

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA



21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISE TÉRMICA DE FERRAMENTA DE METAL DURO REVESTIDA USANDO COMSOL

Diego Corrêa Ferreira, diegoc.ferreira@yahoo.com.br¹
Carlos Adriano Corrêa Ribeiro, cadrianocr@yahoo.com.br¹
Rogério Fernandes Brito, rogbrito@unifei.edu.br¹
Sandro Metrevelle Marcondes Lima e Silva, metrevell@unifei.edu.br¹

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

Resumo: Durante um processo de usinagem, a maior parte da energia consumida se transforma em calor na região próxima da superfície de corte da ferramenta. Porém, este calor é responsável por muito dos problemas técnicos e econômicos deste processo. Com o objetivo de aumentar a vida da ferramenta, nos últimos anos as ferramentas de usinagem têm sido revestidas com materiais com características de isolante térmicos que proporcionam um menor desgaste por atrito. Para uma melhor compreensão do desempenho da ferramenta, a determinação da temperatura se torna um fator muito importante. Assim, existe a importância de se desenvolver métodos eficientes e capazes de determinar esta temperatura. Neste trabalho propõe-se simular o fenômeno do aquecimento, em regime transiente, de um conjunto ferramenta e porta-ferramentas, considerando a presença de revestimento e a presença de convecção. São realizadas simulações através do programa comercial COMSOL, que resolve a equação da difusão de calor através do método dos elementos finitos. Resultados satisfatórios para as temperaturas calculadas para a ferramenta de corte revestida de Nitreto de Titânio (TiN) comparados com a sem revestimento (somente o substrato) foram obtidos para algumas espessuras de revestimento.

Palavras-chave: Problemas inversos, Análise térmica, COMSOL, Ferramentas de usinagem, Revestimento.

1. INTRODUÇÃO

Grande parte da energia consumida durante o processo de usinagem é convertida em calor na região próxima da superfície de corte da ferramenta de usinagem. Muitos dos problemas técnicos e econômicos deste processo estão relacionados de forma direta ou indireta à geração de calor. Com um mercado cada vez mais competitivo, maiores velocidades de corte são usadas nos processos de usinagem objetivando o aumento da produtividade. Utilizando maiores velocidades de corte mais calor é gerado durante o processo, prejudicando assim o desempenho da ferramenta de corte (Trent e Wright, 2000).

Para contornar esta situação, nos últimos anos as ferramentas de corte de usinagem têm sido revestidas com materiais que tenham características de isolantes térmicos e que proporcionam um menor desgaste por atrito. A primeira característica faz com que a maior parte do calor gerado durante o processo vá para o cavaco. Já a segunda reduz o desgaste da ferramenta. Juntas elas aumentam a vida da ferramenta de usinagem, o que garante um processo mais produtivo.

A determinação da temperatura de corte durante a usinagem é um dos fatores mais importantes para que se possa compreender o desempenho da ferramenta. Porém, devido ao movimento da peça e da difícil região de acesso e mesmo com condições simples de corte, a determinação da temperatura na interface cavaco-ferramenta não é fácil. Assim, existe a importância de se desenvolver métodos eficientes e capazes de determinar esta temperatura (Trent e Wright, 2000).

O primeiro trabalho documentado relacionado ao estudo da temperatura durante o processo de usinagem de metais foi realizado por Thompson (1798) que examinou a equivalência mecânica do calor durante o processo de furação de uma amostra de latão. Mais tarde Taylor (1907) reconheceu claramente a influência do calor, em seu artigo “A arte de cortar metais”. Seus estudos levaram o desenvolvimento dos aços rápidos. Porém a determinação precisa e quantitativa da temperatura nos processos de usinagem foram realizadas por Shore (1925), Gottwein (1925) e Herbert (1926) quase

na mesma época. Ambos os autores mediram a temperatura no processo através da medição das forças eletromotrizes, isto é, utilizando termopares. Desde então, vários métodos têm sido propostos para a determinação da temperatura. Alguns autores utilizaram métodos analíticos para a solução do problema térmico (Rapier, 1954; Young e Chou 1994), já outros utilizaram métodos experimentais (Boothroyd, 1961; Shaw, 1984; Stephenson, 1991; Carvalho *et al.*, 2006; Mitsuichi *et al.*, 2015).

Os revestimentos para ferramentas de corte surgiram na década de 1960 devido ao avanço no campo dos materiais. Inicialmente as ferramentas eram revestidas pelo processo CVD (*Chemical Vapour Deposition*) e mais tarde passaram a ser revestidas pelo processo PVD (*Physical Vapour Deposition*). Cerca de 80% dos processos de usinagem são realizados utilizando ferramentas revestidas. No trabalho de Ruppi *et al.* (1998) foram estudadas as propriedades dos revestimentos de uma camada de TiC, TiN, TiCN e Al₂O₃. Estas ferramentas foram utilizadas para a usinagem de aços tratados e não tratados termicamente. Grzesik e Nieslony (2003) mostraram que dependendo do tipo de revestimento da ferramenta de metal duro, a área de contato entre a ferramenta e o cavaco e a temperatura média na interface de contato ferramenta-peça são modificadas. Rech *et al.* (2004) chegaram à conclusão que o revestimento não se torna uma barreira térmica em operações de corte contínuas, mas somente em operações de corte interrompido especialmente com altas velocidades de corte. Brito *et al.* (2009) estudaram a influência do revestimento na ferramenta de corte considerando a variação da sua espessura, utilizando ferramenta de substrato de metal duro e diamante e revestimento de TiN e Al₂O₃. Os revestimentos não mostraram resultados satisfatórios durante o processo de corte contínuo. Brito *et al.* (2015) continuando os trabalhos de Carvalho *et al.* (2006) e Brito *et al.* (2009), propuseram uma geometria mais complexa para representar o modelo numérico do problema de usinagem. Para isto os autores utilizaram uma técnica inversa não linear de condução de calor juntamente com o software comercial COMSOL[®].

