

# INFLUÊNCIA DA INTERPOLAÇÃO DA TRAJETÓRIA DA FERRAMENTA NO FRESAMENTO A ALTAS VELOCIDADES DE SUPERFÍCIES COMPLEXAS

Jacson Machado Nunes <sup>1</sup>  
 Jefferson de Oliveira Gomes <sup>2</sup>  
 Guilherme Gomes de Souza <sup>3</sup>  
 Ricardo Sutério <sup>4</sup>

## Resumo

Este trabalho estuda a influência dos métodos de interpolação utilizados em máquinas de usinagem de alta velocidade para usinagem de superfícies complexas. O método tradicional de interpolação linear foi comparado ao método de interpolação polinomial para duas diferentes tolerâncias do sistema CAM. Os resultados foram analisados em termos de tempo real da velocidade de avanço, erro dimensional de contorno e qualidade superficial. Para uma mesma condição de corte, observa-se que a interpolação polinomial apresenta um maior ganho no tempo de usinagem e uma pequena melhora no acabamento superficial. Contudo na decisão da escolha do método de interpolação tem que ser considerado o valor de tolerância desejado do CAM em termos de redução de tempo de usinagem, controle dimensional e acabamento.

**Palavras-chave:** Fresamento; Moldes; Matrizes.

## INFLUENCE OF THE TOOL PATH INTERPOLATION RESULTS ON THE HIGH FEED MILLING OF FREE FORM SURFACES

### Abstract

This work presents the influence of the tool interpolation method on the HSC of free form surfaces. The traditional linear interpolation was compared to polynomial interpolation by application of two different values of CAM tolerance. The results were analyzed in terms of the real time acquisition of feed rate, contour dimensional error, and quality surface. It was shown that polynomial interpolation offers accuracy and surface quality gains if compared to linear interpolation, in the same cutting conditions. However the decision for choose of interpolation methods has to consider the CAM tolerance value in terms of lead-time reduction, dimensional control and quality of machined surface.

**Key words:** High feed milling; Die; Mould.

## I INTRODUÇÃO

A usinagem de moldes e matrizes vem se destacando no setor de manufatura na medida em que a economia mundial avança em direção da redução de lotes, configurações do produto ao cliente, grande diversidade de produtos, redução de seu tempo de vida e principalmente redução do tempo de lançamentos de novos produtos. No entanto, seu processo tradicional de manufatura ainda apresenta um tempo total do ciclo de produção de produto (*lead time*) extremamente alto, o que faz com que haja

um forte interesse por parte dessa indústria na aplicação da tecnologia de usinagem a altas velocidades de corte (HSC). Esta aplicação pode encontrar grandes restrições, em virtude de não estar baseada somente em um eixo árvore de rotação mais elevada, mas sim na união de altas velocidades de cortes e avanço para criar um novo processo de usinagem.<sup>(1,2)</sup>

Atualmente, de todo o *lead time* de manufatura de um molde ou matriz, a maior parte do

<sup>1</sup>Mestre em Ciências e Aluno de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Eng. Mecânica - Aeronáutica do Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Praça Mal. Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, CEP: 12228-900, Div. de Eng. Mecânica/CCM. jacson@ita.br.

<sup>2</sup>Doutor em Engenharia Mecânica e Professor Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Praça Mal. Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, CEP: 12228-900, Div. de Eng. Mecânica/CCM.gomes@ita.br.

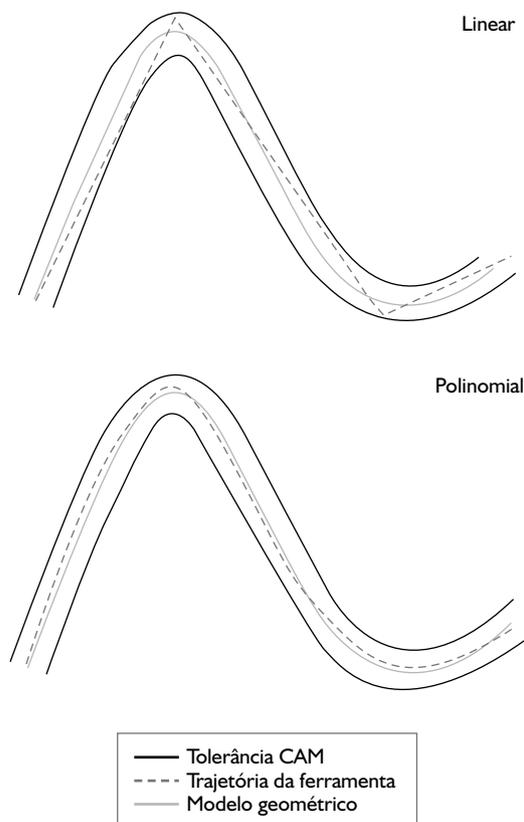
<sup>3</sup>Mestre em Engenharia Mecânica, Gerente de Projetos em CAD/CAM do SENAI CIMATEC Bahia e Aluno de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Eng. Mecânica - Aeronáutica do Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Praça Mal. Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, CEP: 12228-900, Div. de Eng. Mecânica/CCM. guilhermes@imatec.fieb.org.br.

