

## RESISTÊNCIA MECÂNICA DE METAIS COM GRÃOS ULTRAFINOS AFETA A GEOMETRIA DE CANAIS MICROFRESADOS

ITALO R. M. TRINDADE<sup>1</sup>, JÉSSICA F. L. BRITO.<sup>2</sup>, CLEITON L. F. ASSIS<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Cursando Técnico em mecânica, Bolsista CNPq, IFSP Campus Votuporanga, italo.r.milani@hotmail.com

<sup>2</sup> Cursando Técnico em mecânica, Bolsista CNPq, IFSP Campus Votuporanga, jflb07@hotmail.com

<sup>3</sup> Doutor em Engenharia Mecânica, Docente, IFSP Campus Votuporanga, fazolocla@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): Processos de Fabricação – 3.05.05.05-4

Apresentado no  
7º Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica do IFSP  
29 de novembro a 02 de dezembro de 2016 - Matão-SP, Brasil

**RESUMO:** A microfabricação possibilitou o surgindo de novos processos e desenvolvimento de dispositivos miniaturizados com diversidade de funções. Este trabalho objetivou avaliar a influência da resistência mecânica de metais com grãos ultrafinos na formação de microcanais, mais especificamente a geometria da seção. Os materiais utilizados nos ensaios de microfresamento foram alumínio, aço baixo carbono e aço inoxidável. As microfresas utilizadas foram do tipo esféricas, com diâmetro de 800  $\mu\text{m}$ . As variáveis dos experimentos foram avanço por dente ( $f_z$ ) e profundidade de usinagem ( $a_p$ ), cujo efeito foi avaliado via análise de variância (ANOVA). Para avaliação da geometria da seção dos microcanais, foram consideradas as medições da área da seção, por intermédio de imagens tridimensionais dos microcanais, obtidas por microscopia laser confocal e software para análise de imagens. Deformações plásticas dos corpos de prova durante a usinagem, resultaram em menor área de seção, quando comparado ao valor teórico. O alumínio (menos resistente) possibilitou o microfresamento de canais com menos desvios geométricos da área de seção, seguido por aço baixo carbono e aço inoxidável (mais resistente). Com base nos resultados, quanto maior a resistência mecânica do material da peça, menor a área da seção dos microcanais, o que pode afetar a funcionalidade do microdispositivo.

**PALAVRAS-CHAVE:** microfresamento; microcanais; metais com grãos ultrafinos; resistência mecânica.

### MECHANICAL STRENGTH EFFECT AT THE GEOMETRIC DEVIATION OF MICROMILLED CHANNELS

**ABSTRACT:** The micromanufacturing enabled the coming of new processes and development in miniaturized devices with diversity functions. This work aimed to evaluate the influence mechanical strength of metals with ultrafine grains in microchannel machining, more specifically, the geometry of the section. The materials used in micromilling tests were aluminum, steel low carbon and stainless steel. The micromills used were the spherical type, with a diameter of 800  $\mu\text{m}$ . The variables of the experiments were feed per tooth ( $f_z$ ) and depth of cut ( $a_p$ ), whose effect was evaluated using by analysis of variance (ANOVA). To evaluate the geometry of the microchannels section, were considered the measurements of sectional area, per intermediate three-dimensional images of microchannels, obtained by confocal laser microscopy and software for image analysis. Plastic deformation of the test pieces during machining, resulting in smaller section area, when compared the theoretical value. Aluminium (softer) enabled the micromilling of channels with less geometric deviations of section area, followed by low carbon steel and stainless steel (harder). Results with bases

in, the higher the mechanical strength of the part material, smaller the area of the section of the microchannels, which may affect the functionality of the microdevice.

**KEYWORDS:** micromilling; microchannels; ultrafined grained metals; mechanical strength

## INTRODUÇÃO

Ainda não há uma definição exata para microusinagem, contudo há pesquisadores que associam o microcorte a espessura do cavaco que é removido durante a usinagem, como sendo menor que 999  $\mu\text{m}$ , e outros pesquisadores que definem microusinagem pelo emprego de ferramentas com diâmetro inferior a 1 mm, como no caso do microfresamento (SIMONEAU, NG e ELBESTAWI, 2006).

