

# INTERPOLAÇÃO POLINOMIAL: UM CAMINHO PARA A REDUÇÃO DO TEMPO DE USINAGEM DE MOLDES E MATRIZES<sup>1</sup>

André Luís Helleno<sup>2</sup>, Klaus Schützer<sup>3</sup>

## Resumo

A Tecnologia HSC surge como uma das soluções na manufatura de moldes e matrizes, porém sua aplicação pode encontrar grandes restrições na indústria, uma vez que, não se baseia 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 por completo. Com isso, este artigo analisa a influência da metodologia de interpolação da trajetória da ferramenta (interpolação Linear X Interpolação Polinomial) na aplicação da Tecnologia HSC na indústria de moldes e matrizes.

Palavras Chaves: Tecnologia HSC, CAD/CAM/CNC, Moldes e Matrizes, Interpolação da trajetória da Ferramenta.

## 1. Introdução

Por um longo período o alto *lead time* resultante da manufatura de moldes e matrizes, foi considerado uma característica de seu processo de fabricação em decorrência da complexidade do produto associada à falta de investimento em tecnologia, em que predominavam as habilidades manuais dos trabalhadores e a falta de automatização dos equipamentos.

Este cenário refletia em um alto tempo de fabricação e, conseqüentemente um alto tempo de desenvolvimento de um produto. Tempos estes que eram facilmente absorvidos num mercado movido pela produção seriada, o que juntamente com a grande diversidade nas formas dos moldes e matrizes, não incentivava qualquer evolução tecnológica do seu processo de fabricação.

No entanto, com o avanço da economia mundial em direção da redução de lotes, personalização de produtos, grande diversidade de produtos, redução de seu tempo de vida e principalmente redução do tempo de lançamentos de novos produtos, inicia-se a transformação deste cenário, impulsionando a produção de moldes e matrizes.

Todo este aquecimento na produção de moldes e matrizes fez com que o alto *lead time* do processo de fabricação deixasse de ser uma característica inerente e começasse a ser observado como um problema a ser resolvido e um grande desafio para a indústria, o que culminou no incentivo à evolução tecnológica deste processo

<sup>1</sup> 2º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes.

<sup>2</sup> Msc. Eng. André Luís Helleno - Pesquisador do Laboratório de Sistemas Computacionais para Projeto e Manufatura (SCPM) da Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP).

<sup>3</sup> Dr.-Ing. Klaus Schützer - Coordenador do Laboratório de Sistemas Computacionais para Projeto e Manufatura (SCPM) da Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP).

Dentre esses avanços tecnológicos encontra-se a Tecnologia HSC (*High Speed Cutting*), que surge como uma das soluções, pois apresenta como características a grande remoção dematerial e a alta qualidade superficial, resultando assim na redução do tempo de fabricação, custos e uma melhora significativa no produto final [2].

Esta tecnologia tem sido alvo da maior atenção na Europa, Japão e USA e apesar de ainda ser uma tecnologia em desenvolvimento, 60% da indústria alemã e 95% da indústria japonesa já pretendiam investir nesta tecnologia em 1996 [3].

No Brasil o setor de manufatura de moldes e matrizes atingiu taxas de crescimento da ordem de 10% no ano de 2000 [4], projetando ainda uma situação futura promissora, principalmente pelo fato do alto crescimento da indústria automobilística, o que desencadeou a instalação de empresas européias no país e interesse de outras para investimentos futuros [5].

Porém, a aplicação da Tecnologia HSC pode encontrar grandes restrições na indústria, uma vez que, não se baseia 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 por completo.

Dentre os fatores envolvidos com a Tecnologia HSC, este artigo traz, uma análise da influencia da escolha da metodologia de interpolação da trajetória da ferramenta sobre o tempo de fabricação através da comparação da interpolação linear e polinomial.

## **2. Interpolações da trajetória da ferramenta no programa NC**

Para determinar a trajetória da ferramenta que melhor se adapta à faixa de tolerância CAM, os sistemas podem utilizar diversos métodos de interpolação através de uma variável definida pelo programador. Cada método de interpolação proporcionará características próprias aos programas e conseqüentemente influências distintas na Tecnologia HSC.

Na usinagem tradicional em que as exigências com a velocidade de avanço são menores, os métodos de interpolação da trajetória da ferramenta praticamente foram desprezados como recurso dos sistemas CAM, tornando a interpolação linear um padrão devido à sua simplicidade matemática e facilidade de uso pelo programador.

