

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/328890726>

FORMAÇÃO DE REBARBA E ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE NO MICROFRESAMENTO

Conference Paper · May 2015

CITATIONS
0

READS
46

2 authors:



Fernando Brandão De Oliveira
Federal Institute of Education, Science and Technology of São Paulo
9 PUBLICATIONS 119 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



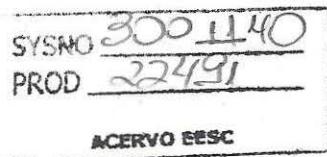
Alessandro Roger Rodrigues
University of São Paulo
76 PUBLICATIONS 436 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:

Project Free form milling [View project](#)

Project Moulds manufactured by Micromilling and Electro-Discharge Machining [View project](#)



All content following this page was uploaded by Fernando Brandão De Oliveira on 12 November 2018.

The user has requested enhancement of the downloaded file.

FORMAÇÃO DE REBARBA E ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE NO MICROFRESAMENTO

Fernando Brandão de Oliveira, fernandobrandao@usp.br¹

Alessandro Roger Rodrigues, roger@sc.usp.br¹

Suzana Regina da Silva Moreira, msc.suzana@gmail.com²

¹USP Campus São Carlos, Av. Trabalhador São-Carlense 400, CEP 13.566-590, São Carlos-SP

²UNIP Unidade Araçatuba, Av. Baguaçu 1939, CEP 16.018-555, Araçatuba-SP

Resumo: Este trabalho quantificou o efeito do avanço por dente (f_z) no processo de formação de rebarba e na energia específica de corte no microfresamento do aço ABNT 1045 aplicado em micromoldes. Os ensaios de microfresamento foram conduzidos em um centro de usinagem CNC sem aplicação de fluido lubrirrefrigerante, empregando fresa de topo inteiriça de duas arestas com Ø 0,8 mm, revestida de Nitreto de Alumínio Titânio. Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura revelaram que os maiores comprimentos de rebarba foram atingidos em usinagens com avanços menores que a espessura mínima de corte para o respectivo material. Avanços maiores favoreceram a total formação de cavaco e resultaram em menores comprimentos de rebarba. O aumento da energia específica indica um processo de formação do cavaco através de plowing, havendo maior geração e aumento do tamanho de rebarbas para avanços menores que 1 $\mu\text{m}/\text{z}$.

Palavras-chave: microfresamento, rebarba, energia específica de corte.

1. INTRODUÇÃO

Dentre os diversos processos de usinagem em microescala, o microfresamento possibilita a produção de microcomponentes em três dimensões com alta complexidade geométrica, podendo-se processar uma grande variedade de materiais metálicos e não-metálicos, como polímeros e cerâmicas (Alting et al., 2003; Kim, Mayor, Ni, 2004; Câmara et al., 2012). Entretanto, com a diminuição do volume do material removido, a dimensão da espessura do cavaco não deformado (espessura de corte) pode ser comparada à do raio da aresta de corte da ferramenta. Como resultado, 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 (Bissaco, Hansen, De Chiffre, 2005).

Chae, Park e Freihet (2006) apresentam o conceito de espessura mínima de corte (h_{\min}), segundo o qual o cavaco não irá se formar a menos que a espessura do cavaco não deformado seja maior que h_{\min} . Quando a espessura do cavaco não deformado é menor que h_{\min} , o material é submetido a um mecanismo de deformação elastoplástica (*plowing*), sem que ocorra remoção efetiva de material. 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 (Simoneau, Ng, Elbestawi, 2006).

