

EFEITO DE ESCALA NO MICROFRESAMENTO DE AÇO COM GRÃOS ULTRAFINOS

Fernando Brandão de Oliveira, fernandobrandao@ifsp.edu.br¹

Alessandro Roger Rodrigues, roger@sc.usp.br²

Adriana Bruno Norcino, adriananorcino@ifsp.edu.br¹

André Marcon Zanatta, andre.zanatta@sc.senai.br³

¹IFSP Campus Matão, Rua Stéfano D'avassi, 625, CEP 15.991-502, Matão-SP

²USP Campus São Carlos, Av. Trabalhador São-Carlense 400, CEP 13.566-590, São Carlos-SP

³Instituto SENAI de Inovação em Sistemas de Manufatura, R. Arno Waldemar Dohler, 957, CEP 89.219-510, Joinville-SC

Resumo: Este trabalho determinou a influência do avanço por dente e do tamanho de grão da peça no efeito de escala e rebarba da peça ao produzir canais retos por microfresamento de topo. Os ensaios foram conduzidos em um centro de microusinagem CNC Kern Pyramid Nano, variando o avanço por dente em 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25; 2; 3 e 4 $\mu\text{m}/\text{z}$. Os aços COS AR 60 como recebido perlítico-ferrítico (tamanho de grão de 11 μm) e COS AR60 com grãos ultrafinos ferrítico (tamanho de 0,7 μm) foram empregados nos testes. Microfresas Sandvik R216.32-00830-AI08G 1620 de carbeto de tungstênio de duas arestas, revestidas de TiAlN, diâmetro de 800 μm e raio de aresta de 1,9 μm foram aplicadas nos ensaios. Foram consideradas três observações para cada condição de corte sem a influência do desgaste da ferramenta para aplicação da Análise de Variância. Os resultados indicam que a redução do tamanho de grão e a fase ferrítica não foram significativos no efeito de escala e na formação de rebarba. Por outro lado, o aumento do avanço em 16 vezes diminuiu a energia específica de corte e o tamanho da rebarba em 92% e 86%, respectivamente.

Palavras-chave: efeito de escala, energia específica de corte, rebarba, microfresamento, grãos ultrafinos.

1. INTRODUÇÃO

A evolução da tecnologia e dos processos de manufatura demandou uma produção cada vez maior de produtos miniaturizados em diferentes áreas da indústria, tais como automotiva, médica, biotecnológica, telecomunicações, eletrônica e óptica. O processo de miniaturização objetivou produzir microcomponentes com novas aplicações, bom desempenho e alta qualidade, requerendo métodos de produção que tenham confiabilidade e repetibilidade. Dentre esses métodos, a microusinagem mecânica, realizada através do corte (microcorte), se tornou uma boa opção por utilizar ferramentas de corte miniaturizadas para promover a remoção do material da peça com boa precisão e acabamento (Madou, 2002; Chae; Park; Freihet, 2006; Dornfeld; Min; Takeuchi, 2006; Câmara et al., 2012; Komatsu et al., 2012).

Com a diminuição do volume do material removido, entretanto, a dimensão da espessura do cavaco não deformado (espessura de corte) pode ser comparada à dimensão do raio da aresta de corte da ferramenta. Nessa condição, o corte pode ocorrer com um ângulo de saída efetivo altamente negativo e uma pequena variação na espessura de cavaco não deformado pode influenciar o processo de corte e a formação do cavaco (Shaw, 1995; Bissaco; Hansen; De Chiffre, 2005). Portanto, a relação entre a espessura de cavaco não deformado (h) e o raio de aresta (r_e) da ferramenta irá definir o mecanismo ativo de remoção do cavaco, que em condições críticas pode ocorrer através de um processo de deformação elasto-plástica (*plowing*), sem que ocorra remoção efetiva de material (Chae; Park; Freihet, 2006).

Esse mecanismo de formação de cavaco no corte em microescala gera o efeito de escala, um fenômeno caracterizado pelo aumento substancial da energia específica de corte para usinagens com espessura de cavaco não deformado muito reduzidas, um reflexo do aumento da tensão de escoamento do material devido à diminuição da zona de corte (Shaw, 1996; Simoneau; Ng; Elbestawi, 2006; Mian; Driver; Mativenga, 2011). Além disso, no corte em microescala a razão h/r_e diminui. Nessas condições, o raio de aresta da ferramenta e a espessura de cavaco não deformado começam a atingir a mesma ordem de dimensão do tamanho de grão do material e, a partir deste momento, o corte ocorre a nível granular no material, portanto, o material não deve mais ser considerado homogêneo e isotrópico. O mecanismo de corte difere substancialmente do corte em macroescala e a anisotropia envolvida no corte em microescala, juntamente com o mecanismo do *plowing*, deve contribuir para gerar o efeito de escala e defeitos na superfície usinada (Dornfeld; Min; Takeuchi, 2006; Piljek; Keran; Math, 2014).

