



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

Inserção da Interpolação Spline na manufatura de superfícies complexas

Marco Aurélio Garrido Priore, marco_garridopriore@yahoo.com.br¹

André Luís Helleno, alhelleno@gmail.com¹

Renato Luis Garrido Monaro, renato_lgmonaro@yahoo.com.br¹

¹Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP – Lab. SCPM, Rodovia Luiz Ometto, km 1 – 13451-900 Santa Bárbara d'Oeste - SP

Resumo: Atualmente a globalização vem intensificando a competitividade em todos os ramos de mercados, fazendo com que as empresas busquem melhorias contínuas na direção de aumento da qualidade do produto, reduções de custos e tempo de manufatura. No contexto da manufatura de superfícies complexas estas melhorias enfrentam a limitação tecnológica relacionada com a trajetória da ferramenta representada por interpolação linear, na qual a trajetória da ferramenta é representada por segmentos de retas. Dentre as inúmeras soluções para esta limitação, inúmeros trabalhos destacam a utilização da Interpolação Spline na representação da trajetória da ferramenta. Neste caso, a trajetória seria representada por uma associação de segmentos de retas e curvas. No entanto, ao utilizar o Sistema CAM para representar a trajetória da ferramenta com interpolação Spline, observa-se que além da tolerância de adaptação da trajetória da ferramenta sobre a geometria CAD (Tolerância CAM), uma nova tolerância de suavização da curva é inserida no processo. Em virtude disto, este artigo visou conhecer e compreender o método de Interpolação Spline, analisando as influências da tolerância de suavização e integrá-lo na indústria de moldes e matrizes. Para atingir esses objetivos, foi utilizado um corpo de prova cuja as características superficiais se assemelha ao utilizado em indústrias de moldes e matrizes. Posteriormente, foi feita a comparação entre o tempo de usinagem, virtual e real, foi feita a comparação da rugosidade superficial e a exatidão geométrica, através da máquina de medir por coordenadas.

Palavras-chave: *Interpolação Spline, CAD/CAM/CNC, Superfícies complexas.*

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. (Choi, B.K.; Jerard, R.B, 1998)

Nesse cenário, a manufatura de superfícies complexas surge como destaque no ciclo de desenvolvimento do produto, uma vez que os processos tradicionais não são capazes de atender os novos requisitos relacionados com o tempo de fabricação e custos, tornando-se assim um fator limitante desse ciclo.

Para obter-se a concepção de um produto e o projeto de fabricação, utiliza-se o ciclo CAD/CAM/CNC como base para o desenvolvimento do produto, tendo em vista sua fácil adaptação, entendimento e praticidade. O Sistema CAD é responsável pela concepção do modelo geométrico do produto e do projeto de fabricação.

O sistema CAM, é responsável pela geração da trajetória da ferramenta de corte e da simulação do processo de manufatura, onde se inclui os parâmetros necessários como: estratégia de corte a ser utilizada, velocidade de corte e de avanço, tipo de ferramenta, tolerâncias, etc. Posteriormente à simulação, é gerado o programa NC contendo a linguagem de programação.

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. Através dessa tecnologia pode-se impulsionar ou limitar a manufatura de superfícies complexas. Dentre as diversas metodologias de geração da trajetória da ferramenta, a interpolação Spline, possibilita uma trajetória da ferramenta mais suave e precisa, tornando-se uma solução na usinagem de superfícies complexas. (Erkorkmaz, K.; Altintas, Y, 2001)

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.

Para melhor entendimento, a Figura 1 ilustra o processo de manufatura desde a concepção do modelo geométrico até a simulação do mesmo. Este processo é mais conhecido como ciclo CAD/CAM/CNC.

