

INFLUÊNCIA DAS TRAJETÓRIAS DA FERRAMENTA NO FRESAMENTO DE GEOMETRIAS COMPLEXAS

Luane Maria de Brito Prata

Muriel de Bona Porton Guarezi

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

luane.prata@grad.ufsc.br

muriel.porton@grad.ufsc.br

Adriano Fagali da Silva

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

adriano.fagali@ufsc.br

Resumo: Em processos de fresamento é fundamental a determinação dos parâmetros de usinagem, de forma a se buscar o melhor resultado possível que otimize toda a cadeia de manufatura. A trajetória que a ferramenta percorre na peça influencia no contato ferramenta-peça que é determinante no acabamento. Deve-se evitar situações em que o centro da ferramenta está em contato com a superfície usinada, pois essa gera um esmagamento da peça e não retira o cavaco. Em processos de acabamento o objetivo é deixar o mais alto padrão de qualidade possível. É essencial considerar a otimização do processo e determinar trajetórias que sejam mais rápidas e, ao mesmo tempo, ofereçam o menor erro de forma assim como a superfície com menor rugosidade. A estratégia de trajetória comumente utilizada na indústria é de passes paralelos a 45°, pretende-se estudar sua eficiência em comparação a estratégia de offset de contorno externo. Além da trajetória determinada, um fator importante a se considerar é a tolerância do processo de acabamento. O limite de tolerância determinado determina a faixa de distância da superfície percorrida pela ferramenta em relação a superfície da peça. Programas com menores valores de tolerância geram programas CNC maiores e com mais coordenadas a serem seguidas, o que aumenta o tempo de manufatura. O estudo analisa o fator estratégia e tolerância da usinagem e quantifica sua influência no tempo real da usinagem e na forma da peça produzida em relação à projetada. Para isso, foram realizados quatro programas com as duas diferentes estratégias e para cada trajetória, duas tolerâncias distintas. Os resultados mostram uma redução no tempo na trajetória de offset do contorno externo e um desempenho de qualidade superficial geral menor desvio padrão na média para a estratégia de passes paralelos a 45°.

Palavras-chave: Fresamento CNC, Trajetória de usinagem, qualidade da superfície, Tempo de usinagem

1. INTRODUÇÃO

Processos de fresamento podem ter seu tempo, e consequentemente custo, reduzido com a escolha adequada de trajetória de ferramenta, fator que também impacta na rugosidade superficial da peça (Ramos, Relvas e Simões, 2003). A trajetória da ferramenta pode ser interpretada como o percurso que define o movimento de contato que ocorre entre a peça e a ferramenta durante a fabricação. Scandiffio et al (2017) observou como o contato ferramenta peça em formas complexas pode influenciar na qualidade superficial em sua fabricação, principalmente no acabamento.

Em especial no acabamento, é essencial a escolha dos parâmetros de corte ideais. Trata-se do processo de fabricação mais essencial que determina a qualidade da superfície e, geralmente, é o mais significativo no tempo de fabricação total (Souza e Ulbrich, 2013). Por isso, é essencial determinar estratégias que a ferramenta percorre pela superfície de modo a otimizar os processos, porém não abrir mão da qualidade superficial. A escolha incorreta destes parâmetros pode tornar o processo ineficiente ou prejudicar a forma e a rugosidade da peça usinada.

As escolhas no processo se agravam quando a peça a ser produzida é de forma complexa. Segundo Souza e Ulbrich (2013), geometrias complexas são aquelas que não são representadas por formas geométricas convencionais da matemática, mas por splines. Estes definem splines como geometrias que cada ponto da forma possui um raio de curvatura distinto e independente dos adjacentes.

Um operador de máquinas, no entanto, não tem como produzir peças com formas complexas manualmente sendo necessário o auxílio de comandos computadorizados. Quando o software faz os programas para produção da peça, ele gera coordenadas para a ferramenta executar, então essas formas complexas são descritas por segmentos de retas. O tamanho dessas retas é definido a partir da tolerância que o usuário determina e pela forma da superfície. De acordo

com Camargo et al (2014), menores tolerâncias geram programas que seguem a forma mais fielmente, porém devido a problemas de processamento da máquina CNC (comando numérico computadorizado) ocorre uma redução do avanço do programa o que faz com que o tempo de produção aumente.