Como consequência desses efeitos, diversos estudos têm sido desenvolvidos para compreender os mecanismos governantes do efeito de escala, investigando a influência do raio de aresta da ferramenta e da microestrutura do material usinado no processo de formação de cavaco e na integridade superficial do componente microusinado. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar o efeito do avanço por dente (f_z) e do tamanho médio de grão (TG) da

microestrutura do material da peça na energia específica de corte e no processo de formação de rebarba no microfresamento de canais, explorando o efeito de escala na microusinagem.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de usinagem foram realizados em um centro de usinagem vertical CNC, modelo KERN Pyramid Nano, com rotação máxima de 50.000 rpm e potência de 6,4 kW, gentilmente cedido pelo Instituto SENAI de Inovação em Sistemas de Manufatura, do SENAI/SC em Joinville-SC. Empregou-se microfresamento de topo sem aplicação de fluido lubrificante. A Figura (1) ilustra a montagem experimental do sistema no centro de usinagem.

A profundidade de usinagem (a_p) e a velocidade de corte (v_c), respectivamente, 160 μm e 60 m/min, foram mantidas constantes. A largura de usinagem (a_e) foi adotada como o valor do diâmetro da fresa utilizada no ensaio ($a_e = d_f = 800 \mu\text{m}$). O avanço por dente (f_z) foi adotado como variável de entrada (0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25; 2; 3 e 4 $\mu\text{m/z}$). A fresa percorreu trajetória linear e unidirecional, no sentido positivo do eixo y do dinamômetro (Fig. 1), microfresando canais de 8 mm de comprimento.

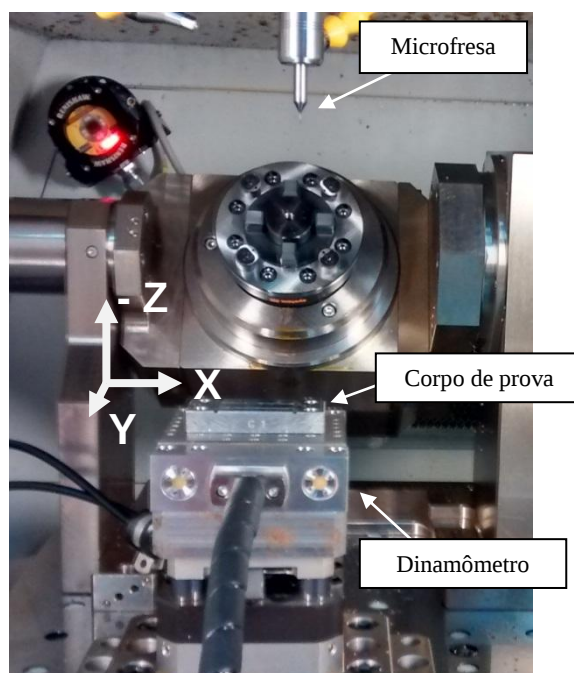


Figura 1. Montagem experimental no centro de usinagem CNC para os ensaios de microfresamento.

A energia específica de corte foi obtida pela integração numérica do sinal da força de corte no tempo e multiplicando-a pela razão entre a velocidade de corte e o volume removido de cavaco, calculado com base na geometria dos corpos de prova: nos parâmetros de corte (a_p e a_e) e no comprimento usinado. Para aquisição da força de corte, empregou-se o software Labview® 7.1 e placa de aquisição NI USB-6216 da National Instruments, e o dinamômetro piezelétrico 9256C2 e amplificador de carga Type 5019B da Kistler. Matlab V.7.9.0.529 (R2009b)™ foi utilizado para o pós-processamento dos sinais de força, considerando-se uma taxa de aquisição de 30 kHz.

Os corpos de prova utilizados nos ensaios de usinagem foram obtidos a partir do aço COS AR 60 como recebido perlítico-ferrítico e de uma versão deste material com grãos ultrafinos ferrítico. A aplicação do material como recebido e de sua versão com grãos ultrafinos visa avaliar o impacto do processo de refino de grão e, por consequência, da diminuição do tamanho médio de grão do material no efeito de escala.

O aço COS AR60 como recebido possui tamanho médio de grão de 11 μm e dureza de 192 HV. Após um tratamento termomecânico, o material passou a ter tamanho médio de grão de 0,7 μm e dureza de 216 HV, sendo caracterizado como um material com grãos ultrafinos. A Figura (2) apresenta a microestrutura do material COS AR60 como recebido e de sua versão com grãos ultrafinos, a qual denominaremos GUF para a discussão dos resultados.