2. DESENVOLVIMENTO TEÓRICO

2.1. Descrição do Conjunto

O modelo térmico numérico trata-se de uma ferramenta de corte de torneamento e de um porta-ferramenta. Inicialmente considera-se no modelo somente a ferramenta de corte e o porta-ferramenta. Num segundo momento considera-se também a presença do revestimento, que está na superfície de contato entre a ferramenta de corte e a peça-obra. A partir destes dois modelos numéricos são feitas simulações para comparar o efeito do revestimento sobre o gradiente térmico que é formado sobre a ferramenta durante a operação de corte. A geometria da ferramenta e do porta-ferramenta tem como referência o trabalho de Carvalho *et al.* (2006). Nas Figuras 1a e a 1b são mostradas as principais dimensões da ferramenta de corte e do porta-ferramentas respectivamente.

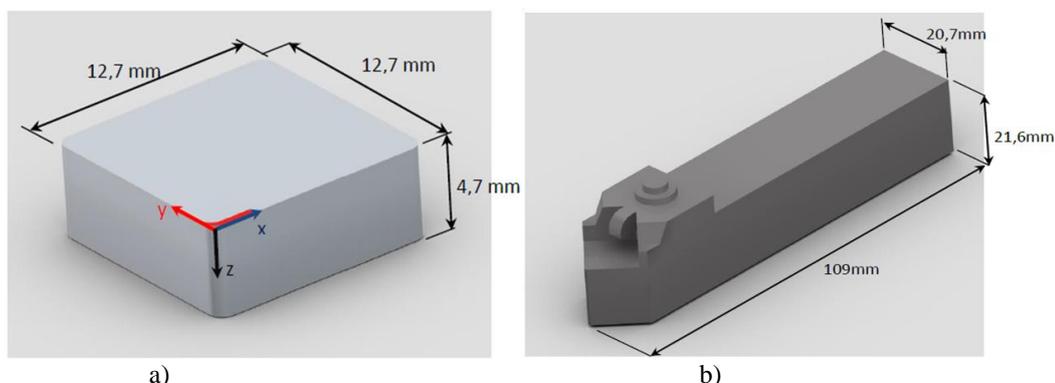


Figura 1. a) Dimensões da ferramenta de corte e b) dimensões do porta-ferramentas.

O conjunto completo com a ferramenta revestida pode ser visualizado através da Fig. 2a enquanto o revestimento na face superior é mostrado na Fig. 2b. Ambos os conjuntos estão submetidos às condições de contorno de fluxo de calor prescrito e convecção. Para maior clareza, a ferramenta sem revestimento foi dividida em diversos domínios conforme Fig. 3.



Figura 2. a) Montagem do conjunto ferramenta e porta-ferramentas e b) detalhe do revestimento.

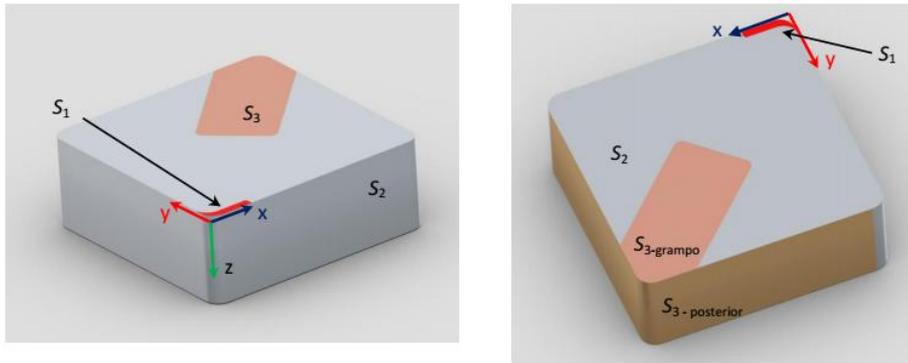


Figura 3. Domínios da ferramenta de corte: a) interface de contato com a peça e convecção e b) interface de contato com o porta-ferramentas.

A região S_1 destacada na cor vermelha é a interface de contato entre a ferramenta e a peça, onde o fluxo de calor é aplicado durante o processo de corte. A região denominada S_2 compreende todas as superfícies da ferramenta de corte onde há presença de convecção, pois esta está em contato com o ar. A superfície S_3 é a interface de contato entre a ferramenta de corte e o porta-ferramentas. Os domínios presentes na ferramenta de corte revestida são os mesmos da ferramenta de corte não revestida, exceto pelo domínio S_4 que é a região onde está presente o revestimento. O domínio S_1 é modelado segundo medição experimental com uso de um analisador de imagens, apresentado no trabalho de Carvalho *et al.* (2006). A superfície S_1 apresenta uma área de $1,427 \text{ mm}^2$.

