

## DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR TÉRMICO DO PROCESSO DE USINAGEM POR FRESAMENTO

A.N.S. Barrios<sup>1</sup>; P.A.C. Beltrão<sup>1</sup>; A.R. Rodrigues<sup>2</sup>; J.B.C. Silva<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná

<sup>2</sup> Universidade de São Paulo

<sup>3</sup> Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Avenida Sete de Setembro, 3165, Rebouças CEP 80230-901, Curitiba – PR

E-mail: abarrios@alunos.utfpr.edu.br

### RESUMO

*O parâmetro temperatura na usinagem é um fator importante, pois possui forte ligação com a integridade superficial da peça e a vida da ferramenta. O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um simulador térmico que possa auxiliar, posteriormente, no estudo da integridade superficial da peça e vida da ferramenta nos processos de usinagem por fresamento. O Simulador Térmico de Usinagem por Fresamento (STUF) tem a função de estimar o fluxo de calor transferido e a distribuição de temperatura gerada na peça. Para alimentar o banco de dados do simulador, os ensaios por fresamento foram realizados através de corpos de prova do aço comercial VP100, com velocidades de corte de 200 e 450 m/min, utilizando condições de usinagem a seco, usinagem com fluido de corte semissintético, e usinagem com fluido de corte sintético. Os resultados encontrados para as estimativas do fluxo de calor foram da ordem de 27000 a 93000 W/m<sup>2</sup>.*

*Palavras-chave: fresamento, simulador térmico, fluxo de calor.*

### 1. INTRODUÇÃO

Há pelo menos 60 anos os efeitos da temperatura na usinagem vêm sendo estudado. Alguns dos autores que ao longo dos anos contribuíram nesta área podem ser citados: os autores Trigger e Chao em 1951 desenvolveram um estudo analítico das temperaturas no corte de metal<sup>(1)</sup>, Loewen e Shaw em 1954 realizaram estudo analítico das temperaturas na ferramenta de corte<sup>(2)</sup>, Boothroyd, Eagle e

Chisholm em 1967 estudaram os efeitos do desgaste de flanco da ferramenta em relação a geração de temperaturas<sup>(3)</sup>, Zakaria e ElGomayel em 1975 monitoraram a temperatura de corte para analisar o desgaste da ferramenta<sup>(4)</sup>, Chakraverti, Pandey e Mehta em 1984 analisaram a variação da temperatura da ferramenta no corte interrompido<sup>(5)</sup>, Lo Casto em 1994 avaliou a temperatura de corte utilizando uma ferramenta cerâmica<sup>(6)</sup>, Braguini Junior em 2002 desenvolveu uma metodologia para escolha de fluido de corte através da estimativa do fluxo de calor<sup>(7)</sup>, Carvalho em 2004 desenvolveu um modelo 3D da ferramenta e porta ferramenta para determinar a temperatura na interface cavaco ferramenta<sup>(8)</sup>, Guimarães, Guimarães e Carvalho em 2006 desenvolveram um modelo térmico 2D utilizando volumes finitos para o processo de furação<sup>(9)</sup>, Ulutun, Lazoglu e Dinc em 2008 desenvolveram um modelo térmico tridimensional do processo de usinagem utilizando o método de diferenças finitas<sup>(10)</sup>, Iqbal, Mativenga e Sheikh em 2009 estudaram o coeficiente de transferência de calor na interface no processo HSM<sup>(11)</sup>, Nascimento em 2011 utilizou o método de elementos finitos para o estudo da distribuição de temperatura na região de formação de cavacos<sup>(12)</sup>, Yaseen em 2012 realizou uma análise teórica da distribuição de temperatura e variação de fluxo de calor no torneamento<sup>(13)</sup> e o autor Magalhães em 2014, desenvolveu um método para estimar a temperatura no processo de usinagem por brunimento<sup>(14)</sup>.