<sup>4</sup>Doutor em Eng. Mecânica, Tecnologista Sênior do INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e Professor do Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Praça Mal. Eduardo Gomes, 50, Vila das Acácias, CEP: 12228-900, Div. de Eng. Mecânica/CCM. suterio@lit.inpe.br.

tempo é consumido pelas etapas de usinagem e acabamento manual. Isto ocorre em razão da baixa qualidade superficial do molde após o processo de usinagem com velocidades convencionais, sendo necessário as etapas de acabamento manual (polimento), realizadas por artesãos, que visam obter o acabamento superficial requerido em projeto.<sup>(2)</sup> A etapa de polimento manual é especialmente crítica, pois, por mais hábil quer seja o profissional que o realiza, o tempo de trabalho envolvido é extremamente alto, podendo em alguns casos ser maior do que as operações de usinagem. Além disso, esta operação influenciará de forma negativa a precisão geométrica dos moldes.<sup>(3)</sup>

Com isso, qualquer tentativa para reduzir o *lead time* da produção de moldes e matrizes deve levar em consideração principalmente à redução destas operações. A otimização da geração da trajetória da ferramenta de corte é uma das alternativas usadas para reduzir a quantidade de processos secundários, tal como o polimento manual.<sup>(4,5)</sup> Para determinar a trajetória da ferramenta que melhor representa o modelo geométrico, os sistemas computacionais que auxiliam na manufatura podem utilizar diversos métodos matemáticos de interpolação, dentre eles, as interpolações linear e polinomial, ilustradas na Figura 1.

Ao utilizar a interpolação linear o sistema CAM (*Computer Aided Manufacturing*) determina a trajetória da ferramenta através de uma seqüência de segmentos de reta definidos de acordo com o contorno da superfície a ser usinada e a tolerância definida pelo programador. Por utilizar segmentos de retas, este método é caracterizado pela sua simplicidade matemática, em relação aos outros métodos.



**Figura 1.** Métodos de geração do caminho da ferramenta de usinagem.

No entanto, com o aumento relevante da velocidade de avanço inerente à usinagem HSC, este método torna-se uma limitação tecnológica, à medida que não é capaz de guiar a ferramenta ao longo de superfícies complexas, normalmente contidas em moldes e matrizes, com uma trajetória de ferramenta suave e precisa.<sup>(6)</sup> Trajetórias de ferramenta baseadas em segmentos de retas têm transições não-contínuas. Para poder lidar com estas situações, o CNC (*Computer Numerical Control*) reduz drasticamente a velocidade dos eixos em regiões de mudança de direção como, por exemplo, num canto. Essa variação do avanço real ao longo da peça gera forças de corte flutuantes e flexões na ferramenta de corte, o que causa impacto negativo sobre as condições de corte, qualidade superficial do produto, exatidão dimensional e no tempo de usinagem.<sup>(3,7)</sup>

Métodos complexos de interpolação, como a interpolação polinomial, são alternativos para a melhora do comportamento dinâmico de máquinas durante operações de usinagem CNC. Esta determina a trajetória da ferramenta através de uma seqüência de curvas polinomiais, deixando-a suave e com uma boa qualidade no acabamento da superfície usinada, proporcionando um melhor controle e manipulação da curva, e permitindo uma melhor representação das superfícies complexas pelos sistemas CAD (*Computer Aided Design*).<sup>(6)</sup>

Para manter a competitividade e produtividade no mercado atual através da aplicação da tecnologia HSC, a indústria de moldes e matrizes necessita reestruturar seu processo produtivo, e o estudo de novos métodos de interpolação da trajetória da ferramenta é um fator fundamental neste contexto.<sup>(1)</sup>