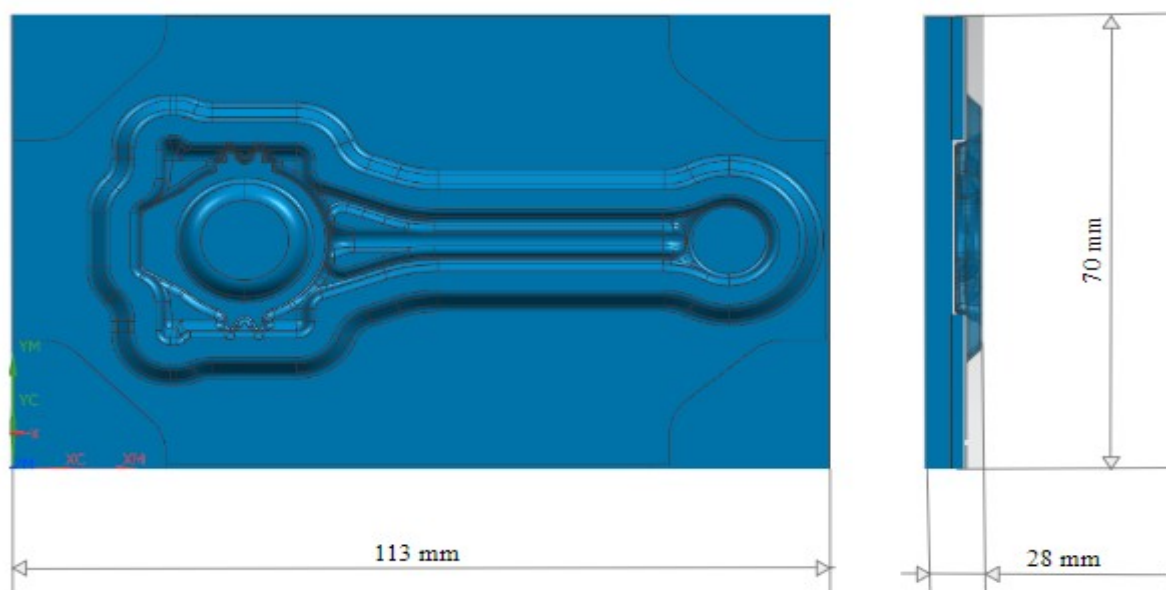
Um importante parâmetro para a indústria é a duração de manufatura, softwares CAM (manufatura auxiliada por computador) possuem ferramentas que tentam fazer uma previsão do tempo exigido de produção. A abordagem utilizada por sistemas CAM é genérica, sem considerar as limitações de cada máquina, e na maioria dos casos, possui um erro muito grande. Buscando suprir essa demanda a equipe GPCAM (grupo de pesquisa de manufatura auxiliada por computador), então, desenvolveu um plug-in que é capaz de determinar com grande precisão o tempo necessário de fabricação da peça usinada.

O seguinte trabalho tem como objetivo analisar o fator estratégia e tolerância da usinagem e quantificar sua influência no tempo real da usinagem e na qualidade superficial da peça produzida. Para estimar o tempo real foi utilizado o sistema computacional CAM Estimator desenvolvido pelo grupo GPCAM.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A parte experimental foi realizada por experimentos de fresamento com uma geometria que tem características comumente encontradas na indústria, fig. 1. O corpo de prova foi produzido em um centro de usinagem CNC Romi D600. A máquina utiliza o comando GE-Fanuc 0i-MC. Os programas foram gerados no software de simulação NX.

Figura 1 - Corpo de prova



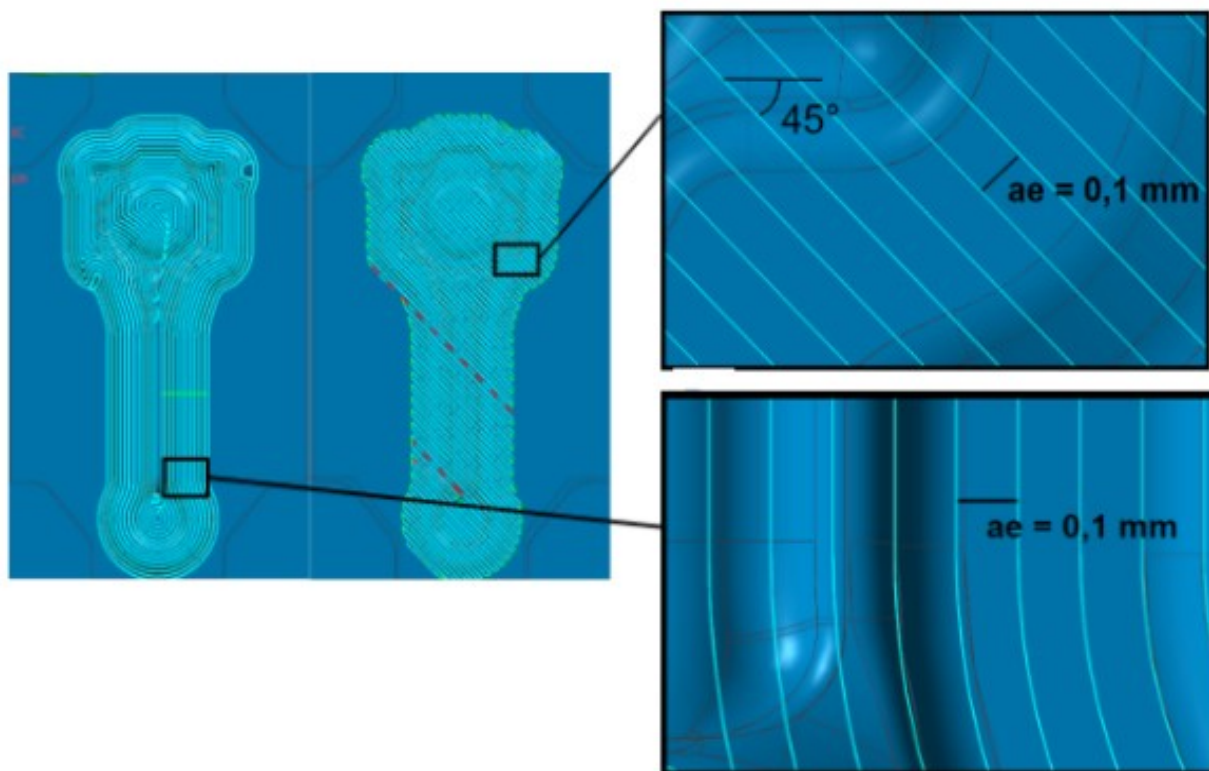
Foi avaliada a influência da tolerância e da estratégia de usinagem no tamanho dos programas CNC, e consequentemente no tempo real de usinagem e sua influência na qualidade superficial. Os dados obtidos no tempo real de usinagem foram comparados com os tempos previstos por diferentes métodos de previsão de tempo de usinagem. Os parâmetros utilizados na fabricação dos corpos de prova estão expostos na tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros de Usinagem