O parâmetro temperatura em usinagem é um fator importante, pois possui forte ligação com a vida da ferramenta e a integridade superficial da peça. Uma das formas para se estudar a temperatura no processo de usinagem é através de modelos térmicos resolvidos por métodos matemáticos que podem trazer boas estimativas. Entretanto, estudar os efeitos da temperatura no processo de usinagem representa um desafio, por ser um processo em que o corte ocorre numa região bem específica de difícil acesso e pelo o processo estar atrelado a vários parâmetros que podem influenciar na transferência de calor, como por exemplo: parâmetros de corte, propriedades do material da peça, propriedades do material da ferramenta, dimensões da ferramenta, utilização do fluido de corte, tipo de fluido de corte, tipo do processo de usinagem e vibrações.

Através de modelos térmicos desenvolvidos o processo de transferência de calor na usinagem se torna cada vez mais abordado. Um dos motivos é devido a grande evolução dos computadores. Através de métodos matemáticos

implementados em softwares para simular processos, houve um importante avanço nas estimativas e na velocidade de resolução.

Portanto, o conhecimento do calor gerado no processo de usinagem através dos métodos para a determinação da temperatura e dos modelos térmicos já desenvolvidos e implementados computacionalmente, auxilia em novos estudos dos efeitos térmicos na usinagem e contribui para o desenvolvimento de novos procedimentos e novas tecnologias.

## OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é desenvolver um simulador térmico que realize estimativas de temperatura na peça para o processo de usinagem por fresamento através da utilização de um banco de dados.

