

INTEGRIDADE SUPERFICIAL DO AÇO AISI 1045 MICROFRESADO

Alessandro Roger Rodrigues, roger@sc.usp.br¹

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

Fernando Brandão de Oliveira, fernandobrandao@usp.br¹

Wyser José Yamakami, wyser@dem.feis.unesp.br²

Hidekasu Matsumoto, hidekasu@dem.feis.unesp.br²

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

²Universidade Estadual Paulista (UNESP), Av. Brasil Centro, 56, CEP 15.385-000, Ilha Solteira, SP, Brasil.

Resumo: Este artigo determina a influência da escala de usinagem e dos parâmetros de corte na integridade superficial do aço AISI 1045 “como recebido”. Canais retos foram usinados a seco com fresas de topo de duas arestas, constituídas de carbeto de tungstênio e revestidas de TiNAl, sob velocidade de corte constante (60 m/min). Um experimento fatorial completo com duas réplicas foi adotado para aplicação da Análise de Variância. Avanços por dente de 5, 10 e 20 μm , profundidades de usinagem de 80, 160 e 320 μm , e fresas de topo de 0,8 e 2,0 mm de diâmetro foram combinados entre si para compor a matriz experimental. Os resultados revelam que a integridade superficial da peça foi mais afetada pela usinagem em microescala que pela macroescala, pois a microdureza, a camada encruada e a deformação da microestrutura foram 75%, 400% e 60%, respectivamente, maiores que do macrofresamento. Apenas a rugosidade da peça diminuiu 16%, mas danos significativos como microfissuras, cavidades e escoamento lateral foram observados. Como conclusão, a especificação adequada dos parâmetros de corte, especialmente em relação à magnitude do raio de aresta da microfresa, é crucial para a apropriada formação do cavaco e preservação ou melhoria da integridade superficial do produto.

Palavras-chave: microfresamento, integridade superficial, rugosidade, microdureza, deformação microestrutural

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 (Câmara et al, 2012).

Na microusinagem, 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 macrousinagem, tornam-se fatores de grande influência na precisão dimensional e integridade dos microcomponentes (Brinksmeier, Riemer e Twardy, 2010; Komatsu et al, 2012). Além disso, sob o prisma da ferramenta de corte, especialmente no microfresamento, a baixa velocidade de corte e rigidez da ferramenta dificultam a devida formação do cavaco (Kim, Bono e Ni, 2002; Robinson e Jackson, 2005).

Com a diminuição da escala de corte, a dimensão da espessura de corte pode ser comparada à do raio da aresta de corte da ferramenta. Assim, o corte pode ocorrer com um ângulo de saída altamente negativo e uma pequena variação na espessura de corte pode influenciar o processo de corte e a formação do cavaco (Sooraj e Mathew, 2011; Malekian et al, 2012). Essa relação entre a espessura de corte e o raio de aresta define o mecanismo ativo de remoção do cavaco, que deve ocorrer através do cisalhamento e corte do material. A interação entre espessura de corte e o raio de aresta na microusinagem pode promover apenas deformação do material, não havendo cisalhamento e formação do cavaco, o que influencia diretamente na integridade superficial da peça (Yun et al, 2011).

A integridade superficial de peças usinadas em geral influi no desempenho do produto em serviço (Field, Kahles e Koster, 1989). Na produção de microestruturas por microcorte (microusinagem mecânica), a integridade superficial é igualmente importante, uma vez que características como rugosidade, textura superficial, encruamento subsuperficial e erros de forma podem comprometer as funções dos microcomponentes (Tas et al, 1996). Produtos como microssistemas analíticos (dispositivos microfluidicos) para uso nas indústrias farmacêutica e química dependem muito da rugosidade para a apropriada interação fluido-estrutura (Vasquez et al, 2014). Micromoldes e microtrocares de calor dependem também do estado de tensões na superfície e dos erros de forma que influenciam a vida em fadiga.

Com base no exposto acima, este artigo busca contribuir com este tema e visa determinar a influência da escala de usinagem (micro ou macrocorte) e dos parâmetros de corte (avanço e profundidade de usinagem) na rugosidade qualitativa e quantitativa da peça, bem como na microdureza e na deformação da microestrutura subsuperficiais, na fabricação de canais por microfresamento de topo do aço AISI 1045.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de usinagem foram realizados em um centro de usinagem vertical CNC, marca HERMLE, modelo C800U, com rotação máxima de 24.000 rpm. As ferramentas adotadas foram microfresas inteiriças de metal duro com duas arestas e revestimento de TiNAl, fornecidas pela Seco Tools S/A, sendo de código 920ML008-MEGA-T para microfresamento ($\varnothing$ 0,8 mm) e 920ML020-MEGA-T para macrofresamento ($\varnothing$ 2,0 mm). Ambas ferramentas têm raio de aresta $r_e = 2,7 \mu\text{m}$, medidos por microscopia confocal.

Corpos de prova de aço AISI 1045 (93 HB ou 1890 HMV) com dimensões 13 x 24 x 48 mm foram divididos em quatro áreas menores separadas por três canais de 3 mm de largura por 4 mm de profundidade e para cada uma dessas áreas (saliências) foram usinados canais retos na direção do eixo y, atendendo à matriz experimental apresentada na Tab. (1). Metalografia quantitativa revelou que a ferrita possui tamanho de grão médio de $12 \mu\text{m}$ e a perlita de $43 \mu\text{m}$. A Figura 1 apresenta a montagem experimental e a geometria dos corpos de prova.

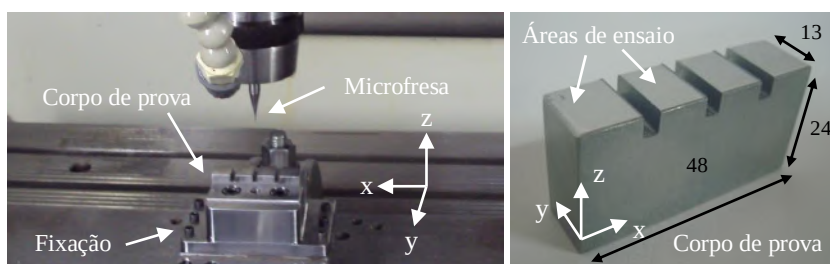


Figura 1. Montagem experimental para os ensaios de usinagem e geometria dos corpos de prova.

