

AVALIAÇÃO DOS ESFORÇOS DE CORTE NO PROCESSO DE ABERTURA DE CAVIDADES POR INTERPOLAÇÃO HELICOIDAL NO MICROFRESAMENTO

Gildeones Andrade Protázio

Amauri Hassui

Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), R. Mendeleyev, 200 - Cidade Universitária, Campinas - SP, 13083-860

gpandrade@fem.unicamp.br

ahassui@fem.unicamp.br

Carlos Eiji Hirata Ventura

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Rod. Washington Luiz, s/n, São Carlos - SP, 13565-905

ventura@ufscar.br

Luciano Wallace Gonçalves Barbosa

Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), R. Mendeleyev, 200 - Cidade Universitária, Campinas - SP, 13083-860

lucianowbarbosa@gmail.com

Resumo. A busca por alternativas e aperfeiçoamento ao que é tradicional e está consolidado impulsiona a melhoria contínua de todos os processos produtivos e isso também se aplica à usinagem. Uma operação que veio como consequência dessa metodologia é o microfresamento, que trouxe consigo suas próprias características e desafios a serem compreendidos. Dessa forma, esse trabalho almejou contribuir avaliando os esforços de corte quando esse processo é aplicado na estratégia de abertura de cavidade por interpolação helicoidal. Com essa finalidade, cavidades circulares de 1.400 μm de diâmetro foram usinadas com uma microfresa de topo reto de 800 μm em aço ferramenta AISI P20 com diferentes avanços por dente. Os dados foram adquiridos através de dinamômetro e gráficos foram gerados juntamente com testes estatísticos para avaliar as condições. Ao final, foi notado aumento dos esforços na direção axial e comportamento atípico da força de usinagem, sugerindo influência da falta de rigidez da ferramenta.

Palavras chave: Microfresamento. Moldes e matrizes. Forças de usinagem. Abertura de cavidades.

1. INTRODUÇÃO

A miniaturização de componentes tem ocorrido em larga escala, chegando à gradação micro e nano. Rodrigues e Jasinevicius (2017) afirmam que a manufatura de microcomponentes foi primeiramente apresentada na década de 60 pela indústria do relógio e seguiu como campo estratégico na década de 70. Weule et al. (2001) complementam que a pesquisa em microusinagem a partir dos anos 80 passou a apresentar também foco no microfresamento de moldes e matrizes.

A diminuição do tamanho da ferramenta, por sua vez, traz consigo desafios e características próprias, que acentuam as diferenças em relação ao processo em escala macro. O principal desafio é o efeito escala, um aumento na energia específica de corte acompanhado pela alteração do mecanismo de remoção de cavaco (Chae et al., 2006; Jackson, 2007). A sua origem está no sulcamento, fenômeno que se torna relevante em microescala devido à proporção do raio de aresta em relação à espessura de corte, o que leva a deformações plásticas/elásticas e dificulta o cisalhamento do material.

Dessa forma, este trabalho propõe avaliar os esforços de corte em microfresamento durante a abertura de cavidades por interpolação helicoidal. Para isso, cavidades circulares foram usinadas em um aço ferramenta AISI P20, com um dinamômetro triaxial sendo utilizado para aquisição dos sinais de força. A variação de avanço por dente em relação ao raio de aresta (f_z/r_n) foi utilizada para obter diferentes níveis de influência do efeito escala. Ao final, espera-se que esse trabalho possa contribuir para discussão do uso do microfresamento para fabricação de moldes e matrizes.

2. METODOLOGIA

O corpo de prova teve como matéria-prima o aço ferramenta AISI P20, comumente utilizado para fabricação de moldes e matrizes. Ele foi entregue pelo fabricante em estado pré-endurecido, com 34 HRc de dureza, e não passou por nenhum tratamento térmico. Dimensões de 150 mm x 110 mm x 10 mm foram obtidas após usinagem e retificação do referido material para se evitar erros de paralelismo entre as faces.

As cavidades circulares possuem diâmetro de 1400 μm e profundidade (p_c) de 800 μm . Elas foram usinadas com passo axial de 200 μm /volta, sendo necessárias, portanto, 4 voltas em hélice para usiná-las. Uma câmera fotográfica de

5,0 MP, modelo IS500 da Bel Photonics, acoplada a um microscópio óptico do mesmo fabricante, modelo SZT, com aumento de até 45 vezes, foi utilizada para registro e avaliação qualitativa.

