

PROJETO SMART-CAM: CALCULO DINÂMICO DO RAIO EFETIVO DE CORTE NO FRESAMENTO DE FORMAS COMPLEXAS E IMPLEMENTAÇÃO EM SISTEMA CAD/CAM

Felipe Marin

Universidad del País Vasco (UPV/EHU) – Centro de Fabricación Avanzada Aeronáutica, Parque Tecnológico de Bizkaia 202, Zamudio/Bizkaia 48170, Espanha

Adriano Fagali de Souza

Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Joinville, Rua dona Francisca 8300, Joinville/SC 89.219-600, Brasil
adriano.fagali@ufsc.br

Nícolas de Lima Rossini Severino

Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Joinville, Rua dona Francisca 8300, Joinville/SC 89.219-600, Brasil

Rodrigo Berretta Käsemodel

Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Joinville, Rua dona Francisca 8300, Joinville/SC 89.219-600, Brasil

Alessandro Roger Rodrigues

Universidade de São Paulo – Campus São Carlos. Rua Trabalhador Saocarlense 400. 89.219-600, Brasil

Luis Norberto López de Lacalle

Universidad del País Vasco (UPV/EHU) – Centro de Fabricación Avanzada Aeronáutica, Parque Tecnológico de Bizkaia 202, Zamudio/Bizkaia 48170, Espanha

Resumo. O fresamento de formas geométricas complexas utiliza frequentemente ferramentas de ponta esférica. Neste processo, alterações do contato ferramenta-peça são constantes, alterando o raio efetivo de corte da ferramenta, e por consequência, a velocidade real de corte, a área e a espessura do cavaco, além das componentes da força de usinagem. Os sistemas CAM desenvolvidos atualmente não são capazes de considerar tais condições de usinagem. Assim, potenciais otimizações para elevar a produtividade deste processo não são consideradas. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para calcular especificamente o raio efetivo de corte de uma fresa de ponta esférica ao longo da usinagem de uma forma complexa. Esta ferramenta foi implementada no software CAD/CAM NX Siemens, através de sua interface de programação. A ferramenta desenvolvida auxilia o operador CAM a visualizar e realizar uma programação otimizada do fresamento de superfícies complexas, e contribui com o desenvolvimento e implementação de novas rotinas para uma programação inteligente de usinagem de formas complexas. O artigo é resultado de um projeto amplo de pesquisa denominado SMART-CAM, em desenvolvimento pelos grupos de pesquisa GPCAM da UFSC-Joinville em parceria com o grupo CFAA da Universidade do País Basco - Espanha, com o objetivo de aprimorar as ferramentas computacionais CAD/CAM para o fresamento de formas complexas.

Palavras chave: Fresamento de formas complexas. Ferramenta esférica. Raio efetivo de corte. NX Open.

1. INTRODUÇÃO

Geometrias com formas complexas estão presentes em diversos produtos de engenharia, por requisitos estéticos ou operacionais. O processo de fresamento é o principal processo de fabricação destas geometrias, onde se emprega comumente fresas de ponta esférica. Assim, ocorrem alterações do contato ferramenta-peça ao longo da usinagem, fato que não ocorre no fresamento convencional. Figura 1 ilustra estas alterações de contato e o raio real de usinagem.

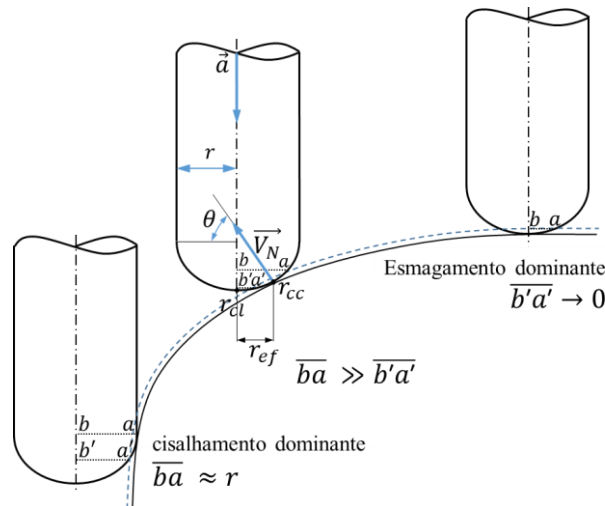


Figura 1. Alterações do contato ferramenta-peça em diferentes momentos durante o fresamento de uma superfície complexa.

