



## 19 Congresso de Iniciação Científica

### SISTEMA DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA TRAJETÓRIA DA FERRAMENTA REPRESENTADA POR INTERPOLAÇÃO SPLINE

#### Autor(es)

---

MARCO AURÉLIO GARRIDO PRIORE

#### Orientador(es)

---

ANDRÉ LUÍS HELLENO

#### Apoio Financeiro

---

PIBIC/CNPQ

#### 1. Introdução

---

A busca constante em melhorias no processo de desenvolvimento de um produto levou a evolução dos Sistemas CAD na direção do modelamento e manipulação de superfícies complexas, associado às novas exigências funcionais e estéticas no desenvolvimento do produto. Com isso, houve uma grande inserção da representação geométrica através de superfícies complexas.

Nesse sentido, a trajetória da ferramenta gerada pelo Sistema CAM proporciona ao processo de fabricação características relacionadas diretamente com o tempo de usinagem, qualidade final e exatidão geométrica. Dentre as diversas metodologias de geração da trajetória da ferramenta, a interpolação NURBS, possibilita uma trajetória da ferramenta mais suave e precisa, tornando-se uma solução na usinagem de superfícies complexas.

No entanto, esses benefícios estão diretamente relacionados com a qualidade da trajetória da interpolação fornecida para a máquina ferramenta realizar os movimentos de usinagem. Qualidade esta, que é seriamente prejudicada pela utilização de tolerâncias de aproximação do Sistema CAM.

Em virtude disto, inicia-se um movimento pela indústria em busca da integração entre as fases do desenvolvimento do produto, através da utilização de sistemas computacionais e desenvolvimento virtual e simultâneo do produto.

Dentre os sistemas computacionais mais aplicados nas indústrias destacam-se o Sistema CAD e o Sistema CAM.

Então, para obter-se a concepção de um produto e o projeto de fabricação, utiliza-se a cadeia CAD/CAM/CNC como base para o desenvolvimento do produto, tendo em vista sua fácil adaptação, entendimento e praticidade. Sistema CAD é onde se obtém a concepção do produto e projeto de fabricação. Através do Sistema CAM é feito uma simulação da usinagem e gerado um programa NC. CNC é a máquina onde o produto será fabricado.

Na Figura 1, pode-se ver a integração do ciclo CAD/CAM/CNC na manufatura de superfícies complexas.

Dentro da cadeia CAD/CAM/CNC existem opções para os métodos de interpolação da trajetória da ferramenta. Nos tópicos a seguir apresentam-se detalhes sobre esses métodos.

Através da Interpolação Linear, o Sistema CAM irá gerar uma trajetória da ferramenta baseado em segmentos de reta que melhor se adaptem à faixa de tolerância definida pelo programador.

Devido à utilização de segmentos de retas para representar a trajetória da ferramenta, o método de Interpolação Linear tem a representação matemática mais simples se comparado aos demais métodos, como Interpolação Spline, Interpolação Polinomial, Interpolação Circular (HELLENO A. L., 2004).

Interpolação “Spline” é um modelo matemático complexo para representar curvas. Tal modelo representa a trajetória da ferramenta através de curvas, no qual, normalmente são aplicados nos sistemas CAD na representação de curvas, possibilitando uma trajetória da ferramenta mais suave e precisa respeitando o campo de tolerância do sistema CAM (Erkormaz & Altintas, 2001).

Com isso, este projeto buscou integrar esses métodos de interpolação em superfícies complexas. Juntamente com isso, a usinagem em altíssimas velocidades é um ponto fundamental nesse processo.

Nesta direção, a expressão High Speed Cutting (HSC) é hoje a última palavra em termos de tecnologia para usinagem. Esta tecnologia está em constante desenvolvimento, e por isso, existem muitas dúvidas sobre este assunto. As atuais propostas e fundamentos da HSC estão causando hoje o mesmo impacto que o CNC causou há mais 40 anos.

Além do High Speed Cutting (HSC), High Speed Machine (HSM) também tem sido melhorado graças ao considerável avanço sobre o desenvolvimento de novas ferramentas (geometria ideal, materiais mais duros), material usinado (trabalhabilidade e capacidade de usinagem para peças mais pesadas) e finalmente sobre máquinas (alta precisão e poder em altas velocidades, desempenho do sistema de controle numérico) (CAHUC & GERARD, 2006).

A HSC está sendo muito utilizada em indústrias que exigem velocidade de produção conciliada com precisão de usinagem. Isto, devido aos diversos benefícios que à acompanham, tais como tempo de produção e custos reduzido, excelente qualidade de acabamento e menor distorção da peça final, menor stress do material, entre outros.

Não existe uma velocidade que determina se o processo de usinagem está ou não sendo feito em HSC, pois este valor depende de outros fatores como dureza do material a ser usinado, tipo da ferramenta utilizada, etc. No entanto, pode-se apresentar como exemplos velocidades de spindle variando de 20000 até 60000 rpm, e velocidades de corte entre 2 e 20 m/min.