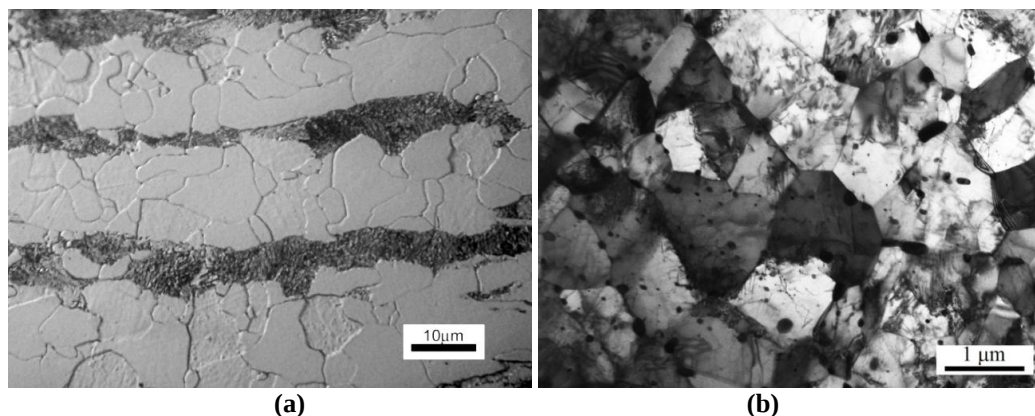


Figura 2. Fotomicrografia do aço COS AR60 (a) como recebido e (b) com grãos ultrafinos (GUF) para caracterização microestrutural do material da peça (Assis, 2013).

Todos os corpos de prova obtidos dos dois materiais e utilizados nos ensaios de usinagem possuem dimensões de 60 x 26 x 10 mm. Os corpos de prova foram usinados com canais de 2 mm ao longo da sua geometria, conforme apresentado pela Fig. (3), para facilitar a movimentação da microfresa durante a usinagem dos microcanais.

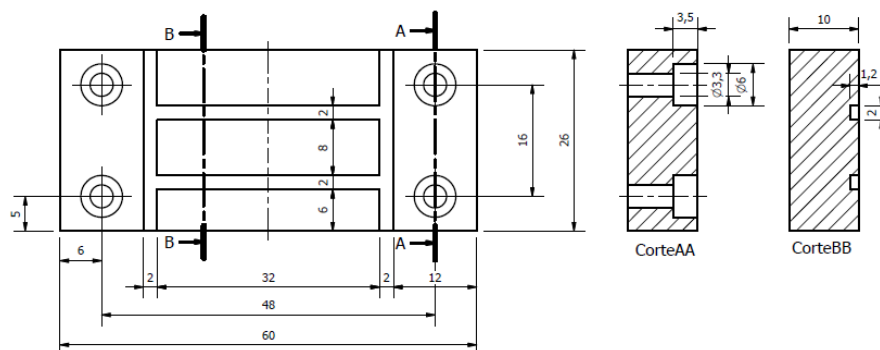


Figura 3. Geometria dos corpos de prova com dimensões em mm.

A ferramenta adotada para a realização dos ensaios foi uma fresa de topo inteiriça de metal duro, com duas arestas de corte e revestimento de TiAlN. Foi selecionada a microfresa de código R216.32-00830-AI08G 1620 da Sandvik Coromant que possui diâmetro de 800 µm e valor máximo de profundidade de usinagem de 0,8 mm. O raio de aresta das ferramentas de corte, medido através de um microscópio confocal *Olympus OLS4000*, foi determinado em $1,9 \pm 0,103$ µm.

Visando a quantificação estatística dos resultados, foram consideradas três réplicas para cada avanço por dente. O desgaste das ferramentas foi monitorado via microscopia ótica a fim de não influir nos resultados. A análise do processo de formação de rebarba foi realizada recorrendo-se ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) *Zeiss LEO 440*. O comprimento da rebarba de topo concordante foi obtido através da análise das imagens obtidas pelo MEV no *software Autocad®*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A energia específica de corte (u) é o parâmetro mais representativo do efeito de escala em um processo de usinagem. A Figura (4) apresenta o típico aumento hiperproporcional da energia específica de corte com a diminuição do avanço por dente da microfresa para ambos os materiais da peça. A variabilidade associada às medidas de energia específica foi de 4,1 a 39,8% para o aço COS AR60 e de 10,1 a 44,2% para o aço GUF.