Os parâmetros de corte adotados como variáveis de entrada foram avanço por dente (f_z) e profundidade de usinagem (a_p), mantendo-se a velocidade constante a 60 m/min. Todos os ensaios foram realizados sem fluido lubrificante, na condição de corte em cheio, ou seja, com largura de usinagem (a_e) igual ao diâmetro da ferramenta (D_c). Assim, a Tabela (1) apresenta as variáveis de entrada (fatores de controle) e o número respectivo de variações (níveis). Análise de Variância (ANOVA) foi aplicada nos resultados de rugosidade, a fim de quantificar as significâncias das variáveis de entrada na de saída, adotando nível de significância $\alpha = 5\%$ e três réplicas. O Teste de Normalidade Ryan-Joiner atestou a Distribuição Normal dos resultados de rugosidade com Valor-P $> 10\%$ ($> \alpha$).

Tabela 1. Variáveis de entrada e os níveis adotados nos ensaios de micro/macrofresamento.

Parâmetros de Corte	Microfresamento ($D_c = 0,8 \text{ mm}$)				Macrofresamento ($D_c = 2,0 \text{ mm}$)			
	F5-P80	F10-P80	F5-P160	F10-P160	F10-P160	F20-P160	F10-P320	F20-P320
$f_z [\mu\text{m}/\text{z}]$	5	10	5	10	10	20	10	20
$a_p [\mu\text{m}]$	80		160		160		320	

As caracterizações da microestrutura e da microdureza subsuperficiais das amostras foram feitas recorrendo-se a um microscópio óptico da marca Carl Zeiss Jena, modelo Neophot 21, e a um ultramicrodurômetro da marca Shimadzu, modelo DUH-211. Pelo fato de que todas as amostras embutidas foram utilizadas tanto para análise da microestrutura quanto de microdureza, o procedimento de preparo das amostras foi realizado a quente com o emprego de baquelite. Após terem sido cortadas na seção transversal à superfície fresada e à direção de laminação, as amostras passaram por um processo de lixamento manual, alternando a posição de trabalho em 90° a cada troca de lixa, com a seguinte sequência de granulação: 120, 220, 320, 400, 600, 1000 e 1200. Para espelhamento, foi feito o polimento das amostras com alumina, com tamanho de partículas de $1 \mu\text{m}$ e, posteriormente, $0,3 \mu\text{m}$. Após a etapa de preparação, as amostras sofreram ataque químico, cujo processo baseou-se em sequências de ataque com Nital 2%.

Os perfis de microdureza foram determinados segundo a norma ISO 14577-1, utilizando a escala de dureza dinâmica Martens (HMV) com indentador Vickers, carga de 20 mN (2 gf). O método de ensaio de microdureza foi o de carregamento-descarregamento, no qual o ultramicrodurômetro aumenta a força de teste até o valor pré-determinado, em seguida a força de ensaio é mantida constante por um período de tempo estabelecido, finalizando com um processo de descarga. O ensaio foi automatizado, sendo preciso apenas o posicionamento manual da amostra e escolha das regiões para indentação. As medidas foram feitas somente nos grãos de ferrita.

Para levantar o perfil de microdureza ao longo da profundidade da superfície usinada, foram efetuadas 10 repetições de cada um dos 6 pontos de medição, espaçados de igual forma, sendo o primeiro ponto a $10 \mu\text{m}$ da superfície e os 5 pontos seguintes equidistantes $20 \mu\text{m}$ um do outro para refinar a discretização nesta região mais suscetível a uma interferência microestrutural. A profundidade total avaliada pela microdureza foi de $110 \mu\text{m}$.

A rugosidade qualitativa da superfície da peça fresada foi realizada recorrendo-se ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) Zeiss LEO 440 e a rugosidade quantitativa foi medida utilizando um perfilômetro ótico Veeco, modelo Wyko NT9100. O raio de aresta das fresas foi medido utilizando microscópio confocal Olympus OLS4000.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Microdureza

A Figura (2) ilustra o comportamento do perfil de microdureza com a escala de usinagem, considerando, todavia, a média entre as microdurezas das quatro condições de usinagem em suas respectivas escalas. A variabilidade percentual geral ficou entre 5,2 e 9,0%.

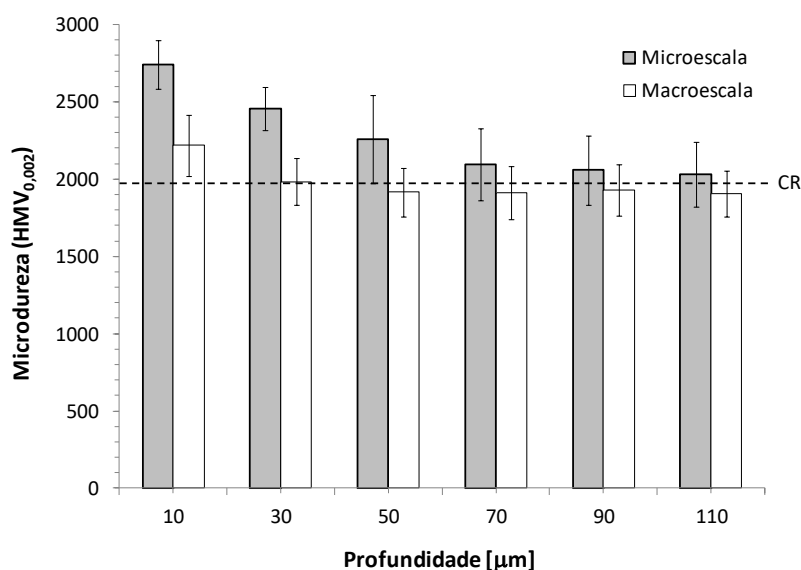


Figura 2. Perfil de microdureza na seção transversal à superfície usinada em micro e macroescala.

