

DESENVOLVIMENTO DE UM ÍNDICE DE DESEMPENHO DINÂMICO (IDDyn) PARA AVALIAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE USINAGEM EM MÁQUINAS-FERRAMENTAS¹

Renato Luis Garrido Monaro²
André Luís Helleno²

Resumo

No processo de fabricação de superfícies complexas a demanda por atualizações é amplificada pelo longo lead time e pela sua importância no setor de manufatura. Em virtude disso, inúmeras pesquisas tem sido desenvolvidas na direção de otimização da cadeia CAD/CAM/CNC. Uma das tecnologias envolvidas neste processo de fabricação, a trajetória da ferramenta gerada pelo sistema CAM, proporciona ao processo características importantes relacionadas diretamente com o tempo de usinagem e qualidade final. Atualmente a geração dos programas NC através de Sistemas CAM aborda predominantemente a representação da trajetória da ferramenta através da Interpolação Linear, porém as características dinâmicas da máquina-ferramenta não estão inseridas no processo de decisão das estratégias de usinagem durante a programação CAM, fazendo com que a otimização do processo não alcance níveis de excelência. Além disso, os processos decisórios da programação da trajetória da ferramenta e do desempenho deste programa durante sua execução estão baseados em conhecimentos implícitos do programador CAM. Em função disso, o objetivo deste artigo é apresentar o desenvolvimento de um sistema de apoio ao Sistema CAM que avalia a trajetória da ferramenta e fornece o tempo de usinagem real e o índice de desempenho dinâmico (IDDyn) de cada operação de usinagem, antes do processamento do programa NC. Este sistema baseia-se nas características dinâmicas da máquina-ferramenta, do CNC e da estratégia de usinagem representada por Interpolação Linear e permite a avaliação quantitativa das reais condições da utilização deste método de Interpolação, tornando-se um importante fator de decisão na escolha da melhor estratégia de usinagem.

Palavras-chave: Índice de desempenho; Superfícies complexas; Cadeia CAD/CAM/CNC.

DEVELOPMENT OF A DYNAMIC PERFORMANCE INDEX (IDDyn) TO EVALUATE CUT STRATEGIES IN MACHINE TOOLS

Abstract

In manufacturing of complex surfaces the demand for updates is amplified by the long lead time and by the importance in the manufacturing sector. As a result, many studies have been developed in the direction of optimization of CAD/CAM/CNC chain. One of the technologies involved in the manufacturing of complex surfaces process; the tool path generated by the CAM system, provides to this process important features directly related to the machining time and final quality. Currently the generation of NC programs using CAM Systems deals predominantly the representation of the tool path by Linear Interpolation, but the dynamic characteristics of machine tool are not included in the decision process of machining strategies for CAM programming, making optimization process does not reach levels of excellence. In addition, decision-making processes of programming the tool path and the performance of this program during its execution on a machine tool are based on implicit knowledge of the CAM programmer. As a result, the objective of this paper is to present the development of a support system for the CAM system that evaluates the tool path and provides the actual machining time and dynamic performance index (IDDyn) of each machining operation, before processing the NC program. This system is based on the dynamic characteristics of machine tools, CNC and machining strategy with the tool path represented by Linear Interpolation and enables quantitative assessment of the actual conditions of use of this method of interpolation, becoming an important factor of decision in choosing the best machining strategy, allowing the optimization of CAD/CAM/CNC chain.

Key words: Performance index; Complex surfaces; CAD/CAM/CNC chain.

¹ Contribuição técnica ao 8º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 11 e 12 de agosto de 2010, São Paulo, SP.

² Univ. Metodista de Piracicaba – UNIMEP – Lab. SCPM, Rod. Luiz Ometto, km 1 – 13451-900 Santa Bárbara d'Oeste - SP



1 INTRODUÇÃO

O aumento das exigências do projeto industrial, buscando cada vez mais formas harmônicas para a apresentação de um produto e, por outro lado, o desenvolvimento dos métodos e softwares para o modelamento e manipulação de superfícies complexas, assim como a redução dos custos de hardware, fizeram com que o uso de objetos e produtos contendo formas geométricas complexas se intensificasse.