Onde $\vec{a}$ e $\vec{V}_N$ são o vetor da ferramenta e o vetor normal da peça respectivamente, θ o ângulo formado entre eles, r o raio da ferramenta, r_{ef} o raio efetivo de corte e os segmentos $\overline{b'a'}$ e $\overline{ba}$ representam início e final de contato.

Estas alterações do contato ferramenta-peça alteram o raio efetivo de corte em função da posição da ferramenta ao longo de uma superfície complexa. Isso implica em alterar, involuntariamente, a velocidade de corte programada (Souza et al., 2014a).

Quando a região central da ferramenta esférica atua no corte, a velocidade tangencial se aproxima a zero devido ao raio efetivo (r_{ef}) ser nulo no centro da ferramenta. Nesse caso, o mecanismo de corte predominante é o esmagamento (*ploughing*) e não o cisalhamento, o que resulta em maiores esforços mecânicos denegando tanto a superfície da ferramenta quanto a da peça. Estudos sobre os fenômenos de corte nestas condições já foram publicados pelo grupo de pesquisa (Souza et al., 2014a; Scandiffio et al., 2016). Scandiffio et al., (2017) estudaram a rugosidade de superfícies quando o centro participa do corte. Na manufatura de moldes e matrizes, este fenômeno eleva custos de pós-processos como o polimento. Em hélices e turbinas, a qualidade superficial também está diretamente relacionada ao rendimento mecânico. Fu et al. (2016); Jung et al. (2001); Lamikiz et al. (2005); Scandiffio et al. (2016) estudaram o comportamento das componentes da força de usinagem nestas condições. As alterações da força durante a usinagem, além de comprometer a vida da ferramenta, propicia erros de forma na peça usinada, e como ocorrem alterações das forças ao longo da usinagem, os valores destes erros também podem variar na mesma peça, conforme as alterações do contato ferramenta-peça.

Os atuais sistemas CAM disponíveis comercialmente oferecem para o cálculo de usinagem de superfícies complexas diferentes opções de trajetória. Contudo, a escolha da trajetória mais adequada fica a critério do usuário. Embora estes sistemas se encontrem em um elevado nível de desenvolvimento, problemas/limitações básicas de cálculo de trajetória ainda podem ser observadas (Souza et al., 2014b). Desta forma, ferramentas mais avançadas para auxiliar os usuários nesta etapa de seleção de trajetórias otimizadas para usinagem ainda não foram desenvolvidas em softwares CAM comerciais.

O trabalho apresentado neste artigo atende a esta demanda. Foi desenvolvido uma ferramenta computacional para calcular e identificar o diâmetro efetivo real de uma ferramenta de ponta esférica, em diferentes posições ao longo da usinagem de uma superfície complexa. Identificar o raio efetivo de corte em função do contato ferramenta-peça é o primeiro passo para desenvolver um sistema CAM mais interativo com cada caso específico de usinagem. Este futuro sistema CAM permitirá corrigir a rotação e a velocidade de avanço da ferramenta em função da região a ser usinada (Käsemodel et al., 2020), corrigir erros de forma na peça, através da previsão de força, assim como identificar melhores ferramentas e parâmetros conforme as características da superfície a ser usinada. Ainda, neste trabalho, esta ferramenta foi implementada em sistema CAD/CAM para identificar os raios efetivos da geometria, como apresentado a seguir.