Material	Aço 1045
Ferramenta de acabamento	Diâmetro esférico 6 mm - 2 arestas
Ferramenta - Material	Carboneto de tungstênio
Ferramenta - Cobertura	TiNAl
Balanço	25 mm
Refrigeração	Ar comprimido – 6 bar
Passo lateral (ae) - Acabamento	0,1 mm
Velocidade de corte (vc)	120 mm/min
Avanço por aresta (fz)	0,15
Rotação (S)	6366 rpm
Taxa de avanço (F)	1909,8 mm/min

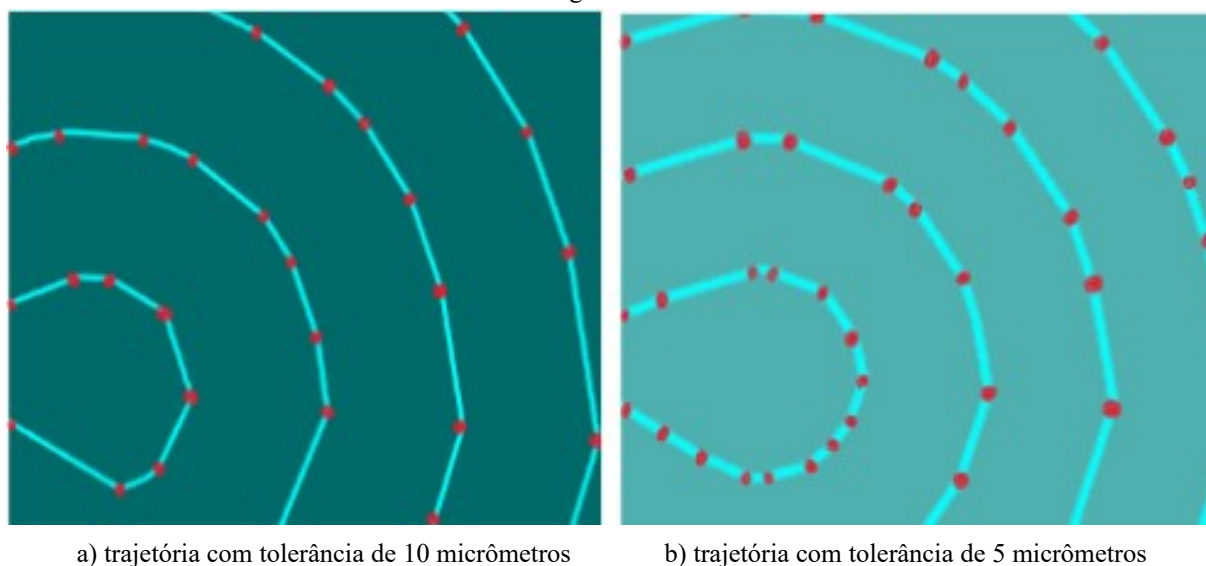
Conforme apresentado por Vila et al (2019), as trajetórias mais utilizadas nas indústrias são os passos paralelos (direction parallel) e passes em offset de contorno externo (contour parallel). Assim o presente trabalho utilizará estas estratégias de usinagem. Assim, foi determinado os estudos das estratégias Offset de contorno externo e passos paralelos a 45 graus, fig. 2.

Figura 2 - Estratégias de fresamento



Foram selecionadas então duas tolerância para estudo. Foi proposto o valor de 10 micrômetros para análise e comparar seu desempenho com metade de seu valor, 5 micrômetros. A figura 3 explicita a diferença na dispersão de coordenadas necessárias para gerar a trajetória em relação à tolerância de cálculo.