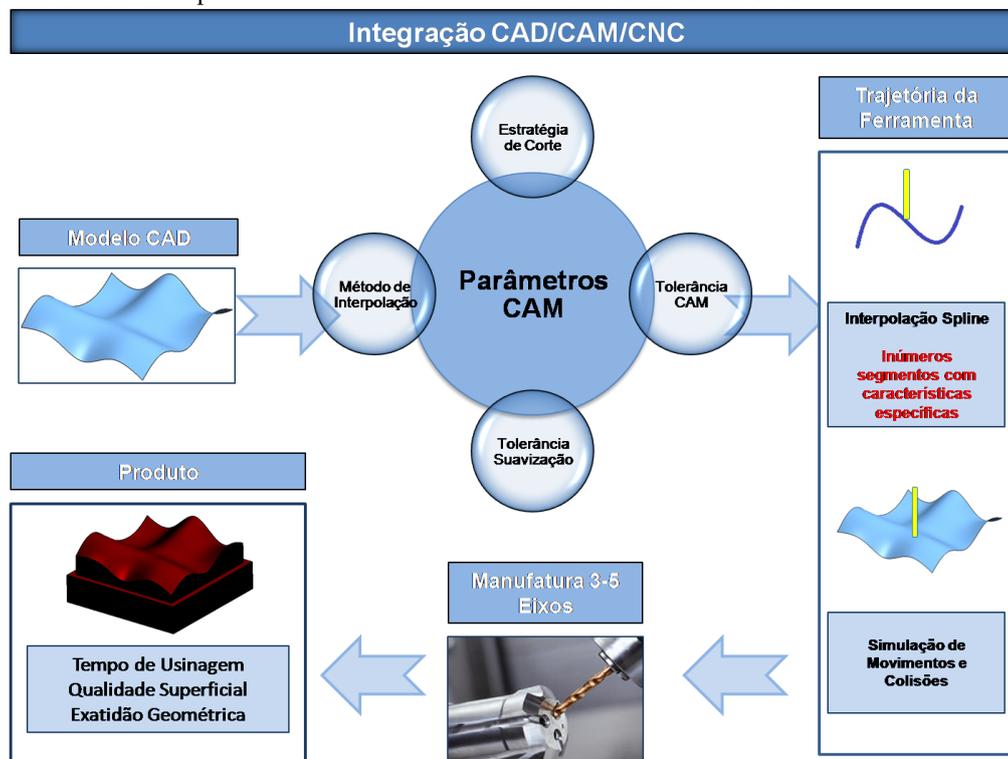


Figura 1: Integração CAD/CAM/CNC na manufatura de superfícies complexas.

Atualmente, as indústrias utilizam como trajetória da ferramenta a Interpolação Linear, que representa a superfície da peça através de segmentos de retas que melhor se adaptam a faixa de tolerância definida pelo programador.

Porém, para a manufatura de superfícies complexas, a utilização da Interpolação Linear se torna limitada, uma vez que para respeitar a geometria da peça dentro da faixa de tolerância desejada, a trajetória da ferramenta será representada por pequenos segmentos de retas que resultarão em reduções da velocidade de usinagem (Arnone, 1998).

Os problemas que pode-se identificar com Interpolação Linear são:

- É o método de mais simples aplicação na indústria devido ao uso de formas matemáticas bastante simples;
- Baixa qualidade de acabamento devido ao “facetamento” da superfície usinada, principalmente para grandes tolerâncias no Sistema CAM;
- Quanto menor for a tolerância no Sistema CAM, maior será o número de segmentos de retas gerados para a trajetória da ferramenta;
- Programas NC extensos.

Dentro desta perspectiva, a Interpolação Spline surge como destaque no ciclo de desenvolvimento do produto, uma vez que utiliza curvas NURBS para a representação geométrica.

As curvas NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline), são curvas representadas por um modelo matemático baseado no modelo B-Spline, com algumas modificações que permitem, entre outras coisas, que os vértices do polígono de controle influenciem na curva de forma não uniforme, sendo possível determinar a intensidade que cada ponto de controle atrai a curva (Mahon, Mc; Browne, J 1993).

Estas características permitem gerar inúmeras possibilidades de curvas para os mesmos pontos de controle, proporcionando ao projetista total manipulação da curva (Costantini, 2000).

Dentre as características da aplicação deste método de interpolação na geração do programa NC, pode-se ressaltar:

- Programas NC extremamente menores em relação aos da interpolação linear em decorrência da necessidade de um número reduzido de pontos para representar a mesma superfície;
- Redução do tempo de usinagem, principalmente em superfícies complexas, já que a velocidade de avanço real se aproxima da velocidade de avanço programada;
- Os segmentos de retas são substituídos por curvas eliminando os problemas decorrentes do tempo de processamento de dados e picos de aceleração e desaceleração;
- Melhor acabamento superficial.

