

# INTERAÇÃO FERRAMENTA DE CORTE E MATERIAL DA PEÇA NO MICROFRESAMENTO DE CANAIS EM UM AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA

Cleiton Lazaro Fazolo de Assis, fazolocl@ifsp.edu.br<sup>1</sup>

Alessandro Roger Rodrigues, roger@sc.usp.br<sup>2</sup>

Renato Goulart Jasinevicius, renatogj@sc.usp.br<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de São Paulo, Campus Votuporanga, Avenida Jerônimo Figueira da Costa 3014 – Pozzobon, Votuporanga – SP, 15503-110

<sup>2</sup>Escola de Engenharia de São Carlos, Avenida Trabalhador São-carlense 400 – Centro, São Carlos – SP, 13566-590

**Resumo:** A microestrutura do material da peça é um importante fator no microcorte de aços multifásicos. Estudos procuram a compreensão da relação entre a microestrutura da peça e as condições de usinagem para promover a qualidade da superfície de microcomponentes. Neste trabalho, um aço de alta-resistência e baixa-liga (ARBL), com tamanho médio de grão de 10  $\mu\text{m}$  para a ferrita e 5  $\mu\text{m}$  para a perlita, foi microfresado com microfresas de 200 e 800  $\mu\text{m}$  de diâmetro à 10000 e 54000 rpm de rotação do eixo-árvore. Nos testes foram produzidos microcanaís utilizando avanços por dente de 0,5, 3 e 10  $\mu\text{m}/\text{dente}$ , cujas superfícies foram caracterizadas com auxílio de um microscópio laser 3D. Os resultados mostraram que com a redução do diâmetro da microfresa, ocorreu a minimização dos defeitos nas superfícies microfresadas. O aumento da rotação do eixo-árvore também minimizou os defeitos superfícies, além de melhorar o acabamento dos microcanaís. Estas análises confirmaram que utilizando aços multifásicos com tamanho de grão menor que o de aços multifásicos convencionais, testados pela literatura, defeitos superfícies e rugosidade são melhores controlados durante o processo de microfresamento.

**Palavras-chave:** microfresamento, geração de superfície, aço multifásico, raio de aresta de corte.

## 1. INTRODUÇÃO

Sistemas microfluidicos têm sido fabricados a base de metais, principalmente para microreações devido as altas temperaturas e reagentes químicos agressivos que esses microdispositivos devem suportar (Abgrall e Gué, 2007). Além disso, aços são os materiais mais comuns para a manufatura de micromoldes (Attia, Marson e Alcock, 2009). Nestes componentes, os microcanaís devem apresentar paredes polidas para prevenir o atrito durante a desmoldagem, e essa característica é alcançada pelo uso de materiais capazes de suportar as altas pressões durante a inserção de material polimérico dentro do micromolde (Hecke e Schmbur, 2004). Contudo, há uma grande diversidade de aços para estas aplicações.

Nesse sentido, aços bifásicos apresentam baixa resistência ao escoamento, alta ductilidade e bom alongamento (Jha *et al.*, 2003). Porém, aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) aliam alto limite de escoamento e tenacidade (Davis e King, 1993). Aços ARBL provêm uma boa combinação de resistência e ductilidade, a qual depende de sua microestrutura (Sami, Tahar e Mohamed, 2014). Considerando a microusinagem, a atração particular desses aços é o tamanho reduzido do grão do material (menor que 10  $\mu\text{m}$  para alguns aços ARBL), devido a elementos de liga específicos e processos termomecânicos, tais como os usados para produzir aços baixo-carbono microligados (Davis e King, 1993). Esse aprimoramento na microestrutura de aços multifásicos poderia favorecer a microusinagem, principalmente considerando o microtorneamento, microfuração e microfresamento para a produção de microdispositivos, tais como micromoldes. A escolha do processo de manufatura mais adequado depende da geometria e precisão da peça, qualidade do acabamento e material apropriado da peça (Attia, Marson e Alcock, 2009).

Particularmente, no microfresamento de materiais multifásicos, a influência de uma segunda fase durante o microcorte tem sido apresentado na literatura como um problema para a geração da superfície usinada e formação do cavaco (Simoneau, Ng e Elbestawi, 2006). A principal observação é a diferença da mínima espessura do cavaco entre as fases da microestrutura (Vogler, DeVor e Kapoor, 2004). No microcorte, a espessura do cavaco pode ser da mesma escala do tamanho de grão do material, e assim a ferramenta corta um grão dúctil e em seguida um grão mais duro. As características observadas na superfície usinada devido ao seu efeito são defeitos como crateramento, fluxo lateral de material e microarebarbas nos contornos de grão entre diferentes fases da microestrutura, em particular quando a espessura do cavaco é menor que o raio de aresta da ferramenta de corte (Liu, DeVor e Kapoor, 2007). Os materiais multifásicos convencionais contêm tamanhos de grão maiores que 50  $\mu\text{m}$ , então quando o diâmetro de microfresas é reduzido, por exemplo, problemas durante o corte ocorrem e o processo de remoção de material causa sérios danos à superfície da micropeça (Simoneau e Elbestawi, 2006; Driver, Mian e Mativenga, 2010).

A contribuição deste trabalho é justificar o uso de aços alta resistência e baixa liga (ARBL), bifásicos com reduzido tamanho médio de grão da microestrutura, como um substituto para típicos materiais de engenharia com estruturas

multifásicas utilizados para produção de microcomponentes por microfresamento. Diâmetro da microfresa e velocidade de corte foram considerados como parâmetros para construir uma base científica nesse artigo. Análises por microscopia laser da superfície usinada foram utilizadas para testar as hipóteses.