Este artigo é resultado de um projeto de pesquisa amplo, denominado SMART-CAM, em desenvolvimento pelo grupo de pesquisa GPCAM da UFSC-Joinville em parceria com o grupo CFAA da universidade do País Basco, Espanha.

2. METODOLOGIA

Uma ferramenta computacional foi desenvolvida com o objetivo de auxiliar o programador CAM durante a programação de trajetórias para manufatura de superfícies com formas complexas, identificando o raio efetivo de corte em função do diâmetro da ferramenta e sua posição na superfície. Um módulo de extensão (*plug-in*) foi implementado em um sistema CAD/CAM comercial com interface de programação aberta ao usuário.

A metodologia proposta neste trabalho para se obter o raio efetivo da ferramenta utiliza o ponto de contato da ferramenta de ponta esférica com a superfície, conhecido como *Cutter Contact-CC*, calculado pelo módulo CAM, assim como o vetor normal à superfície neste ponto. O raio efetivo de corte é definido pela distância perpendicular entre o ponto CC e o eixo da ferramenta, ilustrado na Fig. 1.

Considerando a origem na ponta da ferramenta, é possível obter o ponto CC a partir do ponto de contato *Cutter Location-CL*, que determina a posição da máquina CNC que com uma dada ferramenta intersecciona a superfície. Este ponto é conhecido pelo programa CAM e é utilizado no pós-processamento junto com a ferramenta e orientações da superfície. Os vetores normais da superfície no ponto CL são dados pelo seguinte vetor unitário mostrado na Eq. (1).

$$\hat{n} = \frac{(0,0,0),(n_x,n_y,n_z)}{|(0,0,0),(n_x,n_y,n_z)|} \quad (1)$$

Onde n_x , n_y e n_z são as componentes normais a x, y e z respectivamente. Assim, o raio de corte efetivo em funções do vetor normal e do raio da ferramenta (r) é dado pela Eq. (2).

$$r_{ef} = r(\hat{n}) = r\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} \quad (2)$$

Considerando o sistema de coordenadas no centro da ferramenta e normal ao eixo da ferramenta é possível calcular o raio efetivo (r_{ef}) conforme mostra a Eq. (3).

$$r_{ef} = r_{CC} - r_{CL} \quad (3)$$

Onde os pontos CC e CL se correlacionam com os vetores normais da ferramenta ($\vec{a}$) e da superfície ($\hat{n}$) de acordo com a Eq.4 (Käsemodel *et al.*, 2020).

$$r_{CL} = r_{CC} + r(\hat{n} + \vec{a}) \quad (4)$$

Utilizou-se o software CAD/CAM *Siemens NX*, que possui interface de programação aberta (*NX Open*). Foi utilizado o módulo CAD a fim de modelar as superfícies e extrair o vetor normal destas e o módulo CAM para obter as trajetórias da ferramenta (CL). Para programação utilizou-se uma linguagem compatível com o software, a linguagem *C#*.

Com a informação do diâmetro da ferramenta, a Eq. 2 foi empregada para calcular o raio efetivo em cada posição e retornar os dados ao usuário. A metodologia implementada para o cálculo do raio efetivo de corte é apresentada na Fig. 2.

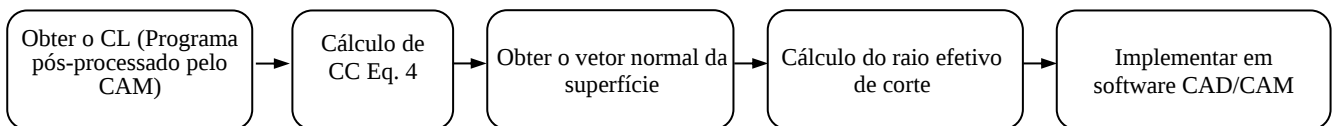


Figura 2. Metodologia de cálculo do raio efetivo de corte utilizando software aberto.