2. OBJETIVOS

Este artigo teve como foco conhecer e compreender o método de Interpolação Spline, assim como analisar as influências da tolerância NURBS e integrá-lo na manufatura de superfícies complexas. Tal integração depende primeiramente do modelo CAD, que será a geometria do produto, posteriormente no sistema CAM serão inseridos os parâmetros de usinagem como estratégia de corte, modelo de interpolação e tolerâncias. Após definidos os parâmetros, define-se o tipo de trajetória da ferramenta para que se possa iniciar a fabricação do produto.

3. DESENVOLVIMENTO

Para atingir os objetivos, os ensaios experimentais foram aplicados no corpo de prova ilustrado na Figura 2, o qual é representado com curvas complexas e regiões côncavas e convexas.

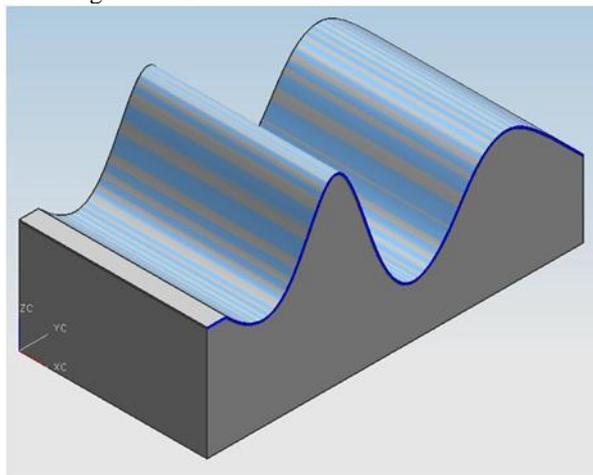


Figura 2: Corpo de prova.

A Figura 3 ilustra o modelo matemático da curva NURBS que representa a geometria do corpo de prova.

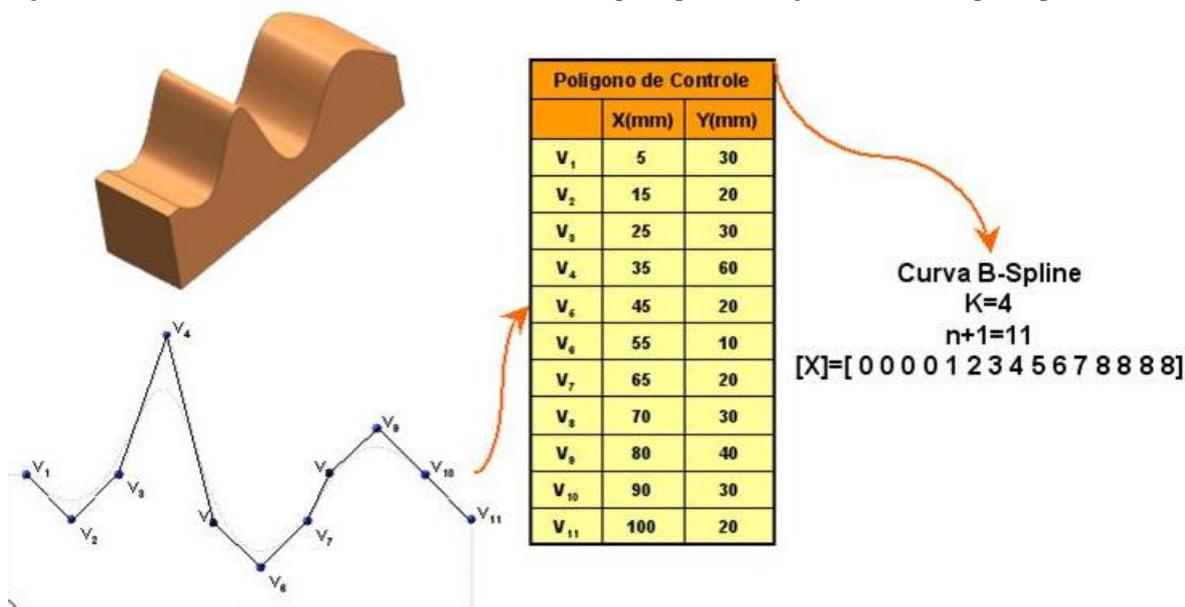


Figura 3: Modelo matemático do corpo de prova.