## 2. Objetivos

---

Esse projeto teve por objetivo contribuir para o desenvolvimento de um sistema de avaliação do desempenho prático da trajetória da ferramenta gerada através da Interpolação Spline e integrá-lo como ferramenta de apoio na Integração CAD/CAM/CNC.

## 3. Desenvolvimento

---

Para atingir os objetivos propostos, foi feito o aprimoramento de conhecimento sobre o ciclo CAD/CAM/CNC, Tecnologia HSC e métodos de interpolação da trajetória da ferramenta.

O projeto teve como prioridade discutir quais métodos seriam utilizados para fazer as análises incluindo tipo de ferramenta, material a ser usinado, método de interpolação e método de medição.

Foi utilizado um corpo de prova padrão, no qual se enquadra nos modelos utilizados em indústrias de moldes e matrizes, para realizar os ensaios e a usinagem. Posteriormente, realizar a medição do mesmo para obter a exatidão geométrica e analisar os resultados, conforme ilustrado na Figura 2.

Nos testes práticos, foi utilizado o centro de usinagem ROMI – Modelo Discovery 760 - localizado no laboratório de Automação da Manufatura na UNIMEP, capacidade de velocidade de avanço 10.000 mm/min e equipada com o comando Siemens 810D.

A proposta inicial foi a utilização de ferramentas inteiriças de metal duro, que apesar de seu alto custo em relação à outros tipos de ferramentas, são as mais indicadas para operação que necessitam altas velocidades, boa estabilidade e batimento radial mínimo, ou seja, para operação de manufatura de moldes e matrizes.

As ferramentas utilizadas foram: fresa esférica inteiriça de 16mm de diâmetro, fresa de topo de 12mm de diâmetro.

Com o estudo sobre curvas realizado, pode-se afirmar que a Interpolação Spline, no sistema CAM (Computer Aided Manufacturing), gera a trajetória da ferramenta em segmentos de curvas, que dependendo da tolerância, esta curva pode ser maior ou menor. Se as curvas são maiores, significa que há menos segmentos de curva compondo o programa NC e assim diminuindo o tempo de usinagem. No entanto, ao contrário, levará mais tempo para ser usinado a peça, pois haverá mais segmentos de curvas. O fato de ter mais curvas, quer dizer que o programa NC ficará mais longo e mais demorado. Tal demora pode ser caracterizada pelo tempo de resposta da máquina.

O Tempo de Resposta de Máquina (TRM) é o tempo que o CNC leva para ler um bloco de informação, processar e transmitir estas informações para os motores executarem os comandos de movimento (A.Arnome, 1998).

Ensaio feito no centro de usinagem Discovery, observou-se que a velocidade de avanço programado não era compatível com a velocidade de avanço real. Os ensaios executados consistem em fazer uma trajetória linear de 100mm com segmentos de 1mm, e também de 0,1mm. Foi constatado que o segmento de reta é proporcional á velocidade, pois a cada 1mm a velocidade era de 5400mm/min e com 0,1mm era de 540mm/min.

Portanto, os sistemas CAM são apenas ferramentas que permitem a programação de movimentos, sem visão das condições dinâmicas da máquina, tais como curvas de aceleração e desaceleração, tempo de resposta do comando numérico e quais estratégias são aplicáveis para minimizar estes efeitos. Isto implica em fatores limitantes no processo de manufatura, uma vez que embora o programador coloque um avanço de 15.000mm/min, por exemplo, a máquina irá avançar de acordo com seu limite máximo.

Esta programação está relacionada diretamente com o tipo de produto a ser usinado, ou seja, de acordo com o produto alguns parâmetros são indispensáveis na hora de programar a manufatura. Para isso existem vários parâmetros dentro do Sistema CAM que são muito utilizados.

Esses parâmetros podem ser escolha do tipo de ferramenta, estratégia de usinagem, tolerância CAM, tolerância do tipo de trajetória da ferramenta (linear, spline, etc) entre outros tantos parâmetros que recorrem de acordo com o material.

Uma influencia importantíssima é a tolerância CAM e tolerância do tipo de trajetória da ferramenta. Primeiramente é preciso escolher o tipo de trajetória da ferramenta, pois há diferença quando se trata de Spline. Então, utilizando Interpolação Linear apenas a tolerância CAM é necessária para realizar a manufatura.

Todavia, para a Interpolação Spline, além da tolerância do Sistema CAM, outra tolerância chamada de Tolerância NURBS, ou simplesmente tolerância Spline, é necessária para se realizar a manufatura do produto.

Durante a execução das operações de acabamento dos corpo de prova foram monitorados os seguintes parâmetros:

- Tempo de usinagem total e parcial (tempo de cada passe de acabamento)
- Avanço real em diversos pontos do perfil usinado

Estes parâmetros são de extrema importância para a determinação da velocidade de avanço médio da usinagem e da curva de avanço real. Ambos irão auxiliar na análise posterior para a determinação das características de cada tipo de interpolação da trajetória da ferramenta.

