

ESTUDO DO DESGASTE EM MICROFRESAS

Adriana Bruno Norcino, adriananorcino@ifsp.edu.br¹

Alessandro Roger Rodrigues, roger@sc.usp.br²

Flávio Henrique Manarelli, flavio.manarelli@ifsp.edu.br³

Renato Goulart Jasinevicius, renatogj@sc.usp.br²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), R. Stéfano D'avassi 625, CEP 15.991-502, Matão-SP

²Universidade de São Paulo (USP), Av. Trabalhador São Carlense 400, CEP 13.566-590, São Carlos -SP

³Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), R. Primeiro de Maio 500, CEP 085.71-050, Itaquaquecetuba-SP

Resumo: Com a evolução do processo de miniaturização de peças é necessário que ocorra o aumento da qualidade das peças fabricadas, pois retrabalhos, de um modo geral, não são aceitáveis. A microusinagem não pode ser entendida apenas em função da redução da escala já que essa redução não implica na diminuição do tamanho do grão do material a ser usinado. Devido às pequenas dimensões e tolerâncias no microfresamento compreender os mecanismos governantes de avarias e/ou desgastes de microfresas serve de guia para predição de características da peça, tais como rugosidade, energia específica de corte e rebarba, por exemplo. Este artigo quantifica os desgastes de flanco na aresta primária além de avarias nas arestas primárias e secundárias, no microfresamento de quatro materiais com diferentes microestruturas. Diferentes níveis de avanço por dente (fz), sob o mesmo comprimento de corte usinado foram adotados nos ensaios. Os ensaios foram conduzidos em um centro de usinagem CNC, adotando simultaneamente corte concordante e discordante sem aplicação de fluido lubrificador. Utilizou-se fresas de carbeto de tungstênio revestidas de TiAlN, Ø 1,0 mm e duas arestas. O desgaste de flanco foi medido na superfície primária de folga da fresa. Os resultados mostraram que os níveis de desgaste na aresta de corte primária foram menores nos materiais com grãos refinados. E que na superfície secundária de corte avarias foram potencializadas no material com microestrutura com diferentes fases.

Palavras-chave: microfresamento, desgaste da ferramenta, grãos ultrafinos.

1. INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica e a melhoria dos processos de fabricação possibilitam a miniaturização dos produtos, agregando a eles cada vez mais funcionalidade e recurso em detrimento a redução de tamanho, peso e custo. A microusinagem está inserida nesse contexto, sendo um dos processos de fabricação capaz de produzir produtos miniaturizados com precisão e complexidade geométrica com detalhes menores que 1mm, além possibilitar bom acabamento (Câmera et al., 2012 e Cheng;Huo,2013).

No processo de microusinagem, ocorre o contato direto da ferramenta com a peça e do cavaco com a ferramenta. Os resultados dessas interações podem influenciar na vida da ferramenta de corte, na integridade superficial do produto, na produtividade e no custo do produto final. Segundo Mian, Driver e Mativenga (2008), Jemielniak, Bombinski e Aristimuno (2008), Prakash e Kanthababu (2013), Hung e Lu (2013) o processo de desgaste da ferramenta é potencializado pelos elevados níveis de força de corte durante o processo de corte associado ao fato que essas microferramentas são suscetíveis a flexão devido ao seu diâmetro diminuto.

As microferramentas não apresentam um elevado número de cobertura somado ao fato de que o controle da deposição da cobertura pode modificar o raio de aresta da ferramenta alterando assim a sua geometria de corte (Biermann, Steiner e Krebs,2013 e Kumar et al, 2014).

Durante a microusinagem as arestas de corte encontram grãos isolados e seus contornos. Os materiais não são isotrópicos e sob o ponto de vista microscópico cada fase presente possui dureza e tamanho de grãos diferentes, sugerindo que a remoção do material não ocorra de forma uniforme. As partículas mais endurecidas podem ser arrancadas e contribuir para o fenômeno de abrasão e contribuir para o desgaste de flanco nas arestas principais da ferramenta. O desgaste de flanco aumenta pois existe maior espaço entre a ponta da ferramenta e a superfície onde o corte ocorre (Attanasio et al., 2012; Uhlmann et al.,2013).

