



## 9º Congresso de Pós-Graduação

**AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE USINAGEM NA MANUFATURA DE SUPERFÍCIES COMPLEXAS CONSIDERANDO AS CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS DA MÁQUINA-FERRAMENTA****Autor(es)**

RENATO LUIS GARRIDO MONARO

**Orientador(es)**

ANDRÉ LUIS HELLENO

**1. Introdução**

Os avanços tecnológicos na manufatura tiveram uma acentuada ascensão a partir da necessidade das empresas em se adequarem ao novo cenário econômico que surgiu nos últimos anos devido o processo de globalização. Dentre os efeitos desse processo destaca-se a maior liberdade, por parte dos consumidores, para escolher produtos com melhor qualidade e menor custo, resultando no aumento do nível de competitividade entre as empresas. (GAITHER; FRAZIER, 2002) (RIBEIRO et al.; 2003)

Dentre as diversas áreas que sofreram com estas mudanças destaca-se a indústria de moldes e matrizes, pois o atual nível tecnológico de seus processos de fabricação não permite atender a crescente demanda no desenvolvimento de produtos cada vez mais individualizados e principalmente, representados geometricamente por superfícies complexas.

Neste contexto, a busca pela excelência no processo de manufatura de superfícies complexas está diretamente relacionada com a otimização dos fatores relacionados com o tempo de usinagem e, conseqüentemente com a cadeia CAD/CAM/CNC.

No uso desta cadeia, especialmente nos sistemas CAM, os processos decisórios sobre parâmetros de corte e estratégias de usinagem são determinados através dos conhecimentos implícitos do programador, sendo que, para isto, estes sistemas fornecem como indicadores de desempenho a simulação virtual de colisão do par ferramenta-peça e o tempo de usinagem teórico.

A simulação virtual de colisão tem sido amplamente desenvolvida de forma a ser atualmente uma ferramenta eficaz para o programador NC simular as colisões que poderão existir na execução do programa NC. Porém, o mesmo não pode ser afirmado em relação aos indicadores de tempo de usinagem. Isto ocorre em virtude deste tempo ser calculado em função dos movimentos ideais da máquina-ferramenta, ou seja, desprezando as suas condições dinâmicas, tais como, curvas de aceleração, tempo de resposta do comando numérico, comportamento das vibrações (RODRIGUES, 2010).

O cálculo do tempo de usinagem, normalmente utilizado pelos Sistemas CAM, denominado neste artigo como Tempo de Usinagem CAM ( $TU_{CAM}$ ), é determinado pela somatória dos percursos realizados com avanço rápido (Deslocamentos de aproximação e recuo – G0) e dos percursos realizados com avanço programado (Movimentos de corte – G1), conforme ilustrado na Eq. (1).

$$TU_{CAM} = \left[ \frac{G0}{VaG0} + \left( \frac{G1}{Va} \right) \times 60 \right] \quad (1)$$

na qual:

$TU_{CAM}$  = Tempo de Usinagem CAM [s]

G0 = Deslocamento com avanço rápido [mm]

VaG0 = Velocidade de Avanço Rápido [mm/min]

G1 = Deslocamento com avanço programado [mm]

Va = Velocidade de Avanço Programado [mm/min]

Observando a Eq.(1) verifica-se que a variação da velocidade de avanço em função das características dinâmicas de movimento

conforme a geometria da trajetória da ferramenta não é considerada na determinação do tempo de usinagem, fazendo com que haja uma considerável diferença entre o tempo de usinagem CAM e o tempo real de usinagem.

Na manufatura de superfícies complexas, em que o tamanho do segmento da trajetória da ferramenta e a inclinação entre eles influenciam bruscamente na variação da velocidade de avanço (STROH, 2005), verifica-se que o tempo de usinagem CAM irá se distanciar consideravelmente do tempo de usinagem real.