Figura 3 - Tolerâncias

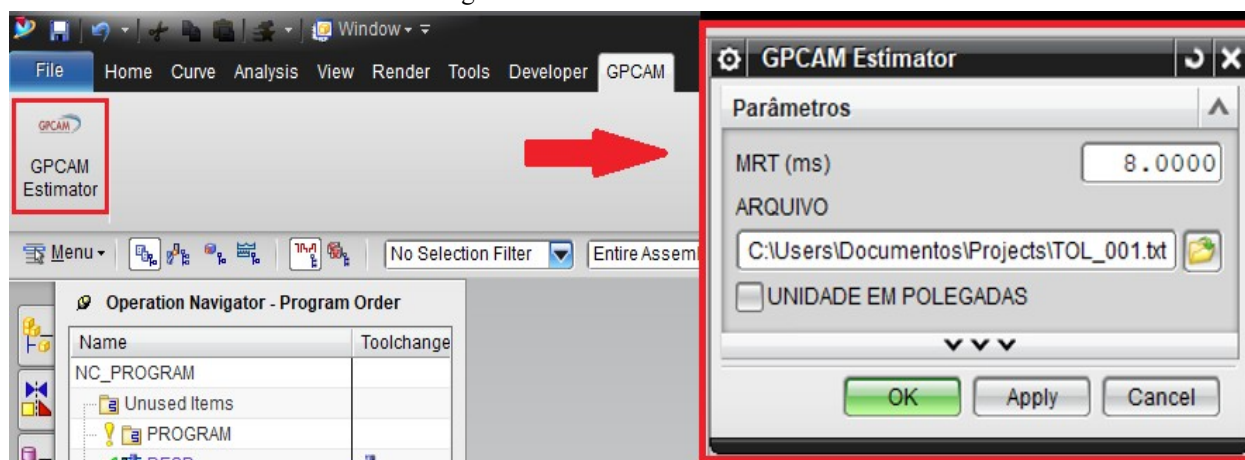


É notório que a tolerância de 5 micrômetros gera um programa com maior número de pontos e, consequentemente, segmentos, resultando em curvas mais suaves principalmente na representação de formas complexas. Apesar de gerar curvas mais suaves, essa não é uma garantia que a superfície gerada pela fabricação se torne mais suave. Para a análise superficial será utilizado um rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-210 que fornecerá o resultado da rugosidade Ra em micrômetros. Ferraresi (2018) quando fez considerações sobre a norma de rugosidade de superfícies NB-93 da ABNT colocou a avaliação da rugosidade determinada pelo valor do desvio médio aritmético (Ra) que oferece um método eficaz e rápido para análise superficial de peças usinadas.

Na usinagem de geometrias complexas, devido a limitações de processamento da máquina CNC, os programas CNC com pequenos segmentos de reta não permitem-na atingir a velocidade de avanço programada.

Essa informação não é reconhecida pelo software CAM, e o tempo previsto acaba sendo impreciso. Para corrigir essa limitação e, auxiliar no planejamento de produção, o Grupo de Pesquisa em Manufatura Auxiliada por Computador (GPCAM), da UFSC Joinville, desenvolveu um plug-in ao software CAD/CAM NX Siemens que permite determinar o tempo real de usinagem com maior precisão. Essa ferramenta foi implementada ao software como ilustra a Fig. 4.

Figura 4 – Menu do CAM Estimator



O plug-in pode ser adaptado para qualquer software CAM, sabendo que ele depende principalmente do arquivo de texto com as coordenadas que é gerado pelo software. Além de uma métrica obtida através de ensaios na máquina CNC, procurando descobrir o tempo de resposta para variados valores de avanço, entre diversos tamanhos de segmento de reta. A partir desses dados é possível calcular a distância entre as coordenadas e criar uma relação com a limitação da máquina.

A interface de usuário do GPCAM Estimator possui três parâmetros, sendo o primeiro o Machine Response Time (MRT), que é uma medida obtida a partir do ensaio da máquina CNC, que representa o tempo de atraso de processamento, em milissegundos. O tempo de atraso é uma propriedade de cada máquina, e depende do hardware/software construído. Esse atraso é responsável por não conseguir atingir a velocidade de avanço determinada para certas tolerâncias, conceito apresentado por Coelho et al (2010).

Segundo os autores, a origem da discrepância entre tempo de usinagem real e o tempo previsto por sistemas CAM comerciais, está no fato que os sistemas comerciais não consideram as limitações da máquina-CNC, apenas estimam o tempo de usinagem considerando o comprimento total da trajetória com a velocidade de avanço constante, fato que não ocorre na prática.

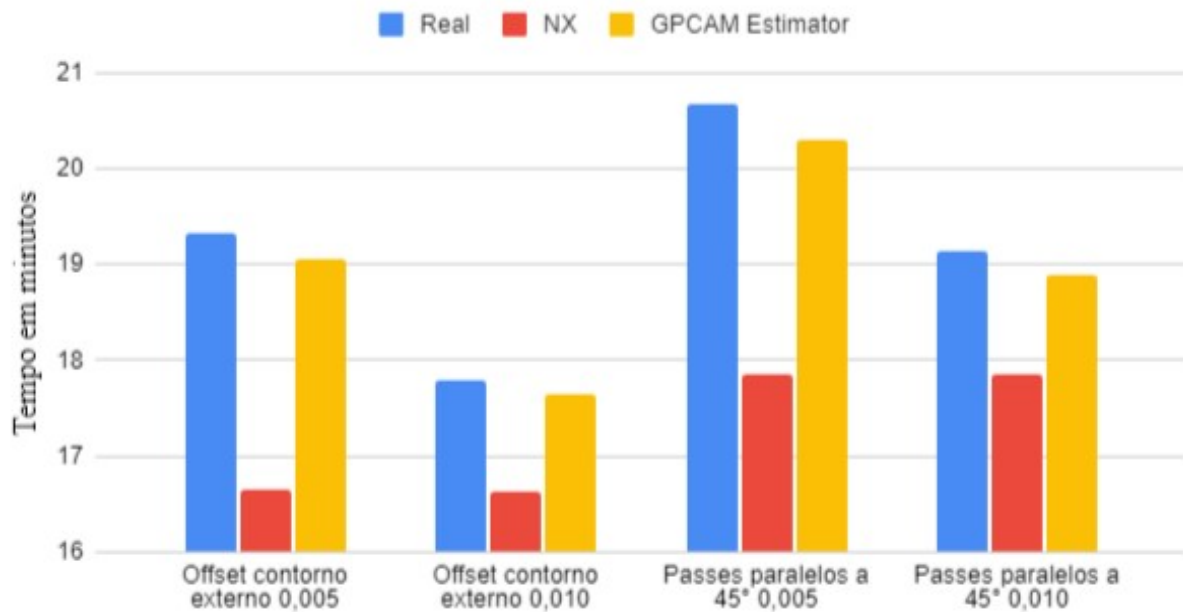
Sistemas CAM consideram que, em todo percurso da fresa, a velocidade de avanço se mantenha de forma constante no valor programado. No sistema desenvolvido pelo grupo (CAM Estimator), é considerado o atraso de processamento da máquina para determinar o tempo de manufatura mais próximo do real.