A Figura (2) mostra que o fresamento em microescala encruou uma camada de 50 μm de profundidade, pois a 70 μm o desvio estatístico alcançou o limite superior de microdureza do material na condição CR “como recebido” (linha tracejada). Este comportamento, para a usinagem em macroescala, já ocorreu para uma profundidade de apenas 30 μm. De outra forma, pode-se afirmar que a integridade superficial do aço AISI 1045, quanto à microdureza, é afetada apenas até 50 μm de profundidade a partir da superfície fresada nas condições de usinagem utilizadas.

Este comportamento ocorreu devido ao emprego dos parâmetros de corte reduzidos (especialmente avanço por dente), que dificultam a formação do cavaco diante do aumento proporcional da força de deformação (“plowing”) em relação à força de corte. Assim, nestas condições de avanços tendendo ao raio de aresta da ferramenta, a formação de cavaco é dificultada devido ao maior recalque da ferramenta sobre o material da peça.

Por fim, podem ser extraídos da Fig. (2) os crescimentos percentuais e os gradientes de microdureza no domínio da extensão encruada para cada escala de usinagem. Os crescimentos de microdureza foram de 21% e 12% para a micro e macroescala, respectivamente, ao passo que os gradientes alcançaram 12,1 e 11,7 HVM/μm. Esses dados mostram que as taxas de crescimento da microdureza subsuperficial para ambas as escalas de usinagem foram semelhantes (3,4% de diferença), mas o microfresamento imprimiu um aumento na microdureza 75% maior que o macrofresamento.

3.2 Deformação Microestrutural

A resposta microestrutural do material da peça diante do fresamento em micro e macroescala é sumarizada nas Figs. (3) e (4). As imagens obtidas por MEV revelam que a microestrutura abaixo da superfície fresada sofreu severas deformações e danos significativos que podem ser associados ao encruamento da peça e afetar diretamente a vida em fadiga da peça em aplicações cíclicas.

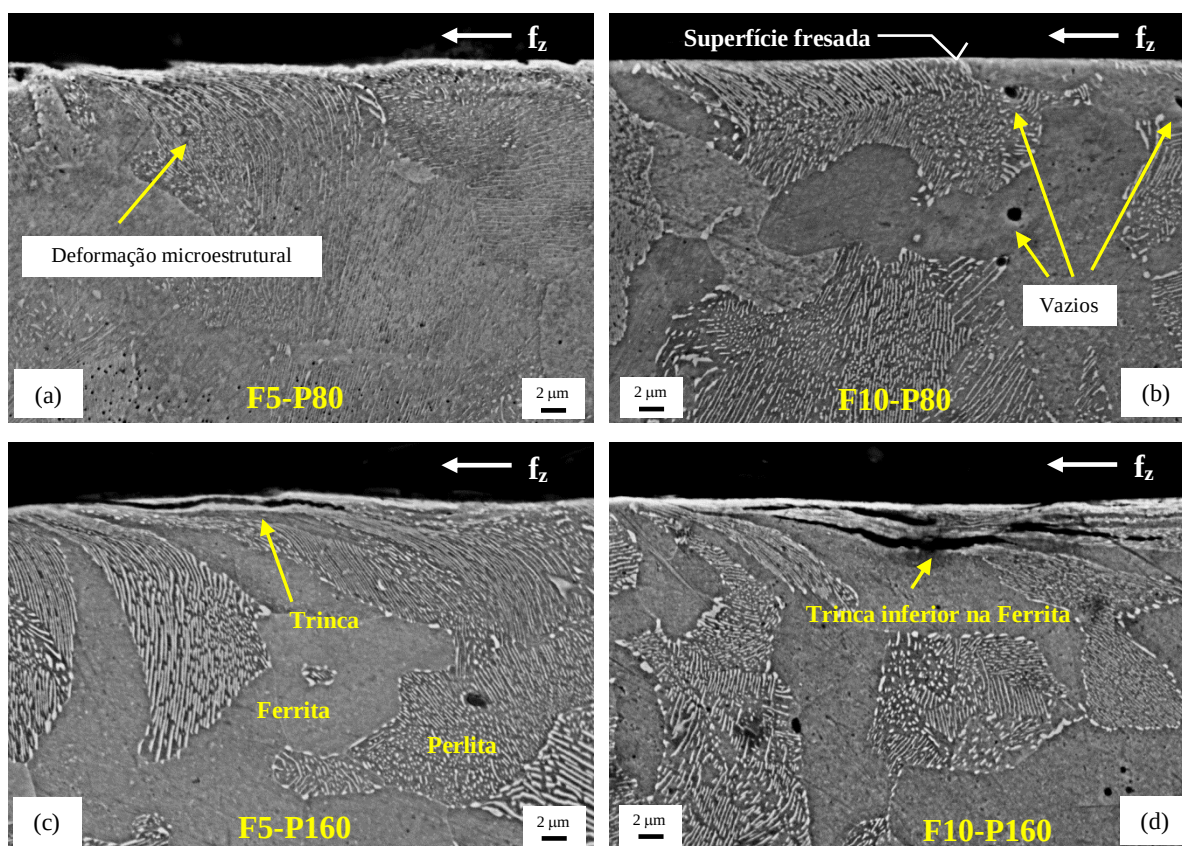


Figura 3. Deformações e danos microestruturais abaixo da superfície microfresada.

Apesar da ocorrência de vazios inerentes ao material “como recebido”, exemplificados na Fig. (3b) em dimensões maiores ($\sim \varnothing 1,3 \mu\text{m}$), e nas Figs. (4a) e (4b) em dimensões menores ($\sim \varnothing 0,4 \mu\text{m}$), além de conglomerados de vazios finos, nota-se a ocorrência de trincas superficiais e subsuperficiais, sobretudo na usinagem em microescala (Figs. 3c e 3d). Nestes casos mais extremos, as trincas chegam a apresentar abertura de até $1 \mu\text{m}$ por $19 \mu\text{m}$ de comprimento, com nucleação (na maioria dos casos) na superfície e propagação na subsuperfície, alcançando profundidades de até $3,7 \mu\text{m}$. Porém, houve casos de nucleação subsuperficial de trincas (abaixo até $2,2 \mu\text{m}$ da superfície fresada), como mostram as Figs. (4a) e (4d).