Para validação, foi utilizada uma geometria baseada em um componente aeronáutico que apresenta um perfil aerodinâmico não definido por geometrias convencionais como retas e curvas. Para o cálculo da trajetória, utilizou-se uma ferramenta de ponta esférica de 10 milímetros de diâmetro. Obteve-se o vetor normal da superfície em função de uma trajetória perpendicular ao perfil aerodinâmico. Com os vetores normais foi calculado o raio efetivo utilizando a interface desenvolvida de programação já implementada no software *Siemens NX*.

A metodologia de validação consistiu em simular a trajetória avaliada e comparar, ponto a ponto, com o valor teórico obtido através do CAD. Para realizar esse procedimento, inicialmente foi simulado o caminho da ferramenta com o posicionamento da ferramenta no ponto CC desejado. Na sequência, abria-se o módulo de inspeção do software, selecionava-se duas entidades para medição, a linha de centro da ferramenta e o ponto na superfície e se guardava o valor medido para a coordenada CC avaliada. Esse procedimento foi realizado para os 10 primeiros pontos de contato.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados deste trabalho estão apresentados na sequência de seu desenvolvimento, a citar: i) identificação do vetor normal à superfície em pontos na trajetória de usinagem, ii) cálculo do raio efetivo da ferramenta em função da posição na usinagem, implementação e validação dos valores obtidos, iii) implementação da ferramenta em software CAM comercial.

3.1. Identificação do vetor normal à superfície

As etapas de desenvolvimento para a obtenção do vetor sobre a superfície na trajetória do CAM são mostradas na Fig. 3. É ilustrado na esquerda, a trajetória da programação CAM junto com os pontos intermediários CL e CC calculados respectivamente pelo software CAM e pela matemática apresentada na Eq (4). Na direita, os vetores obtidos sobrepostos a trajetória da ferramenta.

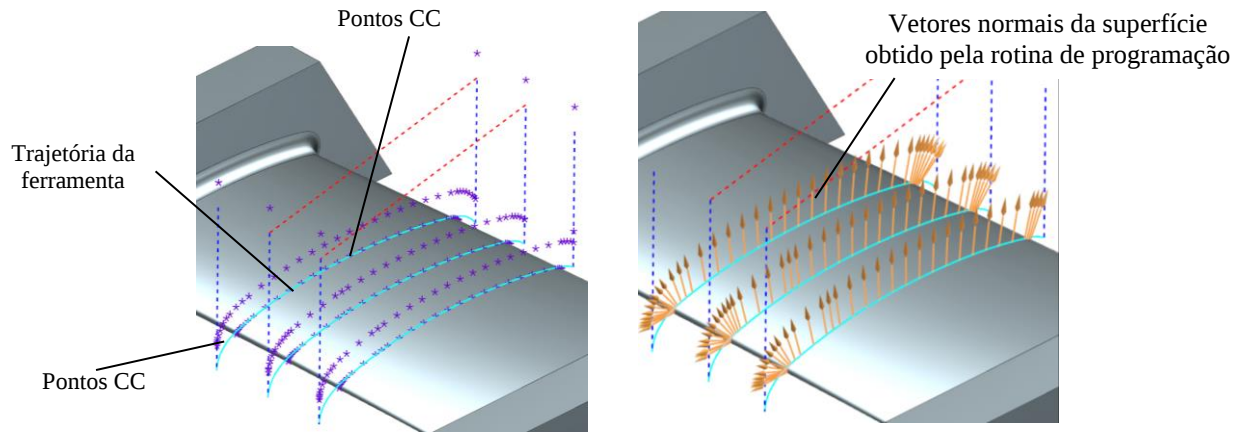


Figura 3. Etapas do processo de cálculo para obtenção dos vetores normais à superfície.

A discretização dos pontos é um fator que pode ser ajustado de acordo com a precisão necessária, para melhor visualização, a fig. 3 apresenta um número limitado de vetores plotados e passadas laterais. Com os vetores obtidos sobre a superfície, procedeu-se para a próxima etapa, o cálculo do raio efetivo.