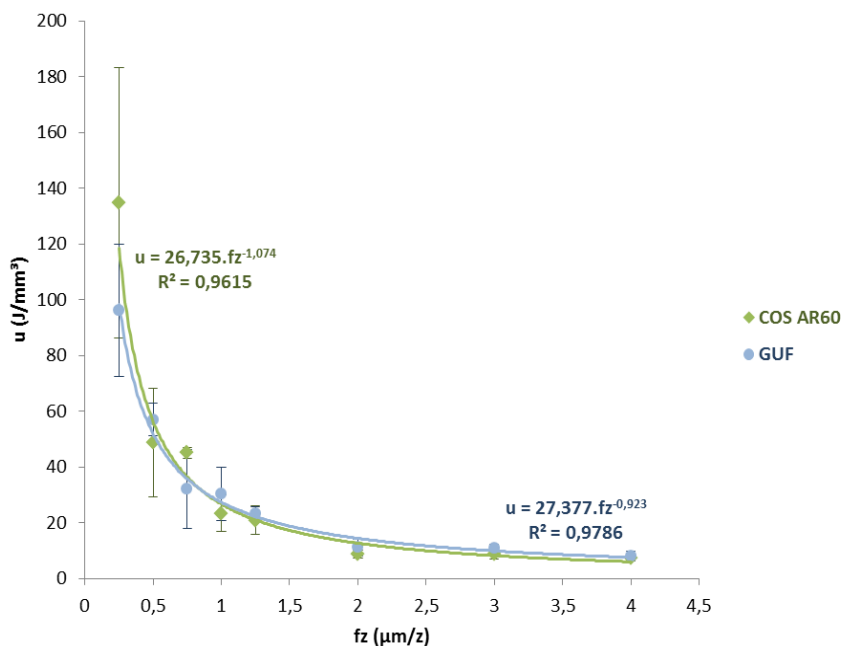


Figura 4. Efeito do avanço por dente ($\mu\text{m/z}$) na energia específica de corte, comparando os dois materiais da peça.

Os altos valores de variabilidade correspondem principalmente aos resultados de energia específica para os avanços por dente de 0,75; 0,5 e 0,25 $\mu\text{m/z}$. Essa alta variabilidade pode ser associada ao efeito do *plowing* e ao processo de remoção instável de material, considerando-se principalmente que os avanços listados são menores que o valor do raio de aresta da ferramenta, $r_e = 1,9 \pm 0,103 \mu\text{m}$, e devem figurar na ordem da espessura mínima de corte dos materiais.

A variabilidade decorrente das medidas para o mesmo avanço em ambos os materiais indicam que não há diferença entre as médias de energia específica de corte entre eles. Assim, visando validar estatisticamente os resultados de energia específica de corte obtidos, apresenta-se na Tab. (1) a análise de variância (ANOVA) dos efeitos principais (avanço por dente e tamanho de grão) sobre a resposta (energia específica). O efeito do tamanho de grão de cada material será discutido em função do material da peça usinado, considerando-se os aços COS AR60 e GUF, com seus respectivos tamanhos médios de grão.

Tabela 1. ANOVA do efeito do avanço por dente e do material da peça na energia específica de corte ($R^2 = 88,44\%$).

Fator de Controle	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	Teste F	Valor P
f_z	7	54192,1	7741,7	33,31	0,000
Material	1	158,2	158,2	0,68	0,415
$f_z \times \text{Material}$	7	2526,8	361,0	1,55	0,185
Erro	32	7436,4	232,4		
Total	47				

Nota-se na ANOVA que apenas o avanço por dente afeta significativamente a energia específica de corte, já que seu Valor P é menor que o nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$). Este resultado pode ser verificado graficamente na Fig. (5)(a), uma vez que energia específica de corte (u) varia significativamente em torno da média ($u_{med} \cong 35,5 \text{ J/mm}^3$) para os oito valores de avanço por dente. O material da peça não afeta significativamente a energia específica de corte ($P = 0,415 > \alpha = 0,05$), o que podemos observar na Fig. (5)(b), onde a energia específica de corte não 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.

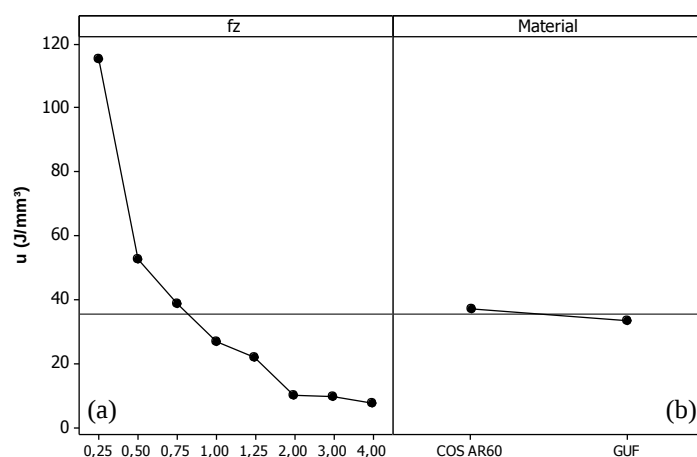


Figura 5. Gráfico dos efeitos principais (a) avanço por dente e (b) material da peça sobre a energia específica de corte.