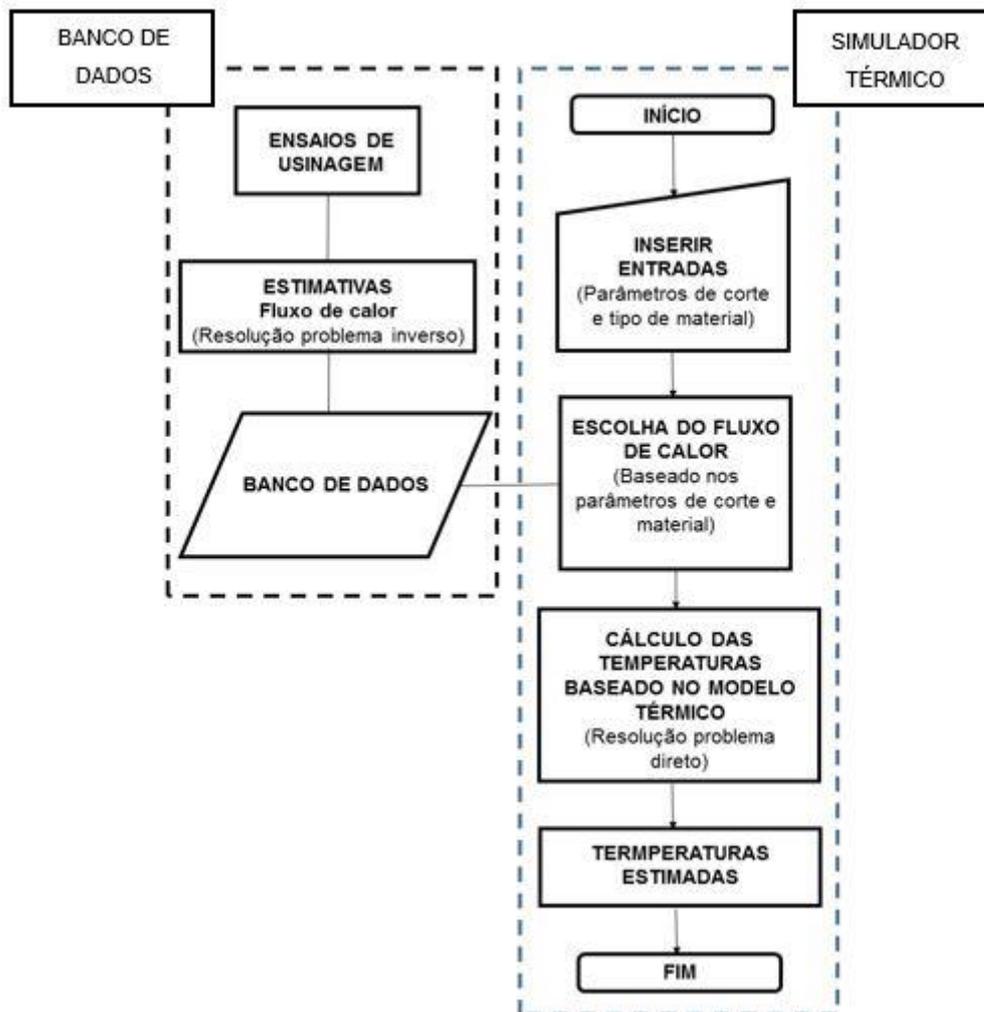
## MATERIAIS E MÉTODOS

A visão geral do funcionamento do processo utilizado no simulador térmico é mostrada na Figura 1. O desenvolvimento das resoluções numéricas foi realizado no ambiente Matlab®.

O simulador térmico tem início através da inserção dos dados de entrada dos parâmetros de corte por fresamento, tipo de material e tipo de corte. Logo após, é realizada uma busca no banco de dados do parâmetro de fluxo de calor referente aos dados de entrada que foram inseridos. O fluxo de calor é escolhido no banco de dados e através de cálculos utilizando resolução direta do modelo térmico, as temperaturas máximas são estimadas na peça.

O banco de dados é alimentado por ensaios de usinagem as quais são coletadas temperaturas experimentais na peça. Através dos dados de temperatura experimental é utilizado um método de resolução inverso e dessa forma a resposta do parâmetro fluxo de calor é armazenado.

Portanto, o banco de dados é um conjunto das estimativas de fluxo de calor dos ensaios experimentais. Através desses dados o simulador pode realizar estimativas de temperaturas teóricas de acordo com os dados de entrada requisitados no início do simulador.



**Figura 1** – Visão geral do funcionamento do simulador térmico.

### Ensaios de usinagem

O simulador térmico está ainda em aprimoramento, e requer novos ensaios de usinagem para alimentação do banco de dados. Porém os ensaios de usinagem realizados no trabalho do autor em Barrios<sup>15</sup>, foram utilizados como referência para os pré-testes do simulador.

Os ensaios de usinagem utilizados em Barrios<sup>15</sup>, foram realizados a seco e com fluidos de corte em abundância sintético e semissintético fornecidos pela Blaser Swisslube do Brasil Ltda. As velocidades de corte foram de 200 e 450 m/min, profundidade de corte de 2 mm, avanço por dente de 0,1 mm/z e a largura de usinagem de 17,5 mm. Utilizou-se uma fresa de topo com fixação porta-barras R390-025A25-11L para cone ISO BT40, com diâmetro de 25 mm para dois insertos

intercambiáveis de metal duro R390-11 T3 08M PM GC 4230, revestidos com TiAlN, ambos da Sandvik Coromant. A matriz experimental é mostrada na Tabela 1, a seguir.

Tabela 1 - Matriz experimental.

Condição	Subcondição	$v_c$ [m/min]	Lubrificaçã o
A	A1	200	Usinagem a Seco
	A2	450	
B	B1	200	Fluido Semissintético
	B2	450	
C	C1	200	Fluido Sintético
	C2	450	

O corpo de prova, com dimensões de 17,5 mm de largura, 15 mm de altura e 100 mm de comprimento, foi obtido do aço comercial VP100 cedido pela Villares Metal S/A. O VP100 é uma liga Cr-Ni-Mn mais microadições e possui dureza aproximada de 32 HRC. A composição química desse aço é mostrada na Tabela 2, a seguir.

Tabela 2 - Composição química do aço VP100.

