



ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE FATORES GEOMÉTRICOS DE PEÇA E FERRAMENTA SOBRE A PRECISÃO DE TRAJETÓRIAS DE FERRAMENTA PARA MICROFRESAMENTO

¹ Marcus Vinícius Pascoal Ramos (SENAI CIMATEC) – marcuspascoal@gmail.com;

² Guilherme Oliveira de Souza (SENAI CIMATEC) – guilhermeos@fieb.org.br

Resumo: O objetivo deste trabalho foi o de investigar a influência dos fatores, raio de curvatura convexa da superfície usinada, diâmetro da fresa e tolerância CAM, no desvio médio das trajetórias de ferramenta geradas por dois softwares CAM comercialmente disponíveis. Foram criados modelos CAD e trajetórias CAM representativos desta escala, calculados os desvios e realizada uma análise estatística dos dados. Não foram identificadas diferenças para os fatores isolados e suas interações, exceto para a tolerância de trajetória CAM. A tolerância de 0,01 mm apresentou o maior desvio, entretanto, não foram evidenciadas diferenças significativas para as tolerâncias de 0,001 mm e 0,0001 mm, demonstrando não existir distinção entre os softwares adotados, para estas escalas.

Palavras-Chaves: Microfresamento; CAM; Tolerâncias.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF GEOMETRIC FACTORS OF WORKPIECE AND TOOL ON THE PRECISION OF MICROMILLING TOOL PATHS

Abstract: The goal of this work was to analyze the influence of the factors, convex curvature radius of a geometry, tool radius and CAM tolerance on the mean deviation calculated from tool paths generated by two commercially available CAM softwares. CAD models and CAM trajectories, representative for this scale were created, the deviations were calculated and a statistical analysis of the data was performed. No differences were identified for the isolated factors and their interactions, except for the CAM tolerance. The tolerance of 0.01 mm showed the greatest deviation, however, no significant differences were observed for the tolerances of 0.001 mm and 0.0001 mm, demonstrating that there is no distinction between the adopted softwares for these scales.

Keywords: Micromilling; CAM; Tolerances.



1. INTRODUÇÃO

A usinagem é um dos principais processos de fabricação utilizados para a fabricação de micropeças e, em particular, o microfresamento vem recebendo destaque. Sua vantagem mais atraente advém da capacidade de fabricação de geometrias tridimensionais complexas, em vários materiais, formas e interfaces funcionais, além da possibilidade da usinagem de materiais com elevada razão de esbeltez [1-3].

Este processo, devido à escala micro e à complexidade das geometrias processadas, necessita de suporte computacional para a sua realização, o que é feito por meio de tecnologias CNC (Comando Numérico Computadorizado) e CAM (*Computer Aided Manufacturing*). O papel desta última tecnologia é o de gerar trajetórias de ferramenta que serão posteriormente transformadas em programas CN (programas de Comando Numérico) para serem executados em máquinas CNC.

As trajetórias de ferramenta são calculadas a partir de um modelo geométrico 3D gerado em um software CAD em um processo conhecido como *Tool Path Generation* (Geração de Trajetória de Ferramenta). Para isto, os sistemas CAM disponibilizam rotinas parametrizáveis que, além do modelo geométrico da peça, levam em consideração outras informações, como as da geometria de ferramenta, do padrão de movimentação a ser adotado, das grandezas de penetração a_p (profundidade de usinagem) e a_e (penetração de trabalho) e da tolerância geométrica. Este último parâmetro deve informar o quanto é tolerável que a trajetória de ferramenta calculada pelo CAM se afaste da geometria de referência, o modelo CAD da peça e, portanto, tem forte relação com a precisão da operação de fresamento que utilizará o programa CN gerado.

O que resulta desse processo é um arquivo nativo, conhecido como CLDATA (*Cutter Location Data File*) que consiste basicamente de uma sucessão de pontos de localização de ferramenta, conhecidos como CL (*Cutter Location*), pelos quais a ferramenta deve passar. O programa CN é criado a partir do arquivo CLDATA na etapa de pós-processamento, que traduz a trajetória de ferramenta para uma linguagem apropriada para o CNC da máquina em que a operação será executada [4].