3.2. Cálculo do raio efetivo da ferramenta em função da posição na usinagem, implementação e validação

A partir dos vetores normais obtidos na etapa (i), calculou-se o raio efetivo de corte utilizando a Equação 4. Durante a rotina, os valores calculados foram incluídos nas linhas pós-processadas da trajetória CAM de forma comentada para facilitar a análise do usuário e a verificação do cálculo, como mostra a Figura 4.

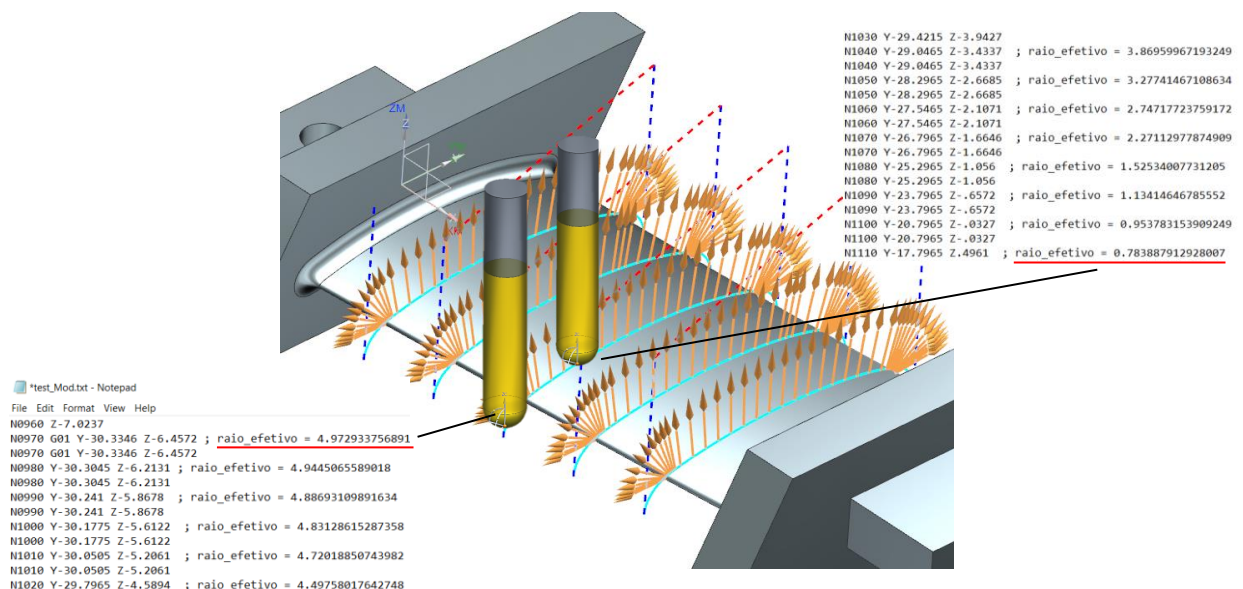


Figura 4. Posição da ferramenta sobre a trajetória e programa CNC modificado com os raios efetivo de corte comentados.

Ao plotar os valores do raio efetivo de corte é possível observar a magnitude da variação do contato ferramenta-peça, que, para uma mesma velocidade radial da ferramenta, pode-se inferir que existe uma grande variação da velocidade tangencial de corte (efetiva) durante a manufatura ($v_{ef} = \omega r$).

Para validação da rotina implementada, empregou-se tanto os dados do CAM como da geometria. Uma secção em corte passando pelo centro da ferramenta é apresentado na Fig. 5 para mostrar os recursos selecionados de medição. Foram utilizados a linha de centro da ferramenta e o ponto na superfície. Selecionando a menor distância entre entidades se tem o valor teórico obtido com o software CAD/CAM, permitindo a comparação com o valor calculado pela rotina desenvolvida.