Nos últimos anos, os microcomponentes tiveram um grande salto em pesquisas e aplicações. Contudo, a fabricação desses dispositivos gerou dificuldades para a indústria, implicando num tratamento diferenciado, pois desafios como o efeito de escala tornaram-se objeto de estudo para criar ou aperfeiçoar técnicas para a produção de micropeças (BATALHA, CERVEIRA e SILVA, 2005).

O microfresamento tem obtido bons resultados entre os processos de microfabricação, pois possibilita fabricar peças em escala micro e macro, com ampla escolha de materiais e possibilita geometrias variadas e até mesmo complexas. O processo de microfresamento tem o mesmo princípio do fresamento convencional, só que as ferramentas possuem diâmetros muito pequenos e requer altas velocidades de rotação (LEE e DORNFELD, 2004).

Alguns fatores influenciam a qualidade dos produtos fabricados por microfresamento, como a escolha das microfresas com microgeometria de aresta de corte bem definida, e a escolha de materiais para a peça e seleção de parâmetros de usinagem adequados (FRIEDRICH e VASILE, 1995).

A formação do microcanal influencia a qualidade do produto final, pois a ocorrência de desvios geométricos afeta, por exemplo, a resistência a passagem de microfluidos. Sendo assim, este trabalho tem por objetivo avaliar o efeito da resistência mecânica do material da peça na formação destes microcanais. A análise de variância foi empregada na avaliação dos resultados.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram feitos em centro de microusinagem CNC. Profundidade de usinagem ( $a_p$ ) e avanço por dente ( $f_z$ ) foram os parâmetros de usinagem adotados como variáveis nos experimentos. A velocidade de corte ( $v_c$ ) foi constante em todos os ensaios e igual a 50 m/min. Não houve o uso de fluido de corte durante os ensaios.

As profundidades de usinagem adotadas foram 50 e 80  $\mu\text{m}$ , largura dos microcanais de 390 e 580  $\mu\text{m}$ . Os avanços por dente foram 0,56, 1,12, 2,24, 5,60 e 7,84  $\mu\text{m}/\text{z}$ . Microfresas de metal duro, esféricas, recobertas com TiN, com diâmetro de 750  $\mu\text{m}$ , raio de ponta de 0,4 mm e raio de aresta de  $2,24 \pm 0,5$   $\mu\text{m}$ , foram empregadas nos testes. O raio de aresta de corte foi medido com o uso de um microscópio laser confocal 3D OLS4000 da Olympus. Imagens tridimensionais dos microcanais também foram feitas com auxílio do mesmo equipamento, e as medidas de área da seção transversal dos microcanais foram feitas com software de análise de imagens.

Três metais com microestrutura homogênea de grãos ultrafinos foram utilizados como corpos de prova nos experimentos de microfresamento (Tabela 1). Nota-se que para todos os materiais o tamanho médio de grão são menores que 1  $\mu\text{m}$ , sendo o aço inoxidável o metal de maior resistência e o alumínio de menor resistência mecânica. O método da análise de variância (ANOVA) foi aplicada, visando verificar o efeito dos fatores de controle (avanço e profundidade de usinagem) na resposta (área da seção dos microcanais), considerando nível de significância  $\beta = 0,05$ .

TABELA 1. Materias dos corpos de prova utilizados nos experimentos de microfresamento.

Material	TG** [ $\mu\text{m}$ ]	Dureza [HV]
Alumínio	1,0	117
Aço baixo-carbono	0,7	216
Aço inoxidável	0,2	470

\*\* :tamanho médio de grão.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta imagens de microcanais microusinados com profundidade de usinagem ( $a_p$ ) de 80  $\mu\text{m}$  e avanço por dente ( $f_z$ ) de 2,24  $\mu\text{m}/\text{z}$ . Os demais microcanais, obtidos com outros arranjos de parâmetros de usinagem seguiram perfil semelhante. Cada imagem representa um microcanal usinado em um corpo de prova de material com microestrutura homogênea de grãos ultrafinos. Com base em um corte da seção transversal dos microcanais foi medida a área de seção, visando comparar com os valores teóricos de área de seção que deveria ser produzida pela microfresa após o corte.