No entanto, na Tecnologia HSC em que as exigências com as velocidades são maiores, o método de interpolação linear começa a gerar diversas limitações, principalmente quanto ao avanço de usinagem e à exatidão do modelo geométrico. Isto faz com que os métodos de interpolação da trajetória da ferramenta voltassem a serem considerados na geração do programa NC [6].

Isto pode ser verificado na prática através de um teste realizado no Laboratório de Sistemas Computacionais para Projeto e Manufatura (SCPM-UNIMEP) para verificar o comportamento da velocidade de avanço real em função do aumento da velocidade de avanço programada.

Neste teste o programa NC foi gerado pelo sistema CAD/CAM Unigraphics NX1, utilizando a operação de acabamento de um corpo de prova com a interpolação linear e tolerância no sistema CAM de 0,005 mm.

A Figura 1 ilustra os valores encontrados neste ensaio.

Observa-se que para um avanço programado de 500 e 1000 mm/min, o avanço real se mantém constante ao longo de todo o modelo geométrico e com o mesmo valor programado, mas, a medida que o avanço programado aumenta, as variações do avanço real se acentuam nas regiões complexas do modelo geométrico.

Esta variação do avanço real ao longo do corpo de prova influenciará de forma negativa no tempo de usinagem, resultando numa limitação tecnológica na manufatura de moldes e matrizes com altas velocidades. Em virtude disto, o estudo de novas metodologias de interpolação da trajetória da ferramenta se torna fundamental.

Dentre das metodologias existentes este artigo traz uma comparação da interpolação linear e polinomial.

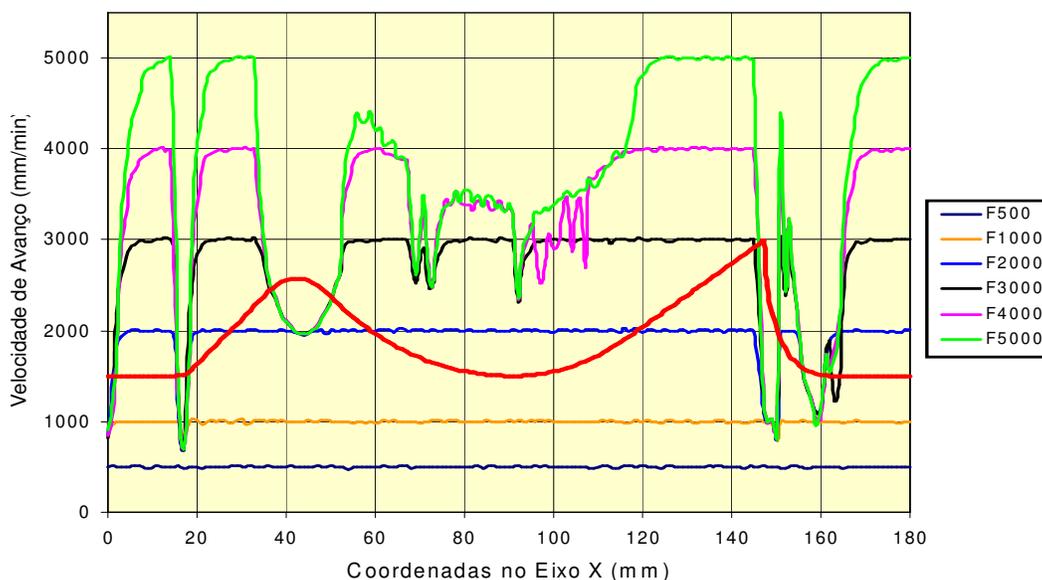


Figura 1: Influência do avanço programado na velocidade real de avanço.

## 2.1. Interpolação Linear

Na interpolação linear o sistema CAM determina a trajetória da ferramenta através da interpolação de segmentos de retas que melhor se adaptam à faixa de tolerância do sistema, conforme ilustrado na Figura 2. Esses segmentos de retas são representados pelo comando G01 da linguagem de programação ISO 6983 [7].

A utilização de segmentos de retas para representar a trajetória da ferramenta faz com que a interpolação linear tenha uma representação matemática mais simples em relação aos demais métodos.

