

**Análise térmica de processos de usinagem variando os tipos de revestimentos da
ferramenta de corte**

Thermal analysis of machining processes varying the types of coatings snipping tool

**Analisis térmico de procesos de mecanizado variando los tipos de recubrimiento de la
herramienta de corte**

Recebido: 29/08/2019 | Revisado: 31/08/2019 | Aceito: 17/09/2019 | Publicado: 04/10/2019

Rodrigo Dias Nunes Coelho

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8972-2381>

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

E-mail: rodinuco@hotmail.com

Rogério Fernandes Brito

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6833-7801>

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

E-mail: rogerio6497@gmail.com

Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1295-6208>

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

E-mail: metrevel@unifei.edu.br

Resumo

O processo de usinagem é um dos métodos mais eficientes e eficazes para criação de peças finas em que se deseja obter muitos detalhes, com qualidade e precisão. Contudo, há uma forte influência da temperatura no processo, isso ocorre, devido a dissipação do calor na região de contato entre a peça e a ferramenta. Nos dias atuais, deseja-se alcançar a maior produtividade com o menor gasto possível, no contexto deste trabalho, o intuito é aumentar a vida da ferramenta de corte, e com a aplicação de revestimento na região de corte da ferramenta, será possível alcançar essas melhorias que proporcionariam menor desgaste da ferramenta, alcançando maiores velocidades de corte sem um aumento da temperatura, preservando a integridade da ferramenta, que dispensariam gastos financeiros com trocas constantes de insertos e ferramentas, reduzindo custos a empresa e aumentando sua produtividade. Dessa forma, esse projeto de pesquisa estuda sobre a influência térmica do revestimento sobre a ferramenta de corte, utilizando simulações numéricas no software

comercial COMSOL Multiphysics® versão 5.3a. Também foi estimado o fluxo de calor utilizando a técnica inversa do método da função especificada, escrita usando o pacote MATLAB®, ao qual utilizamos para estimar o fluxo de calor variável, usado para obter as temperaturas numéricas para a ferramenta de corte revestida de Nitreto de Titânio (TiN) com espessura de 20 microns, e posteriormente comparadas com a ferramenta sem revestimento.

Palavras-chave: Problemas inversos; Influência térmica; Revestimento; Ferramentas de corte.

Abstract

The machining process is the method more efficient and effective in creation fine parts in which there are many details in need quality and precision. However, there is a strong influence of the temperature in process, due the heat dissipation in the region of contact between the part and the tool. Currently, it is desired to achieve the highest productivity with the lowest expenditure, in the context of this work, the purpose is to increase the life of the cutting tool, and with the application of coating in the cutting region of the tool, it will be possible achieve these improvements that would provide less wear of the tool, achieving higher cutting speeds without increasing the temperature, preserving the integrity of the tool, which would eliminate financial expenses with constant changes of inserts and tools, reducing costs to the company and increasing its productivity. Thus, the research project studies about the termical influence in the coating on the cutting tool, using numerical simulation in a commercial software COMSOL Multiphysics® version 5.3a. It as also estimated the heat flux using the inverse technique of the melhod in the specified function, written using the MATLAB® package, which it was used for obtain the heat variable flux, used for obtain the numeric temperature for a cutting tool coasting in the Titanium Nitride (TiN) with thickness of 20 microns, and later compared wich the uncoated tool.

Keywords: Inverse Problems; Thermal Influence; Coating; Cutting tools.

Resumen

El proceso de mecanizado es uno de los métodos más eficientes y efectivos para crear piezas finas en que si desea obtener muchos detalles, con calidad y precisión. Sin embargo, existe una fuerte influencia de la temperatura en el proceso, esto se debe a la disipación de calor en la región de contacto entre la pieza y la herramienta. Hoy en día, se desea lograr la mayor productividad con el menor gasto posible. En el contexto de este trabajo, el objetivo es aumentar la vida útil de la herramienta de corte, y al aplicar el recubrimiento en la región de

corte de la herramienta, será posible lograr las mejoras que resultarían en un menor desgaste de la herramienta, alcanzando velocidades de corte más altas sin aumentar la temperatura, preservando la integridad de la herramienta, lo que impediría el gasto financiero con los cambios constantes de los insertos y herramientas, reduciendo los costos comerciales y aumentando la productividad. Por lo tanto, este proyecto de investigación estudia la influencia térmica del recubrimiento en la herramienta de corte, utilizando simulaciones numéricas en el software comercial COMSOL Multiphysics® versión 5.3a. El flujo de calor también se estimó usando la técnica inversa del método de función especificado, escrito en el paquete MATLAB®, que usamos para estimar el flujo de calor variable utilizado para obtener las temperaturas numéricas para la herramienta de corte recubierta de Nitruro de Titanio (TiN) con un grosor de 20 micras, y luego comparado con la herramienta sin recubrimiento.

Palabras clave: Problemas inversos; Influencia termico; Recubrimiento; Herramienta de corte.

1. Introdução

O processo de usinagem é muito importante nas indústrias, pois é um dos métodos mais eficientes e eficazes para criação de peças finas e objetos que contém muitos detalhes, com o objetivo de se ter qualidade e precisão. Entretanto, por ser um processo que contém atrito, ocorre a dissipação de grande quantidade de calor na região de contato entre a ferramenta e a peça. Essa dissipação ocorre principalmente na ferramenta de corte, que a partir do avanço dos estudos na área foi possível minimizar essa quantidade de calor, onde foi acrescentado na ferramenta de trabalho uma camada de revestimento.

A usinagem é um dos processos mais utilizados em todo mundo, em diversas aplicações no dia a dia das indústrias. A temperatura na usinagem influencia o processo em diversos aspectos, de forma direta ou indireta, como a seleção da ferramenta, vida útil da ferramenta, uso de lubrificantes, uso de revestimentos, avanço, profundidade, dentre outros.

De acordo com dados de mercado mais de 40% das ferramentas utilizadas no mercado são revestidas, e segundo Grzesik (1999) pode se afirmar também que 80% dos insertos indexáveis usados no torneamento são revestidos e que o processo CVD (Processo por deposição à vapor) é o processo de revestimento dominante.

Nota-se uma grande diferença no desempenho das ferramentas de corte revestidas e ferramentas sem revestimento, pois a interação entre suas propriedades, modificam a região interface cavaco-ferramenta, a necessidade para se entender como esses revestimentos melhoram o desempenho da ferramenta de corte, é importante que sejam realizados ensaios de usinagem que possam caracterizar principalmente sua capacidade a mudanças térmicas constantes e também se existe uma boa adesividade da camada sobre o substrato.

O projeto de pesquisa apresenta um estudo sobre a influência térmica do revestimento sobre a ferramenta de corte utilizando problemas inversos, e através disso será possível analisar o quão importante é para o desempenho da ferramenta de corte, ela conter uma cada de revestimento. Com a aplicação desse revestimento na região de corte da ferramenta, será possível alcançar melhorias que proporcionariam menor desgaste da ferramenta, aumento da vida útil, alcançar maiores velocidades de corte sem um aumento da temperatura, preservando a integridade da ferramenta, que dispensariam gastos financeiros com trocas constantes de insertos e ferramentas, reduzindo custos a empresa.

2. Revisão Bibliográfica

Na revisão bibliográfica deste trabalho, apresenta-se pesquisas, trabalhos e artigos que tratam de temas que sejam relacionados à análise térmica durante o processo de usinagem. Inicialmente foi feita uma revisão sobre análise térmica nas ferramentas de corte sem revestimento que foram utilizadas por muito tempo antes da implementação do revestimento. Em seguida, trata-se sobre alguns artigos que analisaram termicamente ferramentas de corte com revestimento.

2.1. Análise Térmica de Ferramentas sem Revestimentos

Sabe-se que as deformações que ocorrem durante o processo de usinagem no material acabam gerando grande quantidade de calor, que ainda são intensificadas pelas altas velocidades de rotação normalmente maiores do que 18000 rpm e velocidades de corte de várias centenas de m/min. Segundo Borelli, França, Medeiros e Gonzaga (2001) a medição da temperatura durante o processo de corte é o fator mais importante em pesquisas sobre o uso das ferramentas, onde permite controlar os fatores que influenciam no seu uso, vida útil e desgaste. O uso de lubrificantes e refrigerantes não é indicado, devido ao impacto ao meio

ambiente e devido aos altos custos industriais (Tonshoff, Arendt & Ben Anor, 2000 & Yen, Sohner, Lilly & Altan, 2004).

Pode-se perceber de acordo com a fig.1, que a maior parte do calor gerado durante o processo de usinagem se deve a deformação plástica que ocorre no plano de cisalhamento primária que é a região entre o cavaco gerado e a peça. Na região do plano de cisalhamento secundária, que fica na superfície de saída da ferramenta, se encontra a fonte secundária de calor, onde o atrito gerado do contato entre o cavaco e a superfície de saída da ferramenta é responsável pela geração desse aumento da temperatura (Diniz, Marcondes & Coppini, 2008).

Machado, Abrão, Coelho e Silva (2011), afirma que a temperatura gerada no contato ferramenta/cavaco está associada a temperatura produzida pelo cisalhamento na zona primária ou causado pelo atrito entre o cavaco e a superfície de saída.

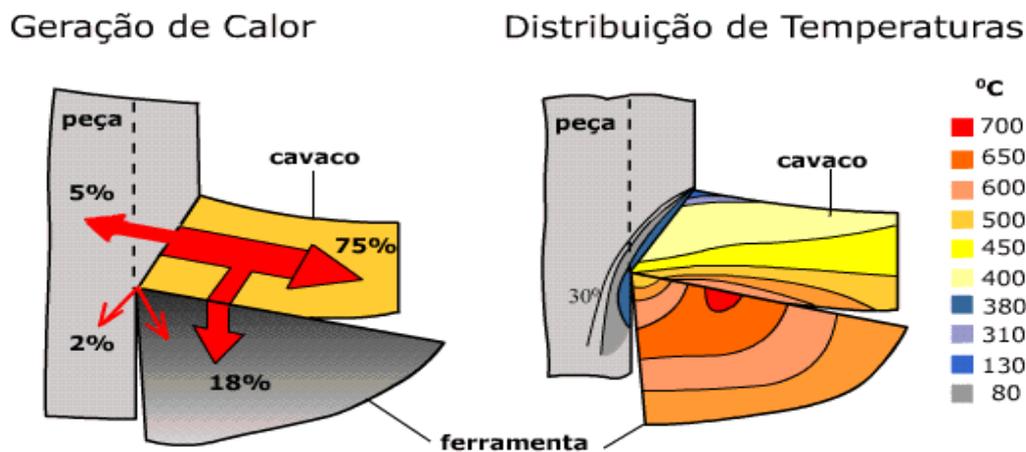


Figura 1: Geração de calor na zona primária (peça/cavaco) e secundária (cavaco/ferramenta). (Centro de Informação Metal Mecânica [CIMM], 2017)

Pode-se constatar, experimentalmente, que mais de 90% de todo o trabalho mecânico na usinagem se converte em calor. (Machado *et al.*, 2011)

De acordo com Diniz *et al.*, (2008), a quantidade de calor que é dissipado pela ferramenta é baixa, mas como a região da ferramenta que recebe este calor (região de contato ferramenta-peça e cavaco-ferramenta) é reduzida e não muda com o tempo, o mesmo ocorre com a peça de trabalho, aplicando-se altas temperaturas (até 1200°C), isso contribui expressivamente para o desgaste da ferramenta. Também é possível notar que a porcentagem do calor total que é dissipado pelo cavaco aumenta de acordo com o aumento da velocidade.

Quando as velocidades de corte são muito altas, parte desse calor é carregado pelo cavaco, uma pequena porção pela peça e uma quantidade menor pela ferramenta.

Na pesquisa de Yigit *et al.* (2008), a partir do momento em que a velocidade de corte aumenta, todas as ferramentas sofrem um desgaste no flanco, isso se torna mais visível na ferramenta sem revestimento, pois há um salto na curva da taxa de desgaste. Pode-se concluir que os usos das ferramentas de corte sem revestimentos são indicados para velocidades de corte mais baixas. A qualidade de superfície por exemplo não se altera, independente se a ferramenta tenha ou não revestimento, mas quando as velocidades de corte são mais altas, as qualidades de superfície são muito melhores.

