

USINABILIDADE DE DIFERENTES MATERIAIS DA PEÇA NO MICROFRESAMENTO

Alessandro Roger Rodrigues, roger@sc.usp.br¹

Luciana Wasnievski da Silva de Luca Ramos, swluciana@ipt.br²

¹Universidade de São Paulo (USP), Av. Trabalhador São-Carlense 400, CEP 13.566-590, São Carlos-SP.

²Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), Av. Prof. Almeida Prado 532, CEP 05.508-901, São Paulo-SP.

Resumo: A microusinagem por ação mecânica da ferramenta, como microfresamento, microtorneamento e microfuração, tem sido demandada cada vez mais, em função da miniaturização de peças para diversas aplicações, especialmente na área biotecnológica e óptica. Entretanto, a redução da escala de usinagem demanda a redução dimensional das ferramentas e maior precisão de movimento e repetibilidade das máquinas-ferramentas. Ocorre que a microestrutura do material da peça também influí decisivamente no desempenho da microusinagem, uma vez que o avanço da ferramenta é da mesma ordem de grandeza do raio de aresta da ferramenta e do tamanho de grão do material da peça. Este trabalho quantificou o efeito da relação entre a direção de corte e a microestrutura do material da peça na rugosidade da peça, formação de rebarba e formação de cavaco. Os ensaios de microfresamento foram conduzidos em um centro de usinagem CNC Kern, modelo Evo Twenty Five, sem aplicação de fluido lubrificante, empregando fresas de topo inteiriças de duas arestas com diâmetro 1,0 mm revestidas de Nitreto de Alumínio Titânio, fornecidas pela Seco Tools. Foram empregados três tipos de material da peça: aço ABNT 1045, aço Villares VP100 e alumínio com grãos ultrafinais RSA 6061-T6. A velocidade de corte (60 m/min), o avanço da ferramenta (3 mm/tooth), a largura de usinagem (1 mm) e a profundidade de usinagem (160 µm) foram mantidos constantes. Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e perfilometria óptica (PO) revelaram que o microfresamento pode ser um processo altamente anisotrópico, uma vez que a direção de corte perpendicular à direção da microestrutura minimizou a formação de rebarba. A rugosidade e a formação de cavaco dependem do tamanho de grão do material da peça e de suas propriedades mecânicas.

Palavras-chave: microfresamento, rebarba, rugosidade, cavaco.

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 óptica, eletrônica, médica, biotecnológica, comunicações, aeroespacial e automotiva. Esse processo de miniaturização surgiu com o intuito de produzir microcomponentes com dimensões variando na ordem de micrometros e com alta precisão dimensional, e que pudessem melhorar a qualidade de vida das pessoas e produzir crescimento econômico (Masuzawa, 2000; Liu, Devor, Kapoor, 2004; Chae, Park, Freihet, 2006; Aramcharoen, Mativenga, 2009; Oliveira et al., 2015).

A fabricação de microcomponentes requer métodos que tenham confiabilidade e repetibilidade, com ferramentas de boa precisão (Chae, Park, Freihet, 2006). A microusinagem mecânica, realizada através do corte, se tornou uma boa opção por utilizar ferramentas de corte miniaturizadas para promover a remoção do material. As taxas de remoção de material envolvidas nessas operações de corte são extremamente reduzidas se comparadas às condições de usinagem ditas convencionais.

Entretanto, com a diminuição da dimensão do material removido, questões sobre a geometria do raio de aresta da ferramenta, tamanho de grão e orientação cristalográfica do material, efeitos considerados pouco influentes na usinagem em macroescala, tornaram-se fatores de grande influência na precisão dimensional e integridade dos componentes usinados em microescala (Dornfeld, Min, Takeuchi, 2006). Assim, este trabalho objetivou quantificar o efeito da relação entre a direção de corte e a microestrutura do material da peça na rugosidade da peça, formação de rebarba e formação de cavaco no microfresamento do aço ABNT 1045, aço Villares VP100 e liga de alumínio com grãos ultrafinais RSA 6061-T6.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados em um centro de usinagem vertical CNC kern *Evo Twenty Five*, empregando-se microfresamento de topo sem aplicação de fluido lubrificante. A profundidade de usinagem (a_p), o avanço por dente (f_z) e a velocidade de corte (v_c), respectivamente, 0,160 mm, 3 µm/z e 60 m/min, foram mantidos constantes. A largura de usinagem (a_e) foi adotada como o valor do diâmetro da fresa utilizada no ensaio ($a_e = d_f = 1,0$ mm). A microestrutura do material da peça e a direção de corte (transversal/longitudinal) foram adotas como variáveis de entrada. Apesar de próximo do valor do raio de aresta da ferramenta, como será visto adiante, o avanço por dente da

fresa é suficiente para formar cavaco, sem danos à ferramenta e à peça, por ser cerca de 4 vezes superior à espessura mínima de corte ou de formação de cavaco (h_{min}).

A Figura (1) ilustra a montagem experimental no centro de usinagem e a geometria dos corpos de prova, indicando as direções de corte. A fresa percorreu trajetória linear e unidirecional. O corte no sentido positivo do eixo y corresponde ao sentido da laminação do material do corpo de prova (direção longitudinal) e o corte no sentido negativo do eixo x é transversal à direção de laminação. As direções de retirada dos corpos de prova do *blank* (matéria-prima) foram rigorosamente controladas durante a preparação dos corpos de prova, de modo a permitir determinar com exatidão as direções de corte da microfresa para a realização da microusinagem.