Dentre esses estudos, a preocupação com o desgaste é pertinente tendo em vista que afeta o processo de corte e formação do cavaco. Assim estabelecer critérios para o fim de vida da ferramenta baseado em um método de medição de desgaste direto é de suma importância podendo ser estabelecido vidas de ferramenta para determinados parâmetros de corte servindo de guia para predição de características como rugosidade, energia específica e rebarba, por exemplo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O ensaio estabelecido para a usinagem das peças foi o microfresamento de topo em um centro de usinagem vertical CNC KERN Evo Twenty Five, sem aplicação de fluido lubrificante. Foram empregadas fresas de topo inteiriças de metal duro, revestidas de TiAlN, com diâmetro (df) 1,0 mm e raio de aresta $2,736 \pm 0,161 \mu\text{m}$ (obtido por Microscopia Confocal). A largura de usinagem (ae) foi adotada como o valor do diâmetro da fresa utilizada no ensaio ($ae = df$), simulando um processo de usinagem de cavidades e canais em moldes e matrizes. A velocidade de corte (vc) e a profundidade de usinagem (ap) foram mantidas constantes em todos os ensaios de usinagem em 60 m/min e 0,160 mm respectivamente. Os fatores de controle adotados como variáveis de entrada foram o avanço por dente (fz) em cinco níveis (0,3;0,6;1,0;1,4;3,0 $\mu\text{m/z}$) e, a microestrutura do material da peça.

A Figura (1) apresenta a montagem experimental no centro de usinagem e a geometria dos corpos de prova. A trajetória da ferramenta foi linear e unidirecional no sentido positivo do eixo y na direção longitudinal ao sentido de laminação do material do corpo de prova. Foram utilizados quatro tipos de materiais com diferentes microestruturas: aço ABNT 1045, aço COS AR60 com grãos ultrafinos, aço Villares VP100, e liga de alumínio com grãos ultrafinos RSA 6061-T6.

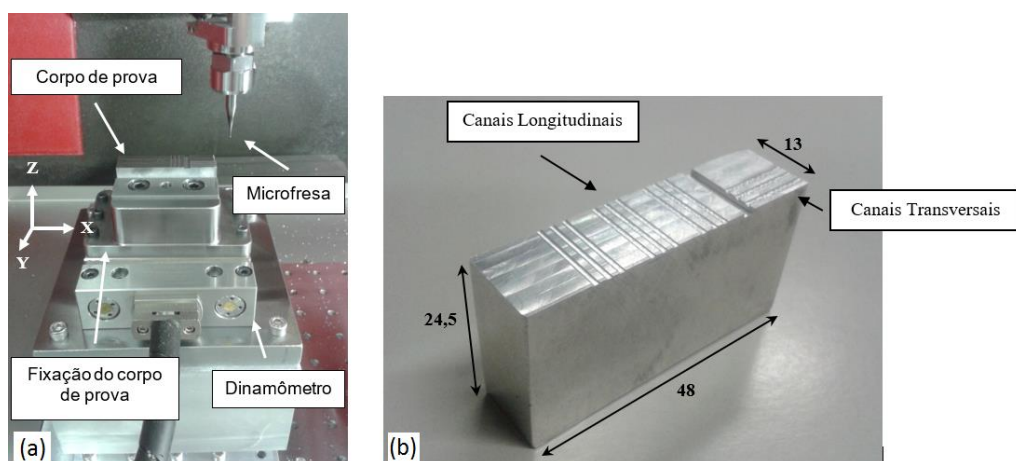


Figura 1. (a) Montagem experimental no centro de usinagem CNC para os ensaios de microfresamento e (b) dimensões dos corpos de prova (mm)

A Figura (2a) mostra a microestrutura do aço ABNT 1045. Sua estrutura possui ferrita e perlita nas formas poligonais com contornos de grãos bem definidos. O tamanho médio do grão de ferrita é $12,54 \pm 0,4 \mu\text{m}$ e da perlita de $42,79 \pm 0,92 \mu\text{m}$.

O aço VP100 é fornecido pela Villares Metals S/A e não possui similares normatizados. É utilizado na fabricação de moldes e matrizes e, sua microestrutura é composta por bainita inferior na forma de ferrita lenticular com placas finas de cementita. A Figura (2b) apresenta a microestrutura do material.

