

ANÁLISE DA INTERPOLAÇÃO DA TRAJETÓRIA NO FRESAMENTO HSC DE SUPERFÍCIES COMPLEXAS ¹

Jacson Machado Nunes ²
Jefferson de Oliveira Gomes ³
Guilherme Gomes de Souza ⁴
Ricardo Sutério ⁵

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 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 de alta velocidade; Molde e matriz; CNC; CAD/CAM.

ANALYSIS OF THE TOOL PATH INTERPOLATION ON THE HSC PROCESS 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 and mould; CNC; CAD/CAM.

¹ *Contribuição técnica ao 5º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 22 e 23 de agosto de 2007, São Paulo – SP, Brasil.*

² *Engenheiro Mecânico e Aluno de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-Aeronáutica do ITA, Instituto Tecnológico de Aeronáutica.*

³ *Doutor em Engenharia Mecânica e Professor do ITA, Instituto Tecnológico de Aeronáutica.*

⁴ *Mestre em Engenharia Mecânica, Gerente de Projetos em CAD/CAM do SENAI CIMATEC Bahia e Aluno de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-Aeronáutica do ITA, Instituto Tecnológico de Aeronáutica.*

⁵ *Doutor em Engenharia Mecânica, Tecnologista Sênior do INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e Professor do ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica.*

1 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.^(1,2)

Atualmente, de todo o *lead time* de manufatura de um molde ou matriz, a maior parte do 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.⁽²⁾ A etapa de polimento manual é especialmente crítica, pois, por mais hábil que 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.⁽³⁾

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.^(4,5) 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.

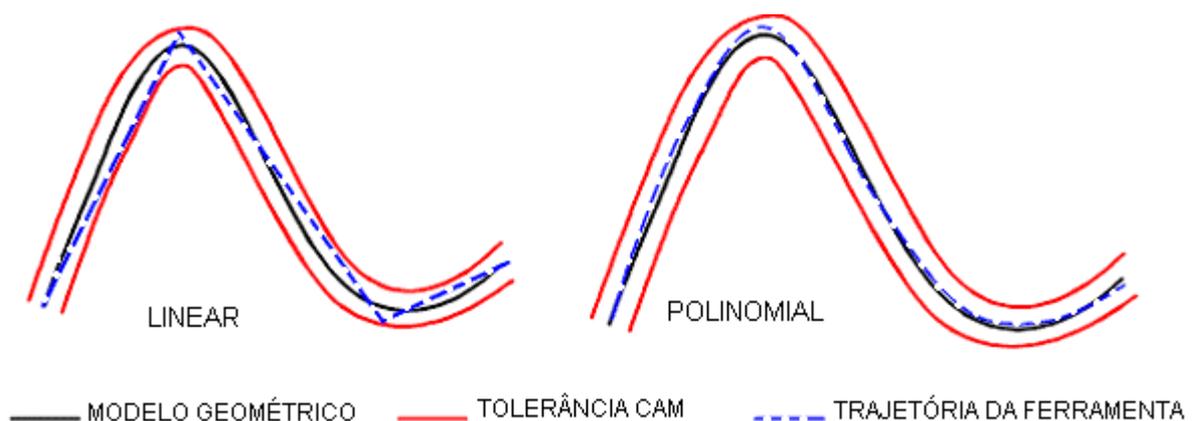


Figura 1: Método de geração do caminho da ferramenta de usinagem.

Ao utilizar a interpolação linear o sistema CAM 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.

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.⁽⁶⁾ Trajetórias de ferramenta baseadas em segmentos de retas têm transições não-contínuas. Para poder lidar com estas situações, o CNC 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.^(3,7)

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 proporcionando 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.⁽⁶⁾

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.⁽¹⁾

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 MÉTODOS

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 usinada em uma liga de alumínio 7050.

Sua superfície foi dividida em seções de 2.1 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, 0.005 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.