Han et al. (1999) destacam a limitação da velocidade de avanço em função da capacidade de processamento do comando numérico em interpretar e processar a grande quantidade de blocos de informação (Look ahead) resultantes da aplicação da Interpolação Linear em superfícies complexas.

Arnone (1998) aborda esse mesmo problema relacionando o Tempo de Resposta de Máquina (TRM) e o tamanho do segmento da trajetória da ferramenta, conforme observado na Eq. (2).

$$TRM = \frac{\Delta x}{V_a} \times 60 \quad (2)$$

na qual:

TRM = Tempo de Resposta de Máquina [s]

$\Delta x$  = Deslocamento da trajetória da ferramenta em um eixo [mm]

$V_a$  = Velocidade de Avanço Programado [mm/min]

Baseado na Eq. (2) pode-se observar que o TRM será um fator limitante da velocidade de avanço em situações em que a trajetória da ferramenta seja representada por pequenos segmentos de retas, característica esta, comum na manufatura de superfícies complexas.

Além do TRM, Stroh (2005) e Heo (2006) destacam, em seus estudos, a limitação da velocidade de avanço em função da variação da aceleração decorrente do ângulo de inclinação entre os segmentos de retas.

Com isso, na geração da trajetória da ferramenta em um Sistema CAM, a quantidade de segmentos de retas, o tamanho destes segmentos, assim como, a inclinação entre os mesmos, serão fatores determinantes no tempo de usinagem.

## 2. Objetivos

---

O objetivo desse artigo é demonstrar o desenvolvimento do Índice de Desempenho Dinâmico (IDDyn) baseado nas informações da máquina-ferramenta, do CNC e da estratégia de usinagem para avaliação da trajetória da ferramenta antes da geração do programa NC. Esse novo índice permitirá a avaliação quantitativa das reais condições da trajetória da ferramenta, permitindo assim o cálculo de um tempo de usinagem mais próximo do tempo real de usinagem, conforme ilustrado na Figura 1.

## 3. Desenvolvimento

---

A Figura 2 ilustra o corpo de prova e as estratégias de corte utilizados para os ensaios experimentais. Este corpo de prova apresenta, em sua geometria, superfícies complexas que atendem às características estudadas na cadeia CAD/CAM/CNC, o que permite que os resultados alcançados com a aplicação de diferentes estratégias de usinagem possam ser melhor avaliados através do uso do IDDyn.

A grande diferença entre os graus das curvaturas do corpo de prova permitiu uma ampla possibilidade de análises para as diferentes estratégias de usinagem aplicadas na manufatura de superfícies complexas.

Sabe-se que o planejamento do caminho da ferramenta é uma tarefa crítica na manufatura de superfícies complexas (CHOI; JERARD, 1998) (MCMAHON; BROWNE, 1999) (LASEMI et al., 2010). Cada estratégia de usinagem pode ser mais adequada para uma específica geometria, como, por exemplo, áreas planas, inclinadas, côncavas e convexas. A escolha dentre as diferentes trajetórias de ferramenta pode representar uma grande influência sobre o tempo necessário para a usinagem, desgaste de ferramentas de corte e qualidade superficial (SOUZA; COELHO, 2003) (MCMAHON; BROWNE, 1999).

Para a realização dos ensaios, foram utilizados três tipos diferentes de velocidades de Avanço ( $V_a = 1.000, 3.000$  e  $5.000$  mm/min) executadas em um centro de usinagem vertical, modelo Discovery 760, fabricado pelas Indústrias ROMI S.A. equipado com Comando Siemens 810D.

Após a definição do corpo de prova e do centro de usinagem utilizados para os ensaios experimentais, inicia-se o equacionamento para a determinação do IDDyn. Para este equacionamento, foi levada em consideração as características dinâmicas de Tempo de Resposta de Máquina (TRM), inclinação entre os segmentos e curvas de aceleração e desaceleração.

