

ESTUDO ANALÍTICO DA INFLUÊNCIA DA CONDIÇÃO DE ATRITO NO CISALHAMENTO EM UM PROCESSO DE TORNEAMENTO.

Marcio Roberto Nenevê

Joel Martins Crichigno Filho

Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC - Rua Paulo Malschitzki, 200 - Zona Industrial Norte, Joinville / SC

CEP: 89.219-710 Instituição e endereço

marcio_neneve@yahoo.com.br joel.crichigno@udesc.br

Resumo. Este trabalho apresenta um estudo analítico em ferramentas de usinagem com contato restrito, que tiveram alguns dos parâmetros geométricos, como: comprimento de contato restrito da ferramenta; ângulo de saída primário da ferramenta; comprimento do quebra cavaco; e altura do quebra cavaco como parâmetros para cálculo da espessura do cavaco indeformado e raio de curvatura do cavaco, considerando um range de valores de pressão hidrostática em um ponto A, a aderência ou tensão de cisalhamento por atrito(τ), ambas em razão do valor da tensão cisalhante máxima do material(k). Os cálculos foram realizados através de um algoritmo de cálculo numérico desenvolvido pelos autores em software específico e os resultados obtidos foram comparados com resultados já existentes de outros autores e obtiveram uma aproximação numérica satisfatória. Os resultados obtidos combinados com resultados experimentais podem ser utilizados para a determinação da tensão de cisalhamento por atrito em um processo de usinagem como o torneamento.

Palavras chave: Ferramentas de contato restrito. Aderência, Linhas de escorregamento

1. INTRODUÇÃO

Modelagem de cargas mecânicas e térmicas durante a usinagem tornou-se cada vez mais importante para a diminuição do custo de investigações experimentais na otimização de ferramentas e de processos em usinagem (DENKENA et al., 2015).

Em decorrência da interação da ferramenta, a peça sofre carregamento fazendo com que parte do material desnecessário seja removido em forma de cavaco. A deformação de material ocorre devido às tensões normais e cisalhantes promovidas pela interação com a ferramenta. Quando a tensão cisalhante em um determinado ponto da peça atinge o limite de escoamento do material, este escoar ao longo de um plano. A teoria desenvolvida inicialmente para estudar o fenômeno de deformação plástica, o fez em um plano considerando o material da peça perfeitamente rígido-plástico. O primeiro modelo apresentado de formação de cavaco foi o de Merchant. O principal problema existente com esse modelo é o fato de que uma partícula de material da peça é acelerado infinitamente, enquanto, na realidade a deformação ocorre em uma zona de tamanho definido. Por isso, modelos com várias linhas ou planos de escorregamento foram desenvolvidos.

Da análise das tensões em um plano de um material carregado pode-se concluir que em qualquer ponto existem duas direções nas quais as tensões cisalhantes são máximas. As tensões normais, no mesmo ponto, são iguais e são também conhecidas como tensão hidrostática. Se um material sofre deformação plástica, o estado de tensões pode ser descrito por uma constante de tensão cisalhante máxima k , sua direção ϕ e pela tensão hidrostático p (tensão normal média) conforme as relações Eq. (1) e Eq. (2):

$$p + 2k\phi = \text{Constante, ao longo da linha alpha} \quad (1)$$

$$p - 2k\phi = \text{Constante, ao longo da linha alpha} \quad (2)$$

Uma linha – normalmente curvada – que tangencia, ao longo de seu comprimento, as máximas tensões de cisalhamento é conhecida como slip-line¹, sendo que o conjunto (rede) completo de todas as linhas de escorregamento curvilíneas e ortogonais existentes em uma região plástica é denominado slip-line field² (CHILDS et al., 2000).

Vários autores desenvolveram campos de sliplines para modelar a usinagem no corte ortogonal: Dewhurst (1978), Shi e Ramalingam (1993), Kudo (1965), Johnson (1962) e Usui e Hoshi (1963). Importante contribuição para a aplicação das sliplines na usinagem foi dada por Kudo (1965) substituindo linhas retas por arcos. O modelo universal de Fang et al. (2001) leva em conta tanto o efeito do curvamento do cavaco quanto do ângulo de retorno do cavaco. Ademais, incorpora seis modelos de slip-lines desenvolvidos anteriormente para usinagem, que são os modelos de Dewhurst (1978), Shi e Ramalingam (1993), Kudo (1965), Johnson (1962) e Usui e Hoshi (1963). Fang et al. (2001b) desenvolveram um modelo universal de slip-lines para usinagem com ferramentas de corte de contato restrito (RC).