O porta-ferramentas também é dividido em domínios, pois ele recebe parte da energia gerada durante o processo de usinagem. Os domínios do porta-ferramentas podem ser visualizados na Fig. 4. O domínio S_5 representa a superfície de contato com a ferramenta de corte. As demais superfícies do porta-ferramentas compreendem o domínio S_6 , sujeitas à condição de contorno de convecção natural. Por melhor que seja o acabamento das superfícies da ferramenta e do porta-ferramentas, existe uma resistência térmica de contato entre estas superfícies. Esta resistência existe devido à rugosidade presente que leva a formação de interstícios de ar e dificulta a propagação do calor da ferramenta para o porta-ferramentas. Assim neste trabalho, é considerado uma rugosidade de $10 \mu\text{m}$ e uma resistência térmica média de $0,0263 \text{ m}^2\text{W/K}$ nas superfícies de contato. Tais valores foram utilizados no trabalho de Brito *et al.* (2015).

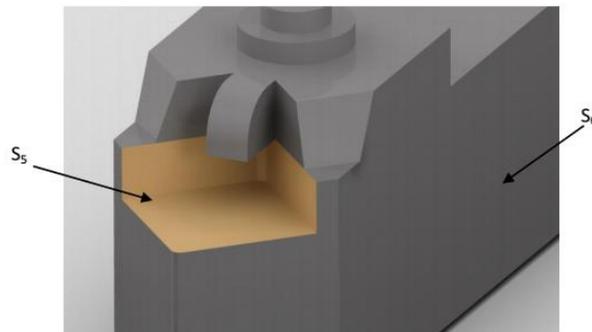


Figura 4. Interface de contato no porta-ferramentas.

As propriedades termofísicas adotadas para o substrato foram obtidas de Tungsten Carbide (WC) With Co Binder Alloys TC K20 (<http://www.rgpballs.com/>) e para o porta-ferramentas, foram obtidas no trabalho de Brito *et al.* (2009) (Tab. 1). As propriedades termofísicas dos materiais usados para o revestimento são apresentadas na Tab. 2, e foram retiradas dos trabalhos de Brito *et al.* (2009) e Grzesik *et al.* (2009). Todas estas propriedades foram consideradas constantes em relação à temperatura. Ainda são adotadas algumas hipóteses simplificadoras como ausência de radiação, contato térmico perfeito entre o revestimento e o substrato, temperatura ambiente constante e ausência de geração interna de calor no revestimento, substrato e no porta-ferramentas.

Tabela. 1 Propriedades termofísicas para o substrato e porta-ferramenta.

<https://www.rgpballs.com>

Elemento	Condutividade k [W/mK]	Massa específica ρ [kg/m ³]	Calor específico c_p [J/KgK]
substrato	87	14950	225
porta-ferramenta	49,80	7850	486,13

Tabela. 2 Propriedades termofísicas dos materiais do revestimento.

Revestimento	Condutividade k [W/mK]	Massa específica ρ [kg/m ³]	Calor específico c_p [J/KgK]
TiN	21	4650	645
Al ₂ O ₃	28	3780	1079

O problema térmico apresentado é tratado como um problema direto, tendo todas suas condições de contorno e condições iniciais já conhecidas. O fluxo de calor, o coeficiente de convecção e a temperatura inicial são obtidos do trabalho de Brito *et al.* (2015). Os equacionamentos de ambos os conjuntos são apresentados a seguir.

2.2. Modelo Térmico

O modelo térmico que rege o problema é descrito pela equação da difusão de calor tridimensional em regime transiente:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, y, z, t) + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}(x, y, z, t) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}(x, y, z, t) = \frac{1}{\alpha_j} \frac{\partial T}{\partial t}(x, y, z, t) \quad (1)$$

Com as seguintes condições de contorno:

$$-k_j \frac{\partial T}{\partial z}(x, y, 0, t) = q_0'' \text{ em } S_1 \quad (2)$$

$$-k_j \frac{\partial T}{\partial z}(x, y, z, t) = h(T - T_\infty) \text{ em } S_2, S_4 \text{ e } S_6 \quad (3)$$

e no contato entre a ferramenta de corte e o porta-ferramentas, S_3 e S_5 , onde há a presença de resistência térmica de contato. O COMSOL[®] possui um modelo próprio para equacionar a resistência térmica de contato que é apresentado nas Eqs. (4) a (7).

$$k_1 \left(\frac{dT_1}{dx}(x, y, z) + \frac{dT_1}{dy}(x, y, z) + \frac{dT_1}{dz}(x, y, z) \right) = -h_{rt}(T_2 - T_1) \quad (4)$$

e

$$k_2 \left(\frac{dT_2}{dx}(x, y, z) + \frac{dT_2}{dy}(x, y, z) + \frac{dT_2}{dz}(x, y, z) \right) = -h_{rt}(T_1 - T_2) \quad (5)$$

Sendo

$$h_{rt} = h_g + h_c \quad (6)$$

O termo h_g trata-se do coeficiente de convecção do fluido presente nos interstícios da face de contato. Neste trabalho, o valor de h_g adotado foi 0,0236 W/m²K (Carvalho *et al.* 2006). O termo h_c na Eq. 6 é calculado através da Eq. 7

$$h_c = 1,25k_c \cdot \frac{m_{asp}}{\sigma_{asp}} \left(\frac{P}{H_c} \right)^{0,95} \quad (7)$$

As propriedades físicas das superfícies de contato são definidas através da rugosidade superficial média, m_{asp} , e rugosidade máxima σ_{asp} . Características de montagem como pressão de contato P e microdureza H_c também são consideradas no cálculo de h_c . Os valores adotados para estas grandezas são apresentado na Tab. 3. A condição inicial do modelo é dada por:

$$T(x, y, z, t) = T_0 \text{ em } t = 0 \quad (8)$$

sendo α a difusividade térmica, k a condutividade térmica, h o coeficiente de convecção, T a temperatura calculada, T_∞ a temperatura ambiente e q_0 o fluxo de calor. O índice j indica o domínio da ferramenta ($j = 1$), do porta-ferramentas ($j = 2$) e do revestimento ($j = 3$).