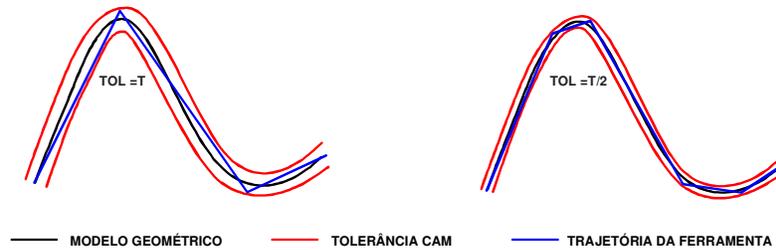


Figura 2: Representação da interpolação linear.

Dentre as características deste método pode-se ressaltar [8, 9]:

- programas NC extensos;
- trajetória da ferramenta representada por segmentos de retas, ocasionando baixa qualidade de acabamento devido ao “faceteamento” da superfície usinada, principalmente para grandes tolerâncias no sistema CAM;
- pequenas tolerâncias no sistema CAM aplicadas em modelos geométricos com superfícies complexas resultam numa trajetória da ferramenta representada por um número excessivo de pequenos segmentos de retas;

Como pode ser observado na Figura 1, o aumento da velocidade de avanço decorrente da Tecnologia HSC, faz com que a utilização da interpolação linear para representar a trajetória da ferramenta resulte em um grande número de problemas, tornando-se inclusive uma limitação tecnológica para a aplicação desta nova tecnologia.

Este fato ocorre principalmente devido a uma característica técnica do comando numérico chamada de tempo de processamento de bloco (TPB). Este é o tempo que o CNC leva para ler um bloco de informação, processar e transmitir estas informações para a máquina ferramenta executar o movimento.

Com isso, o seu estudo é de extrema importância, pois se o tempo de processamento do bloco for maior que o tempo de usinagem do percurso do segmento, a máquina irá atingir o ponto de destino e a informação para o próximo movimento ainda não estará disponível.

Nesse caso, os CNC mais modernos reduzem automaticamente a velocidade de avanço programada para uma velocidade de avanço compatível com a sua velocidade de processamento, resultando em uma menor velocidade de avanço real e conseqüentemente, um maior tempo de usinagem.

Isto faz com que o tempo de processamento de bloco seja uma característica extremamente importante na manufatura de moldes e matrizes com alta velocidade, principalmente na execução de Programas NC gerados através da interpolação linear.

A equação 1 fornece a estimativa do valor máximo de avanço em função do tempo de processamento e do tamanho do segmento de movimento [9].

$$V_a = \frac{\Delta_x}{TPB/60} \quad [1]$$

onde:

$V_a$  = velocidade de avanço [mm/min];  
 $\Delta_x$  = tamanho do segmento de reta [mm];  
 TPB = Tempo de Processamento de Bloco [ms]

## 2.2. Interpolação Polinomial

A partir da aplicação da interpolação polinomial tem-se início a uma nova fase nas metodologias de interpolação da trajetória da ferramenta. A trajetória da ferramenta não será mais representada através da utilização de elementos geométricos simples (Retas e Arcos), como ocorre na interpolação linear e interpolação circular, mas por segmentos de curvas ( $C_0, C_1, \dots, C_n$ ) baseadas em modelos matemáticos, normalmente aplicados pelos sistemas CAD.

Com isso, os sistemas CAM poderão determinar uma trajetória da ferramenta mais suave e precisa que se adapte no campo de tolerância do sistema CAM, conforme ilustrado na Figura 3.

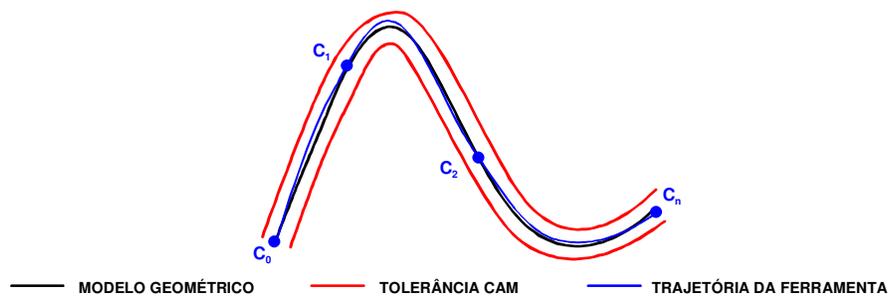


Figura 3: Representação da interpolação polinomial.