Atualmente, tais superfícies podem ser encontradas em produtos com requisitos funcionais, tais como, componentes aerodinâmicos aplicados na indústria aeronáutica, próteses cirúrgicas e componentes com características ópticas,⁽¹⁾ ou produtos com requisitos estéticos para a satisfação do cliente, como os produtos do setor automobilístico e eletroeletrônico. Para esses, a representação geométrica através de superfícies complexas é utilizada como fator determinante no lançamento de novos produtos. Desta forma, alguns fatores tais como a variedade dos moldes e a alta dureza do material utilizado na sua fabricação demandam grande dificuldade na engenharia de fabricação.

Em virtude disto, a manufatura do ferramental necessário para a fabricação destes produtos, tem demonstrado ser bastante problemática, agravando-se com a complexidade geométrica. As dificuldades encontradas envolvem a usinagem de formas geométricas complexas, a usinagem de pequenos raios entre cantos, paredes verticais, áreas com profundidade de corte relativamente grande entre outros fatores desfavoráveis à usinagem.⁽²⁾

Toda esta exigência e a constante busca por excelência no processo de desenvolvimento de um produto visam sempre obter a redução de todos os custos relacionados com a fabricação. Dentro desta busca no setor de fabricação de produtos com geometrias complexas, a Tecnologia que mais se adéqua é a cadeia CAD/CAM/CNC e por isso o seu uso tem se intensificado.

Na cadeia CAD/CAM/CNC, desenvolve-se inicialmente um modelo geométrico tridimensional no Sistema CAD e posteriormente transfere-o para o sistema CAM. Após esta etapa, o programador do sistema fornecerá os dados da manufatura, tais como: a dimensão da matéria prima, dispositivos de fixação, ferramentas de usinagem, estratégias de usinagem e parâmetros tecnológicos, para que o sistema calcule a trajetória da ferramenta e gere primeiramente um arquivo nativo, conhecido como CLDATA (*cutter location data file*) que contém apenas o percurso da ferramenta representado por coordenadas no plano cartesiano.⁽³⁾ Este arquivo nativo pode ser reconhecido apenas pelo sistema CAM, não tendo função para a máquina CNC, por não estar na linguagem de programação ISO 6983, ou seja, comandos de movimento.⁽⁴⁾

Depois de concluídas as etapas anteriores, o sistema CAM utilizará todas as informações fornecidas pelo projetista para gerar o programa NC que será enviado ao Centro de Usinagem CNC onde será feita a usinagem do modelo geométrico criado. Na maioria dos casos, um módulo adicional integrado ao sistema CAM, conhecido como pós-processador, será o responsável por transformar o arquivo nativo em programa NC, contendo a linguagem apropriada para o CNC em questão. A Figura 1 ilustra as fases da cadeia CAD/CAM/CNC aplicadas na manufatura de superfícies complexas.

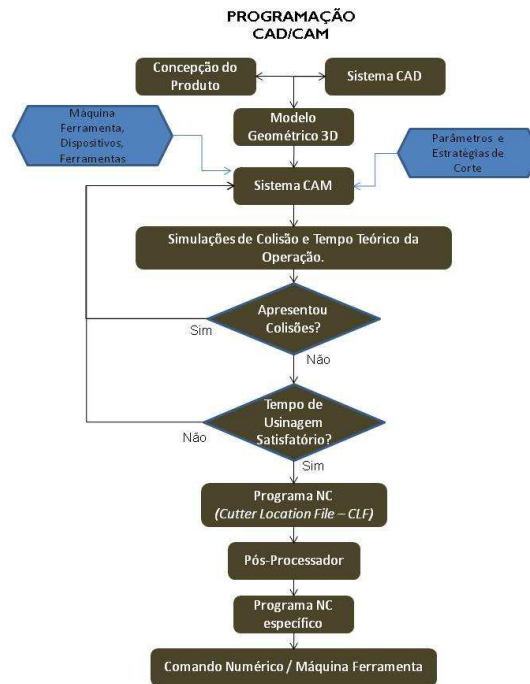


Figura 1: Cadeia CAD/CAM/CNC.

Dentre as variáveis mais significativas, com relação ao tempo de usinagem, no processo decisório do programador CAM, destacam-se a determinação das estratégias de usinagem, uma vez que esta escolha está diretamente relacionada com as características geométricas do produto.

1.1 Estratégias de Usinagem

As estratégias que podem ser adotadas na manufatura de superfícies complexas, em geral, mais utilizadas nos softwares CAM, são: *Zig Zag*, *Follow Periphery* e *Radial Lines*.⁽⁵⁾

A estratégia *Zig Zag* é caracterizada pelo movimento da ferramenta que percorre toda a superfície da peça através da criação de linhas paralelas que cortam nas duas direções de corte (ida e volta) mantendo um passo lateral constante em apenas uma direção, conforme ilustra a Figura 2⁽⁵⁾.

