

DESGASTE EM MICROFRESAS NO FRESAMENTO FRONTAL

Flávio Henrique Manarelli

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) - Rua Pedro Vicente, 625, CEP 01.109-010, São Paulo-SP
flavio.manarelli@ifsp.edu.br

Adriana Bruno Norcino

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) - Rua Estéfano D'avassi, 625, CEP 15.991-502, Matão-SP
adriananorcino@ifsp.edu.br

Alessandro Roger Rodrigues

Universidade de São Paulo (USP) - Av. Trabalhador São Carlense, 400, CEP 13.566-590, São Carlos-SP
roger@sc.usp.br

Resumo. A microusinagem é um dos processos de fabricação capaz de produzir produtos ou geometrias com precisão e complexidade com detalhes menores que 1 mm, e nesse contexto surge o desafio de se estudar a interação peça-ferramenta, visando aprimorar o desempenho do processo de usinagem e dos produtos microfabricados. Este trabalho objetiva correlacionar a influência da estratégia de usinagem, o avanço da ferramenta e tamanho médio de grão do material da peça com os níveis de desgaste e energia específica de corte no microfresamento de topo. Os ensaios foram realizados em um Centro de Usinagem ROMI D 600, com a adaptação de um cabeçote de alta rotação, variando a estratégia de usinagem em corte em cheio (CCH) e corte em face (CF); o avanço por dente em 3 e 10 $\mu\text{m}/\text{z}$. A velocidade de corte e profundidade de usinagem foram mantidas constantes em 60 m/min e 160 μm , respectivamente. Foi empregada uma microfresa de topo na usinagem a seco, com diâmetro de 800 μm e raio de aresta de 1,9 μm . O aço COS AR60 como recebido com tamanho de grão de 11 μm e o com grãos ultrafinos (GUF), com tamanho médio de grão de 0,7 μm foram microfresados, executando três observações para cada condição de usinagem, visando aplicação da Análise de Variância. Os resultados indicam que o desgaste da microfresa e a variação da energia específica de corte independe do material usinado, ou seja, do processo de refino do grão. Por outro lado, a estratégia de corte em face promove maiores níveis de desgastes devido ao impacto da ferramenta durante o corte na formação do cavaco, e não pelo efeito de sulcamento. Porém, o efeito de sulcamento faz com que os fatores estratégia de corte e avanço, bem como suas respectivas interações, sejam significativos na energia específica de corte.

Palavras chave: Microusinagem. Microfresamento. Desgaste. Energia específica de corte. Sulcamento.

1. INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica dos meios de fabricação e as consecutivas demandas das indústrias que visam miniaturizar os produtos, aumentar a eficiência e consecutivamente garantir precisão e exatidão dimensionais e de funcionamento faz com que a microusinagem assuma um papel importante neste cenário, pois com ela, pequenos detalhes ou peças miniaturizadas podem ser geradas. Além disso, com a microusinagem é possível usinar vários tipos de materiais, tais como polímeros, compósitos, metais, cerâmicos e vidros (Cheng e Huo, 2013), sendo, portanto, um processo de fabricação bastante versátil. Como resultado, segmentos produtivos como aeroespacial e automobilísticos são diretamente beneficiados por serem grandes usuários de microcomponentes tais como fixadores, sensores e microválvulas (Davim e Jackson, 2009).

A micro fabricação por usinagem pode ser definida como um processo capaz de gerar produtos ou geometrias com precisão e complexidade com detalhes menores que 1 mm, além de alcançar valores de rugosidades menores que 1 μm (Câmara, et al., 2012). Já segundo Dornefeld, Min e Takeuchi (2006), a microusinagem pode ser caracterizada do ponto de vista da ferramenta, sendo que esta deve ser menor que 1 mm e possuir aresta de corte com geometria definida.

Nesse contexto, o microfresamento se destaca, pois peças ou detalhes específicos que tipicamente só poderiam ser feitos por processos não convencionais de usinagem como por exemplo a eletroerosão, atualmente podem ser microfresadas. Isso é possível em decorrência da redução do tamanho da ferramenta de corte aliada aos altos níveis de precisão dimensional e rotacional que as máquinas-ferramentas podem atingir. Nesses casos, o processo de usinagem ocorre com taxas de remoção de material até cinco vezes mais rápida do que a usinagem não convencional e com a mesma precisão dimensional e geométrica, bem como qualidade superficial e com custo menor (Cristofaro, et al., 2012).