A partir do valor de TRM, determina-se o valor da Velocidade Real de Avanço para cada segmento gerado no sistema CAM, definida pela Eq.(3):

$$V_R = \frac{S}{(TRM \cdot 60)} \quad (3)$$

na qual:

$V_R$  = Velocidade Real de Avanço [mm/min]

?S = Tamanho do Segmento [mm]

TRM = Tempo de Resposta da Máquina [s]

Em seguida, considerando também os efeitos dinâmicos da inclinação entre segmentos e as curvas de aceleração e desaceleração da máquina, e relacionando o  $TU_{CAM}$ , definido na Equação 1, substituindo o valor da Velocidade de Avanço Programada ( $Va$ ), também na Equação 1 pela Velocidade Real de Avanço ( $VR$ ) calculada pela Equação 3, define-se o Tempo de Usinagem Aproximado ( $TU_{Ap}$ ), conforme Equação 4.

$$TU_{Ap} = \left( \frac{?G0}{VaG0} + \left( \frac{?G1}{VR} \right) \times 60 + ?t_{ad} + ?t_{inc} \right) \quad (4)$$

na qual:

$TU_{Ap}$  = Tempo de Usinagem Aproximado (s)

?G0 = Deslocamento com avanço rápido (mm)

VaG0 = Velocidade de Avanço Rápido (mm/min)

?G1 = Deslocamento com avanço programado (mm)

VR = Velocidade de Avanço Real (mm/min)

$t_{ad}$  = Fator de tempo para aceleração e desaceleração (s)

$t_{inc}$  = Fator de tempo para inclinação entre segmentos (s)

Com as informações obtidas para  $TU_{CAM}$  [Eq.(1)],  $TU_{Ap}$  [Eq.(4)] e também com o Tempo de Usinagem Real ( $TU_R$ ) medido com auxílio de um cronômetro durante os ensaios experimentais, é possível o desenvolvimento de duas novas equações que são o principal foco de estudo deste artigo. Através da Eq.(5) obtêm-se o Índice de Desempenho CAM ( $ID_{CAM}$ ).

$$ID_{CAM} = \left( \frac{TU_{CAM}}{TU_R} \right) \times 100 \quad (5)$$

na qual:

$ID_{CAM}$  = Índice de Desempenho CAM [%]

$TU_{CAM}$  = Tempo de Usinagem CAM [s]

$TU_R$  = Tempo de Usinagem Real [s]

Através da Eq.(6) será calculado o Índice de Desempenho Dinâmico ( $IDD_{dyn}$ ).

$$IDD_{dyn} = \left( \frac{TU_{Ap}}{TU_R} \right) \times 100 \quad (6)$$

na qual:

$IDD_{dyn}$  = Índice de Desempenho Dinâmico [%]

$TU_{Ap}$  = Tempo de Usinagem Aproximado [s]

$TU_R$  = Tempo de Usinagem Real [s]

#### 4. Resultado e Discussão

---

Para cada estratégia, observando o fluxograma da Figura 1, gerou-se um arquivo CLDATA. Com este arquivo obteve-se o tamanho de cada segmento da trajetória da ferramenta calculado pelo sistema CAM e, baseando-se nas informações da velocidade programada de avanço e do TRM calculado na Eq.(2), pode-se observar, através de gráficos, os limites dinâmicos da máquina-ferramenta para cada faixa de velocidade em relação ao tamanho do segmento.

Para o melhor entendimento das influências dinâmicas geradas por cada tipo de estratégia em cada velocidade de avanço programada, foram levantados os dados, em porcentagem, da quantidade de segmentos que terão influência no comportamento dinâmico da máquina ferramenta considerando os fatores dinâmicos da máquina-ferramenta. Esta influência resulta em velocidades de avanço reais menores do que o valor de velocidade de avanço programada, durante o processo de usinagem.

A Figura 3 traz um comparativo das estratégias de usinagem utilizadas no ensaio para uma velocidade programada de 5.000 mm/min. A escolha desta faixa de velocidade para representar os dados foi feita pois é nesta faixa de testes que se encontrou a maior variação entre os indicadores.