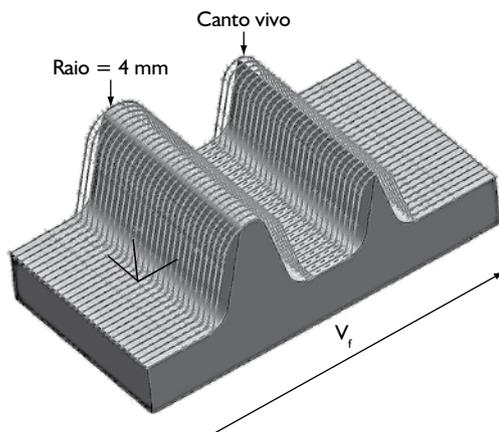
O presente trabalho tem como objetivo verificar a influência dos métodos linear e polinomial de interpolação da trajetória da ferramenta na qualidade superficial e exatidão dimensional de superfícies complexas com canto vivo fresadas com alta velocidade, que são requisitos de fundamental importância para garantir o fechamento do molde.

## 2 MATERIAL E MÉTODO

Foi realizado um ensaio de acabamento por fresamento no qual foi usinada a peça-teste apresentada na Figura 2, cujo perfil complexo apresenta no topo de suas cristas uma geometria com brusca mudança de direção. Em uma destas, o raio de concordância entre as superfícies ascendente e descendente é de 4 mm, enquanto na

outra não há raio, configurando um canto vivo. Suas dimensões principais são 125 mm de comprimento, 56,5 mm de largura e altura máxima de aproximadamente 42,5 mm. Com o objetivo de não caracterizar o desgaste da ferramenta de corte como variável influente nos experimentos, esta peça foi confeccionada em uma liga de alumínio 7050.

Sua superfície foi dividida em seções de 2,1 mm em 2,1 mm, paralelas à direção de avanço indicada na Figura 2. Em cada seção foram realizados testes distintos variando-se os seguintes parâmetros de usinagem: (1) tolerância do sistema CAM, de 0,025 mm, 0,005 mm e 0,001 mm, e (2) método de interpolação, ora linear, ora polinomial. Os valores dos parâmetros restantes, durante o processo de usinagem foram mantidos fixos conforme apresentado na Tabela 1.



**Figura 2.** Geometria da peça usinada e direção de avanço da usinagem.

**Tabela 1.** Parâmetros de usinagem fixos durante os experimentos.

D	= 10,018 mm	Diâmetro da ferramenta (fresa de topo esférico).
$a_p$	= 0,3 mm	Profundidade de corte.
$a_e$	= 0,1 mm	Penetração de trabalho.
N	= 15915 rpm	Rotação da ferramenta.
z	= 2	Número de facas da ferramenta.
f	= 0,1 mm	Avanço da ferramenta.

A usinagem foi realizada no centro de usinagem em 5 eixos, C600U - Hermle, equipado com o CNC Sinumerik 840D - Siemens. A modelagem e programação da peça foram auxiliadas pelo NX 4.0 - Unigraphics System (UGS). A ferramenta utilizada foi uma fresa de topo esférico com  $\varnothing$  10 mm, haste cilíndrica, duas facas, composição de metal-duro, modelo R216.42-10030-AK19G - Sandvik Coromant.

Neste trabalho foram realizados três procedimentos de medição para cada seção usinada da peça, nos quais:

- Medição da velocidade efetiva da ferramenta durante o processo de usinagem;
- Medição dimensional da superfície e comparação com o modelo teórico de projeto; e
- Medição da rugosidade superficial.

Os dados de posição e velocidade efetiva da ferramenta de corte foram adquiridos em tempo real utilizando-se de uma placa Profibus CP5611 - Siemens e de uma rotina do software de aquisição de dados Labview instalado em um computador.