As forças geradas são elas: força de corte principal, a força de alimentação e a força radial, geradas pela ferramenta não revestidas são muito superiores, do que as ferramentas com revestimento, o que acaba gerando mais gastos com material por causa do desgaste e de energia pois as forças necessárias são maiores (Yigit *et al.*, 2008).

2.2. Análise Térmica de Ferramentas com Revestimentos

Uma das soluções para minimizar os danos que a ação do calor pode gerar nas ferramentas, está relacionada ao uso de revestimentos resistentes ao calor. Com o desenvolvimento, novos materiais para serem usados como revestimentos tem sido desenvolvido, visando a melhoria do desempenho do processo. Há tempos que os revestimentos foram empregados nas ferramentas de corte visando sempre a proteção contra desgaste, abrasão e adesão. Como sempre há um aumento de temperatura de corte, o foco nas pesquisas foi de melhorar as propriedades do revestimento para que suportasse as altas temperatura da usinagem. Os revestimentos para serem usados em ferramentas de corte surgiram em escala comercial a partir do final da década de 1960. Hoje em dia, 85% de todas as ferramentas de carboneto cementadas ou “metal duro” são revestidas. (Bobzin, 2017).

Em um estudo realizado nos Estados Unidos chamado de "Cutting Tools 2014", a empresa Dedalus Consulting de Nova York, analisou o mercado global de ferramentas de corte, fazendo previsões para os anos de 2012 a 2018. De acordo com a estatística, mostrada na fig. 2, o volume do mercado mundial de 2013 foi de 16,33 bilhões de dólares.

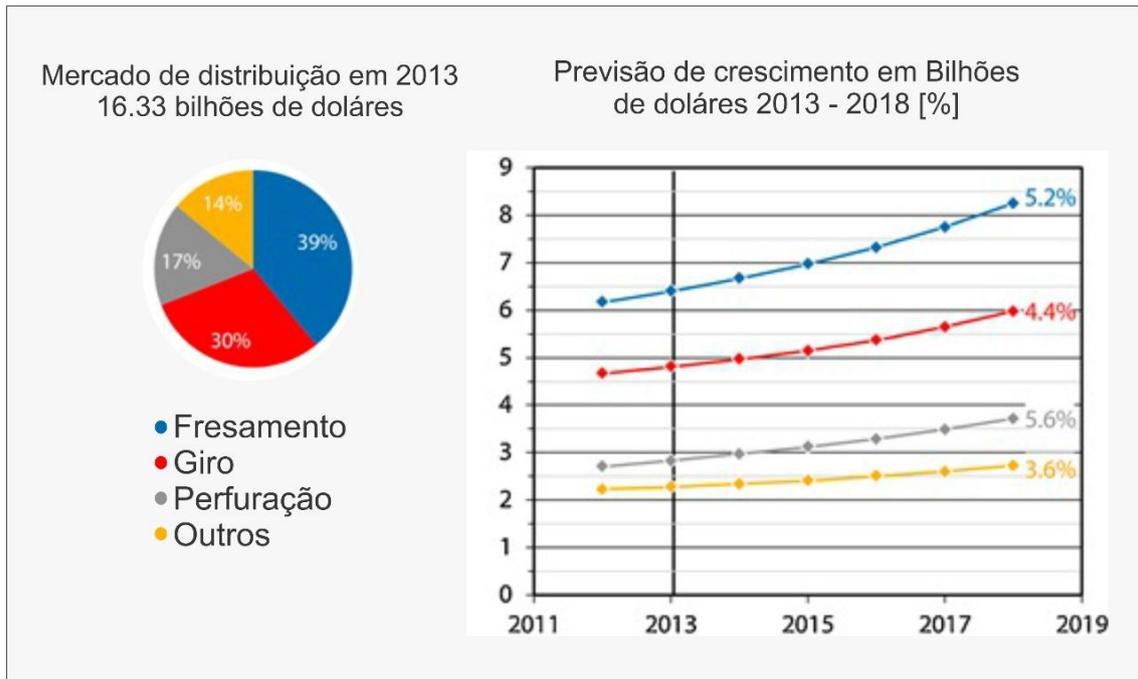


Figura 2: Mercado global de ferramentas de corte por tipo de ferramenta.

(N.N. Cutting Tools, 2014)

O primeiro revestimento de ferramenta por deposição de vapor químico CVD (*Chemical Vapour Deposition*) em carboneto cementado a ser introduzido no mercado foi TiC (Carboneto de Titânio) em 1969 (Ettmayer, Kolaska & Ortner, 2014). Seu sucesso rápido leva a um desenvolvimento dinâmico do desenvolvimento de processos CVD, bem como os materiais de revestimento TiCN (CarboNitreto de Titânio), TiN (Nitreto de Titânio) e Al_2O_3 (Óxido de Alumínio) (Liu, Liu, Mcnerny, Mehrotra & Inspektor, 2005).

Werthein, Sivan, Porat e Ber (1982), ao avaliar a relação entre as propriedades térmicas e a resistência ao desgaste dos revestimentos TiN, TiC e Al_2O_3 , depositados pelo processo CVD, concluiu-se que a maior resistência de Al_2O_3 a todos os mecanismos de desgaste está relacionada com a sua inércia química e a menor condutividade térmica entre os três revestimentos estudados.

Segundo Santhanam, Tierney e Hunt (1990) a produtividade chegou a atingir níveis de duas a três vezes maiores, quando comparadas a ferramentas não revestidas, no processo de torneamento.

Na década de 1960 foi introduzida a distinção entre os termos CVD e PVD para a diferenciação dos processos químicos dos processos físicos. A técnica CVD então passou então a ser utilizada na fabricação de semicondutores e os revestimentos de TiC aplicados

sobre ferramentas. Na década de 1980, o processo CVD passou a ser utilizado na deposição de carbono diamante. Nos anos 1990 houve a expansão do processo com o desenvolvimento de MOCVD (deposição química de vapores organometálicos) para deposição de metais e cerâmicas, e aprimorou-se o uso de CVD em componentes ópticos e eletrônicos (Gonçalves, 2010).

O processo de deposição física de vapor PVD (*Physical Vapour Deposition*) apareceu no início da década de 1970 com a deposição de TiN (Nitreto de Titânio) sobre as ferramentas de aço-rápido. Já na década de 1980 o processo foi adaptado para revestir aços de ferramentas de metal duro. A principal característica do processo PVD é a faixa de temperatura, em torno de 500 °C que traz benefícios como granulometria mais fina e a possibilidade de revestir cantos vivos (Trent & Wright, 2000).

Após a deposição de revestimentos TiN e TiC sobre as ferramentas de aços rápidos elas ganham propriedades que auxiliam no processo de usinabilidade, como o de gerar menor atrito entre a ferramenta e a peça, o que acaba gerando menos desgaste da ferramenta, gera uma maior estabilidade química e uma proteção térmica. Com a deposição de revestimentos sobre os metais duros, estes ganham tenacidade, fazendo com que combine resistência ao impacto com resistência ao desgaste, aumentando a vida útil da ferramenta (Barrios, Pivetta & Yoshikawa, 2011).

Thakur e Gangopadhyay (2016), realizou uma pesquisa com 3 ferramentas de corte, a primeira não tinha revestimento, a segunda tinha um revestimento CVD, e a última continha um revestimento PVD. Observou que a vida útil da ferramenta não revestida era de apenas 90s, por outro lado as ferramentas com revestimento CVD e PVD sustentavam trabalhar por 28 e 40 min, respectivamente, um aumento bastante considerável e significativo, como mostrado na fig.3.

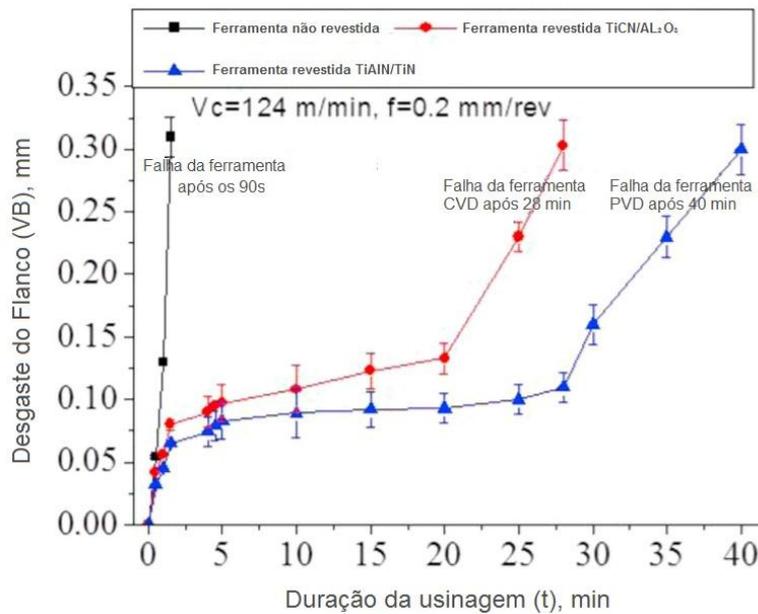


Figura 3: Vida útil da ferramenta sob condições de usinagem adversas ($V_c = 124 \text{ m/min}$ e $f = 0,2 \text{ mm/v}$). (Thakur & Gangopadhyay, 2016)

Segundo Stoeterau e Weingaertner (2004), cada tipo de camada de revestimento tem suas principais propriedades, e com finalidades diferentes, por exemplo:

- TiC – gera alta dureza, proteção contra desgaste na superfície de saída e tendência a difusão relativamente baixa;
- TiN – estabilidade termodinâmica e baixa tendência a difusão;
- Al₂O₃ – tem boa resistência à abrasão e à oxidação.

De acordo com Stoeterau e Weingaertner (2004), através de estudos realizados sobre a influência do revestimento na ferramenta de corte durante o processo de usinagem, temos como funções principais do revestimento:

- Proteção do material de base da ferramenta;
- Redução de atrito na interface cavaco/ferramenta;
- Aumento da dureza na interface cavaco/ferramenta;
- Condução rápida de calor para longe da região de corte;
- Isolamento térmico do material de base da ferramenta.

Sivaramakrishnaiah, Kumar e Janardana (2017), realizou um monitoramento conectado à rede, de um corte gerado em um metal Inconel 600 com revestimento de Al_2O_3 . No estudo pode-se perceber que durante o corte do metal, uma grande quantidade de calor é removida da peça de trabalho. Além disso, foi possível observar que a medida que a velocidade de corte aumenta, mais calor era removido, mas a temperatura na ferramenta aumentava também.

Navarro-Devia *et al.* (2017) diz que nos processos de usinagem, observa-se que o comportamento da temperatura através do processo de corte depende se existe ou não o revestimento, dito isso, na pesquisa realizada é possível observar que o aquecimento gerado pelo atrito entre a peça de trabalho e a ferramenta de corte é reduzido quando existem camadas de revestimento.

3. Metodologia

No desenvolvimento do trabalho foi utilizado um modelo numérico tridimensional (3D), que consiste de uma ferramenta de carboneto revestida ou não revestida, um calço de carboneto, um porta-ferramentas de aço AISI 1045 e um revestimento de 20 microns de Nitreto de Titânio (TiN). A fig. 4 apresenta todos os componentes citados do modelo e suas respectivas dimensões, que foram utilizados nesta pesquisa em simulações para obter a influência térmica do revestimento no modelo numérico durante o processo de corte desenvolvido pela ferramenta. O revestimento utilizado no modelo numérico com revestimento está localizado através de uma camada fina na superfície do substrato da ferramenta e a resistência térmica de contato entre os componentes, incluindo o revestimento e o substrato não é considerada no presente trabalho.