A propagação das trincas segue a orientação do fluxo de deformação microestrutural em direção ao interior do material, mesmo nos casos menos significativos (macrousinagem), onde as trincas são curtas (até $\sim 3,5 \mu\text{m}$), conforme ilustram as Figs. (4a) e (4b). Apesar de as ferritas localizadas na borda fresada não apresentarem claramente as linhas de deformação na direção do avanço da ferramenta, as trincas identificadas nas Figs. (3d) e (4b) indicam que as ferritas também sofreram cisalhamento na direção do fluxo de deformação decorrente da usinagem.

Todas as trincas identificadas e classificadas por MEV foram geradas pelo endurecimento por deformação plástica (encruamento) do material da peça na região próxima à superfície fresada, evidenciando que os maiores níveis de encruamento (Fig. 2) estão diretamente associados ao aparecimento e crescimento de trincas superficiais e subsuperficiais (Figs. 3 e 4).

Além da ocorrência de trincas na peça, geradas por condições e escalas específicas de usinagem, nota-se claramente que a microestrutura do material da peça apresentou também nítida deformação dos grãos na região próxima à superfície fresada, sendo muito mais evidenciada na perlita do que na ferrita, cujas linhas de deformação são praticamente imperceptíveis, como já citado anteriormente. É possível constatar, mais claramente na perlita, que a orientação antes aleatória dos veios de cementita para cada grão, curvaram-se e inclinaram-se em direção ao fluxo de deformação microestrutural causado pela passagem da fresa sobre a superfície da peça.

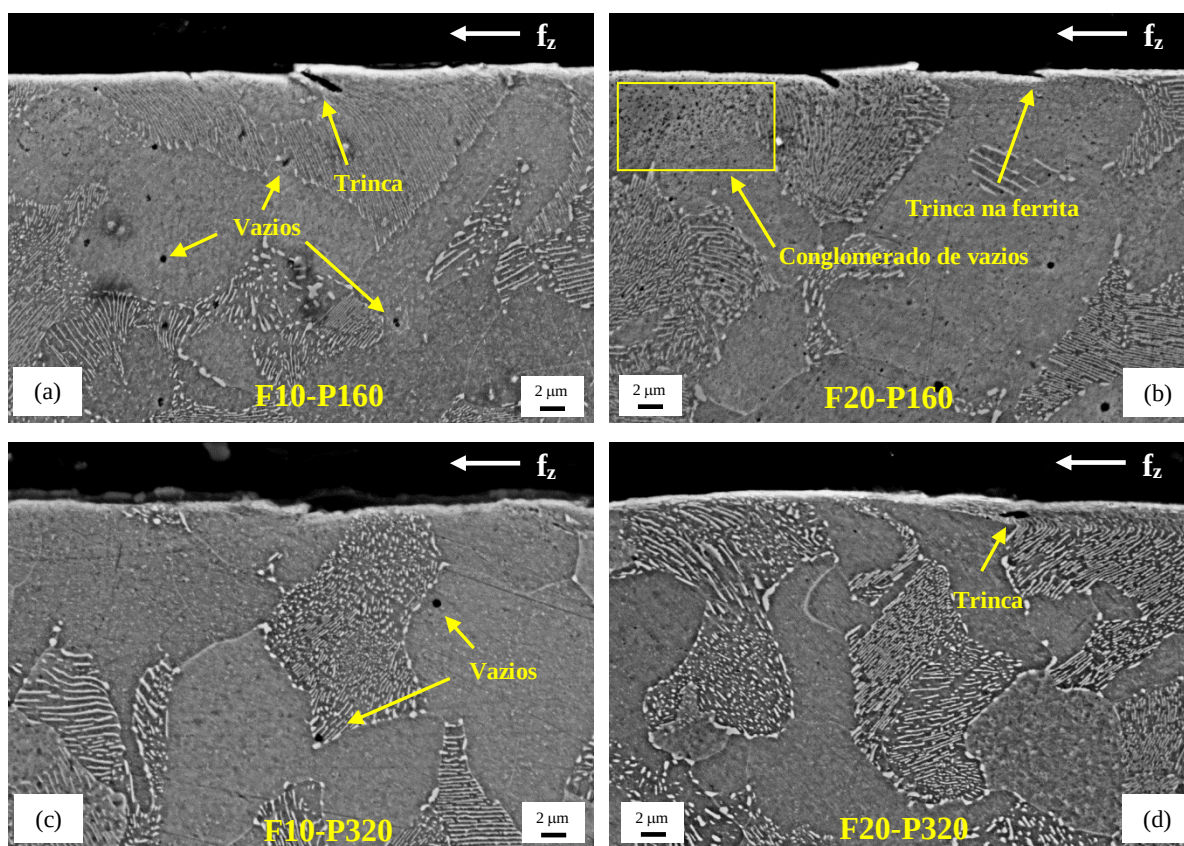


Figura 4. Deformações e danos microestruturais abaixo da superfície macrofresada.

3.3 Rugosidade Quantitativa e Qualitativa

O comportamento da rugosidade média aritmética 3D (S_a) em função das condições de fresamento e das escalas de corte é apresentado na Fig. (5). Este parâmetro de rugosidade, que se baseia na amplitude das microirregularidades, foi escolhido por considerar toda área de análise e não apenas o perfil 2D, uma vez que a topografia fresada apresentou orientação definida das marcas de avanço, porém aleatória (a priori) dos fluxos laterais do material, como será visto nas Figs. (7) e (8). A variabilidade percentual das medidas está compreendida entre 3,0 e 8,2%.