A desvantagem da utilização do modelo de slip-line clássico é que este não leva em consideração o encruamento do material da peça, da taxa de deformação e da temperatura durante a usinagem. Para contornar esse problema, Fang e Jawahir (2002) incorporaram o modelo desenvolvido por Oxley (1989), para prever a formação do cavaco. Tal modelo universal estendido para usinagem com ferramentas ranhuradas de contato restrito é ilustrado na Figura 1, onde AC é o plano de cisalhamento ascendente convexo; θ , ψ , η_1 e η_2 são quatro ângulos da slip-line; e F_b e N_b são força de atrito e força normal, respectivamente.

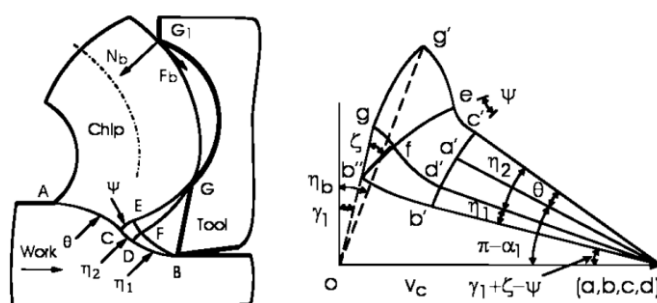


Figura 1 – Representação do modelo universal estendido para usinagem com ferramentas ranhuradas de contato restrito de Fang e Jawahir (2002).

Fonte: Fang e Jawahir (2002).

Para o modelo preditivo analítico desenvolvido por Fang e Jawahir (2002), ressalta-se que a integração permite o uso de uma abordagem analítica para levar plenamente em conta os efeitos do encruamento, da taxa de deformação e temperaturas na usinagem com ferramentas ranhuradas.

Conforme apresentado pelos autores, diversos testes de corte, envolvendo três distintos grupos de cavacos, foram realizados para validar o método, pelo qual obteve-se uma boa correlação entre os resultados previstos e os experimentais. Este modelo pode prever as forças de corte, raio de curvatura, espessura do cavaco e ângulo de retorno do cavaco, juntamente com o ângulo de cisalhamento equivalente, tensão de cisalhamento, taxa de deformação e temperatura no plano de cisalhamento equivalente na face da ferramenta de contato restrito utilizando o Método de Oxley.

Testes caros e demorados de materiais são necessários para descrever o comportamento do material em condições de alta temperatura e alta taxa de deformação durante o corte. Uma abordagem alternativa foi sugerida em trabalhos de pesquisa; análise inversa usando experimentos de corte juntamente com análise FEM ou modelos analíticos. A abordagem mais recente é combinar um modelo analítico com um modelo de material capaz de descrever a tensão de escoamento em termos de deformação, taxa de deformação e temperatura, e usando experimentos de corte para adquirir parâmetros de entrada para análise inversa, a partir dos quais os parâmetros do modelo de material podem ser resolvidos (LAAKSO e NIEMI, 2017).

No artigo proposto foi implementado um algoritmo numérico que calcula a espessura do cavaco e o raio de curvatura do cavaco a partir de parâmetros geométricos da ferramenta de contato restrito para um range de valores de Pressão Hidrostática no ponto A e tensão de cisalhamento por atrito (τ), ambas em razão do valor da tensão cisalhante máxima do material (k). Os resultados obtidos são combinados em um gráfico que a partir de dados experimentais de espessura do cavaco e raio de curvatura é possível obter os valores reais de τ/k e Pa/k . Também a partir de dados experimentais das forças de corte é possível determinar o valor de k , possibilitando assim calcular o valor da tensão de cisalhamento por atrito no processo investigado.

1
linhas de escorregamento.

2
campo de linhas de escorregamento.