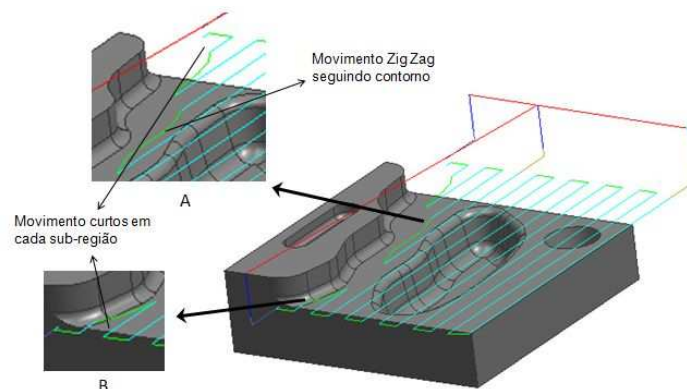


Figura 2: Estratégia Zig Zag.

Este tipo de estratégia maximiza os movimentos de corte permitindo que a ferramenta mantenha continuamente um trabalho de corte durante os passos

laterais. Para que esta continuidade de movimentos ocorra, esta estratégia permite também que a trajetória siga uma específica região de contorno dentro dos limites do passo lateral, como pode ser observado no detalhe A da Figura 2, onde a trajetória da ferramenta desvia da região de contorno e segue a direção de corte para manter a continuidade do movimento.

Outra característica importante é a de que este tipo de movimento não permite que as linhas geradas na trajetória da ferramenta se cruzem. Para os casos onde a estratégia não consegue seguir os movimentos contínuos devido ao contorno da região de corte, o sistema gera então uma seqüência de passos mais curtos entre regiões menores, conforme ilustrado nos detalhes A e B da Figura 2.

A estratégia *Follow Periphery* está baseada em *offsets* da geometria da peça, o que faz com que a ferramenta tenha uma trajetória otimizada, ou seja, consiste em gerar trajetórias eqüidistantes ou paralelas à geometria da peça.⁽⁶⁾

Em outras palavras, esta estratégia cria caminhos de corte que produzem uma seqüência de passes concêntricos a partir da periferia da peça, seguindo os contornos da região de corte. Todos os passes criados com esta estratégia são em forma de ciclos fechados, conforme ilustrado na Figura 3:

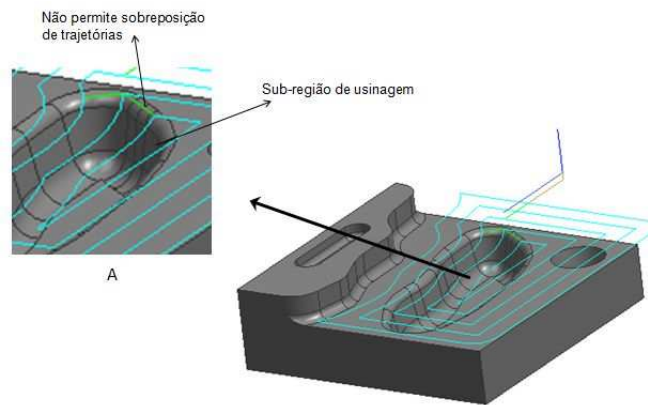


Figura 3: Estratégia *follow periphery*

Da mesma forma que a estratégia Zig Zag, esta estratégia maximiza os movimentos de corte permitindo que a ferramenta mantenha continuamente um trabalho de corte durante os passos laterais, além disso os caminhos da ferramenta não se cruzam durante todo o processo de usinagem. Para isso, esta estratégia cria movimentos menores em cada sub-região, conforme ilustrado no detalhe A da Figura 3.

Nesta estratégia, o sistema CAM reconhece que os movimentos gerados não percorrem regiões de rasgos mais finos. Assim, o sistema calcula o melhor caminho para que seja feita uma remoção de material homogênea em toda a peça.

A estratégia de usinagem *Radial Lines* cria o caminho da ferramenta com movimentos perpendiculares a partir da definição de um ponto central, conforme ilustra a Figura 4. Este tipo de estratégia é normalmente utilizado para realizar operações de acabamento.