O segundo parâmetro é o arquivo CNC, em formato de texto. Esse podendo ser em polegadas ou milímetros. Por fim, o terceiro parâmetro, um botão em que o usuário pode determinar a unidade utilizada no arquivo, indicado se este está ou não em polegadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A figura 5 mostra um comparativo entre o tempo real da produção de cada peça, o tempo que o software NX tinha estimado e o resultado obtido no cálculo do tempo com o CAM Estimator.

Figura 5 - Estimativas de tempo para manufatura



O gráfico apresenta a comparação no tempo de manufatura de cada peça de acordo com sua trajetória e o tamanho da tolerância determinados. A duração em minutos e a tolerância em milímetros. Em azul o tempo real, em vermelho a duração calculada pelo software CAM e enfim em amarelo, o tempo estimado pelo plug-in GPCAM Estimator. A trajetória de passos paralelos a 45 graus demorou 7% mais que a offset de contorno externo. É possível perceber a discrepância entre os valores reais e o calculado pelo software CAM. O plug-in, por outro lado, considera as limitações de cada máquina e sua menor estimativa chegou a 98% do valor real.

Para a peça produzida é possível perceber a vantagem que o padrão offset de contorno externo possui comparado aos passos paralelos a 45°, o primeiro tem um tempo menor de produção. Para entender essa vantagem foram utilizadas abordagens estatística e gráfica. A figura 6 mostra a diferença do número de pontos entre os programas de comunicação com a máquina gerados para cada experimento. Utilizando as distâncias entre coordenadas do projeto, foram encontrados valores referentes à média, desvio padrão e variância dos segmentos de reta percorridos pela ferramenta durante a fabricação, que estão explícitos na tabela 2.

Figura 6 - Comparativo quantidade de pontos no programa CNC

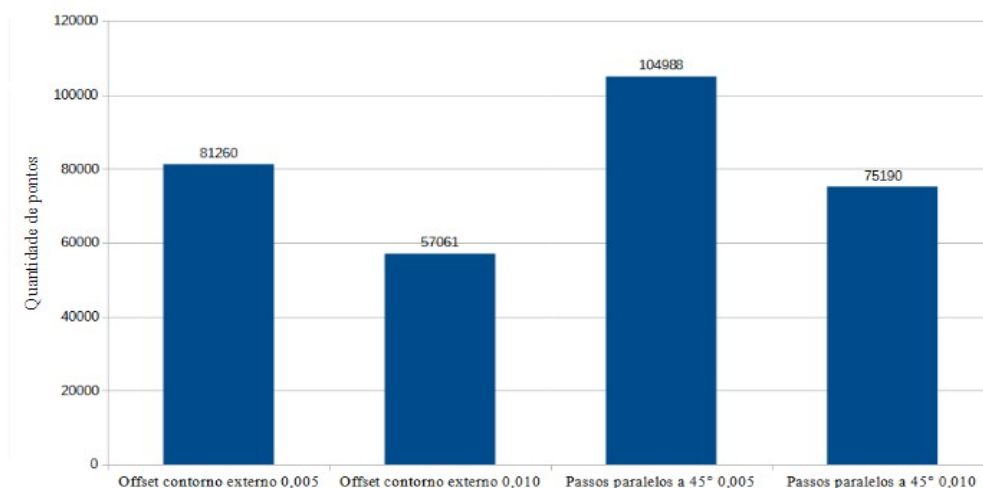


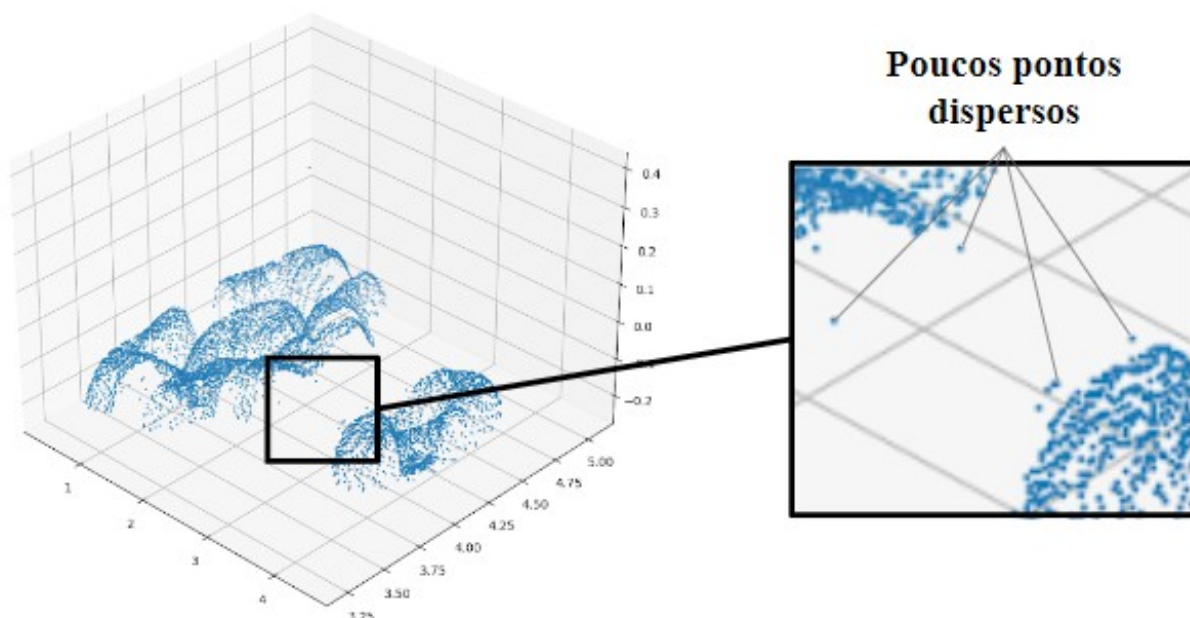
Tabela 2 : Estatísticas referentes aos segmentos de reta no projeto de manufatura