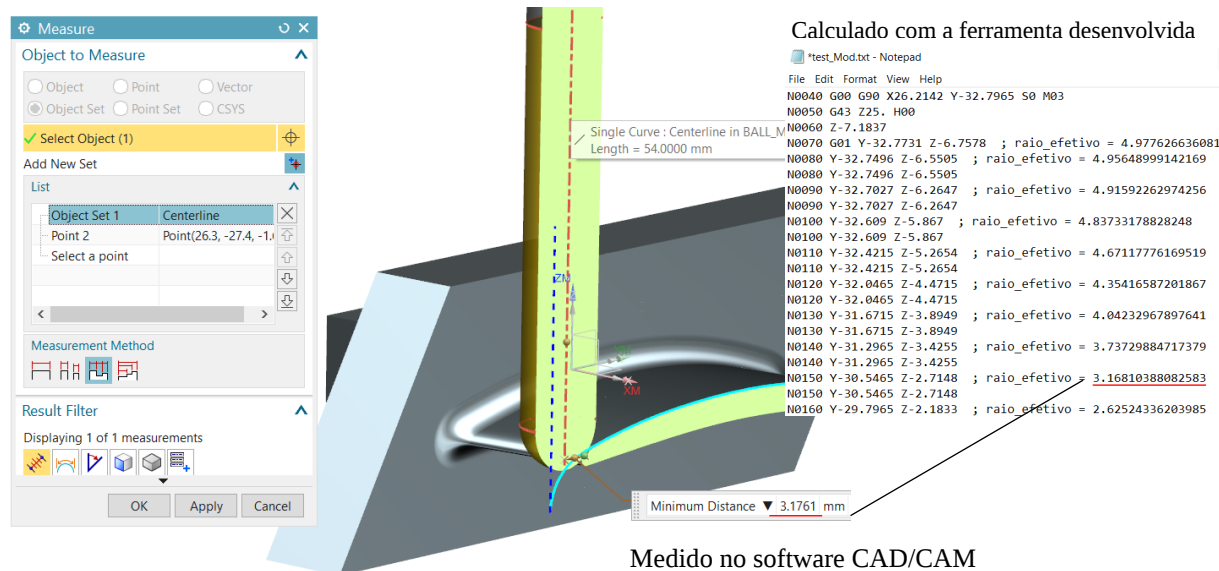


Figura 5. Medição do raio efetivo de corte com o programa CAD/CAM e comparação com o calculado pela rotina implementada.

A comparação dos 10 primeiros valores de raios efetivos obtidos pelo CAD (medido) com os calculados e adicionados ao programa pós-processado é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Valores do raio efetivo de corte calculado e teórico em função do ponto de referência.

Z (posição de referência)	R _{ef} do CAD	R _{ef} calculado	Erro %
6,76	4,99	4,97	0,31
6,55	4,97	4,95	0,33
6,26	4,93	4,92	0,29
5,87	4,85	4,84	0,28
5,26	4,68	4,67	0,29
4,47	4,37	4,35	0,35
3,89	4,05	4,04	0,31
3,42	3,74	3,74	0,11
2,71	3,18	3,17	0,25
2,18	2,63	2,63	0,09

Avaliando os dados obtidos, observa-se uma boa relação entre os valores de raio efetivo teóricos e calculados. Observando o erro percentual observa-se que existe uma tendência de aumento na precisão de cálculo conforme o raio efetivo diminui, e em nenhum caso avaliado esse erro chegou a 0,4%. Este aumento é importante por dois motivos, i) normalmente na maior parte do tempo, devido ao contato entre ferramenta-peça, o raio efetivo se aproxima de valores próximos de zero, ii) conforme o raio diminui maior a variação entre a velocidade de corte da programada pelo operador CAM ao utilizar como entrada a velocidade de referência para o raio da ferramenta esférica.

3.3. Implementação da ferramenta em software CAM comercial

O código desenvolvido em C# foi implementado no software NX utilizando a ferramenta de desenvolvedor de interface com o usuário (*Block UI Styler*), o menu foi criado e as variáveis de entrada incorporadas utilizando a linguagem do *NX Open* para o código em linguagem C#. A interface de interação com o usuário é mostrada na Fig. 6.