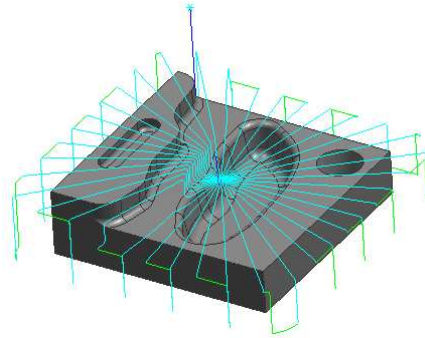


Figura 4: Estratégia *Radial Lines*.

Este tipo de estratégia é realizado através de movimentos de *Zig Zag* ou apenas *Zig*, o que faz com que ele tenha as mesmas características de corte já apresentadas. Além da estratégia de usinagem, o programador CAM pode determinar o modelo matemático que será utilizado para representar a trajetória da ferramenta, que neste caso, poderá ser a interpolação linear ou interpolação *Spline*. Atualmente, devido à simplicidade matemática e facilidade de uso pelo programador, a trajetória da ferramenta representada pela interpolação linear tornou-se um padrão no ambiente industrial.^(7,8) Em função da grande abrangência da utilização desta interpolação, este artigo não abordará a interpolação *Spline*.

1.2 Interpolação Linear

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, conforme ilustra a Figura 5. 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.⁽⁹⁾

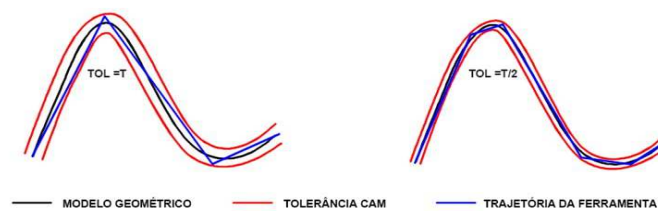


Figura 5: Interpolação linear e tolerância CAM.

Portanto, devido ao uso dos segmentos de reta, um dos maiores problemas encontrados com a utilização da Interpolação Linear está na representação de superfícies complexas. Neste caso, 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.⁽¹⁰⁾

Segundo Lartigue *et al.*⁽¹¹⁾ é conhecido que o processo convencional de usinagem usando Interpolação Linear não se adapta bem para altas velocidades e usinagem de alta precisão. A superfície usinada é uma aproximação da superfície CAD; velocidades e descontinuidades aparecem na junção de segmentos Lineares e a quantidade de dados a serem transmitidos é muito grande.

Assim, identificando estes problemas, dentre as características deste método pode-se ressaltar:⁽¹²⁾

- 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; e
- programas NC extensos.

Mas, apesar de resultar em programas NC extensos, os programadores continuam optando pela Interpolação Linear, exatamente pelo seu fácil uso no ambiente industrial.

1.3 Dinâmica da Máquina-Ferramenta

Observando a Figura 1 pode-se verificar que os processos decisórios sobre parâmetros de corte e estratégias de usinagem são determinados através dos conhecimentos implícitos do programador CAM, sendo que, para isto, os sistemas CAM fornecem como indicadores de desempenho a simulação virtual de colisão do par ferramenta-peça e o tempo de usinagem teórico.

Neste sentido, a simulação virtual de colisão no sistema CAM 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 real de usinagem.

É muito comum encontrar diversos questionamentos no que diz respeito ao motivo pelo qual os tempos obtidos através da programação da manufatura através de um software CAM são tão diferentes dos tempos obtidos durante o processo de usinagem. A resposta encontrada para estas questões é que 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, comportamento das vibrações e quais estratégias são aplicáveis para minimizar estes efeitos.⁽¹³⁾

O indicador de tempo de usinagem dos sistemas CAM, aqui denominado 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).

$$TU_{CAM} = \left(\sum \frac{\Delta G0}{V_{aG0}} + \sum \frac{\Delta G1}{V_a} \right) \times 60 \quad \text{Equação 1}$$

na qual:

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

$\Delta G0$ = Deslocamento com avanço rápido [mm]

V_{aG0} = Velocidade de Avanço Rápido [mm/min]

$\Delta G1$ = Deslocamento com avanço programado [mm]

V_a = Velocidade de Avanço Programado [mm/min]

Observando a Eq.(1) verifica-se que a variação da velocidade de avanço em função das inversões de movimento conforme a geometria da trajetória da ferramenta não é levada em consideração 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. Da mesma forma, ao abordarmos a questão da manufatura de superfícies complexas em que o tamanho do segmento e a inclinação entre eles influenciam bruscamente a variação da velocidade de avanço,⁽¹⁴⁾ verifica-se que o tempo de usinagem CAM irá se distanciar do tempo de usinagem real.