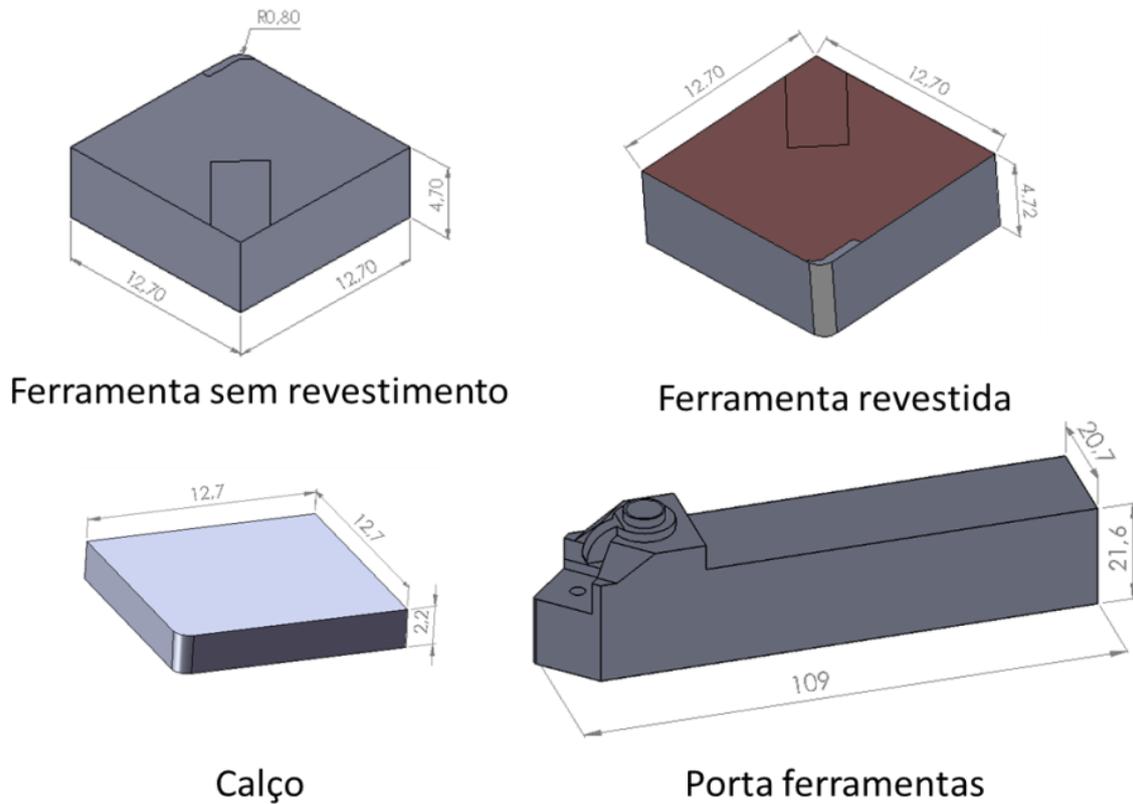


Figura 4: Dimensões fundamentais dos modelos estudados. (Presente Autor)

A fig. 5 exemplifica cada um dos domínios do conjunto, sendo que Ω_1 é o substrato da ferramenta, Ω_2 o calço, Ω_3 o suporte da ferramenta e Ω_4 o revestimento. Durante as simulações realizadas, cada domínio é dividido em regiões, que serão submetidas a diferentes condições de contorno como interface de fluxo, convecção e contato de calor imposta.

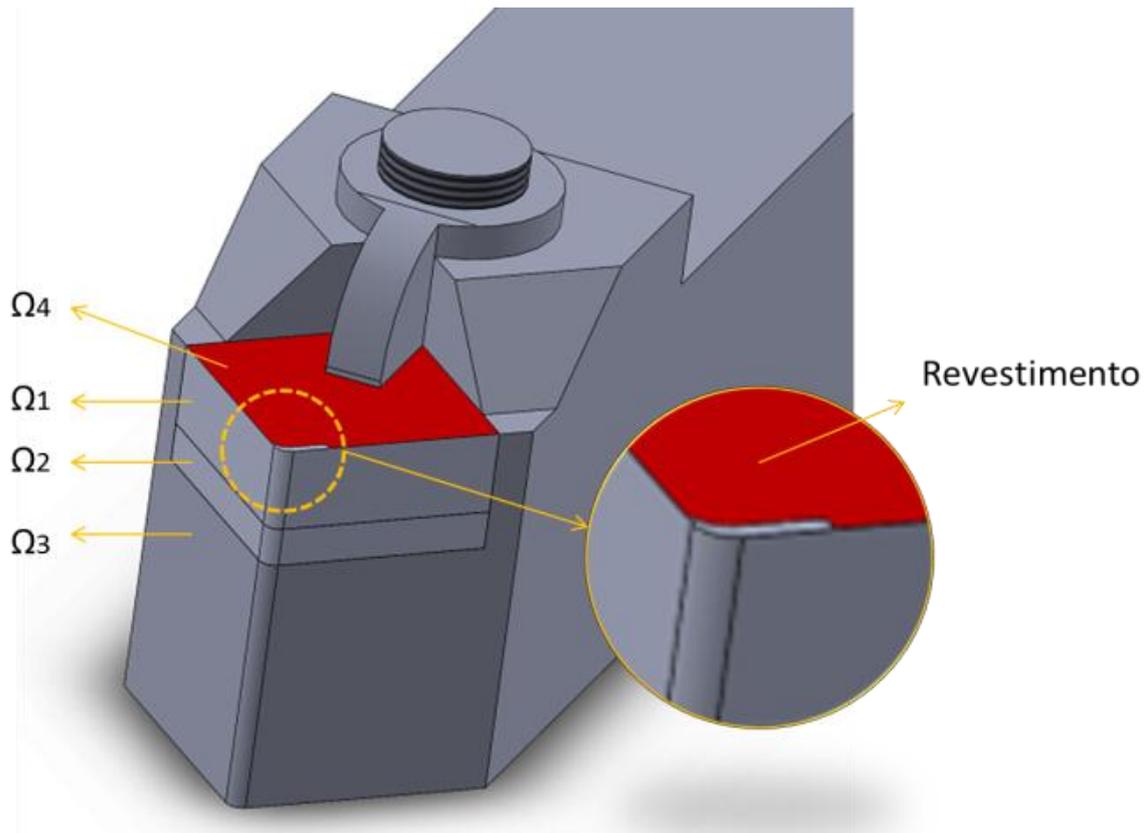


Figura 5: Todos os domínios do modelo e o detalhe do revestimento. (Presente Autor)

Na fig. 6 podemos observar que as regiões sobre a ferramenta de corte revestida são as mesmas que a ferramenta de corte não revestida, com exceção de S_4 , que representa a parte superior do revestimento. A região S_1 , que está sendo indicada pela seta amarela, é a área de contato entre a ferramenta de corte e a peça de trabalho, onde o fluxo de calor é aplicado durante o processo de corte. A região S_2 representa a superfície de ferramenta de corte inteira que está em contato com o ar, cuja condição de contorno é a convecção natural. Já a região S_3 é a interface de contato entre a ferramenta de corte e o suporte de ferramenta. A região S_1 foi medida por Carvalho (2005) usando um programa de sistema de imagem com uma câmera de vídeo.

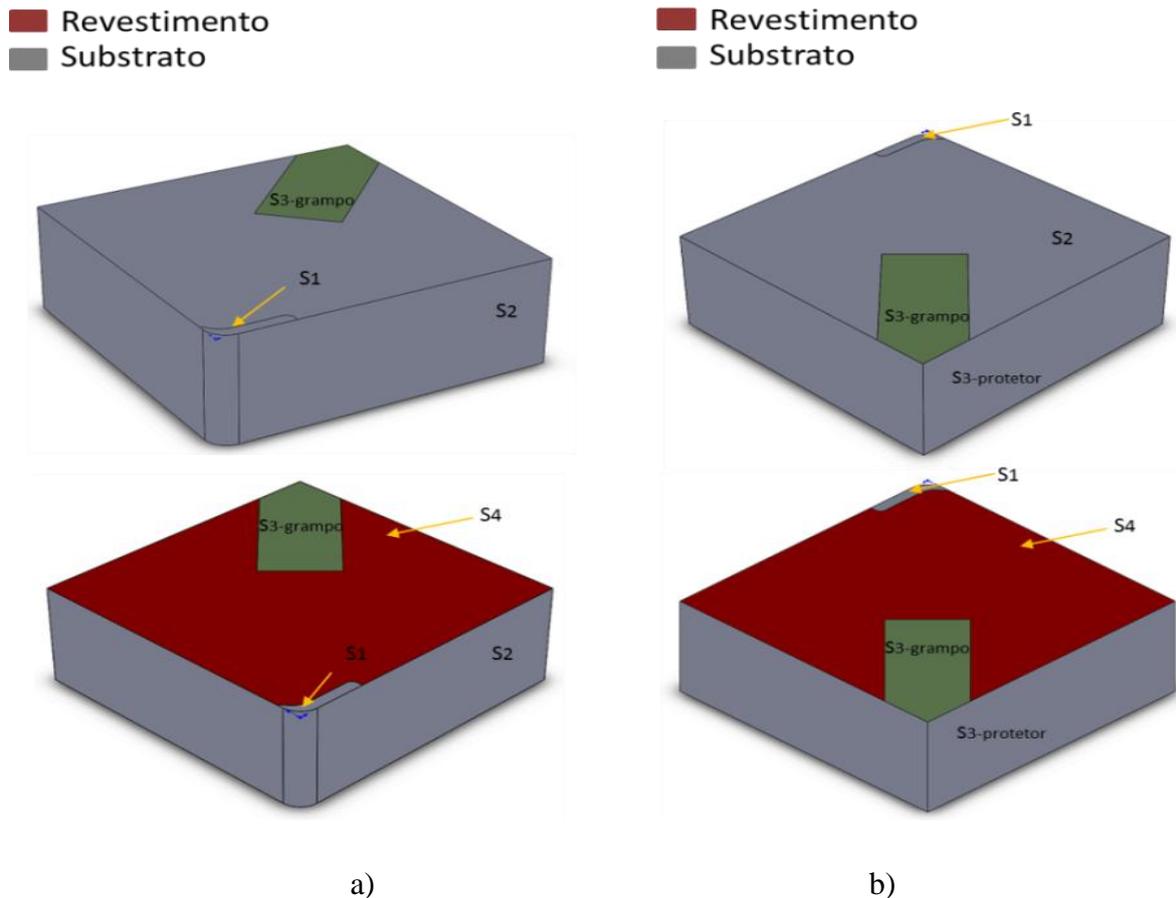


Figura 6: Domínio da ferramenta corte revestidos e não revestidos: a) interface de contato com a peça a ser trabalhada, convecção e radiação; b) interface contato com o suporte da ferramenta. (Presente Autor)

O domínio do porta-ferramentas (Ω_3) é dividido em duas regiões, uma vez que ele recebe parte da energia térmica da ferramenta de corte durante o processo de usinagem. A primeira região é a que inclui todas as superfícies de suporte que estão em contato com o calço e com a ferramenta de corte. As outras superfícies do suporte da ferramenta compreendem o domínio 3D, e estão submetidos às condições de contorno de convecção natural. As propriedades térmicas, tais como a condutividade térmica e difusividade térmica de carboneto, materiais de revestimento e o AISI 1045 aço foram tiradas de Grzesik *et al.*, (2009). O modelo térmico pode ser descrito pela equação da difusão de calor tridimensional e transiente, onde x , y , e z são as coordenadas cartesianas, t o tempo físico, T a temperatura, c o calor específico e ρ a massa específica:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Este modelo está sujeito às seguintes condições de contorno de convecção, na qual k é a condutividade térmica, η a direção normal, h o coeficiente de transferência de calor por convecção e T_∞ a temperatura ambiente:

$$-k(T) \frac{\partial T}{\partial \eta} = h(T - T_\infty) \quad (2)$$

Na área de contato, a condição de contorno do fluxo de calor que se impõem q'' é aplicada:

$$-k(T) \frac{\partial T}{\partial z}(x, y, 0, t) = q'' \quad (3)$$

A condição inicial da temperatura prescrita T_0 é usada para todo o domínio, como:

$$T(x, y, z, 0) = T_0 \quad (4)$$

Utilizando o pacote comercial COMSOL Multiphysics versão 5.3a, é obtida a solução das equações anteriores através do método dos elementos finitos, sendo que existe indução de correntes de convecção natural em torno do conjunto.