#### 4. Resultado e Discussão

---

Na usinagem, notou-se que o tempo teórico não é o mesmo do que o tempo prático. Isto se deve à influência dinâmica da máquina, ou seja, o tempo de resposta da máquina considerado pelo software é um tempo ideal com características perfeitas. Porém, sabe-se que na prática há diversos fatores que podem influenciar no desempenho do processo de usinagem. Portanto, por esse motivo, o tempo real de usinagem sempre será maior do que o tempo gerado pelo software.

Apesar da velocidade da Interpolação Linear com tolerância de 0,005 mm variar muito ao longo da superfície, e não conseguir chegar na velocidade programada, com a tolerância de 0,05 mm teve um comportamento melhor devido ao aumento da faixa de tolerância para representar aquela superfície. Nota-se também que da região de 80 mm (eixo X) até o final da superfície, a tolerância de 0,05 mm conseguiu chegar na velocidade programada.

A variação da velocidade em relação a posição da Interpolação Spline no decorrer da superfície, contendo o modelo desejado (Modelo CAD), Tolerância Spline de 0,005mm (Spline 5M), 0,05mm (Spline 5C), 0,5mm (Spline 5D) e 0,1mm (Spline 1D). Nela estão inseridas as quatro faixas que representam a Interpolação Spline com a variação de tolerância. Observa-se que as quedas de velocidades ocorrem quando há junção entre os segmentos de curvas.

Analisando as coordenadas 25mm, 43mm e 70mm pode-se observar as variações da velocidade entre as Interpolações Splines. Fazendo uma correlação com o programa NC, observa-se que esta variação está relacionada com a distancia entre os vértices do polígono de controle, assim como estas regiões situam-se de um ponto de união entre duas curvas.

A Figura 3 ilustra o modelo geométrico juntamente com os tipos de interpolação da trajetória e suas respectivas variações de velocidade.

Na Figura 3, observa-se que a Interpolação Spline conseguiu chegar mais próximo da velocidade programada e em alguns pontos mantê-la constante. Isso indica que o tempo de usinagem também é muito parecido com o tempo simulado no software como visto anteriormente.

Pode-se analisar que a velocidade, assim como ocorre em 5000mm/min, em alguns trechos cai devido ao fato da inversão de movimento e do tamanho de segmento, e este por sua vez é determinado pela tolerância de suavização.

Uma analogia pode ser feita da seguinte forma: em regiões de reta ou curvas suaves, o tamanho de segmento se mantém estabilizado, mas quando em regiões críticas o tamanho de segmento diminui.

Essa variação do tamanho do segmento é um dos fatores principais para a variação e queda da velocidade em usinagem em altíssimas velocidades.

Então, conclui-se que a tolerância de suavização da curva (para interpolação Spline) age diretamente no tamanho de segmento, pois com tolerâncias mais apertadas o segmento é menor. Em contra partida, o tamanho de segmento também age diretamente na velocidade, pois quando este é menor a velocidade diminui.

## 5. Considerações Finais

---

De acordo com os tempos de usinagem, verificou-se que em todos os métodos usados para realizar o acabamento houve um aumento no tempo real comparando com o tempo simulado no software. Este aumento se deve pelo fato das características dinâmicas da máquina influenciar diretamente na velocidade de avanço programada.

Portanto, com os dados obtidos nos gráficos de velocidades, observou-se que a Interpolação Linear não conseguiu manter a velocidade programada ao longo da trajetória. Do mesmo modo, a Interpolação Spline também não conseguiu manter a velocidade programada em toda superfície, porém essa queda só foi observada justamente onde havia junção dos pontos do polígono de controle. Juntamente com isto, o gráfico observado mostra que o processo de usinagem depende não somente de um único fator, mas sim de uma cadeia de fatores que influenciam no processo como um todo. Então, foi concluído que ao se diminuir a tolerância de suavização (Spline), o tamanho do segmento diminui também para que seja possível manter a geometria desejada.

Porém, essa diminuição do tamanho do segmento, implica diretamente na velocidade, pois há mais segmentos a ser processado. Com isso, as características dinâmicas da máquina entram como um fator importante neste processo, limitando-o.

Conclui-se então, que a Tolerância Spline conseguiu alcançar a velocidade programada e só nas junções das curvas houve uma queda de velocidade. Entre as tolerâncias Splines a que melhor representou, em termos de velocidade real, foi a tolerância de 0,05 mm. Deste modo, o sistema de avaliação da trajetória da ferramenta, já tem os dados e características prontas para ser desenvolvido

## Referências Bibliográficas

---

HELLENO, A. L. (2004). Investigação de métodos de Interpolação para Trajetória da Ferramenta na Usinagem de Moldes e Matrizes com alta velocidade. Santa Bárbara d'Oeste: Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Metodista de Piracicaba.

Erkormaz, K., & Altintas, Y. (2001). High Speed CNC system design. Part I: jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation. International journal of Machine tools & manufacture.

CAHUC, O., & GERARD, A. (26-27 de October de 2006). Metrology Influence on the Cutting Modelisation. Proceedings of the 15th International Conference on Manufacturing Systems - ICMaS .

A. Arnone. (1998). High Performance Machining. USA: Hanser Gardner Publications.

## Anexos

---