	Offset 0,005	Offset 0,010	Passos paralelos 0,005	Passos paralelos 0,010
Média	0,23	0,34	0,23	0,28
Desvio padrão	1,78	1,85	0,82	0,89
Variância	3,17	3,44	0,67	0,79

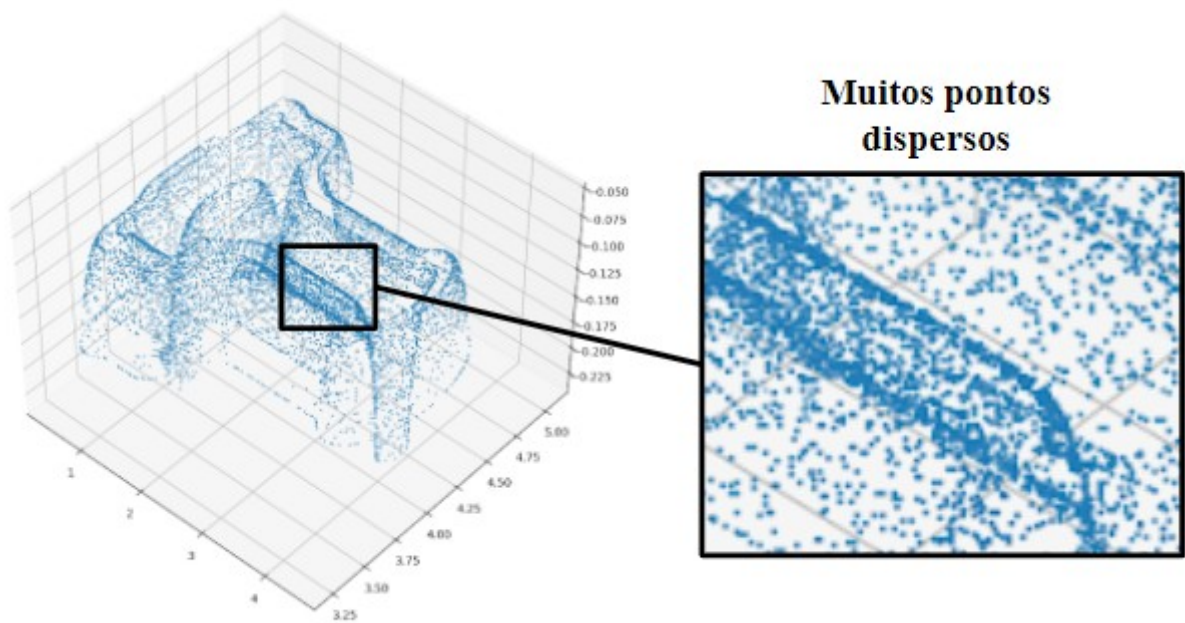
Com esses dados é possível admitir que, independente da tolerância, a distribuição de tamanhos de segmento de reta é muito maior para o offset de contorno externo, isso pode ser interpretado como: o offset de contorno externo aproveita melhor os trechos onde há extensos segmentos de reta, o que não ocorre com passos paralelos a 45°, para essa peça produzida. O que complementa essa idéia é que o tamanho do arquivo de passes paralelos a 45° são 30% maiores que o de offset.

Por fim, foi colocado em um gráfico 3D os pontos das coordenadas de 10% do total do arquivos do offset de contorno externo (figura 7a) e dos passos paralelos a 45° (figura 7b) de mesma tolerância. Com esse resultado, é possível notar que a trajetória de offset de contorno externo apresenta menos pontos dispersos em trechos planos. A trajetória de passos paralelos a 45°, no entanto, possui coordenadas bem dispersas por toda sua superfície.