Vale ressaltar que para a realização da simulação numérica no COMSOL[®] foi utilizado 8 pontos de monitoramento que coincidem com a localização dos termopares utilizados experimentalmente em Carvalho (2005). Na tab. 1 e na fig. 7 é possível observar a posição de cada ponto de monitoramento utilizado nas simulações numéricas, onde a origem está posicionada na interface ferramenta-cavaco.

Posição/Termopar	1	2	3	4	5	6	7	8
X [mm]	0,000	0,000	0,000	4,490	6,528	7,222	9,512	5,300
Y [mm]	6,450	7,250	3,950	4,116	6,579	4,740	1,715	14,550
Z [mm]	-6,550	-11,650	-2,120	-4,830	-4,830	0,000	0,000	5,400

Tabela 1: Posição dos termopares nos eixos x, y e z. (Presente Autor)

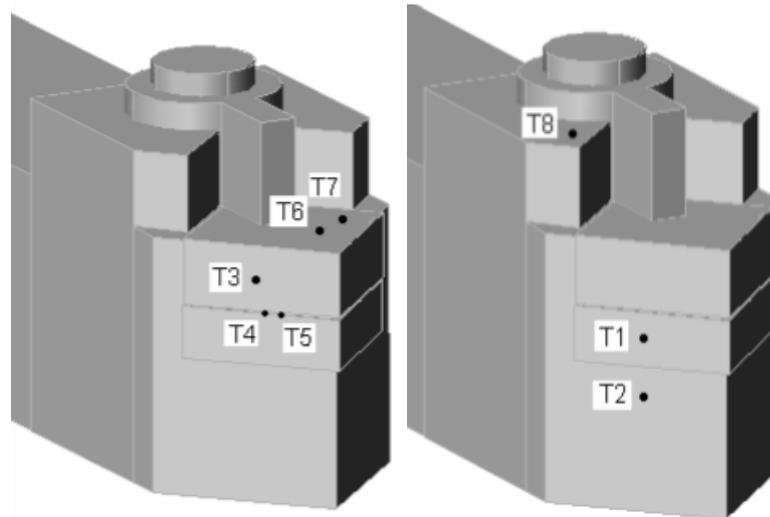


Figura 7: Posicionamento dos termopares no conjunto numérico. (Carvalho, 2005)

4. Resultados e discussão

Através do estudo feito, foi possível escolher que a malha de aproximadamente 200.000 elementos é a malha mais apropriada a ser utilizada na realização das simulações numéricas no COMSOL®, na qual foi utilizado um conjunto que inclui porta-ferramenta, calço e a ferramenta de corte, foram utilizadas duas formas para observar a influência térmica que o revestimento tem sobre a ferramenta.

4.1. Método Numérico Inverso

Em um primeiro instante foi utilizado o método numérico inverso, onde realizamos uma simulação para o conjunto com revestimento e outra para o conjunto sem revestimento no COMSOL®, onde foi medida a temperatura nos oito termopares posicionados de acordo com Brito, Carvalho, Lima e Silva e Ferreira (2009) que tem o mesmo posicionamento dos oito termopares de Carvalho (2005), utilizando a técnica inversa do método da função especificada (Beck, Blackwell & Clair, 1985), escrita usando o pacote MATLAB®, pode-se encontrar os fluxos estimados para cada conjunto.

Na Fig. 13, temos os fluxos estimados para cada conjunto, percebe-se que o fluxo é maior no conjunto com revestimento, quando comparado ao conjunto sem revestimento.

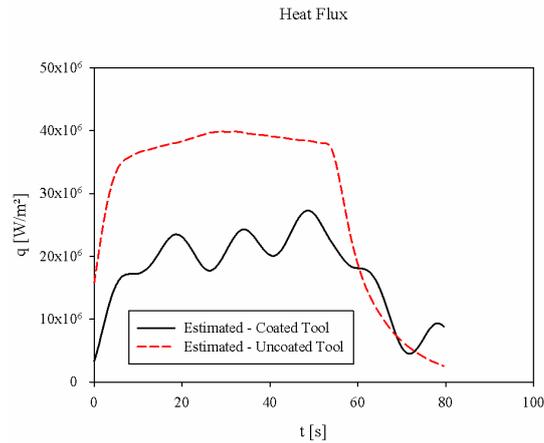


Figura 13: Comparação entre os fluxos estimados no presente trabalho com revestimento e sem revestimento. (Presente Autor)

É realizado também uma comparação entre o fluxo estimado no presente trabalho para o conjunto com e sem revestimento e o fluxo de Carvalho (2005), e nota-se que existe uma discrepância na comparação dos fluxos de calor do conjunto com revestimento e do fluxo experimental de Carvalho (2005), isso se deve ao fato de que as análises experimentais ocorreram apenas com a ferramenta sem revestimento, e que nem todas as condições de contorno foram consideradas nas simulações numéricas como mostra as Figs. 14a e 14b.

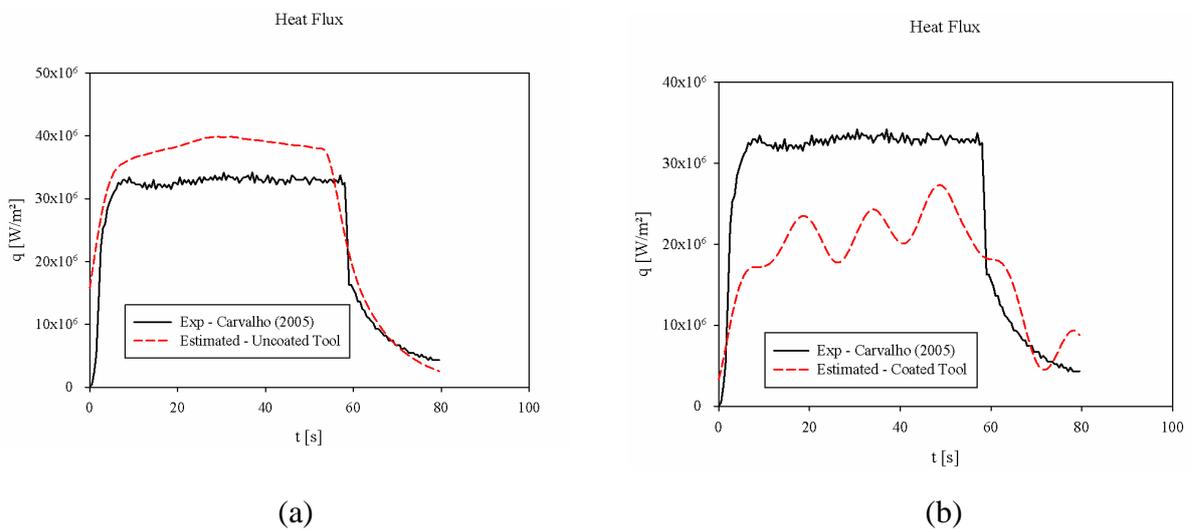
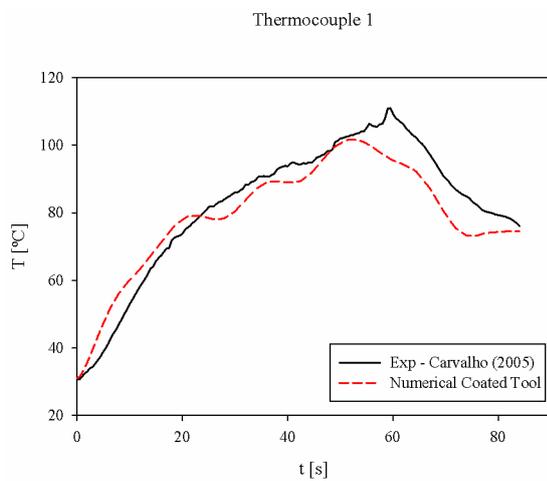


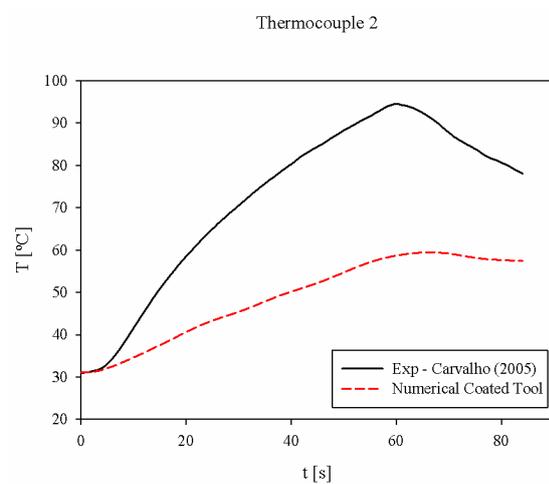
Figura 14: Comparação entre o fluxo estimado no presente trabalho sem revestimento (a) e com revestimento (b) e o fluxo experimental de Carvalho (2005). (Presente Autor)

Após estimar os fluxos térmicos através da função especificada, foram realizadas duas simulações no conjunto, na primeira simulação não foi utilizado revestimento sobre a ferramenta de corte, já na segunda foi utilizado o revestimento de Nitreto de Titânio (TiN) com uma camada de 20 μm sobre a ferramenta.

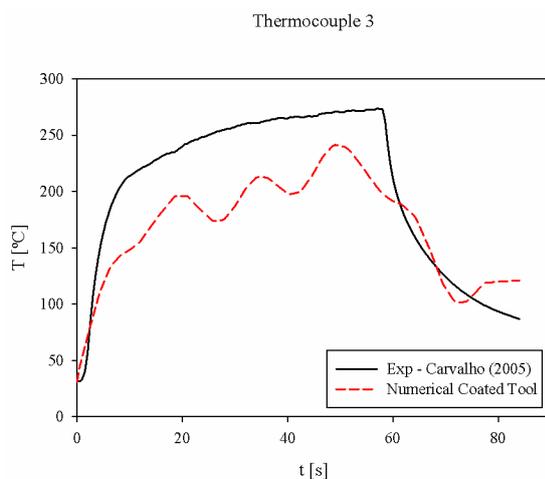
Com as simulações realizadas, foram geradas as curvas de temperatura numéricas para os oito termopares do conjunto com revestimento de 20 μm de TiN e do conjunto sem revestimento, e comparadas as temperaturas experimentais de Carvalho (2005), conforme mostrado nos gráficos das Figs. 15 e 16 respectivamente.