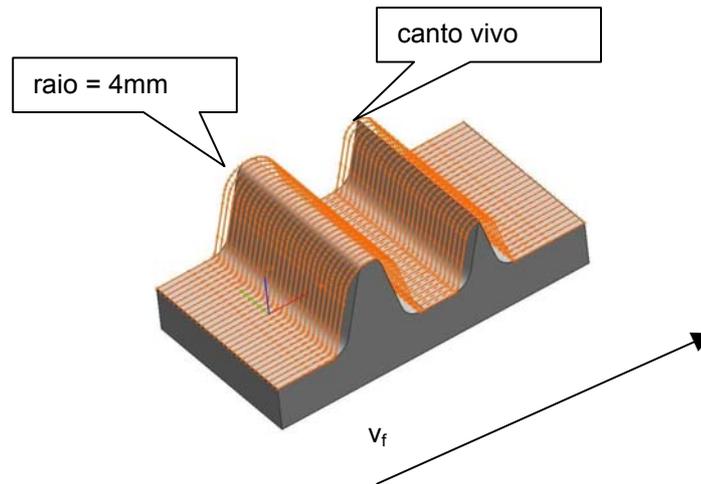


Figura 2: Geometria da peça usinada e direção de avanço da usinagem.

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 usada 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 através 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 $(1,7 + 3L/1000)$ μm , equivalendo a uma exatidão de aproximadamente 3 μm para todas as medições realizadas. A medição do desvio da peça usinada foi realizada através do escaneamento de pontos sobre a superfície, onde o sentido de medição do sensor foi o mesmo do sentido de avanço da ferramenta. Nesse escaneamento 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,⁽⁸⁾ 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 calculados um valor médio de rugosidade R_a e R_z para três valores medidos.

3 RESULTADOS

O exame do comportamento da velocidade efetiva de avanço (v_f) ao longo do contorno da peça, apresentado nas Figuras 3 e 4, permite verificar que, para a tolerância de 0.025 mm, a interpolação 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.

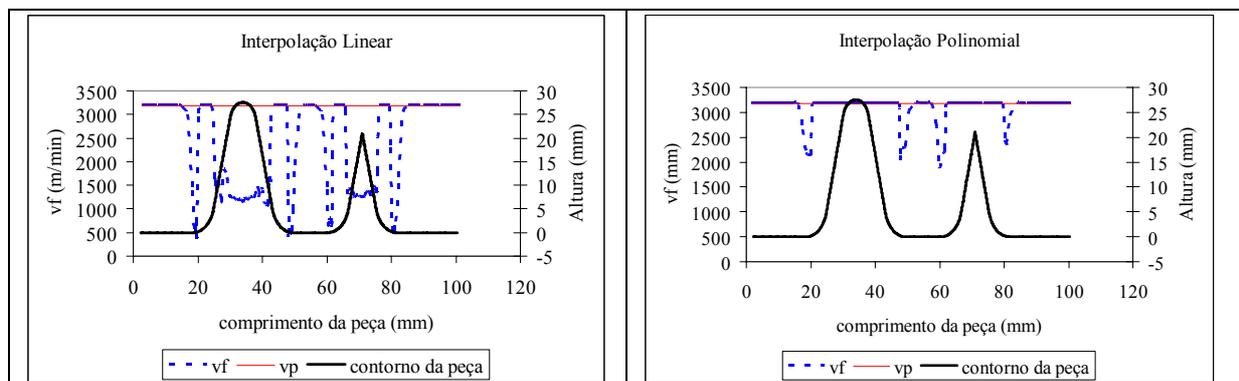


Figura 3: Comportamento da velocidade de avanço ao longo do contorno da peça (Tolerância CAM 0,001 mm)

Quando a tolerância foi reduzida para o valor de 0.001 mm, 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_p) no sistema CAM, caracterizando um movimento suave e contínuo durante a usinagem.

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.

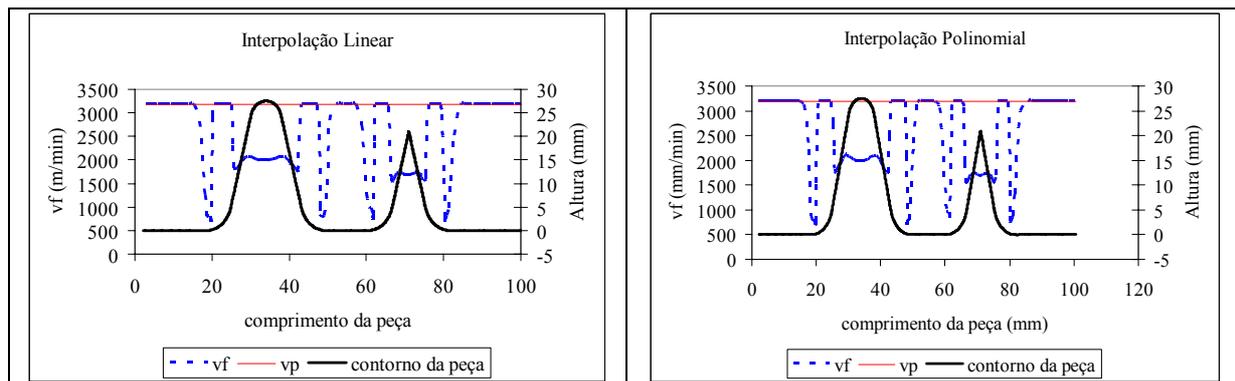


Figura 4: Comportamento da velocidade de avanço ao longo do contorno da peça (Tolerância CAM 0,025 mm)