Tabela 3. Parâmetros da resistência térmica de contato.

h_c [W/m ² K]	σ_{asp} [μm]	P [kPa]
0,0263	10	300

2.3. Solução Numérica

A equação da difusão apresentada na Seção 2.2 é resolvida utilizando o software comercial *COMSOL Multiphysics* 5.0[®]. O software divide o domínio geométrico em partes menores e aplica a estas partes menores as equações que regem o problema. Devido à complexidade da geometria da ferramenta de corte e do porta-ferramentas, utilizou-se um outro programa de CAD para a edição da geometria e posteriormente esta geometria foi exportada para o COMSOL[®].

O fluxo de calor na interface cavaco-ferramenta foi estimado usando a técnica de problemas inversos da Função Especificada por Brito *et al.* (2015) cujas condições de usinagem empregadas foram 135,47 m/min para a velocidade de corte, 0,138 mm/rotação de avanço e 5 mm para a profundidade de corte. O coeficiente médio de transferência de calor por convecção adotado foi de 20 W/m²K, enquanto que a temperatura inicial utilizada foi de 29°C.

3. VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA

A validação da metodologia deste trabalho é feita comparando o resultado de uma ferramenta não revestida com os resultados obtidos nos trabalhos de Carvalho *et al.* (2006) e Brito *et al.* (2015). O fluxo de calor utilizado para a validação apresentado na Fig. 5 foi o fluxo de calor estimado por Carvalho (2005).

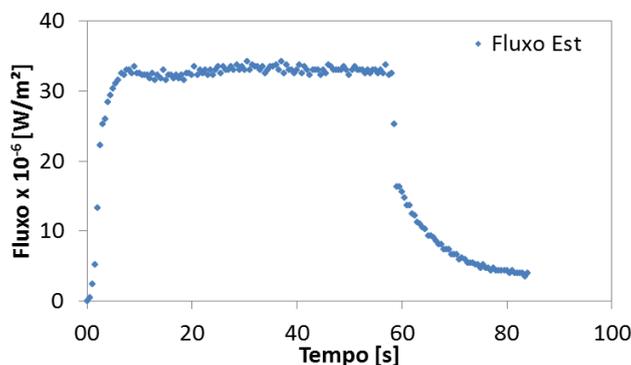


Figura 5. Fluxo de calor adotado na validação.

A temperatura usada na validação foi obtida através da sonda numérica inserida no modelo nas coordenadas $x = 0$, $y = 3,95$ e $z = -2,12$, posição equivalente a temperatura obtida nos trabalhos de referência. Na Figura 6a compara-se a temperatura numérica obtida neste trabalho com a temperatura experimental obtida por Carvalho *et al.* (2006). Na Figura 6b mostra-se o resíduo entre a temperatura experimental e a temperatura calculada neste trabalho. O resíduo é calculado dividindo-se a diferença da temperatura experimental e numérica deste trabalho, pela temperatura estimada por Carvalho *et al.* (2006) para o termopar posicionado nas coordenadas anteriormente mencionadas.

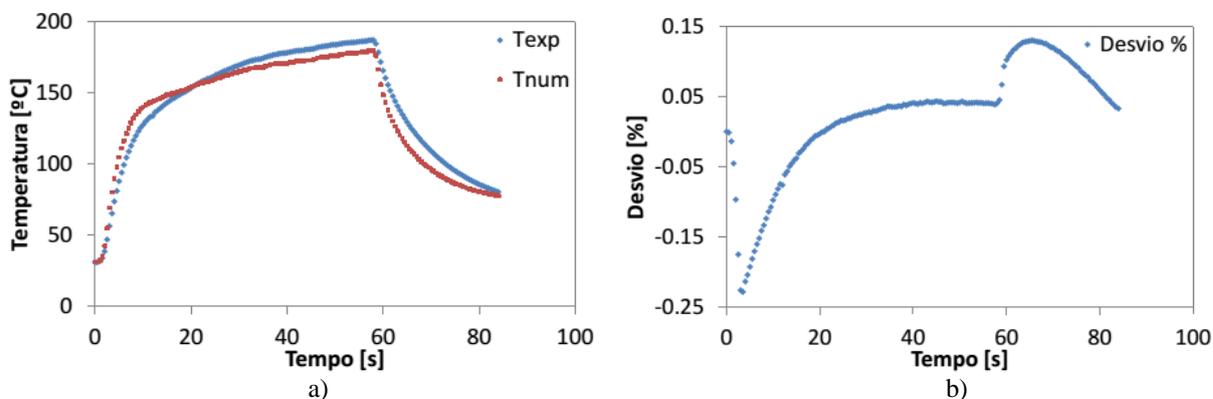


Figura 6. a) Comparação entre as temperaturas experimental e numérica para validação da metodologia e b) desvio de temperatura entre os trabalhos de Carvalho *et al.* (2006) e Brito *et al.* (2015).