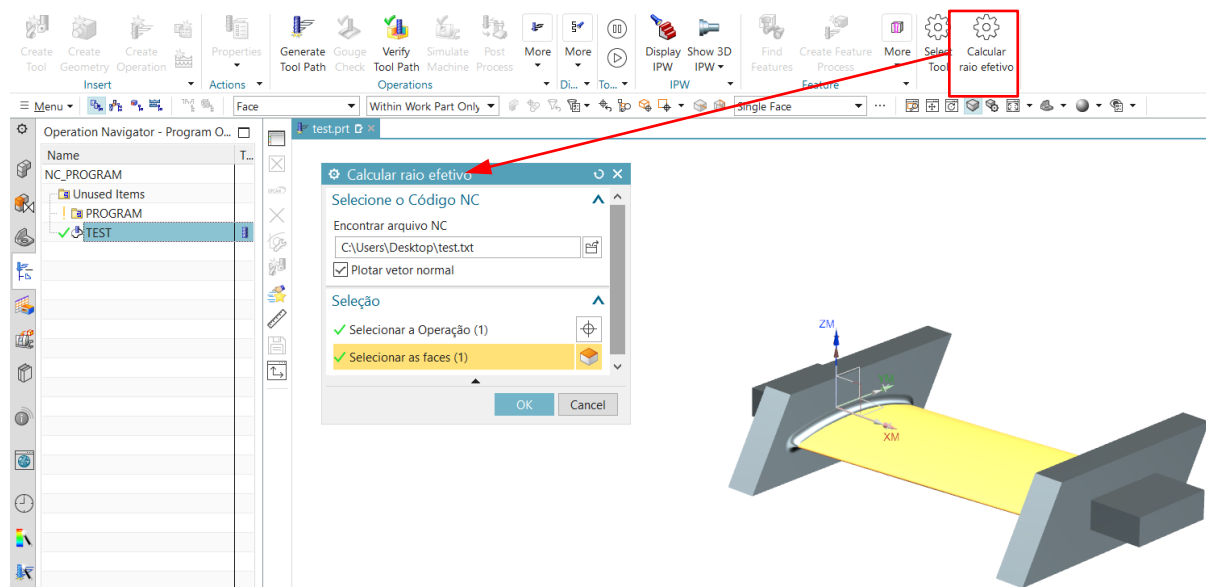


Figura 6. Menu customizado para interação com usuário.

Os dados de entrada do menu são respectivamente, o arquivo NC em formato texto (.txt) que se deseja calcular e modificar o raio efetivo, a operação CAM e as superfícies onde se programou a usinagem.

4. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento realizado para o cálculo do raio efetivo de corte é uma etapa inicial do projeto SMART CAM, projeto de otimização da programação utilizando softwares CAM. A ferramenta desenvolvida auxiliará no desenvolvimento de futuros trabalhos e implementações que necessitem dos dados de vetores e raio efetivo de corte, que junto com o estudo do contato ferramenta-peça estimarão as componentes da força de corte, desgaste de ferramenta, deflexão de ferramenta e topografia de superfície usinada. As principais conclusões deste trabalho foram:

- Mesmo os softwares tendo informações fechadas para proteger sua matemática, é possível implementar, em softwares comerciais com programação aberta, rotinas com dados de geometria e da trajetória calculada pelo CAM.
- A interface de programação desenvolvida no software de grande porte Siemens NX permitiu extrair dados de vetores normais da superfície e de trajetórias de usinagem para calcular o raio de contato efetivo e otimizar a programação CAM para fresamento de superfícies complexas.
- A validação dos valores obtidos pela ferramenta desenvolvida neste trabalho para calcular o raio efetivo de corte durante o fresamento de formas complexas demonstrou elevada precisão. Assim, esta ferramenta poderá ser empregada com sucesso em futuros módulos de extensão computacionais para otimizar a programação CNC e a usinagem de formas complexas.
- Analisando as variações dos raios efetivos plotados no código NC modificado, observou-se que o raio efetivo varia entre o valor nominal (raio da ferramenta) e zero, mas permanece a maior parte do tempo em valores mais próximos de zero do que do valor nominal.
- Com método matemático implementado com linguagem C#, o algoritmo desenvolvido apresentou um menor tempo computacional de cálculo. Fato ratificado pelo controle de memória, uma característica desta linguagem de programação que eleva a robustez e o desempenho do módulo de extensão.