O aço COS AR60 (Fig.(2c)), originalmente fornecido pela Usiminas-Cubatão na forma de chapa grossa laminada, foi submetido a um tratamento termomecânico para obtenção de uma estrutura de grãos ultrafinos. Após o tratamento termomecânico, o material passou a ter uma dureza de 216 HV e tamanho médio de grão de $0,7 \mu\text{m}$. Ele possui fase única constituído predominantemente por ferrita, e cementita globular nos contornos de grão (estruturas negras globulares de tamanho manométrico). O processo de refino de grão utilizado é uma patente registrada no INPI (Instituto Nacional de Propriedade Intelectual) com código de registro PI1107247-4, depositada em 28/01/2011 e publicada em 25/09/2012 (Instituto Nacional da Propriedade Industrial, 2012).

A liga de alumínio RSA6061-T6 foi extrudada a frio e possui tamanho médio de grão de $1 \mu\text{m}$, podendo ser classificada como um material de grãos ultrafinos. A Figura (2d) apresenta a microestrutura do material.

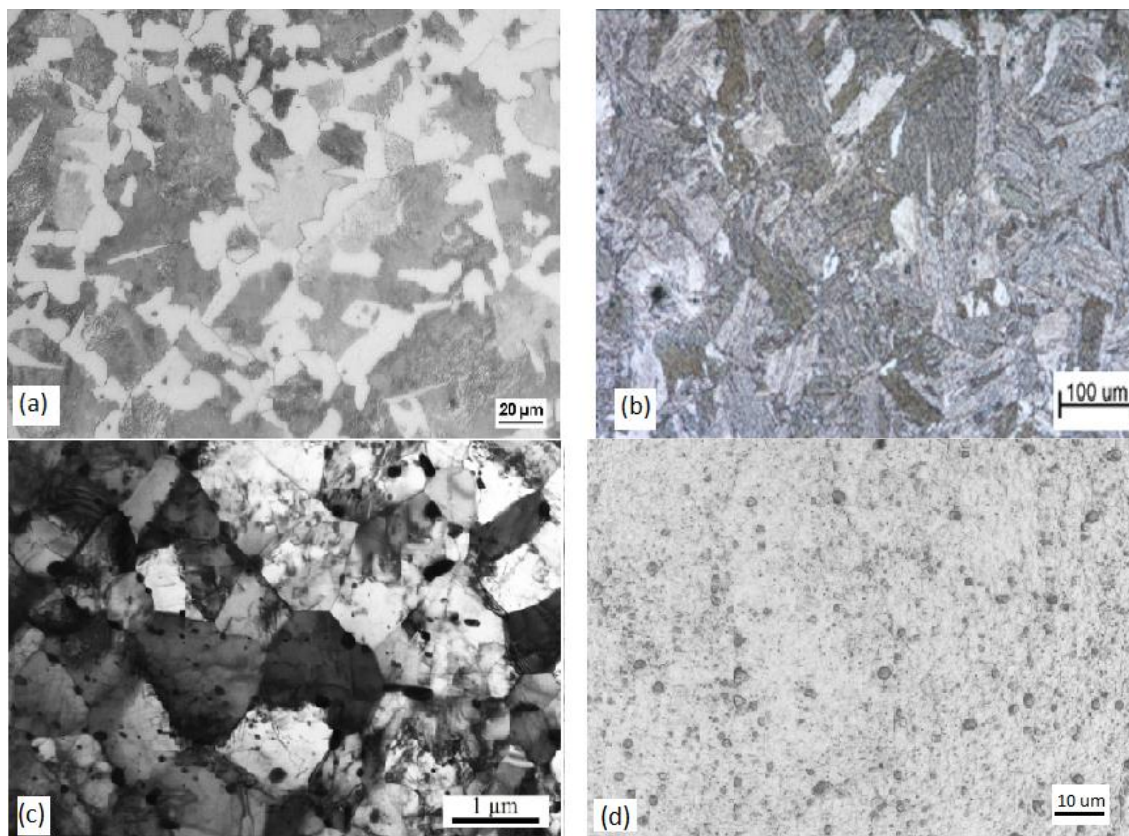


Figura 2. (a) Fotomicrografia do aço ABNT 1045 (Oliveira, 2012), (b) do aço VP100, (c) do aço COS AR60 com grãos ultrafinos (Assis, 2013) e (d) do alumínio RSA6061-T6 com grãos ultrafinos (Dib, 2013).