Segundo Liu, Devor e Kapoor (2004), esse fenômeno tem uma grande influência nas forças de corte, formação de cavaco e acabamento superficial durante a usinagem em microescala. Como consequência, diversos estudos têm sido desenvolvidos para compreender os mecanismos governantes do efeito de escala e garantir que o corte ocorra sem danos à integridade superficial do material. Assim, o objetivo deste artigo é avaliar o efeito do avanço por dente (f_z) no processo de formação de rebarba e na energia específica de corte no microfresamento de canais do aço ABNT 1045 aplicado em micromoldes, explorando o efeito de escala na microusinagem.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados em um centro de usinagem vertical CNC *Hermle C800U*, empregando-se microfresamento de topo sem aplicação de fluido lubrirrefrigerante. A profundidade de usinagem (a_p) e a velocidade de corte (v_c), respectivamente, 0,160 mm 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 ($a_e = d_f = 0,8 \text{ mm}$). O avanço por dente (f_z) foi adotado como variável de entrada (0,1; 0,3; 1,0; 3,0; 7,0 e 9,0 $\mu\text{m}/\text{z}$). A fresa percorreu trajetória linear e unidirecional, no sentido positivo do eixo y do dinamômetro (Fig. 1).

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 ($\text{vol} = A_e \cdot a_p$). 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. A Figura (1) ilustra a montagem experimental do sistema no centro de usinagem.

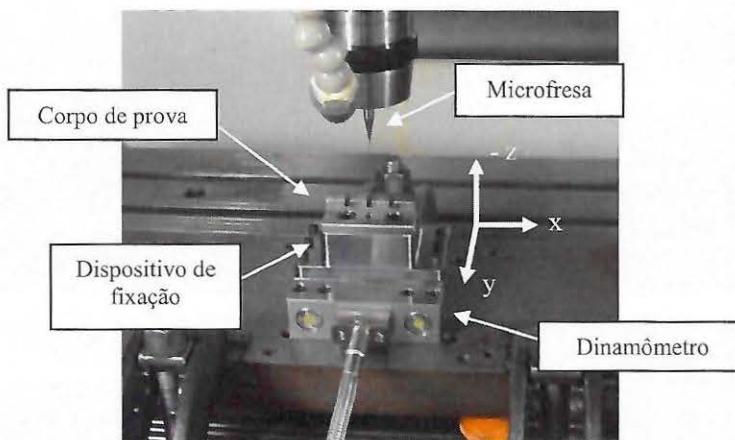


Figura 1. Montagem experimental no centro de usinagem CNC para os ensaios de microfresamento.

Os corpos de prova foram obtidos a partir do aço ABNT 1045 trefilado ($93,2 \pm 1,1$ HRB). Como ferramenta de corte, utilizou-se fresas de topo inteiriças de metal duro com duas arestas (920ML008-MEGA-T / Seco Tools), revestidas de Nitreto de Alumínio Titânio, com diâmetro (d_f) de 0,8 mm, raio de ponta de 50 μm e raio de aresta (r_e) de $2,736 \pm 0,161$ μm , medido através de um microscópio confocal Olympus OLS4000. A Figura (2) apresenta imagens do corpo de prova e da microfresa.

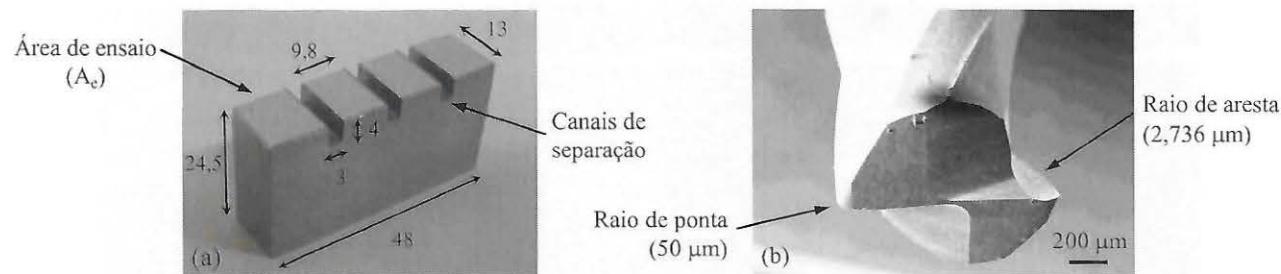


Figura 2. (a) Dimensões dos corpos de prova (mm) e (b) ferramenta de corte para os ensaios de microfresamento.

