam os resultados simulados são o coeficiente de atrito, propriedades dos materiais e geometria da ferramenta. Segundo Abukhshim e Mativenga, citados por Davim e Maranhão (2009), a usinagem de metais é um processo não-linear complexo e a avaliação da deformação e da temperatura não é totalmente compreendido atualmente. O processo de deformação está concentrado numa pequena zona e as temperaturas que são geradas nesta zona afetam grandemente a ferramenta e a peça. As altas temperaturas de corte influenciam fortemente o desgaste e a vida da ferramenta, a integridade da superfície e o mecanismo de formação do cavaco. Um aumento da temperatura na zona primária de deformação amolece o material, promovendo forças de corte menores e menor consumo de energia durante o corte.

Na análise a seguir serão efectuadas diversas simulações numéricas usando modelo Lagrangiano empregando o software AdvantedgeTM, para prever as forças de corte e avanço, evolução da temperatura, cisalhamento máximo e deformação plástica.

2. MÉTODO

Neste estudo, o método de elementos finitos foi utilizado aplicado ao corte ortogonal de precisão do aço ABNT 4140. O processo de corte foi modelado utilizando o *software* comercial *AdvantEdgeTM*. Os parâmetros de entrada para o *software* são mostrados na Tab. (1). Simulações de corte com diferentes avanços foram realizadas para mostrar a influência do avanço sobre as forças de corte e avanço, temperatura de corte, tensão de cisalhamento e deformação plástica.

Tabela 1. Parâmetros de entrada para *software*.

Peça		Simulação	
Comprimento [mm]	2,5	Número máximo de nós	12000
Altura [mm]	2	Tamanho máximo do elemento [mm]	0,1
Material	AISI 4140	Tamanho mínimo do elemento [mm]	0,02
Ferramenta		Processo	
Ângulo de ataque [°]	0	Profundidade de corte [μm]	100
Comprimento da face de ataque [mm]	1	Comprimento de corte [mm]	2,5
Ângulo de saída [°]	7	Velocidade de avanço [$\mu\text{m}/\text{rev.}$]	20; 40; 80
Comprimento da face de saída [mm]	1	Velocidade de corte (m/min.)	100
Raio da aresta [mm]	0,02	Temperatura inicial [°C]	20
Material	metal duro	Coefficiente de atrito	0,5
	(s/ revestimento)	Fluído de corte	não utilizado

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Simulação das forças de corte e avanço e da temperatura de corte

A fig. (1) mostra os gráficos de simulação da evolução das forças de corte e avanço e da temperatura de corte em função do comprimento de corte para os diferentes avanços.