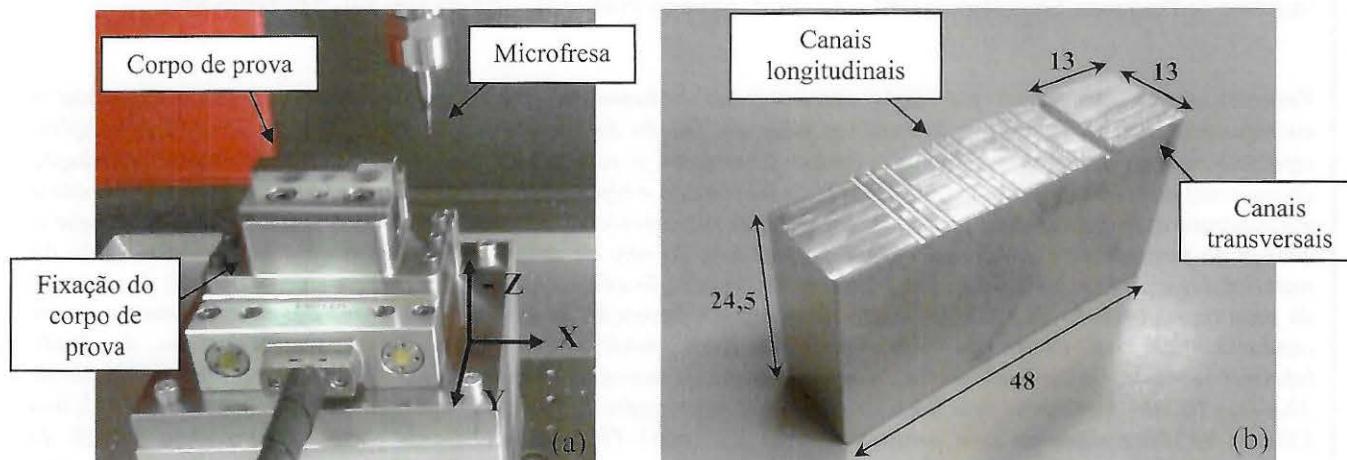


Figura 1. (a) Montagem experimental no centro de usinagem CNC para os ensaios de microfresamento e (b) dimensões dos corpos de prova (mm).

Foram consideradas a microestrutura de três materiais: aço ABNT 1045, aço Villares VP100 e liga de alumínio com grãos ultrafinos RSA 6061-T6.

A Figura (2a) apresenta a microestrutura do aço ABNT 1045 na condição “como recebido”. É possível observar que o aço possui ferrita e perlita nas cores clara e escura, respectivamente, com contornos de grão bem definidos, incluindo nas interfaces ferrita-ferrita. A morfologia dos grãos de ferrita e das colônias de perlita pode ser classificada como poligonal ou equiaxial, com pouca ocorrência de microconstituintes sensivelmente alongados e irregulares. A ferrita possui tamanho médio de grão de $12,54 \pm 0,4 \mu\text{m}$ e a perlita de $42,79 \pm 0,92 \mu\text{m}$.

O aço VP100, como é comercialmente conhecido, foi fornecido pela Villares Metals S/A e não possui similares normatizados. A Figura (2b) apresenta a microestrutura do material na condição “como recebido”. É possível observar que o aço possui bainita inferior, na forma de ferrita lenticular com placas finas de cementita.

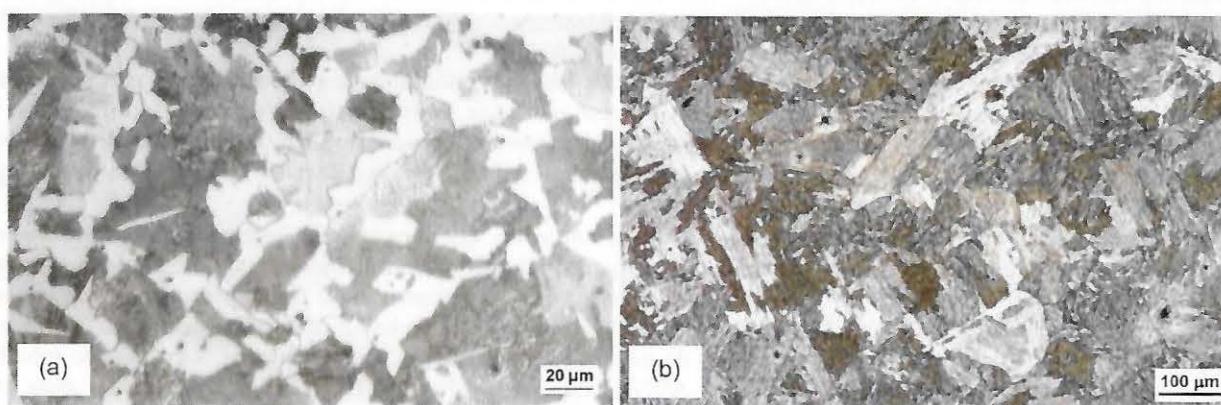


Figura 2. (a) Fotomicrografia do aço ABNT 1045 (Oliveira, 2012) e (b) do aço VP100 (Norcino, 2013).

A liga de alumínio RSA 6061-T6 possui tamanho médio de grão de $1 \mu\text{m}$, sendo caracterizada como um material de grãos ultrafinos, os quais foram gerados pelo processo de extrusão. A Figura (3) apresenta uma imagem da sua microestrutura obtida por perfilometria óptica (marca Veeco, modelo Wyko NT1100). Nota-se na imagem com escala de cores a topografia refinada dos grãos, com diferença de altura máxima de, aproximadamente, $1 \mu\text{m}$ (1073 nm). O perfil bidimensional desta microestrutura, mostrada na imagem ao lado, apresenta a medida linear de um grão ($1,305 \mu\text{m}$), cuja altura exposta pelo ataque químico não ultrapassou $0,2 \mu\text{m}$ (200 nm).

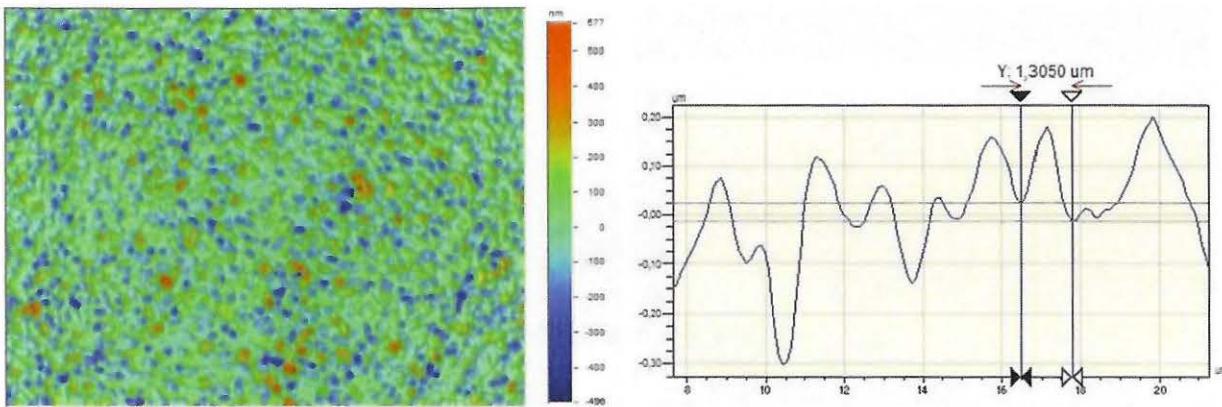


Figura 3. Perfilometria óptica da liga de alumínio com grãos ultrafinos RSA 6061-T6 para caracterização microestrutural do material da peça.

