

## ANÁLISE ESTATÍSTICA DA RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIES FORMADAS POR MICROFRESAMENTO

HELOISA M. RIBEIRO<sup>1</sup>, CLEITON L. F. DE ASSIS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Elétrica, Bolsista no PIBIFSP, IFSP, Câmpus Votuporanga, helomontilha@gmail.com.

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia Mecânica, Docente, IFSP, Câmpus Votuporanga, fazolocla@ifsp.edu.br  
Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.03.03.07-9 Usinagem

Apresentado no  
10º Congresso de Iniciação Científica e Tecnologia do IFSP  
27 e 28 de novembro de 2019- Sorocaba-SP, Brasil

### RESUMO:

Nas últimas décadas, estudos têm sido realizados visando o controle de geometrias e superfícies produzidas por microusinagem. A fabricação de microcomponentes requer métodos de fabricação que apresentem confiabilidade e repetibilidade, com ferramentas de boa precisão. No microfresamento, o contato da ferramenta de corte com o material da peça produz microgeometrias reconhecidas como rugosidade, cujo controle é importante no escoamento de micro ou nanofluidos. Este trabalho quantifica estatisticamente e discute a influência de estratégias de usinagem no acabamento de superfícies produzidas por microfresamento. O material utilizado nos testes foi um aço-carbono 0,15%C. As estratégias de usinagem aplicadas foram *Offset*, *Helicoidal* e *Raster*. Velocidade de corte ( $v_c$ ) e avanço por dente ( $f_z$ ) também foram considerados fatores de controle nos experimentos. O efeito das variáveis nos parâmetros de rugosidade  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_p$ ,  $R_v$  e  $R_{sm}$  foram avaliados com uso da Análise de Variância (ANOVA) e o Teste de Tukey. Os resultados indicaram que a formação de superfícies por microfresamento é mais sensível aos efeitos das estratégias de usinagem e avanço por dente. A significância estatística foi confirmada pelo Teste de Tukey. A análise de dados de rugosidade por meio de ferramentas estatísticas robustas revelou informações importantes sobre a formação de superfícies em peças microusinadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Microusinagem; Acabamento; ANOVA; Teste de Tukey.

### STATISTICAL ANALYSIS FOR MICRO MILLING RUGOSITY SURFACE

### ABSTRACT:

In the last decades, studies have been conducted aiming at the control of geometries and surfaces produced by micromachining. Microcomponent manufacturing requires reliable and repeatable manufacturing methods with good precision tools. In micromilling, the contact of the cutting tool with the workpiece material produces microgeometries recognized as roughness, whose control is important in the flow of micro or nanofluids. This paper quantifies and discusses the influence of machining strategies on surface finishing produced by micromilling. The material used in the tests was 0.15% C carbon steel. The applied machining strategies were *Offset*, *Helical* and *Raster*. Cutting speed ( $v_c$ ) and feed per tooth ( $f_z$ ) were also considered control factors in the experiments. The effect of the variables on the roughness parameters  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_p$ ,  $R_v$  and  $R_{sm}$  were evaluated using analysis of variance (ANOVA). The results indicated that surface formation by micromilling is more sensitive to the effects of machining strategies and feed per tooth. Statistical significance was confirmed by the Tukey test. Analysis of roughness data using robust statistical tools revealed important information on surface formation in micromachined parts.

**KEYWORDS:** Micromachining; Finishing; ANOVA; Tukey Test.

## INTRODUÇÃO

A vantagem mais atraente do microfresamento é a possibilidade de fabricar microestruturas 3D compostas por vários materiais, caracterizadas por elevada razão de aspecto e complexidade geométrica (Rodrigues *et al.*, 2012). Segundo Câmara *et al.* (2012), o microfresamento é uma solução para a fabricação de diversos tipos de componentes (podendo apresentar geometrias tridimensionais) para diversos tipos de materiais, como ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos. As estratégias usadas para selecionar o caminho da ferramenta no fresamento podem influenciar o tempo de usinagem, e mais importante que isso, forças de corte e rugosidade também são influenciadas (Romero *et al.* 2013). Assim, a questão é o quanto o percurso da ferramenta de corte afeta a superfície usinada, especificamente a rugosidade, durante o processo de microfresamento, onde o tamanho das peças é reduzido.