Visando a quantificação estatística dos resultados, foram consideradas duas 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 Zeiss LEO 440. A recuperação elástica do material, analisada através da medida real da profundidade de usinagem no canal microfresado, foi obtida recorrendo-se ao perfilômetro ótico Veeco Wyko NT1100.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura (3) mostra imagens de MEV dos canais microfresados (vista superior) e as respectivas rebarbas formadas nas bordas dos canais para cada avanço por dente adotado.

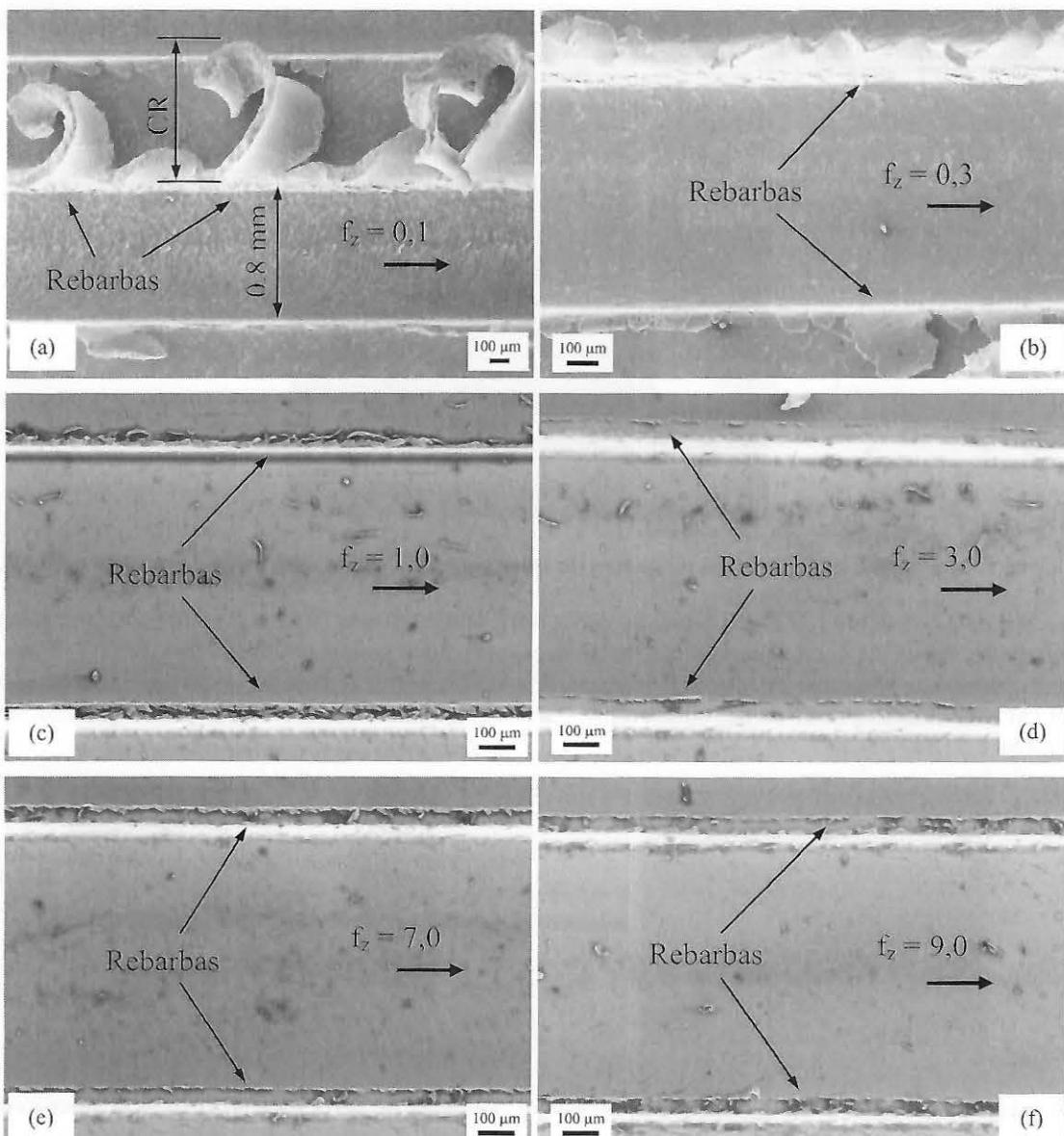


Figura 3. Formação de rebarbas no fresamento de microcanais utilizando $a_p = 160 \mu\text{m}$.