O valor do resíduo obtido entre as temperaturas, Fig. 6b, apresentou um desvio médio de 0,023%. Esta divergência está atribuída a fatores como diferentes propriedades térmicas, geometria da ferramenta de corte e área de contato entre

a ferramenta e a peça. As propriedades térmicas da ferramenta e do porta-ferramentas variam de fabricante para fabricante. A geometria usada no trabalho de Carvalho *et al.* (2006) é idealizada. Já a geometria usada neste trabalho se aproxima mais da geometria real por levar em conta as singularidades geométricas. Carvalho *et al.* (2006) usou uma malha cartesiana, devido as limitações computacionais. Neste trabalho utilizou-se uma malha tetraédrica não estruturada, que se adapta melhor às geometrias mais complexas. Outro ponto a ser considerado é que a área de contato cavaco-ferramenta no trabalho de referência é de $1,56 \text{ mm}^2$, enquanto o modelo deste trabalho possui uma área de $1,42 \text{ mm}^2$.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foram realizadas simulações do modelo da ferramenta de corte sem revestimento e posteriormente do modelo da ferramenta de corte revestida. Os revestimentos adotados nas simulações foram o Nitreto de Titânio (TiN) e o Óxido de Alumínio (Al_2O_3). Inicialmente considerou-se uma espessura de $10 \text{ }\mu\text{m}$ para o revestimento. As propriedades termofísicas adotadas para o porta-ferramenta, substrato e ambos os revestimentos são descritas no item 2.1. Para o cálculo numérico da temperatura foi usado o fluxo de calor estimado a partir de dados experimentais de temperatura em processo de torneamento, do trabalho de Brito *et al.* (2015). Apresenta-se na Fig. 7 o perfil do fluxo de calor usado na simulação do aquecimento da ferramenta de corte. Este fluxo de calor tem duração de 84 s, com intervalo de tempo de 0,5 s. Nos primeiros 5 segundos a intensidade do fluxo de calor aumenta bruscamente. De 5 segundos até 55 segundos, o fluxo de calor permanece estável com ordem de $37,7 \times 10^6 \text{ W/m}^2$. A partir deste ponto, o fluxo de calor vai perdendo intensidade até o instante final, uma vez que a usinagem foi interrompida.

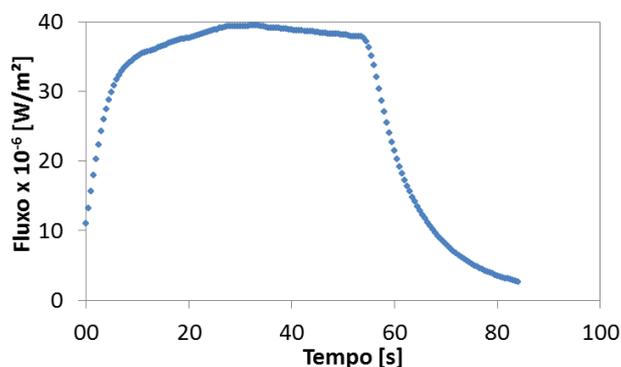


Figura 7. Fluxo de calor adotado nas simulações.

Para avaliar a temperatura no substrato, foram inseridas sondas numéricas nas posições mostradas na Tab. 4. Foram inseridas ao todo 11 sondas numéricas na ferramenta sem revestimento e 12 sondas na ferramenta revestida. Estas sondas numéricas foram inseridas para acompanhar a evolução da temperatura no substrato e comparar com a propagação de calor na ferramenta sem revestimento com a propagação de calor nas ferramentas revestidas e assim, verificar o efeito do revestimento sobre o substrato.

Tabela 4. Coordenadas xyz das sondas numéricas (mm).

Sonda	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
x	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
y	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
z-sem revestimento	-	0	-0,47	-0,94	-1,41	-1,88	-2,35	-2,82	-3,29	-3,76	-4,23	-4,70
z-com revestimento	0	-0,05	-0,52	-0,99	-1,46	-1,93	-2,40	-2,87	-3,34	-3,81	-4,28	-4,75

Para a ferramenta não revestida, a máxima temperatura obtida foi de $1035,5 \text{ }^\circ\text{C}$ no instante $t = 54 \text{ s}$, mensurada pela sonda 1. Na Figura 8 mostra-se o aspecto do campo de temperatura para este instante. Neste mesmo instante de tempo, a ferramenta revestida com TiN chegou a atingir a temperatura de $898,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ao passo que, a ferramenta revestida com Al_2O_3 atingiu a temperatura máxima de $871,8 \text{ }^\circ\text{C}$.

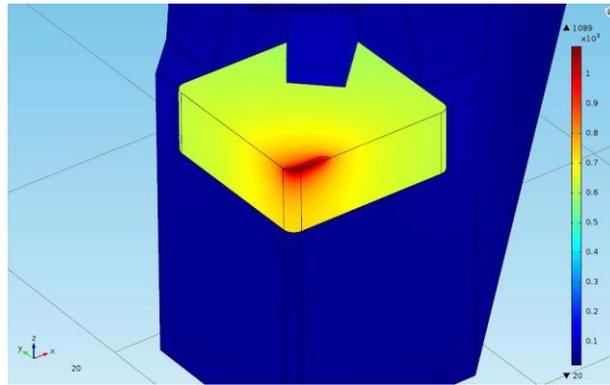


Figura 8. Campo de temperaturas para o instante $t = 54$ s para a ferramenta não revestida.

Nas Figuras 9a e 9b são mostrados os campos de temperatura para as ferramentas revestidas com TiN e Al_2O_3 respectivamente, no instante de $t = 54$ s. Nota-se uma diferença na escala de temperatura destas figuras. Enquanto a ferramenta não revestida apresenta uma temperatura acima de 1000 °C no instante $t = 54$ s, a ferramenta revestida com TiN apresenta uma temperatura abaixo de 900 °C e o revestimento de Al_2O_3 , uma temperatura ainda menor, $871,8$ °C.

