

## MICROFRESAMENTO DE CANAIS EM AÇOS COM GRÃOS ULTRAFINOS

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

Renato Goulart Jasinevicius, renatogj@sc.usp.br<sup>1</sup>

Alessandro Roger Rodrigues, roger@sc.usp.br<sup>1</sup>

Reginaldo Teixeira Coelho, rtcoelho@sc.usp.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escola de Engenharia de São Carlos, Avenida Trabalhador São-carlense 400 - Centro, São Carlos – SP, 13566-590

**Resumo:** Na microssinagem, a interação entre a ferramenta e o material da peça apresenta problemas relacionados a deformação do material, defeitos na superfície usinada e rebarbas. Para abordar estes problemas, o emprego de materiais com microestrutura na mesma escala dos parâmetros de usinagem, poderia ser uma proposta de solução. Este trabalho avaliou o efeito de microestruturas bifásica (ferrita-perlita) e com grãos ultrafinos (ferrita), no microfresamento. Os parâmetros de usinagem adotados consideraram o efeito do raio de aresta das microfresas. O material com grãos ultrafinos apresentou melhores resultados de acabamento, rugosidade e menos rebarbas quando comparado ao material bifásico. A modificação metalúrgica de aços baixo-carbono pelo refino de grão favoreceu a usinagem de microcanaís, viabilizando novas aplicações para esta classe de aços.

**Palavras-chave:** microfresamento, microcanaís, microestrutura, rugosidade, rebarbas

### 1. INTRODUÇÃO

Aços baixo-carbono são normalmente aplicados na fabricação de chapas finas para a indústria automobilística e folhas de flandres para confecção de utensílios domésticos e objetos de arte. Outras aplicações típicas são perfis estruturais, vagões, comportas, tubos, construção civil e latas. Em geral são aplicações que não envolvem solicitações mecânicas severas, devido à baixa resistência mecânica e alta ductilidade e tenacidade. Estes aços são de baixo custo, facilmente usináveis e soldáveis, e não são tratáveis termicamente para endurecimento (Weng, 2009).

Um modo de expandir a aplicação dos aços baixo-carbono é a intervenção na microestrutura do material com auxílio de técnicas de refino de grão. A redução do tamanho de grão até a ordem de alguns micrometros ou inferior a 1 µm gera um incremento significativo na resistência mecânica (Okitsu, Takata, & Tsuji, 2009). Aços baixo-carbono com microestrutura constituída pelas fases ferrita (ultrafina) e bainita favorecem alta resistência mecânica e baixa tenacidade. Por outro lado, a presença das fases ferrita (ultrafina) e particulados de cementita globular nos contornos de grão geram menor incremento de resistência mecânica, porém asseguram boa tenacidade (Weng, 2009).

O controle do tamanho dos grãos e das fases presentes na microestrutura expandem aplicações antes restritas, com fator econômico favorável. Componentes para automóveis, parafusos e micropeças com paredes finas podem ser fabricados com o emprego de aços baixo-carbono com grãos ultrafinos, pois o balanço entre resistência mecânica e tenacidade pela intervenção metalúrgica na microestrutura abre um novo campo de possibilidades. Além disso, superfícies de materiais com grãos ultrafinos, submetidas a solicitações de fadiga, desgaste e corrosão apresentaram resultados superiores aos respectivos materiais de mesma composição química, porém com maior tamanho de grão (Wang *et al.*, 2008).

Dando ênfase à usinagem, a microestrutura da peça possui uma influência significativa nos fenômenos inerentes ao corte, independente da escala de usinagem, em especial quando relacionado à redução do avanço por dente da ferramenta até a ordem de dimensão do raio de aresta (Mian, Driver, & Mativenga, 2011). Nessa condição a baixa razão do cavaco e fluxo plástico indesejado, tal como efeito de *ploughing* podem causar significantes danos na superfície usinada, e o escoamento de material na camada afetada pode aumentar a dureza na superfície da peça (Rodrigues *et al.*, 2010).