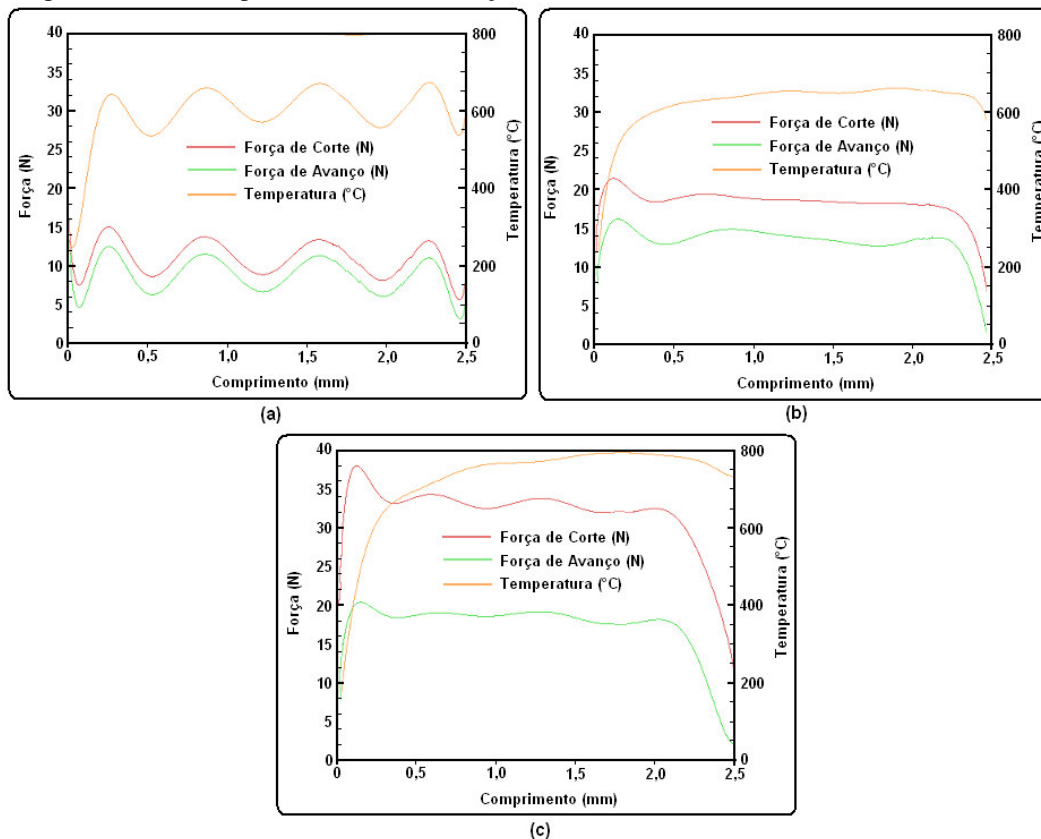


Figura 1. Forças de corte e avanço e da temperatura de corte obtida por simulação numérica em função do avanço ao longo do comprimento de corte com velocidade de corte de 100 m/min e profundidade de corte de 100 μm : a) $f = 20\mu\text{m}/\text{rev.}$ b) $f = 40\mu\text{m}/\text{rev.}$ e c) $f = 80\mu\text{m}/\text{rev.}$

Neste caso, os gráficos mostram um comportamento diferente entre as forças de corte e avanço. O aumento da força de corte é substancial com o aumento do avanço, enquanto que para a força de avanço não se pode dizer o mesmo. A diferença entre as forças de corte e avanço pode esta relacionada com a seção de corte do cavaco, que influencia fortemente a força de corte. A temperatura mostra um valor de 600°C para os avanços de 20 e 40µm/rev. e de 800°C no avanço de 80µm/rev., aumento este que também pode estar relacionado com a maior seção de corte do cavaco. Ozel e Altan (2000) usinaram um aço com 30 HRC dureza com ferramentas de metal duro P20 e empregaram avanços de 0,100 e 0,155 mm/dente e velocidades de corte de 200 e 300 m/min. As forças de corte, tanto nas simulações FEM como nos testes experimentais, apresentaram tendências e valores similares.

3.2 Simulação da temperatura de corte

A Fig. (2) mostra os mapas de simulação da evolução da temperatura de corte para os diferentes avanços no final do comprimento de corte. A temperatura cresce quase linearmente com o avanço. Este crescimento da temperatura está diretamente relacionado com a quantidade de energia gasta para cisalhar um volume maior de material. Empregando volumes finitos e técnicas experimentais, Carvalho et al (2006) mostram o comportamento da temperatura em função da velocidade de corte e do avanço para uma ferramenta de carboneto na usinagem de ferro fundido cinzento. Segundo os autores, quanto maior a velocidade de corte mais elevada é a temperatura na interface cavaco-ferramenta. Este comportamento é devido ao fato de que a alta velocidade de corte aumenta a taxa de deformação na zona primária e secundária de corte.