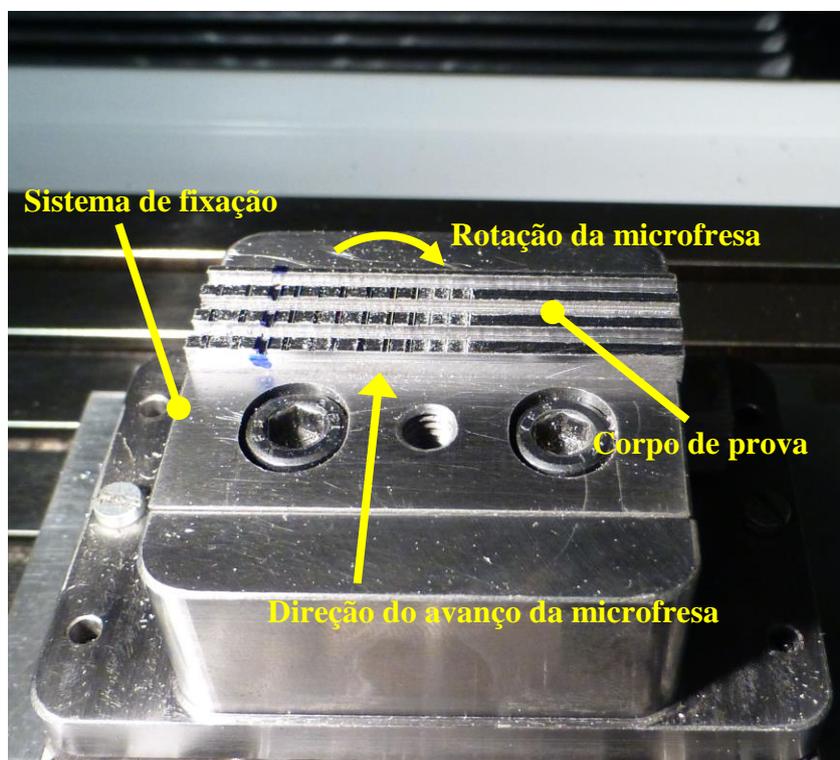
## 2. DETALHAMENTO EXPERIMENTAL

Microcanais foram usinados pelo processo de microfresamento sem aplicação de fluido refrigerante. Os parâmetros de usinagem são apresentados na Tabela 1. Profundidade de corte, comprimento de corte, raio de ponta da ferramenta e raio de aresta de corte foram mantidos constantes. Os testes foram replicados para confirmar os efeitos da relação entre as variáveis e a formação da superfície da peça.

**Tabela 1. Parâmetros de usinagem.**

Items	#1	#2
Diâmetro da microfresa [ $\mu\text{m}$ ]	200	800
Largura de corte [ $\mu\text{m}$ ]	200	800
Rotação do eixo-árvore [rpm]	10000	10000 and 54000
Profundidade de corte [ $\mu\text{m}$ ]	32	32
Comprimento de corte [ $\mu\text{m}$ ]	2000	2000
Raio de ponta da ferramenta [ $\mu\text{m}$ ]	2	8
Raio de aresta de corte [ $\mu\text{m}$ ]	$1,06 \pm 0,2$	$4,47 \pm 0,3$
Avanço por dente [ $\mu\text{m}/\text{tooth}$ ]	$0,5 - 3,0 - 10,0$	$0,5 - 3,0 - 10,0$

A Figura 1 apresenta o aparato experimental e o procedimento de usinagem. Os testes de microfresamento foram realizados em um centro de usinagem CNC Mikrottools, model MPM4020L. Microfresas de metal duro com duas arestas de corte (MITSUBISHI MS2MS) com ângulo de hélice de  $30^\circ$  foram utilizadas nos testes de usinagem. A Figura 2 apresenta as medições de raio de aresta por meio do microscópio laser 3D Lext OLS 4100 Olympus. Cada raio de aresta foi medido cinco vezes. Imagens da superfície dos canais foram feitas pelo mesmo microscópio laser, assim como as medições de rugosidade. Uma ferramenta nova foi utilizada para cada condição de usinagem.



**Figure 1. Aparato experimental.**

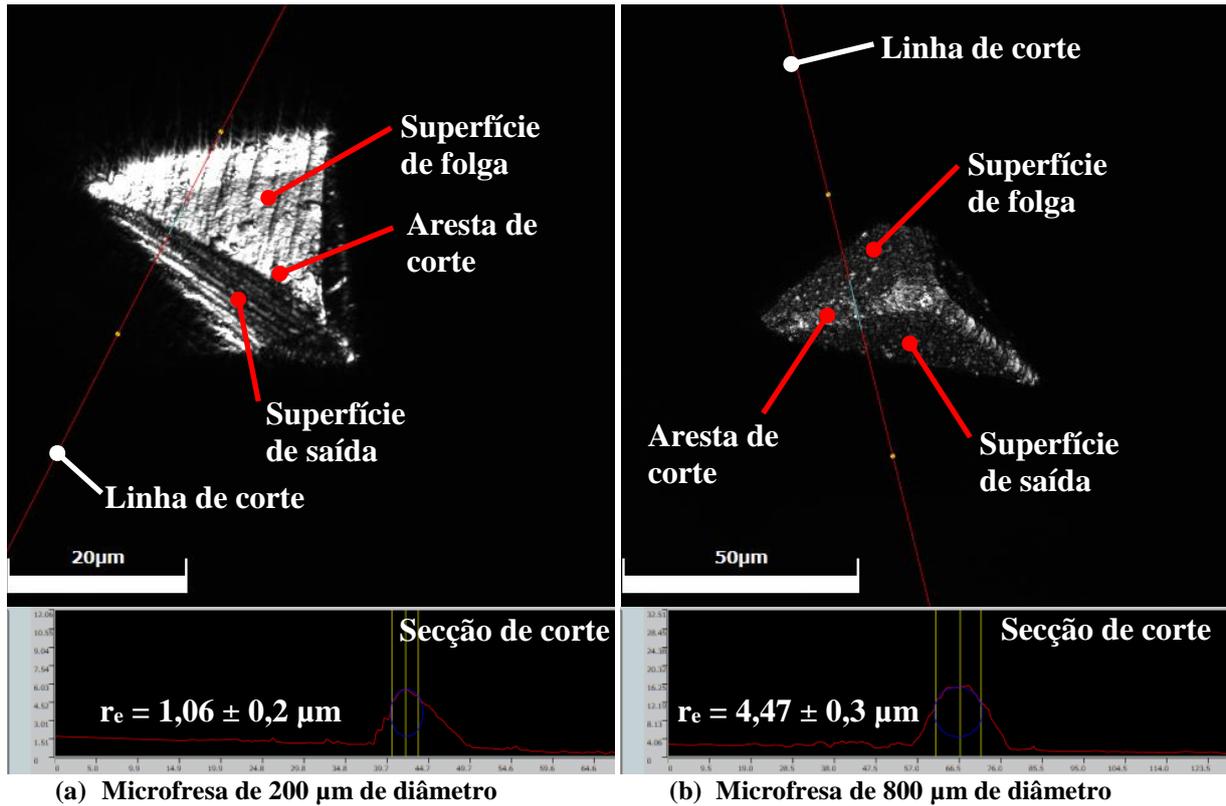


Figure 2. Medições de raio de aresta com microscopia laser 3D.