Desta forma, estudos mais aprofundados dos processos de usinagem em microescala ainda são incipientes, mas importantes para mitigar os custos envolvidos no processo. Aproximadamente 20% do tempo de inatividade dos setores de usinagem na indústria são atribuídos às falhas de ferramentas (Kurada e Bradley, 1997), como por exemplo, os

decorrentes dos mecanismos de desgaste de flanco. Esse tipo de desgaste acontece com maior frequência e ocorre na superfície de folga da ferramenta, devido ao contato entre ferramenta e a peça (Diniz, Marcondes e Coppini, 2014) e sua evolução com maior ou menor intensidade tem correlação direta com os parâmetros de usinagem. Ademais, o desgaste de flanco é comumente adotado como critério de fim de vida da ferramenta em macro usinagem e, segundo Colpani, *et al.*, (2019), também pode ser empregado nos processos de microfresamento. Entretanto, nem sempre há uma correlação direta entre os conceitos de macro e microusinagem.

A relação entre o raio da aresta da ferramenta e a espessura de corte produz efeitos imperceptíveis na escala macro, mas são potencializados no microfresamento. Como exemplo, o entendimento de que o cavaco é formado a cada passada da ferramenta não é válido na microusinagem e o resultando é evidenciado pela formação intermitente do cavaco (Kim, Mayor e Ni, 2004). Isso ocorre porque a espessura do cavaco removido é da mesma ordem de grandeza do raio da aresta de corte da ferramenta ou até mesmo, do tamanho do grão do material a ser usinado (Aramcharoen e Mativenga, 2009). Desta forma, é definido o conceito da espessura mínima de corte, entendida como a menor espessura suficiente para ocorrer a formação do cavaco por cisalhamento do material da peça, sendo este um fator importante para o processo, pois depende diretamente do avanço por dente e da penetração entre a ferramenta e a peça (Kim Mayor e Ni, 2004).

Ainda, como consequência da interação entre ferramenta e peça, surgem as forças de contato causadas pela deformação do material imposta pela ferramenta. Essa força é denominada força de sulcamento e atua na ponta da ferramenta, na região de interface peça ferramenta, especificamente na superfície (flanco) de folga da ferramenta devido à recuperação elástica do material (Filiz, *et al.*, 2007). Sendo assim, o processo de micro corte pode ser afetado de forma significativa quando o processo de formação do cavaco ocorrer abaixo da espessura mínima de corte, pois o sulcamento é intensificado. Deste modo, busca-se condições de usinagem na qual a quantidade de cisalhamento seja maior que a quantidade de sulcamento durante o corte (Dornefeld, Min e Takeuchi, 2006).

A intensidade da força devido ao efeito de sulcamento pode ser monitorada indiretamente por meio da energia específica de corte requerida, que por sua vez pode ser entendida como a resistência oferecida ao corte de um determinado material. Ademais, a energia específica de corte é uma grandeza ideal na investigação da usinagem em microescala, por ser bastante sensível à pequenas variações dos parâmetros usinagem, como por exemplo o avanço da ferramenta (de Oliveira, *et al.*, 2015) e o seu aumento é inversamente proporcional à espessura de corte (Aramcharoen e Mativenga, 2009).

Portanto, este trabalho visa analisar como o tipo de corte, o avanço por dente da ferramenta e o tipo de material usinado influenciam no desgaste de uma microfresa e na energia específica de corte no microfresamento de topo. Detalhadamente, as metas específicas são mensurar os níveis de desgaste na superfície secundária de folga da microfresa e os valores de energia específica de corte, correlacioná-los com a tipo de corte, material usinado e avanço por aresta da ferramenta e verificar qual tipo de influência cada uma dessas grandezas tem entre si.

2. METODOLOGIA

Os ensaios de microfresamento de topo foram realizados em um centro de usinagem CNC ROMI D600 sem aplicação de fluido de corte e a microfresa utilizada possuía diâmetro de corte (D_c) de 800 μm , fabricada em metal duro (R216.32-00830-AI08G 1620). Devido às características do ensaio e em especial, para atender o valor da velocidade de corte empregada, foi necessário adaptar na máquina-ferramenta o cabeçote de alta rotação NSK Nakanishi, modelo NR3060S que atinge rotações de até 60.000 rpm (Fig. 1). A velocidade de corte (v_c) e profundidade de usinagem (a_p) foram constantes de 60 m/mim e 160 μm , respectivamente. Os fatores de controle adotados como variáveis de entrada foram o avanço por dente (f_z), o tamanho médio de grão do material da peça e o tipo de corte. A Tab. 1 organiza os fatores de controle, perfazendo um experimento fatorial completo com dois níveis e três fatores que foram replicados três vezes, culminando em 24 ensaios, visando análise estatística dos resultados.