É possível constatar que o comprimento linear da rebarba (CR), projetado no plano dos canais, apresenta relação inversamente proporcional ao avanço por dente da fresa, isto é, quanto maior o avanço, menor é o tamanho das rebarbas formadas. Verifica-se que as rebarbas alcançaram dimensões da ordem de grandeza do diâmetro da ferramenta ou largura dos canais para avanços por dente inferiores a $1,0 \mu\text{m/z}$, como pode ser visto nas Fig. (3)(a) e (b). Por outro lado, as Fig. (3)(c) a (f) mostram que as rebarbas diminuem significativamente de tamanho para avanços por dente a partir de $1,0 \mu\text{m/z}$, alcançando as menores dimensões para o maior avanço adotado ($9,0 \mu\text{m/z}$).

A formação de rebarba foi crítica para avanços por dente menores, pois depende da espessura de corte mínima para a formação de cavaco, que por sua vez depende do raio de aresta da ferramenta e do material da peça usinado. Medições do raio de aresta das fresas adotadas neste trabalho através de microscopia confocal, mostraram que o raio de aresta da microfresa é $r_e = 2,736 \pm 0,161 \mu\text{m}$, o que condiz aproximadamente com o valor de avanço por dente utilizado na usinagem do canal apresentado pela Fig. (3)(d), $f_z = 3,0 \mu\text{m/z}$ e onde houve uma diminuição significativa no tamanho das rebarbas. Além disso, segundo Vogler, Devor e Kapoor (2004), a espessura mínima para a formação de cavaco em aço-carbono perlítico-ferrítico é da ordem de 20 a 30% do valor do raio de aresta da ferramenta, o que resulta na espessura mínima (no caso deste trabalho) entre $0,515$ e $0,869 \mu\text{m}$. Este resultado reforça ainda mais o fato de que a rebarba também diminuiu grandemente para o avanço por dente de $1,0 \mu\text{m/z}$ (cavaco completamente formado) e aumentou fortemente para os avanços de $0,3$ e $0,1 \mu\text{m/z}$ (espessura de corte não atingiu a mínima para formação de cavaco).

Assim, nos casos mais críticos, as rebarbas foram formadas devido ao recalque ou deformação excessiva do material da peça à frente da aresta de corte da microfresa, onde o material que formaria o cavaco (por não atingir a

espessura mínima de formação) transformou-se em rebarba, que foi empurrada para as laterais dos microcanais. Por consequência, para os avanços menores, observa-se uma formação de rebarba maior na saída da ferramenta, ou seja, no fim do corte concordante durante a formação do cavaco. Para os avanços maiores, as rebarbas formadas na entrada e saída da ferramenta apresentam em média o mesmo CR. Este comportamento de recalcamento do material para as laterais também ocorreu no contato peça-fresa (superfície de folga secundária da ferramenta), onde pode-se constatar delaminações de material da peça no fundo dos microcanais, que têm reflexo direto na rugosidade. As superfícies das paredes dos canais microfresados não foram caracterizadas.

A Figura (4) traz detalhes ampliados da superfície microfresada do fundo dos canais, onde fica latente a ocorrência de delaminação para os avanços de 0,1 e 0,3 $\mu\text{m}/\text{z}$ (não formação de cavaco) e marcas de avanço da microfresa para $f_z = 1,0 \mu\text{m}/\text{z}$ (formação completa de cavaco).