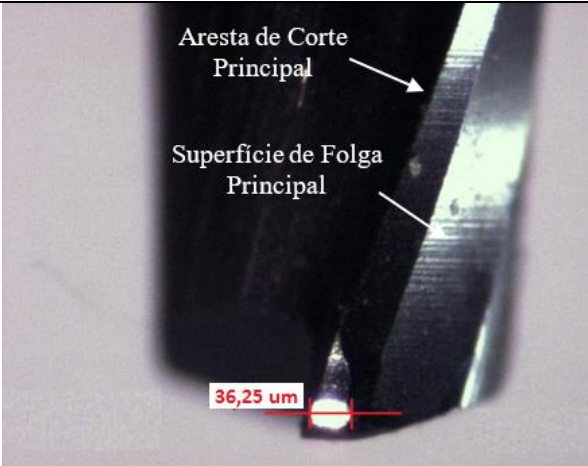
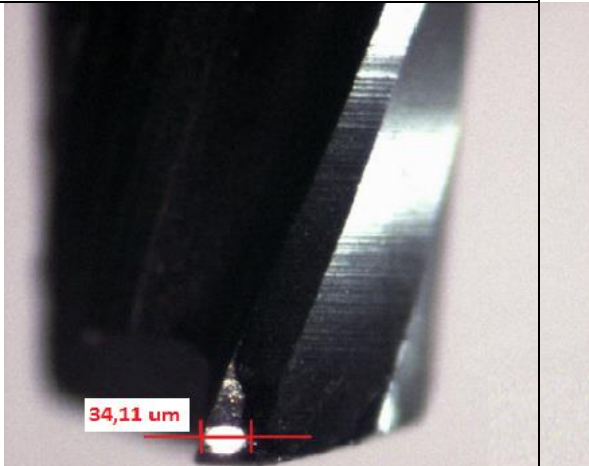
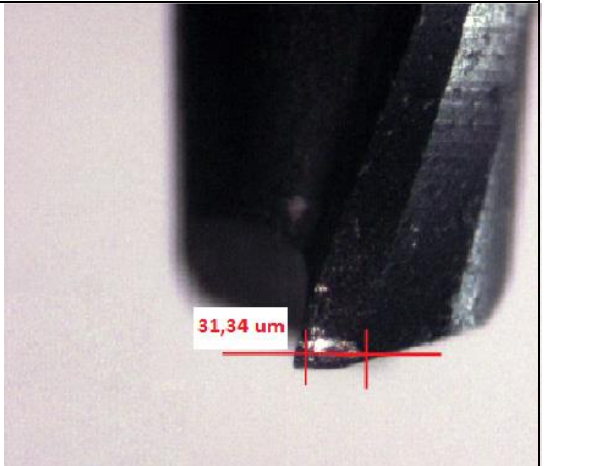
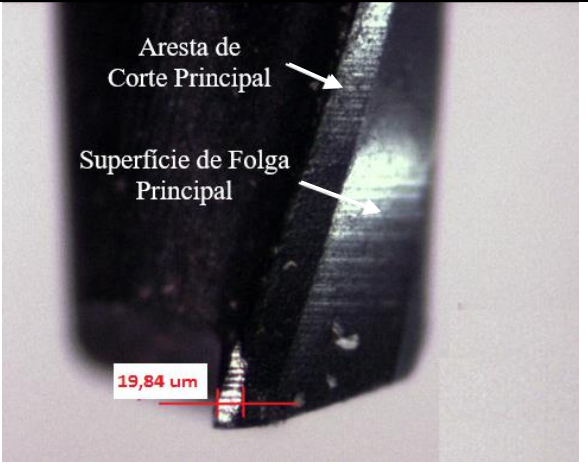
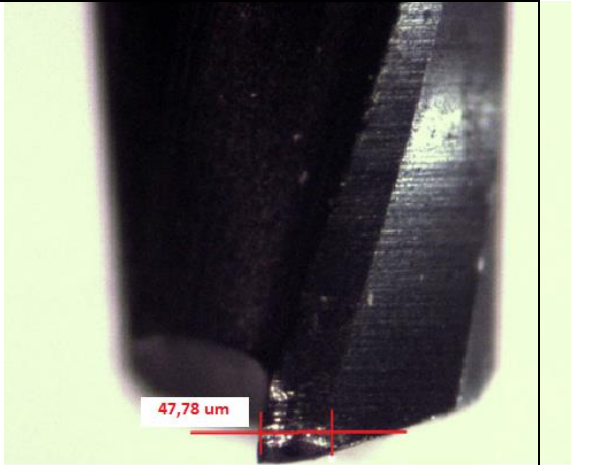
A avaliação do desgaste foi feita com o auxílio de uma lupa Zeiss. As microfresas foram presas com o auxílio de um suporte de forma a ficarem posicionadas paralelas e perpendicular em relação a lente da lupa, possibilitando medir em real grandeza possíveis desgastes de flanco, cratera e entalhe. A medição dos desgastes foi feita com o auxílio do software BELView 6.2 próprio para aquisição e avaliação de imagens obtidas em microscópios. Imagens das superfícies de saída e superfícies de folga principais bem como superfície de folga secundária foram registradas em todas as ferramentas.