A resposta mecânica de um material pode ser fortemente influenciada pelo efeito de escala na usinagem (Fang, 2003). Quando a espessura de corte está na dimensão do raio de aresta da ferramenta, mudanças no estado de tensões e na taxa de deformação ocorrem, pois o escoamento lateral muda o estado de tensão de compressivo para trativo (Fang, 2003). Como resultado, há mudanças no mecanismo de formação do cavaco e surgimento de defeitos indesejáveis na superfície da peça. Isto se deve à redução do volume de material à frente da ferramenta e a quantidade de material que escoou sob a ferramenta, na zona terciária de cisalhamento, a qual aumenta proporcionalmente com a redução da espessura de corte, principalmente para materiais com mais de uma fase (Simoneau, Ng, & Elbestawi, 2006). Nestes casos, a usinagem é favorecida quando a quantidade de uma fase mais dura é reduzida na microestrutura do material, como a perlita, e a microestrutura torna-se mais homogênea (Rodrigues *et al.*, 2012).

A maior diferença entre as características da usinagem de um material com microestrutura homogênea e com diferentes fases é a mudança na formação do cavaco de contínuo para descontínuo, e sua influência na formação da superfície da peça (Vogler, DeVor e Kapoor, 2004). Microestruturas refinadas retardariam este efeito, mantendo os

cavacos contínuos mesmo na usinagem com espessuras de corte inferiores ao raio de aresta da ferramenta. Isso por que na redução da escala de usinagem a ferramenta pode usinar um dado grão de uma fase mais dura e em seguida um grão dúctil, alterando o processo de formação da superfície (Liu et al., 2004). Tendo como base este argumento, o refinamento da microestrutura de aços é uma alternativa viável para solucionar problemas relacionados à qualidade da superfície usinada e desempenho do componente quando submetido a solicitações mecânicas.

Com base nos argumentos apresentados, o objetivo deste trabalho foi realizar uma investigação sobre o microfresamento de canais em materiais bifásicos e de microestrutura homogênea de grão ultrafinos. Superfície usinada, rugosidade e análise da formação de rebarbas foram utilizadas para comparação entre os dois materiais.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de microfresamento foram realizados em centro de usinagem vertical CNC, Mikrotools MPM4020L. Os parâmetros de usinagem adotados como variáveis de entrada foram velocidade de corte ( $v_c$ ), profundidade de usinagem ( $a_p$ ), avanço por dente ( $f_z$ ), diâmetro das microfresas ( $d_\phi$ ) e raio de aresta da ferramenta ( $r_e$ ). Todos os ensaios foram realizados sem emprego de fluido de corte, com largura de usinagem ( $a_e$ ) dependente do diâmetro das microfresas, constantes ao longo de todo o comprimento de usinagem e iguais a 200 e 800  $\mu\text{m}$ .

A faixa de exploração das variáveis de entrada foi determinada conforme o fabricante das ferramentas de corte e os conceitos de microusinagem. Sendo assim, a Tabela 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta as variáveis de entrada (fatores de controle). Cada ensaio de usinagem foi realizado duas vezes, visando confirmar os efeitos gerados pela relação entre velocidade de corte ( $v_c$ ), avanço por dente ( $f_z$ ), raio de aresta da ferramenta ( $r_e$ ) e microestrutura dos materiais no acabamento da peça, rugosidade e formação de rebarbas. Todas as médias foram calculadas considerando uma confiabilidade estatística de 95%. Para este grupo de ensaios a velocidade de corte será identificada pela rotação do eixo-árvore em rpm, visando facilitar as análises. A profundidade de usinagem foi fixada. Com relação ao avanço por dente, foi proposto adotar um avanço menor, aproximado e maior que o raio de aresta das ferramentas, conforme apresentado na Tabela 1.