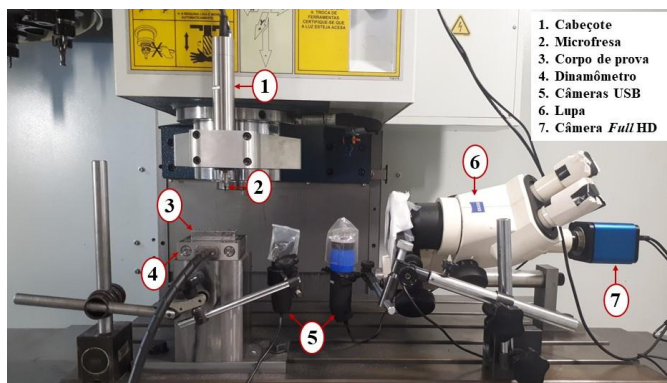


Figura 1. Aparato experimental

Tabela 1. Fatores de controle experimental.

Fatores de controle	Níveis	
f_z [$\mu\text{m}/\text{dente}$]	3,0	10,0
Tipo de corte	Face (CF)	Cheio (CCH)
Tamanho do grão [μm]	0,7	11,0

Os tipos de cortes foram definidos a partir do plano de trabalho xy (Fig. 2 e Fig. 3), com diferentes penetrações de trabalho (a_e), de acordo com as seguintes características:

- Corte em face (CF): corte simétrico com penetração de trabalho igual à 500 μm ($a_e \neq D_c$);
- Corte em cheio (CCH): corte simétrico com penetração de trabalho igual à 800 μm ($a_e = D_c$);

A representação técnica das Fig. 2 e Fig. 3 demonstram o posicionamento da ferramenta em relação às regiões usinadas nos corpos de prova, de acordo com o tipo de corte aplicado, tendo como referência o plano de trabalho xy. A superfície usinada está indicada nas figuras e os movimentos da ferramenta seguiram trajetórias lineares paralelas ao plano de trabalho xy e, na mesma direção do eixo y. Para isso, uma rotina CNC foi desenvolvida, garantindo a usinagem de canais paralelos um ao outro, como representados nos desenhos técnicos.

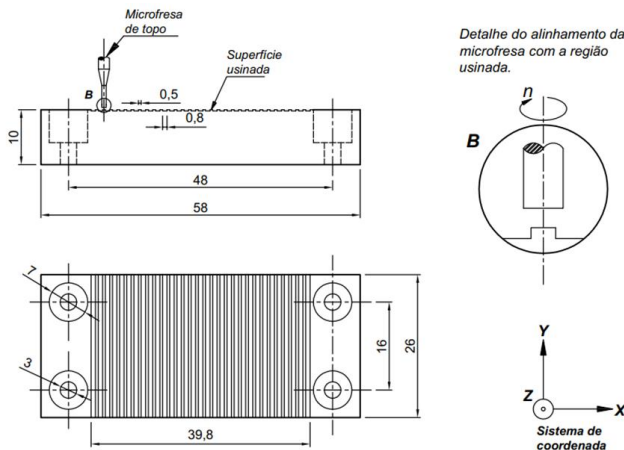


Figura 2. Detalhe do posicionamento da microfresa de topo para o fresamento simétrico em face.

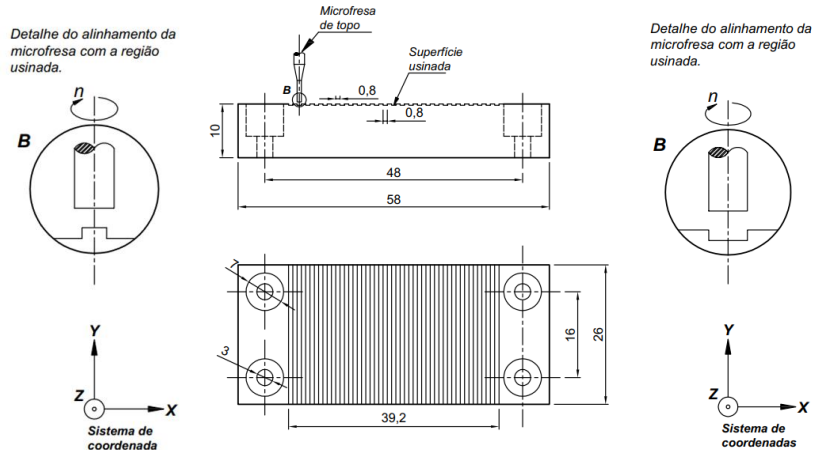


Figura 3. Detalhe do posicionamento da microfresa de topo para o fresamento simétrico em cheio.