O aço AISI 1015 (material bifásico) apresentado na Figura 3 contém grãos de ferrita (cinza) e colônias de perlita (preto) derivadas do bandeamento do carbono originário do processo de laminação usado pelo fabricante. A mesma figura apresenta o caminho da ferramenta ao longo da microestrutura. As principais propriedades mecânicas dos corpos de prova são limite de escoamento de 474 Mpa, energia Charpy de 176 J e Módulo de Elasticidade de 211 GPa. A presença de elementos de liga tais como Cu, V, Ni e Mn aprimora as propriedades mecânicas devido ao refinamento de grão, endurecimento por solução sólida, e endurecimento por precipitação (Hong *et al.*, 2003). Esse material foi desenvolvido como um aço comercial de alta resistência e baixa liga (ARBL). A Tabela 2 apresenta a composição química.

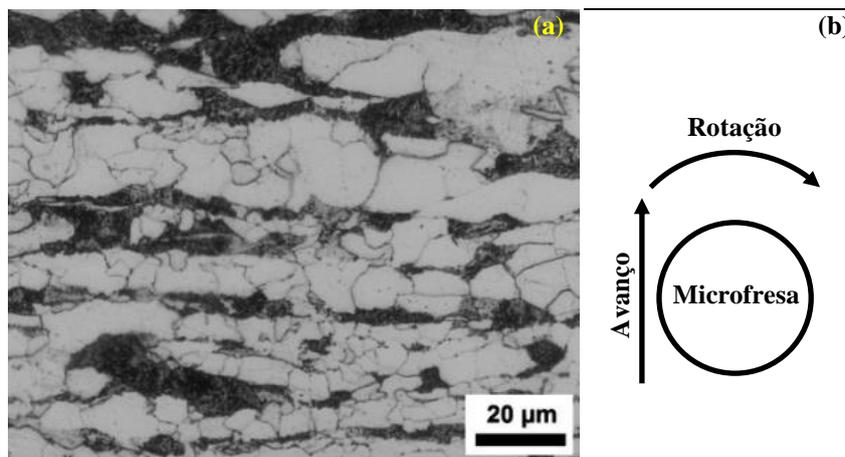
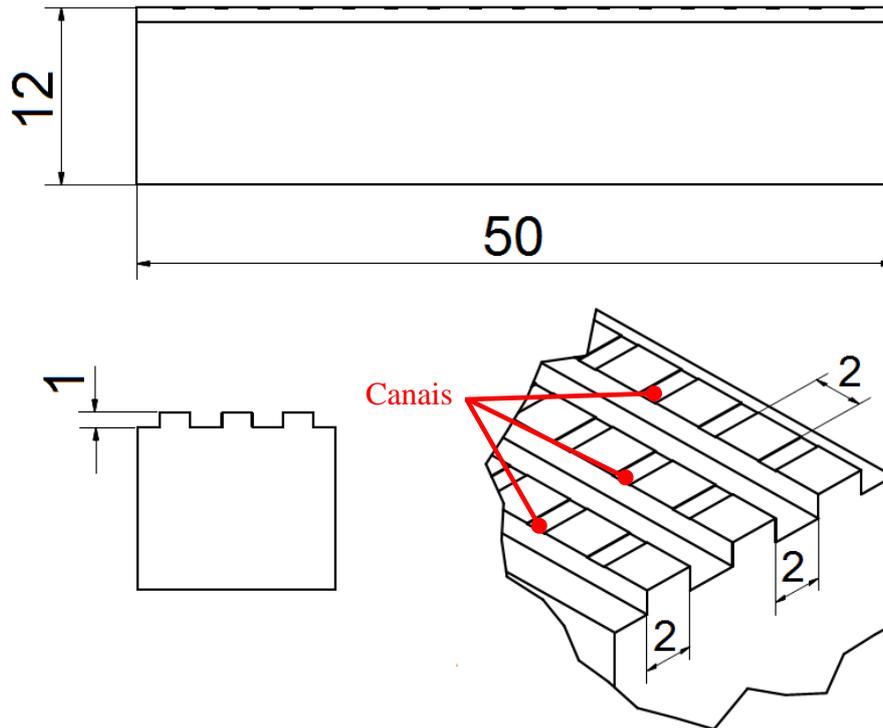


Figure 3. (a) microestrutura do material da peça e (b) trajetória da microfresa pela microestrutura.

**Table 2. Composição química do material da peça.**

C	Mn	P	S	Si	Al	Cu	Cr	Ni	Nb	V	Ti
0,15	1,49	0,027	0,009	0,27	0,046	0,005	0,276	0,008	0,048	0,044	0,016

A Figura 4 apresenta a geometria do corpo de prova aplicada aos testes de microfresamento. O espaçamento longitudinal e transversal entre os canais usinados foi mantido constante (2 mm) para evitar qualquer influência dos canais adjacentes na estabilidade do microfresamento, tais como, vibrações, formação de rebarbas, deflexão da microfresa ou desvios de forma dos microcanais.