Para a realização dos ensaios utilizou-se um centro de usinagem, modelo Discovery 760, fabricado pelas Indústrias ROMI S.A., apresentando as seguintes especificações técnicas:

- Avanço rápido: 25.000 mm/min;
- Rotação máxima: 10.000 rpm;
- Máximo avanço programável: 5.000 mm/min;
- Comando Siemens 810D configurado especialmente para a utilização de Interpolação Spline.

Para chegar aos resultados, tendo como base o corpo de prova acima, deve-se iniciar o processo de usinagem através do desbaste. O desbaste tem a finalidade de remover o maior material possível sem se preocupar com a uniformidade do sobremetal deixado para as operações posteriores. Para esta operação foi utilizada a ferramenta de topo com diâmetro de 12mm.

A Figura 4 ilustra a operação desbaste simulada no Sistema CAM.

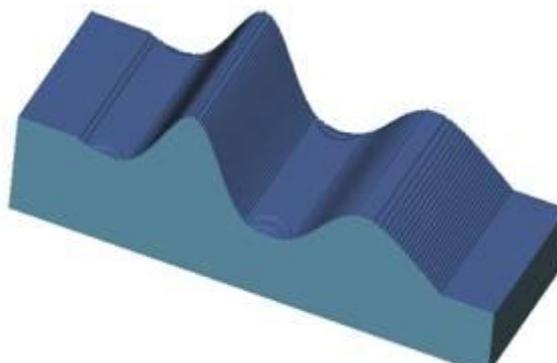


Figura 4: Operação desbaste virtual.

A próxima etapa foi o pré-acabamento, onde busca-se a remoção do sobremetal deixado pelo desbaste a fim de aproximar-se da geometria do modelo, obtendo-se um sobremetal mais uniforme para o acabamento, evitando assim esforços desnecessários para as ferramentas posteriores. A Figura 5 ilustra a simulação do pré-acabamento.

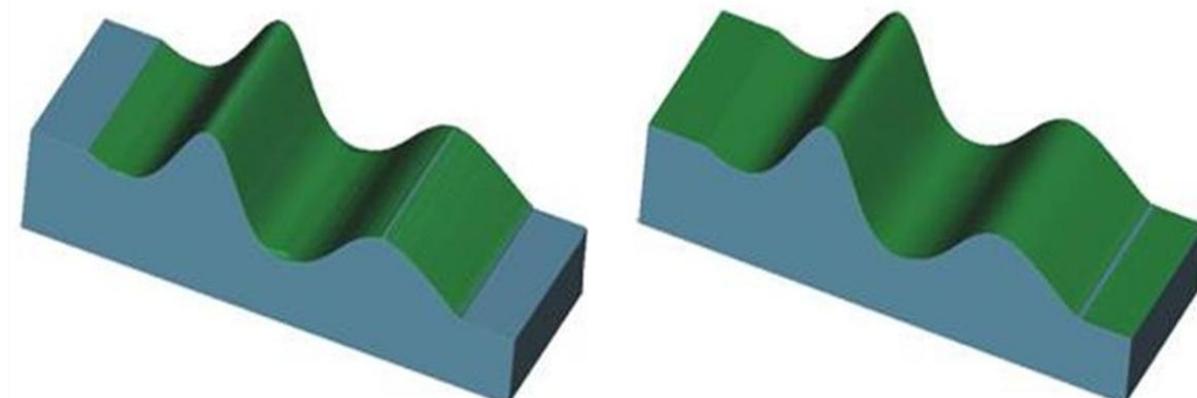


Figura 5: Simulação do pré-acabamento.

Para que se tenha um melhor desempenho na usinagem, necessita-se entender e compreender diversos fatores como estratégia de usinagem, ferramenta, tipo de material e parâmetros de usinagem.

Tendo em vista isto, após feito toda a usinagem da peça até o pré-acabamento, foi feito uma divisão do corpo de prova para realizar o acabamento. Então a peça foi dividida em cinco faixas e cada uma contendo uma estratégia de corte (ou usinagem) e uma tolerância específica, como visto na Figura 6.