C	Mn	Si	Mo	Cr	Ni	P	S
0,22	1,90	0,40	0,25	0,58	0,40	0,027	0,002

Para aquisição de dados da temperatura experimental foi utilizado o software PicoLog e placa TC08 (8 canais) da marca Pico Technology Limited, acoplada a três termopares rígidos do tipo K com três milímetros de diâmetro. Os termopares foram inseridos em três furos no corpo de prova com 9 mm de profundidade a 1 mm da superfície fresada.

### Estimativas do fluxo de calor

As estimativas do fluxo de calor foram realizadas através da resolução do problema inverso. O problema inverso é caracterizado quando precisa-se encontrar as causas através dos efeitos, neste caso, encontrar o fluxo de calor através da

temperatura experimental. O método utilizado para a resolução do problema inverso foi por Gauss-Newton. A Equação 1 apresenta o método.

$$(J_T J) \Delta = -J_T (\vec{T}_T - \vec{T}_{exp}) \quad (1)$$

As variáveis  $J$ ,  $J_T$ ,  $\vec{T}_T$ ,  $\vec{T}_{exp}$  e  $\Delta$  são respectivamente a matriz Jacobiana, matriz Jacobiana transposta, vetor temperatura teórica, vetor temperatura experimental e o termo de correção. A matriz Jacobiana, é formada pelas derivadas parciais da temperatura teórica em relação aos parâmetros que estão sendo estimados. A temperatura teórica é obtida pela resolução numérica do modelo térmico adotado e o termo de correção é responsável por comparar as temperaturas teóricas com as experimentais e corrigir o termo de fluxo de calor até convergir o programa.

### Banco de dados

O banco de dados armazena os dados de fluxo de calor em função da velocidade de corte ( $v_c$ ), profundidade de corte ( $a_p$ ) e largura de corte ( $a_e$ ) no software Excel® e são lidos no simulador na forma de matriz. Para a leitura dos dados é realizada uma varredura de acordo com os dados de entrada. Logo após, através de uma interpolação linear, pode ser determinado o fluxo de calor que está atrelado aos dados de entrada inseridos no simulador.

Os resultados para as estimativas de fluxo de calor encontrados em Barrios<sup>15</sup> (Figura 2) foram inseridos no banco de dados para as simulações. Dessa forma, pode-se realizar simulações para o material VP100, dentro da faixa de velocidade entre 200 e 450 m/min para as condições de usinagem a seco, fluido semissintético e sintético.

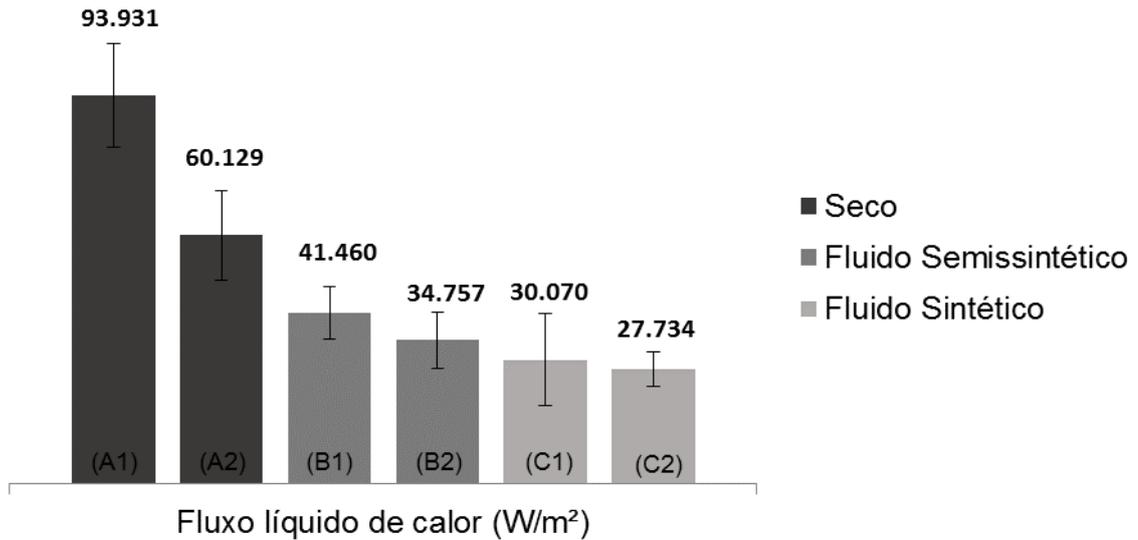


Figura 2 – Fluxos líquido de calor, estimados para as condições A1, B1 e C1 ( $v_c = 200$  m/min) e para as condições A2, B2 e C2 ( $v_c = 450$  m/min).