Os dados analisados na Figura 3 comprovam a eficiência de se considerar as características dinâmicas da máquina-ferramenta, antes mesmo de finalizar o processo de programação da manufatura de um produto em um sistema CAM.

Na estratégia Follow Periphery On Plane, por exemplo, para uma velocidade de avanço programada ( $Va$ ) de 5.000 mm/min, o  $ID_{CAM}$  apresentou um erro de 61,4% do  $TU_{CAM}$  em relação ao  $TU_R$ . Quando se considera as características dinâmicas da máquina-ferramenta

apresentadas neste artigo, o valor encontrado de erro com o IDDyn foi de apenas 14,7%.

É possível observar em todas as outras estratégias que, para qualquer velocidade programada, o IDDyn sempre apresenta um valor consideravelmente menor do que o  $ID_{CAM}$ .

## 5. Considerações Finais

---

Analisando-se os dados apresentados na Figura 3, é possível concluir que considerar características dinâmicas da máquina-ferramenta, durante o processo de programação da manufatura, é um fator influente na fase de planejamento do processo produtivo. Em todos os casos, com diferentes estratégias e velocidades de avanço programadas, foi possível observar diferenças significativas entre o tempo de usinagem do sistema CAM e o tempo de usinagem aproximado pelo novo índice proposto. Para todas as estratégias estudadas, o erro médio de estimativa de tempo encontrado com o novo índice foi de apenas 9,95%.

Além disso, foi possível definir, durante os ensaios práticos, alguns procedimentos padrões para a determinação das características dinâmicas da máquina-ferramenta. Estes procedimentos podem ser utilizados para determinar algumas variáveis que estão relacionadas com o índice apresentado.

Portanto, com este novo índice de auxílio ao sistema CAM, o programador terá a possibilidade de conhecer melhor as reais condições da usinagem, possibilitando à empresa informações importante para uma melhor gestão dos tempos de usinagem e custos envolvidos com a fabricação do produto.