Os corpos de prova com dimensões de 58 x 26 x 10 mm foram confeccionados a partir do aço COS AR60 em duas versões distintas: como recebido e como grãos ultrafinos. Os corpos de prova provenientes do aço com as características originais (como recebido) tinham dureza média de 192 HV e tamanho de grão médio de 11 μm . Já os corpos de prova fabricados a partir da versão com grãos ultrafinos foram obtidos após o aço como recebido ter sido submetido a um processo termomecânico de laminação para refino do grão, que passou a ter dureza de 216 HV e tamanho médio de grão de 0,7 μm .

Com relação ao critério de parada adotado, foi necessário desenvolver um novo modelo visando mensurar de forma efetiva o percurso de corte das arestas da ferramenta, em detrimento ao modelo tradicional que considera o percurso de avanço. Sendo assim, o valor do percurso de corte adotado como critério de parada foi de 32,67 metros. Este valor equivale à soma dos semicírculos formados por cada aresta de corte durante a rotação e deslocamento da ferramenta (percurso de avanço) em relação à peça na direção do avanço, durante o corte de material.

As imagens de desgastes e avarias foram realizadas por um microscópio eletrônico de varredura. Além disso, para monitorar a evolução do desgaste, dois microscópios USB e uma câmera Full HD acoplada à uma lupa foram montados na mesa da máquina-ferramenta (Fig. 1).

A energia específica de corte foi obtida por meio do cálculo da razão entre a velocidade de corte e o volume removido de material, multiplicada pela integral da curva força de corte *versus* tempo de usinagem. Já para obtenção das forças de corte, utilizou-se um dinamômetro piezelétrico marca Kistler, modelo 9256C2, aquisição em três componentes, faixa de trabalho em Fx, Fy e Fz de -250 a 250 N, frequência natural de 4 kHz, rigidez de 250 N/ μm e um amplificador de carga de 3 canais, marca Kistler, modelo 5019B.

A análise de resultados foi realizada utilizando o Método da Análise de Variância (ANOVA), com nível de significância de 5%, visando verificar se existem diferenças significativas entre as médias dos resultados obtidos e se os fatores de controle exercem influência em alguma variável de resposta.

3. RESULTADOS

A Fig. 4 mostra o efeito do material da peça, do tipo de corte e do avanço por dente da fresa no comportamento do desgaste de flanco causado na superfície secundária de folga da microfresa, após atingir o percurso de corte adotado ou critério de parada de 32,67 m.

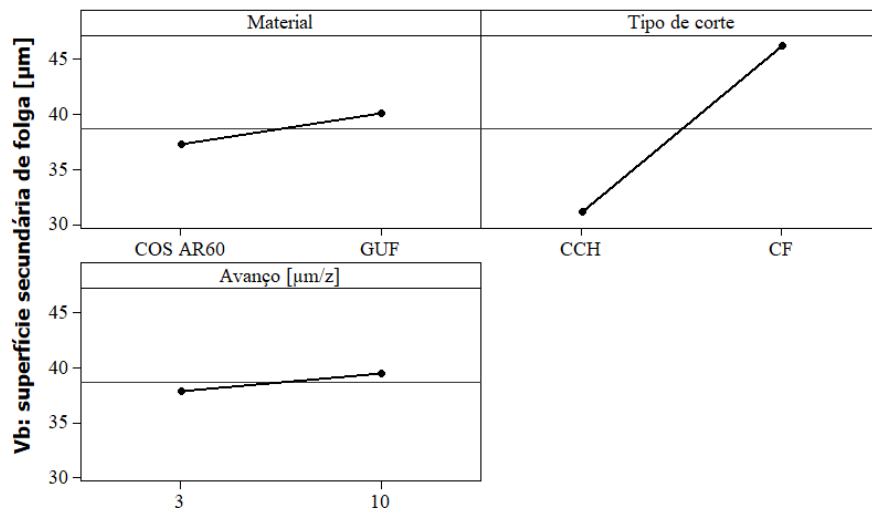


Figura 4. Efeito do material da peça, tipo de corte e avanço por dente da fresa no comportamento do desgaste de flanco na aresta secundária de corte da microfresa.