Como ferramenta de corte, utilizou-se fresas de topo inteiriças de metal duro com duas arestas (920ML010-MEGA-T), fornecidas pela Seco Tools Indústria e Comércio Ltda, revestidas de Nitreto de Alumínio Titânio (TiNAl), com diâmetro (d_f) de 1,0 mm, raio de ponta de 100 μm (catálogo do fabricante) e raio de aresta de $2,736 \pm 0,161 \mu\text{m}$ ($\pm 5,9\%$). O raio de aresta foi medido recorrendo-se ao microscópio confocal Olympus OLS 4000, através da geração de imagens tridimensionais das arestas principais de corte e interceptação de planos perpendiculares às arestas. Perfis bidimensionais dos raios de arestas foram gerados para cada plano, cujos raios foram determinados precisamente via software acoplado ao microscópio (Olympus OLS 4100 v.3.1.1). Visando quantificação da variabilidade de medição, foi adotado um total de 5 seções de medição por aresta de corte de todas as ferramentas. A Figura (4) ilustra o esquema de medição do raio de aresta das microfresas, mostrando, como exemplo, a interseção do quinto plano perpendicular.

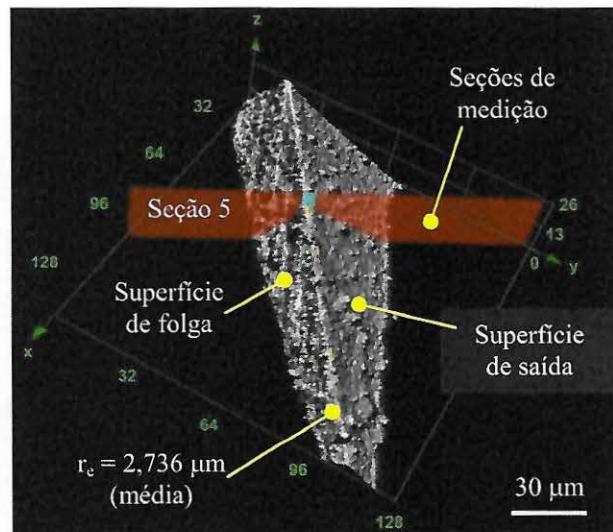


Figura 4. Forma de medição do raio de aresta das fresas através de microscopia confocal (Oliveira et al., 2015).

Visando a quantificação estatística dos resultados, foram consideradas três réplicas para cada avanço por dente e nível de significância $\alpha = 5\%$. Um total de 3 ferramentas foi empregado nos ensaios de usinagem. Cada fresa usinou um material da peça nas direções transversal e longitudinal, sendo o comprimento de corte de 26 mm para cada ferramenta. O desgaste das ferramentas foi monitorado via microscopia óptica a fim de não influir nos resultados. As análises do cavaco e da rebarba foram realizadas recorrendo-se ao microscópio eletrônico de varredura Zeiss, modelo LEO 440. A análise quantitativa da rugosidade foi realizada utilizando o perfilômetro óptico Veeco, modelo Wyko NT1100. Os parâmetros avaliados foram a rugosidade média 3D (Sa), Skewness (Ssk) e Kursosis (Sku), que consideram o relevo de toda a área registrada pelo perfilômetro, sendo aplicado na análise de superfícies usinadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras (5) a (7) apresentam imagens de MEV dos canais microfresados (vista superior) e os respectivos cavacos obtidos na usinagem do aço ABNT 1045, do aço VP100 e da liga de alumínio com grãos ultrafinos RSA 6061-T6, respectivamente.