Figura 7 - Representações da trajetória em um gráfico 3D das coordenadas



a) Gráfico offset de contorno externo

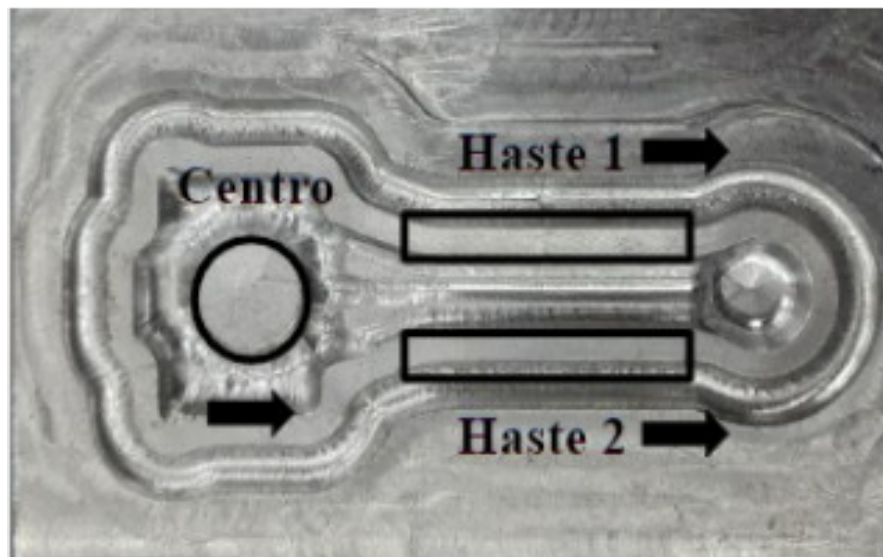


b) Gráfico passos paralelos a 45°

A máquina CNC possui uma limitação natural que não é capaz de alcançar a velocidade de avanço projetada devido ao seu tempo de resposta (Souza et al, 2014). Em uma trajetória retilínea maior, a ferramenta pode alcançar a velocidade programada, o que é refletido no tempo de execução do programa.

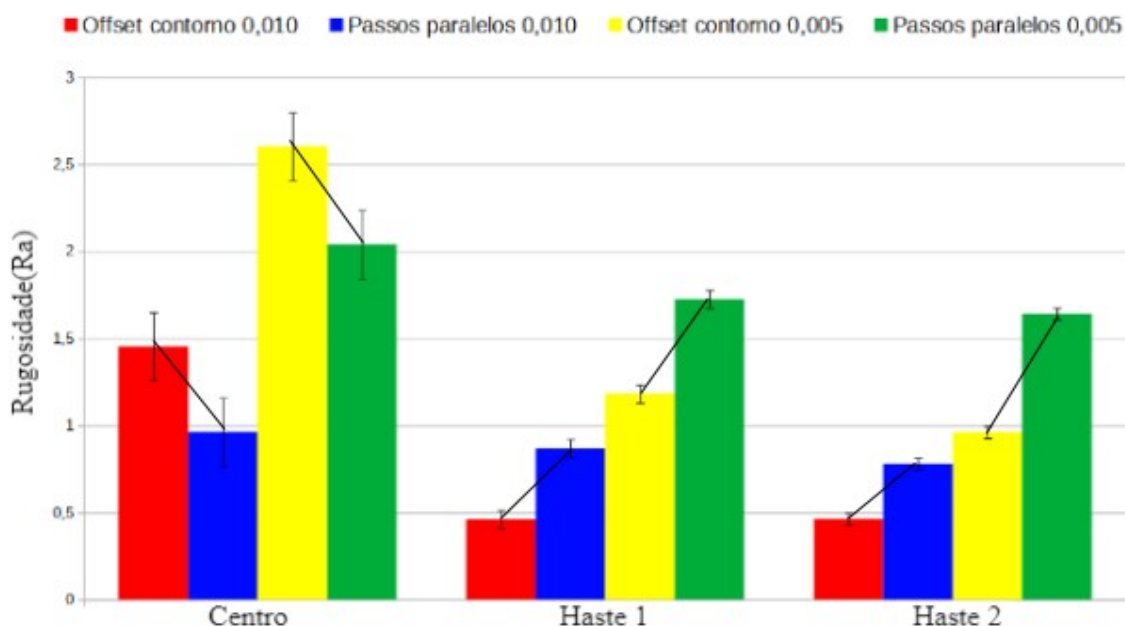
Para a comparação da qualidade superficial da peça foi feita a análise da rugosidade do corpo de prova fabricado. Como o rugosímetro empregado calcula a rugosidade em superfícies planas, foram selecionadas as regiões destacadas na figura 8 para análise e o sentido de medição indicado.

Figura 8 - Corpo de prova fabricado



Quando analisados os resultados da rugosidade da superfície nas três regiões representadas na figura obteve-se os resultados, em micrômetros, descritos na figura 9. Foram realizados três repetições em cada região e calculado a média.

Figura 9 - Gráfico da rugosidade de cada trajetória e tolerância



Para a estratégia offset do contorno externo houve um melhor resultado superficial nas regiões das hastes onde os segmentos são descritos por retas de comprimento maior, como observado na fig. 7b, e não sofre influência do movimento de oscilação da ferramenta. Ao calcular uma média entre os valores de cada região, observa-se que a estratégia de passes paralelos tem um desempenho geral com menor valor.

Quando comparada a rugosidade em função da tolerância, os programas com 10 micrômetros tiveram uma qualidade superficial menor em todas as regiões. Apesar do programa com a tolerância de 5 micrômetros gerar trajetórias mais suaves no CAM esse fato não é observado no cálculo da rugosidade da superfície.

Sugere-se que as condições que influenciam no cálculo do tempo também interferem na qualidade superficial. Como foi investigado por Souza et al (2014), é possível que a oscilação do avanço altera a carga da ferramenta e danifica a rugosidade da superfície, fato que fica evidente em programas com tolerâncias menores.