Analisando os dados, identificamos que os três fatores de controle adotados são diretamente proporcionais ao desgaste. Além de que, o tipo de corte causou a maior variação ($\approx 20\%$) em torno do valor médio, quando comparado com as demais variáveis, sugerindo que este parâmetro seja significativo na resposta. Contudo, esta análise somente poderá ser provada se verificada estatisticamente através do estudo de sensibilidade da resposta (desgaste de flanco da aresta secundária). Por este motivo, é apresentado a seguir a Análise de Variância (ANOVA) sobre os resultados de desgastes. A Tab. 2 apresenta o quadro ANOVA, onde os efeitos das variáveis de entrada e suas interações de primeira ordem no desgaste são indicados através do valor de probabilidade P.

Tabela 2. Quadro ANOVA dos fatores de controle: material, estratégia de usinagem e avanço; em relação ao desgaste da ferramenta ($R^2 = 62,42\%$).

Fator	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	Teste F	Valor P
Material	1	50,04	50,04	1,23	0,282
Corte	1	1382,74	1382,74	34,09	$\approx 0,000$
Avanço	1	15,80	15,80	0,39	0,541
Mat. X corte.	1	52,83	52,83	1,30	0,270
Mat. x Ava.	1	113,68	113,68	2,80	0,112
Estr. x Ava.	1	177,56	177,56	4,38	0,052
Erro	17	689,49	40,56		
Total	23	2482,14			

Conforme os dados da Tab. 2, apenas o tipo de corte influi no comportamento do desgaste da aresta de corte secundária da microfresa, uma vez que a probabilidade foi menor que o nível de significância adotado na ANOVA ($P = 0\% < \alpha = 5\%$). Deste modo, pode-se afirmar com 95% de confiança que o corte em face eleva o nível de desgaste das arestas secundárias da ferramenta, independentemente do material usinado e do nível de avanço. Ademais, a interação entre os fatores de controle não demonstraram significância sobre o desgaste de flanco da aresta secundária ($P = 0,052 > \alpha = 0,05$), ou seja, qualquer uma das variáveis de entrada não depende do nível da outra para influir na resposta.

Apesar do material e o avanço por dente não serem significativos no desgaste de flanco da superfície secundária de folga, verifica-se que a redução do tamanho médio do grão do material usinado (COS AR60 para GUF) tende a aumentar o desgaste e, por outro lado, o aumento do avanço também tende a aumentar o nível de desgaste da microfresa. Assim, o aumento do avanço ou redução do tamanho médio dos grãos do material usinado intensifica o desgaste de flanco da aresta secundária da microfresa.

De outra forma, nota-se que o desgaste é maior quanto maior for a dureza do material (COS AR60 192 HV e GUF 216 HV), sendo ainda intensificado pela mudança no tipo de corte e com maior valor de desgaste para o corte em face. Deste modo, o desgaste não está sendo governado pelo efeito de sulcamento, pois quanto maior o avanço, menores serão os níveis de deformação elastoplástica para corte em cheio e, para corte em face não há efeito do sulcamento no início e

no fim da formação do cavaco, pois o cavaco se forma com uma espessura inicial acima da espessura mínima de corte. Por conseguinte, o aumento do impacto das arestas de corte no corte em face sugere um aumento no desgaste da ferramenta, reduzindo a vida da mesma. Isso justifica o maior nível de desgaste para o corte em face para maior avanço na usinagem do GUF.

Logo, a intensidade da evolução do desgaste não é governada pelo efeito de sulcamento e sim pelo impacto que a aresta de corte sofre a cada rotação da microfresa durante a operação de remoção de material e formação do cavaco, visto que a estratégia de corte foi o fator significativo (quadro ANOVA). Outrossim, o aumento do avanço e da dureza do material (refino do grão) intensifica o impacto para estratégia de corte em face. As imagens da Fig. 5 corroboram com esta hipótese, visto que apresentam evidências de lascamento nas arestas de corte das microfresas após a usinagem.