Imagens e análise de espectrometria de energia dispersiva de Raios-X (EDS) com o microscópio eletrônico de varredura (Mev) foram analisados. Porém dado a dificuldade em posicionar as microfresas de forma a deixar evidente as superfícies de folga e / ou saída principais por hora a avaliação na lupa se mostrou mais eficaz.

Cada condição de usinagem foi repetida três vezes sendo que a mesma ferramenta de corte foi utilizada durante a execução de todos os avanços para o mesmo tipo de material. Assim a troca da ferramenta ocorreu quando o material usinado era modificado.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura (3) apresenta imagens com a lupa e aumento de 50 vezes das ferramentas utilizadas nos ensaios. Vale ressaltar que para os materiais VP100, COS AR60 e alumínio (RSA 6061-T6) ambos com grãos ultrafinos, as ferramentas eram novas e todos os avanços foram executados na seção longitudinal, ao passo que na seção transversal apenas o menor e maior avanço foram feitos. Na usinagem do aço ABNT 1045 tanto na direção longitudinal quanto na direção transversal toda a faixa de avanço foi contemplada na execução do ensaio.

	Aresta 1	Aresta 2
Aço 1045 F01		
VP100 F02		
COS AR60 F03		

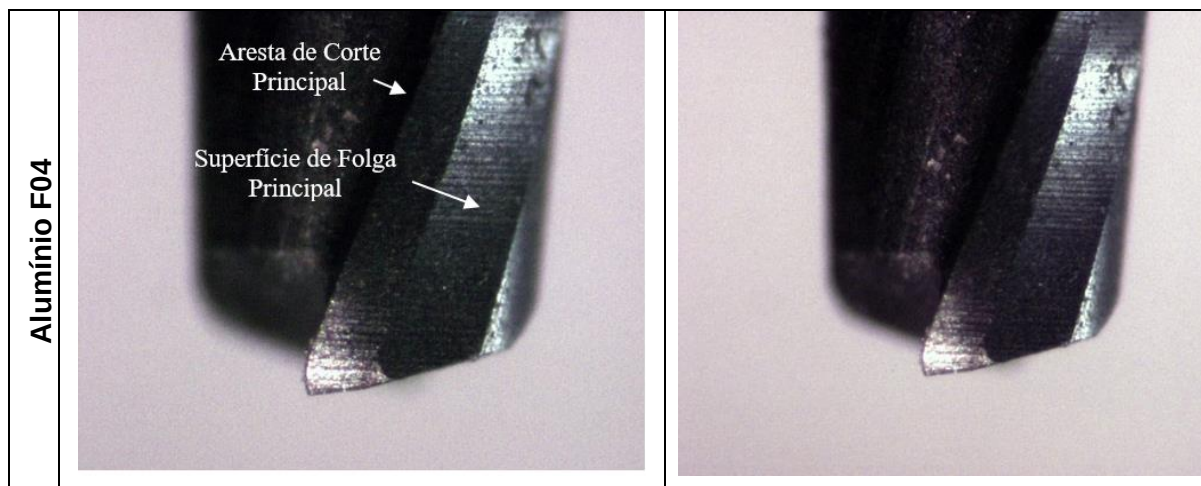


Figura 3 - Efeito do avanço por dente ($\mu\text{m}/\text{z}$) no desgaste da ferramenta nas duas arestas principais de corte para os quatro materiais usinados.