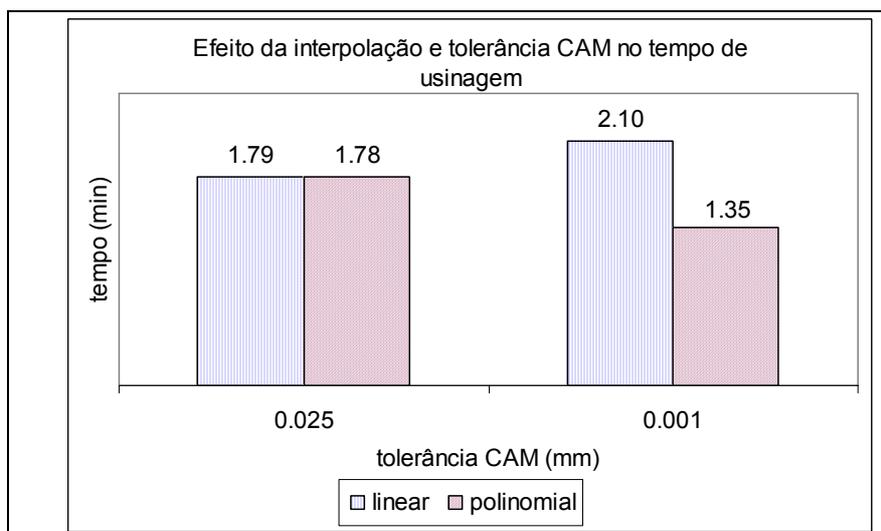


Figura 5: Comparação do tempo de usinagem das seções da peça em função da tolerância CAM e do método de interpolação.

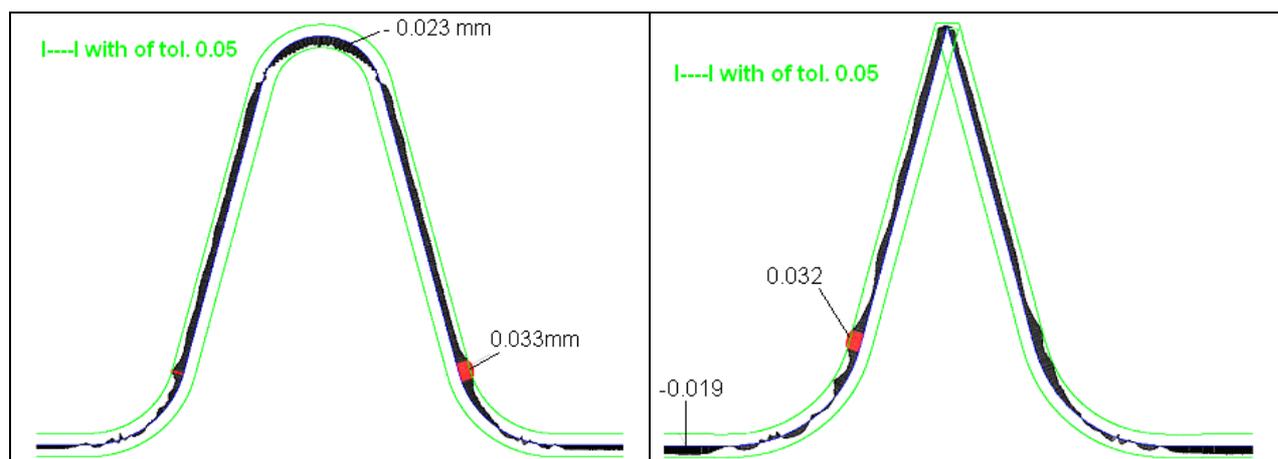


Figura 6: Medidas de contorno realizadas na superfície analisada. Interpolação Linear e Intol/Outtol = 0,025 mm e $f = 0,1$ mm.