**Figure 4. Geometria dos corpos de prova (escala em milímetros).**

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 apresenta imagens de microscopia laser da superfície de peças microfresadas sob diferentes avanços por dente, rotação do eixo árvore de 10000 rpm e diâmetro da microfresa de 200  $\mu\text{m}$ . A primeira coluna apresenta as imagens da superfície usinada, a segunda coluna apresenta as imagens de relevo correspondentes a mesma área analisada e a terceira coluna apresenta o histograma do relevo da superfície usinada. Para todas as condições de usinagem são observadas marcas uniformes do avanço da ferramenta de corte, com aparente escoamento lateral de material, delaminação e crateramento ao longo da superfície microfresada, em particular quando o avanço por dente ( $f_z$ ) é maior que o raio de aresta ( $r_c = 1,06$ ). Analisando as imagens de relevo da superfície é possível identificar defeitos causados pelo processo de usinagem. No avanço de 0,5  $\mu\text{m}/\text{dente}$  a superfície apresenta uma textura periódica com predominância de picos ( $S_{sk}>0$ ) e distribuição simétrica do histograma ( $S_{ku}=3$ ). A análise do *skewness* ( $S_{sk}$ ) indica uma simetria do relevo da superfície em relação ao plano médio, característica típica de superfícies formadas por processos de usinagem. A análise do avanço de 3,0  $\mu\text{m}/\text{dente}$  revela crateramento da superfície usinada. Um segundo pico no histograma revela regiões de “vales” causadas pelos defeitos na superfície usinada, como confirmado na imagem de relevo. Finalmente, quando o avanço por dente é muito maior que o raio de aresta de corte (10  $\mu\text{m}/\text{dente}$ ), a imagem de relevo da superfície, associado a análise do histograma de distribuição de alturas do relevo, indicam uma predominância de picos ( $S_{sk}>0$ ). Nessa condição de usinagem a microfresa penetrou o corpo de prova assimetricamente com maior elevação da superfície no lado de corte discordante do microcanal. Este efeito pode ter sido causado pela deflexão da microfresa durante o corte associada a elevação do avanço por dente.

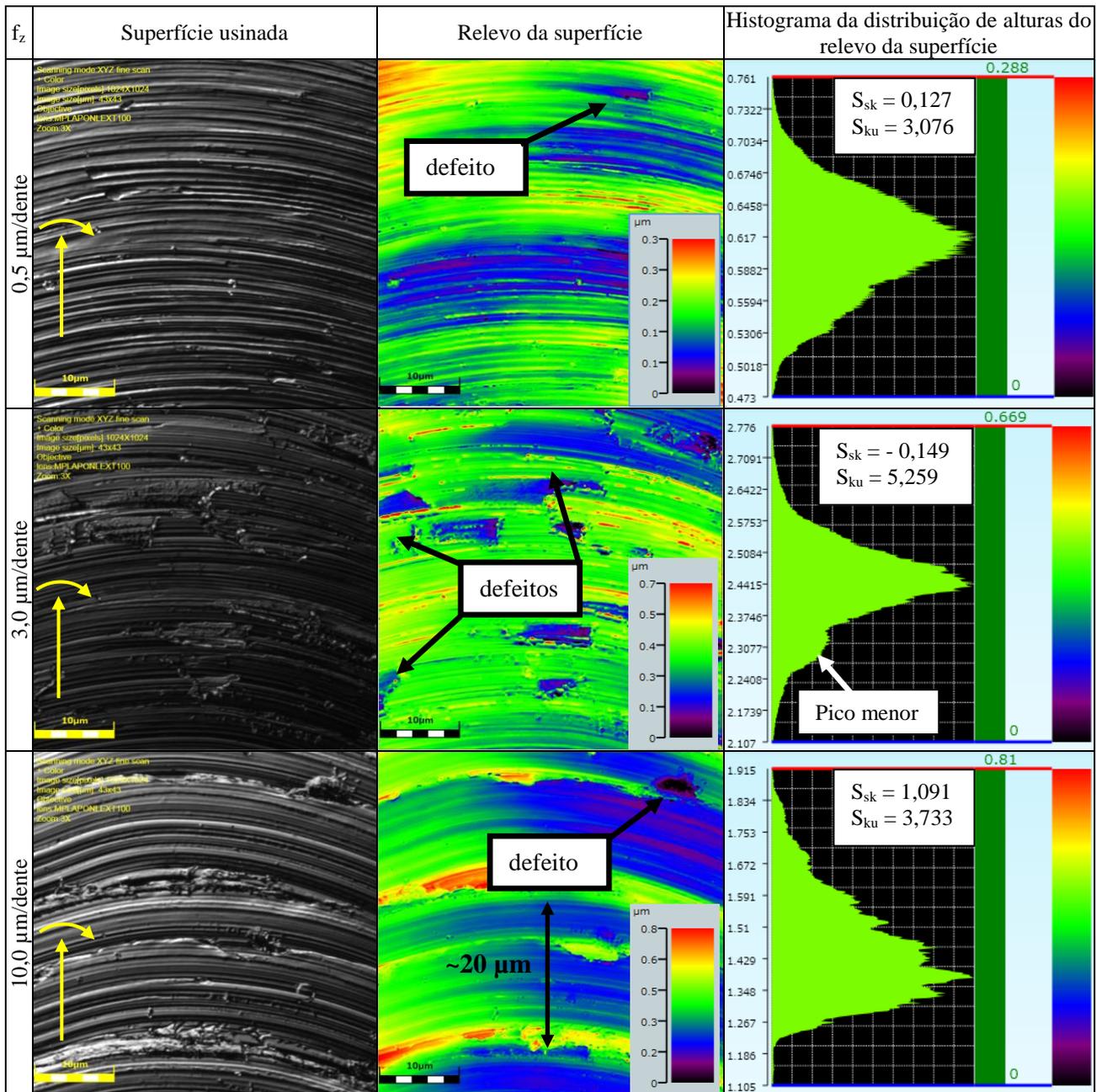


Figure 5. Imagens de microscopia laser de superfícies microfresadas com diferentes avanços por dente (microfresa de 200  $\mu\text{m}$  de diâmetro e rotação do eixo árvore de 10000 rpm). As setas indicam a direção do avanço e rotação da ferramenta.