### Simulador térmico

O simulador térmico mostra como resultado o fluxo de calor, distribuição de temperaturas na peça e um gráfico com gradiente de cores em função das temperaturas. Para isto, foi criada uma interface para facilitar o entendimento e a utilização do simulador.

Para o cálculo da distribuição de temperatura foi utilizada a resolução do problema direto através do método numérico conhecido por volumes finitos. A resolução por volumes finitos utilizou-se do esquema totalmente implícito.

O modelo térmico para a resolução do problema direto teve como base a Equação da difusão de calor tridimensional transiente (Equação 2):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

As variáveis  $T$ ,  $t$ ,  $k$ ,  $\rho$  e  $c_p$  são respectivamente a temperatura da peça, tempo, condutividade térmica do material, massa específica do material e o calor específico do material. A variável temperatura é função das coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$  e do tempo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3, a seguir, mostra a interface prévia do simulador, e o resultado encontrado para as entradas dos parâmetros de corte, tipo do material e o tipo de corte. Na interface nos dados de entrada foi utilizada uma velocidade de 300 m/min, 2 mm de profundidade de corte e 17.5 mm de largura de corte. Os dados de profundidade de corte e largura de corte, estão fixadas por motivos do banco de dados somente ter esses valores alimentados. Quanto mais o banco de dados for alimentado com outras variáveis, mais robusto e aplicável será o simulador.

O material selecionado no simulador foi o VP100, pois os ensaios que alimentaram o banco de dados utilizaram o VP100. Porém, existe um outro campo para o material que é o AISI13, muito utilizado também na indústria de fabricação de moldes e matrizes, e que estão previstos para ensaios futuros.

A velocidade de corte de 300 m/min está entre os valores de velocidades ensaiadas, 200 e 450 m/min. Apesar de não ter sido realizado o ensaio com uma velocidade de 300 m/min, o dado de fluxo de calor pode ser estimado através do método da interpolação dos resultados de fluxo de calor encontrados em 200 e 450 m/min. Quanto mais próximos forem os intervalos de ensaios entre as velocidades, melhor será a estimativa no simulador.

Os resultados encontrados no exemplo na Figura 3 para uma velocidade de corte de 300 m/min, foram 80410 W/m<sup>2</sup> de fluxo de calor, gráfico de fluxo de calor em função da velocidade de corte e o gráfico da evolução da temperatura em função do tempo, neste caso, com uma temperatura máxima em torno de 121 °C, e o gradiente de cores na peça.

Os valores máximos e mínimos de fluxo de calor que alimentaram o banco de dados em 200 e 450 m/min para uma usinagem a seco, com fluido semissintético e fluido sintético foi da ordem de 27000 a 93000 W/m<sup>2</sup>, como visto na Figura 2. Dessa forma o simulador pode realizar as estimativas de temperatura nesta faixa de velocidade e fluxo de calor.