Para a execução do processo, foram utilizadas microfresas de topo reto com 2 arestas, 800 μm de diâmetro e 30° de ângulo de hélice. Elas foram fabricadas em metal duro, com revestimento de TiAlN. Sua aresta de corte, medida em um microscópio confocal LEXT OLS 4100, possui um raio (r_n) médio de 1,84 μm , com desvio padrão de 8,7%.

A operação de microfresamento foi feita em condições de corte a seco em um centro de usinagem DMG, modelo DMU 40 eVo/Linear, que atinge rotações de 42.000 rpm e possui potência máxima de 18 kW. A velocidade de corte utilizada foi de 100 m/min, que, em função do diâmetro da microfresa, levou a uma rotação de 39789 rpm. A variação de avanço por dente (f_z), indicada na Tab. 1, foi empregada para analisar diferentes condições de corte, tendo em vista possíveis ocorrências de sulcamento e/ou cisalhamento.

Tabela 1. Valores de avanço por dente utilizados no teste

f_z/r_n	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
f_z [$\mu\text{m}/\text{dente}$]	0,46	0,92	1,38	1,84	2,30	2,76	3,22	3,68

A aquisição dos sinais foi feita em um dinamômetro piezelétrico triaxial Kistler, modelo 9257B, ligado a um amplificador, também da Kistler, modelo 5019B, e a uma placa de aquisição de sinais National Instruments, modelo PCI-6025E. A taxa de aquisição empregada foi de 25 kHz por canal e foi utilizado um filtro passa baixa de 10 kHz. A análise dos esforços de corte adquiridos ocorreu com auxílio de algoritmos em Matlab e aplicação de testes estatísticos no Minitab.

A Figura 1 ilustra o procedimento experimental adotado e apresenta fotos das cavidades usinadas e da ferramenta utilizada. Também estão representadas as direções dos eixos X, Y e Z positivos, segundo a leitura do dinamômetro.

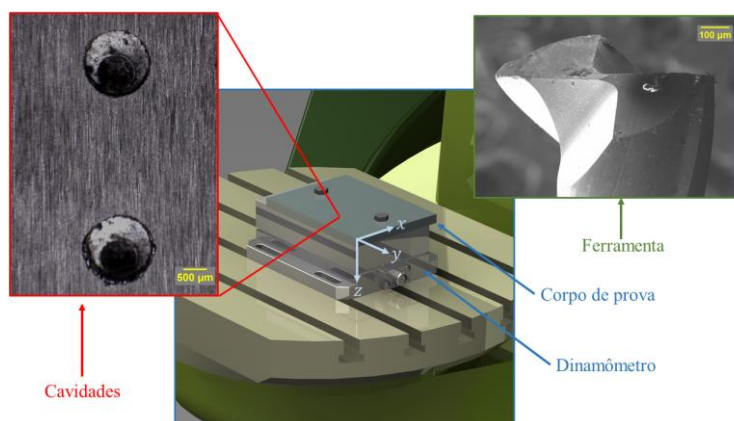


Figura 1. Representação do procedimento experimental adotado para os testes

3. RESULTADOS

Após a aquisição dos sinais, o comportamento dos esforços de corte nas direções X, Y e Z foram obtidos com auxílio do Matlab, conforme ilustrado nas Fig. 2 a, b e c, onde se tomou o teste com $f_z/r_n = 0,25$ como exemplo. As características verificadas nos sinais, levando em consideração os perfis formados ao longo da usinagem das 4 hélices, são similares, mesmo para diferentes taxas de f_z/r_n , variando apenas a redução de amostras adquiridas por consequência da diminuição do tempo de corte.

Nas Figura 2a e Figura 2b, notam-se intensidades de força diferentes ao longo de cada hélice nos sinais nas direções X e Y. Um formato bem estabelecido pode ser apontado, com exceção da primeira e da última volta, visto que elas são afetadas pelo processo de estabilização do corte e preparação para saída da ferramenta da cavidade. Portanto, na primeira volta, há uma transição do volume de cavaco removido igual à zero até o volume removido instantâneo correspondente à posição da ferramenta dentro da cavidade. Já na última volta, há uma desaceleração da ferramenta até sua parada e movimento retilíneo de subida para sua saída.

Assim, analisando-se apenas as voltas intermediárias, pode-se apontar que a alternância de direção de avanço entre X e Y durante a execução da estratégia helicoidal afeta o sinal em sua amplitude, fenômeno que corresponde a uma característica da dinâmica de corte.