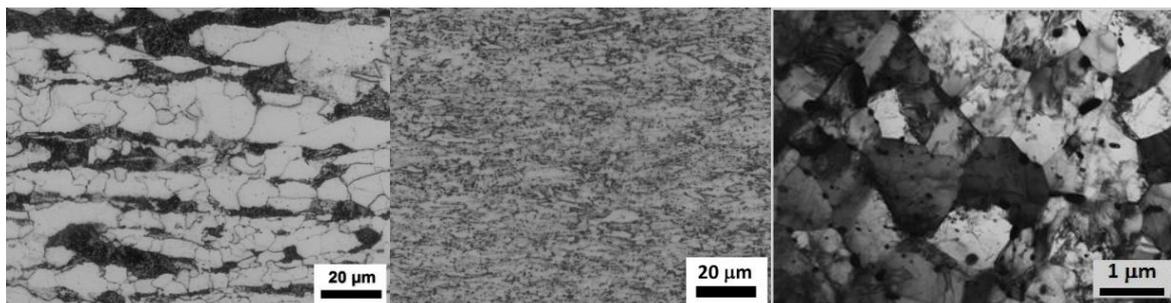
**Tabela 1. Parâmetros de usinagem e microestrutura dos corpos de prova.**

PARÂMETROS DE USINAGEM	
Velocidade de rotação do eixo-árvore [rpm]	10000 e 54000
Profundidade de usinagem [ $\mu\text{m}$ ]	32
Largura de usinagem [ $\mu\text{m}$ ]	200 e 800
Raio de aresta de corte [ $\mu\text{m}$ ]	1 e 4,5
Avanço por dente [ $\mu\text{m}$ ]	0,5; 3 e 10
Microestrutura e TG*	Ferrita-perlita com 11 $\mu\text{m}$
	Ferrita ultrafina com 0,7 $\mu\text{m}$

\*TG - Tamanho médio de grão ferrítico

As microfresas utilizadas são de metal duro da marca MITSUBISHI, código MS2MS, com ângulo de hélice de  $30^\circ$ . O raio de corte das ferramentas ( $r_e$ ) foi medido com auxílio de um microscópio laser 3D Olympus OLS4000. Cinco medidas de raio de aresta foram feitas em cada aresta de corte. Os valores médios de raio de aresta foram de  $1,06 \pm 0,2$  e  $4,47 \pm 0,3$   $\mu\text{m}$  para as microfresas de diâmetros 200 e 800  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Mais detalhes sobre a medição do raio de aresta das ferramentas podem ser encontrados em Assis, Jasinevicius e Rodrigues (2014).

A Figura 1 apresenta a microestrutura dos materiais dos corpos de prova. A microestrutura da Figura 1a corresponde ao material bifásico (CR) contendo grãos de ferrita (cinza) e colônias de perlita (preto). Em contraste, o material de fase única (GUF) na Figura 1b é constituído predominantemente por ferrita, e devido ao tamanho ultrafino dos grãos, microscopia eletrônica de transmissão (MET) foi utilizada para melhor definição dos grãos (Figura 1c).



(a) Como Recebido (CR)

(b) Grãos Ultrafinos (GUF)

(c) MET do material GUF

**Figura 1. Microestruturas dos materiais das peças.**

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentadas caracterizações feitas por MEV da base dos canais microusinados e formação de rebarbas utilizando microfresas com diâmetros de 200 e 800  $\mu\text{m}$ , sendo os ensaios com menor diâmetro de microfresa apenas com velocidade de rotação do eixo-árvore de 10000 rpm, e para o maior diâmetro velocidades de 10000 e 54000 rpm. Devido à fragilidade das microfresas de 200  $\mu\text{m}$ , não foi possível realizar ensaios com 54000 rpm. Todas as imagens foram obtidas no início do canal, região onde o desgaste da ferramenta ainda não influencia a formação da superfície e das rebarbas. Nas imagens as setas indicam a direção da velocidade de avanço e de rotação da ferramenta.

A análise qualitativa das imagens de superfície da Figura 2 revelou melhor acabamento na microusinagem com avanço por dente maior que o raio de aresta, enquanto para  $f_z < r_c$  o aspecto das superfícies foi similar, sem a presença aparente de defeitos. Para o material CR, conforme o avanço por dente aumentou, houve aumento da intensidade dos defeitos na superfície da base do canal. Os defeitos de superfície na usinagem com microfresa de 200  $\mu\text{m}$  tiveram origem na dificuldade de formação do cavaco, principalmente para o material bifásico (CR), o qual não se formou completamente pelo processo de cisalhamento, gerando rebarbas na lateral superior dos canais, conforme será visto adiante na análise sobre formação de rebarbas da Figura 3.