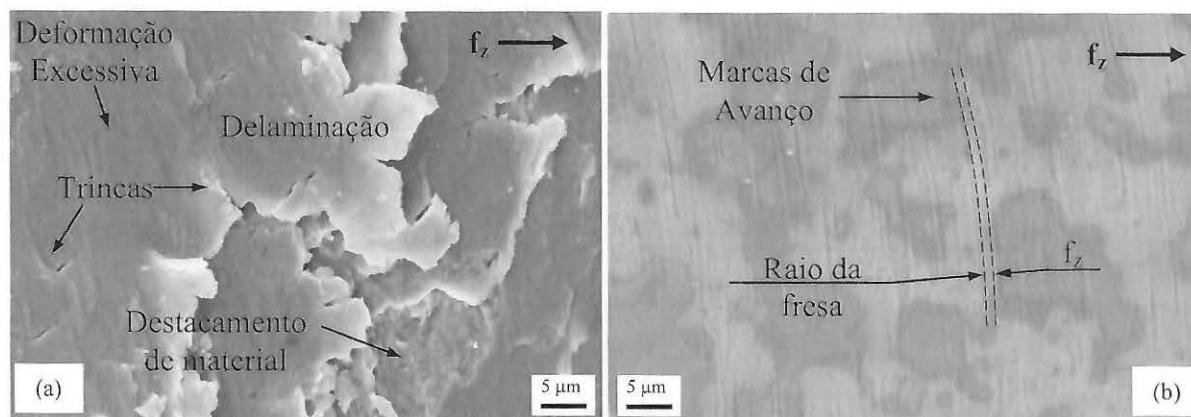


Figura 4. (a) Delaminação em $f_z = 0,1$ e $0,3 \mu\text{m}/\text{z}$ e (b) marcas de avanço em $f_z = 1,0 \mu\text{m}/\text{z}$.

A análise qualitativa realizada através das Fig. (3) e (4) foi quantificada através dos gráficos apresentados na Fig. (5). Verifica-se na Fig. (5)(a) que a diminuição do avanço por dente elevou a energia específica de corte, devido ao efeito de escala. A variabilidade percentual média das medidas é de 4,5%.

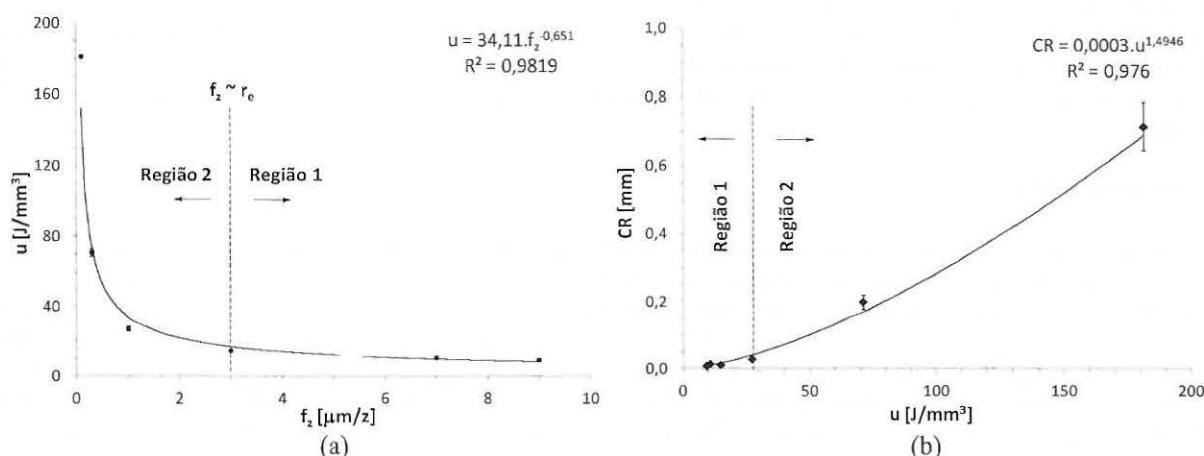


Figura 5. (a) Efeito de escala e (b) relação entre comprimento da rebarra (CR) e energia específica de corte no microfresamento para avanços por dente de 0,1; 0,3; 1,0; 3,0; 7,0 e 9,0 $\mu\text{m}/\text{z}$ e $a_p = 160 \mu\text{m}$.