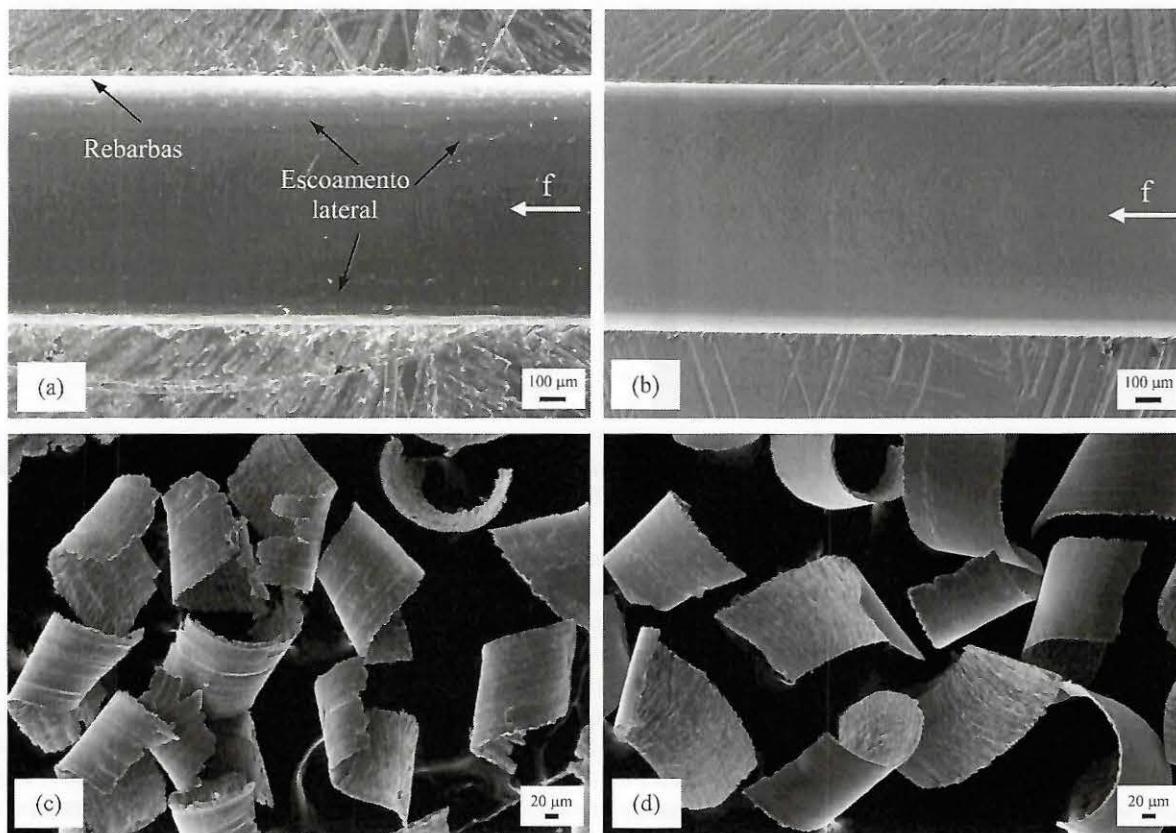


Figura 5. Imagens de MEV dos canais microfresados na direção (a) longitudinal, (b) transversal e os cavacos obtidos na usinagem dos canais (c) longitudinais e (d) transversais para o aço ABNT 1045.

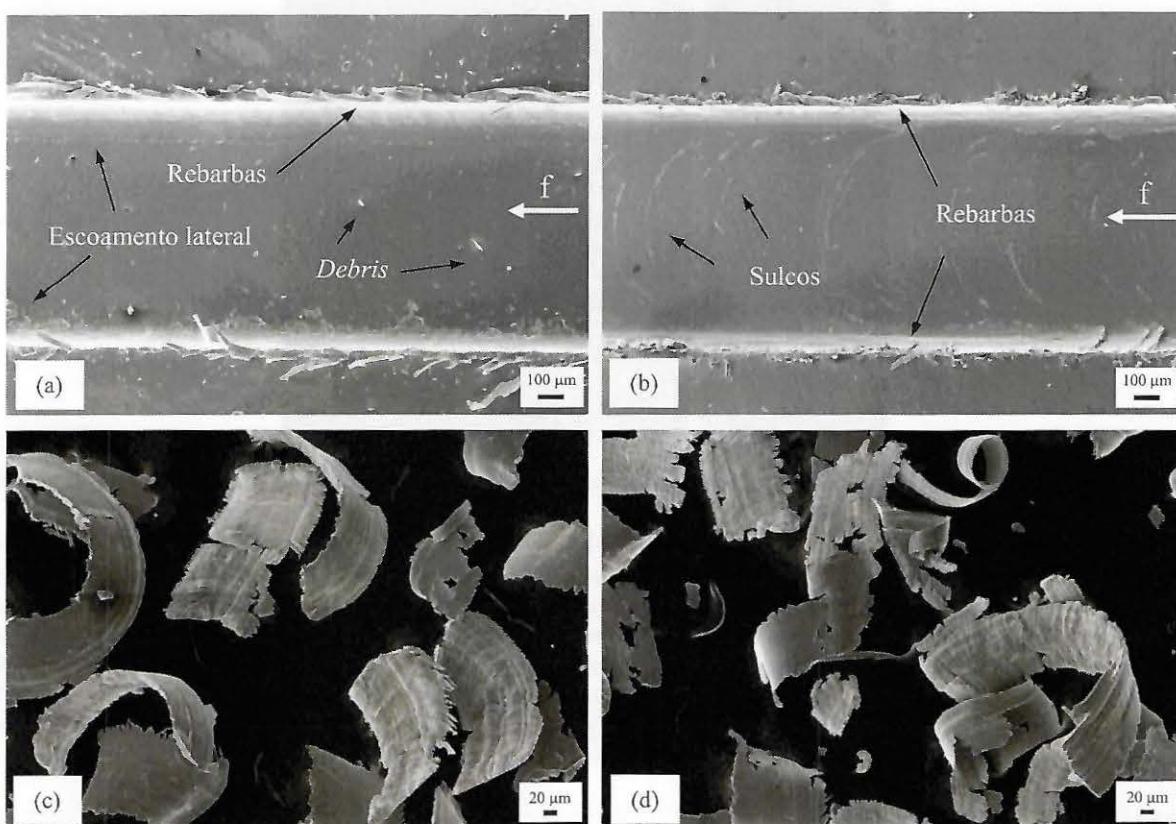


Figura 6. Imagens de MEV dos canais microfresados na direção (a) longitudinal, (b) transversal e os cavacos obtidos na usinagem dos canais (c) longitudinais e (d) transversais para o aço VP100.