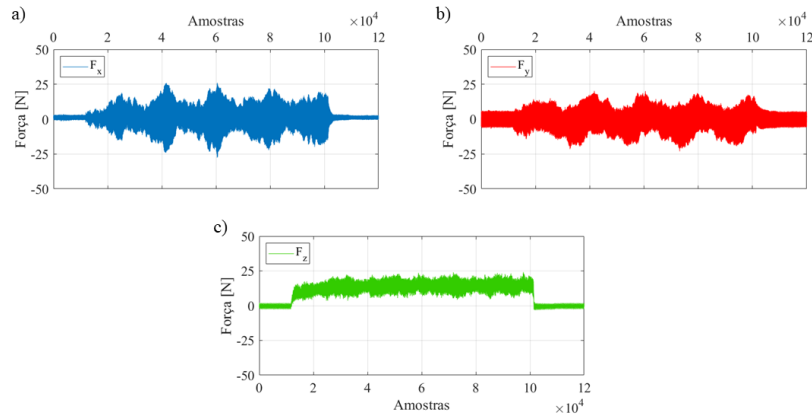


Figura 2. Sinal Bruto dos esforços de corte nas direções (a) X, (b) Y e (c) Z para o teste com $f_z/r_n = 0,25$

Já a direção Z coincide com a direção de esforços axial e seu comportamento está representado na Fig. 2c. O perfil é marcado por um súbito aumento até sua estabilização, sem passar por variações de intensidade similares àqueles experimentados em X e Y. Isso se deve ao valor constante do passo axial a cada hélice percorrida pela ferramenta. Esse comportamento pode ser verificado pelo valor eficaz da força em diferentes profundidades (todas as hélices) para diferentes valores de f_z/r_n , conforme mostra a Fig. 3.

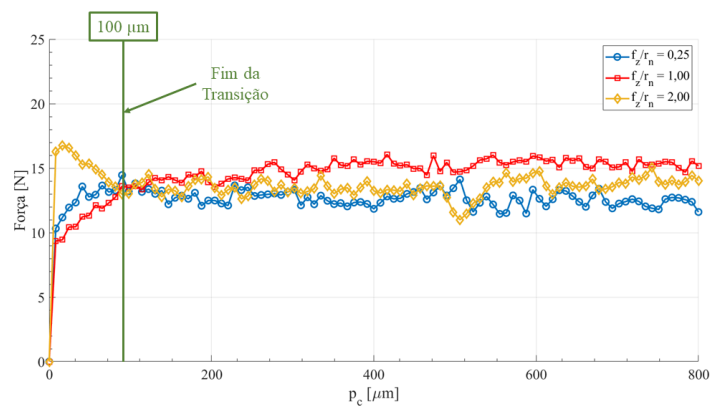


Figura 3. Valor eficaz para os esforços de corte na direção axial durante a usinagem em hélice

Para obtenção da Figura 3, uma rotina de cálculo foi construída, agrupando dez ciclos de corte ao longo do sinal em cem diferentes pontos com intervalos iguais entre si. O cálculo de valor eficaz foi aplicado para cada grupo e correlacionado com a profundidade da cavidade à qual pertencia. As relações de 0,25, 1,00 e 2,00 foram escolhidas por representarem os extremos e a mediana das condições utilizadas no experimento.

Pode-se apontar que, para todos os experimentos, após um período de transição, terminado em $p_c = 100 \mu\text{m}$, as energias dos sinais se mantêm em nível similar. Todavia, a análise de variância (ANOVA) obtida a partir dos dados da força axial (Tab. 2) apontou para importantes diferenças. Para isso, foram considerados apenas amostras contidas entre a segunda – iniciando em $200 \mu\text{m}$ e terminando em $400 \mu\text{m}$ – e a terceira volta da hélice – iniciando em $400 \mu\text{m}$ e finalizando em $600 \mu\text{m}$ – com $50 \mu\text{m}$ de distância entre si. Primeiramente, a normalidade foi confirmada através do teste Anderson-Darling, que verificou – com um p-valor de 0,869 – a rejeição da hipótese de os dados não seguirem uma distribuição normal, o que impossibilitaria a utilização da ANOVA por esta apenas poder ser aplicada a dados paramétricos. Em seguida, a interação de segunda ordem foi descartada do teste devido ao grau de liberdade (GL) dos resíduos resultar em zero, o que conduzia o teste estatístico a um p-valor nulo. Excluindo-se a interação de segunda ordem, o GL foi alterado, o que possibilitou a continuação do teste. Vale ressaltar que outra alternativa para alteração do GL seria fazer uma réplica dos experimentos, mas como se tratam de testes preliminares de verificação, optou-se pela retirada da interação de maior ordem. É necessário destacar ainda o valor de R-quadrado igual a 74,24%, que, apesar de ser considerado baixo, não sinaliza que as conclusões obtidas da tabela sejam imprecisas, mas, sim, que há oportunidade de melhoria do modelo através da adição de mais réplicas ou adição de novos níveis e fatores.