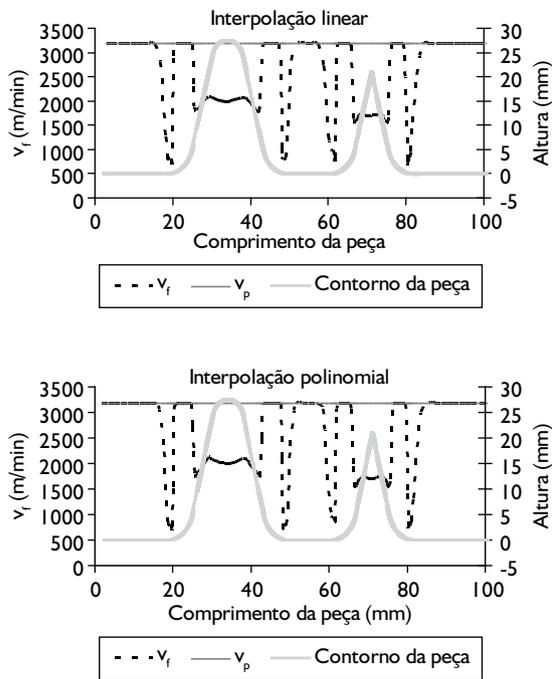
Para quantificar a qualidade dimensional das seções da peça usinada, utilizou-se uma máquina de medição por coordenadas Crysta - Apex C7106 - Mitutoyo, erro máximo de  $(1,7 + 3 L/1000) \mu\text{m}$ , equivalendo a uma exatidão de aproximadamente  $3 \mu\text{m}$  para todas as medições realizadas. A medição do desvio da peça usinada foi realizada por meio do exame de pontos sobre a superfície, onde o sentido de medição da agulha de apalpagem foi o mesmo do sentido de avanço da ferramenta. Nesse exame os contornos da peça usinada (peça real) foram comparados com os contornos extraídos da peça modelada em programa CAD. A tolerância usada para comparar as peças foi configurada com base na maior tolerância aplicada pelo sistema CAM para desvio máximo da trajetória da ferramenta durante a usinagem e seu valor igual a  $\pm 0,025 \text{ mm}$ .

Para quantificar a qualidade superficial das seções da peça usinada, utilizou-se um rugosímetro SJ-201P - Mitutoyo. Os parâmetros de rugosidade considerados nesse trabalho foram: rugosidade média aritmética  $R_a$  e rugosidade média  $R_z$ . O comprimento de amostragem foi definido segundo a NBR 6405/1988,<sup>(8)</sup> que estabelece, no caso de operação de acabamento com fresa, que para uma faixa de  $0,1 < R_a < 2 \mu\text{m}$ , deve ser 0,8 mm. Para cada seção foi calculado um valor médio de rugosidade  $R_a$  e  $R_z$  para três valores medidos.

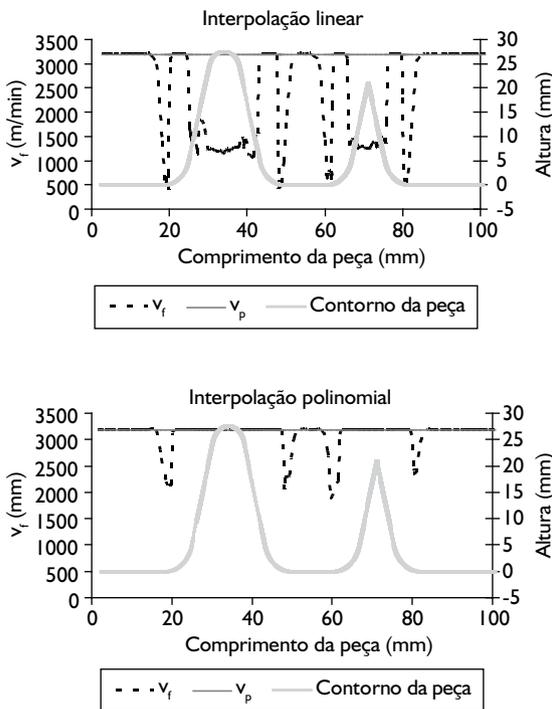
### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O exame do comportamento da velocidade efetiva de avanço ( $v_f$ ) ao longo do contorno da peça, como mostrado na Figura 3, permite verificar que, para a tolerância de 0,025 mm, as interpolações linear e polinomial apresentaram uma descrição similar da velocidade, caracterizada por redução brusca da velocidade nos picos do contorno onde ocorreu inversão da direção do movimento de avanço.

Quando a tolerância foi reduzida para o valor de 0,001 mm, como apresentado na Figura 4, constatou-se que a interpolação linear apresentou maiores reduções de velocidade de avanço, em comparação com a tolerância anterior. Já a interpolação polinomial apresentou um comportamento inverso, ou seja, a  $v_f$  da ferramenta de corte se aproximou da velocidade de avanço programada ( $v_{fp}$ ) no sistema CAM, caracterizando um movimento suave e contínuo durante a usinagem.