Termo em inglês, usualmente empregado na literatura, para referir-se às

Termo em inglês, usualmente empregado na literatura, para referir-se ao

2. METODOLOGIA

Quanto à formulação matemática do modelo, fez-se uso da técnica matricial de resolução de slip-lines aplicada por Dewhurst e Collins (1973). Para tal, a slip-line GE da Figura 1 é tomada como slip-line base e seu raio de curvatura é denotado por um vetor ($\vec{\sigma}$), pelos quais se obtém o que segue.

$$\vec{A} \cdot \vec{\sigma} = \vec{B}(\rho, \omega) \cdot \vec{c} \quad (3)$$

Tal que ρ é a magnitude do salto de velocidade através da slip-line ABCD; ω é a velocidade angular de rotação do cavaco ondulado; $\vec{c}$ é um vetor coluna; e $\vec{A}$ e $\vec{B}$ são expressos por:

$$\vec{A} = \vec{I} - \left(\overrightarrow{P_{\eta 1 \eta 2}} \cdot \overrightarrow{R_{\eta 1}} \cdot \overrightarrow{G_{\zeta}} \cdot \overrightarrow{Q_{\psi \eta 1}} \cdot \overrightarrow{P_{\eta 2}} + \overrightarrow{Q_{\eta 2 \eta 1}} \cdot \overrightarrow{Q_{\psi \eta 2}} \right) \cdot \left(\overrightarrow{P_{\psi \eta 2}} \cdot \overrightarrow{Q_{\eta 1}} \cdot \overrightarrow{G_{\zeta}} \cdot \overrightarrow{P_{\eta 2}} + \overrightarrow{Q_{\eta 2 \psi}} \cdot \overrightarrow{Q_{\eta 1 \eta 2}} \right) \quad (4)$$

$$\vec{B} = \overrightarrow{P_{\eta 1 \eta 2}} \cdot \overrightarrow{R_{\eta 1}} \cdot \overrightarrow{G_{\zeta}} \left(\overrightarrow{P_{\eta 1 \psi}} + \overrightarrow{Q_{\psi \eta 1}} \cdot \overrightarrow{Q_{\eta 2}} \right) + \overrightarrow{Q_{\eta 2 \eta 1}} \cdot \overrightarrow{P_{\eta 2 \psi}} \quad (5)$$

A Figura 2 apresenta a geometria da ferramenta, onde “ γ_1 ” é o ângulo de inclinação primário da ferramenta; “ h ” é o comprimento de contato restrito da ferramenta; “GW” é a largura da ranhura do cavaco; e BH é a altura da parede traseira do quebra-cavaco. A altura BH é igual a 0 para ranhuras padrão, de modo que adquire um valor positivo para ranhuras padrão com parede traseira aumentada ou um valor negativo para ranhuras padrão com parede traseira reduzida. Também são apresentados o raio de curvatura do cavaco (R_u); a espessura do cavaco (h_{ch}); e o ângulo de retorno do cavaco (η_b).

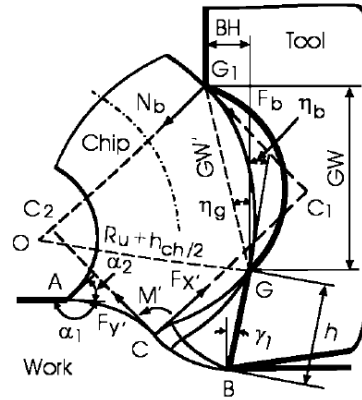


Figura 2 - Geometria da ferramenta e parâmetros relacionados.
Fonte: Fang e Jawahir (2002).

Por meio da análise de forças, momentos e geometria de cavaco e ferramenta, obtém-se o seguinte:

$$f_1 = F'_x - N_b = 0 \quad (6)$$

$$f_2 = F'_y - F_b = 0 \quad (7)$$

$$f_3 = M' + N_b \cdot CC_2 - F_b \cdot CC_1 = 0 \quad (8)$$

$$f_4 = h^2 - (X_{f-gf} - Y_{f-bf})^2 - (X_{f-bf} - Y_{f-gf})^2 = 0 \quad (9)$$

$$f_5 = \left(R_u + \frac{h_{ch}}{2} \right) \cdot \sin(\eta_b - \eta_g) - \frac{GW'}{2} = 0 \quad (10)$$