A Figura 6 apresenta imagens de microscopia laser da superfície de peças microfresadas sob diferentes avanços por dente, rotação do eixo árvore de 10000 rpm e diâmetro da microfresa de 800  $\mu\text{m}$ . As imagens estão na mesma escala e disposição da Figura 5. As superfícies microfresadas com avanços de 0,5 e 3  $\mu\text{m}/\text{dente}$  apresentam crateramento, resultando em predominância de vales na superfície dos microcanais. Essa característica pode ser observada pela análise do histograma de distribuição de alturas do relevo, com  $S_{sk} < 0$  e  $S_{ku} > 3$  (vales profundos). O histograma deslocado revela defeitos na superfície de dimensão considerável em relação a área analisada, prejudicando a periodicidade da rugosidade do microcanal. No avanço de 10  $\mu\text{m}/\text{dente}$ , a superfície apresentou crateramento menor que o causado pelos demais avanços por dente, e houve a formação de picos altos ( $S_{sk} > 0$  e  $S_{ku} > 3$ ).

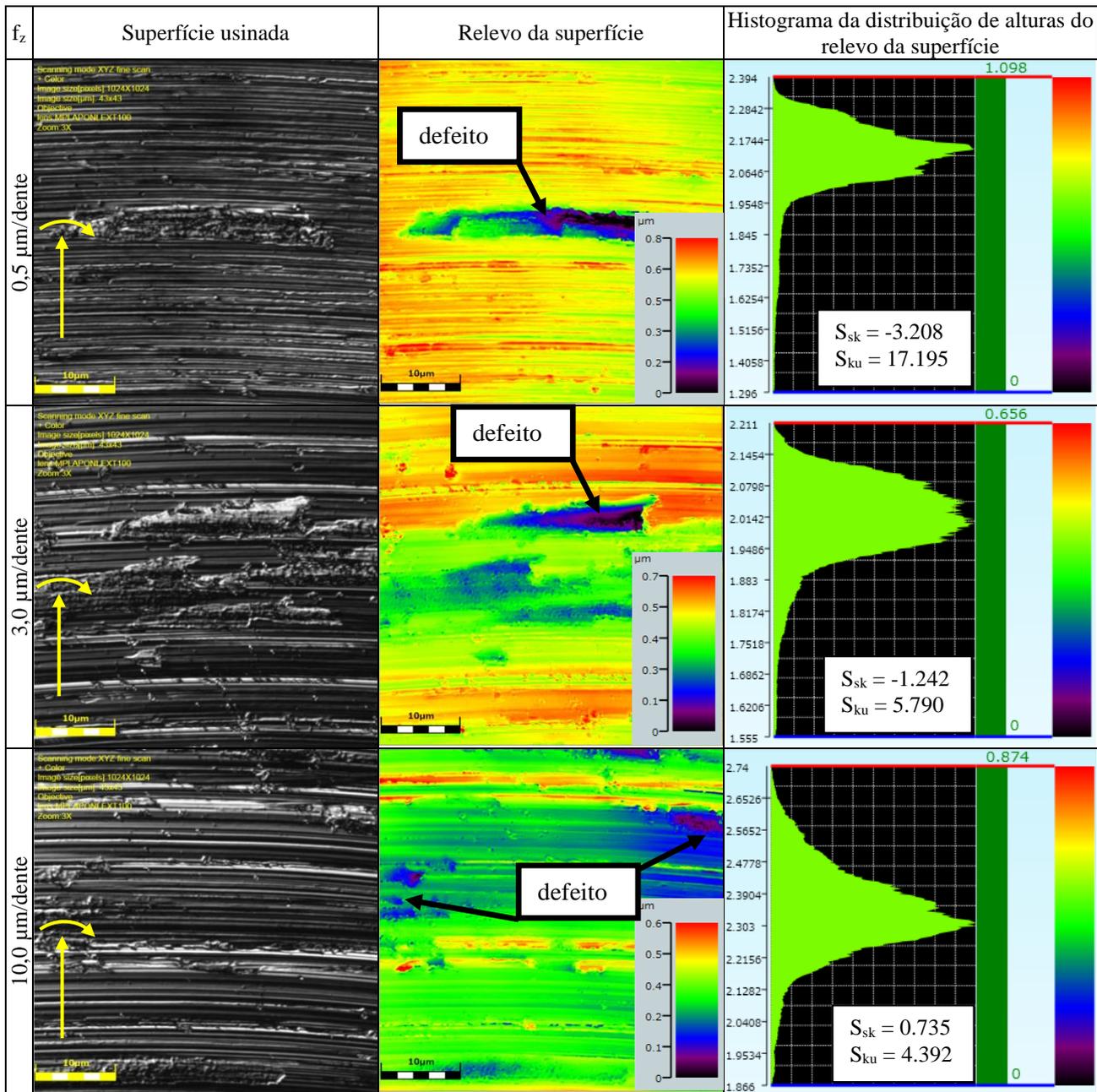
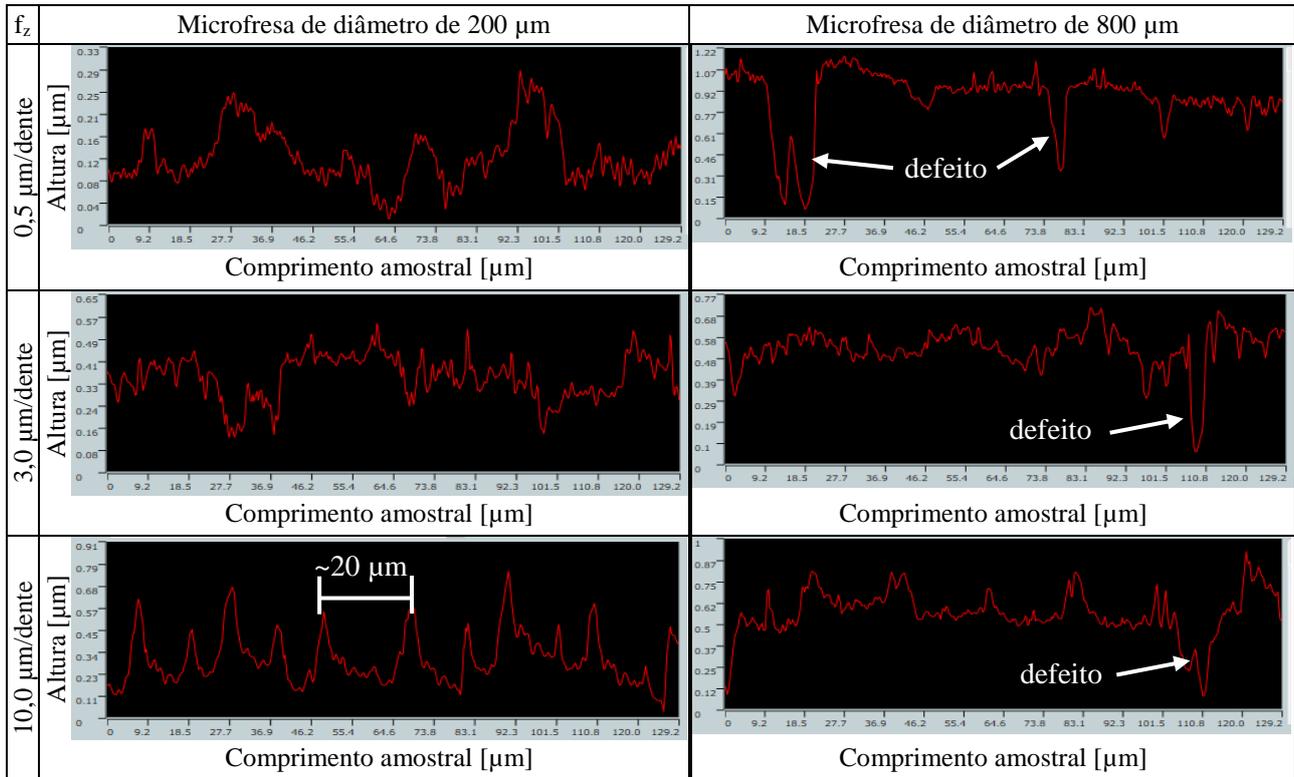