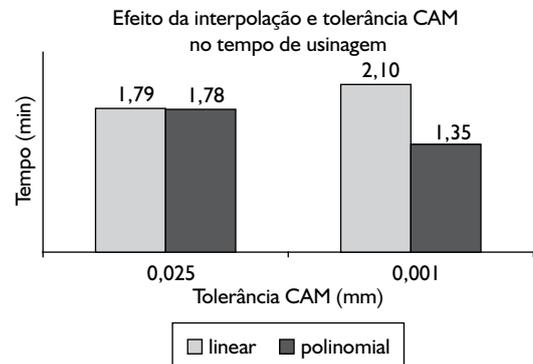
**Figura 3.** Comportamento da velocidade de avanço ao longo do contorno da peça (tolerância CAM 0,025 mm).



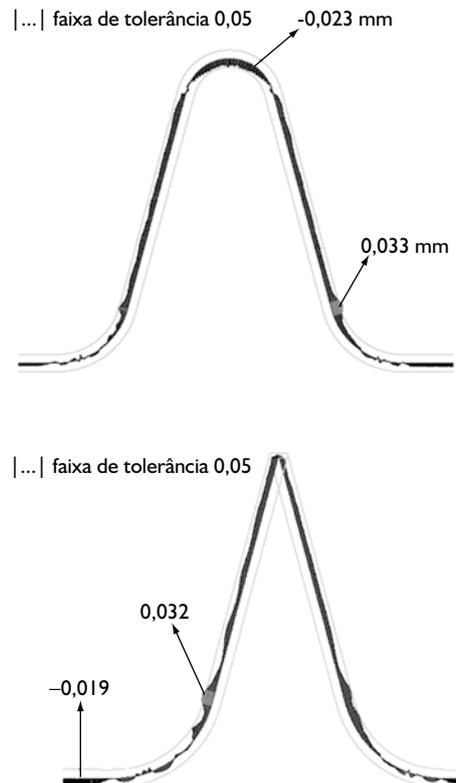
**Figura 4.** Comportamento da velocidade de avanço ao longo do contorno da peça (tolerância CAM 0,001 mm).

Na usinagem da peça em estudo verificou-se que com a tolerância do sistema CAM de 0,001 mm e interpolação polinomial, houve um ganho do tempo de usinagem na ordem de 36%, se comparado à interpolação linear, como pode ser observado na Figura 5.

A análise da medição do perfil por meio do exame de pontos sobre a superfície das seções da peça está representada na Figura 6. Todas as medidas realizadas e comparadas com os contornos extraídos da peça modelada em programa CAD (peça ideal) apresentaram desvios máximos de trajetória da ferramenta em torno de  $\pm 0,025$  mm, independentes do método de interpolação ou do desvio teórico configurado durante a programação CAM.



**Figura 5.** Comparação do tempo de usinagem das seções da peça em função da tolerância do sistema CAM e do método de interpolação.



**Figura 6.** Medidas de contorno realizadas na superfície analisada. Interpolação linear, tolerância CAM = 0,025 mm e  $f = 0,1$  mm.

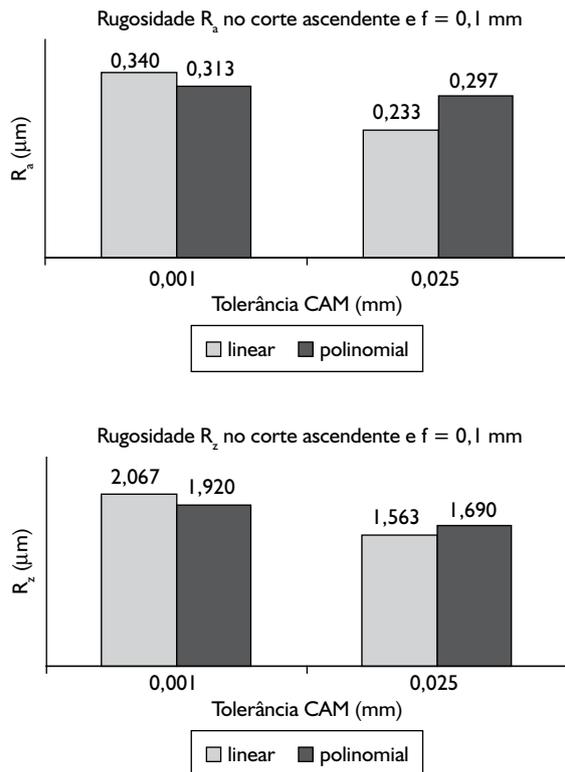
Finalmente os parâmetros de usinagem com relação à qualidade superficial através da medição da rugosidade  $R_a$  e  $R_z$  nas regiões ascendentes, são apresentados na

Baseado nos gráficos da Figura 7, não é possível afirmar que os métodos de interpolação utilizados neste trabalho afetam a rugosidade superficial da peça. A maior diferença foi observada na tolerância CAM de 0,025 mm, mas de modo geral há uma pequena vantagem quando a tolerância do sistema CAM é programada para 0,025 mm.