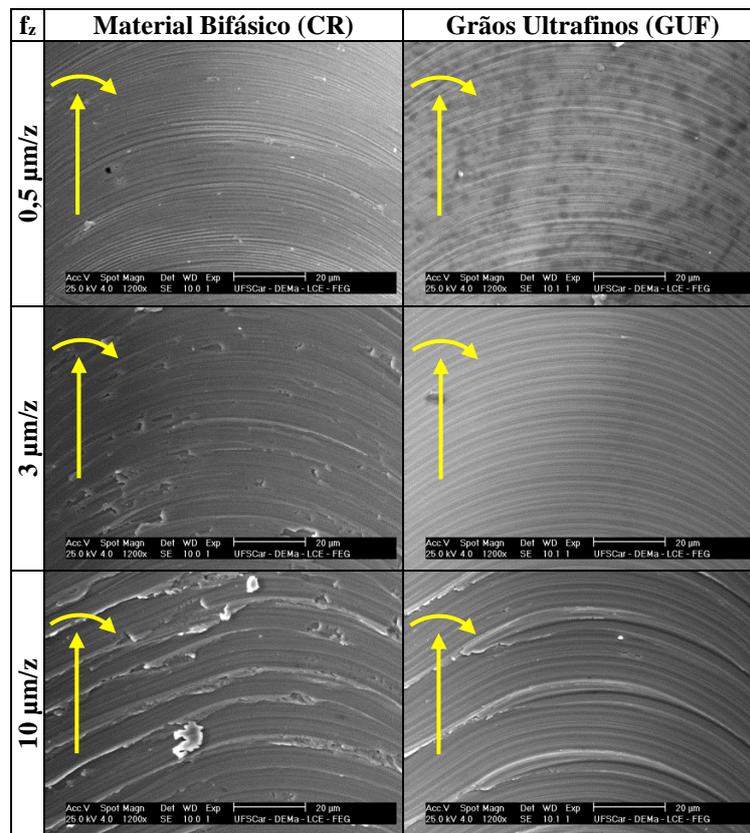


Figura 2. Imagens de MEV da superfície dos canais para microfresa de 200  $\mu\text{m}$  de diâmetro e 10000 rpm.

A Figura 3 apresenta imagens de MEV do topo da lateral dos canais microfresados. Numa análise qualitativa, a formação de rebarbas foi mais intensa no lado correspondente a saída da aresta de corte para ambos os materiais, mantendo-se uniforme independente do avanço por dente no material CR, enquanto para o material GUF o incremento de avanço por dente gerou rebarbas menores. Para todas as condições a formação de rebarbas foi constante ao longo do comprimento de corte. Comparativamente, o material GUF apresentou maiores rebarbas na condição de  $f_z < r_c$ . Para ambos os materiais o mecanismo de remoção de material observado foi *ploughing* do material da peça à frente da aresta da ferramenta, a qual empurrou material da peça para as laterais do canal.