Figure 6. Imagens de microscopia laser de superfícies microfresadas com diferentes avanços por dente (microfresa de 800  $\mu\text{m}$  de diâmetro e rotação do eixo árvore de 10000 rpm). As setas indicam a direção do avanço e rotação da ferramenta.

Os perfis de rugosidade 2D estão apresentados na Figura 7. O menor diâmetro de microfresa apresentou perfis de rugosidade mais uniformes quando comparados a microfresa de maior diâmetro. A diferença entre o comportamento dos perfis de rugosidade gerados pelos dois diâmetros de microfresas é mais evidente conforme o avanço por dente é reduzido. O aumento da rugosidade máxima ( $R_t$ ), que é a diferença de altura entre o vale mais profundo e o pico mais alto, para a microfresa de maior diâmetro foi causado devido a existência de defeitos mais profundos. No avanço de 3,0  $\mu\text{m}/\text{dente}$ , a razão entre o raio de aresta e o avanço por dente é diferente para as microfresas, sendo  $f_z/r_e = 3$  para o diâmetro de 200  $\mu\text{m}$  e  $f_z/r_e = 0,67$  para o diâmetro de 800  $\mu\text{m}$ . Nesse caso, o ângulo de saída efetivo da microfresa maior causou mais deformação do material da peça, resultando em danos na superfície usinada, tal como observado na Figura 6. Por outro lado, quando utilizada a menor microfresa, esse efeito foi reduzido para o mesmo valor de avanço por dente. Para esta microfresa, o raio de aresta de corte é muito menor que o tamanho médio de grão do material da peça (aproximadamente 10x menor). Sendo assim, o mecanismo de corte foi mais uniforme no transito entre um grão e outro da microestrutura, mesmo quando há mudanças de dureza entre os grãos. Essa característica do corte verificado neste

estudo contribuiu para a minimização dos problemas gerados pelo efeito do raio de aresta de corte discutido por Liu, DeVor e Kapoor (2004) e Simoneau, Ng e Elbestawi (2006).



**Figure 7. Perfil de rugosidade de superfícies microfresadas com diferentes avanços por dente e diâmetros de microfresas (rotação do eixo árvore de 10000 rpm).**

A variação da rotação do eixo-árvore foi avaliada apenas para a microfresa com diâmetro de 800 μm, tal como apresentado pela Tabela 1. A Figura 8 apresenta imagens de microscopia laser da superfície microfresada das peças sob diferentes avanços por dente, e rotação do eixo-árvore de 54000 rpm. As imagens estão na mesma escala e disposição da Figura 5. No avanço de 0,5 μm/dente, a superfície microfresada apresenta marcas de avanço da ferramenta uniformes, sem fluxo lateral aparente de material, delaminação ou crateramento, revelando que o aumento da velocidade de corte favoreceu a formação da superfície dos microcanais. Os parâmetros *skewness* ( $S_{sk}$ ) e *kurtosis* ( $S_{ku}$ ) apresentaram histogramas com distribuição Normal (curva de sino) das alturas do relevo. Aumentando o avanço por dente há uma tendência ao surgimento de vales mais profundos na superfície microfresada, principalmente no avanço de 10,0 μm/dente, conforme análise dos histogramas. Contudo, as superfícies apresentaram uma simetria do relevo em relação ao plano médio da superfície para todas as condições de usinagem.

A Figura 9 apresenta os perfis de rugosidade da superfície microfresada das peças com diferentes condições de avanço por dente para a microfresa de 800 μm de diâmetro. O aumento da velocidade de corte favoreceu o microfresamento quando o avanço por dente é menor que o valor de raio de aresta de corte, com picos e vales uniformes se comparado a aqueles formados com rotação do eixo-árvore menor. Na usinagem de um aço AISI 1045 com tamanhos de grão de 7 e 52 μm para ferrita e perlita, respectivamente, Mian, Driver e Mativenga (2010) citam que a microestrutura do material da peça governa a textura da superfície para baixos avanços por dente. No trabalho dos autores, foram observadas descontinuidades nos contornos de grão, aplicando uma rotação do eixo-árvore de 30000 rpm.