Podemos ainda observar que a interação entre os fatores de controle não demonstrou significância sobre a energia específica de corte ($P = 0,185 > \alpha = 0,05$), ou seja, qualquer uma das variáveis de entrada não depende do nível da outra para influir na resposta. Em termos gráficos, isso significa que a variação da energia específica de corte entre os avanços não depende do material da peça, portanto, existe variação entre os valores de energia específica conforme variamos os valores de avanço por dente, mas se considerarmos cada valor de avanço por dente, não há variação de energia específica quando alteramos o material da peça usinado, principalmente devido à variabilidade das medidas, conforme podemos observar na Fig. (6).

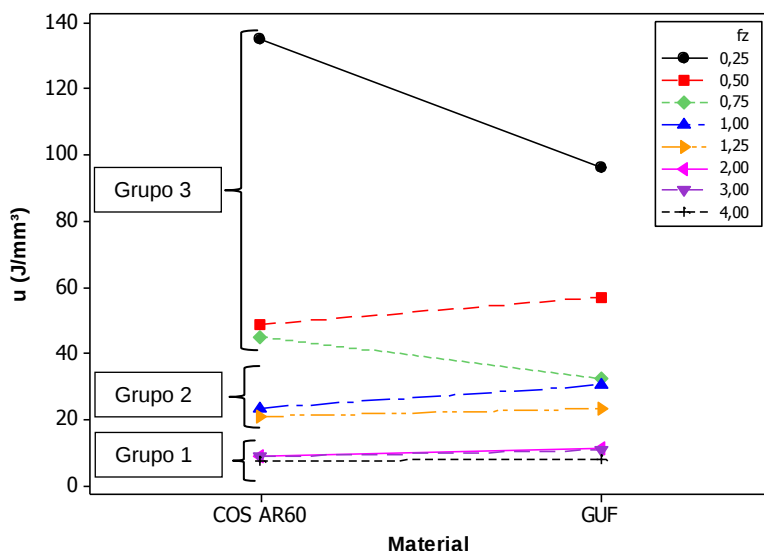


Figura 6. Gráfico do efeito da interação entre os fatores de controle (variáveis de entrada) na energia específica.

Apesar da não significância da interação entre os fatores de controle, vale frisar na Fig. (6) que há um indicativo de sensível aumento da energia específica de corte para o aço GUF para avanços por dente maiores que 2 $\mu\text{m/z}$ (retas do Grupo 1). Nestes casos, a variabilidade das medidas está na faixa de 4 a 10% apenas e os resultados concordam com a Fig. (4), onde a energia específica de corte para o aço GUF tende a ser maior que a do aço COS AR60, associada à baixa variabilidade. Esta tendência de pequeno aumento da energia específica para o aço GUF pode ocorrer em função de sua maior dureza, mas nem sempre ela ocorre, pois também depende de uma relação inversamente proporcional entre grau de recalque e tensão de ruptura do material da peça (Ferraresi, 1970).

Uma maior tendência de aumento da energia específica ocorre para as retas do Grupo 2 (avanços de 1 e 1,25 $\mu\text{m/z}$), mas neste caso, é associada a uma maior variabilidade, como validada também pela Fig. (4).

Entretanto, comportamento oposto da energia específica ao variar o material de peça é observado para os menores avanços, excetuando-se para $f_z = 0,50 \mu\text{m/z}$ (retas do Grupo 3). Neste caso, a energia específica tende a decair para o aço GUF, mas a elevada variabilidade dos resultados ($\sim 40\%$) pode ter afetado este comportamento, que por sua vez, concorda com a Fig. (4), uma vez que as amplitudes das curvas dos aços COS AR60 e GUF se invertem, porém associadas a maiores variabilidades. Novamente, a queda de energia específica para materiais mais duros pode ocorrer, mas depende do balanço entre grau de recalque e tensão de ruptura do material da peça.

Portanto, a significância do avanço por dente e as não significâncias do material da peça e da interação entre estes fatores na energia específica de corte são cobertas pela ANOVA em quase 90% dos resultados, como mostra a Tab. (1).

O aumento hiperproporcional da energia específica de corte com a diminuição do avanço por dente decorre principalmente do efeito do *plowing* durante a microfresagem. Como consequência desse efeito, normalmente tem-se maior formação de rebarba de topo em canais microfresados com espessuras de cavaco não deformado muito reduzidas, principalmente devido ao processo de formação de cavaco mais instável nessas condições de corte. A fim de avaliarmos o impacto do efeito de escala na formação de rebarba dos dois materiais, a Fig. (7) apresenta os resultados para o comprimento de rebarba de topo concordante gerados no microfresamento dos canais.