A Figura (5)(a) permite analisar o comportamento do efeito de escala segundo duas regiões distintas da curva. A região 1 apresenta níveis de energia específica de corte em torno de 10 J/mm^3 , tendendo a diminuir para patamares equivalentes ao fresamento em macroescala. A região 2 mostra um crescimento assintótico e significativo da energia específica com a diminuição do avanço por dente, iniciando em aproximadamente 15 J/mm^3 e alcançando níveis encontrados em processos de retificação ($\sim 70 \text{ J/mm}^3$ e/ou superior). O limite divisor destas regiões demonstra ocorrer quando o avanço por dente da fresa se aproxima da dimensão do raio de aresta da ferramenta. Este comportamento da energia específica de corte foi associado ao processo de formação de rebarba, através da medida de seu comprimento (CR), projetado no plano dos microcanais, conforme ilustra a Fig. (5)(b). A variabilidade percentual média das medidas é de 12,7%.

É interessante notar que o tamanho da rebarba demonstra depender dos níveis de energia específica gerados no processo de usinagem, uma vez que os dados experimentais apresentaram boa correlação ao modelo matemático

proposto na forma de potência. Além disso, pode-se constatar que o processo de formação de rebarba também apresenta duas regiões distintas, onde a região 1 contém os menores comprimentos de rebarba ($< 0,05$ mm) associados aos menores níveis de energia específica e a região 2 com comprimentos de rebarbas superiores a 0,05 mm, a partir do qual o crescimento com a energia específica de corte é significativo.

Para avanços por dente muito pequenos, sobretudo aqueles menores que 1/3 do raio de aresta da ferramenta, tal como mostra a região 2 da Fig. (5)(a), a energia específica de corte é tão elevada ($> \sim 50$ J/mm³) que o mecanismo de formação de cavaco pode não ser mais composto majoritariamente por cisalhamento, mas sim por uma parcela significativa de deformação elástica, sem necessariamente causar remoção de material na forma de cavaco, a ponto de haver na superfície usinada uma recuperação elástica significativa e mensurável, como mostra a Fig. (6).

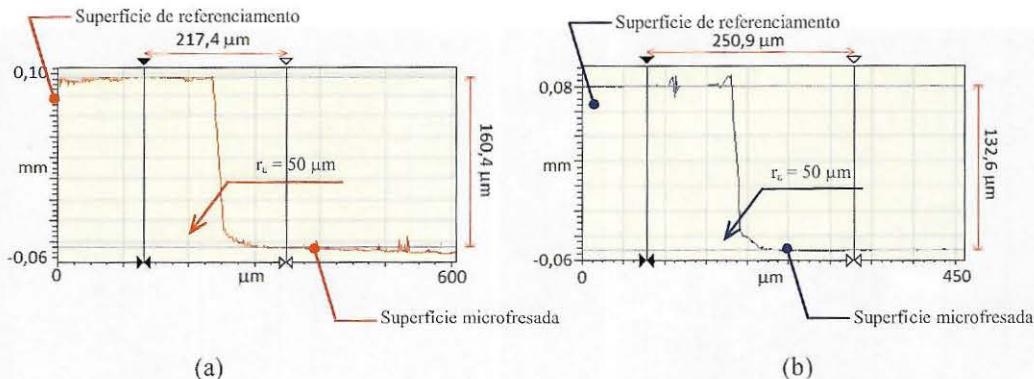


Figura 6. Profundidade microfresada do canal para (a) $f_z = 10 \mu\text{m}/\text{z}$ e (b) $f_z = 0,1 \mu\text{m}/\text{z}$.