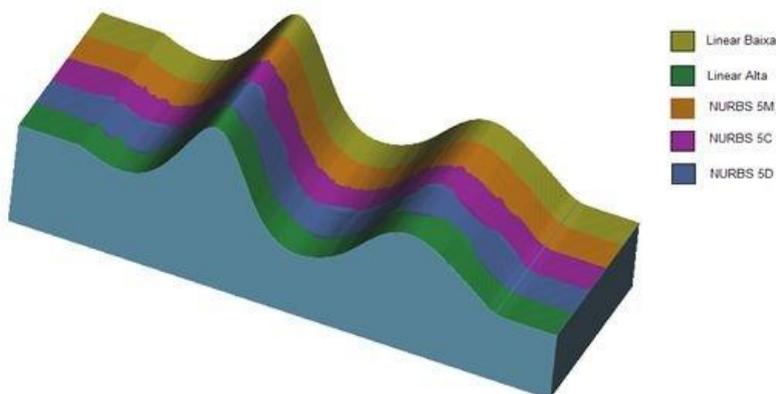


Figura 6: Corpo de prova com as respectivas faixas.

Na primeira faixa utilizou-se interpolação linear (segmentos de reta) para representar a superfície da peça, com uma tolerância apertada, 0,005mm (tolerância baixa). As análises feitas mostram que seu acabamento superficial ficou com alta qualidade e precisão geométrica.

Na segunda, terceira e quarta faixa, utilizou-se interpolação spline (segmentos de curvas) para representar a superfície da peça, com uma tolerância de 0,005mm, 0,05mm e 0,5mm, respectivamente. Através de uma análise visual, notou-se que a qualidade superficial entre as três faixas não mudaram tanto. Porém, quando comparada com a primeira faixa, observa-se que ficou um pouco inferior na qualidade do acabamento. Porém, o programa NC da interpolação Spline (NURBS) ficou bem menor comparado ao linear e também o tempo de usinagem ficou cerca de 6 vezes mais rápido.

A quinta e última faixa ocorreu um erro onde não foi possível detectar. Portanto esta última faixa não foi incluída nas análises.

A Figura 7, ilustra o acabamento do corpo de prova real com suas respectivas faixas e diferentes estratégias.

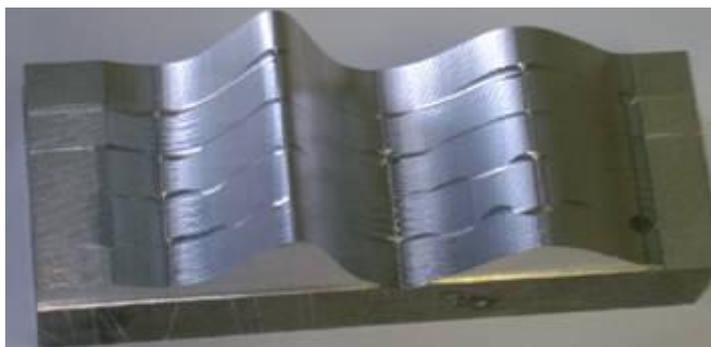


Figura 7: Acabamento final real.

Depois de usinado o corpo de prova, foi feita uma análise entre a variação da velocidade ao longo da trajetória e a posição do eixo X. Para realizar a medição, foi preciso gerar um programa onde apenas uma linha de cada faixa fosse gerada. Depois de feito o programa, foi usinado em vazio na máquina para colher os parâmetros R gerado pela mesma, para assim iniciar as análises.

Um detalhe que deve ser observado é a questão da capacidade da máquina poder guardar somente 99 parâmetros. Pelo fato da peça ter um tamanho de 130mm e a coleta dos dados a cada 1mm foi preciso retirar 15mm no início e 15mm no final do programa NC para que o programa que fará a coleta de dados consiga recolher os parâmetros da superfície complexa. Esta coleta foi feita através de um computador conectado ao centro de usinagem, utilizando o software Lab View.

4. RESULTADOS

A Figura 8 ilustra a velocidade real de todas as faixas de tolerâncias, tanto Interpolação Linear quanto Spline, no decorrer da superfície. Foi observado que a interpolação linear teve um desempenho variado ao longo da superfície. Já a Interpolação Spline, com a variação de tolerância, mostra que as quedas de velocidades ocorrem quando há junção entre os segmentos de curvas.