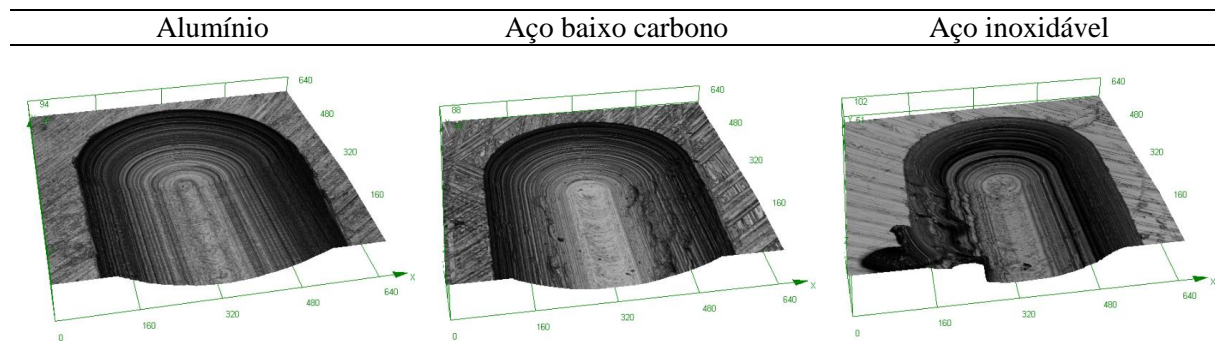


FIGURA 1. Canais microfresados com profundidades de usinagem ( $a_p$ ) de 80  $\mu\text{m}$  e avanço por dente ( $f_z$ ) de 2,24  $\mu\text{m}/\text{z}$ , em diferentes metais com grãos ultrafinos.

A Tabela 2 apresenta o quadro ANOVA para a área da seção dos microcanais. Considerando um nível de significância menor que 5% ( $P \leq \beta = 0,05$ ), a mudança do material da peça afetou o geometria do microcanal durante o microfresamento. Analisando os parâmetros de usinagem, o avanço por dente foi influente no resultado, assim como a profundidade de usinagem. Contudo, o aumento deste último fator de controle gera um aumento natural da área da seção. Por esta razão, apenas o material da peça e o avanço por dente serão considerados na discussão posterior.

TABELA 2. Quadro ANOVA para a área de seção dos microcanais.

Fator	GL	SQ	QM	F	P
Material	2	347275034	173637517	41,16	0,000
$f_z$	4	129165941	32291485	7,65	0,000
$a_p$	1	1871506551	1871506551	443,62	0,000
Erro	52	219372324	4218699		
Total	59	2567319851			

A Figura 2 apresenta o efeito isolado dos fatores de controle sobre a área da seção dos microcanais usinados por microfresamento. Com o efeito das variáveis atestado pela probabilidade P do quadro ANOVA da Tabela 2, é observado nos gráficos que o alumínio foi o material que mais apresentou área da seção próxima dos valores teóricos de área, ou seja, do perfil impresso pela ferramenta após o corte, sem considerar recuperação elástica e deformações plásticas devidas a não ocorrência de cisalhamento do material durante da usinagem. O aço inoxidável foi o material que apresentou as menores áreas de seção. Com relação aos parâmetros de usinagem, o aumento do avanço por dente favoreceu um perfil da seção do microcanal mais próximo ao teórico.

Conforme as análises indicam, apesar da homogeneidade da microestrutura do material da peça, obtida por meio do refinamento dos grãos, favorecer a usinagem em microescala, a resistência mecânica do material também é uma variável a ser considerada, particularmente quando há a necessidade de fabricação de microcanais para sistemas planares, sem desvios geométricos significativos que venham a comprometer a funcionalidade do dispositivo. Além disso, a escolha adequada dos parâmetros de usinagem, como o avanço por dente, também tendeu a favorecer a qualidade do produto final. Maiores avanços por dente favorecem o cisalhamento, pois afasta o mecanismo de corte de problemas relacionados ao efeito do raio de aresta de corte da ferramenta.