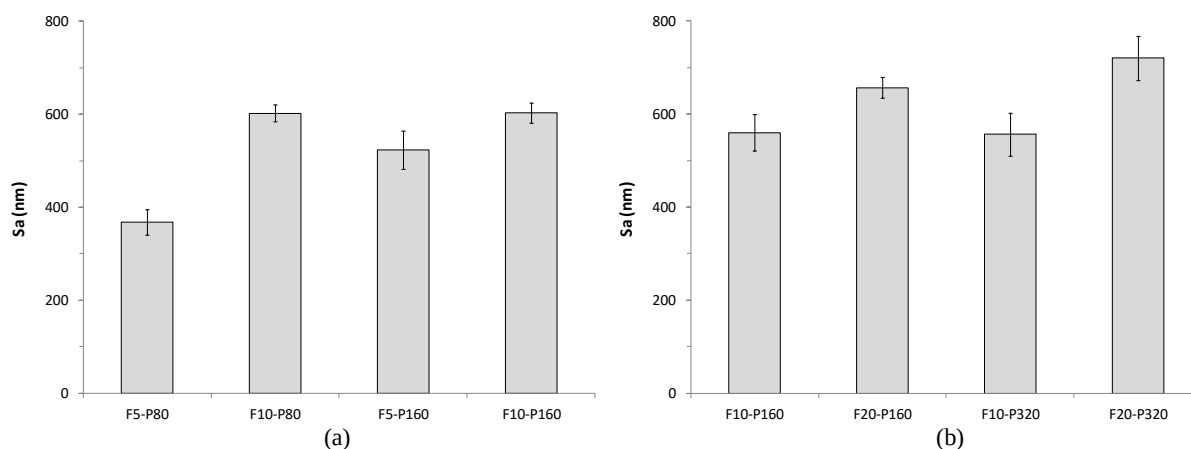


Figura 5. Comparação entre rugosidade média aritmética 3D (S_a) em (a) microescala e (b) macroescala considerando as condições de usinagem.

Observa-se que o aumento do avanço por dente em duas vezes na microusinagem elevou a rugosidade dos microcanais em 63,7 e 15,4%, respectivamente, para a menor e maior profundidade de usinagem, e de 17,3 e 29,4%, respectivamente, para a macroescala. A elevação em 100% da profundidade de usinagem, por sua vez, aumentou em 42% a rugosidade da peça apenas na condição de menor avanço no fresamento em microescala.

Estes resultados, sobretudo os provenientes do microfresamento, seguiram o comumente obtido no fresamento convencional, onde os maiores espaçamentos da passagem da ferramenta (marcas de avanço) geram maiores amplitudes dos picos e, conseqüentemente, maiores rugosidades. A profundidade de usinagem, apesar de ter elevado a rugosidade para o menor avanço por dente, pode ser considerada como resultado isolado, uma vez que a rugosidade é assumida ser insensível à variação da profundidade de usinagem (Cakir, Ensarioglu e Demirayak, 2009).

A escala de corte também mostrou-se influente na rugosidade da peça. Análise de Variância aplicada nos resultados de S_a medidos para ambas as escalas de usinagem resultaram no valor da Probabilidade-P de 0,002, significando que é possível afirmar com 95% de confiabilidade que a mudança de macro para microfresamento diminuiu a rugosidade da peça, uma vez também que o Coeficiente de Correlação de Pearson foi de 0,497 (correlação linear média e diretamente proporcional). A análise estatística separada para as escalas de usinagem é apresentada na Fig. (6).

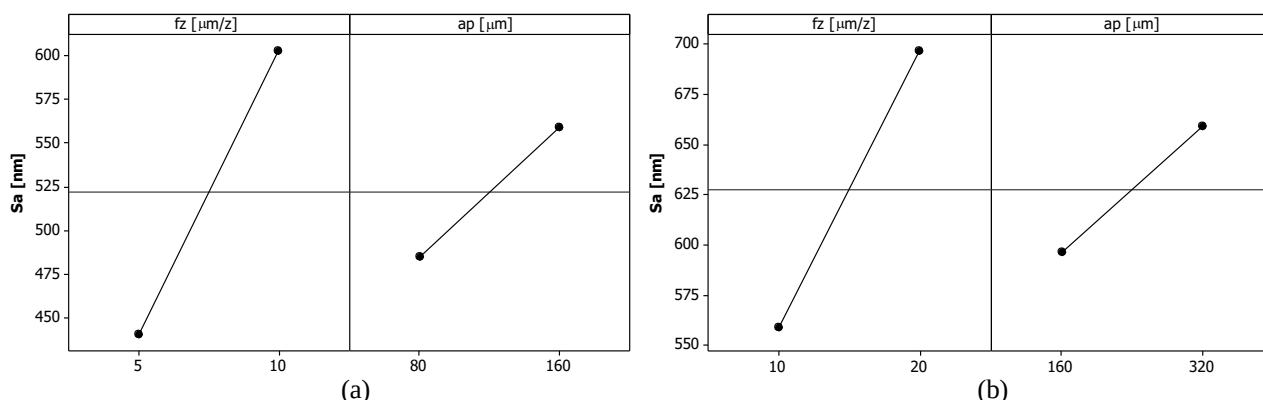


Figura 6. Influência dos fatores principais (avanço por dente e profundidade de usinagem) na resposta (rugosidade S_a) considerando (a) micro e (b) macrofresamento.

Em consonância com a Fig. (5), constatou-se que o avanço por dente foi o parâmetro de corte mais influente na rugosidade, já que causou maior variação de rugosidade em torno da média, para cada escala de corte adotada. Esta análise é qualitativa e também serve para a profundidade de usinagem, porém, neste caso, indicando que sua influência na rugosidade é menor, por gerar menor variação da rugosidade em torno da média. Nota-se que a rugosidade S_a é diretamente proporcional ao avanço por dente e profundidade de usinagem, resultados que podem ser quantificados também pelo Quadro ANOVA (Tab. 2).

Tabela 2. Quadro ANOVA do efeito dos parâmetros de usinagem (avanço por dente e profundidade de usinagem) na rugosidade S_a .

Fator	GL	Microescala					Macroescala				
		SQ	QM	F	P	CP	SQ	QM	F	P	CP
f_z	1	131090	131090	52,79	~0,000	0,808	75972	75972	33,71	~0,000	0,855
a_p	1	27377	27377	11,02	0,004	0,369	3330	3330	1,76	0,207	0,387
Erro	17	42218	42218				24579	24579			
Total	19	200686					103881				

GL: graus de liberdade; SQ: soma dos quadrados; QM: quadrado médio; F: teste F; P: probabilidade P; CP: correlação de Pearson.