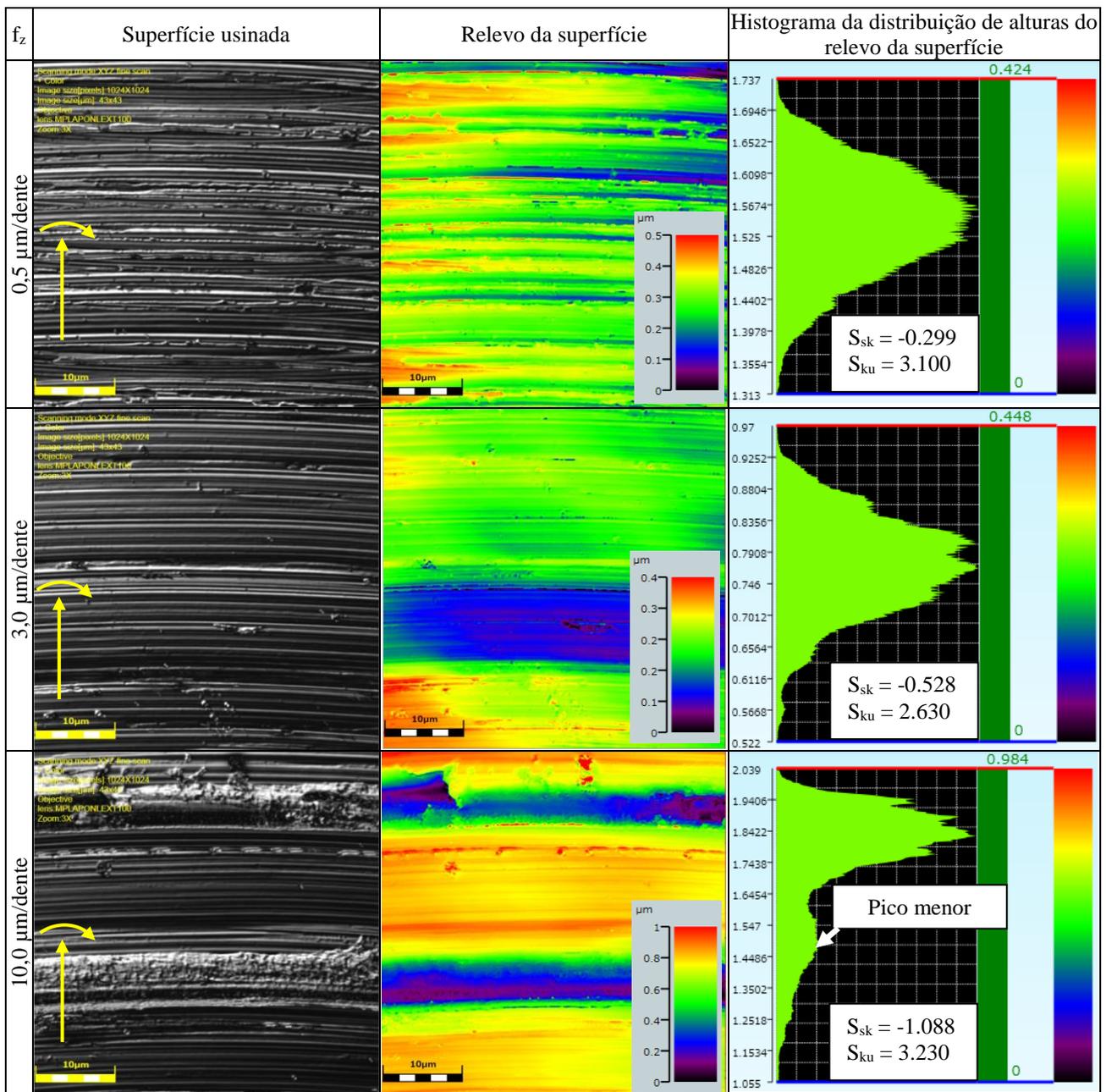
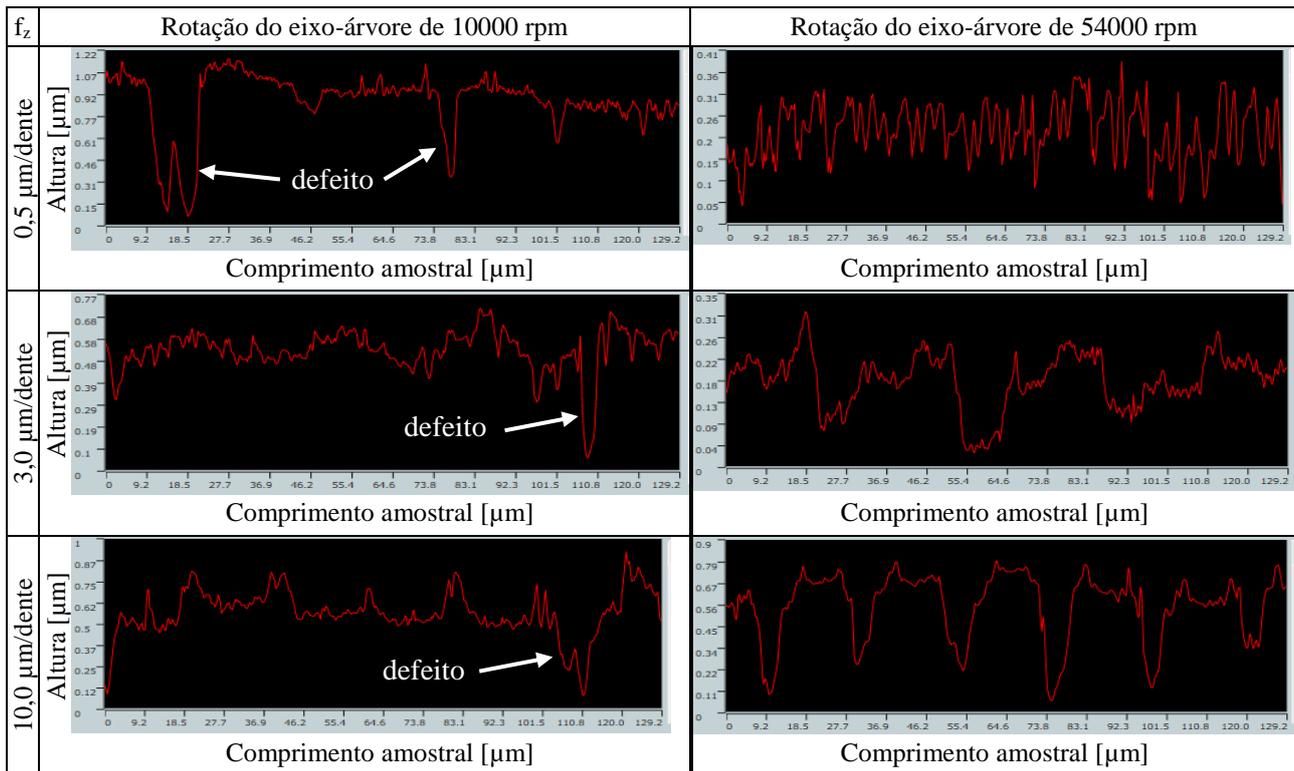


Figure 8. Imagens de microscopia laser de superfícies microfresadas com diferentes avanços por dente (microfresa de 800  $\mu\text{m}$  de diâmetro e rotação do eixo árvore de 54000 rpm). As setas indicam a direção do avanço e rotação da ferramenta.