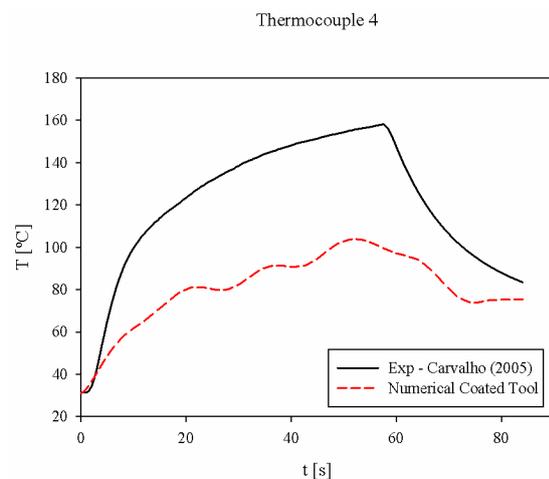
(a)



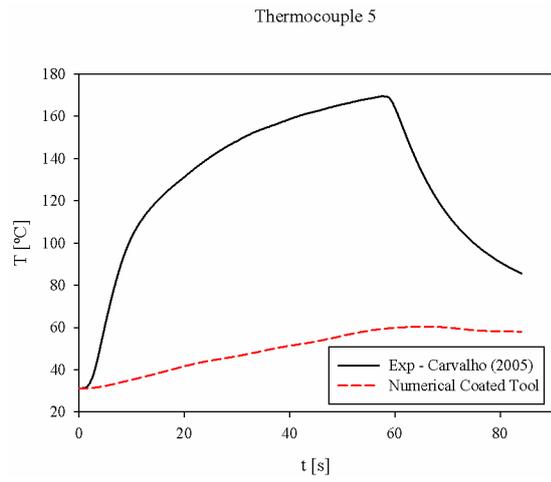
(b)



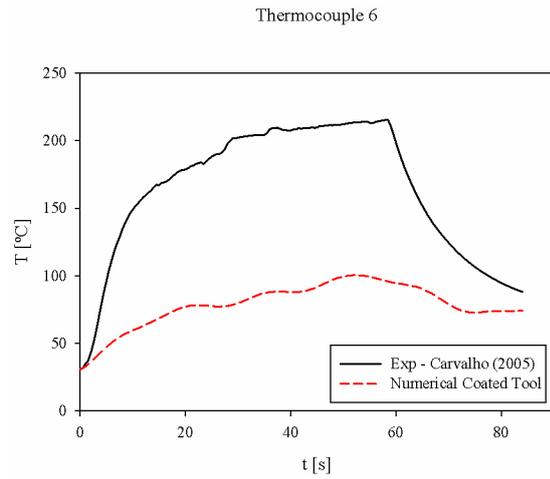
(c)



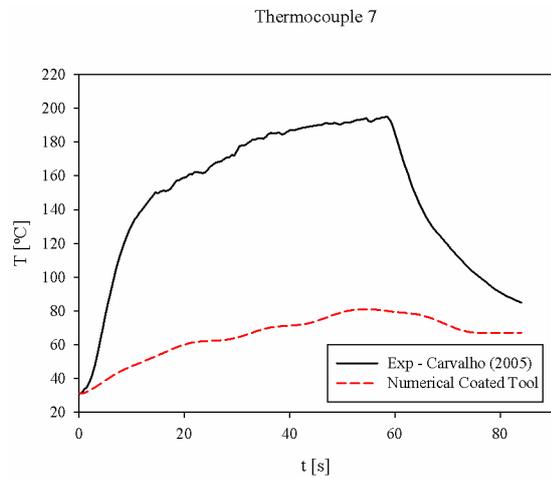
(d)



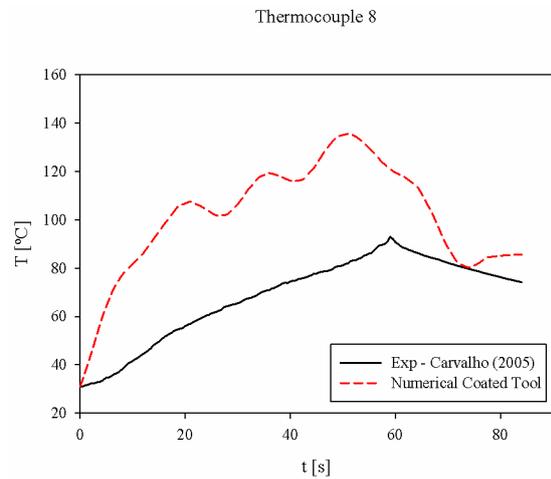
(e)



(f)

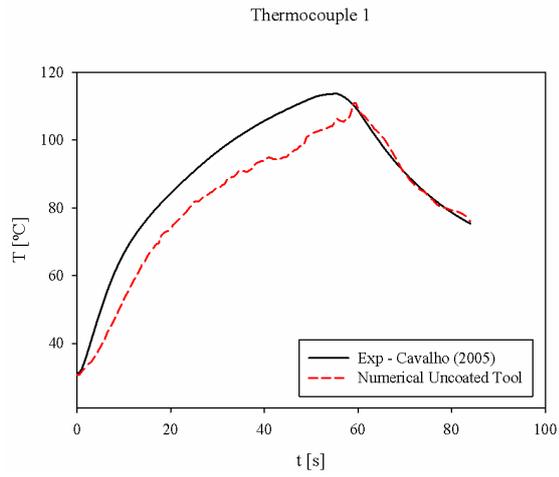


(g)

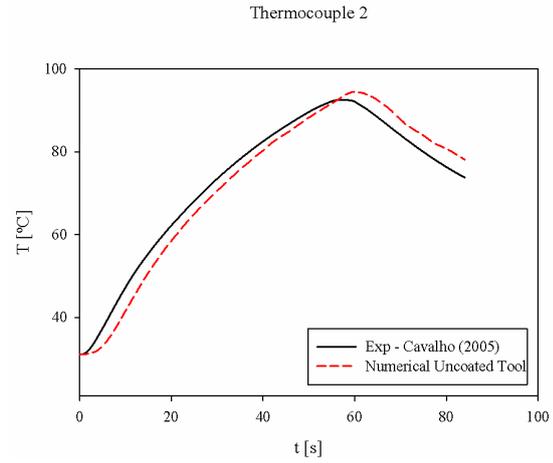


(h)

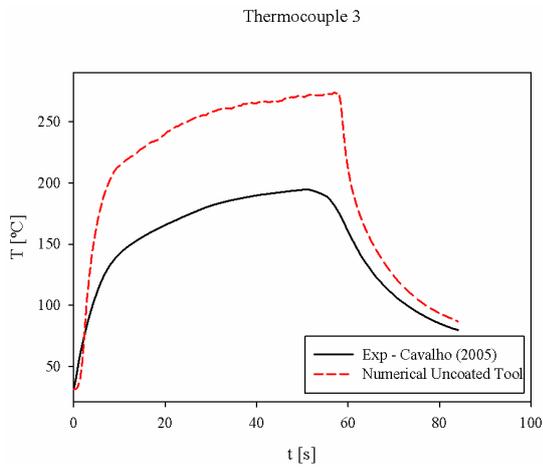
Figura 15: Termopares T1 (a), T2 (b), T3 (c), T4 (d), T5 (e), T6 (f), T7 (g) e T8 (h): Comparação entre a temperatura numérica do conjunto com revestimento e a temperatura experimental de Carvalho (2005). (Presente Autor)



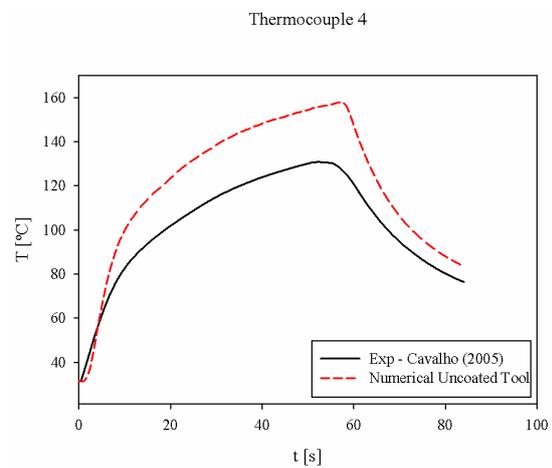
(a)



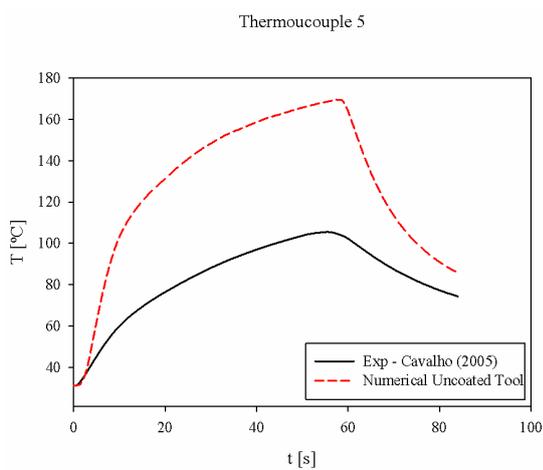
(b)



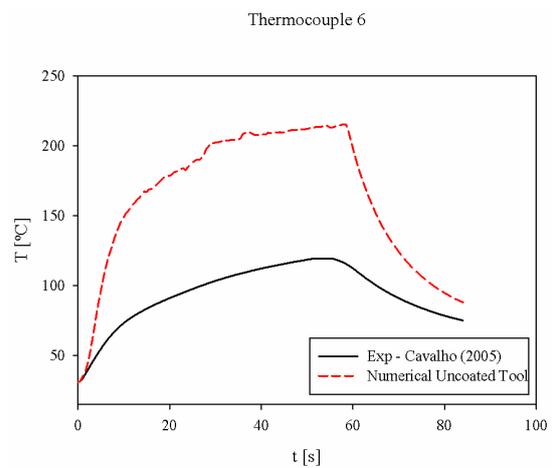
(b)



(d)



(e)



(f)

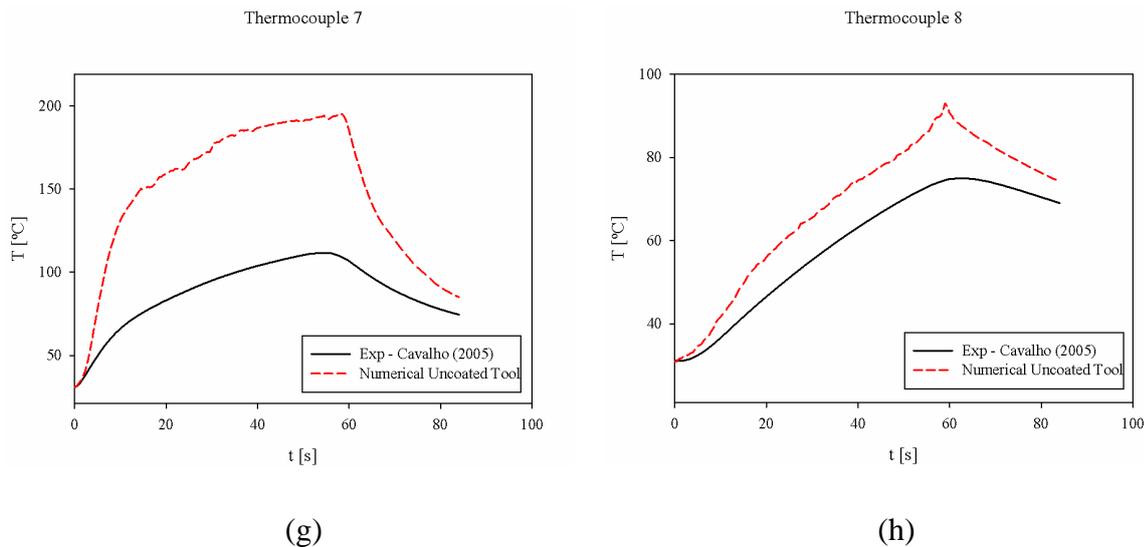
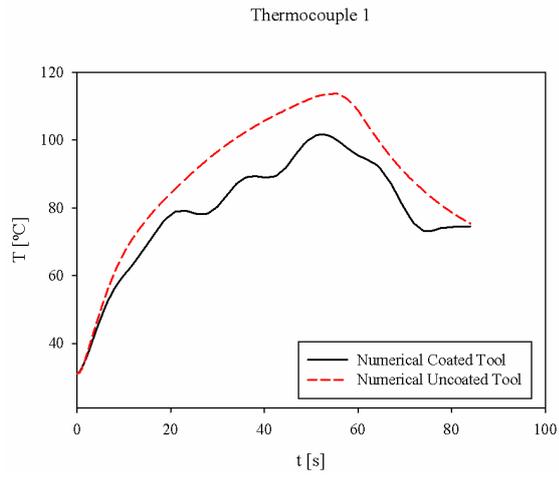


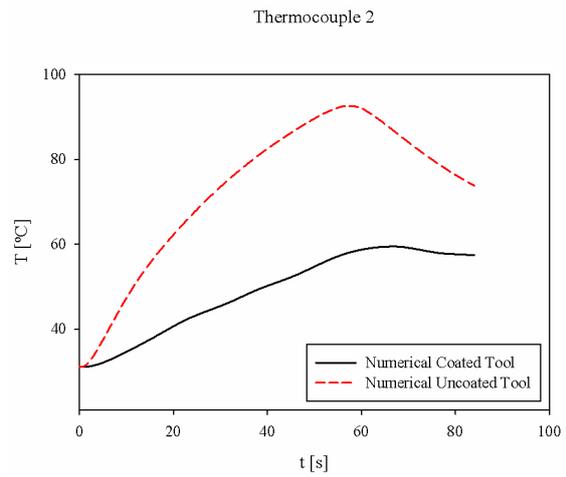
Figura 16: Termopares T1 (a), T2 (b), T3 (c), T4 (d), T5 (e), T6 (f), T7 (g) e T8 (h): Comparação entre a temperatura numérica do conjunto sem revestimento e a temperatura experimental de Carvalho (2005). (Presente Autor)

Já na Fig. 17, a comparação realizada é entre as temperaturas numéricas do conjunto com revestimento e do conjunto sem revestimento.