É possível observar, de fato, que o avanço por dente é significativo na rugosidade da peça para ambas as escalas de corte, uma vez que a Probabilidade-P é praticamente nula e o Coeficiente de Correlação de Pearson (CP) é próximo da unidade (~0,8). Isto indica que a correlação linear entre o avanço por dente e a rugosidade é forte e diretamente proporcional. Porém, de acordo com as Figs. (5) e (6), a profundidade de usinagem possui uma correlação considerada média e diretamente proporcional à rugosidade, apesar de influir de forma significativa na rugosidade em microescala, mas não em macroescala. A Análise de Variância conjunta entre as escalas de macro e microfresamento resulta em um valor-P para a profundidade de usinagem de 0,152 (maior que o nível de significância $\alpha = 0,05$), o que ratifica o fato deste parâmetro poder ser considerado não influente na rugosidade da peça. Todas as análises estatísticas foram

validadas pelo Teste de Ryan-Joiner e constatou-se que não houve significância na Análise de Variância da interação entre os fatores de controle.

Além da avaliação quantitativa da rugosidade da peça através do parâmetro S_a , a Fig. (7) traz imagens de MEV e perfilometria ótica da superfície dos canais microfresados a fim de realizar uma análise qualitativa da topografia usinada.

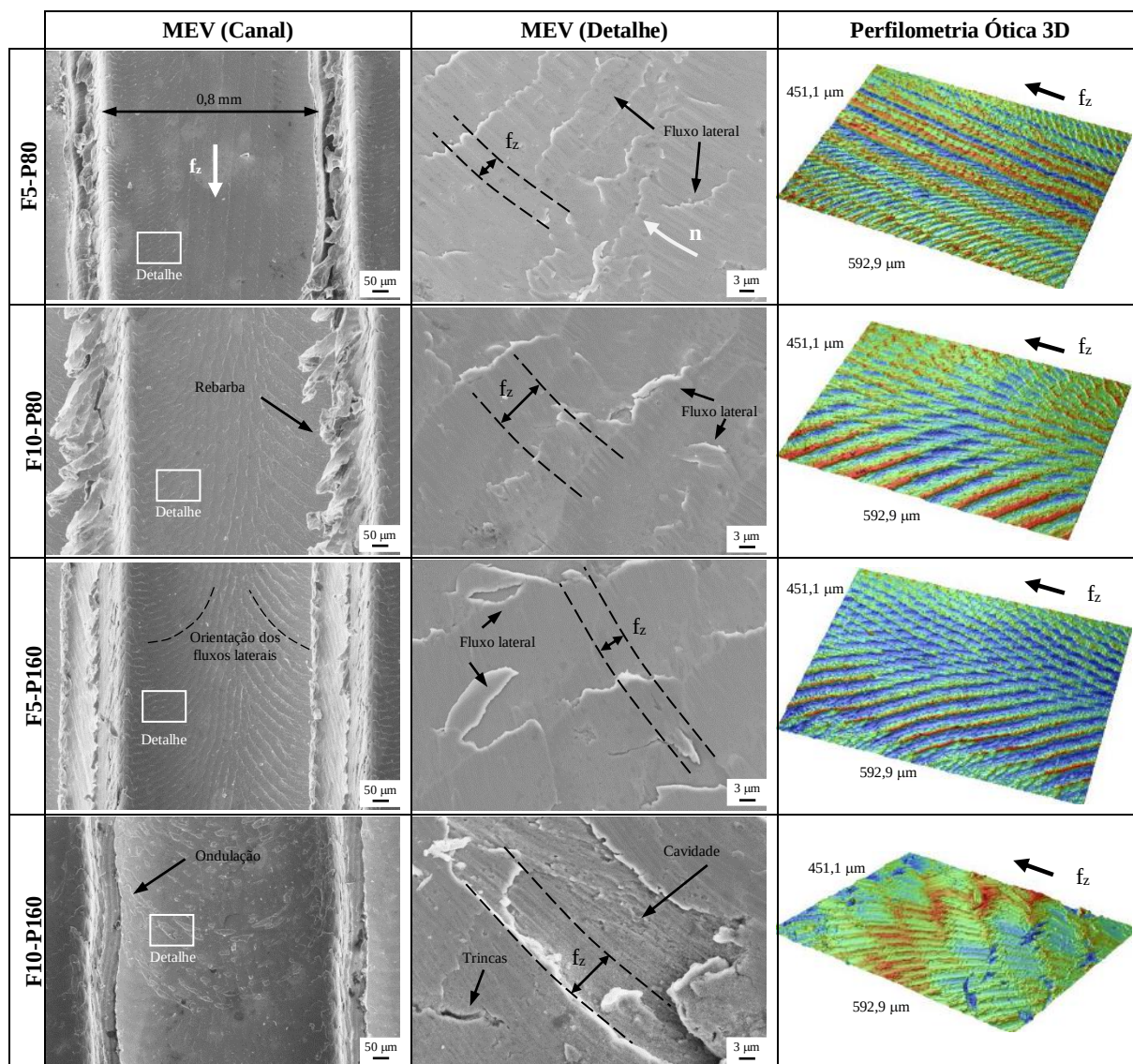


Figura 7. Avaliação qualitativa da rugosidade dos canais fresados em microescala.

Dentre os diversos aspectos observados na superfície microfresada, é possível constatar que as menores profundidades de usinagem (F5-P80 e F10-P80) geraram rebarbas mais proeminentes nas paredes laterais dos canais, tendo sido minimizadas com o aumento do a_p (F5-P160 e F10-P160). O aumento do avanço por dente da fresa demonstra também minimizar o tamanho e a ocorrência das rebarbas, sobretudo na condição de maior profundidade de usinagem.