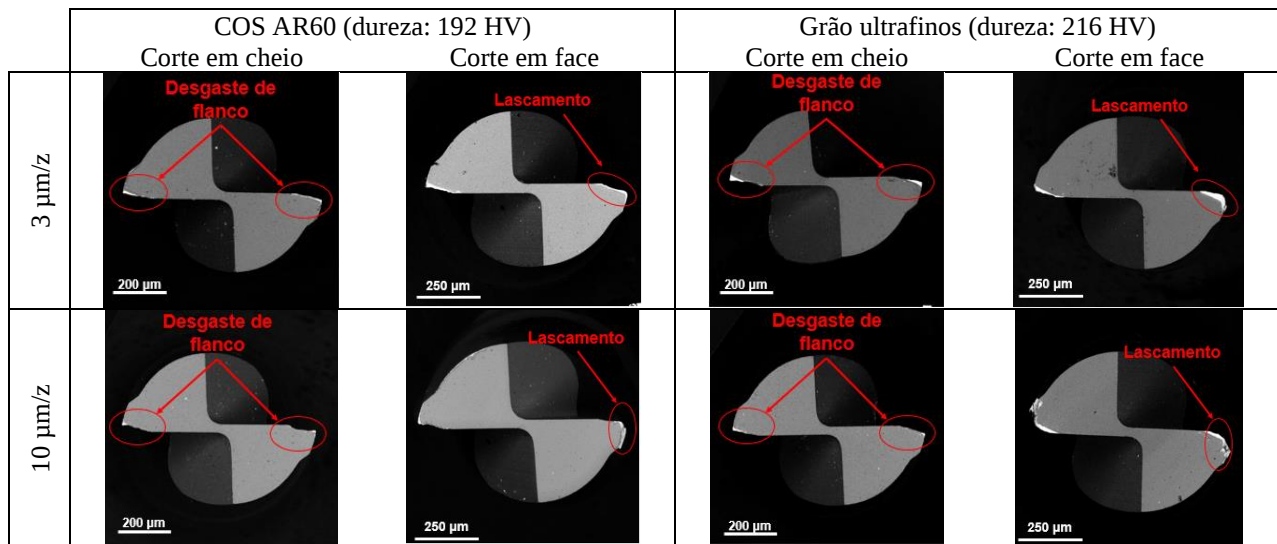


Figura 5. Estado final da ferramenta após a usinagem do percurso de corte de 32,67 m.

Com a análise das imagens acima, fica evidente que na condição com maior nível de desgaste (CF com 10 $\mu\text{m}/\text{z}$), houve perda de uma grande porção da aresta da ferramenta, com características predominantes de lascamento, sendo esta avaria a responsável por influenciar significativamente na evolução do desgaste. Ainda para a estratégia de corte em face com avanço de 3 $\mu\text{m}/\text{z}$, qualitativamente também houve lascamento ou microlascamentos, porém de menor intensidade. Esse comportamento é justificável, pois no fresamento de topo, menores avanços implicam em espessuras de corte menores, consequentemente, menor impacto da ferramenta durante o processo de remoção de material.

Os próximos resultados da pesquisa estão apresentados nos gráficos da Fig. 6 que detalham o efeito do material da peça, tipo de corte e avanço por dente da fresa no comportamento da energia específica de corte.

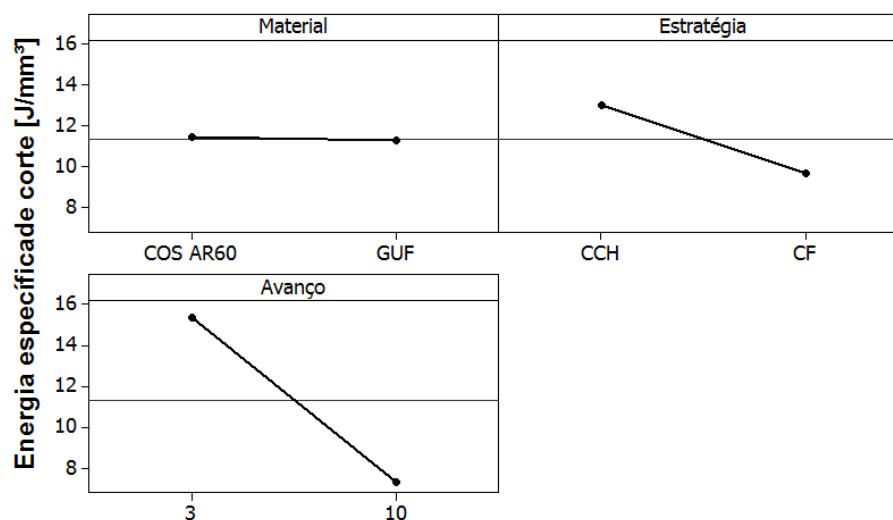


Figura 6. Efeito do material da peça, tipo de corte e avanço por dente da fresa no comportamento da energia específica de corte.