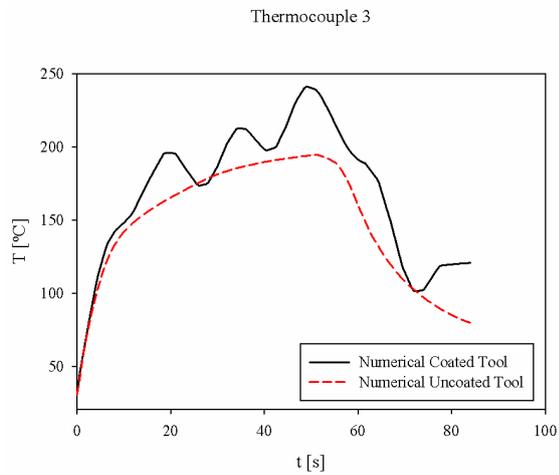
Com o objetivo de mostrar a influência do revestimento de Nitreto de Titânio (TiN) na ferramenta de corte, assim como no calço e no porta-ferramentas do conjunto os gráficos da figura 13 mostram uma queda considerável de temperatura na interface ferramenta-cavaco ao longo do processo de usinagem quando a ferramenta de corte possui tal revestimento. Mesmo com essa queda nas temperaturas na interface cavaco-ferramenta, os gráficos mostram que o revestimento não tem uma influência significativa sobre as temperaturas no calço e no porta-ferramentas.



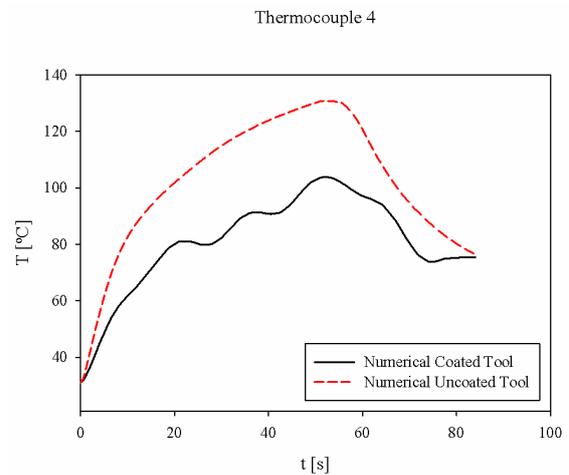
(a)



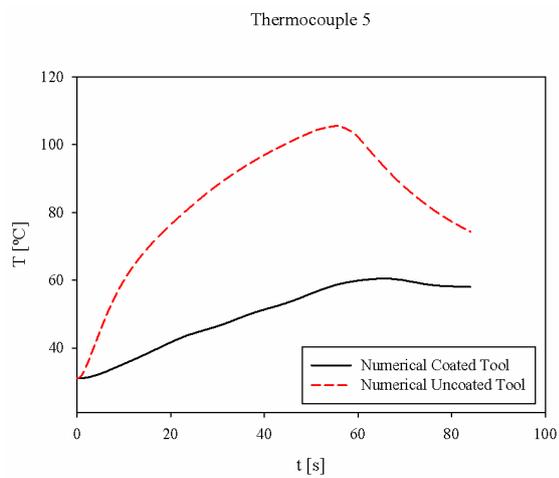
(b)



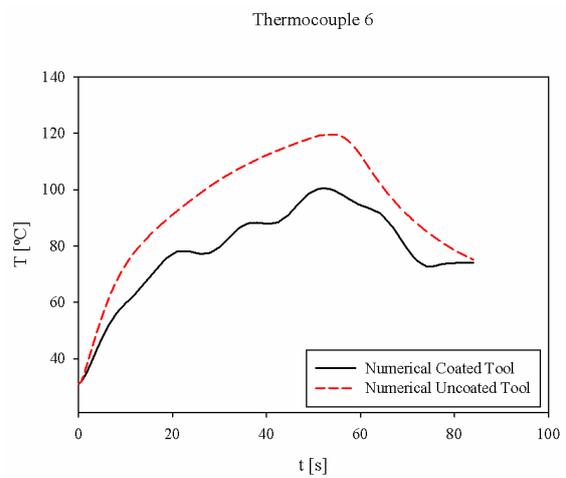
(c)



(d)



(e)



(f)

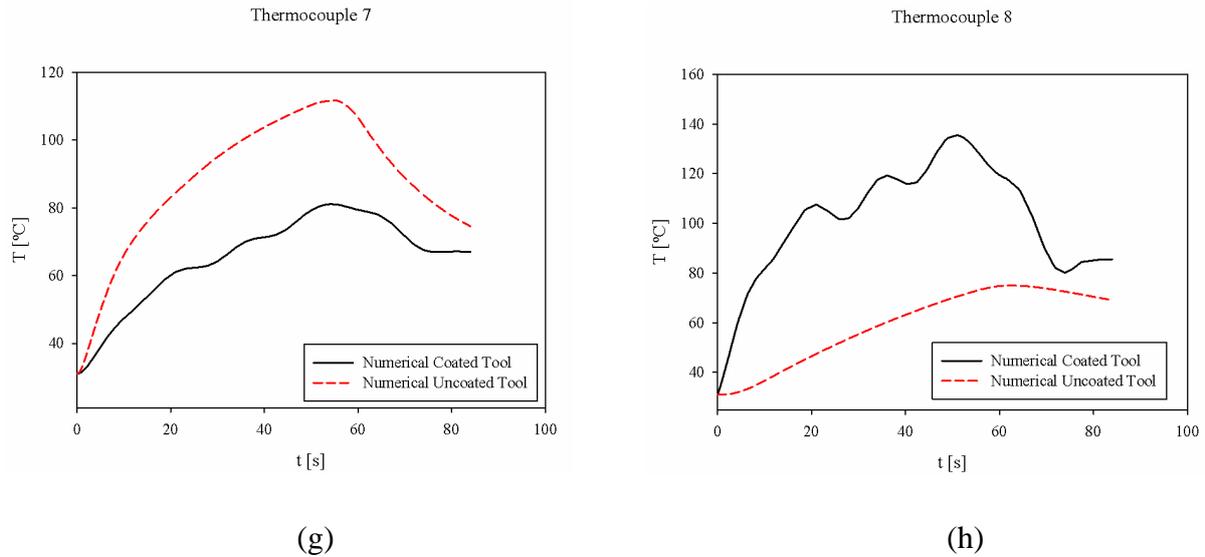


Figura 17: Termopares T1 (a), T2 (b), T3 (c), T4 (d), T5 (e), T6 (f), T7 (g) e T8 (h): Comparação entre a temperatura numérica do conjunto com revestimento e a temperatura numérica do conjunto sem revestimento. (Presente Autor)

4.2. Método das Sondas Numéricas

Em um segundo instante, foi utilizado o método das Sondas Numéricas de Ribeiro (2018) para analisar a influência térmica que o revestimento tem sobre a ferramenta de corte, em que foram posicionadas 11 sondas numéricas nas ferramentas, na ferramenta de corte revestida as sondas foram posicionadas ao longo dos 20 μm a partir da superfície do revestimento, e na ferramenta de corte não revestida foram posicionadas ao longo de 20 μm a partir da superfície do substrato da ferramenta, sendo possível a observação a partir da fig. 18 e das tabs. 4 e 5, em que a origem está posicionada na interface ferramenta-cavaco.

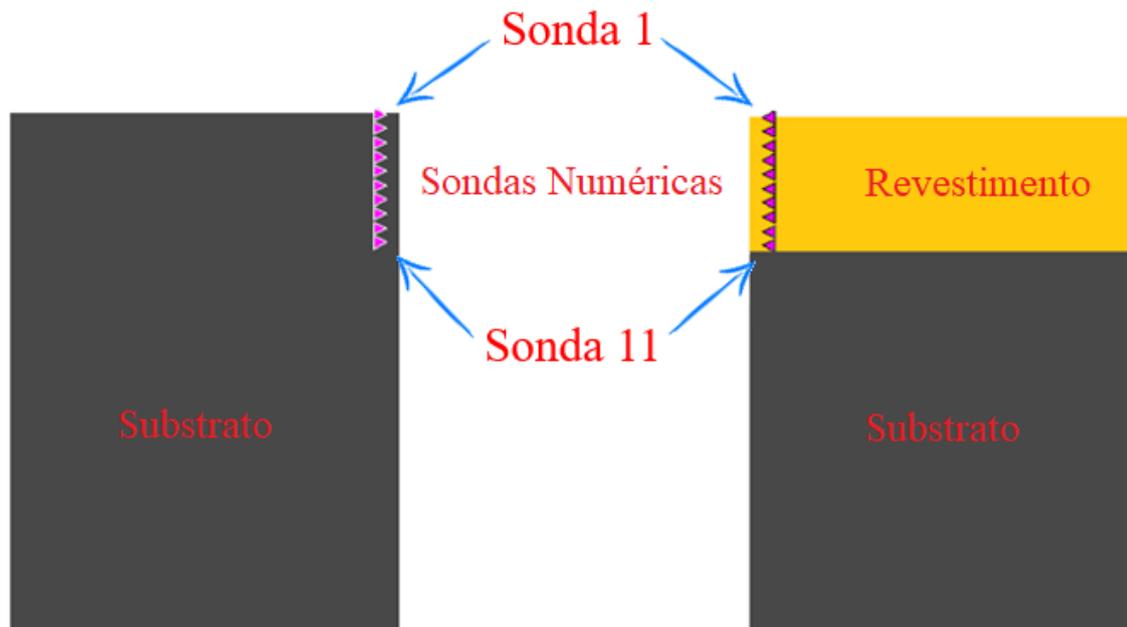


Figura 18: Posicionamento das Sondas Numéricas na Ferramenta de corte Revestida e Não Revestida. (Presente Autor)

Posição/Sondas Numéricas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X [mm]	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Y [mm]	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4	-0,4
Z [mm]	0	-0,002	-0,004	-0,006	-0,008	-0,010	-0,012	-0,014	-0,016	-0,018	-0,020

Tabela 4: Posição das Sondas Numéricas para o Conjunto com Revestimento nos eixos x, y e z. (Presente Autor)

Posição/Sondas Numéricas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
X [mm]	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Y [mm]	0	-0,002	-0,004	-0,006	-0,008	-0,010	-0,012	-0,014	-0,016	-0,018	-0,020
Z [mm]	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

Tabela 5: Posição das Sondas Numéricas para o Conjunto sem Revestimento nos eixos x, y e z. (Presente Autor)

O fluxo de calor é estimado em um tempo de 80 s, para um intervalo de 0,5 s, devido ao fluxo estimado no presente trabalho para a ferramenta com revestimento não ter tido um resultado satisfatório, pois para estima-lo foram utilizadas temperaturas experimentais obtidas do Conjunto Ferramenta, Calço e Porta Ferramenta Sem Revestimento de Carvalho (2005), os valores de temperatura no período de tempo entre $t = 66$ s a $t = 80$ s passaram por um período instável, com oscilações muito altas. No caso do fluxo estimado no presente trabalho para a ferramenta sem revestimento, o resultado obtido foi melhor, devido à semelhança do Conjunto Numérico com Ferramenta sem Revestimento de Carvalho (2005) e deste trabalho.

Com o intuito de avaliar o revestimento sobre o campo de temperatura da ferramenta de corte são apresentadas duas simulações. Inicialmente foi realizada a simulação para o conjunto numérico com ferramenta com revestimento TiN e no segundo instante foi realizada a simulação para o conjunto numérico com ferramenta sem revestimento.

Para o conjunto com presença de revestimento, a máxima temperatura foi de 728,91 °C registrada no instante de tempo $t = 52,5$ s, calculada na Sonda 1. Já para o conjunto sem revestimento a máxima temperatura foi de 946,48 °C registrada no instante de tempo $t = 32,5$ s, calculada também na Sonda 1.