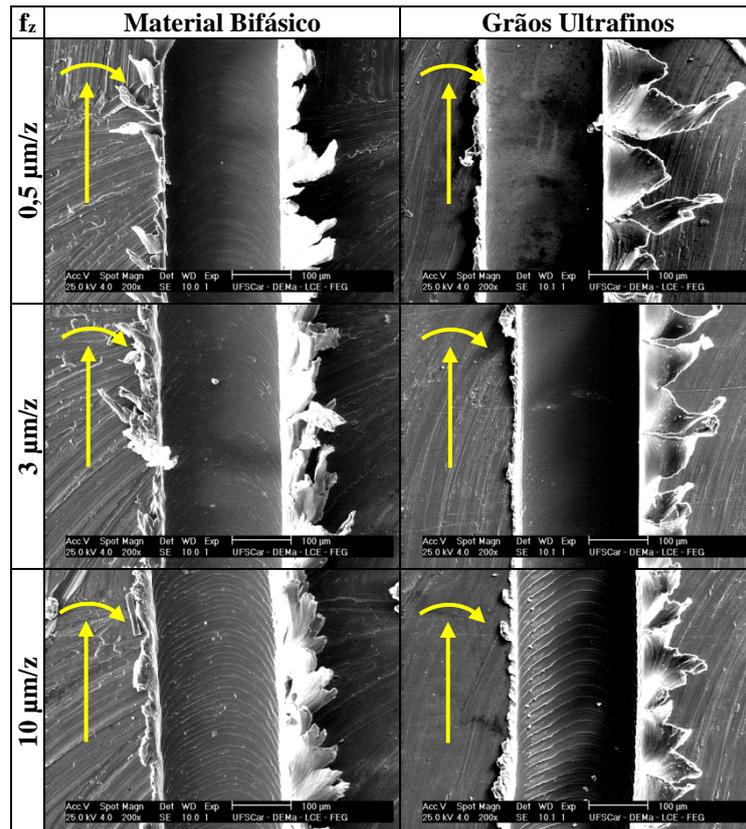


Figura 3. Imagens de MEV das rebarbas para microfresa de 200  $\mu\text{m}$  de diâmetro e 10000 rpm.

A maior resistência à deformação apresentada pelo material GUF está refletida no tamanho das rebarbas observado na Figura 3. Sendo as rebarbas, no lado de entrada da aresta cortante, menores para o material GUF, é possível inferir que a espessura mínima de corte do material GUF é menor que a do material CR, gerando menor quantidade de material a ser empurrado para o topo da lateral do canal no lado de entrada da aresta cortante. Com o material GUF sendo rompido antecipadamente ao rompimento do material CR, há maior porção de material sendo empurrada para o topo da lateral de saída da aresta cortante, formando rebarbas maiores. A presença de diferentes fases, com diferentes durezas na microestrutura do material da peça, contribui para diferentes valores de mínima espessura de corte, alterando o mecanismo de formação de cavaco e causando danos à superfície usinada em comparação a um material homogêneo (Vogler, DeVor, & Kapoor, 2004).

Com o aumento do diâmetro da ferramenta e mesma rotação do eixo árvore (10000 rpm), a Figura 4 apresenta o mesmo aspecto qualitativo observado na análise anterior. Da mesma forma, o material CR apresentou danos na superfície da base do canal, no entanto, diferentemente da Figura 2, na condição de  $f_z < r_e$ , o material CR apresentou defeitos na superfície da base do canal.

A Figura 5 apresenta imagens de MEV do topo da lateral dos canais microfresados. Numa análise qualitativa, o incremento de avanço por dente favoreceu a redução das rebarbas em ambos os materiais, porém para o material CR as rebarbas formaram-se em maior quantidade e tamanho no lado de entrada da aresta de corte. Por outro lado, para o material GUF, as rebarbas foram maiores e mais largas e em igual proporção para os dois lados do canal.