Os estudos incluem diferentes escalas de usinagem (macro e micro), utilizando materiais de microestrutura homogênea, visando reduzir defeitos na superfície usinada e controlar a rugosidade (Rodrigues *et al.*, 2012; Assis *et al.*, 2014). Nesse sentido, o uso de ferramentas estatísticas robustas pode contribuir para a compreensão dos fenômenos físicos inerentes ao microcorte e que afetam a qualidade da peça produzida, favorecendo assim o controle do processo de fabricação.

Este trabalho propõe o uso da Análise de Variância (ANOVA) e do Teste de Tukey na análise do efeito dos fatores de controle estratégia de usinagem, velocidade de corte e avanço por dente nos parâmetros de rugosidade  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_p$ ,  $R_v$  e  $R_{sm}$ , para formação de superfícies por microfresamento.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos de microfresamento foram realizados em um centro de usinagem CNC Kern D-82418, com rotação máxima de 50000 rpm. As superfícies foram usinadas com microfresas de topo reto e diâmetro de 800  $\mu\text{m}$ , com 30° de ângulo de hélice. Cada experimento foi realizado duas vezes.

Nos ensaios foram utilizados os seguintes parâmetros de usinagem: avanço por dente ( $f_z$ ) de 2 e 8  $\mu\text{m}/\text{z}$ , e velocidade de corte ( $v_c$ ) de 40 e 100 m/min. As estratégias de usinagem aplicadas foram *Offset*, *Helicoidal* e *Raster*. Os parâmetros de rugosidade adotados neste estudo foram  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_p$ ,  $R_v$  e  $R_{sm}$ . O material de teste foi um aço baixo-carbono 0,15%C, submetido a processo termomecânico para refinamento de grão e uniformidade da microestrutura, apresentando granulometria média de 0,7  $\mu\text{m}$ .

As imagens das superfícies usinadas e respectivas medições de rugosidade foram feitas com auxílio de um perfilômetro laser 3D confocal LEXT OLS4100 da Olympus. A Análise de Variância (ANOVA) e o Teste de Tukey foram utilizados para verificar o efeito dos parâmetros de corte e estratégias de usinagem nos parâmetros de rugosidade.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta imagens representativas, obtidas por perfilometria laser 3D, de superfícies produzidas por microfresamento. Cada superfície possui um aspecto correspondente ao tipo de estratégia de usinagem adotada. A análise das imagens revelou que a estratégia helicoidal tendeu a formar superfícies com defeitos do tipo cratera, correspondentes aos pontos escuros na Figura 1a, enquanto as estratégias *offset* e *raster* formaram superfícies sem defeitos aparentes (Figura 1b e Figura 1c).

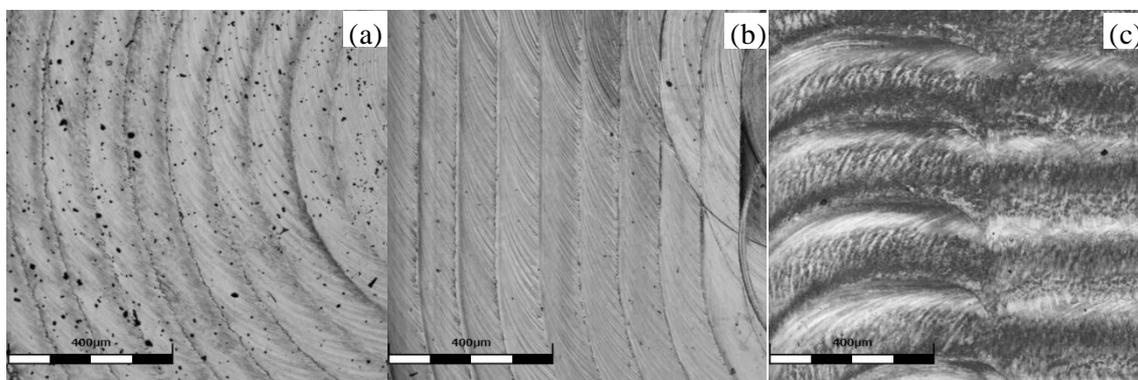


FIGURA 1. Imagens de perfilometria laser 3D de superfícies usinadas com velocidade de corte de 100 m/min e avanço de 2  $\mu\text{m}/\text{z}$  nas estratégias de usinagem (a) helicoidal, (b) *offset* e (c) *raster*.