No que se refere ao microfresamento, ainda que o mercado de softwares CAM seja altamente fragmentado e competitivo, poucos softwares comercialmente disponíveis assumem ser dedicados ou possuem módulos especiais voltados às operações em microescala. Sob esse aspecto, um software CAM para operações de usinagem em escala convencional nem sempre apresentará resultados satisfatórios em operações de microescala [1].

Uma das principais preocupações é com a precisão das trajetórias de ferramenta geradas, que precisa atender aos requisitos de precisão micrométricos e submicrométricos de operações de microfresamento. Neste sentido, este artigo tem como objetivo verificar se as proporções da geometria a ser usinada e da fresa a ser utilizada possuem influência na precisão das trajetórias de ferramenta geradas. Para



tal, foi analisada a influência dos fatores, raio de curvatura convexa da superfície a ser usinada, diâmetro da fresa e tolerância CAM, sobre o desvio médio calculado das trajetórias de ferramenta geradas por dois softwares CAM comercialmente disponíveis, um que se propõe a gerar trajetórias para microfresamento e outro que não.

2. METODOLOGIA

A influência dos fatores geométricos de peça e ferramenta sobre a precisão das trajetórias de ferramenta foi analisada estatisticamente e o experimento foi delineado como fatorial completo, com 4 fatores de controle em 2 e 3 níveis, conforme informado na Figura 1. Para determinar a precisão das trajetórias de ferramenta, foram calculados os desvios das trajetórias com relação a um modelo analítico de referência. Estes desvios foram, portanto, as respostas do experimento utilizadas na análise estatística.

Figura 1. Fatores de controle, níveis e respostas da pesquisa.

Fatores de controle	Níveis	Respostas
Raio da geometria (RG)	0,5 mm; 1 mm; 10 mm	Desvios das trajetórias da ferramenta
Diâmetro da ferramenta (DF)	0,1 mm; 0,5 mm; 1 mm	
Tolerância (TOL)	0,01 mm; 0,001 mm; 0,0001 mm	
Softwares CAM (CIM ou HSM)	Cimatron; Inventor HSM	

Dois sistemas CAM comercialmente disponíveis foram utilizados nesta pesquisa. O primeiro, o software *Cimatron*, da fabricante *3D Systems*, é o único software comercial que anuncia capacidade de gerar trajetórias de ferramenta para microfresamento através de um módulo específico integrado, e o *Inventor HSM Ultimate*, versão 2017, da *Autodesk*, que disponibiliza licença sem custo para estudantes e instituições de ensino. Foram geradas 27 trajetórias para cada sistema CAM e os arquivos CLDATA foram utilizados para o cálculo e análise dos desvios.

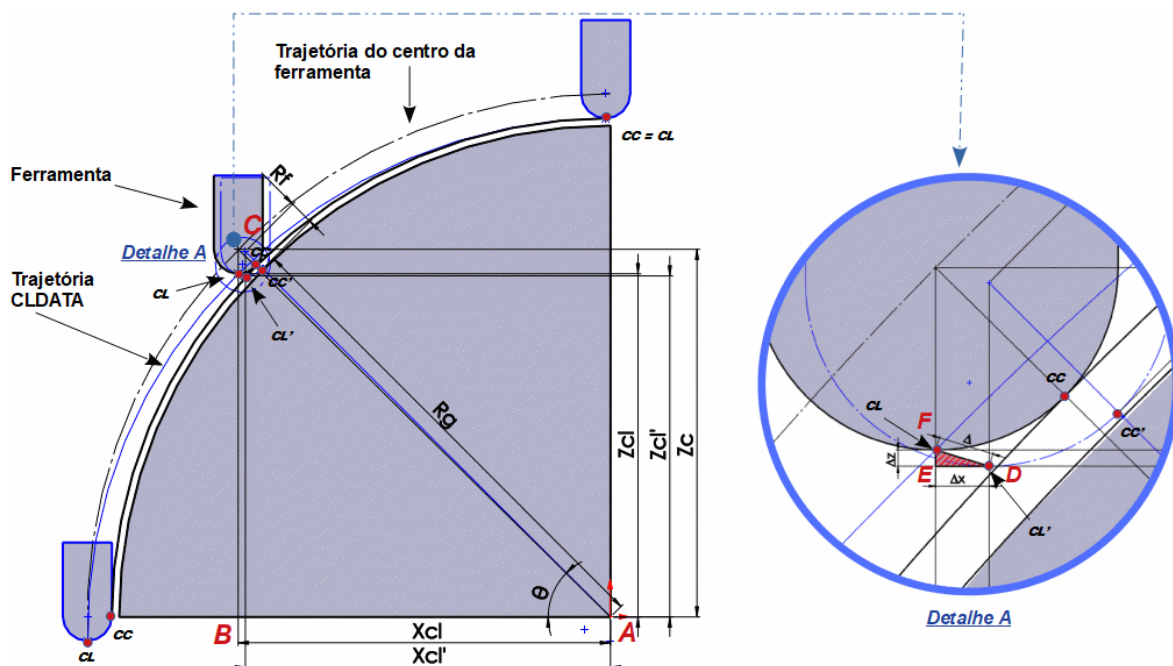
Para o cálculo dos desvios, Pontos de Referência foram calculados utilizando o software *Microsoft Excel 2017*, que dispõe de uma resolução de 15 dígitos. Os cálculos utilizados para a determinação do desvio (Δ_{cl}), obedeceram às relações representadas na Figura 2. A seguir, são listadas as considerações fundamentais para este cálculo:

- as superfícies usinadas foram cilíndricas, com raio conhecido (0,5, 1 e 10 mm) e modeladas em torno do eixo Y;
- essas superfícies constituíam modelos CAD nativos, ou seja, foram modeladas em arquivos separados para cada superfície diretamente nos módulos CAD dos softwares adotados;
- as trajetórias de ferramenta foram compostas de passes paralelos com direção de avanço perpendicular ao eixo de simetria da superfície cilíndrica;



- a curva composta pelos pontos de contato (CC), ou tangência, da ferramenta com a superfície cilíndrica eram arcos de raio conhecido e igual ao da superfície em usinagem R_g (0,5, 1 e 10 mm), com centro em $(X; Z) = (0;0)$ e contidos em planos paralelos ao plano XZ;
- para cada trajetória de ferramenta, os desvios foram calculados apenas para um trecho de 1 passe (1 arco), considerado do primeiro ao último ponto em que havia contato, ou seja, desconsiderando movimentos de engajamento e saída.

Figura 2. Representação geométrica para o cálculo dos desvios de trajetória.



Desta forma, a partir da posição em Z do arquivo CLDATA (Z_{cl}) e conhecendo o raio (R_f) da ponta da ferramenta de topo esférico, foi possível encontrar a coordenada Z do centro da esfera (Z_c) para cada ponto e determinar a trajetória do centro da ferramenta, conforme Equação 1.

$$Z_c = Z_{cl} + R_f \quad (1)$$

Com a determinação da posição do centro da ferramenta, assumindo que a posição em X (X_{cl}) permanece a mesma, da relação trigonométrica observada a partir do triângulo ABC da Figura 2, foi possível determinar o ângulo de posição da ferramenta (θ) para cada ponto CL das trajetórias (Equação 2):

$$tg \theta = \frac{Z_c}{X_{cl}} = \frac{Z_{cl} + R_f}{X_{cl}} \rightarrow \theta = \arctg\left(\frac{Z_{cl} + R_f}{X_{cl}}\right) \quad (2)$$

Na sequência, cada ângulo de posição (θ) foi utilizado para calcular um Ponto de Referência ($X_{cl'}$; $Z_{cl'}$), determinado considerando novamente a relação trigonométrica do triângulo ABC, além da informação do raio da superfície cilíndrica (R_g) através das Equações 3 e 4.



$$\text{sen } \theta = \frac{Z_c}{R_g + R_f} = \frac{Z_{cl'} + R_f}{R_g + R_f} \rightarrow Z_{cl'} = \text{sen } \theta \cdot (R_g + R_f) - R_f \quad (3)$$

$$\text{cos } \theta = \frac{X_{cl'}}{R_g + R_f} \rightarrow X_{cl'} = \text{cos } \theta \cdot (R_g + R_f) \quad (4)$$