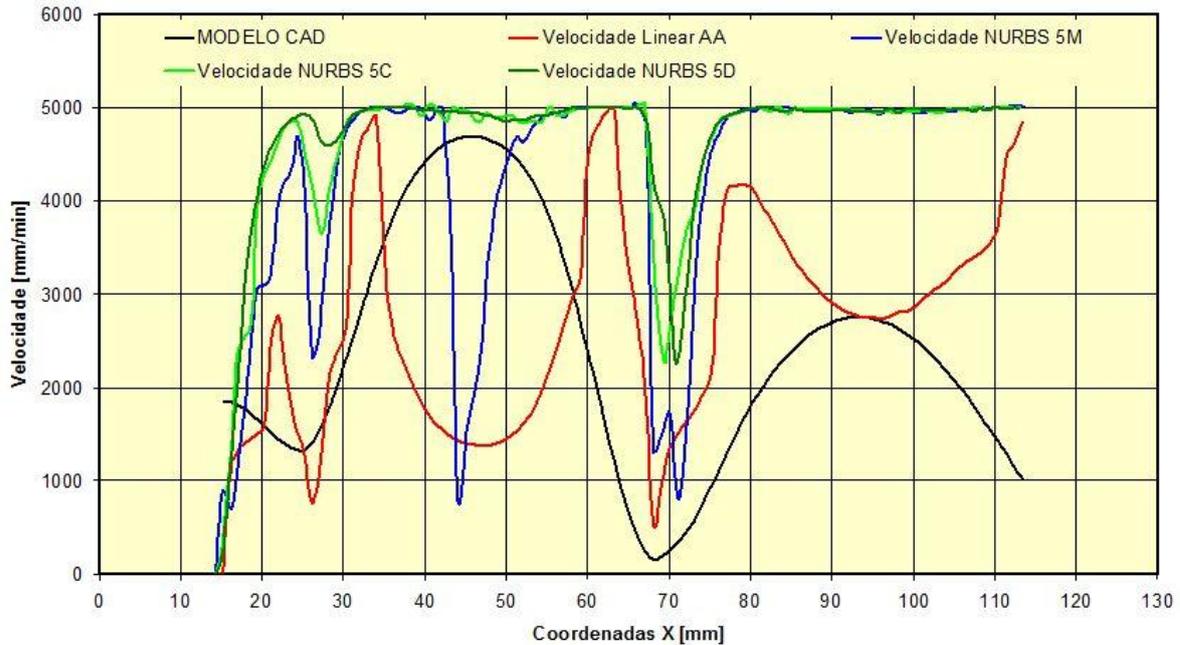


Figura 8: Gráfico de velocidade comparado com modelo geométrico.

Observando o gráfico, tirou-se a conclusão 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.

Analisando as regiões de 25mm, 43mm e 70mm, pode-se observar variações entre as Interpolações Splines. Observando o programa NC, ilustrado na Figura 9, pode-se analisar as seguintes distinções entre as Interpolações, o que pode indicar o motivo pelo qual isso ocorreu. No trecho 43mm observou-se que a única variação foi justamente na pequena distancia entre os vértices do polígono de controle. O mesmo ocorre na região 25 e 70, com suas respectivas distancias devido á tolerância.

```
N0360 X43.325 Y36. Z-2.369 PL=.0065
N0370 X43.418 Y36. Z-2.345 PL=0.
N0380 BSPLINE X43.511 Y36. Z-2.323 F5000. PL=0. SD=3.
N0390 X43.669 Y36. Z-2.286 PL=.0059
N0400 X44.26 Y36. Z-2.165 PL=.0059
```

Trecho Spline 5M

```
N0190 X38.772 Y27. Z-3.663 PL=.3167
N0200 X43.164 Y27. Z-2.411 PL=0.
N0210 BSPLINE X44.733 Y27. Z-1.976 F5000. PL=0. SD=3.
N0220 X47.141 Y27. Z-1.935 PL=.1108
N0230 X51.04 Y27. Z-3.298 PL=.049
```

Trecho Spline 5C

```
N0130 X34.261 Y18. Z-5.632 PL=.631
N0140 X43.164 Y18. Z-2.411 PL=0.
N0150 BSPLINE X47.143 Y18. Z-.809 F5000. PL=0. SD=3.
N0160 X59.893 Y18. Z-8.368 PL=.253
N0170 X60.821 Y18. Z-25.081 PL=.6687
```

Trecho Spline 5D

Figura 9: Programa NC NURBS, trecho 43mm.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observando o cenário mundial, a tendência é a busca cada vez mais de tecnologia e suporte técnico para que seja alcançada a máxima otimização do processo de fabricação. Pode-se concluir que a utilização de softwares para auxiliar a manufatura de um modo geral, é hoje indispensável para quem almeja obter o máximo de lucro e qualidade em seus produtos.