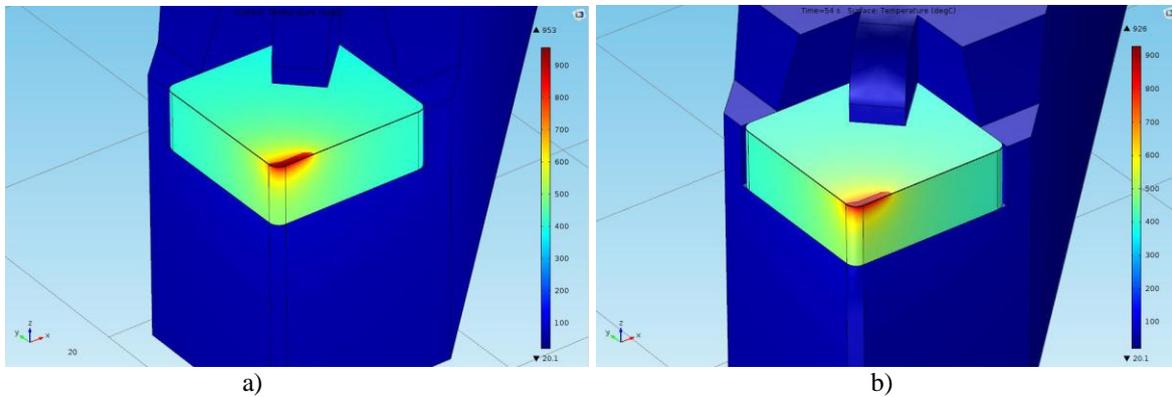


Figura 9. Campo de temperaturas para os revestimentos no instante $t = 54$ s: a) TiN e b) Al_2O_3 .

As temperaturas mensuradas pelas sondas numéricas distribuídas ao longo da direção z no instante de tempo $t = 54$ s, são apresentadas na Fig. 10a. Nota-se que a ferramenta não revestida (pontos em azul) apresenta uma distribuição de temperaturas maior ao longo da direção z enquanto que as ferramentas revestidas apresentam temperaturas inferiores ao longo da direção z . Observando atentamente a distribuição de temperatura das ferramentas revestidas, nota-se também que, os valores das temperaturas na interface de contato ($z = 0$), para ambos os revestimentos, são inferiores a temperatura da ferramenta não revestida.

O efeito do revestimento sobre as temperaturas calculadas para as sondas posicionadas ao longo do substrato é apresentado na Fig. 10b. Tomando a ferramenta não revestida como referência, o revestimento proporcionou uma redução na temperatura do substrato entre 220 °C e 230 °C, tanto para o revestimento de TiN quanto o revestimento de Al_2O_3 .

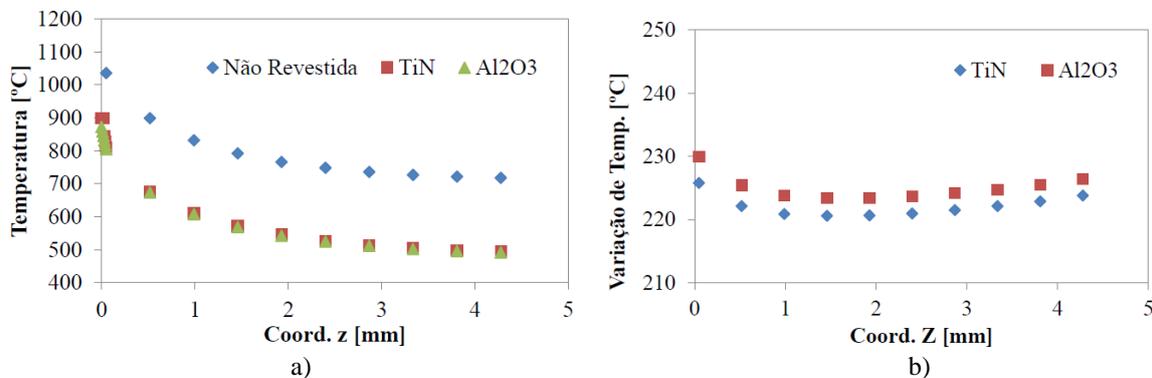


Figura 10. a) Distribuição de temperatura ao longo da coordenada z , no instante $t = 54$ s e b) diferença de temperatura no substrato ao longo da direção z .

Os resultados apresentados na Fig. 10 mostram que existe um efeito do revestimento sobre a distribuição de temperatura no substrato da ferramenta. No entanto, o revestimento deveria isolar o calor fazendo com que a temperatura na superfície da ferramenta com o revestimento fosse maior que a máxima temperatura da ferramenta não revestida. Dessa forma, a temperatura sofreria uma forte redução ao longo do revestimento, fazendo com que as temperaturas ao longo do substrato fossem inferiores as respectivas temperaturas na ferramenta não revestida. Os resultados preliminares não apresentaram essa inversão. Este efeito inesperado é atribuído à malha que ainda não foi refinada o suficiente na região do revestimento. O revestimento possui dimensões muito pequenas quando comparada às demais dimensões envolvidas no problema, exigindo assim um maior refinamento da malha na sua região.