Han et al.⁽¹⁵⁾ 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⁽¹²⁾ 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).

$$TRM = \frac{\Delta x}{V_a} \times 60$$

Equação 2

na qual:

TRM = Tempo de Resposta de Máquina [s]

Δx = Deslocamento da trajetória da ferramenta em um eixo [mm]

V_a = Velocidade de Avanço Programado [mm/min]

Regalbuto⁽¹⁶⁾ e Stroh⁽¹⁴⁾ 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.

A variação da velocidade de avanço, observada nesses casos, influenciará de forma negativa no tempo de usinagem e a qualidade superficial do produto, resultando numa limitação tecnológica na manufatura de superfícies complexas com altas velocidades.

Sendo assim, o objetivo desse artigo é desenvolver o índice IDDyn baseado nas informações da máquina-ferramenta, do CNC e da estratégia de usinagem, avalie a trajetória da ferramenta antes da geração do programa NC. Esse novo sistema permitirá a avaliação quantitativa das reais condições da utilização da Interpolação Linear, permitindo assim a otimização da trajetória da ferramenta e o cálculo do tempo real de usinagem, conforme ilustrado na Figura 6:

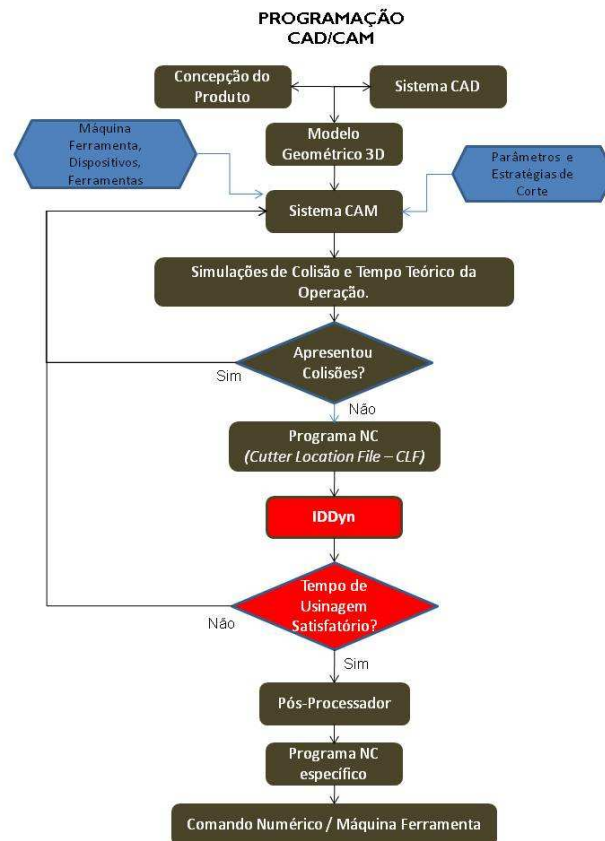


Figura 6: Fluxograma Programação com Índice (IDDyn) para aproximação do tempo real de usinagem.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O corpo de prova (Figura 7), utilizado para os ensaios experimentais 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.

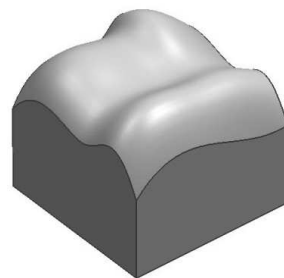


Figura 7: Corpo de prova.

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

- rotação máxima: 10.000 min^{-1} ;
- avanço rápido: 25.000 mm/min;
- máximo avanço programável: 5.000 mm/min; e

- 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. A primeira variável a ser definida está relacionada com o TRM, definido pela Eq. (2). A partir do valor de TRM, determina-se o valor da Velocidade Real de Avanço, definida pela Eq.(3):

$$VR = \frac{\Delta S}{TRM/60} \quad \text{Equação 3}$$

na qual:

VR = Velocidade Real de Avanço [mm/min]

ΔS = Tamanho do Segmento [mm]

TRM = Tempo de Resposta da Máquina [s]