Onde F'_x , F'_y e M' representam os componentes da força resultante e momento fletor transmitidos através das slip-lines AC, CE e GE no ponto C. Por conveniência de cálculo F'_x e F'_y são tomados de modo que sejam paralelos a N_b e F_b , respectivamente. Por outro lado, $(X_{f-gf}; Y_{f-gf})$ são as coordenadas cartesianas no ponto F da slip-line GF com base no ponto G, e $(X_{f-bf}; Y_{f-bf})$ são as coordenadas cartesianas no ponto F da slip-line BF com base no ponto B. Ademais, N_b e F_b são assumidos de forma a satisfazer a Lei de Coulumb. Finalmente, as variáveis intermediárias η_g e GW' são dadas por:

$$\eta_g = \tan^{-1} \left(\frac{BH + h \cdot \sin \gamma_1}{GW} \right) \quad (11)$$

$$GW' = \sqrt{GW^2 + (h \cdot \sin \gamma_1)^2} \quad (12)$$

Para resolução das equações previamente apresentados do modelo Fang e Jawahir (2002), os autores fizeram uso de um algoritmo de otimização não-linear, de modo que obtiveram a seguinte inequação:

$$\left(\frac{f_1}{k_{AB} \cdot h_c \cdot w} \right)^2 + \left(\frac{f_2}{k_{AB} \cdot h_c \cdot w} \right)^2 \left(\frac{f_3}{k_{AB} \cdot h_c^2 \cdot w} \right)^2 + \left(\frac{f_4}{h_c^2} \right)^2 < 10^{-10} \quad (13)$$

Tal que k_{AB} é a tensão do fluxo de cisalhamento do material no plano de cisalhamento AB; h é a espessura do cavaco não deformada; e w é a largura do corte. Considerando que as forças transmitidas através das *slip-lines* CA, CD e DB são descritas pelos vetores $\vec{F}_{CA}$, $\vec{F}_{CD}$ e $\vec{F}_{DB}$, respectivamente, então, a força resultante $\vec{F}$ pode ser determinada adicionando esses três vetores, tal que:

$$\frac{\vec{F}}{k_{AB} \cdot h_c \cdot w} = \frac{\vec{F}_{CA}}{k_{AB} \cdot h_c \cdot w} + \frac{\vec{F}_{CD}}{k_{AB} \cdot h_c \cdot w} + \frac{\vec{F}_{DB}}{k_{AB} \cdot h_c \cdot w} \quad (14)$$

Outrossim, a espessura do cavaco e o raio de curvatura são dados por:

$$h_{ch} = 2 \left(\frac{V_{g'}}{\omega} - R_u \right) \quad (15)$$

$$R_u = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{V_c}{\omega} \right)^2 + \left(\frac{\rho}{\omega} \right)^2 + 2 \cdot \frac{V_c}{\omega} \cdot \frac{\rho}{\omega} \cdot \cos \alpha_1} + \frac{V_{g'}}{2\omega} \quad (16)$$

De forma que $V_{g'}$ é a velocidade do cavaco no instante em que deixa a ferramenta e α_1 é apresentado na Figura 2.

Finalmente, o modelo de Fang e Jawahir (2002) deve satisfazer quatro condições de restrição de fluxo de tensão e de cavaco, as quais são:

$$\frac{\pi}{2} - 1 - 2\alpha_1 \leq \frac{P_A}{k_{AB}} \leq 2\alpha_1 - \frac{3\pi}{2} + 1 \quad (17)$$

$$2\cos \left(\alpha_2 - \frac{\pi}{4} \right) - 1 \leq \frac{P_A}{k_{AB}} \leq 1 + 2 \left(\alpha_2 - \frac{\pi}{4} \right) \quad (18)$$

$$\gamma_1 + \zeta_1 + \psi \geq 0 \quad (19)$$

$$\eta_b \geq \gamma_1 \quad (20)$$

Onde P_A é a pressão hidrostática no ponto A e α_2 é apresentado na Figura 22. ζ_1 é equivalente a $\frac{1}{2} \cos^{-1}$, onde k_f é a tensão do fluxo de cisalhamento na interface cavaco/ferramenta; e τ é a tensão de cisalhamento por atrito no terreno primário da ferramenta.

O algoritmo implementado calcula espessura do cavaco e raio de curvatura do cavaco em função de valores fornecidos da geometria da ferramenta, pressão hidrostática dependente da tensão cisalhante máxima do material e condição de atrito na tensão de cisalhamento dependente da tensão cisalhante máxima do material.