Devido à dificuldade encontrada em refinar mais a malha no revestimento, foram feitos testes onde se variou a espessura do revestimento para valores maiores. Nestes testes, aumentou-se a espessura do revestimento e foi reduzida a espessura do substrato de modo que a espessura total do conjunto revestimento e substrato mantivesse o valor constante de 4,7 mm. Foram inseridas diversas sondas numéricas ao longo da direção z a fim de acompanhar a evolução da temperatura. Nesta etapa, foi empregado somente o revestimento de TiN. Apresenta-se na Tab. 5 as dimensões adotadas para o revestimento em cada teste.

Tabela 5. Dimensões do revestimento e do substrato adotados nos testes de espessura.

Teste	Espessura revestimento [mm]	Espessura substrato [mm]	Total [mm]	Temperatura máxima [°C]
1	0	4,7	4,7	1035,5
2	2,35	2,35	4,7	1895,6
3	1,0	3,7	4,7	1628,1
4	0,5	4,2	4,7	1393,3
5	0,2	4,5	4,7	1114,9

Os resultados obtidos nestes testes são comparados ao resultado da ferramenta não revestida. Os resultados são apresentados na Fig. 11 e Fig. 12. Nota-se que a ferramenta não revestida apresenta uma temperatura, na interface de contato cavaco-ferramenta, de 1035,5 °C, sendo inferior as respectivas temperaturas dos modelos revestidos. Entretanto, nas ferramentas revestidas, a distribuição de temperaturas no substrato encontra-se em patamares inferiores, havendo dessa forma, a inversão das curvas. Nessas condições, o revestimento cumpre seu papel de isolar o calor, protegendo o substrato da ferramenta, assim, a temperatura na interface de contato atinge valores elevados. Quanto maior a espessura do revestimento (Fig. 11a e Fig. 11b), uma maior parcela da energia é retida pelo revestimento fazendo com que o substrato sofra um menor aquecimento. A medida que a espessura do revestimento vai se aproximando de valores próximos à realidade (Fig. 12a e Fig. 12b) a temperatura máxima tende a valores coerentes com a realidade e ainda apresenta a inversão das temperaturas apresentando inclusive uma queda maior da temperatura no substrato.

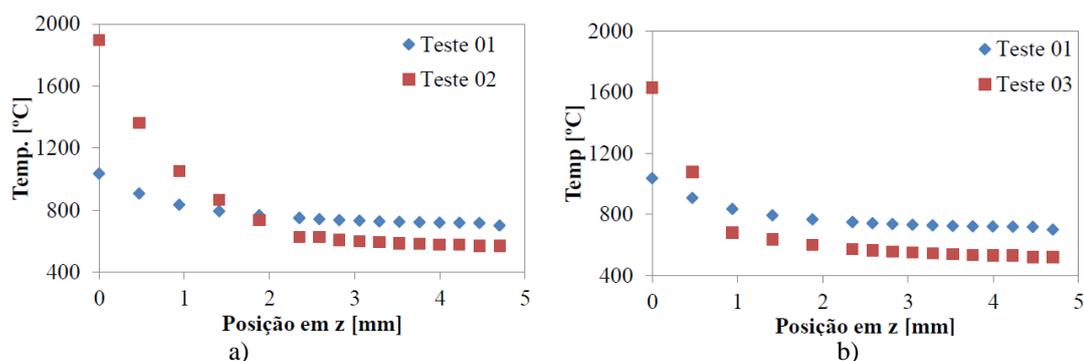


Figura 11. Comparativo entre as temperaturas: a) teste 01 x teste 02 e b) teste 01 x teste 03.

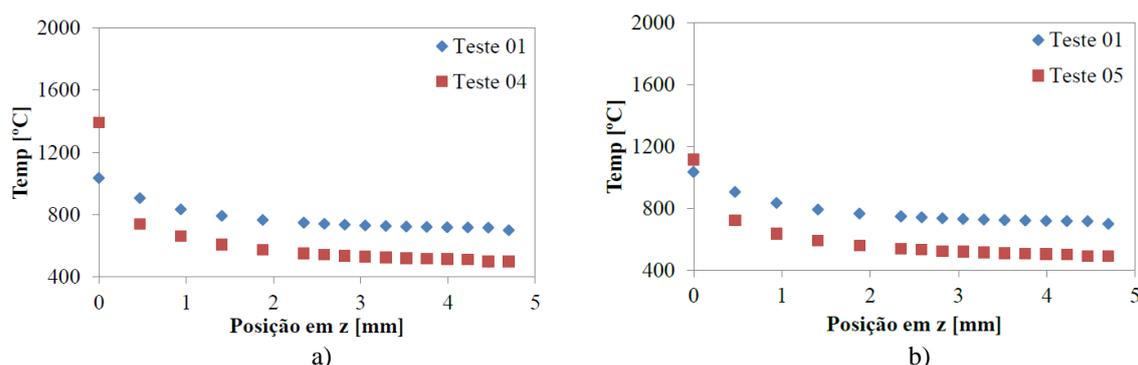


Figura 12. Comparativo entre as temperaturas: a) teste 01 x teste 04 e b) teste 01 x teste 05.