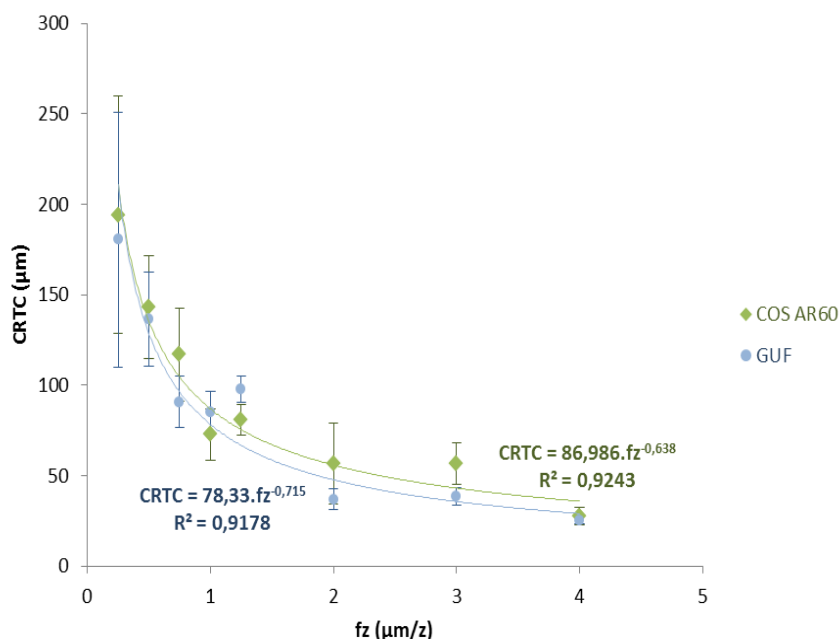


Figura 7. Comprimento de rebarba de topo concordante (CRTC) em função do avanço para os aços COS AR60 e GUF.

Observa-se que os valores de comprimento de rebarba de topo concordante (CRTC), resultado do processo de formação de cavaco no microfresamento e, consequentemente, da formação de rebarba, apresentam comportamento similar aos resultados de energia específica de corte, descrevendo também a curva característica do efeito de escala. Para as condições de corte em que $f_z < r_e$, a curva apresenta crescimento assintótico atingindo valores de CRTC próximos a $200 \mu\text{m}$ para o menor avanço por dente. Em contrapartida, para as condições de corte em que $f_z > r_e$, os valores de CRTC tendem a atingir um patamar próximo a $50 \mu\text{m}$, cerca de 4x menor.

Os altos valores de CRTC para os menores avanços são uma resposta direta ao processo de formação de cavaco no microfresamento fortemente influenciado pelo *plowing*. Nessas condições, a ferramenta avança sem remoção efetiva de material, deformando o material a frente da aresta de corte. O material deformado e acumulado à frente da aresta se transforma em rebarba de topo, podendo haver ainda o escoamento de uma pequena porção deste material na superfície já usinada, conhecido como escoamento lateral de cavaco. Assim, a formação de rebarba é crítica para avanços por dente menores, pois depende da espessura mínima de corte para a formação de cavaco, que por sua vez depende do raio de aresta da ferramenta. Quanto menor o avanço, maior o volume de material à frente da ferramenta para atingir a espessura mínima de corte, sendo este volume que se transforma em rebarba.

Visando validar estatisticamente os resultados de comprimento de rebarba de topo concordante obtidos, apresenta-se na Tab. (2) a análise de variância (ANOVA) dos efeitos (avanço por dente e material da peça) sobre a resposta (CRTC).

Tabela 2. ANOVA do efeito do avanço por dente e do material da peça no CRTC ($R^2 = 78,18\%$).

Fator de Controle	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	Teste F	Valor P
f_z	7	357109	51016	65,87	0,000
Material	1	1468	1468	1,90	0,171
$f_z \times$ Material	7	7771	1110	1,43	0,197
Erro	133	103006	774		
Total	148				

A partir dos resultados da ANOVA, observa-se que o avanço por dente afeta significativamente o CRTC ($P = 0,000 < \alpha = 0,05$). Este resultado pode ser verificado graficamente na Fig. (8)(a), uma vez que o CRTC varia significativamente em torno da média ($CRTC_{méd} \cong 87,4 \mu m$) para os oito valores de avanço por dente. O comportamento gráfico apresentado pela Fig. (8)(a) reforça o comportamento do efeito de escala para o microfresamento e mostra que o processo de formação de rebarba é fortemente influenciado pelo *plowing*, uma vez que os maiores comprimentos são atingidos no microfresamento com menores avanços por dente.