Com esses softwares é possível analisar para cada caso específico, qual método é mais eficiente a ser utilizado numa determinada peça e qual a estratégia que melhor se adapta ao resultado esperado. Observa-se então que a Interpolação Spline através da utilização de NURBS pode levar vantagens na otimização de processo quando se utilizam superfícies complexas.

Analisando o programa NC da Interpolação Spline, constatou-se que há variedade no tamanho de segmento de curvas. Se há mais curvas maiores, quer dizer que menos pontos representam o mesmo tamanho de segmento, com isso implicando possivelmente na redução de 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 representa a mesma trajetória só que com maior número de pontos, e neste caso o tempo de leitura da máquina é um fator limitante neste processo.

Com os dados obtidos nos gráficos de velocidades, observou-se em algumas regiões uma grande queda da velocidade. Mas, através do gráfico, ainda não foi possível determinar que variável ou fator que gerou tal queda, então busca-se algo na análise do programa NC e constatou-se que a variação está diretamente relacionada com a distância entre os vértices do polígono de controle que representa a curva.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arnome, A. High Performance Machining. USA, Cincinnati: Hanser Gardner Publications, 1998. ISBN 1-56990-246-1.

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.

Costantini, P. Curve and surface construction using variable degree polynomial splines. Computer Aided Geometric Design, v. 17, p. 419-446, 2000.

Erkorkmaz, K.; Altintas, Y. High Speed CNC system design. PartI: jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation. International journal of Machine tools & manufacture, v. 41, p. 1323-1345, 2001.

Heng, M., & Erkorkmaz, K. (11 de Novembro de 2009). Design of a NURBS interpolator with minimal feed fluctuation and continuous feed modulation capability. Machine Tools & Manufacture, pp. 1-36.

Lartigue, C.; Tournier, C.; Ritou, M.; Dumir, D. High performance NC for HSM by means of Polynomial Trajectories. In: Annals of the CIRP, v. 53, n. 1, 2004.

Mahon, Mc.; Browne, J. CAD/CAM from Principles to Practice. UK, Suffolk: Addison-Esley, 1993. 508 p. ISBN 0-201-56502-1

Souza, A. F., & Arias, M. (2008). Descrição matemática das funções Spline. Máquinas e Metais, 290-311.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos no seu trabalho.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

Insertion of Spline Interpolation in the manufacture of complex surfaces

Marco Aurélio Garrido Priore, marco_garridopriore@yahoo.com.br¹

André Luís Helleno, alhelleno@gmail.com¹

Renato Luis Garrido Monaro, renato_lgmonaro@yahoo.com.br¹

¹Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP – Lab. SCPM, Rodovia Luiz Ometto, km 1 – 13451-900 Santa Bárbara d'Oeste - SP

***Abstract:** Currently, globalization is intensifying competition in all branches of the markets, causing companies to seek continuous improvements toward increasing product quality, cost reductions and manufacturing time. In connection with the manufacture of complex surfaces facing these improvements technological limitation related to the trajectory of the tool represented by linear interpolation, in which the trajectory of the tool is represented by straight line segments. Among the several solutions to this limitation, several studies highlight the use of Spline Interpolation representation of the trajectory of the tool. In this case, the trajectory would be represented by a combination of straight lines and curves. However, when using the CAM system to represent the trajectory of the tool with Spline interpolation, it is observed that beyond the tolerance for adjusting the trajectory of the tool on the CAD geometry (Tolerance CAM), a new tolerance of smooth curves is inserted into process. Because of this, this paper was to know and understand the Spline interpolation method, analyzing the influences of tolerance smoothing and integrate it into the mold and die industry. To achieve these objectives, we used a specimen whose surface characteristics are similar to that used in die and mold industries. Subsequently, the comparison was made between the machining time, virtual and real, was done to compare the geometric accuracy and surface roughness through the machine for measuring coordinates.*

Keywords: *Spline interpolation, CAD / CAM / CNC, surface complex.*

The authors are solely responsible for the content of the printed material included in his work.