Em seguida, considerando os efeitos dinâmicos da máquina-ferramenta em uma condição “perfeita”, ou seja, não levando em consideração o Limite de Inclinação entre Segmentos (LIS) e as curvas de aceleração e desaceleração da máquina, e relacionando o TU_{CAM} , definido na Eq. (1), substituindo o valor da Velocidade de Avanço Programada (Va) na Eq.(1) pela Velocidade Real de Avanço (VR) calculada pela Eq.(3), define-se o Tempo de Usinagem Aproximado (TU_{Ap}), conforme Eq.(4):

$$TU_{Ap} = \left(\sum \frac{\Delta G0}{VaG0} + \sum \frac{\Delta G1}{VR} \right) \times 60 \quad \text{Equação 4}$$

na qual:

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

$\Delta G0$ = Deslocamento com avanço rápido [mm]

$VaG0$ = Velocidade de Avanço Rápido [mm/min]

$\Delta G1$ = Deslocamento com avanço programado [mm]

VR = Velocidade de Avanço Real [mm/min]

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}).

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

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 (IDDyn), levando-se em consideração informações dinâmicas importantes que são descartadas pelo sistema CAM.

$$IDDyn = \left(\frac{TU_{Ap}}{TU_R} \right) \times 100 \quad \text{Equação 6}$$

na qual:

IDDyn = Índice de Desempenho Dinâmico [%]

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

TU_R = Tempo de Usinagem Real [s]

3 RESULTADOS

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. Através do recurso de simulação do software CAM utilizado nos ensaios desenvolveu-se 5 diferentes tipos de operações de acabamento com movimentos diferentes para a geração das trajetórias das ferramentas, conforme ilustrado na Figura 8:

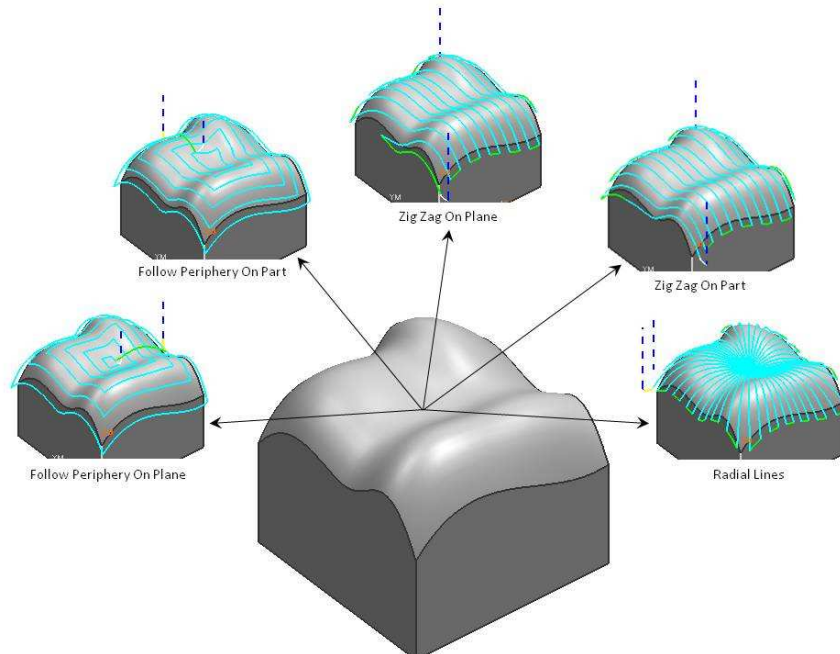


Figura 8: Diferentes estratégias de corte para acabamento.

Para cada estratégia, observando o fluxograma da Figura 6, gerou-se um arquivo CLDATA e 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 elaborar um gráfico que demonstra os limites dinâmicos da máquina-ferramenta para cada faixa de velocidade em relação ao tamanho do segmento, conforme ilustrado na Figura 9:

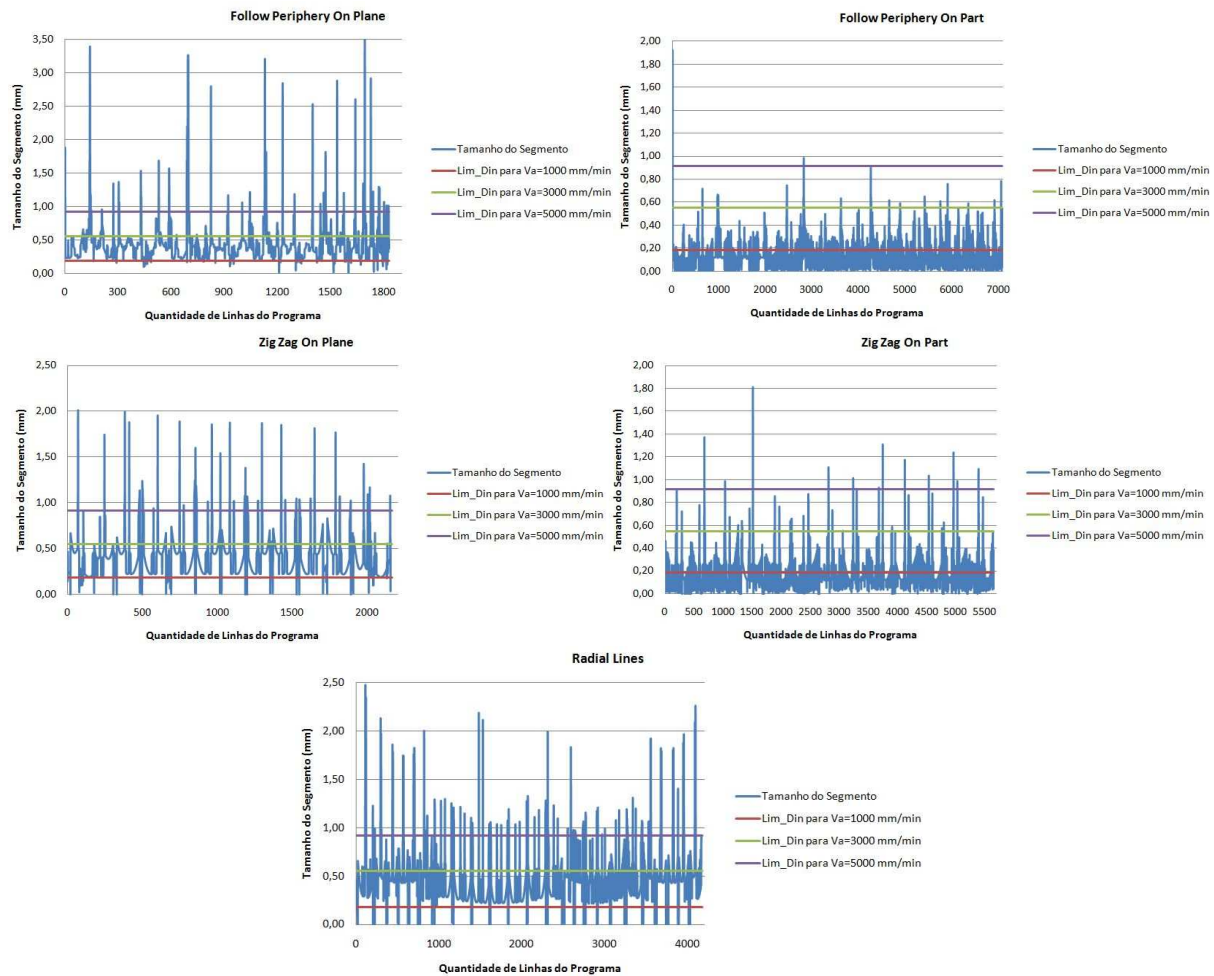


Figura 9: Gráficos tamanho segmento x limite dinâmico de velocidade.

Na Tabela 1 estão os dados obtidos através das equações descritas neste artigo.