O material da peça não afeta significativamente o CRTC ($P = 0,171 > \alpha = 0,05$), o que podemos observar na Fig. (8)(b), onde o CRTC não apresenta grande variação em torno da média para os dois materiais. Ao considerarmos a interação entre os fatores de controle, o avanço por dente e o material da peça, o resultado da ANOVA mostra que essa interação também não tem significância no CRTC ($P = 0,197 > \alpha = 0,05$), ou seja, as duas variáveis de entrada não dependem uma da outra para influir na resposta. Em termos gráficos, isso significa que a variação do CRTC entre os valores de avanço por dente não deve depender do material da peça, conforme comportamento apresentado pela Fig. (9).

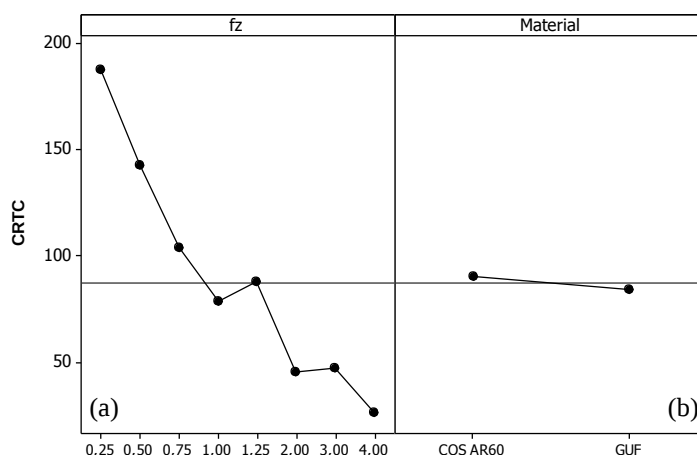


Figura 8. Gráfico dos efeitos principais (a) avanço e (b) material da peça sobre o comprimento de rebarba de topo concordante (CRTC em μm).

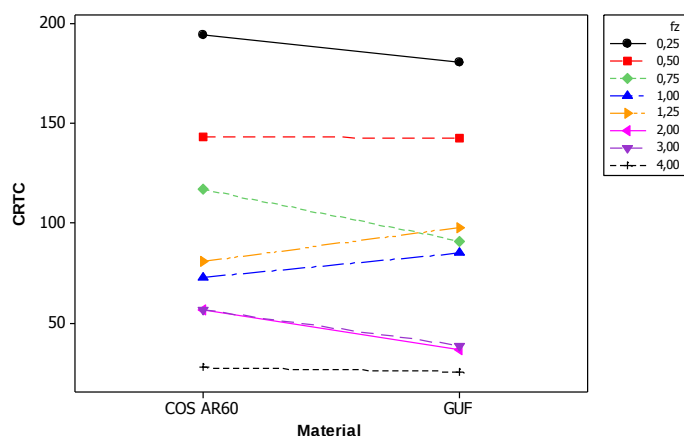


Figura 9. Gráfico do efeito da interação entre os fatores de controle (variáveis de entrada) no comprimento de rebarba de topo concordante (CRTC em μm).

Ao considerarmos o comportamento das curvas apresentadas pelas Fig. (4) e (7), podemos observar uma boa concordância entre os resultados do aço COS AR60 e do GUF. Quando analisamos o quadro ANOVA apresentado na Tab. (1), observamos que a variação do material usinado não foi influente para a variação da energia específica de corte. Da mesma forma, ao observarmos o quadro ANOVA apresentado na Tab. (2), temos que a variação do material usinado também não foi influente no comprimento de rebarba de topo concordante gerada no microfresamento. Assim, o processo de refino de grão aparenta não exercer diferença significativa no microfresamento dos dois materiais e no efeito de escala.

Em contrapartida, ao avaliarmos a influência do avanço por dente no efeito de escala, as curvas obtidas para os dois materiais na Fig. (4) mostram que ao buscarmos a região do gráfico com menores níveis de energia específica de corte, incidiremos nas condições de usinagem com avanço por dente maior ou igual a $2 \mu m/z$. A Figura (7) mostra ainda que além de encontrarmos as regiões com menores níveis de energia específica de corte, encontraremos também os menores níveis de CRTC para estes mesmos avanços. Portanto, os resultados indicam que as condições de usinagem a partir do avanço de $2 \mu m/z$, o mais próximo do valor do raio de aresta, leva ao microfresamento com melhor balanço entre níveis de energia específica de corte e CRTC, minimizando o efeito de escala no microfresamento.

4. CONCLUSÕES

O efeito de escala na microusinagem é fortemente influenciado pelo *plowing* em condições de usinagem com $f_z < r_e$, o que se reflete no aumento hiperproporcional da energia específica de corte e também no aumento do comprimento das rebarbas de topo formadas no microfresamento dos canais. Portanto, o aumento da energia específica de corte em operações de microfresamento deve indicar um processo de formação do cavaco através de deformações elasto-plásticas (*plowing*), havendo maior geração e aumento do tamanho de rebarbas.