O Ponto de Referência ($X_{cl'}$; $Z_{cl'}$) corresponde à posição da ferramenta, para um determinado ângulo de posição θ , calculado por um modelo analítico. Ou seja, essas seriam as coordenadas da posição da ferramenta para um determinado ângulo de posição θ , caso a trajetória da ferramenta fosse calculada utilizando um modelo analítico. Logo, os desvios de posição das coordenadas foram encontrados a partir da diferença entre a posição calculada pelos softwares CAM (X_{cl} e Z_{cl}) e a posição das coordenadas calculadas a partir do modelo analítico ($X_{cl'}$ e $Z_{cl'}$), descrita nas Equações 3 e 4. Portanto, as Equações 5 e 6, determinam a variação dos desvios de posição para as coordenadas X (Δ_x) e Z (Δ_z).

$$\Delta_x = X_{cl'} - X_{cl} \quad (5)$$

$$\Delta_z = Z_{cl'} - Z_{cl} \quad (6)$$

Por fim, o *Detalhe A* da Figura 2 ilustra, na forma de linhas tracejadas da ferramenta e trajetória, o desvio (Δ_{cl}) encontrado entre a trajetória gerada pelos softwares CAM e a trajetória calculada analiticamente, sendo assim, atendendo a relação trigonométrica do triângulo *DEF* gerado nesta nova posição pelos pontos de localização esperada da ferramenta (CL') e de localização *CLDATA* (CL), foi possível determinar os desvios entre trajetórias (Equação 7):

$$\Delta_{cl} = \sqrt{(\Delta_x^2 + \Delta_z^2)} \quad (7)$$

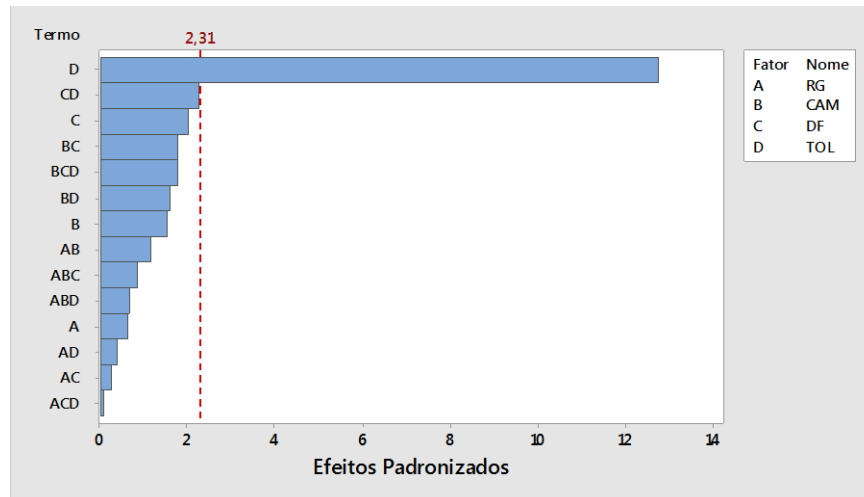
A significância dos fatores foi analisada mediante o gráfico de Pareto e o de efeitos principais, para isso, utilizando a versão de avaliação do software estatístico *Minitab 18*. Todos os testes foram realizados adotando um nível de confiança de 95% para todos os intervalos, o que corresponde a um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta o gráfico de Pareto dos efeitos para os fatores: raio da geometria (A), software CAM (B), diâmetro da ferramenta (C) e tolerância de trajetória (D), individuais e combinados, sobre o desvio de trajetória médio.



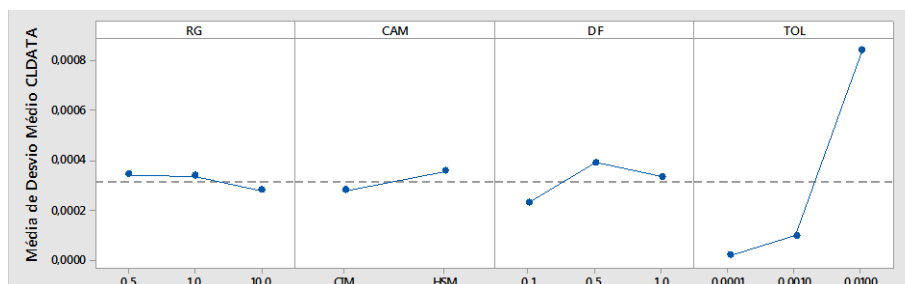
Figura 3. Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados dos fatores analisados sobre o desvio de trajetória médio.