Para um revestimento de 2,35 mm de espessura, a temperatura máxima chega a ser 860°C maior, ao passo que revestimentos de 1 mm, 0,5 mm e 0,2 mm apresentam respectivamente, temperaturas de 592,6°C, 357,8°C e 80°C acima da temperatura máxima da ferramenta não revestida.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o efeito do revestimento sobre o campo de temperatura do substrato da ferramenta de corte. Para os modelos cuja espessura do revestimento foi aumentada, os resultados apresentaram o comportamento esperado, uma vez que menos calor foi transmitido para o substrato. Estes modelos cuja espessura do revestimento difere do usual servem para comprovar que o modelo proposto apresenta o comportamento esperado. Já para o modelo com a espessura do revestimento próxima ao real, os resultados ainda não estão compatíveis. Isto se deve ao fato da dificuldade de refinamento da malha na região do revestimento, que apresenta pequenas dimensões quando comparada às outras regiões do modelo. Este refinamento já está em andamento e resultados futuros deverão ser obtidos.

6. AGRADECIMENTOS

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

7. REFERÊNCIAS

- Boothroyd G., 1961, "Photographic Technique for Determination of Metal Cutting Temperature", *British Journal of Applied Physics*, Vol.12, pp. 238-242.
- Brito, R. F.; Carvalho, S. R.; Lima e Silva, S. M. M.; Ferreira, J. R., 2009, "Thermal Analysis in coating tools", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 314 – 321.
- 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*, Vol. 86, pp. 60 – 68.
- Carvalho, S. R., 2005, "Determinação do Campo de Temperatura em Ferramentas de Corte durante um Processo de Usinagem por Torneamento", Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 123p.
- Carvalho, S. R.; Lima e Silva, S. M. M.; Machado, A. R.; Guimarães, G., 2006, "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, pp. 97-104.
- Gottwein, K., 1925, "Die Messung der Schneidentemperatur beim Drehen, Maschinenbau Betrieb", Vol. 4, pp. 1129–1135
- Grzesik, W., 2003, "A Computational Approach to Evaluate Temperature and Heat Partition in Machining with Multiplayer Coated Tools", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, pp. 1311-1317.
- Grzesik, W.; Nieslony, M.; Bartoszek, 2009, "Modelling of the cutting process analytical and simulation methods", *Adv. Manuf. Sci. Technol.*, Vol. 33, pp. 5-29.
- Herbert, E. G., 1926, "The measurement of cutting temperatures", *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 1, pp. 289–329.
- Mitsuichi, M.; Sugita N.; Ishii K.; Furusho T.; Harada K., 2015, "Cutting temperature measurement by a micro-sensor array integrated on the rake face of a cutting tool", *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 64, pp. 77-80.
- Rapier, A. C., 1954, "A theoretical investigation of the temperature distribution in the metal cutting process", D.I.C, Plasticity Division, Mechanical Engineering Research Laboratory, East Kilbride, Glasgow.
- Rech, J.; Kusiak, A.; Battaglia, J. L.; (2004), "Tribological and Thermal Functions of Cutting Tool Coating", *Surface and Coating Technology*, Vol. 186, pp. 364 – 371.
- Ruppi, S.; Högrelius, B. E.; Huhtiranta, M., 1998, "Wear Characteristics of TiC, Ti(C,N), TiN and Al₂O₃ Coatings in the Turning of Conventional and Ca-Treated Steels", *Int. J. of Refractory Metals & Hard Materials*, Vol. 16, pp. 353-368.
- Shaw, M. C., 1984, "Metal Cutting Principles", Oxford University Press.
- Shore, H., 1925, "Thermoelectric measurement of cutting tool temperatures", *J. Washington Academy of Science*, Vol.15, pp. 85.
- Stephenson, D. A., 1991, "Assessment of Steady-State Metal Cutting Temperature Models Based on Simultaneous Infrared and Thermocouple Data", *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 113, pp. 121-128.
- Taylor, F.W, 1907, "On the Art of Cutting Metals", *Trans. ASME*, Vol. 28, 31p.
- Trent, E. M. e Wright, P. K., 2000, "Metal Cutting", 4th ed., Butterworth-Heinemann, Boston, USA, 464p.
- Thompson, B, 1798, "An inquiry concerning the source of heat which is excited by friction", *Philos. T. R. Soc. Lond.*, Vol.18, pp. 278–287.
- Young, H. T. e Chou, T. L., 1994, "Modeling of Tool/Chip Interface Temperature Distribution in Metal Cutting", *International Journal Mech. Sci.*, Vol. 36, no. 10, pp. 931-943.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

THERMAL ANALYSIS OF A CARBID CUTTING COATED TOOL USING COMSOL

Diego Corrêa Ferreira, diegoc.ferreira@yahoo.com.br¹

Carlos Adriano Corrêa Ribeiro, cadrinanocr@yahoo.com.br¹

Rogério Fernandes Brito, rogbrito@unifei.edu.br¹

Sandro Metrevelle Marcondes Lima e Silva, metrevel@unifei.edu.br¹

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

Abstract. *During the turning process, a considerable amount of the machine energy is transferred into heat near the cutting insert surface. Almost of the technical and economic problems of the process is directly or indirectly caused by this heat generation. In the past few years the tool inserts have been coated with materials that provide minor wear with thermal insulation features, aiming the increase of the tool life. Determining the cutting temperature during the turning process is one of the most important factors to understand the turning tool performance. Thus, is important to develop efficient methods to determine this temperature. This work proposes to simulate the heat phenomenon, in transient regime, of a cutting tool and a tool holder assembly, considering the presence of the coating and convection. The simulations are performed by the software COMSOL[®], that solves the heat diffusion equation using the finite element method. Preliminary comparisons of temperatures calculated for the Titanium Nitride (TiN) coated and uncoated (only the substrate) cutting tool are presented for some coating thicknesses.*

Keywords: *Inverse problems, Thermal analysis, COMSOL, Cutting tools, Coating.*