A ANOVA dos resultados mostrou que o processo de refino de grão da microestrutura do material não exerce influência significativa nos resultados de energia específica de corte e comprimento de rebarba de topo concordante. O avanço por dente, entretanto, mostra ser influente tanto para a energia específica de corte quanto para o comprimento de rebarba, devendo-se buscar condições de usinagem com $f_z > r_e$ para minimizar o efeito de escala na microusinagem.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro e concessão de bolsa de estudo, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudo e ao Instituto SENAI de Inovação em Sistemas de Manufatura, SENAI/SC em Joinville-SC, por disponibilizarem sua infraestrutura para o desenvolvimento deste trabalho e pelo apoio técnico à pesquisa. Agradecemos também ao Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade (LAPRAS) e ao Laboratório de Engenharia de Precisão (LEP), da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, por disponibilizarem sua infraestrutura para o desenvolvimento deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

Assis, C.L.F., 2013, "Microfresamento de aços com grãos ultrafinos", Tese Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

- Bissaco, G., Hansen, H.N., De Chiffre, L., 2005, "Micromilling of hardened tool steel for mould making applications", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167, No. 2-3, pp. 201-207.
- Câmara, M.A., Campos Rubio, J.C., Abrão, A.M., Davim, J. P., 2012, "State of the art on micromilling of materials, a review", *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 28, No. 8, pp. 673-685.
- Chae, J., Park, S.S., Freihet, T., 2006, "Investigation of Micro-Cutting Operations", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 3-4, pp. 313-332.
- Dornfeld, D.; Min, S.; Takeuchi, Y., 2006, "Recent advances in mechanical micromachining", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Amsterdam, v. 55, n. 2, p. 745-768.
- Ferraresi, D., 1970, "Fundamentos da usinagem dos metais", Ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brazil, 754 p.
- Komatsu, T., Yoshino, T., Matsumura, T., Torizuka, S., 2012, "Effect of crystal grain size in stainless steel on cutting process in micromilling", *Procedia CIRP*, Vol. 1, pp. 150-155.
- Madou, M.J., 2002, "Fundamentals of microfabrication: the science of miniaturization", 2. ed. CRC Press, 723 p.
- Mian, A.J., Driver, N., Mativenga, P.T., 2011, "Identification of factors that dominate size effect in micro-machining", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 51, pp. 383-394.
- Piljek, P., Keran, Z., Math, M., 2014, "Micromachining - review of literature from 1980 to 2010", *Interdisciplinary Description of Complex Systems*, Vol. 12, No. 1, pp. 1-27.
- Shaw, M.C., 1995, "Precision Finishing", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 44, No. 1, pp. 343-348.
- Shaw, M.C., 1996, "Energy conversion in cutting and grinding", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 45, No. 1, pp. 101-104.
- Simoneau, A., Ng, E., Elbestawi, M.A., 2006, "Chip formation during microscale cutting of a medium carbon steel", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 5, pp.467-481.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

SIZE EFFECT IN MICROMILLING OF ULTRAFINE-GRAINED STEEL

Fernando Brandão de Oliveira, fernandobrandao@ifsp.edu.br¹

Alessandro Roger Rodrigues, roger@sc.usp.br²

Adriana Bruno Norcino, adriananorcino@ifsp.edu.br¹

André Marcon Zanatta, andre.zanatta@sc.senai.br³

¹IFSP Campus Matão, Rua Stéfano D'avassi, 625, CEP 15.991-502, Matão-SP

²USP Campus São Carlos, Av. Trabalhador São-Carlense 400, CEP 13.566-590, São Carlos-SP

³Instituto SENAI de Inovação em Sistemas de Manufatura, R. Arno Waldemar Dohler, 957, CEP 89.219-510, Joinville-SC

Abstract: This work determined the influence of the feed per tooth and workpiece grain size over size effect and burr formation when producing straight slots by end micro milling. Milling tests were carried out in a micro milling center CNC Kern Pyramid Nano by varying tool feed per tooth in 0.25; 0.5; 0.75; 1; 1.25; 2; 3 e 4 $\mu\text{m/tooth}$. COS AR60 as received pearlite-ferrite (11 μm grain size) and ultrafine grain ferrite (0.7 μm grain size) steels were used as workpiece. TiAlN coated two-flute carbide end mills Sandvik R216.32-00830-AI08G 1620 with 800 μm diameter and 1,9 μm cutting edge radius were applied in all tests. Three runs for each micro cutting condition without tool wear influence were considered to apply Analysis of Variance. The results indicated both ferrite phase and smallest grain size were not significant over both size effect and burr size. Otherwise, specific cutting energy and burr size decreased 92% and 86%, respectively, as tool feed per tooth increased 16 times.

Keywords: size effect, specific cutting energy, burr, micromilling, ultrafine grain.