Conforme análise do gráfico, as barras que cruzam a linha de referência (em 2,31), são consideradas estatisticamente significativas. Nesse caso, observa-se que os fatores avaliados não apresentam influência significativa no desvio médio das trajetórias (com 95% de confiança), com exceção da tolerância (D). Isto significa que não há relevância estatística nos desvios em decorrência da variação o raio da geometria (A), diâmetro da ferramenta (C), software CAM (B) e na interação entre eles. Portanto, enfatiza-se que a variável mais influente entre os fatores no desvio da trajetória é a tolerância.

Como o gráfico de Pareto exibe o valor absoluto dos efeitos, é possível determinar quais fatores, ou combinação destes, possui maior influência do desvio médio das trajetórias, no entanto, não é possível determinar de modo específico quais efeitos possuem influência no aumento ou redução dos desvios de trajetória. Assim sendo, para apoiar adequadamente as considerações aqui descritas, o gráfico de efeitos principais foi investigado. As avaliações gráficas estabelecidas pela análise dos efeitos principais em torno das médias, caracterizando a influência de cada fator isoladamente no desvio médio para as trajetórias da ferramenta geradas a partir do arquivo CLDATA, podem ser feitas a partir da Figura 4.

Figura 4. Gráfico de efeitos principais para o desvio médio gerado a partir do CLDATA.





Assim como analisado no gráfico de Pareto, o gráfico de efeitos principais mostra que a tolerância apresentou maior variação em torno da média e distanciamento entre os níveis e, portanto, exerce maior influência nos desvios médios das trajetórias, quando comparada com os outros fatores. Considerando os efeitos individuais dos níveis no fator tolerância, pode-se observar que os maiores desvios de trajetória foram encontrados para a tolerância de 0,01 mm. Percebe-se, entretanto, que não existem diferenças estatísticas para as tolerâncias de 0,001 mm e 0,0001 mm. Nestes casos, a faixa de variação destes desvios é extremamente pequena.

Visando avaliar o comportamento dos desvios médios das trajetórias dentro das faixas de tolerâncias, em especial para a tolerância de 0,0001 mm, indicada para o microfresamento, foram verificadas as posições destes desvios dentro da banda de tolerância estabelecida nos softwares CAM, conforme Figuras 5 e 6 a seguir.

Figura 5. Gráfico representativo dos pontos de desvios médios para a banda de tolerância de 0,0001 mm do CLDATA do *Inventor HSM*.

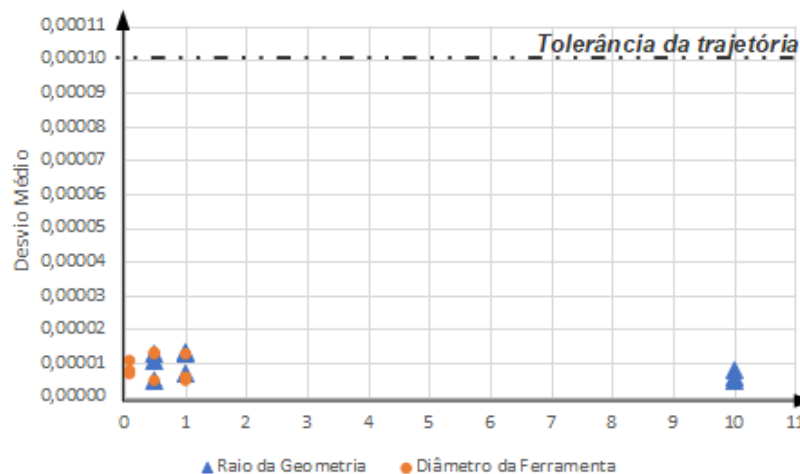
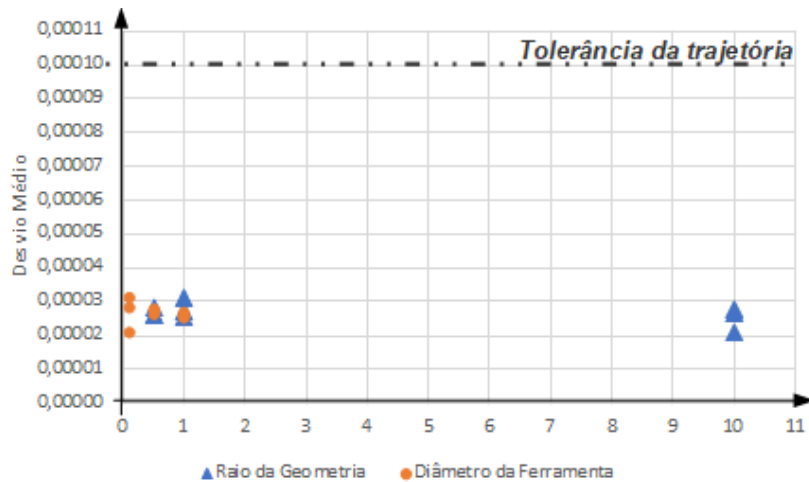