No caso da interpolação polinomial, estas curvas serão definidas por uma função polinomial de grau 3, conforme ilustrado na equação 2 [10].

$$f(p) = a_0 + a_1p + a_2p^2 + a_3p^3 \quad [2]$$

onde:

$a_n$  = coeficientes da função polinomial;  
 $p$  = parâmetros;

Dentre as características da aplicação deste método na geração do programa NC, pode-se ressaltar [11]:

- programas NC extremamente menores em relação aos da interpolação linear;

- os segmentos de retas são substituídos por curvas eliminando os problemas decorrentes do tempo de processamento de bloco e picos de aceleração e desaceleração;
- melhor acabamento superficial;
- redução do tempo de usinagem, principalmente para superfícies complexas, uma vez que a velocidade avanço real se aproxima do avanço programado.

O programa NC gerado não irá conter os comandos da linguagem ISO G1, G2 e G3, mas sim, uma linguagem própria para cada comando numérico.

Para o caso do comando Siemens 810D, que esta sendo utilizado nos ensaios práticos deste trabalho, a interpolação polinomial é representada por uma função polinomial de grau 3, através da seguinte sintaxe [10]:

POLY PO[X] = (X<sub>e</sub>,a<sub>2</sub>,a<sub>3</sub>) PO[Y] = (Y<sub>e</sub>,b<sub>2</sub>,b<sub>3</sub>) PO[Z] = (Z<sub>e</sub>,c<sub>2</sub>,c<sub>3</sub>) PL=n

onde:

POLY = ativa a interpolação polinomial;  
 PO[?] = define a interpolação polinomial;  
 X, Y, Z = nome do eixo;  
 X<sub>e</sub>, Y<sub>e</sub>, Z<sub>e</sub> = ponto final da interpolação polinomial;  
 a<sub>2</sub>, a<sub>3</sub> = coeficientes da interpolação polinomial;  
 PL = parâmetro interno que define a amplitude da interpolação polinomial.

### 3. Ensaios

O corpo de prova utilizado nos ensaios de usinagem é parte integrante de um corpo de prova criado pela associação alemã NC-Gesellschaft para homologação de centros de usinagem. Esta geometria foi escolhida por apresentar uma superfície complexa com diferentes graus de curvatura, semelhante às utilizadas nos moldes e matrizes.

A Figura 4 ilustra o corpo de prova utilizado nos ensaios de usinagem.

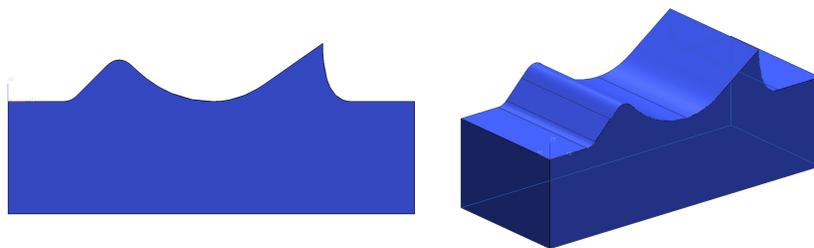


Figura 4: Corpo de prova utilizado nos ensaios.

A usinagem foi realizada em um centro de usinagem vertical, modelo Discovery 760, fabricado pelas Indústrias ROMI S.A. e equipado com o Comando Siemens 810D.

O programa NC foi gerado pelo sistema CAD/CAM Unigraphics NX, utilizando a operação de acabamento do corpo de prova, uma tolerância no sistema CAM de 0,005 mm, um avanço programado de 5000 mm/min e a interpolação linear e polinomial como metodologias de interpolação da trajetória da ferramenta.

Os valores de avanço real foram capturados ao longo do eixo X em intervalos de 1 mm através de uma interface de programação para aquisição de dados chamada de ações síncrona, desenvolvida pelo SCPM com o auxílio do pessoal técnico da Siemens.

Em virtude da influência do tamanho do bloco programado sobre o tempo de processamento de bloco da máquina ferramenta, foi também determinado com o auxílio da Equação 1, o tamanho do segmento mínimo para um avanço programado 5000 mm/min. Para esse cálculo foi considerado o valor de 0,012 ms [12] para o tempo de processamento de bloco da máquina ferramenta..

Para esse avanço, o segmento mínimo apresentou o valor de 1 mm, ou seja, o avanço real somente atingirá 5000 mm/min quanto for programado um segmento maior que 1 mm;

Para a interpolação polinomial os valores obtidos do tamanho do segmento programado apresentam uma imprecisão, uma vez que as coordenadas contidas no programa NC foram consideradas segmentos de retas. No entanto, mesmo com essa imprecisão, é possível representar de forma qualitativa a influência do tamanho do segmento sobre o comportamento do avanço real de usinagem.