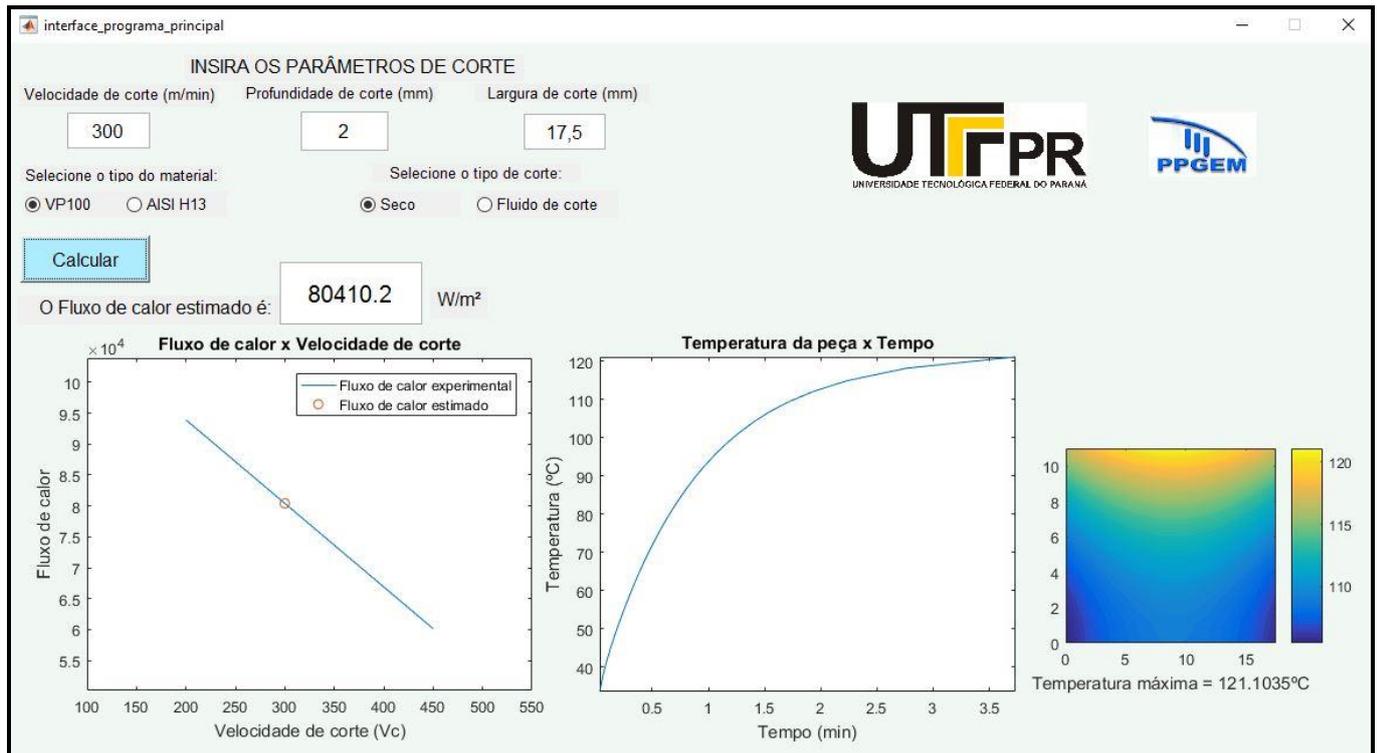


Figura 3 – Interface prévia do simulador térmico com os dados de entrada de parâmetros de corte, material e tipo de corte.

## CONCLUSÕES

Após o desenvolvimento deste trabalho, as seguintes conclusões podem ser consideradas:

- Foi possível obter resultados de fluxo de calor e distribuição de temperaturas na peça com a utilização do simulador através do banco de dados alimentados por ensaios de usinagem por fresamento.
- Através do desenvolvimento do simulador, pode-se realizar estimativas sem a necessidade de repetição de ensaios de usinagem e inserção de termopares na peça.
- Quanto maior a abrangência do banco de dados, mais robusto e utilizável será o simulador.
- Simulador pode auxiliar futuramente na análise de integridade superficial do material da peça e vida da ferramenta de corte em função da temperatura.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos apoios financeiros do CNPq e CAPES e as instituições de ensino UNESP – Ilha Solteira, USP – São Carlos e UTFPR - Curitiba.