Nota-se pela Figura (3) que o desgaste de flanco ocorreu em todas as ferramentas, exceto na usinagem do alumínio. Na microusinagem do aço ABNT 1045 observa-se que a ferramenta F01 apresenta desgaste frontal nas duas arestas com valores de $36,25 \mu\text{m}$ e $34,11 \mu\text{m}$, ou seja, diferença de cerca de 6%. Isso sugere que a ferramenta F01 pode ter tido como mecanismo causador do desgaste a abrasão mecânica uma das maiores causas de desgaste de ferramenta. Na ferramenta F02 que microusinou o aço VP100 a diferença entre o desgaste de flanco nas arestas é de 33 % aproximadamente. Seu valor em termos absolutos quando comparado as demais ferramentas é o maior. O aço VP100 é o material que possui a maior dureza (318 HV).

Tanto o aço ABNT 1045 quanto o aço VP100 possuem estrutura cristalina composta de mais de uma fase. Os materiais não são isotrópicos e sob o ponto de vista microscópico cada fase presente possui dureza e tamanho de grãos diferentes, sugestãoando que a remoção do material não ocorra de forma uniforme. Assim partículas mais endurecidas podem ser arrancadas e contribuir para o fenômeno de abrasão que por sua vez potencializa o desgaste de flanco nas arestas principais da ferramenta. O desgaste de flanco aumenta pois existe maior espaço entre a ponta da ferramenta e a superfície onde o corte ocorre (Attanasio et al., 2012; Uhlmann et al., 2013).

No microfresamento do aço COS AR60 com grãos ultrafinos a ferramenta F03 sofreu um desgaste frontal de 60% de diferença entre as arestas de corte. O aço COS AR60 possui tamanho de grão ($0,7 \mu\text{m}$) menor do que o raio de aresta da ferramenta ($2,71 \mu\text{m}$). Sendo um material isotrópico e homogêneo porem com dureza inferior apenas ao do aço VP100 o que por si só aventaria o aumento da abrasão mecânica dado que a superfície de folga atrita com o elemento rígido que é a peça incentivado por partículas endurecidas. A abrasão mecânica (atrito) acompanhada da força nas arestas de corte podem ser associadas a uma possível flexão da ferramenta (Gietzelt, Eichhorn e Schubert, 2006). Nos ensaios utilizou – se avanços onde a espessura mínima de corte não foi atingida ($f_z \leq 0,6 \mu\text{m}$) e o processo de corte material não ocorreu de forma esperada (cisalhamento) sendo na verdade extrudado e favorecendo o mecanismo de desgaste.

A ferramenta F04 responsável pela usinagem do alumínio nada sofreu durante o microfresamento. Isso se deve possivelmente as características do próprio material que possui menor dureza (117 HV) e maior ductilidade facilitando o processo de corte do metal. Para cada avanço por dente adotado o volume removido é de $6,24 \text{ mm}^3$ sendo que após todo o ensaio o volume removido será de $43,68 \text{ mm}^3$ aproximadamente.

A Figura (4) apresenta imagens do topo das microfresas para todos os materiais usinados obtidos na lupa, bem como imagens de Mev e EDS das ferramentas. Observa- se que ocorreu avarias na superfície secundária em todos os casos exceto no alumínio.