A técnica matricial de modelagem das *slip-lines* propostas por Dewhurst e Collins (1973) foi implementado em MatLab. O algoritmo de otimização para atingir as restrições da equação 13 foi o Algoritmo Genético. Após o cálculo os resultados foram validados comparando com os resultados obtidos por X. Wang e Jawahir (2003).

3. RESULTADOS

O algoritmo implementado calculou $Ru/t1$ e $t2/t1$ com os parâmetros de $t1/h = 0,9$; $\gamma_1 = 5$, $BH/h = 0$, $GW/h = 5$, $\mu b = 0,2$. As Fig. 3 e Fig.4 mostram os resultados obtidos do algoritmo implementado para $Ru/t1$ e $t2/t1$.

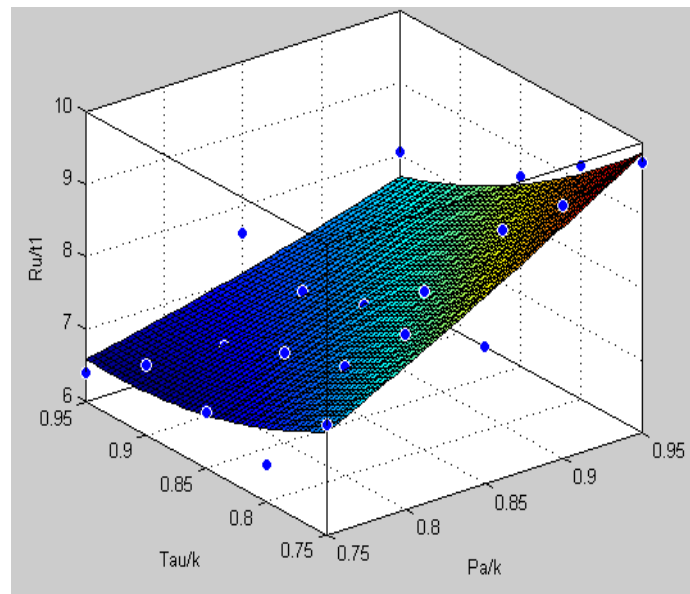


Figura 3 – Resultados de $Ru/t1$ obtidos pelo algoritmo implementado.
Fonte: Primária

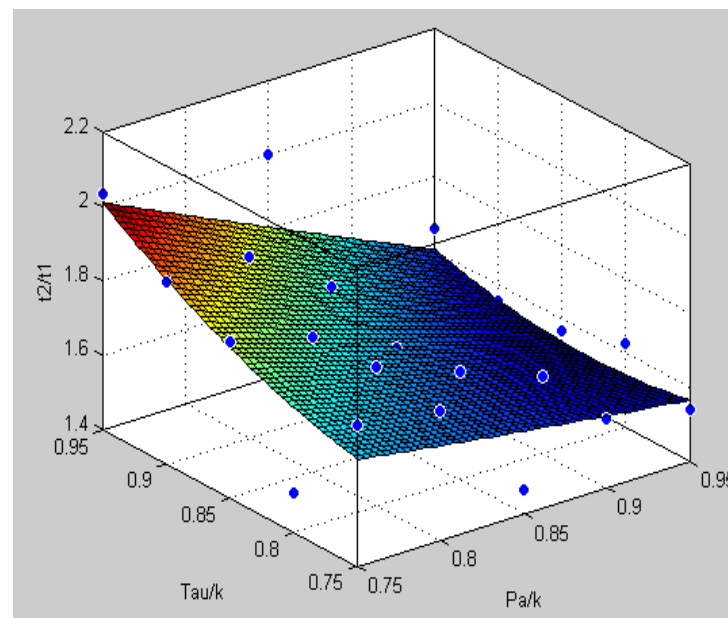


Figura 4 – Resultados de $t2/t1$ obtidos a esquerda pelo algoritmo
Fonte: Primária

Os resultados obtidos com a simulação foram satisfatórios, comparando ponto a ponto os resultados obtidos pelo algoritmo gerado em relação aos resultados obtidos por Wang e Jawahir (2003), tem-se um erro médio de 3% e um erro máximo de 17% em um único ponto.