Outro ponto destacável é o fato de o corte ter ocorrido de forma instável, ditado pela menor rigidez da fresa (diâmetro reduzido x comprimento em balanço), e condição de fresamento desfavorável (corte em cheio). Elementos que caracterizam esta instabilidade da microusinagem neste trabalho são as ondulações significativas nas paredes laterais dos canais (F10-P160), formação de rebarbas (como já mencionado), abertura de cavidades (“open grain”) e microfissuras (F10-P160), que são compatíveis com as Figs. (3d) e (4a) e, principalmente, a ocorrência de um padrão de escoamentos laterais em todas as quatro condições de usinagem adotadas, porém mais visíveis nas condições F10-P80 e F5-P160.

As ondulações das paredes laterais dos microcanais e o padrão de escoamentos laterais (este último mais bem visualizado nas imagens de perfilometria ótica 3D) são fortes indicativos de flexão e batimento radial/axial da fresa, respectivamente, que culminaram na vibração da ferramenta. Apesar desta topografia usinada desfavorável (oriunda de

um processo misto de cisalhamento e deformações plásticas com alta frequência de escoamentos laterais), as rugosidades quantitativas S_a foram reduzidas, alcançando no máximo ~ 600 nm.

Para finalizar a análise da rugosidade qualitativa, apresenta-se na Fig. (8) imagens de MEV e perfilometria ótica dos canais macrofresados.

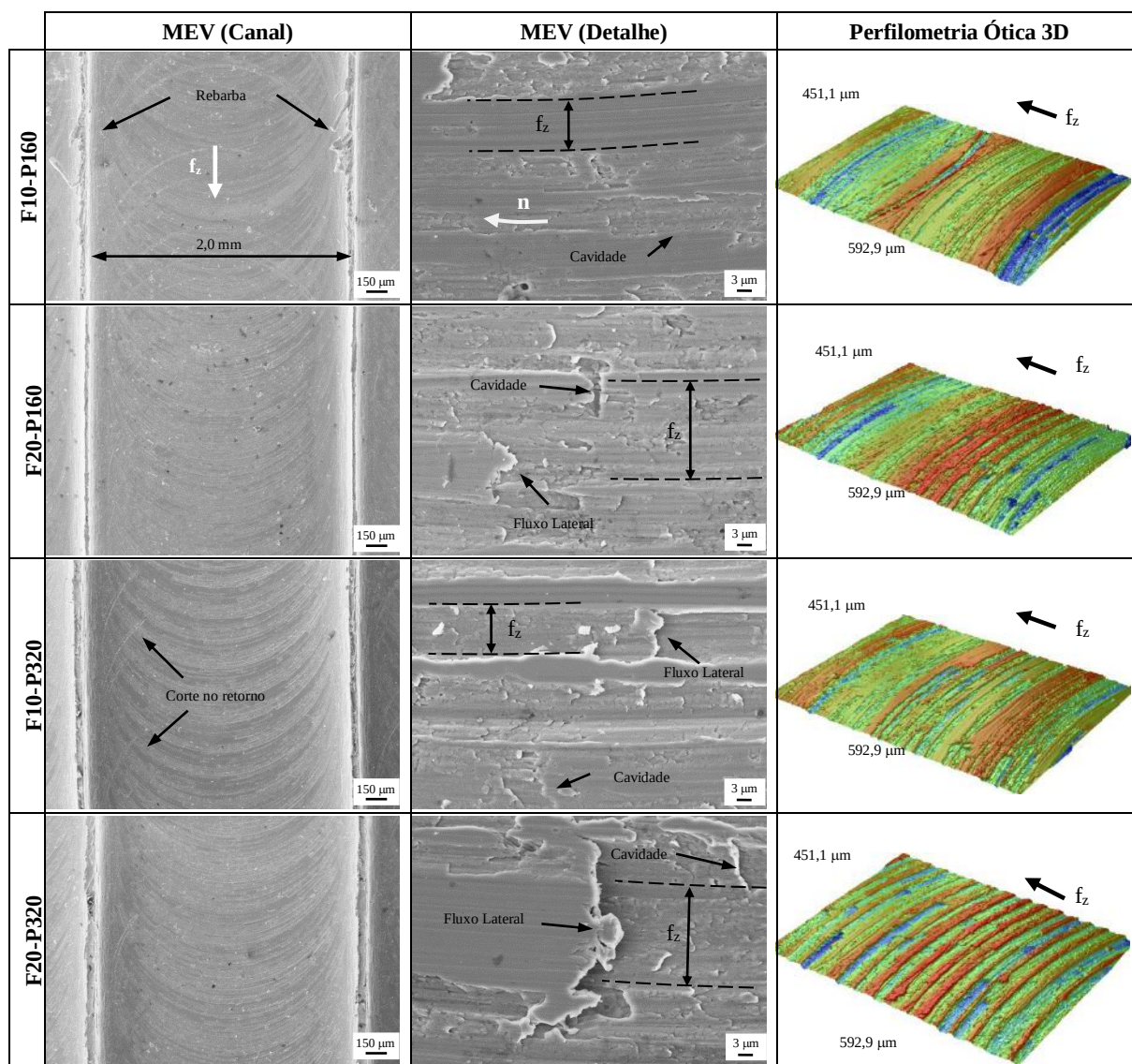


Figura 8. Avaliação qualitativa da rugosidade dos canais fresados em macroescala.

De forma análoga às condições de microfresamento, nota-se a formação de rebarbas de maiores dimensões ao empregar menores avanços por dente da fresa (F10-P160 e F10-P320), porém, ainda sim menores quando comparadas às do fresamento em microescala. Além disso, também nas demais condições de usinagem, constata-se que ocorreram pequenas remoções de material na superfície já fresada (corte no retorno), tal como mostram as condições F10-P160 e F10-P320, o que indica pequenos desbalanceamentos da fresa em posições isoladas e aleatórias no comprimento usinado dos microcanais, já que sua rigidez é maior se comparada à da fresa empregada no microfresamento. Por isso, inclusive, vibrações ou “chatter” não foram observados no fresamento em macroescala, tal como dominou o microfresamento.