Tabela 2. ANOVA obtida para os esforços axiais com a utilização da estratégia helicoidal

Fator	GL	SS	F-valor	P-valor
f_z/r_n	7	108,50	12,28	0,000
p_c	8	31,50	3,12	0,009

GL: Graus de Liberdade, SS: Soma dos quadrados

A partir da análise, é possível afirmar que os valores de força axial obtidos são estatisticamente diferentes com um nível de confiança acima de 99% para os diferentes f_z/r_n e p_c experimentados. Para o fator f_z/r_n , é esperado um aumento no valor eficaz dos esforços axiais devido ao incremento na área de corte. Já a influência sobre p_c pode ser justificada pela forma como se dá o corte na estratégia helicoidal aliada a falta de rigidez da ferramenta. No início da segunda volta, a maior parte do comprimento útil da microfresa está fora da cavidade e ao ser empurrada contra as suas paredes, possivelmente é mais solicitada na direção radial, pois, o momento fletor criado nessas condições é maior do que em profundidades maiores. A medida que p_c aumenta, o momento fletor diminui e as paredes da cavidade passam a atuar como guias, dando sustentação a ferramenta e transferindo a solicitação para direção axial.

Sobre os perfis dos esforços adquiridos através do percurso de corte da referida estratégia, é possível notar diferentes comportamentos quando analisadas apenas duas voltas do corte nas direções X, Y e Z (Fig. 4). Para a avaliação, foram tomados quatro pontos diferentes de profundidade de cavidade e que estão contidos entre a segunda e terceira volta.

Assim, é possível apontar que os esforços analisados possuem comportamentos e intensidades diferentes durante os diferentes pontos da trajetória, com F_z atingindo maiores intensidades que F_x e F_y . Dessa forma, conclui-se que a direção axial é a mais exigida pela estratégia.

Destacam-se ainda os diferentes formatos da força de usinagem (F_u). Como se trata da resultante das forças ativa (F_a) e passiva de corte (F_p), o seu formato é sensível ao volume de cavaco removido e alterações durante a revolução da ferramenta podem ser apontadas. Em $p_c = 250 \mu\text{m}$ e $p_c = 450 \mu\text{m}$, nota-se uma possível queda de volume de cavaco removido na região próxima a 90° . No caso estudado, a microfresa possui dois dentes e o percurso de corte de cada aresta é descrito no intervalo de 180° . Em uma usinagem de macroescala, para este local, seria esperado o ponto de máximo de uma concavidade voltada para baixo devido à espessura de cavaco não-deformado variar da mesma forma. Como isso não ocorre, pode-se supor que houve queda no volume de cavaco removido nessa região e se pode apontar a falta de rigidez da microfresa como um fator que contribuiu para isso. Ao se reduzir o tamanho da ferramenta, perde-se a rigidez, tornando a microfresa mais sensível a deflexões.

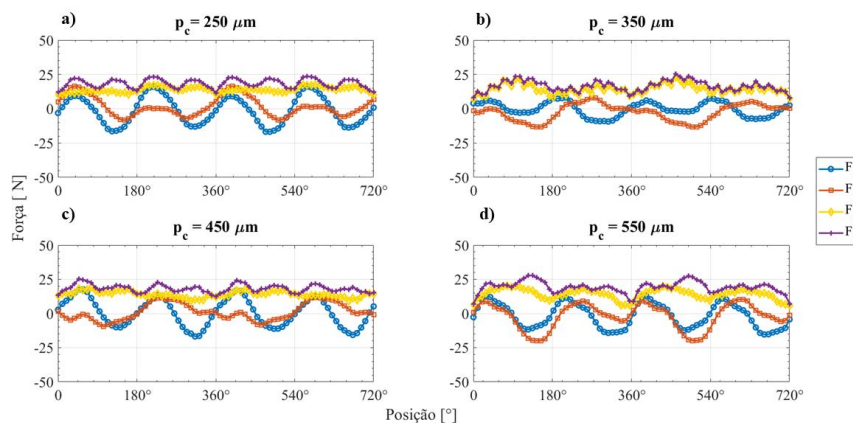


Figura 4. Esforços adquiridos em diferentes profundidades da cavidade para o teste com $f_z/r_n = 1,00$ nas direções X (F_x), Y (F_y), Z (F_z) e força de usinagem (F_u): (a) $p_c = 250 \mu\text{m}$, (b) $p_c = 350 \mu\text{m}$, (c) $p_c = 450 \mu\text{m}$, (d) $p_c = 550 \mu\text{m}$

Já em $p_c = 350 \mu\text{m}$ e $p_c = 550 \mu\text{m}$, é possível apontar uma proximidade maior com o perfil esperado de uma usinagem em macroescala, porém, ainda há a possível ação da deflexão. Em especial para o caso de $p_c = 350 \mu\text{m}$, um comportamento serrilhado acompanha a curva, o que pode sugerir instabilidade da ferramenta devido ao contato da aresta secundária, pois F_z possui o mesmo formato e o corte com a parte de baixo da aresta afeta diretamente a força na direção axial.