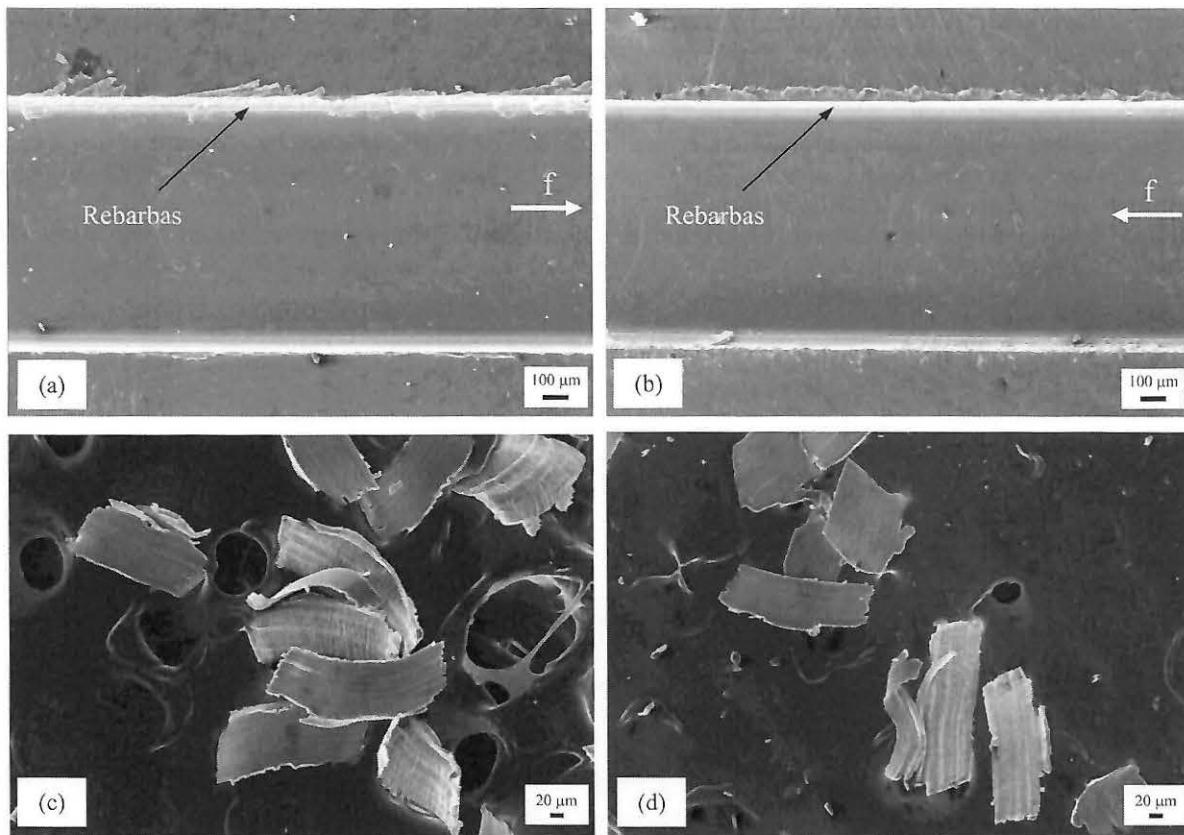


Figura 7. Imagens de MEV dos canais microfresados na direção (a) longitudinal, (b) transversal e os cavacos obtidos na usinagem dos canais (c) longitudinais e (d) transversais para a liga de alumínio com grãos ultrafinos RSA 6061-T6.

Pode-se verificar através das caracterizações dos canais microfresados via MEV que tanto o material da peça quanto a direção de corte indicam influenciar na usinabilidade das peças, particularmente no processo de formação de rebarba e na rugosidade do fundo do canal. Os cavacos demonstram não serem distintos quanto à direção de corte para cada material microfresado, porém dependem do material da peça.

O fresamento longitudinal (Fig. 5a) do aço ABNT 1045 gerou mais rebarbas ao longo do canal microusinado (em ambos os sentidos de corte concordante e discordante), quando comparadas ao sentido transversal (Fig. 5b), além da textura do fundo do canal apresentar nitidamente as marcas de avanço da fresa e indicações de escoamento lateral de cavaco em regiões próximas às paredes do canal.

O fresamento transversal (Fig. 6b) do aço VP100 também favoreceu a minimização de rebarba e a rugosidade do fundo do canal microfresado quando comparado ao fresamento longitudinal (Fig. 6a). Apesar de gerar sulcos periódicos na direção da força de corte, a superfície microfresada no sentido transversal não produziu escoamento lateral (região do corte concordante, especialmente), nem restos de material (*debris*) aderidos na superfície usinada, tal como é observado no fresamento longitudinal.

A Figura (7) mostra que a liga de alumínio com grãos ultrafinos RSA 6061-T6 parece ser insensível à direção de corte no microfresamento, pelo menos quanto ao efeito na topografia do fundo do canal microfresado. Entretanto, a formação de rebarba é ligeiramente menor na direção transversal, apesar da ocorrência em toda extensão do canal na região de corte concordante (Fig. 7b).

Ao comparar a usinabilidade entre os materiais da peça, nota-se que aço ABNT 1045 indica melhor acabamento do fundo do canal e menor formação de rebarba (em especial para o microfresamento transversal), certamente devido à melhor formação de cavaco. É possível constatar que os cavacos produzidos no microfresamento transversal (Fig. 5d) apresentam as frentes de cisalhamento na superfície livre do cavaco nitidamente definidas e a interfaces cavaco-ferramenta mostram-se lisas e isentas de deformações concentradas na direção de escoamento do cavaco sobre a superfície de saída da microfresa. Estas características foram sensivelmente diferentes para os cavacos gerados na direção longitudinal (Fig. 5c), onde são aparentes as deformações concentradas na interface cavaco-ferramenta.

Os cavacos produzidos na usinagem do aço VP100 (Fig. 6c e 6d) são claramente distintos dos cavacos do aço ABNT 1045, uma vez que apresentam formas e tamanhos irregulares recorrentes, além da variação da espessura e indícios de fragilidade em seu mecanismo de formação (trincas). Estes aspectos sinalizam não serem diferentes entre as direções de usinagem longitudinal e transversal. O mesmo comportamento dos cavacos ocorre no microfresamento da liga de alumínio RSA 6061-T6 (Fig. 7c e 7d), exceto pela caráter frágil do aço VP100.

Estes comportamentos distintos entre os materiais, que repercutem nas variáveis de usinabilidade (rebarba e rugosidade) estão também associados às propriedades mecânicas e microestruturais dos materiais das peças. O aço ABNT 1045 apresenta uma dureza intermediária (213 HV) entre os materiais microfresados (330 HV do aço VP100 e 117 HV do alumínio RSA 6061-T6), o que faz com que o limite de escoamento e o limite de resistência também sejam intermediários. Em outras palavras, a tendência à fragilidade do aço VP100 (devido à estrutura bainítica inferior da matriz e à presença de carbonitretos de titânio) e a plasticidade facilitada da liga de alumínio RSA 6061-T6 impactam ambos negativamente na microusinabilidade das peças.

O tamanho de grão dos materiais indica também influir no comportamento da microusinagem e este efeito pode ser analisado não apenas com base na formação de rebarbas (Fig. 5 a 7), mas também com base na rugosidade média (S_a) do fundo do canal, tal como mostra a Fig. (8).