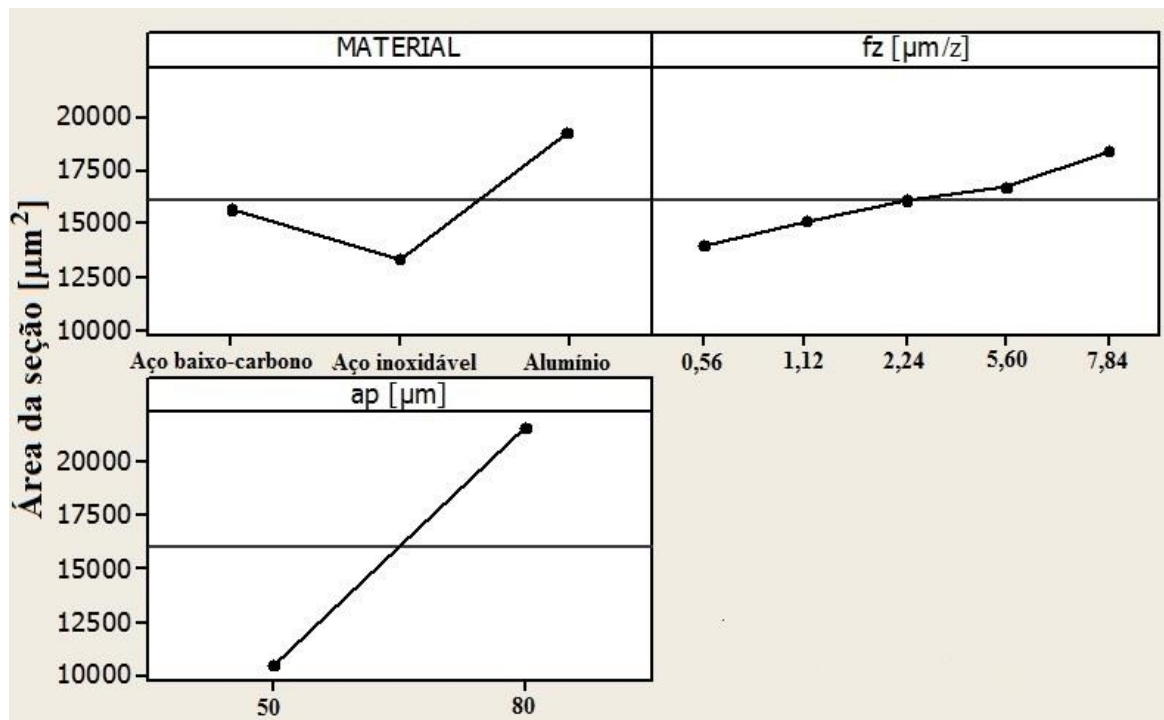


FIGURA 2. Efeito isolado dos fatores de controle sobre a área da seção dos microcanais.

## CONCLUSÕES

Este trabalho objetivou estudar o efeito do material da peça e parâmetros de usinagem no desvio geométrico da seção de microcanais produzidos por microfresamento. Materiais com grãos ultrafinos revelam maior homogeneidade da microestrutura para o microcorte, e por essa razão foram utilizados nos testes. Os resultados indicaram que quanto maior a resistência mecânica do material, menor é a área da seção do microcanal em relação a área teórica gerada pela microfresa. Dessa forma, o alumínio apresentou maior regularidade geométrica da seção dos microcanais e o aço inoxidável revelou maior desvio geométrico do perfil. O aumento do avanço por dente também favoreceu a redução dos desvios geométricos. Apesar do emprego de metais com grãos ultrafinos ser mais adequado para a redução do efeito de escala na microusinagem, a resistência mecânica do material também mostrou ser um fator a ser considerado para garantir a qualidade do microcomponente.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Processos Avançados e Sustentabilidade (LAPRAS), sediado na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) pelo uso do microscópio laser confocal 3D, ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) pelo uso da microfresadora e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento a pesquisa (Processo 468309/2014-4) e bolsa de iniciação científica (Processo 182353/2015-0).

## REFERÊNCIAS

- BATALHA, G. F.; CERVEIRA, R. L. L. P.; SILVA, F. R. D. A. Simulação de processos de microfabricação: influencia do efeito de escala. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação., Joinville, 2005.
- FRIEDRICH, C. R.; VASILE, M. J. The micromilling process for high aspect ratio macrostructures. *Microsystem Technologies*, v. 2, n. 1 p. 144-148, 1995.
- LEE, K.; DORNFELD, D. A Study of Surface Roughness in the Micro-End-Milling Process. *Laboratory for Manufacturing and Sustainability. Consortium on Deburring and Edge Finishing*. 2004.
- SIMONEAU, A.; NG E.; ELBESTAWI, M. A. Grain Size and Orientation Effects When Microcutting AISI 1045 Steel. *Annals do CIRP*, v. 56. 2007