## REFERÊNCIAS

- (1) TRIGGER, K. J.; CHAO, B. T. An analytical evaluation of metal-cutting temperatures. **Trans. of ASME**, n.53, p. 57-68, 1951.
- (2) LOEWEN, E. G.; SHAW, M. C. On the analysis of cutting tool temperatures. **Trans. of ASME**, n.76, p. 217-221, 1954.
- (3) BOOTHROYD, G.; EAGLE, J. M.; CHISHOLM, A. W. J. Effect of tool flank wear on the temperatures generated during metal cutting. **Advances in Machine Tool Design and Research**, p. 667-680, 1967.

- (4) ZAKARIA, A. A.; ELGOMAYEL, J. I. On the reliability of the cutting temperature for monitoring tool wear. **Internacional Journal of Machine Tool Design and Research**, v. 15, p. 195-208, 1975.
- (5) CHAKRAVERTI, G.; PANDEY, P. C.; MEHTA, N. K. Analysis of tool temperature fluctuation in interrupted cutting. **Precision Engineering**, v. 6, p. 99-105, 1984.
- (6) LO CASTO, S. et al. Cutting temperatures evaluation in ceramic tools: experiments tests, numerical analysis and SEM observations. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 43, p. 73-76, 1994.
- (7) BRAGUINI JUNIOR, A. **Metodologia para escolhas de fluido de corte não agressivos ao meio ambiente para aplicações em usinagem de metais**. 2002. 248 f. Tese (doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.
- (8) CARVALHO, R. C. et al. Determinação da temperatura na interface cavaco ferramenta a partir da modelagem 3D do conjunto ferramenta e porta ferramenta. In: Simpósio do programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, 14, 2004, Uberlândia. **Anais... FEMEC**, 2004.
- (9) GUIMARÃES, T. A. M.; GUIMARÃES, G.; CARVALHO, S. R. DE. Modelagem térmica do processo de Furação usando a técnica dos volumes finitos. In: Simpósio do programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, 16, 2006, Uberlândia. **Anais... FEMEC**, 2006.
- (10) ULUTUN, D.; LAZOGLU, I.; DINC, C. Three dimensional temperature prediction in machining processes using finite difference method. **Journal of materials processing technology**, Turkey, v. 209, p. 1111-1121, mar. 2008.
- (11) IQBAL, S. A.; MATIVENGA, P. T.; SHEIKH, M. A. An investigative study of the interface heat transfer coefficient for Fe modelling of high speed machining. **Ned University Journal of Research**, .v. VI, n. 1, 2009.
- (12) NASCIMENTO, C. H. **Estudo da distribuição da temperatura na região de formação de cavacos usando método dos elementos finitos**. 2011. 123 f. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2011.

(13) YASEEN, S. J. Theoretical study of temperature distribution and heat flux variation in turning process. **Al-Qadisiya Journal for Engineering Sciences**, v. 5, n. 3, p. 299-313, 2012.

(14) MAGALHÃES, M. C. F. **Uso do modelo do erro de aproximação para estimativa de fluxo de calor na usinagem por brunimento**. 2014. 97 f. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

(15) BARRIOS, A. N. S. **Modelagem térmica para avaliação da temperatura no fresamento de aços para moldes e matrizes**. 2013. 102 f. Dissertação (mestrado), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2013.

## **DEVELOPMENT OF A THERMAL SIMULATOR FOR MILLING MACHINING PROCESS**

### **ABSTRACT**

*The temperature parameter in machining is an important factor because it has a strong link with the surface integrity of the workpiece and tool life. The main objective of this work is to develop a thermal simulator that can help later in the study of surface integrity of the workpiece and tool life in milling for machining processes. The Thermal Machining by milling simulator has the function of estimating the transferred heat flow and temperature distribution generated in the workpiece. The tests for milling were performed by commercial steel VP100 specimens with cutting speeds of 200 and 450 m / min, using dry machining conditions, machining with semisynthetic cutting fluid and machining with synthetic cutting fluid. The results for estimates of heat flow were the order 27000 to 93000 W / m<sup>2</sup>.*

*Key-words: milling, thermal simulator, heat flow.*