5. AGRADECIMENTO

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq (Bolsa GDE 201478/2018-8).

6. REFERENCIAS

- Souza, A. F., Diniz, A. E., Rodrigues, A. R., e Coelho, R. T. (2014) Investigating the cutting phenomena in free-form milling using a ball-end cutting tool for die and mold manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(9–12), 1565–1577. doi:10.1007/s00170-013-5579-4
- Fu, Z., Yang, W., Wang, X., e Leopold, J. (2016) An analytical force model for ball-end milling based on a predictive machining theory considering cutter runout. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 84(9–12), 2449–2460. doi:10.1007/s00170-015-7888-2

- Jung, Y. H., Kim, J. S., e Hwang, S. M. (2001) Chip load prediction in ball-end milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 111(1–3), 250–255. doi:10.1016/S0924-0136(01)00528-3
- Käsemöller, R. B., de Souza, A. F., Voigt, R., Basso, I., e Rodrigues, A. R. (2020) CAD/CAM interfaced algorithm reduces cutting force, roughness, and machining time in free-form milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(3–4), 1883–1900. doi:10.1007/s00170-020-05143-x
- Lamikiz, A., Lopez De Lacalle, L. N., Sanchez, J. A., e Bravo, U. (2005) Calculation of the specific cutting coefficients and geometrical aspects in sculptured surface machining. *Machining Science and Technology*, 9(3), 411–436. doi:10.1080/15321790500226614
- Scandiffio, I., Diniz, A. E., e de Souza, A. F. (2016) Evaluating surface roughness, tool life, and machining force when milling free-form shapes on hardened AISI D6 steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82(9–12), 2075–2086. doi:10.1007/s00170-015-7525-0
- Scandiffio, I., Diniz, A. E., e de Souza, A. F. (2017) The influence of tool-surface contact on tool life and surface roughness when milling free-form geometries in hardened steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 92(1–4), 615–626. doi:10.1007/s00170-017-0093-8
- Souza, A. F. De, Machado, A., Beckert, S. F., e Diniz, A. E. (2014) Evaluating the roughness according to the tool path strategy when milling free form surfaces for mold application. *Procedia CIRP*, 14, 188–193. doi:10.1016/j.procir.2014.03.089

SMART CAM PROJECT: DYNAMIC CALCULATION OF THE EFFECTIVE CUTTING RADIUS TO SCULPTURED SURFACE MILLING AND IMPLEMENTATION IN CAD / CAM SYSTEM

Abstract. Manufacture sculptured surfaces often use ball-end tools for machining. During this process, the contact between the tool and the workpiece constantly changes, modifying the effective cutting radius of the tool, and consequently the cutting speed at the surface, the chip thickness and its area, affecting the components of the machining force. The actual CAM software are not capable to consider these machining conditions. Thus, potential optimizations to increase the productivity of this process must be considered. This work presents the development of a computational tool to calculate the effective cutting radius of a ball-end mill while machining sculptured surfaces. The calculus was implemented in Siemens CAD / CAM Siemens NX software, through its programming interface. The developed tool helps the CAM operator to visualize and optimize the programming of the milling of sculptured surfaces and contributes to the development and implementation of new routines for intelligent programming of machining of sculptured surfaces.

Keywords: *Sculptured surface. Ball-end mill. Effective cutting radius. NX Open.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.