#### **4. Resultados**

Os valores obtidos do avanço real da trajetória da ferramenta ao longo do Eixo X estão ilustrados na Figura 5.

Com isso, pode se observar que:

- a velocidade de avanço real da trajetória da ferramenta não é constante, variando de acordo com a geometria da peça e, principalmente de acordo com a metodologia da trajetória da ferramenta;
- a redução do avanço real de usinagem ocorre exatamente nas regiões representadas por pequenos segmentos programados;
- a interpolação linear, por apresentar uma maior quantidade de pequenos segmentos na representação da trajetória da ferramenta, apresentar uma maior quantidade de regiões com redução do avanço real de usinagem;

Em virtude desta variação do avanço real, cada metodologia apresenta um avanço real médio diferente e conseqüentemente, tempos de usinagem distintos; conforme ilustrado na

Figura 6

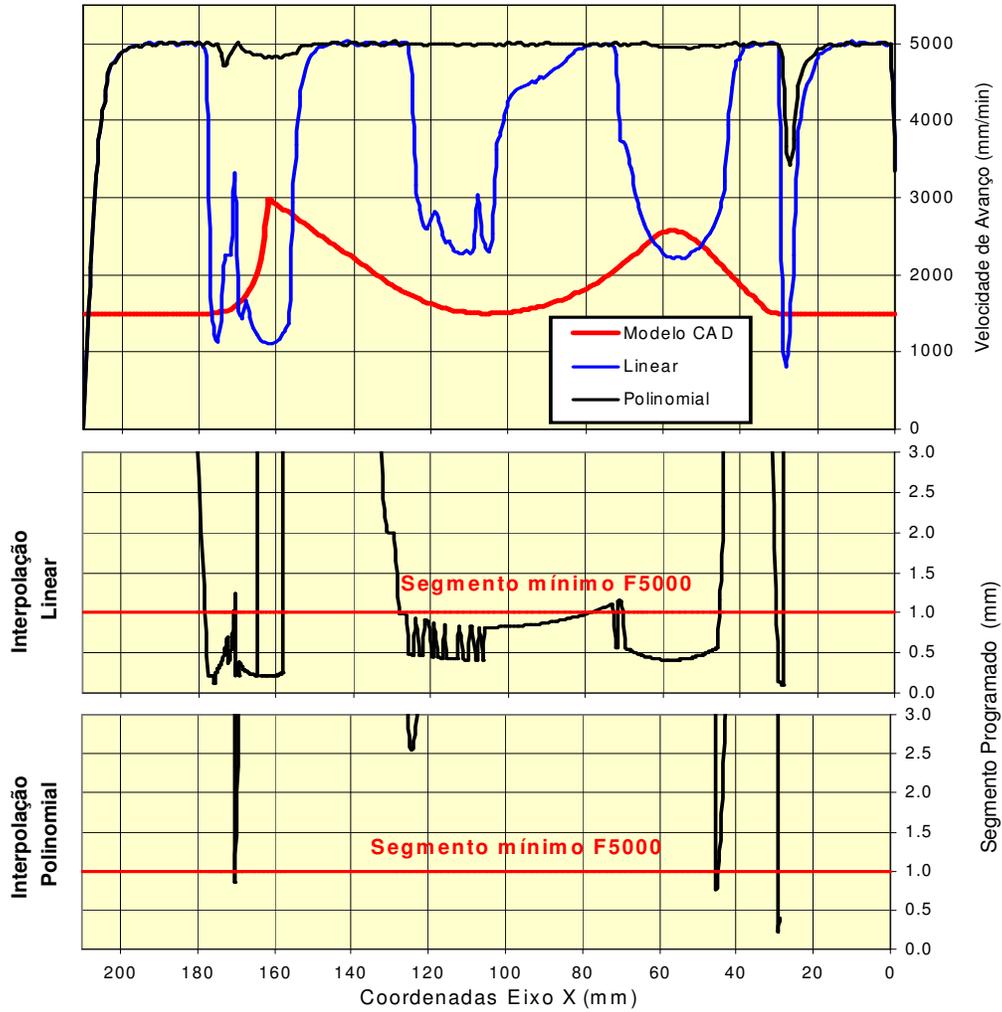


Figura 5: Velocidade de avanço real ao longo do corpo de prova.