As temperaturas nas demais sondas para o instante de tempo de máxima temperatura nos dois casos são apresentados na Tab. 6.

	Revestimento TiN $t = 52,5$ s	Sem Revestimento $t = 32,5$ s
Sonda	T [°C]	T [°C]
Sonda 1	728,91	946,48
Sonda 2	726,10	944,64
Sonda 3	723,26	942,81
Sonda 4	720,42	940,98
Sonda 5	717,58	939,16
Sonda 6	714,71	937,34

Sonda 7	711,83	935,54
Sonda 8	708,95	933,74
Sonda 9	706,08	931,94
Sonda 10	703,20	930,16
Sonda 11	700,31	928,38

Tabela 6: Temperatura calculada nas sondas numéricas posicionadas ao longo do eixo z.
(Presente Autor)

O campo de temperatura da ferramenta de corte revestida para o instante de tempo $t = 52,5$ s pode ser visualizado na fig. 19. Observa-se que para a condição da região estudada, as temperaturas atingiram valores na ordem de 770 °C.

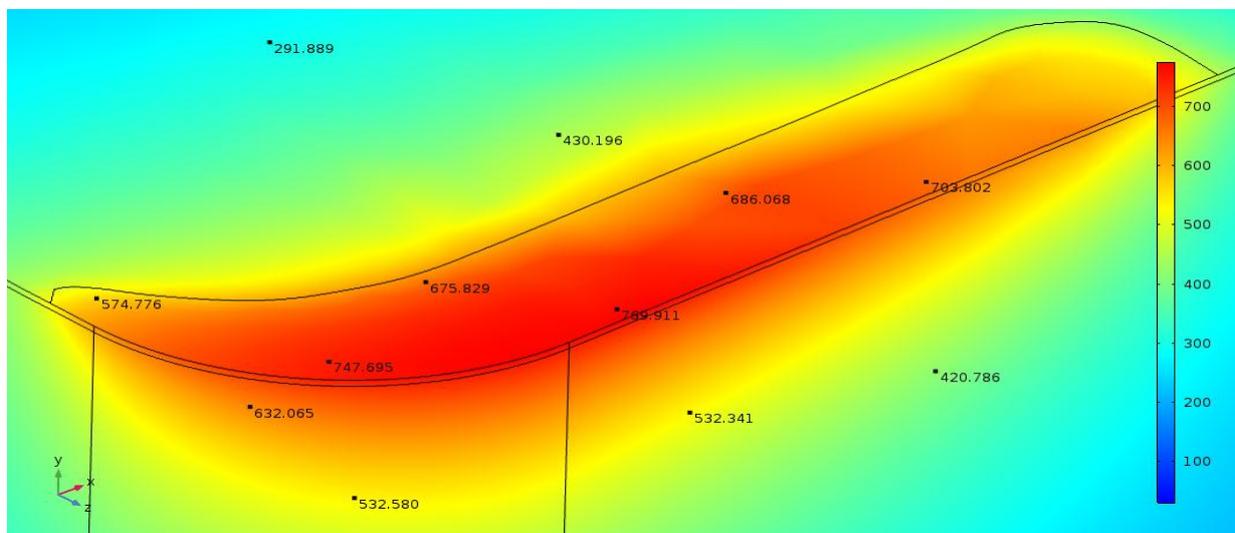


Figura 19: Campo de Temperatura da Ferramenta de Corte Revestida TiN em $t = 52,5$ s na região de contato entre ferramenta e peça. (Presente Autor)

A seguir na fig. 20, observa-se o campo de temperatura da ferramenta de corte não revestida para o instante de tempo $t = 32,5$ s, nota-se que as temperaturas atingiram valores na ordem de 956 °C.

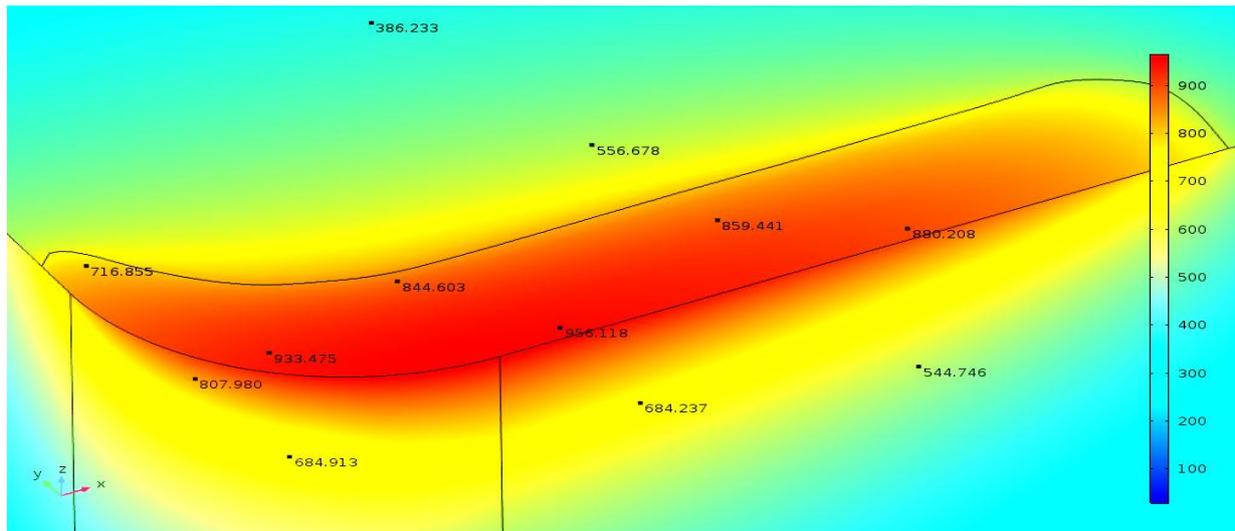


Figura 20: Campo de Temperatura da Ferramenta de Corte Não Revestida em $t = 32,5$ s na região de contato entre ferramenta e peça. (Presente Autor)

Com essa análise é possível avaliar o efeito do revestimento sobre o campo de temperaturas e de acordo com a fig. 21, o revestimento TiN reduziu a temperatura, e levaram a uma redução de temperatura para o substrato da ferramenta de cerca de $228,07$ °C, no ponto em que está posicionada a Sonda 11.

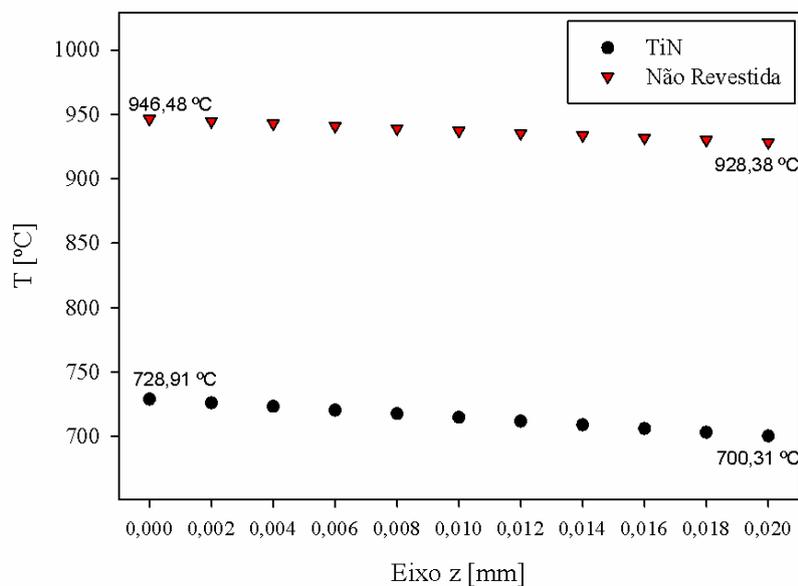


Figura 21: Variação de temperatura calculadas na região do revestimento, em $t = 52,5$ s para a TiN, e $t = 32,5$ s para a Não Revestida. (Presente Autor)

Realizando o mesmo procedimento anterior, porém utilizando o fluxo experimental de Carvalho (2005), pudemos obter um resultado mais satisfatório, quando comparado com o fluxo estimado do presente trabalho. O fluxo experimental de Carvalho (2005), é estimado em um tempo de 80 s, para intervalos de 0,5 s. Ao contrário do fluxo estimado no presente trabalho, o fluxo experimental no período de tempo entre $t = 9$ s a $t = 57$ s, passa por um período estável, com oscilações em torno de um valor médio.

Para o conjunto com presença de revestimento utilizando o fluxo experimental de Carvalho (2005), a máxima temperatura foi de 826,5 °C registrada no instante de tempo $t = 48,5$ s, e para o conjunto sem revestimento a máxima temperatura foi de 812,67 °C registrada no instante de tempo $t = 46$ s, as temperaturas foram calculadas na Sonda 1. As temperaturas nas demais sondas para o instante de tempo de máxima temperatura nos dois casos são apresentados na Tab. 7.

Sonda	Revestimento TiN	Sem Revestimento
	[°C]	[°C]
	$t = 48,5$ s	$t = 46$ s
Sonda 1	826,5	812,67
Sonda 2	823,37	811,12
Sonda 3	820,23	809,57
Sonda 4	817,09	808,02
Sonda 5	813,95	806,49
Sonda 6	810,82	804,95
Sonda 7	807,69	803,43
Sonda 8	804,57	801,91

Sonda 9	801,45	800,39
Sonda 10	798,33	798,88
Sonda 11	795,22	797,38

Tabela 7: Temperatura calculada nas sondas numéricas posicionadas ao longo do eixo z, utilizando o fluxo experimental de Carvalho (2005). (Presente Autor)

O campo de temperatura da ferramenta de corte revestida para o instante de tempo $t = 48,5$ s pode ser visualizado na fig. 22 e o campo de temperatura da ferramenta não revestida para o instante de tempo $t = 46$ s é apresentado na figura 23. Observa-se que para a condição da região estudada, as temperaturas atingiram valores na ordem de 880 °C para a ferramenta com revestimento e 840 °C para a ferramenta sem revestimento.

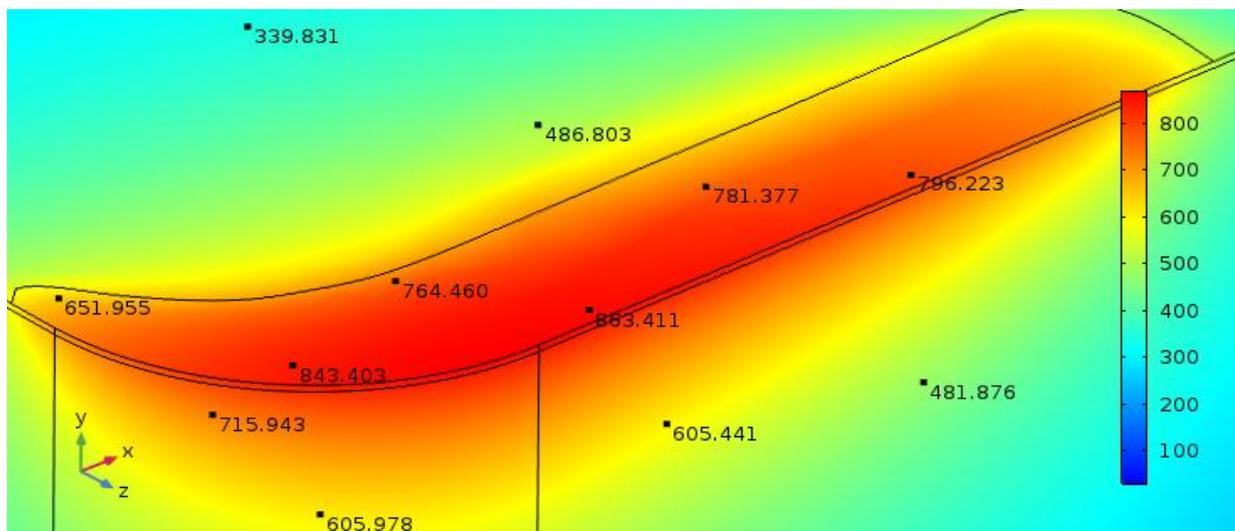


Figura 22: Campo de Temperatura da Ferramenta de Corte Revestida TiN em $t = 48,5$ s na região de contato entre ferramenta e peça, utilizando o fluxo experimental de Carvalho (2005). (Presente Autor)