	Aresta Secundária	Mev (Aresta Primária)
Aço 1045 F01		
VP100 F02		
COS AR60 F03		

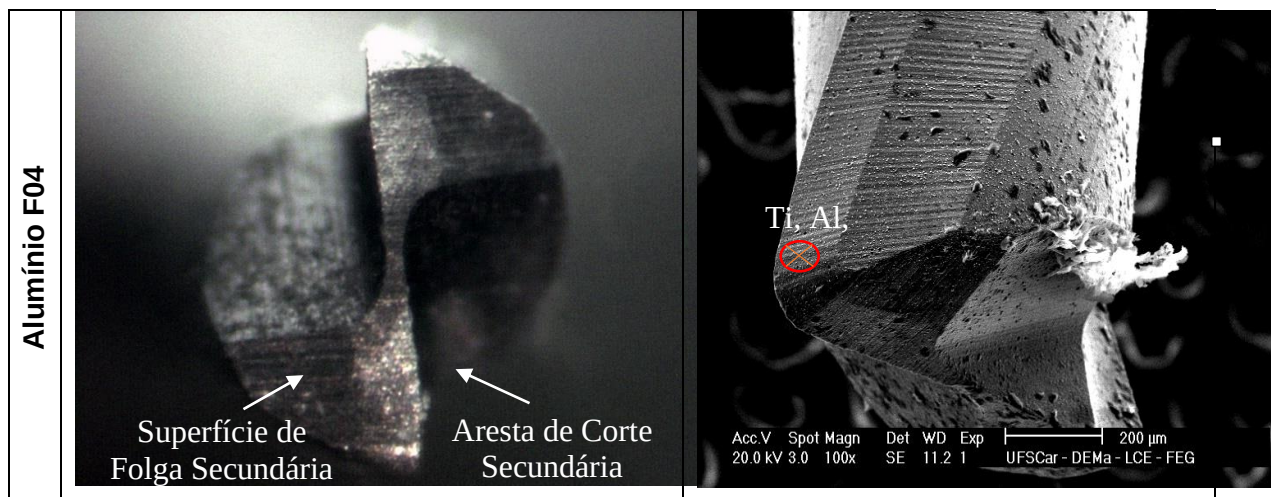


Figura 4 - Efeito do avanço por dente ($\mu\text{m}/\text{z}$) no desgaste da ferramenta na aresta secundária, comparando os quatro materiais por meio da lupa e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Das imagens acima nota – se que a ferramenta F01 (aço ABNT 1045) possui maiores danos em seu topo, seguido pela ferramenta F02 (VP100) e F03 (COS AR60 com grãos ultrafinos). Como o desgaste não foi monitorado para cada avanço sendo observado apenas após a execução de todos os avanços não é possível prever a evolução do desgaste. No entanto é sabido que em condições onde os avanços não atingiram a mínima espessura de corte o efeito do desgaste é potencializado (Biermann, Steiner e Krebs, 2013).

4. CONCLUSÕES

Este trabalho conseguiu monitorar o desgaste nas arestas primárias e secundárias de uma microfresa por meio de imagens ópticas (lupa) e com auxílio de imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Os níveis de desgaste médio das arestas de corte primárias do aço ABNT 1045 e VP100 foram próximos cerca de $35,83 \mu\text{m}$ e, para o aço COS AR60 com grãos ultrafinos o desgaste médio foi ligeiramente menor $33,81 \mu\text{m}$.

Avaliando o desgaste na aresta de corte primária da Ferramenta 01 os níveis de desgaste na aresta 1 e na aresta 2 são próximos. Na Ferramenta 02 os níveis de desgaste das arestas primárias possuem uma diferença de cerca de 33% entre elas. É possível que essa diferença ocorreu, pois, o aço VP100 é constituído de fases com diferentes durezas. A Ferramenta 03 apresentou a maior diferença de desgaste entre as arestas, apesar do material usinado ser um aço com grãos ultrafinos, ou seja, material homogêneo e isotrópico com dureza elevada. Provavelmente as partículas endurecidas aumentaram os níveis de abrasão na ferramenta de corte.

Todas as ferramentas apresentaram danos na aresta secundária de corte. A Ferramenta 01 teve um lascamento acentuado sugerindo que o mecanismo abrasivo teve grande influência. Nas Ferramentas 02 e 03 ocorreu o lascamento com magnitudes menores.

No alumínio com grãos refinados (RSA 6061-T6) não ocorreu desgaste nas arestas primárias e secundárias nas diferentes condições de corte, possivelmente por conta de suas propriedades mecânicas.

5. AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro e concessão de bolsas de estudo, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro e pela concessão de bolsas de estudo, ao Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade (LAPRAS) e Laboratório de Engenharia de Precisão (LEP), da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, e ao Laboratório de Micromanufatura, do Núcleo de BioNanoManufatura, Instituto de Pesquisas Tecnológicas por disponibilizarem a infraestrutura para o desenvolvimento deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

ATTANASIO, A. et al., 2013, 'Influence of Material Microstructures in Micromilling of Ti6Al4V Alloy'. Materials, v. 6, n. 9, p. 4268-4283. ISSN 1996-1944

- ASSIS, C. L. F., 2013, 'Microfresamento de aços com grãos ultrafinos', 101 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- BIERMANN, D.; STEINER, M.; KREBS, E., 2013, 'Investigation of Different Hard Coatings for Micromilling of Austenitic Stainless Steel'. Forty Sixth Cirp Conference on Manufacturing Systems 2013, v. 7, p. 246-251.
- CAMARA, M. A. et al., 2006, 'State of the Art on Micromilling of Materials, a Review'. Journal of Materials Science & Technology, v. 28, n. 8, p. 673-685.
- CHENG, X. et al., 2014, 'Fabrication accuracy analysis of micromilling tools with complicated geometries by wire EDM'. Journal of Mechanical Science and Technology, v. 28, n. 6, p. 2329-2335.
- DIB, M. H. M., 2013, 'Fundamentos do fresamento: uma aplicação em microfresamento', 160 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- HUNG, C.-W.; LU, M.-C., 2009, 'Model development for tool wear effect on AE signal generation in micromilling'. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 66, n. 9-12, p. 1845-1858.
- JEMIELNIAK, K.; BOMBINSKI, S.; ARISTIMUNO, P. X., 2009, 'Tool condition monitoring in micromilling based on hierarchical integration of signal measures'. Cirp Annals-Manufacturing Technology, v. 57, n. 1, p. 121-124.
- KUMAR, S. P. L. et al., 2014, 'A Review on Current Research Aspects in Tool-Based Micromachining Processes'. Materials and Manufacturing Processes, v. 29, n. 11-12, p. 1291-1337.
- MIAN, A. J.; DRIVER, N.; MATIVENGA, P. T., 2009, 'Micromachining of coarse-grained multi-phase material'. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, v. 223, n. 4, p. 377-385.
- OLIVEIRA, F.B., 2012, "Estudo dos mecanismos governantes do efeito de escala na microusinagem", Dissertação (Mestrado), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brasil
- UHLMANN, E. et al., 2013, 'Influence of inclusion contents on the micro-machinability of three plastic mold steels'. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 68, n. 9-12, p. 2451-2460.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

STUDY OF MICROTOOL WEAR

Adriana Bruno Norcino, adriananorcino@ifsp.edu.br¹

Alessandro Roger Rodrigues, roger@sc.usp.br²

Flávio Henrique Manarelli, flavio.manarelli@ifsp.edu.br³

Renato Goulart Jasinevicius, renatogj@sc.usp.br²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), R. Stéfano D'Avassi 625, CEP 15.991-502, Matão-SP

²Universidade de São Paulo (USP), Av. Trabalhador São Carlense 400, CEP 13.566-590, São Carlos -SP

³Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), R. Primeiro de Maio 500, CEP 085.71-050, Itaquaquecetuba-SP

Abstract: *The evolution of miniaturization processes of parts has been essential for reaching better surface quality on machined components, as rework is not suitable in terms of overall production costs. Micromachining ought not to be understood utterly on the reduction of scale, once this concept does not imply in the decrease of grain size from the machined material. In terms of small dimensions and tolerances in micro milling, understanding the mechanisms of failure and/or wear in micro tools can lead to the prediction of characteristics such as roughness, specific cutting force, burr formation, etc. This paper evaluates flank wear on the main cutting edge and damage on the main and sub cutting edges in micro milling of four materials with distinctive grain sizes. Different rates of feed per tooth (fz) were adopted under the same machined cutting length values. For this purpose, tests were performed in a CNC machining center under the conditions of having simultaneously up and down milling without cutting fluid. Tungsten Carbide micro mills coated with TiAlN ($\varnothing$ 1.0 mm) with two edges were used. Flank wear was measured on the primary clearance surface of the milling cutter. The results presented that wear levels at the main cutting edge area were lower in refined grain materials. Furthermore, damages at the secondary cutting surface were observed to be potentiated in the multi-phases microstructure material.*

Palavras-chave: micromilling, tool wear, ultrafine grains.