Tabela 1: Cálculos validação IDDyn

Follow Periphery On Plane				Follow Periphery On Part			
Va (mm/min)	1000	3000	5000	Va (mm/min)	1000	3000	5000
TU _{CAM} (s)	48,2	16,1	9,6	TU _{CAM} (s)	56,6	18,9	11,3
TU _{Ap} (s)	50,7	23,2	21,3	TU _{Ap} (s)	89,2	78,7	78,4
TU _R (s)	50	26	25	TU _R (s)	101	95	95
ID _{CAM}	3,6%	38,2%	61,4%	ID _{CAM}	43,9%	80,1%	88,1%
IDDyn	-1,4%	10,8%	14,7%	IDDyn	11,7%	17,1%	17,5%
Zig Zag On Plane				Zig Zag On Part			
Va (mm/min)	1000	3000	5000	Va (mm/min)	1000	3000	5000
TU _{CAM} (s)	52,0	17,3	10,4	TU _{CAM} (s)	55,0	18,3	11,0
TU _{Ap} (s)	56,3	26,9	25,0	TU _{Ap} (s)	76,6	63,8	63,1
TU _R (s)	55	29	27	TU _R (s)	82	76	76
ID _{CAM}	5,4%	40,2%	61,5%	ID _{CAM}	33,0%	75,9%	85,5%
IDDyn	-2,3%	7,3%	7,5%	IDDyn	6,6%	16,0%	17,0%
Radial Lines							
Va (mm/min)	1000	3000	5000				
TU _{CAM} (s)	109,8	36,6	22,0				
TU _{Ap} (s)	114,2	51,2	47,4				
TU _R (s)	114	55	54				
ID _{CAM}	3,7%	33,5%	59,3%				
IDDyn	-0,2%	7,0%	12,2%				

4 CONCLUSÃO

Os dados da Tabela 1 trazem informações importantes que comprovam a eficiência de se considerar informações dinâmicas da máquina ferramenta antes mesmo de finalizar o processo de programação da manufatura de um produto em um sistema CAM. Apesar de considerar alguns parâmetros da dinâmica da máquina ferramenta em condição “perfeita”, o fato de conhecer um único fator, chamado TRM, já influencia em muito a estimativa do tempo aproximado de usinagem.

Na estratégia *Follow Periphery On Part*, por exemplo, para uma velocidade de avanço programada (V_a) de 5.000mm/min, o ID_{CAM} apresentou um erro de 85,5% do TU_{CAM} em relação ao TU_R , já considerando a dinâmica da máquina ferramenta, com o ID_{Dyn} , este erro se reduziu para 17%. Em todas as outras estratégias, para qualquer velocidade programada, pode-se observar que o ID_{Dyn} sempre apresenta um valor menor do que o ID_{CAM} .

Com esta nova ferramenta inserida em um sistema CAM, o programador terá a possibilidade de conhecer melhor as reais condições da usinagem. Possibilitando à empresa informações importantes para uma melhor gestão dos tempos de usinagem e custos envolvidos com a fabricação do produto.

REFERÊNCIAS

- 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.
- 2 Souza, A. F. Contribuições ao fresamento de geometrias complexas aplicado a tecnologia de usinagem com altas velocidades. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos - EESC-USP, 2004.
- 3 McMahan, C.; Browne, J. CAD/CAM Principles, Practice and Manufacturing Management. 2ª ed. 1999.
- 4 WOLF, J.; WECK, M. ISO 14649 Provides Information for Sophisticated and flexible numerically controlled production. Production Engineering Reserchand Development, v. 10, Issue 2, p. 41-46, 2003.
- 5 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.
- 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.
- 7 Lartigue, C.; Thiebaut, F.; Maekawa, T. CNC tool path in terms of B-Spline curves. Computer Aided Design, v. 33, p. 307-319, 2001.
- 8 Hsu, L.; Yeh, S.S. Adaptive feedrate interpolation for parametric curves with a confined chird error. Computer Aided Design, v. 34, p. 229-237, 2002.
- 9 Helleno, A.L. Investigação de Métodos de Interpolação para Trajetória da Ferramenta na Usinagem de Moldes e Matrizes com Alta Velocidade, 2004, 140 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Metodista de Piracicaba, 2004.
- 10 Schützer, K. et al. Usinagem em Altíssimas Velocidades. São Paulo: Editora Érica, 2003. 214 p.
- 11 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, p. 317 – 320, 2004.
- 12 Arnome, A. High Performance Machining. USA, Cincinnati: Hanser Gardner Publications, 1998. ISBN 1-56990-246-1.



- 13 Rodrigues, M. A. Não Culpe o CAM pelo tempo perdido na usinagem. Máquinas e Metais. São Paulo, p. 128-131. fev. 2010.
- 14 Stroh C.; Abele, E. NURBS based Tool Path generation. In: X SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ALTA TECNOLOGIA. Piracicaba. 2005. p. 49-68.
- 15 Han, G.C. et al. High speed algorithm for CNC machine tools. IECON Proceedings, v. 3, p. 1493-1497, 1999.
- 16 Regalbuto, R. Empirische Untersuchungen zum Vergleich von linear- und NURBS-interpolierten NC-Programmen. Diplomarbeit - Technische Universität Darmstadt, Germany, 2004.