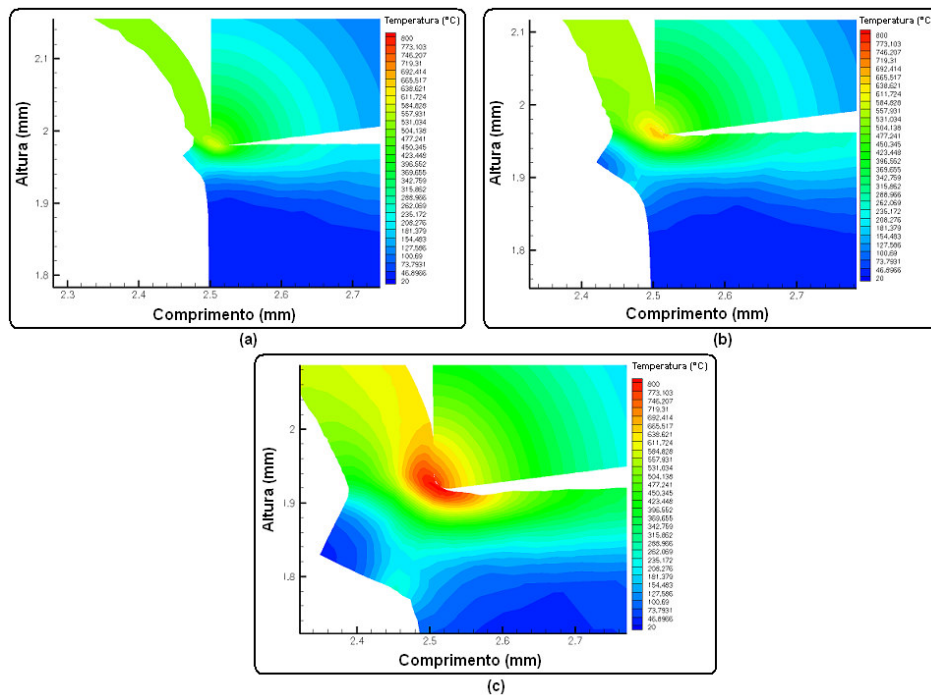


Figura 2. Evolução da temperatura de corte obtida por simulação numérica em função do avanço no final do comprimento de corte com velocidade de corte de 100 m/min e profundidade de corte de 100µm: a) $f = 20\mu\text{m}/\text{rev}$. b) $f = 40\mu\text{m}/\text{rev}$. e c) $f = 80\mu\text{m}/\text{rev}$.

3.3 Simulação da tensão máxima de cisalhamento

A Fig. (3) mostra o mapa de simulação da tensão máxima cisalhamento para os diferentes avanços no final do comprimento de corte. A simulação mostra um aumento da tensão máxima na interface peça-cavaco-ferramenta e o seu crescimento com o aumento do avanço.

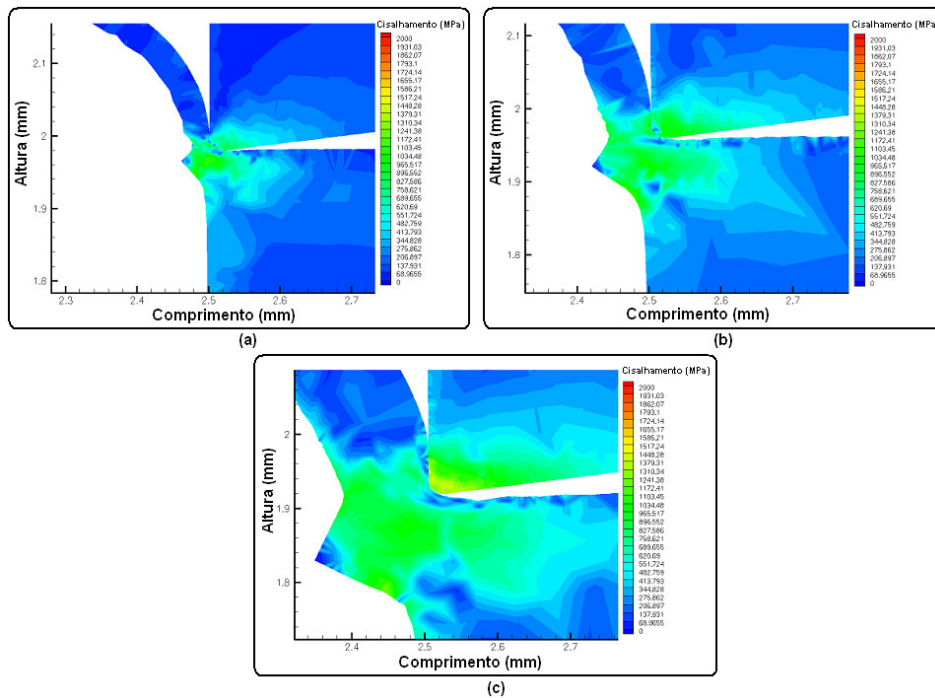


Figura 3. Evolução da tensão máxima de cisalhamento obtida por simulação numérica em função do avanço no final do comprimento de corte com velocidade de corte de 100 m/min e profundidade de corte de 100μm: a) $f = 20\mu\text{m/rev}$. b) $f = 40\mu\text{m/rev}$. e c) $f = 80\mu\text{m/rev}$.