O pequeno desbalanceamento da ferramenta também pode ser comprovado analisando-se as paredes laterais dos canais que, diferentemente do microfresamento, apresentam-se retas e uniformemente usinadas (fresamento tangencial estável). Outra maneira qualitativa de se avaliar o desbalanceamento da fresa (neste caso, batimento axial) é através da ocorrência aleatória de sulcos e saliências nas imagens de perfilometria ótica, cujas cores azul e vermelha, respectivamente, denotam vales mais profundos e picos mais elevados da textura superficial. Diferente do microfresamento, as marcas visualizadas nas imagens de MEV e de perfilometria ótica são, de fato, marcas de avanço da fresa.

As imagens de MEV ampliadas da superfície macrofresada, apresentadas na Fig. (8), mostram claramente a ocorrência de defeitos micrométricos em todas as condições de corte, como abertura de cavidades (“open grain”) e fluxo lateral de material (“side flow”). Estes defeitos foram recorrentes no macrofresamento, independentes da condição de corte adotada, e elevaram a rugosidade da superfície macrofresada em relação à da microfresada, tal como mostra a Fig. (5). Em consonância com a Fig. (4), a superfície macrofresada não apresenta trincas de pequenas aberturas e extensas, mesmo que superficiais, tais como foram observadas nas Figs. (3c), (3d) e (7).

4. CONCLUSÕES

Os processos de usinagem podem afetar a integridade superficial da peça, em um ou mais de seus indicadores, de maneira significativa ou não e independente da escala de usinagem ou magnitude dos parâmetros de corte.

A microdureza subsuperficial da peça, particularmente próxima à superfície usinada, é mais afetada pela usinagem em microescala, do que pela macroescala, pois o emprego de menores avanços por dente (mais influente) e profundidades de usinagem (menos influente) dificulta o processo de formação de cavaco e encrua a subsuperfície usinada.

A microestrutura da seção transversal da peça, na região próxima à superfície usinada, deforma-se em direção ao avanço da ferramenta e é mais afetada pela usinagem em microescala. Este resultado tem relação direta com a microdureza subsuperficial (quanto mais deformada, mais encruada).

Quantitativamente, a rugosidade da peça usinada em microescala é menor se comparada à da macroescala, mas a textura ou topografia superficial da peça pode sofrer danos localizados significativos, como escoamentos laterais excessivos causados por vibrações forçadas no sistema peça-ferramenta-máquina, abertura de cavidades (que podem ter relação com remoção e/ou fratura de grãos) e microfissuras sub e superficiais.

5. AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de recursos financeiros e bolsas de estudo, bem como 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 a infraestrutura para o desenvolvimento de parte deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- Brinksmeier, E., Riemer, O., Twardy, S., 2010, “Tribological Behavior of Micro Structured Surfaces for Micro Forming Tools”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 50, pp. 425-430.
- Cakir, M.C., Ensarioglu, C., Demirayak, I., 2009, “Mathematical Modeling of Surface Roughness for Evaluating the Effects of Cutting Parameters and Coating Material”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 102-109.
- Câmara, M.A., Rubio, J.C.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.
- Field, M., Kahles, J.F., Koster, W.P., 1989, “Surface Finish and Surface Integrity”, In: J.R. Davis (Ed.), *Metals Handbook ASM: Machining*, Vol. 16, pp. 19-36.
- Kim, C., Bono, M., Ni, J., 2002, “Experimental Analysis of Chip Formation in Micro-milling”, *Proceedings of the 30th North American Manufacturing Research Conference (SME)*, Vol. 1, West Lafayette, Indiana, USA.
- Komastu, 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.
- Malekian, M., Mostafa, M.G., Park, S.S., Jun, M.B.G., 2012, “Modeling of Minimum Uncut Chip Thickness in Micro Machining of Aluminum”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, pp. 553-559.
- Robinson, G.M., Jackson, M.J., 2005, “A Review of Micro and Nanomachining from a Materials Perspective”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 167, pp. 316-337.
- Sooraj, V.S., Mathew, J., 2011, “An Experimental Investigation on the Machining Characteristics Microscale End Milling”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 56, pp. 951-958.
- Tas, N., Sonnenberg, T., Jansen, H., Legtenberg, R., Elwenspoek, M., 1996, “Stiction in Surface Micromachining”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 6, pp. 385-97.
- Vázquez, E., Gomar, J., Ciurana, J., Rodríguez, C.A., 2014, “Evaluation of Machine-Tool Motion Accuracy Using a CNC Machining Center in Micro-Milling Processes”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 76, pp. 219-28.
- Yun, H.T. et al., 2011, “Ploughing Detection in Micromilling Processes Using the Cutting Force Signal”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 51, pp. 377-382.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

SURFACE INTEGRITY OF MICROMILLED AISI 1045 STEEL

Alessandro Roger Rodrigues, roger@sc.usp.br¹

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

Fernando Brandão de Oliveira, fernandobrandao@usp.br¹

Wyser José Yamakami, wyser@dem.feis.unesp.br²

Hidekasu Matsumoto, hidekasu@dem.feis.unesp.br²

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

²Universidade Estadual Paulista (UNESP), Av. Brasil Centro, 56, CEP 15.385-000, Ilha Solteira, S, Brasil.

Abstract: *This paper determines the influence of the cutting scale and cutting parameters on surface integrity of as-received AISI 1045 steel. Straight slots were dry milled with two flutes TiNAl coated WC-Co end mills at constant cutting speed (60 m/min). A full factorial design with two replications was run for ANOVA application. 5, 10 and 20 μm feeds per tooth, 80, 160 and 320 μm depths of cut, and 0.8 and 2.0 mm end mill diameters were combined with each other to compose the experimental matrix. Results reveal that part surface integrity from micro cutting is more affected than from macro cutting because micro hardness, work hardening layer and microstructure deformation were 75%, 400% and 60% higher than for macro cutting, respectively. Only part roughness decreased 16% but significant damages such as micro cracks, cavities and side flows were observed. In conclusion, proper specification of cutting parameters concerning mainly tool cutting edge radius is crucial to form chip adequately and to preserve or improve product surface integrity.*

Keywords: micro milling, surface integrity, roughness, micro hardness, microstructural deformation