Figura 6. Gráfico representativo dos pontos de desvios médios para a banda de tolerância de 0,0001 mm do CLDATA do *Cimatron*.



Da análise das figuras, foi possível inferir que, para as trajetórias geradas, os dois softwares CAM apresentaram desvios dentro da banda de tolerância estabelecida nas configurações de trajetória destes softwares (0,0001 mm) e, portanto, apresentam precisão de cálculo adequada para aplicações de microfresamento.

4. CONCLUSÃO

A análise do gráfico dos efeitos principais e de Pareto permitiu avaliar que os fatores, raio de geometria, diâmetro da ferramenta e software CAM, não possuem influência significativa nos desvios gerados das trajetórias dos softwares CAM, individualmente, ou quando se relacionam, indicando irrelevância estatística. Por outro lado, foi possível apreciar que o fator que apresentou maior influência nos desvios de trajetórias da ferramenta, individualmente e nas interações com outros fatores, foi a tolerância.

Os maiores desvios de trajetória encontrados estão relacionados com a tolerância de 0,01 mm. Para tolerâncias na faixa micrométrica (0,001 mm) e submicrométrica (0,0001 mm), os desvios não são considerados significativos para os diversos fatores e suas interações. Sendo assim, no que tange à utilização dos softwares estudados, não foi evidenciada significância estatística que os diferencie.

A análise de posição dos desvios médios das trajetórias dentro da banda de tolerância de 0,0001 mm (Figuras 5 e 6), configurada nos softwares CAM e recomendada para o microfresamento, corrobora a conclusão de que, em termos de precisão dos cálculos matemáticos de geração de trajetórias, não foram encontradas diferenças entre os dois softwares avaliados para a geração de trajetórias com tolerâncias recomendadas para aplicações em microfresamento. O que é uma conclusão importante, uma vez que aponta para a possibilidade de gerar trajetórias de microfresamento em softwares CAM que não têm módulos dedicados a estas aplicações.

5. REFERÊNCIAS



- ¹ GHERMAN, L.; GLEADALL, A.; BAKKER, O. RATCHEV, S. Manufacturing Technology: Micro-machining. In: FASSI, I.; SHIPLEY, D. (Ed.). **Micro-Manufacturing Technologies and Their Applications: A Theoretical and Practical Guide**. Cham: Springer, 2017. Cap. 4. p. 97-127.
- ² THEPSONTHI, T.; ÖZEL, T. An integrated toolpath and process parameter optimization for high-performance micro-milling process of Ti-6Al-4V titanium alloy. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 75, n. 1-4, p. 57-75, 2014.
- ³ POPOV, K.; DIMOV, S.; PHAM, D.; IVANOV, A. Micromilling strategies for machining thin features. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, v. 220, n. 11, p. 1677-1684, 2006.
- ⁴ CHOI, B. K.; JERARD, R. B. **Sculptured surface machining: theory and applications**. Springer Science & Business Media, 2012.