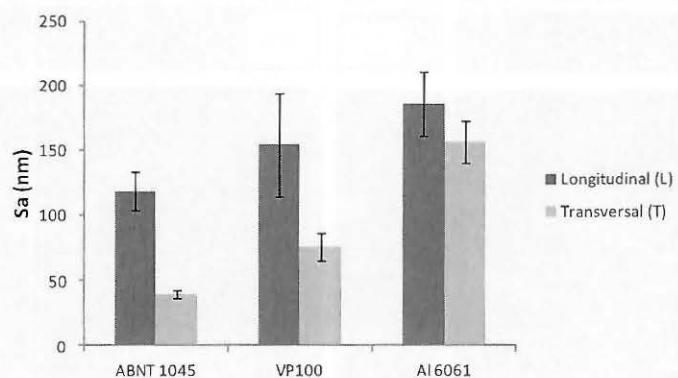


Figura 8. Comparação entre a rugosidade média aritmética 3D (S_a) considerando as diferentes direções de corte para todos os materiais.

Considerando-se a avaliação quantitativa das rugosidades médias 3D, verifica-se, de fato, que o acabamento obtido na direção transversal é melhor que aquele na direção longitudinal, exceção para a liga de alumínio RSA 6061-T6. Isso ocorreu devido ao fato de a aresta de corte da ferramenta cortar o material na direção perpendicular à direção de laminação das peças, particularmente dos aços ABNT 1045 e VP100, o que facilita o processo de cisalhamento na formação do cavaco. Este efeito, em tese, é demonstrado justamente pela exceção no gráfico, já que a liga de alumínio RSA 6061-T6 contém grãos ultrafinos (próximos de 1 μm) e o material não apresenta direções preferenciais ao corte (apesar de ter sido extrudado), pois pode ser assumido como tendo microestrutura homogênea e uniforme (monofásica), inclusive favorecendo a relação entre o avanço por aresta e o tamanho de grão. O avanço por aresta da microfresa três vezes maior que o tamanho de grão da liga de alumínio favorece a usinagem em qualquer direção, na medida em que a área da seção de corte da ferramenta cisalha vários grãos inteiros simultaneamente, onde efeitos que poderiam causar instabilidade no corte, como direções principais de deformação e contornos de grão, são minimizados. Para os aços, em especial, além dos tamanhos de grão serem substancialmente maiores que o avanço da ferramenta, há ainda a diferença de propriedades mecânicas entre as fases, já que a perlita, por exemplo, apresenta maior dureza que a ferrita, no caso do aço ABNT 1045.

O efeito da espessura mínima de corte (h_{\min}), que corresponde a cerca de 30% do raio de aresta da microfresa ($h_{\min} \approx 0,8 \mu\text{m}$), tal como declara Oliveira et al., (2015), não exerce influência nos resultados, uma vez que o avanço por aresta adotado é aproximadamente quatro vezes maior que a espessura mínima para formar cavaco. Assim, os cavacos têm sido formados devidamente sob o processo de cisalhamento, ao invés de esmagamento e extrusão (*plowing*), pois não experimentam substancialmente o efeito de escala (*size effect*), onde a pressão ou força específica de corte aumenta hiperproporcionalmente com a diminuição da espessura de corte.

Visando validar estatisticamente os resultados de rugosidade obtidos, apresenta-se na Tab. (1) a análise de variância (ANOVA) dos efeitos (material da peça e direção de corte) sobre a resposta (rugosidade média 3D).

Tabela 1. ANOVA do efeito do material da peça e da direção de corte na rugosidade média 3D ($R^2 = 88,71\%$).

Fator de Controle	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	Teste F	Valor P
Material	2	32750	17260	40,48	0,000
Direção	1	19582	20209	47,40	0,000
Material x Direção	2	1287	643	1,51	0,251
Erro	16	6822	426		
Total	21	60441			

Nota-se na ANOVA que ambos material da peça e direção de corte afetam significativamente o acabamento do fundo do canal microfresado, já que as probabilidades (Valor-P) são menores que o nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$). Este resultado pode ser verificado graficamente na Fig. (9a), uma vez que a rugosidade (Sa) varia significativamente em torno da média ($SA \geq 120 \mu m$), e confrontado com a Fig. (8), em que a liga de alumínio RSA 6061-T6 apresentou as maiores rugosidades, assim como a direção de corte longitudinal (L). A interação entre estes fatores de controle não demonstrou significância ($P = 0,251 > \alpha = 0,05$), ou seja, qualquer uma das variáveis de entrada não depende da outra para influir na resposta. Em termos gráficos, isso significa que a variação da rugosidade entre os materiais da peça não depende da direção de corte (Fig. 9b).

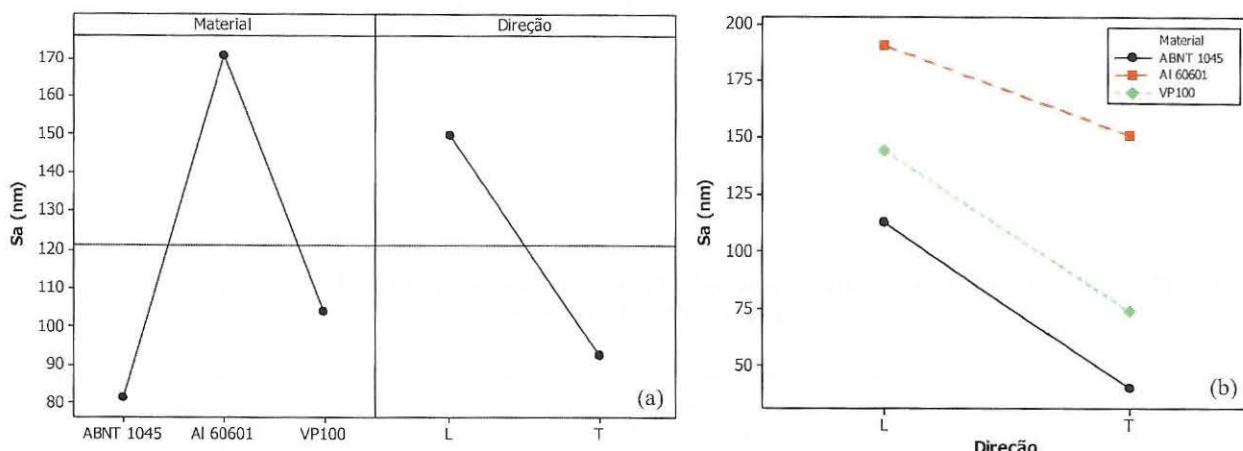


Figura 9. (a) Gráfico dos efeitos principais (material da peça e direção de corte) sobre a resposta (rugosidade média 3D) e (b) efeito da interação entre os fatores de controle (variáveis de entrada) na rugosidade média 3D.