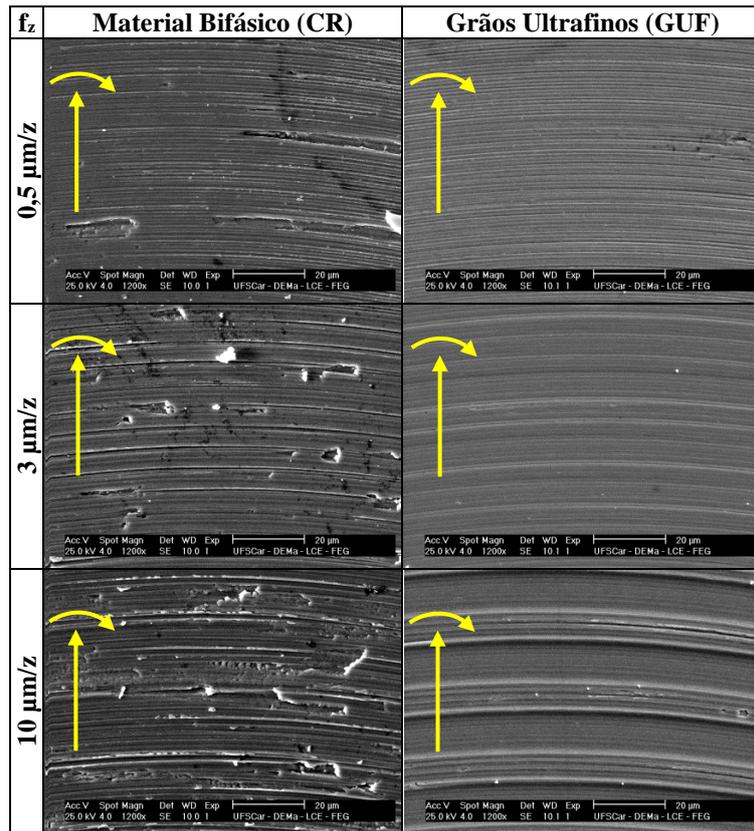


Figura 4. Imagens de MEV da superfície dos canais para microfresa de 800  $\mu\text{m}$  de diâmetro e 10000 rpm.