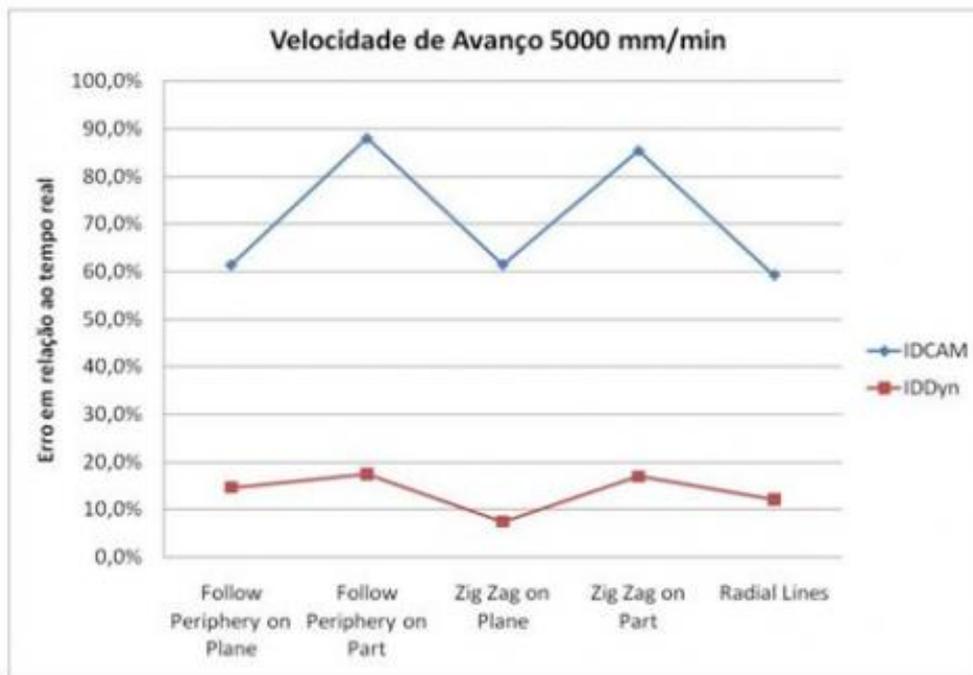
## Referências Bibliográficas

---

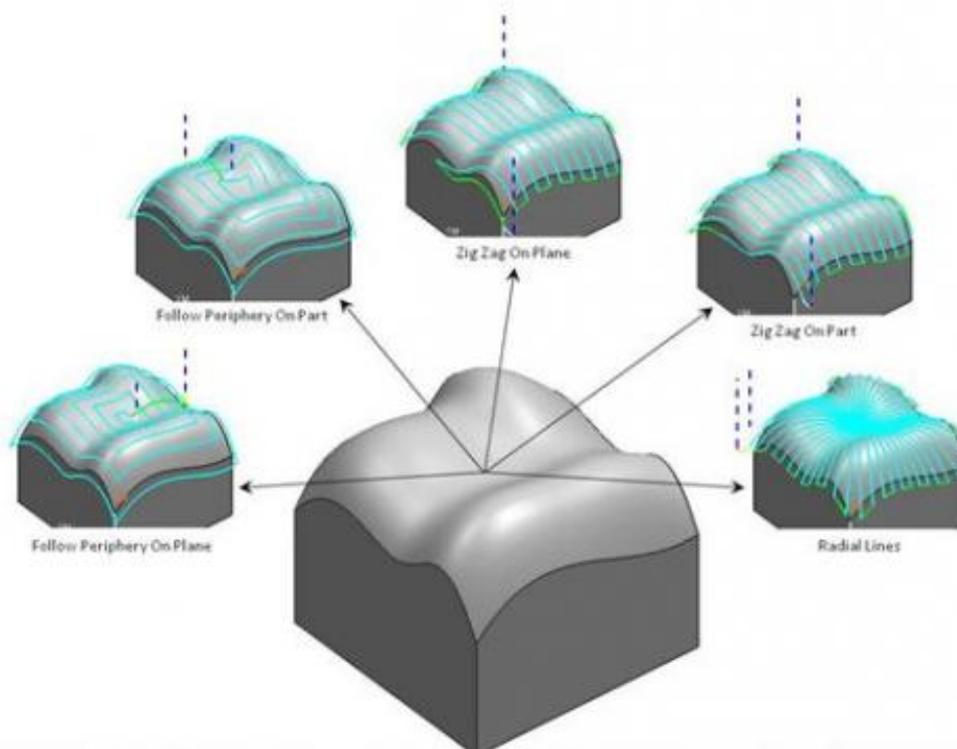
- Arnome, A. High Performance Machining. USA, Cincinnati: Hanser Gardner Publications, 1998. ISBN 1-56990-246-1.
- Choi, B.K.; Jerard, R.B. Sculptured Surface Machining - Theory and applications. Netherlands, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. 368 p. ISBN 0-412-78020-8.
- Gaither, N. Frazier, G. Tradução: Santos, J. C. B. Administração da Produção e Operações. 8. Ed. São Paulo, Ed. Thomson, 2002. ISBN 85-221-0237-6.
- Goellner, E.; Silva, A.D.; Oliveira, L.C. Os recursos CAD ajudam a selecionar ferramentas de corte. Máquinas e Metais, São Paulo, v. 40, n. 458, p. 144-151. mar. 2004.
- Gologlu, C.; Sakarya, N. The effects of cutter path strategies on surface roughness of pocket milling of 1.2738 steel based on Taguchi method. Journal of Materials Processing Technology. v. 206, p. 7-15, 2008.
- Han, G.C. et al. High speed algorithm for CNC machine tools. IECON Proceedings, v. 3, p. 1493-1497, 1999.
- Helleno, A. L. Investigação de Métodos de Interpolação para Trajetória da Ferramenta na usinagem de Moldes e Matrizes com Alta Velocidade. Dissertação (Mestrado) - Universidade Metodista de Piracicaba, 2004.
- Heo, E. Y.; Kim, D. W.; Kim, B. H.; Chen, F. F. Estimation of NC machining time using NC block distribution for sculpture surface machining. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. v. 22, p. 437 – 446, 2006.
- Lasemi, A.; Xue, D.; Gu, P. Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review. In: Computer Aided Design. v 42, p. 641 – 654, 2010.
- McMahon, C.; Browne, J. CAD/CAM Principles, Practice and Manufacturing Management. 2ª ed. 1999.
- Ren, Y.; Yau, H. T.; Lee, Y. S. Clean-up tool path generation by contraction tool method fr machining complex polyhedral models. Computers in Industry. v. 54(1), p. 17 – 33, 2004.
- Ribeiro, J. F.; Godoy, A. F.; Vieira Jr, M. A Integração de Tecnologias Avançadas de Manufatura em Ambiente de Ensino de Engenharia. In: XXIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2003, Ouro Preto, MG.
- Rodrigues, M. A. Não Culpe o CAM pelo tempo perdido na usinagem. Máquinas e Metais. São Paulo, p. 128-131. fev. 2010.
- Savio, E.; Chiffre, L.; Schmitt, R. Metrology of Freeform Shaped Parts. In: Annals of the CIRP, v. 56/2, 2007.
- Souza, A. F.; Coelho, R.T. O Caminho para atingir o estado-da-arte é o bom entendimento. Máquinas e Metais. v. 40, n. 455, p. 82-97, dez. 2003.
- Souza, A. F.; Ulbrich, C. B. L. Engenharia Integrada por Computador e Sistemas CAD/CAM/CNC – Princípios e Aplicações. São Paulo. Ed. Artliber. 2009.
- Sriyotha P. et al. Development of 5-axis Linear Motor Driven Super-Precision Machine. In: Annals of the CIRP, v. 55, n. 1, 2006.
- Stroh C.; Abele, E. NURBS based Tool Path generation. In: X SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ALTA TECNOLOGIA. Piracicaba. 2005. p. 49-68.