Visando não somente avaliar a rugosidade média tridimensional da superfície microfresada, que também é útil em detectar variações na topografia decorrentes de processos de usinagem, apresenta-se na Tab. (2) o quadro ANOVA dos parâmetros de rugosidade *Skewness* (Ssk) e *Kurtosis* (Sku).

Tabela 2. ANOVA do efeito do material da peça e da direção de corte na rugosidade Ssk e Sku ($R^2 = 56,54\%$).

Fator de Controle	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Quadrado Médio	Teste F	Valor P
<i>Skewness</i> (Ssk)					
Material	2	6,0172	2,9295	9,61	0,001
Direção	1	0,0159	0,0279	0,09	0,766
Material × Direção	2	1,4993	0,7496	2,46	0,112
Erro	19	5,7890	0,3047		
Total	24	13,3214			
<i>Kurtosis</i> (Sku)					
Material	2	3,317	1,012	0,94	0,409
Direção	1	3,908	4,527	4,19	0,055
Material × Direção	2	5,332	2,666	2,47	0,111
Erro	19	20,504	1,079		
Total	24	33,060			

Observa-se na Tab. (2) que apenas o material da peça apresenta relevância estatística sobre o parâmetro de rugosidade Ssk, já que o valor da probabilidade P foi 0,1%, menor que o nível de significância de 5% adotado na análise estatística. A direção de corte não influiu em Ssk ($P = 0,766 > \alpha = 0,05$) e Sku não é sensível a nenhuma variável de entrada (valores-P $> \alpha = 0,05$), bem com as interações entre o material da peça e a direção de corte.

O parâmetro *Skewness* mede o grau de simetria das asperidades em relação ao plano médio paralelo à superfície nominal. De outra forma, há predominância de picos na superfície usinada se o valor de Ssk for positivo, e há prevalência de vales, se Ssk for negativo. A Figura (10a) mostra que o valor da rugosidade *Skewness* é negativo, independentemente do material da peça, que é um fator de relevância estatística no acabamento do fundo do canal. Isso significa que as superfícies geradas no microfresamento apresentam predominância de vales ou, equivalentemente, há concentração de material na superfície usinada (superfície tipo platô). Este tipo de topografia poderia ser útil, por exemplo, em aplicações microfluídicas, onde se necessita de escoamento livre. É importante frisar que na análise da

rugosidade *skewness* não importa sua magnitude. Portanto, do ponto de vista estatístico não se pode fazer distinção da topografia do fundo dos canais entre os materiais da peça.

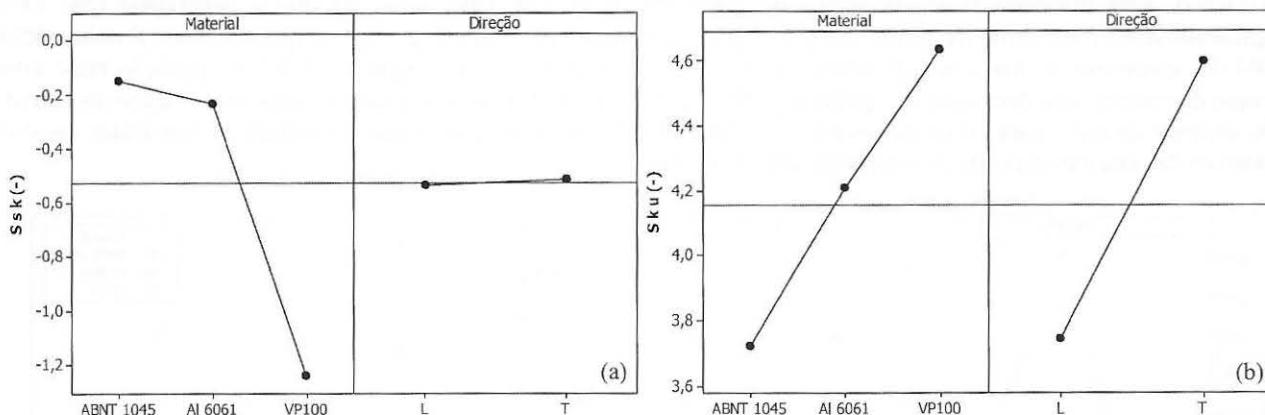


Figura 10. Gráfico dos efeitos principais (material da peça e direção de corte) sobre a (a) rugosidade *Skewness* (Ssk) e (b) *Kurtosis* (Sku).

O parâmetro de rugosidade *Kurtosis* não foi significativo no acabamento dos canais microfresados. Valores maiores que 3 indicam a presença de picos demasiadamente altos ou vales muito profundos, e valores menores que 3 indicam que a superfície não apresenta picos muito elevados ou vales excessivamente profundos. Apesar da não significância dos resultados, constata-se que a rugosidade Kurtosis é sempre maior que três, independentemente do material da peça e da direção de corte. Isso significa que o fundo dos canais microfresados contêm isoladamente picos ou vales destoantes do restante da topografia, apesar de a superfície ser, em geral, tipo platô, com concentração de material na própria superfície microfresada. Esta constatação quantitativa pode ser verificada na Fig. (11), onde uma superfície tipo platô foi gerada no microfresamento transversal do aço VP100, porém com a presença de pontos de vales profundos, no exemplo, de 1,6 μm de profundidade. Este resultado concorda com o apresentado na Fig. (6b), onde há um padrão de sulcamentos no fundo do canal.