Da análise gráfica é possível notar que o aumento do avanço por dente, independentemente do material, reduz a energia específica de corte, sendo este um efeito bem recorrente. Essa correlação indica que a resistência oferecida ao corte é menor ao passo que a espessura de corte aumenta e promove a redução da parcela de sulcamento a cada passada da ferramenta pela região de usinagem. Contudo, esta análise somente poderá ser provada se verificada estatisticamente através do estudo de sensibilidade da resposta (energia específica de corte). Por este motivo, apresenta-se a seguir a Análise de Variância (ANOVA) sobre os resultados da energia específica de corte apresentados. A Tab. 3 traz o quadro ANOVA, onde os efeitos das variáveis de entrada e suas interações de primeira ordem na energia específica de corte são indicados através do valor de probabilidade P.

Tabela 3. Quadro ANOVA dos fatores de controle material, estratégia de usinagem e avanço em relação a energia específica de corte ($R^2 = 93,22\%$).

Fator de controle	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	Teste F	Valor P
Material	1	0,154	0,154	0,10	0,751
Estratégia	1	68,076	68,076	45,91	$\approx 0,000$
Avanço	1	389,471	389,471	262,65	$\approx 0,000$
Mat. x Estr.	1	3,468	3,468	2,34	0,145
Mat. x Ava.	1	0,107	0,107	0,07	0,792
Estr. x Ava.	1	16,569	16,569	11,17	0,004
Erro	17	25,208	1,483		
Total	23	503,053			

Verifica-se do Quadro ANOVA que a estratégia de usinagem afeta significativamente a energia específica de corte, uma vez que a probabilidade foi menor que o nível de significância adotado na ANOVA ($P = 0\% < \alpha = 5\%$). Observa-se da Fig. 6 que a energia específica diminuiu para a estratégia de corte em face (CF). Este comportamento é governado pelo efeito do sulcamento, visto que para estratégia de corte em cheio, sobretudo para o menor avanço, independentemente do material usinado, há uma parcela maior de sulcamento durante a remoção do material, elevando substancialmente a energia específica de corte. Já na estratégia de corte em face em que o efeito do sulcamento é minimizado, a energia específica de corte reduz, principalmente para o maior avanço, independentemente do material usinado.

O avanço por dente da ferramenta também afeta significativamente a energia específica de corte, uma vez que a probabilidade foi menor que o nível de significância adotado na ANOVA ($P = 0\% < \alpha = 5\%$). A energia específica de corte diminuiu para o maior avanço da ferramenta empregado e este comportamento também é governado pelo efeito do sulcamento. Sabe-se da literatura que quanto menor o avanço, menor será a espessura de corte do cavaco e em decorrência, maior será o sulcamento, gerando maiores deformações elastoplásticas sem compromisso de remoção do material na forma de cavaco e assim, maiores níveis de energia específica de corte (Aramcharoen e Mativenga, 2009).

O material da peça não afeta significativamente a energia específica de corte ($P = 75,1\% > \alpha = 5\%$) nem apresenta grande variação em torno da média para os dois materiais. Esse resultado mostra que o processo de refino de grão do aço COS AR60 não deve alterar significativamente os valores de energia específica de corte envolvidos no microfresamento do aço GUF. Assim, pode-se afirmar com 95% de confiança que a estratégia de usinagem e o avanço da ferramenta afetam significativamente a energia específica de corte, independentemente do material usinado.

Além do mais, houve interação de primeira ordem entre a estratégia de usinagem e o avanço da ferramenta ($P = 0,4\% < \alpha = 5\%$). A interação entre fatores de controle ocorre quando a mudança na resposta variando os níveis de um dado fator não é a mesma ao se variar os níveis de um segundo fator. Isso significa que a variação da energia específica de corte entre a estratégia de usinagem depende do avanço por dente da ferramenta. Desta forma, pode-se afirmar com 95% de confiança que a estratégia de usinagem e o avanço da ferramenta afetam significativamente a energia específica de corte, independentemente do material usinado.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho contempla um estudo tecnológico acerca do processo de microfresamento de topo e as principais conclusões a respeito da interação entre os parâmetros de usinagem adotados e as variáveis de respostas consideradas são descritas a seguir.

Com relação aos valores de desgastes percebidos na aresta secundária de folga da microfresa de topo, a estratégia de corte é o fator de maior significância, independente do material da peça ou do avanço, com valores mais elevados para o tipo de corte em face. Esse comportamento indica que o efeito do impacto da aresta cortante durante a remoção de material é o mecanismo governante no desgaste, superando o efeito de sulcamento.

Quanto a energia específica de corte, pode-se afirmar com 95% de confiança que o tipo de corte ou o avanço da ferramenta, bem como a combinação desses dois fatores, afetam significativamente em seu valor, independente do material usinado. Sendo assim, o efeito governante é o sulcamento à medida que o corte em cheio, o menor avanço ou a combinação de ambos elevam a energia específica de corte.