3.4 Simulação da deformação plástica

A Fig. (4) mostra mapas da simulação da evolução da deformação para os diferentes avanços no final do comprimento de corte. Os mapas mostram que as maiores deformações plásticas se concentram na superfície externa do cavaco, ou seja, na região tracionada do cavaco e na superfície da peça. Um trabalho feito por Davim e Maranhão (2009), mostrou que é possível determinar com grande exatidão tanto a deformação plástica como a velocidade de deformação. Para usinagem com velocidade convencional, a deformação plástica apresentou um erro de apenas 2,5% e 1,4% para a velocidade de deformação plástica. Para a usinagem em alta velocidade, os erros também foram muito pequenos (1,6% para deformação plástica e 6,5% para velocidade de deformação).

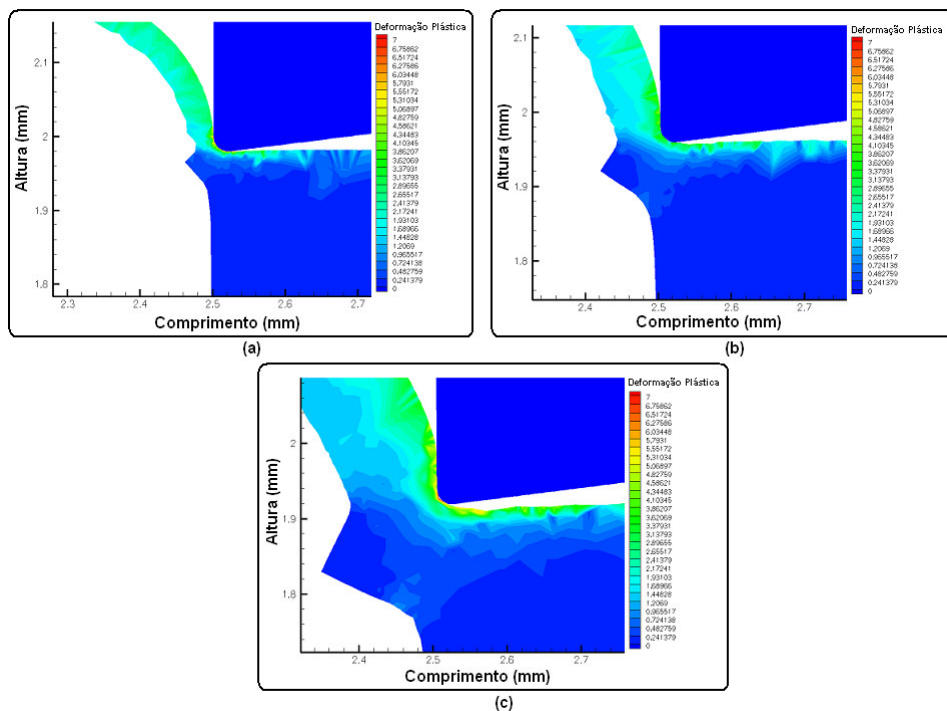


Figura 4. Evolução da deformação plástica obtida por simulação numérica em função do avanço no final do comprimento de corte com velocidade de corte de 100 m/min e profundidade de corte de 100μm: a) $f = 20\mu\text{m/rev}$. b) $f = 40\mu\text{m/rev}$. e c) $f = 80\mu\text{m/rev}$.

Com base nesses resultados conclui-se que a análise por elemento finitos pode ser considerado um bom método para prever tanto deformação plástica e a velocidade de deformação plástica tanto para usinagem convencional como para alta velocidade.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados das simulações as seguintes conclusões podem ser retiradas sobre o corte de precisão do aço AISI 4140 com ferramentas de metal duro:

- As forças de corte e avanço mostram um crescimento com o aumento do avanço sendo que a força de corte apresenta um máximo de 38 N e a a força de avanço um máximo de 20 N para o avanço de 80 μ m/rev.;
- Os mapas de simulação para a temperatura de corte mostraram um aumento da temperatura na interface peça-cavaco-ferramenta com um valor máximo de 800°C igualmente para o maior avanço;
- A tensão máxima de cisalhamento na interface peça-cavaco-ferramenta apresentou um valor máximo de 1241,38 MPa também para o maior avanço;
- A maior deformação plástica é mais evidente no cavaco e na superfície da peça. As maiores deformações se localizam na parte exterior da curvatura do cavaco pois é a região que esta sujeita a tração.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FCT (Fundação para a Ciências e Tecnologia), Portugal, projecto POCTI/EME/61676/2004, sediado no Centro de Tecnologia Mecânica e Automação da Universidade de Aveiro, pela utilização da licença do software Advantedge® para a realização das simulações.

6 REFERÊNCIAS

- Bil, H., Kilic, S.E., Tekkaya, A.E., *A Comparison of Orthogonal Cutting Data from Experiments with Three Different Finite Element Models*, Int. J. Mach. Tools Manufacture, vol. 44, 933 – 944, 2004;
- Carvalho, S.R., Lima e Silva, S.M.M., Machado, A.R., Guimarães, G., *Temperature determination at the chip-tool interface using an inverse thermal model considering the tool and tool holder*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 179, 97 – 104, 2006;
- Davim, J.P., Maranhão, C., *A study of plastic strain and plastic strain rate in machining of steel AISI 1045 using FEM analysis*, Materials and Design, vol. 30, 160–165, 2009;
- Grzesik, W., Bartoszek, M., Nieslony, P., *Finite Difference Analysis of the Thermal Behaviour of Coated Tools in Orthogonal Cutting of Steels*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 44, 1451 – 1462, 2004;
- Iqbal, S.A., Mativenga, P.T., Sheikh, M.A., *Characterization of Machining of AISI 1045 Steel Over a Wide Range of Cutting Speeds. Part I: investigation of contact phenomena*, Journal Engineering Manufacture, vol.221, 909 – 916, 2007;
- Kim, K. W., Lee, W. Y., Sin, H. C., *A Finite-Element Analysis of Machining with the Tool Edge Considered*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 86, 45 – 55, 1999;
- Kumbera, T.G., Cherukuri, H. P., Patten, J.A., Brand, J.A., Marusich, T.D., *Numerical Simulations of Ductile Machining of Silicon Nitride with a Cutting Tool of Defined Geometry*, Machining Science and Technology, 5 (3), 341 – 352, 2001;
- Ozel, T., Altan, T., *Process simulation using finite element method — prediction of cutting forces, tool stresses and temperatures in high speed flat end milling*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 40, 713–738, 2000;
- Ozel, T., *The Influence of Friction Models on Finite Element Simulations of Machining*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, vol. 46, 518 – 530, 2006.

SIMULATING ORTHOGONAL CUTTING OF AISI 4140 STEEL

P. Faria¹, A. Abrão¹, J. C. Rubio¹, J. Paulo Davim², C. Maranhão², Leonardo R. Silva³,

¹Departamento de Engenharia Mecânica, UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, Campus Pampulha, 31.270-901, Belo Horizonte, Minas Gerais, BRASIL.

²Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193, Aveiro, PORTUGAL.

³Departamento de Engenharia Mecânica, CEFET/MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Av. Amazonas, 5253, Nova Suíça, 30.480-000, Belo Horizonte, Minas Gerais, BRASIL.

Abstract: This paper presents a finite element analysis of the orthogonal cutting of AISI 4140 steel using a commercial software and Lagrangian modelling. Cutting and thrust forces, temperature distribution, von Mises stresses, maximum shear strength, plastic strain and plastic strain rate were simulated for different feed rate values. The results indicated that cutting force increases drastically with feed rate, however, the same behaviour is not observed when feed rate is elevated. The temperature at the tool-chip interface increases linearly with feed rate and is closely related to the energy required to shear the work material. In addition to that, the simulation indicated that the maximum shear strength at the tool-chip interface increases with feed rate. Finally, graphs showing the evolution of the plastic strain under distinct feed rates are presented and suggest that higher amounts of plastic strain are observed on the surface of the chip and workpiece.

Keywords: *Ffinite Element Method, Orthogonal Cutting, AISI 4140 Steel, Cutting Force, Temperature Cutting.*