O exame da medição do perfil através do escaneamento de pontos sobre a superfície das seções da peça está representado 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 $\pm 0.025\text{mm}$, independente do método de interpolação ou do desvio teórico configurado durante a programação CAM (Intol/Outtol).

Finalmente os parâmetros de usinagem com relação à qualidade superficial através da medição da rugosidade R_a e R_z nas regiões ascendente, são apresentados na Figura 7. Tanto a rugosidade R_a quanto a R_z apresentaram valores maiores para a tolerância de 0.001 mm tanto no corte ascendente quanto no corte descendente, se comparada com os valores apresentados pela tolerância de 0.025 mm .

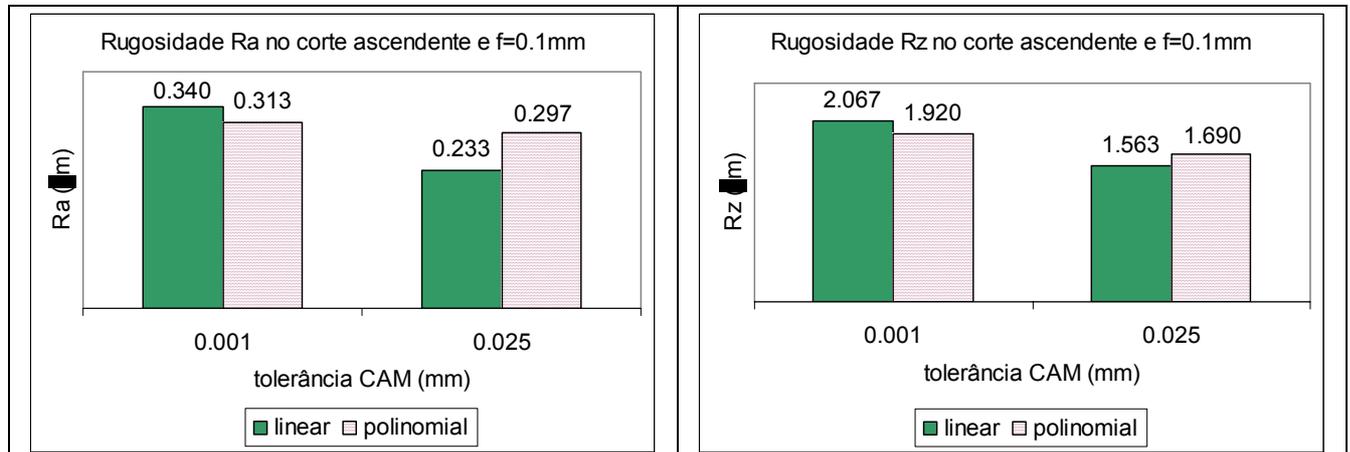


Figura 7: Comparação das medidas de rugosidades R_a e R_z no corte ascendente em função da tolerância CAM e do método de interpolação.

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 $0,025\text{ mm}$, mas de modo geral há uma pequena vantagem quando a tolerância CAM é programada para $0,025\text{ mm}$.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho mostra que há vantagens e desvantagens 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:

O conjunto máquina-ferramenta e o desbalanceamento da ferramenta utilizada na usinagem, apresentaram uma qualidade dimensional limite de $\pm 0.025\text{mm}$ em média, 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. O benefício foi de 36% o que equivaleu a um ganho em torno de 20 minutos na usinagem de uma seção da peça. Fato este 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. Provavelmente devido à menor velocidade efetiva de usinagem que durante o corte com a fresa de topo esférico, a espessura do cavaco gerado permite com que o alumínio não empaste na ferramenta. Fato este também deve ser considerado na fabricação de peças de usinagem complexa.

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. Dissertação. Universidade Metodista de Piracicaba, Março 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. Florianópolis, 2001. 151f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- 3 Guia de aplicação – Fabricação de Moldes e Matrizes – SANDVIK COROMANT, 1999;
- 4 Young-Keun Choi and A. Banerjee, Tool path generation and tolerance analysis for free-form surfaces, International Journal of Machine Tools and Manufacture, In Press, Corrected Proof, , Available online 12 June 2006;
- 5 KRATOCHVIL, R. Fresamento de acabamento em altas velocidades de corte para eletrodos de grafita industrial. Florianópolis, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 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: Anais do VII Encontro de Mestrados e III Encontro de Doutorandos em Engenharia, São Pedro, 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, p. 104-115, 2000.
- 8 Norma Brasileira: Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT Título: NBR 6405/1988 - Rugosidade das superfícies.