#### 4 CONCLUSÃO

O estudo dos métodos de interpolação para usinagem de superfícies complexas apresenta um grande campo possível de aplicação e um forte potencial para ganhos de produtividade.

O presente trabalho mostra que há ganho de produtividade quando se investe na escolha do método de interpolação na usinagem de superfícies. Para a metodologia apresentada, o tipo de material e o equipamento utilizado, conclui-se o seguinte:



**Figura 7.** Tanto as rugosidades  $R_a$  quanto a  $R_z$  resultaram em valores maiores para a tolerância de 0,001 mm tanto no corte ascendente quanto no corte descendente, se comparada com os valores relatados para a tolerância de 0,025 mm.

- O conjunto máquina-ferramenta e o desbalanceamento da ferramenta utilizada na usinagem apresentaram uma qualidade dimensional limite em torno de  $\pm 0,025$  mm, independentemente da programação CAM utilizada ou do método de interpolação.
- Com o método de interpolação polinomial e programação CAM reduzida (0,001 mm), houve a vantagem de ganho na velocidade efetiva de usinagem. A redução do tempo de usinagem da peça, em torno de 20 minutos, equivaleu a um benefício de cerca de 36% quanto ao tempo total da operação. Fato este que deve ser considerado na produção de peças complexas. Atribui-se esta vantagem ao aumento da exigência de processamento do controlador e ao pequeno programa gerado pelo CAM para o comando da máquina.
- Por outro lado o método de interpolação linear e programação CAM equivalente à especificação da máquina (0,025 mm), fizeram com que o acabamento superficial da peça apresentasse características ligeiramente superiores ao método polinomial.
- Com as metodologias estudadas é possível melhorar o desempenho e a utilização de máquinas ferramentas, relativo a melhora da qualidade de matriz ou moldes usinados, um menor tempo de usinagem com menor tempo de polimento manual e *try-out* da ferramenta, otimizando-se desta forma o *lead time* na indústria nacional de moldes e matriz.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior, pelo suporte financeiro ao estudo.

## REFERÊNCIAS

- 1 HELLENO, A.L. Investigação de métodos de interpolação para trajetória da ferramenta na usinagem de moldes e matrizes com alta velocidade. 2004. 157p Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Faculdade de Engenharia da Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara D'Oeste, 2004.
- 2 GOMES, J.O. **Fabricação de superfícies de forma livre por fresamento no aço temperado ABNT 420, na liga de Alumínio AMP8000 e na liga de cobre Cu-Be.** 2001. 151f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- 3 SANDVIK COROMANT. **Guia de aplicação:** fabricação de moldes e matrizes. [S.l.: s.n.], 1999.
- 4 YOUNG-KEUN Choi; BANERJEE, A. Tool path generation and tolerance analysis for free-form surfaces. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 3-4, p.689-96, Mar. 2007.
- 5 KRATOCHVIL, R. **Fresamento de acabamento em altas velocidades de corte para eletrodos de grafita industrial.** 2004. 119p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- 6 HELLENO, A.L.; SCHÜTZER, K. Redução do tempo de fabricação na manufatura de moldes e matrizes através do estudo das metodologias de interpolação da trajetória da ferramenta. In: ENCONTRO DE MESTRANDOS, 7.; ENCONTRO DE DOUTORANDOS EM ENGENHARIA, 3., 2003, São Pedro, SP. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2003. v. 2, p. 49-55.
- 7 FALLBÖHMER, P.; ALTAN, T.; RODRIGUEZ, C.A.; ÖZEL, T. High speed machining of cast iron alloy steels for die and mold manufacturing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 98, n. 1, p. 104-115, Jan. 2000.
- 8 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6405/1988:** Rugosidade das superfícies. Rio de Janeiro, 1988.

Recebido em: 27/11/07

Aceito em: 08/04/08

Proveniente de: ENCONTRO DA CADEIA DE FERRAMENTAS, MOLDES E MATRIZES, 5., 2007, São Paulo, SP. São Paulo: ABM, 2007.