Com os resultados obtidos pode-se construir através de uma sobreposição dos resultados de cálculo de $t2/t1$ e $Ru/t1$ para o range de parâmetros de $\frac{P_A}{k}$ e $\frac{\tau}{k}$ utilizados chegando a um gráfico, conforme Figura 15, que combinada com dados obtidos experimentalmente é possível determinar os valores experimentais de $\frac{P_A}{k}$ e $\frac{\tau}{k}$.

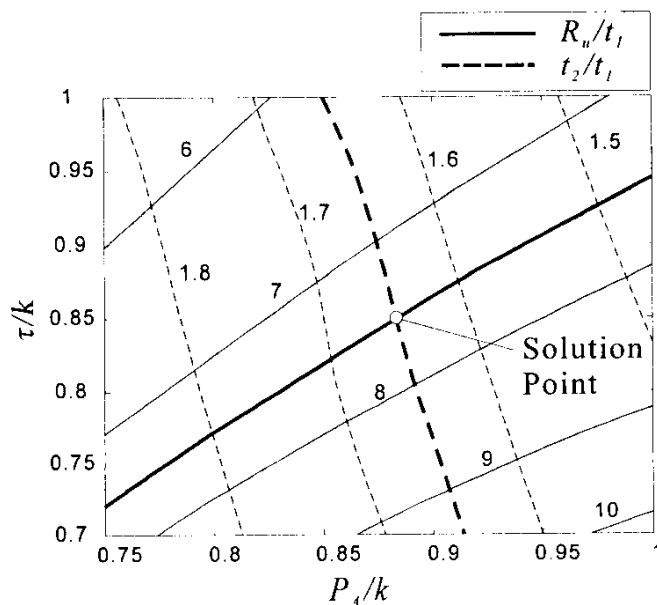


Figura 5 – Nova metodologia para predição do estado de Tensões.
Fonte: Wang e Jawahir (2003).

Obtendo experimentalmente os valores das forças de corte é possível determinar o valor de k , possibilitando assim calcular o valor da tensão de cisalhamento por atrito no processo investigado.

4. CONCLUSÃO

O algoritmo implementado para cálculo da espessura de cavaco e raio de curvatura de cavaco em ferramentas de contato restrito apresentou resultados próximos dos resultados obtidos por outros autores, validando o algoritmo. Com o algoritmo validado é possível aplicar a outros casos de ferramenta de corte com contato restrito conhecendo seus parâmetros geométricos, e a partir de experimentos que possibilitem medir as forças de corte e espessura e raio de curvatura de cavaco calcular a aderência ou tensão de cisalhamento por atrito de forma rápida.

5. REFERÊNCIAS

- CHILDS, T.H.C., MAEKAWA, K., OBIKAWA, T., YAMANE, Y. Metal machining. New York: John Wiley & Sons, 2000. 408p.
- DENKANA, B.; GROVE, T.; DITTRICH, M.A.; NIEDERWESTBERG, D.; LAHRES, M. Inverse Determination of Constitutive Equations and Cutting Force Modelling for Complex Tools Using Oxley's Predictive Machining Theory. Procedia CIRP, Volume 31, 2015, Pages 405-410, ISSN 2212-8271.
- DEWHURST, P.; COLLINS, I.F. A matrix technique for constructing slip-line field solutions to a class of plane strain plasticity problems. International Journal For Numerical Methods In Engineering, Vol. 7, 357-378 (1973).
- FANG, N.; JAWAHIR, I.S.; OXLEY, P.L.B. A universal slip-line model with non-unique solutions for machining with curled chip formation and a restricted contact tool. International Journal of Mechanical Sciences, Volume 43, Issue 2, 2001, Pages 557-580, ISSN 0020-7403.
- FANG, N.; JAWAHIR, I.S. An Analytical Predictive Model and Experimental Validation for Machining with Grooved Tools Incorporating the Effects of Strains, Strain-rates, and Temperatures. CIRP Annals, Volume 51, Issue 1, 2002, Pages 83-86, ISSN 0007-8506.
- WANG, X.; JAWAHIR, I.S. Prediction of Tool-Chip Interface Friction and Chip-Groove Effects in Machining with Restricted Contact Grooved Tools Using the Universal Slip-Line Model, Key Engineering Materials, Vols. 233-236, pp. 469-476, 2003