## Anexos

---



**Figura 3: Comparativo entre Tempo Programado pelo CAM e Tempo Programado pelo novo índice de desempenho.**



**Figura 2: Diferentes Estratégias de Corte para Acabamento.**

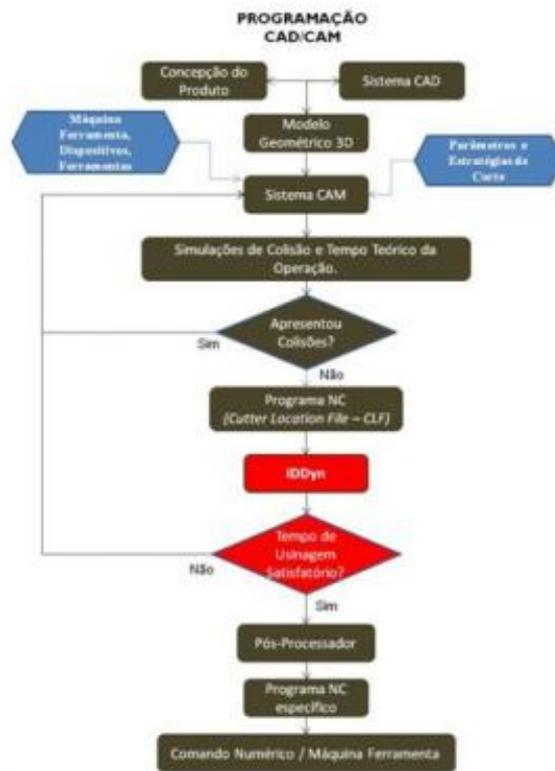


Figura 1: Fluxograma Programação com Índice (IDDyn) para aproximação do tempo real de usinagem.