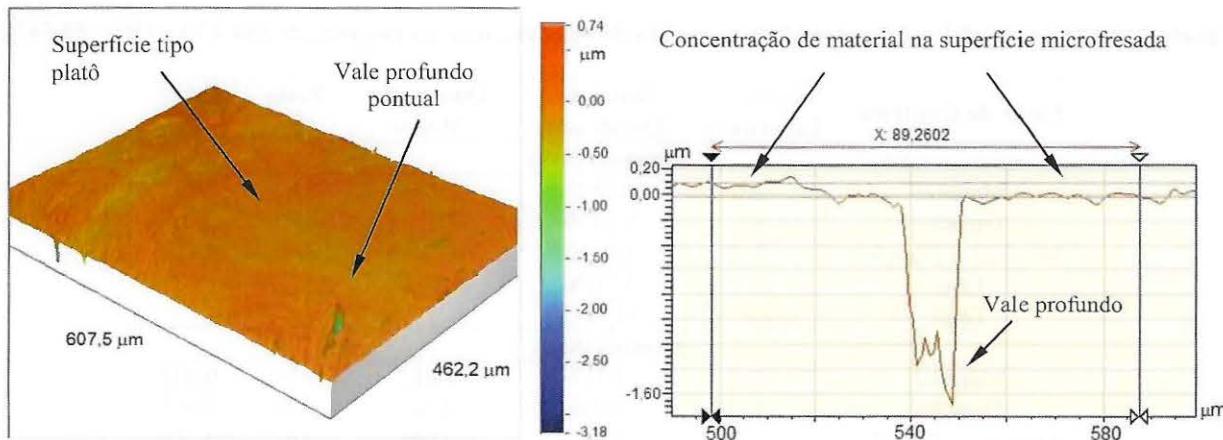


Figura 11. Perfilometria óptica 3D e 2D (perfil) da superfície microfresada do aço VP100 na direção transversal.

4. CONCLUSÕES

A microusinagem de peças metálicas por remoção de material da peça via ação mecânica da aresta de corte da ferramenta depende das propriedades mecânicas e microestruturais da peça e da orientação do corte. Como a formação do cavaco ocorre em escalas diminutas dos parâmetros de corte, o papel da microestrutura do material, como direções preferenciais de deformação, durezas distintas entre fases e contornos de grão influencia as variáveis de usinabilidade, de forma mais sensível do que a usinagem convencional (macroescala). Assim, materiais com tamanho de grão maior em relação aos parâmetros de corte tendem a tornar a usinagem altamente anisotrópica.

No microfresamento do aço VP100 e do alumínio RSA 6061-76, a maior dureza e maior ductilidade, respectivamente, produziram pior acabamento da peça, quando comparados com o do aço ABNT 1045. Isso ocorreu devido à propriedade de resistência ao cisalhamento intermediária deste material, que favoreceu a formação do cavaco e impactou beneficamente na rugosidade do fundo do canal microfresado, sobretudo na direção transversal de corte.

Entretanto, a direção de corte não fez diferença na geração da superfície para o alumínio, por causa de sua granulometria refinada funcionar como microestrutura uniforme, monofásica e isotrópica, mesmo tendo sido extrudados os tarugos da matéria-prima.

Com os parâmetros de corte empregados no microfresamento, foi possível determinar na usinagem um padrão de relevo contendo simetria das asperidades na superfície e ocorrências pontuais de vales profundos, especificamente para o aço VP100. Estes vales podem ser decorrentes de arrancamento de partes de carbonitretos de titânio presentes na matriz bainítica do material. Superfícies do fundo de canais geradas por este trabalho, em particular aquelas usinadas transversalmente no microfresamento do aço ABNT 1045, podem ser aplicadas como superfície de contato para escoamento de fluidos (interação fluido-estrutura), tipicamente empregada em dispositivos microfluidicos ou microtrocadores de calor.

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, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro, ao Laboratório de Micromanufatura, do Núcleo de BioNanoManufatura, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, e ao 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. Ao Dr. Álvaro José Abackerli, da Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII), ao Eng. Antônio Militão de Azevedo Lima (IPT) e ao mestrando Tiago Cacossi Picarelli da Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP) pelo apoio técnico à pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

- Aramcharoen, A., Mativenga, P.T., 2009, "Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel", *Precision Engineering*, Vol. 33, No. 4, pp. 402-407.
- 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*, Vol. 55, No. 2, pp. 745-768.
- 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*, Fairfield, Vol. 126, No. 4, pp. 666-678.
- Masuzawa, T., 2000, "State Of The Art of micromachining", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 49, No. 2, pp. 473-488.
- Norcino, A.B., 2013, "Uma contribuição ao estudo das tensões residuais no fresamento", *Dissertação (Mestrado)*, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brasil.
- 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.
- Oliveira, F.B. et al., 2015, "Size effect and minimum chip thickness in micromilling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 89, pp. 39-54.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

MACHINABILITY OF DIFFERENT PART MATERIALS IN MICROMILLING

Alessandro Roger Rodrigues, roger@sc.usp.br¹

Luciana Wasnievski da Silva de Lucas Ramos, swluciana@ipt.br²

¹University of São Paulo, 400 Trabalhador São-Carlense Av, São Carlos, SP 13.566-590, Brazil.

²Technological Research Institute, 532 Prof. Almeida Prado Av, São Paulo, SP 05.508-901, Brazil.

Abstract: Mechanical micromachining such as micromilling, microturning and microdrilling has been increasingly required mainly for biotechnological and optical applications. Meanwhile, as machining scale is reduced, tool dimensions, greater precision and repeatability of the machine-tool are demanded. Additionally, part microstructure also affects decisively on micromachining performance since tool feed reaches the same size of the tool edge radius and part material grains. This paper quantifies the influence of cutting direction and part microstructure on workpiece finishing, burr and chip formation when micromilling AISI 1045 steel, VP100 steel and ultrafine-grained aluminum RSA 6061-T6. The milling tests were carried out using the CNC machining centre Kern Evo25 without fluid application. Carbide endmill tools with TiNAL coating, 2 flutes and 1.0 mm diameter from Seco Tools were used. Cutting parameters of 3.0 mm/tooth tool feed, 160 μm depth of cut, 60 m/min cutting speed and 1.0 mm cutting width were fixed. The results indicate that the micromilling can be highly an anisotropic process since cutting direction transversal to microstructure minimized the burr formation. Roughness and chip formation depends on grain size of the part material and on their mechanical properties.

Keywords: micromilling, burr, roughness, chip.