4. CONCLUSÃO

Através dos estudos realizados foi possível conhecer as influências das trajetórias de ferramentas e tolerância de cálculo no tempo de usinagem e na rugosidade para a fabricação de uma matriz para forjamento de bielas. As principais conclusões são:

- Observa-se que o tamanho do programa CNC influencia no tempo de usinagem real, e esta está relacionada com a tolerância de cálculo. Reduzindo-se a tolerância em 50%, o programa CNC aumentou em média 35% a quantidade de pontos e o tempo real aumentou 8 %
- Observou-se que os programas CNC com a trajetória com offset de contorno externo possuíam segmentos de trajetória maiores (distância entre os pontos da trajetória) resultaram em menor tempo de usinagem. Considerando a média do comprimento dos segmentos, a trajetória offset de contorno externo apresentou um desvio padrão superior, atingindo até 1,85 mm. Este fato resultou na redução do tamanho do programa CNC em 30% e redução do tempo de usinagem em torno de 7%. Contudo, maiores alterações de comprimento dos segmentos de reta do programa CNC resultaram em elevadas acelerações e desacelerações durante a usinagem, fato que elevou a rugosidade em 216% nas áreas complexas, pois estas oscilações podem prejudicar a superfície usinada.
- Nas regiões planas menos complexas (haste 1 e 2) a rugosidade foi mais influenciada pela trajetória. A trajetória offset de contorno externo resultou melhor qualidade nestas regiões específicas, a passo que na região com curvas no trajeto (centro) passos paralelos a 45° apresentou o melhor resultado.
- Os programas com tolerância de 5 micrômetros além de demorarem 8% de tempo a mais para serem executados e gerarem programas maiores e mais pesados para serem processados, causam uma rugosidade 8% maior na peça fabricada.
- O CAM estimador apresentou um erro de 2% no cálculo do tempo de cada usinagem, demonstra que pode ser empregado de maneira satisfatória em ambiente industrial.

5. REFERÊNCIAS

- Camargo, L.G., Souza, A.F., Podda, L., 2014, *Estudo dos métodos de trabalho em sistemas CAM para a geração de programas CNC com foco no pós-processamento*, Ferramental - Revista Brasileira da Indústria de Ferramentais, Joinville, Vol. 55, pp.19-25.
- Coelho, R. T.; Souza, A. F.; Roger, A. R.; Rigatti, A. M. Y.; Ribeiro, A. A. L. Mechanistic approach to predict real machining time for milling free-form geometries applying high feed rate. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, n 46, p 1103-1111, 2010. doi 10.1007/s00170-009-2183-8
- Ferraresi, Dino. Fundamentos da Usinagem dos Metais. Brasil, Blucher, 2018 .
- Ramos, A. M.; Relvas, C.; Simões, J. A. *The influence of finishing milling strategies on texture, roughness and dimensional deviations on the machining of complex surfaces*. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 136, n. 1, p. 209-216, 2003.
- 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., Coelho, R.T. Rodrigues, A. R. . *CAMESTIMATOR* - Processo 08622-4. 2008. Patente: Programa de Computador. Número do registro: 08622-4, data de registro: 16/10/2008, título: "CAMESTIMATOR - Processo 08622-4" , Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial.
- Souza, A. F.; Ulbrich, C. B. L. (2013). *Engenharia Integrada por Computador e Sistemas CAD/CAM/CNC*. Princípios e Aplicações. Editora: ArtLiber. 335P. ISBN 8588098903.
- Souza, A. F; Machado, A; Beckert, S. F.; Diniz, A .E. 2014. *Evaluating the roughness according to the tool path strategy when milling free form surfaces for mold application*. 6th CIRP International Conference on High Performance Cutting, HPC2014. Berkeley, California. doi: 10.1016/j.procir.2014.03.089
- Vila, C, Ayabacaa, C, Torresa R, Gutiérreza, S. C, Meseguera, A, X. Yanga. (2019). Analysis of Different Tool Path Strategies for Free Form Machining with Computer Aided Surface Milling Operations. *Procedia Manufacturing* 41 (2019) 843-850.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

INFLUENCE OF TOOL PATH IN MILLING OF COMPLEX GEOMETRIES

Luane Maria de Brito Prata

Muriel de Bona Porton Guarezi

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

luane.prata@grad.ufsc.br

muriel.porton@grad.ufsc.br

Adriano Fagali da Silva

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

adriano.fagali@ufsc.br

Abstract. *In milling processes, it is fundamental to determine the machining parameters, in order to reach the best results that optimizes the entire manufacturing process. In finishing processes, the objective is to reach the highest possible quality standard to the part. The tool path strategy can impact the surface roughness due to the alterations on the tool-surface engagement. On the areas where the tool tip takes part on the machined surface the material is removed by ploughing instead of shearing. This fact injures the surface roughness. However, it is not clear how the tool path strategy can influence the roughness. Besides, it is expected the real machining time could also be influenced by the tool path strategy. It is essential to consider the optimization of the process and determine trajectories that are faster and, at the same time, offer the smallest shape error as well as the surface with less roughness. The tool path strategy commonly used in the industry is parallel passes at 45°. The current work investigates its efficiency in comparison to the strategy of offset the outer contour. In addition to the determined trajectory, an important factor to consider is the tolerance of the finishing process. The determined tolerance limit determines the range of distance from the surface executed by the tool in relation to the surface of the part. Programs with lower tolerance values generate larger CNC programs with more coordinates to be followed, which increases the machining time. The study analyzes the machining strategy and tolerance factor and quantifies its influence on the real machining time and the roughness. For this, four programs were performed with two different strategies and for each trajectory, two different tolerances. The results show a reduction in time in the outer contour offset path and lower overall surface quality performance for the 45° tool path parallel passes.*

Keywords: CNC milling, machinig path, surface quality, machinig time.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.