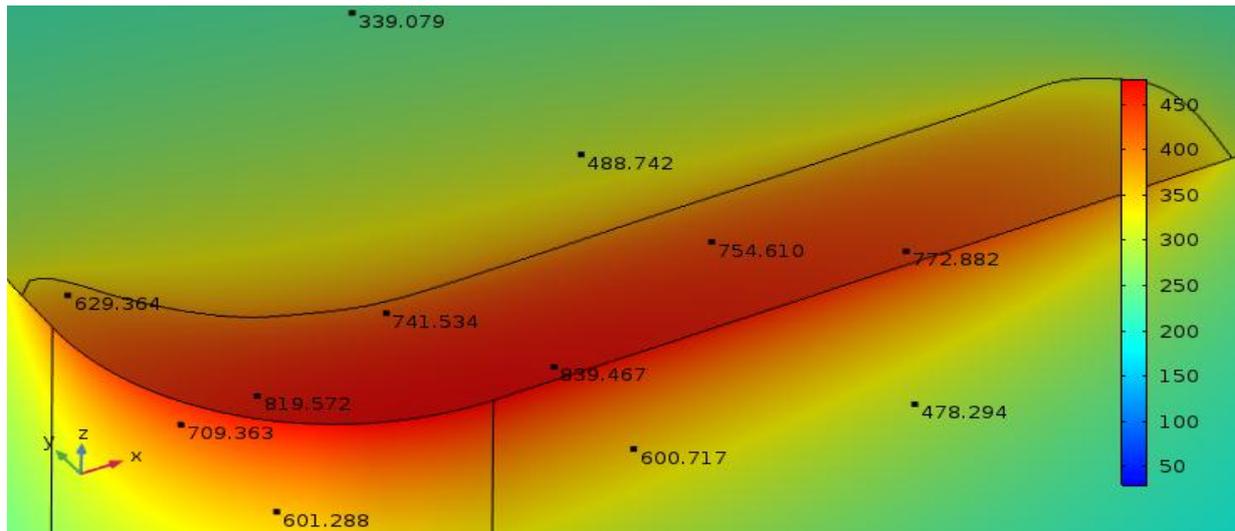


Figura 23: Campo de Temperatura da Ferramenta de Corte Não Revestida em $t = 46$ s na região de contato entre ferramenta e peça, utilizando o fluxo experimental de Carvalho (2005). (Presente Autor)

Observando a fig. 24, onde foi utilizado o mesmo fluxo para as duas ferramentas, percebemos que na ferramenta sem revestimento o calor se dissipa pela ferramenta de corte não revestida, e quando há o revestimento que tem uma baixa condutividade térmica, ela mantém o calor na superfície do revestimento, e isso leva a uma redução da temperatura na superfície do substrato de cerca de $2,16$ °C, no ponto em que está posicionada a Sonda 11.

Nota-se que utilizando o mesmo fluxo de calor para os dois conjuntos, o resultado se torna mais próximo ao real quando comparado ao que utilizou os fluxos estimados distintos para os conjuntos, onde houve uma discrepância muito alta dos valores de temperatura.

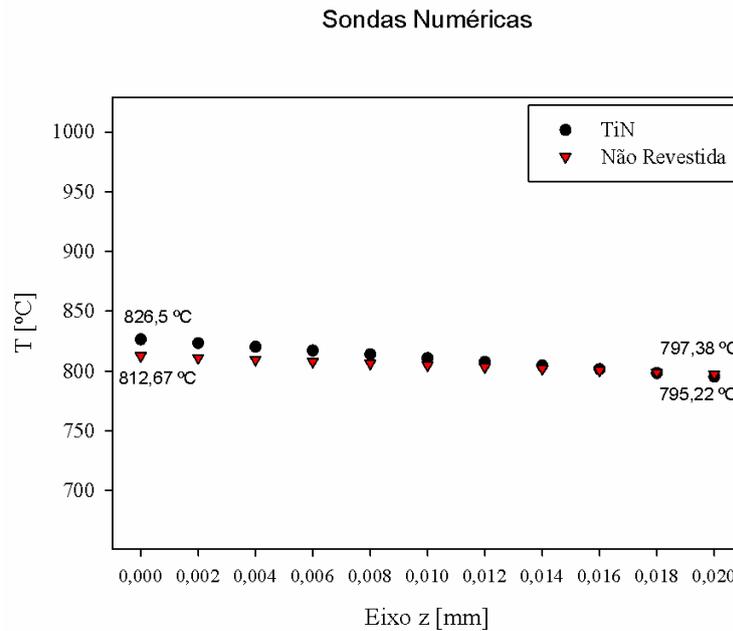


Figura 24: Variação de temperatura calculadas na região do revestimento, em $t = 48,5$ s para a TiN, e $t = 46$ s para a Não Revestida utilizando o fluxo experimental de Carvalho (2005).

(Presente Autor)

6. Considerações finais

Neste trabalho foi possível avaliar os pontos de temperatura na ferramenta de corte com e sem revestimento, e com essa avaliação determinar a influência que o revestimento tem sobre a ferramenta de corte. Como parte do trabalho, utilizando um software estimou-se o fluxo através de problemas inversos, e com sua utilização foi possível determinar as temperaturas nos oito termopares presentes no conjunto, constituído pela ferramenta de corte, porta ferramenta e calço. Analisando os resultados através dos gráficos, que com a utilização do revestimento TiN na ferramenta de corte, ocorreu uma queda de temperatura média de $7,981865^{\circ}\text{C}$, o que gera um aumento de vida útil da ferramenta e também até do conjunto analisado.

Quando analisamos os resultados pelo método numérico inverso ocorreram algumas discrepâncias entre os resultados esperados e os resultados obtidos, isso se deve ao fato de que no presente trabalho não foram consideradas as resistências térmicas de contato entre os componentes, nem as propriedades termofísicas dependentes da temperatura, além disso os pontos que os termopares estão posicionados não são adequados para analisar a influência que

o revestimento tem sobre a ferramenta. Também a área do fluxo de calor usada no trabalho de Carvalho (2005), é uma área retangular e área de desgaste utilizada no presente trabalho é mais próxima da área real.

Pode-se concluir ainda, que pelo método das sondas numéricas, os pontos escolhidos conseguem realizar uma melhor análise da influência do revestimento na ferramenta de corte, sendo possível observar pelas figuras e tabelas a queda considerável de temperatura no substrato da ferramenta, quando se usa o revestimento TiN.

Com estas simulações numéricas é possível determinar os valores de temperaturas em regiões da ferramenta onde não se tem acesso em um processo de usinagem, em razão da posição da ferramenta, da forma que o cavaco é retirado e mesmo colocando um termopar nessa região, irá ocorrer seu derretimento devido as elevadas temperaturas. Assim, torna-se viável e necessário o estudo desse experimento através destas simulações numéricas e com a determinação da temperatura na interface ferramenta-cavaco possibilita o desenvolvimento de novas ferramentas, novos processos e modificações de parâmetros de corte, afim de reduzir esses valores de temperatura.

Referências

- Barrios, D. B., Pivetta, L. A., Yoshikawa, N. K.. (2011). **Mecânica: Métodos e processos industriais**. São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 5v.
- Beck, V. J., Blackwell, B. E, Clair, C. A. S. T.. (1985). **Inverse Heat Conduction: Ill-Posed Problems**, (Wiley).
- Bobzin, K.. (2017). **High-performance coatings for cutting tools**. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, v. 18, p. 1–9.
- Borelli, J. E., França, C. A., Medeiros, C. F. e Gonzaga, A.. (2001). **Análise da Temperatura na Região de Contato entre a Peça e a Ferramenta**. Revista Máquinas e Metais, pp. 114-125.

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.

Carvalho, S. R.. (2005). **Determinação do Campo de Temperatura em Ferramentas de Corte durante um Processo de Usinagem por Torneamento**. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil, 122p.

Centro de Informação Metal Mecânica. (2017). **Geração de Calor e distribuição de Temperaturas**.

Ribeiro, C. A. C. (2018). **Análise Da Influência Térmica De Revestimento E Resistência De Contato Em Ferramenta De Corte De Torneamento Usando COMSOL®**, Itajubá, 104p. Tese (Doutorado Área: Térmica, Fluido E Máquinas De Fluido) - Instituto De Engenharia Mecânica Universidade Federal De Itajubá.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C., COPPINI, N. L.. (2008). **Tecnologia da Usinagem dos materiais**. 6 ed. Campinas, SP, Brasil: Artliber.

Ettmayer, P., Kolaska, H., Ortner, H. M.. (2014). **História dos metais duros**. VK Sarin (Ed): Materiais completos, Elsevier Ltd.

Gonçalves, André. (2010). **OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS COMPOSTOS DE MULTICAMADAS TiO₂/TiN**. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências, Área de Tecnologia Nuclear – Materiais, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares Autarquia Associada À Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil: 65 f.

Grzesik, W. (1999). **Experimental investigation of the cutting temperature when turning with coated indexable inserts**. International Journal Of Machine Tools And Manufacture. Opole, Poland: p. 355-369.

Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Silva, M. B. (2011). **Teoria da Usinagem dos Materiais**, Ed. Blucher, 2ª Ed: 397p.

Navarro Devia, J. H. *et al.* (2017). **Performance evaluation of HSS cutting tool coated with hafnium and vanadium nitride multilayers, by temperature measurement and surface inspection, on machining AISI 1020 steel.** Surface and Coatings Technology.

Cutting Tools, N.N.. (2014). **Dedalus Consulting.** New York, United States of America: www.dedalusconsulting.com.

Santhanam, A. T., Tierney, P., Hunt, J. L.. (1990). Cemented carbides. **In: Metals Handbook, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials.** Ohio, United States of America: American Society for Metals, 10 ed., v.2, p.950-977.

Sivaramakrishnaiah, M., Kumar, P. N., Janardana, G. R.. (2017). **Online Monitoring of Metal cutting of Inconel600 with Al₂O₃ coated carbide tools.** 5th International Conference Of Materials Processing And Characterization (ICMPC 2016). India: v.4, p.1550-1560.

Stoeterau, R. L. B., Weingaertner, W. L.. (2004). **Processos de Usinagem: Fabricação por Remoção de Material.** Florianópolis, SC, Brasil. Editora: UFSC.

Thakur, A., Gangopadhyay, S. (2016). **Tribology International Influence of tribological properties on the performance of uncoated , CVD and PVD coated tools in machining of Incoloy 825.** Tribology International: v. 102, p. 198–212.

Tonshoff, H. K., Arendt, C., Ben Anor, R.. (2000). **Cutting of Hardened Steel, Ann. CIRP:** 49 (2), pp. 547-566.

Trent, E. M., Wright, P. K.. (2000). **Metal Cutting:** 4th Edition, Butterworth Heinemann.

Werthein, R., Sivan, R., Porat, R., Ber, A.. (1982). **Characterization of CVD Coated Carbide Layers and Their Thermal Properties.** Annals of the CiRP: Vol. 31/1, pp. 3-11.

Yen, Y. C., Sohner, J., Lilly, B., Altan, T.. (2004). **Estimation of Total Wear in Orthogonal Cutting using the Finite Element Analysis.** J Mater Process Technologic: Vol. 146, pp. 82-91.

Yigit, R. *et al.* (2008). **Effect of cutting speed on the performance of coated and uncoated cutting tools in turning nodular cast iron.** Journal of Materials Processing Technology: v. 204, n. 1-3, p. 80-88.

Liu, Z. J., Liu, Z. K., Mcnery, C. H., Mehrotra, P., Inspektor, A.. (2005). **Investigações sobre a camada de adesão em carcaças de carboneto cimentadas revestidas CVD comerciais.** Surface and Coatings Technology: 198, pp. 161 – 164.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Rodrigo Dias Nunes Coelho – 60 %

Rogério Fernandes Britto – 30 %

Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva – 10%