As Figuras (6)(a) e (b) mostram a altura do microcanal fresado para avanços por dente de 10 e 0,1 $\mu\text{m}/\text{z}$, respectivamente, e mostram que houve uma recuperação elástica de 27,8 μm (ou 17,3%), já que a altura do microcanal para o menor avanço deveria ser igual à profundidade de usinagem de 160 μm , pois foi usinado na mesma peça. Esta diferença dimensional é, de fato, recuperação elástica, pois análises de MEV da superfície de folga secundária da fresa demonstraram não ter havido desgaste de flanco na ferramenta, a peça e as ferramentas não foram removidas dos sistemas de fixação entre a usinagem dos dois canais, e a microfresa foi referenciada precisamente em relação à fresa de referenciamento da superfície superior dos canais, tal como prova a Fig. (6)(a), onde o erro dimensional em relação à profundidade de usinagem teórica foi de apenas 0,4 μm . Esse pequeno erro dimensional apresentado pela Fig. (6)(a) mostra ainda que o corte não deve ter sido influenciado por uma possível flexão da ferramenta, o que também justificaria esses resultados.

4. CONCLUSÕES

O processo de geração de rebarba no microfresamento em cheio de canais depende significativamente do avanço por dente e demonstra ser crítico em usinagens com avanços por dente próximos da dimensão do raio de aresta da ferramenta ou, sobretudo, menores que este valor, podendo não atingir a espessura mínima de formação de cavaco e gerar deformações elastoplásticas excessivas em detrimento do cisalhamento do material da peça para formar o cavaco.

Esse comportamento é comprovado pelos resultados de energia específica de corte, os quais servem como um indicador do efeito de escala na usinagem. Quando a razão entre a energia requerida na formação de cavaco e o volume removido de material é grande, o processo de formação de cavaco não se dá majoritariamente por cisalhamento e a energia específica cresce exponencialmente devido ao ângulo de saída efetivo da ferramenta. Assim, o aumento da energia específica indica um processo de formação do cavaco através de deformações elastoplásticas (*plowing*), havendo maior geração e aumento do tamanho de rebarbas.

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) pela concessão de bolsas de estudo, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro, e 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, por disponibilizarem a infraestrutura para o desenvolvimento deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Alting, L., Kimura, F., Hansen, H.N., Bissaco, G., 2003, "Micro engineering", CIRP Annals, Vol. 52, No. 2, pp. 635-658.
- 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.
- Kim, C.J., Rhett Mayor, J., Ni, J., 2004, "A static model of chip formation in micro scale milling", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 126, No. 4, pp. 710-718.
- Liu, X., Devor, R.E., Kapoor, S.G., 2004, "The Mechanics of Machining at the Microscale: Assessment of the Current State of the Science", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 126, No. 4, pp. 666-678.
- 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.
- Vogler, M.P., Devor, R.E., Kapoor, S.G., 2004, "On the Modeling and Analysis of Machining Performance in Micro-End Milling", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 126, No. 4, pp. 685-705.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

BURR FORMATION AND SPECIFIC CUTTING ENERGY IN MICROMILLING

Fernando Brandão de Oliveira, fernandobrandao@usp.br¹

Alessandro Roger Rodrigues, roger@sc.usp.br¹

Suzana Regina da Silva Moreira, msc.suzana@gmail.com²

¹USP Campus São Carlos, Av. Trabalhador São-Carlense 400, CEP 13.566-590, São Carlos-SP

²UNIP Unidade Araçatuba, Av. Baguaçu 1939, CEP 16.018-555, Araçatuba-SP

Abstract: This paper quantified the effect of the feed per tooth on burr formation and specific cutting energy when micromilling the ABNT 1045 steel applied for microdies manufacturing. Dry micromilling tests were carried out in a CNC machining center by employing two flutes endmill (0.8 mm diameter) coated with Titanium Aluminum Nitride. Scanning electron microscopy images revealed that the largest burr lengths have been achieved in machinings with feeds per tooth smaller than the minimum uncut chip thickness for the respective material. Larger feeds per tooth favored the complete chip formation and resulted in lower burr lengths. The increase in specific cutting energy indicates a chip formation process through plowing, with higher generation and increase in the burrs' size for feeds per tooth smaller than 1 $\mu\text{m}/\text{z}$.

Keywords: micromilling, burr, specific cutting energy.