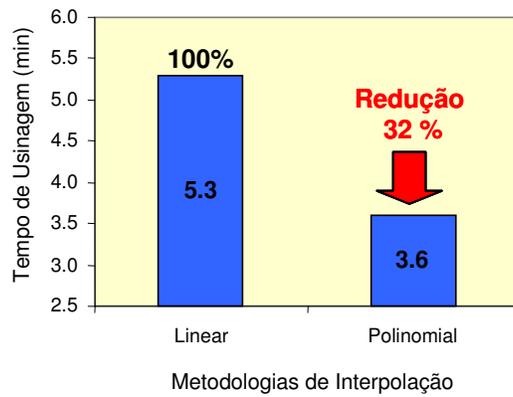


Figura 6: Tempo de usinagem do corpo de prova.

## 5. Conclusões

Com o aumento acentuado do avanço de usinagem, decorrente da Tecnologia HSC na usinagem de moldes e matrizes, a interpolação linear da trajetória da ferramenta, apesar de ser extremamente utilizada pela indústria nacional, torna-se uma limitação tecnológica, criando a necessidade do estudo de novas metodologias de interpolação da ferramenta.

Dentre essas novas metodologias, a interpolação polinomial, apesar de necessitar de recursos especiais do CNC e do sistema CAM, surge como uma das soluções uma vez que apresenta uma grande redução no tempo de usinagem.

No entanto a determinação de um método ideal para representar a trajetória da ferramenta requer o estudo de outras metodologias de interpolação da trajetória da ferramenta, tais como, a interpolação *NURBS* e da influência destes tipos de interpolação na exatidão final e no acabamento superficial do corpo de prova.

## Referências

- [1] ALTAN, T.; LILLY, B.; YEN, Y.C. Manufacturing of Dies and Molds. In: Annals of the CIRP, v. 50, n. 2, 2001.
- [2] SCHULZ, H. *Hochgeschwindigkeitsbearbeitung*. Germany, München: Carls Hanser Verlag, 1996. 286 p. ISBN 3-446-18796-0
- [3] FALLBÖHMER, P.; ALTAN, T.; TÖNSHOFF, H.K.; NAKAGAWA, T. Survey of the die and mold manufacturing industry. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 59, p. 158-168, 1996.
- [4] Setor de máquinas e equipamentos projeta crescimento de 10%. *Revista Metal Mecânica*, São Paulo, n.343, p. 8-12, Jun/Jul. 2000.
- [5] FERRO, S. Moldes. *Plástico Moderno*, São Paulo, v. 31, n. 321, jun. 2001.
- [6] LO, C.C. CNC machine tool surface interpolator for ball end milling of free form surfaces. *International journal of Machine tools & manufacture*, v. 40, p. 307-326, 2000.
- [7] CHOI, B.K.; JERARD, R.B. *Sculptured Surface Machining - Theory and applications*. Netherlands, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. 368 p. ISBN 0-412-78020-8.
- [8] OLLING, G.; CHOI, B.K.; JERARD, R.B. *Machining Impossible Shapes*. Netherlands, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999. 386 p. ISBN 0-07-100846-2
- [9] ARNOME, A. *High Performance Machining*. USA, Cincinnati: Hanser Gardner Publications, 1998. ISBN 1-56990-246-1.
- [10] Sinumerik 840D/840Di/810D/FM-NC. Programming Guide Advanced. 10 ed. 2000.
- [11] MOREIRA, J. Tecnologia CNC para usinagem a alta velocidade. *Máquina e Metais*, São Paulo, v. 39, n. 446, p. 148-159, mar. 2003.

[12] HELLENO, A. L. Usinagem de moldes e matrizes com altas velocidades na faixa de transição para HSC (High Speed Cutting). Dissertação (Trabalho de Graduação) - Universidade Metodista de Piracicaba, 2001.

**Abstract**

*The HSC (High Speed Cutting) technology appears as one of the solutions in die and molds manufacturing, but its application has restrictions in the industry, once that it isn't based only in the high rotation spindle, but is also based on the combination of high speed cutting and feed rate to create a new process which involve factors that is under the influence of HSC technology. This paper analyzes the influence of the tool path interpolation (linear interpolation X polynomialinterpolation) in the application of the HSC technology in die and moulds manufacturing, as a base of this technology development in Brazil.*

*Keywords: High Speed Cutting, CAD/CAM/CNC, Die and Mould, Tool Path Interpolation.*