Não foi possível definir uma influência de f_z/r_n no comportamento dos esforços nessas direções. Apesar de a literatura apontar para a diminuição da ação do sulcamento com o aumento do avanço por dente, essa diminuição será melhor notada com auxílio dos esforços tangenciais e radiais. Contudo, mediante ao que foi abordado, é possível apontar que o aumento do avanço acarretará em esforços axiais maiores quando a microfresa é submetida à estratégia helicoidal.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho, a estratégia de abertura de cavidade por interpolação helicoidal no microfresamento foi realizada em um aço ferramenta AISI P20, com diferentes relações de f_z/r_n . Através de uma avaliação estatística, foi possível atestar que a força axial é diferente entre os testes executados, aumentando com o aumento do avanço. A profundidade da cavidade também influenciou a força axial, o que pode ter ocorrido pela ação do momento fletor ocasionado pela dinâmica de corte, diminuindo com o aumento da profundidade de cavidade, transferindo sollicitação da direção radial para axial.

A força de usinagem demonstrou comportamento inesperado, com aparente diminuição de volume de cavaco removido em certos trechos. Tal fato pode ter ocorrido pela falta de rigidez da ferramenta combinada à dinâmica de corte da estratégia, que altera a trajetória da aresta de corte principal sob influência da aresta secundária. Para futuros trabalhos, serão buscados os esforços na direção tangencial e radial, além de se obter a energia específica de corte para estratégia.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as fundações de amparo à pesquisa dos estados de São Paulo (FAPESP) e do Amazonas (FAPEAM) pelo suporte financeiro e bolsa de auxílio à pesquisa, além da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP) pelo suporte em equipamentos e auxílio de colaboradores.

6. REFERÊNCIAS

- Chae, J., Park, S. S. e Freiheit, T., 2006. "Investigation of micro-cutting operations". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, p. 313–332.
- Jackson, M. J., 2007. *Micro and Nanomanufacturing*. Springer, New York, 1ª edição.
- Rodrigues, A. R., e Jasinevicius, R. G., 2017. "Machining scale: Workpiece grain size and surface integrity in micro end milling". *Microfabrication and Precision Engineering*, p. 27–68.
- Weule, H., Hüntrup, V., e Tritschler, H., 2001. "Micro-Cutting of Steel to Meet New Requirements in Miniaturization". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 50(1), p. 61–64.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

Evaluation of cutting forces in micromilling: circular ramping strategy

Gildeones Andrade Protázio

Amauri Hassui

University of Campinas (Unicamp), 200 Mendeleev St., Cidade Universitária, Campinas city, São Paulo, 13083-860
gpandrade@fem.unicamp.br
ahassui@fem.unicamp.br

Carlos Eiji Hirata Ventura

Federal University of São Carlos (UFSCar), Washington Luiz Highway, 235 km - SP-310, São Carlos city, São Paulo, 13565-905
ventura@ufscar.br

Luciano Wallace Gonçalves Barbosa

University of Campinas (Unicamp), 200 Mendeleev St., Cidade Universitária, Campinas city, São Paulo, 13083-860
lucianowbarbosa@gmail.com

Abstract. *The search for alternatives and enhancement of what is traditional and consolidated boosts all the processes continuous improvement and this is also applied to machining. An operation that raised as a consequence of this methodology is the micromilling bringing their own characteristics and challenges to be understood. Therefore, this work intent to contribute in the evaluation of the cutting forces when this process is applied to an opening pocket strategy, namely the helical interpolation. For this purpose, circular cavities of 1.400 μm of diameter were machined with a micro-end mill of 800 μm in an AISI P20 tool steel with different feed per tooth. The data were acquired through a dynamometer and graphs were generate joined to a statistical test to evaluate the conditions. At the end, it was noted that axial cutting force increase and atypical resultant cutting force behavior suggesting influence of the lack of tool stiffness.*

Keywords: *Micromilling. Molds and dies. Cutting forces. Cavity opening.*

RESPONSIBILITY NOTICE

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