**Figure 9. Perfil de rugosidade de superfícies microfresadas com diferentes avanços por dente (diâmetro da microfresa de 800  $\mu\text{m}$ ).**

#### 4. CONCLUSÕES

Reduzindo o tamanho de grão do material da peça, diâmetro da microfresa e/ou aumentando a velocidade de corte, melhor comportamento da formação da superfície durante o corte e menos defeitos foram observados na usinagem com menor aresta de corte, utilizando como material da peça aço multifásico com tamanho de grão reduzido. De acordo com os resultados, a seleção dos parâmetros de usinagem também depende do diâmetro da microfresa e a velocidade de corte melhorou a qualidade da superfície de microcanais no microfresamento de aços alta resistência baixa liga (ARBL).

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico e Científico (CNPq) pelo fomento (processo 468609/2014-4), MMC Metal do Brasil (Mitsubishi) pelas microfresas e ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) pelo suporte técnico.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Davis, C.L. e King, J.E., 1993, "Effect of cooling rate on intercritically reheated microstructure and toughness in high strength low alloy steel". *Mat Sci and Tech* 9: 8-15.
- Fleck, N.A. *et al.*, (1994) Strain gradient plasticity: theory and experiment. *Acta Metall Mat* 42: 475-487. doi: 10.1016/0956-7151(94)90502-9
- Hong, S.G. *et al.* 2003, "Evolution of precipitates in the Nb-Ti-V microalloyed HSLA steels during reheating". *Scr Mat* 48: 1201-1206. doi: 10.1016/S1359-6462(02)00567-5
- Jha, A.K. *et al.*, 2003, "Correlating microstructural features and mechanical properties with abrasion resistance of a high strength low alloy steel". *Wear* 254: 120-128. doi: 10.1016/S0043-1648(02)00309-5
- Kong, M.C. *et al.*, 2006, "A study of materials swelling and recovery in single-point diamond turning of ductile materials". *Int J of Mat Proc Tech* 180: 210-215. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2006.06.006
- Li, H.Z.; Liu, K. e Li, X.P., 2001, "A new method for determining the undeformed chip thickness in milling". *J of Mat Proc Tech* 113: 378-385. doi: 10.1016/S0924-0136(01)00586-6
- Liu, Z.; DeVor, R.E. e Kapoor, S.G., 2007, "Model-based analysis of the surface generation in microendmilling-part I. Model development" *ASME Trans. J Manuf Sci Eng* 129: 453-460. doi: 10.1115/1.2716705

- Mian, A.J.; Driver, N. e Mativenga, P.T., 2010, “A comparative study of material phase effects on micro-machinability of multiphase materials”. *Int J Adv Manuf Technol* 50: 163-174. doi: 10.1007/s00170-009-2506-9
- Sami, Z.; Tahar, S. e Mohamed, H., 2014, “Microstructure and charpy impact properties of ferrite-martensite dual phase API X70 linepipe steel”. *Mat Sci & Eng A* 598: 338-342. doi: 10.1016/j.msea.2014.01.052
- Sata, T. *et al.*, 1985, “Analysis of surface roughness generation in turning operation and its applications” *CIRP Ann.* 34: 473-476. doi: 10.1016/S0007-8506(07)61814-9
- Simoneau, A.; Ng, E. e Elbestawi, M.A., 2006, “Surface defects during microcutting”. *Int J of Mach Tool & Manuf* 46: 1378-1387. doi: 10.1016/j.ijmactools.2005.10.001
- Vogler, M.P.; DeVor, R.E. e Kapoor, S.G., 2004, “On the modeling and analysis of machining performance in micro-endmilling, part I: surface generation”. *J of Man Sci and Eng* 126: 685-694. doi: 10.1115/1.1813470

## 7. DIREITOS AUTORAIS

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

# CUTTING TOOL AND PART MATERIAL INTERACTION DURING CHANNELS MICROMILLING OF A HIGH-STRENGTH LOW-ALLOY STEEL

Cleiton Lazaro Fazolo de Assis, fazolocla@ifsp.edu.br<sup>1</sup>  
Alessandro Roger Rodrigues, roger@sc.usp.br<sup>2</sup>  
Renato Goulart Jasinevicius, renatogj@sc.usp.br<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal Institute of Sao Paulo, *Campus* Votuporanga, Avenida Jerônimo Figueira da Costa 3014 – Pozzobon, Votuporanga – SP, 15503-110

<sup>2</sup>School of Engineering of São Carlos, Avenida Trabalhador São-carlense 400 – Centro, São Carlos – SP, 13566-590

**Abstract.** Part microstructure plays an important role when microcutting multiphase materials. Current studies aim at understanding the relationship between part microstructure and machining conditions to improve the surface quality of microcomponents. In this paper, high-strength low-alloy (HSLA) steel was micro milled with 200 and 800  $\mu\text{m}$  diameter endmills at 10,000 and 54,000 rpm spindle rotations. Slots were produced at 0.5, 3 and 10  $\mu\text{m}/\text{tooth}$  tool feeds and laser microscopy was applied to evaluate the machined surfaces. The results showed that smaller tool diameters minimized part surface defects and higher spindle rotation improved part roughness for feed per tooth lesser than edge radius when 800  $\mu\text{m}$  tool diameter was used. These findings confirm that when using multiphase steels with smaller grains size than conventional multiphase steels, defects and roughness are better controlled during micro endmilling process.

**Keywords:** micro endmilling, surface generation, multiphase steel, edge radius.

## 1. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.