Portanto, quando o objetivo de um processo de microfresamento de topo for majorar a vida da ferramenta, é preferível utilizar condições de usinagem que proporcionem cortes em cheio e até discordante, independente do material da peça e mesmo que tais condições tenham regiões de seu corte afetadas pelo efeito do sulcamento, não causarão danos significativos no desgaste.

5. REFERÊNCIAS

- Aramcharoen, A. e Mativenga, P.T., 2009. "Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel". *Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, Vol. 33, p. 402-407.
- Camara, M.A., et al., 2012. "State of the Art on Micromilling of Materials, a Review". *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 28, p. 673-685.
- Cheng, K. e Huo, D., 2013. *Micro-cutting: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons, Reino Unido, 1ª edição.
- Colpani, A., et al., 2019. "Tool wear analysis in micromilling of titanium alloy". *Journal of Precision Engineering*, Vol. 57, p. 83-94.
- Davim, J.P., e Jackson, M.J., 2009. *Nano and Micromachining*. John Wiley & Sons, Estados Unidos, 1ª edição.
- de Cristofaro, S., et al., 2012. "High-speed micro-milling: Novel coatings for tool wear reduction". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 63, p. 16-20.
- de Oliveira, F.B, Rodrigues, A.R., Coelho, R.T., e de Souza, A.F., 2007. "Size effect and minimum chip thickness in micromilling". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 89, p. 39-54.
- Diniz, A.E., Marcondes, F.C. e Coppini, N.L., 2014. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. Artliber, Brasil, 9ª edição.
- Dornfeld, D., Min, S. e Takeuchi, Y., 2006. "Recent Advances in Mechanical Micromachining". *CIRP Annals: Manufacturing Technology*, Vol. 55, p. 745-768.
- Filiz, S., et al., 2007. "An experimental investigation of micro-machinability of copper 101 using tungsten carbide micro-endmills". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 47, p. 1088-1100.
- Kim, C.J., Mayor, J.R. e Ni, J., 2004. "A Static Model of Chip Formation in Microscale Milling". *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 126, p. 710-718.
- Kurada, S. e Bradley, C., 1997. "A review of machine vision sensors for tool condition monitoring". *Journal of Computers in Industry*, Vol. 34, p. 55-72.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

MICRO-MILLING TOOL WEAR IN FRONT MILLING

Flávio Henrique Manarelli

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) - Rua Pedro Vicente, 625, CEP 01109-010, São Paulo-SP
flavio.manarelli@ifsp.edu.br

Adriana Bruno Norcino

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) - Rua Estéfano D'avassi, 625, CEP 15.991-502, Matão-SP
adriananorcino@ifsp.edu.br

Alessandro Roger Rodrigues

Universidade de São Paulo (USP) - Av. Trabalhador São Carlense, 400, CEP 13.566-590, São Carlos -SP
roger@sc.usp.br

Abstract. Micromilling is one of the manufacturing processes capable of producing products or geometries with precision and complexity with details smaller than 1 mm, and in this context the challenge arises to study the part-tool interaction, the development of the machining process performance and the microfabricated products. This work aims to correlate the influence of the machining strategy, tool per feed and average grain size of workpiece material with the wear tool levels and specific cutting force in the top micromilling. The tests were carried out in a Machining Center ROMI D 600, with the adaptation of a high-speed head, varying the machining strategy in face cut-off (CCH) and side cutting (CF); feed per tooth in 3 and 10 $\mu\text{m}/\text{z}$. The cutting speed and cutting depth were kept constant at 60 m/min and 160 μm , respectively. A micro milling tool was used in dry machining, with 800 μm diameter and 1.9 μm tool edge radius. The steel COS AR60 with no treatment, 11 μm grain size, ultrafine grain (GUF) and with average grain size of 0.7 μm were micromilled, executing three observations for each machining condition, aiming applying the Analysis of Variance. The results indicate that the wear tool and the variation of the specific cutting force does not depend on the material machined, that is, on the grain refinement process. On the other hand, the face cutting strategy promotes higher levels of wear due to the impact of the tool during the cut in the chip formation and not by the ploughing effect. However, the ploughing effect makes the cutting and feed, as well as their respective interactions, influence the specific cutting force.

Keywords: Micromachining, Micromilling, Wear Tool, Specific Cutting Force, Ploughing.

RESPONSIBILITY NOTICE

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