A Tabela 1 apresenta o quadro ANOVA do efeito dos fatores de controle estratégia de usinagem, velocidade de corte e avanço por dente nos parâmetros de rugosidade  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_p$ ,  $R_v$  e  $R_{sm}$ , medidos em superfícies produzidas por microfresamento. De acordo com os valores de Probabilidade P, estratégia de usinagem e avanço por dente são os parâmetros de usinagem com efeito estatisticamente significativo na formação de superfícies microusinadas ( $P < 0,05$ ), com exceção do parâmetro  $R_p$  para a estratégia de usinagem ( $P = 0,138$ ). A velocidade de corte não foi estatisticamente significativa ( $P > 0,05$ ).

TABELA 1. Quadro ANOVA do efeito dos parâmetros de usinagem na rugosidade de superfícies microfresadas.

Fatores de controle	Probabilidade P				
	$R_a$	$R_z$	$R_p$	$R_v$	$R_{sm}$
Estratégia de usinagem	0,016	0,033	0,138	0,003	0,000
Velocidade de corte ( $v_c$ )	0,102	0,111	0,074	0,207	0,121
Avanço por dente ( $f_z$ )	0,003	0,002	0,012	0,000	0,000

Como complemento a Análise de Variância foi aplicado o Teste de Tukey para comparação de médias. Aplicando o teste no fator de controle estratégia de usinagem, referente ao parâmetro de rugosidade  $R_{sm}$ , os intervalos de confiança para as diferenças de médias, *Offset-Helicoidal*, *Raster-Helicoidal*, *Raster-Offset*, são respectivamente (-5,325; -1,631), (-7,997; -4,302), (4,519; -0,824), revelando que todas as diferenças são estatisticamente significativas. No resultado do teste para o avanço por dente, o intervalo de confiança da diferença das médias foi igual a (-6,557; -4,040), sendo estatisticamente significativo.

Aplicando o teste no fator de controle estratégia de usinagem, referente ao parâmetro de rugosidade  $R_a$ , os intervalos de confiança para as diferenças de médias, *Offset-Helicoidal*, *Raster-Helicoidal*, são respectivamente (0,0102; 0,2561), (0,0203; 0,2662), sendo estatisticamente significativas. No resultado do teste para o avanço por dente, o intervalo de confiança da diferença das médias é igual a (0,0494; 0,2169), também estatisticamente significativo.

O resultado do teste de Tukey para o parâmetro  $R_z$ , considerando a estratégia de usinagem, apresentou as diferenças de intervalo de confiança entre médias em *Offset-Helicoidal* (0,072; 1,396), sendo estatisticamente significativo. Para o avanço por dente, o teste também apresentou resultados estatisticamente significativos, com intervalo de confiança entre as médias igual a (0,319; 1,221).

O resultado do teste de Tukey para o parâmetro de rugosidade  $R_v$ , considerando a estratégia de usinagem, apresentou um intervalo de confiança para a diferença entre as médias de *Offset-Helicoidal* e *Raster-Helicoidal* há variação de (0,130; 0,704) e (0,018; 0,592). A diferença entre estas médias são estatisticamente significativas. O mesmo acontece para a rugosidade  $R_p$ , considerando o avanço por dente, sendo a variação igual a (0,092; 0,614).

## CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou o efeito da estratégia de usinagem, velocidade de corte e avanço por dente na rugosidade. O avanço por dente apresentou efeito estatisticamente significativo nos valores de rugosidade medidos, assim como a estratégia de usinagem. A Análise de Variância (ANOVA), associada com teste de comparação de médias (Teste de Tukey) revelou ser uma importante ferramenta na análise da formação de superfícies produzidas por processos de microusinagem.

## REFERÊNCIAS

- DE ASSIS, C. L. F.; JASINEVICIUS, R. G.; RODRIGUES, A. R. Micro end-milling of channels using ultrafine-grained low-carbon steel. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 77, n. 5-8, p. 1155-1165, 2015.
- CAMARA, M. A.; RUBIO, J. C. C. State of the art on micromilling of materials, a review. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 28, n. 8, p. 673-685, 2012.
- PRAKASH M., HARIHARAM P., KANTHABABU M. Automation in CNC code generation and tool path optimization for micro-milling machine. **Int. J. of Innov. Res. & Dev.**, v. 3, p. 447-455, 2014.
- RODRIGUES, A. R.; DORADO, R.; DÍAZ, F. A.; RUBIO, E. M. Surface integrity analysis when milling ultrafine-grained steels. **Materials Research**, v. 15, n. 1, p. 125-130, 2012.
- ROMERO, P. E. et al. Influence of pocket geometry and tool path strategy in pocket milling of UNS A96063 alloy. **Procedia Engineering**, v. 63, p. 523-531, 2013.