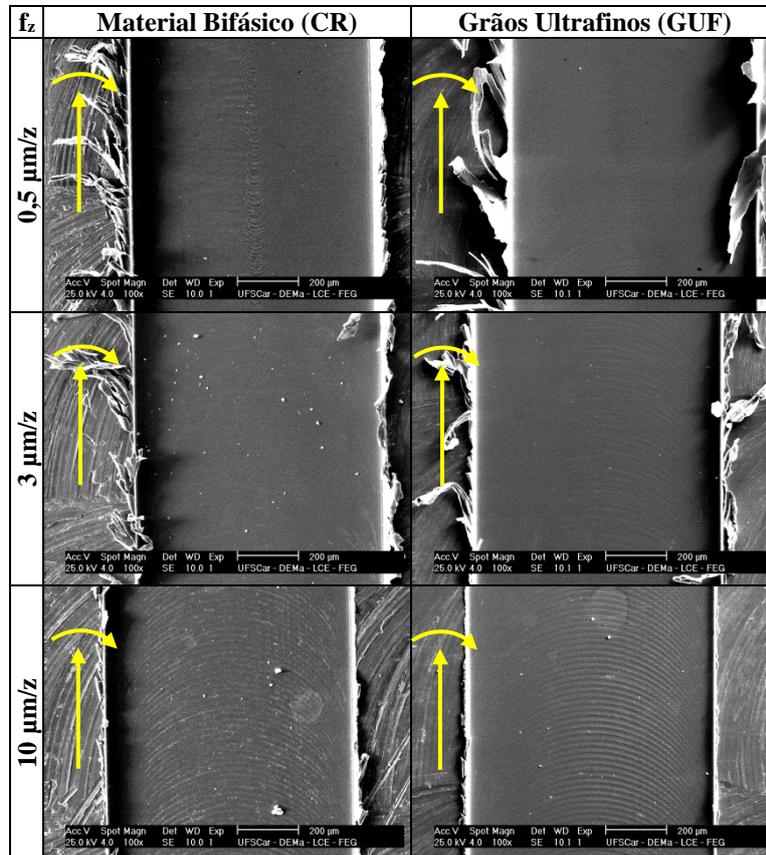


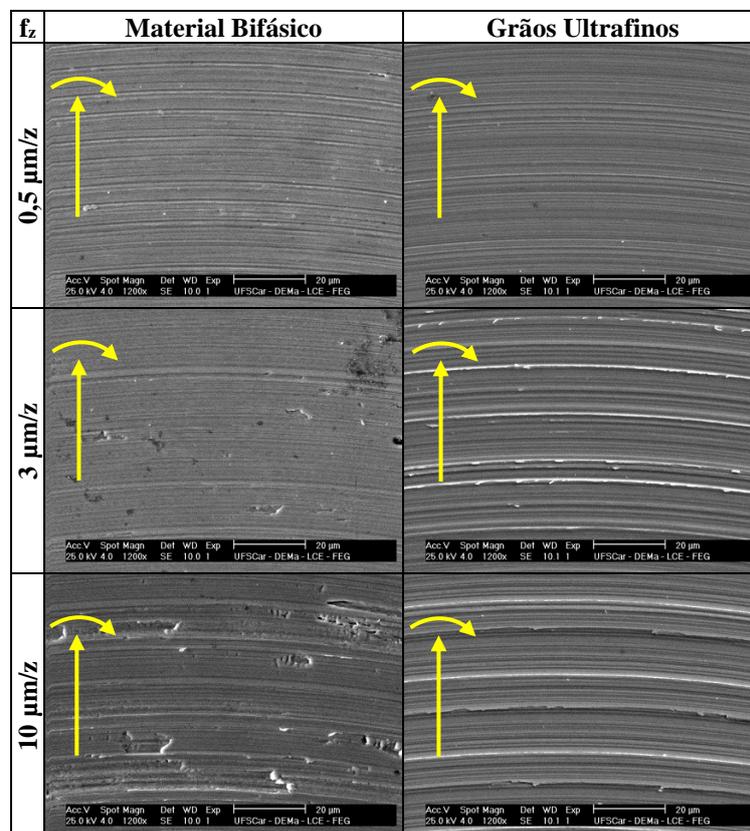
Figura 5. Imagens de MEV das rebarbas para microfresa de 800  $\mu\text{m}$  de diâmetro e 10000 rpm.

É conhecido que o aumento da dureza do material da peça tende a direcionar a formação de rebarbas maiores no lado de saída da aresta de corte devido à redução da mínima espessura de corte (Li & Chou, 2010). No entanto, as características apresentadas pelas rebarbas do material GUF na condição de  $f_z < r_e$  da Figura 5 revelam que houve rompimento de material à frente da ferramenta, aproximadamente no meio do canal. Quando a microfresa não consegue produzir cavaco após a entrada da aresta de corte na peça, um amassamento de material ocorre.

O material a frente da ferramenta é empurrado e deformado plasticamente, e uma fratura ocorre aproximadamente no meio do canal, formando rebarbas com comprimento de cerca de metade do diâmetro da microfresa (Chern *et al.*, 2007). No material CR, para a mesma condição de avanço por dente, o cisalhamento ocorreu após a aresta de corte atingir a mínima espessura de corte, convertendo uma parcela do material a frente da ferramenta em rebarbas na entrada da aresta de corte e a parcela restante em cavaco.

Esta característica da formação das rebarbas na condição de  $f_z < r_e$  para ambos os materiais é condizente com a formação de superfície verificada na Figura 4. A presença de defeitos (desprendimento de material da peça) no material CR é relacionada à má formação do cavaco, sendo indicativo de efeitos mútuos de mínima espessura de corte e cisalhamento parcial do material na peça durante a passagem da ferramenta.

A Figura 6 apresenta imagens de MEV das superfícies da base dos canais para a velocidade de rotação de eixo-árvore de 54000 rpm e ferramenta com diâmetro de 800  $\mu\text{m}$ . Para a condição de  $f_z \geq r_e$ , o material CR apresentou danos na superfície microfresada, enquanto no material GUF foram observadas microrrebarbas direcionadas no sentido contrário ao do avanço da ferramenta. Na condição de  $f_z < r_e$  as superfícies apresentam aspecto semelhante e sem defeitos aparentes.



**Figura 6.** Imagens de MEV da superfície dos canais para microfresa de 800  $\mu\text{m}$  de diâmetro e 54000 rpm.

A Figura 7 apresenta imagens de MEV do topo da lateral dos canais microfresados com velocidade de rotação do eixo-árvore de 54000 rpm e diâmetro da ferramenta de 800  $\mu\text{m}$ . Comparando os materiais, o material GUF apresentou menor formação de rebarbas em ambos os lados do canal e para todas as condições de avanço por dente. Diferentemente do verificado no microfresamento com 10000 rpm da Figura 5, rebarbas com forma de pena foram produzidas no microfresamento com 54000 rpm. Geralmente esta forma de rebarba surge quando ocorre fratura na rebarba primária durante o processo de microfresamento e são geralmente encontradas no lado de entrada da aresta de corte (Chern *et al.*, 2007). O aumento da resistência à deformação devido ao aumento da velocidade de corte antecipou a fratura do material à frente da ferramenta, favorecendo a formação desta forma de rebarba. No lado oposto as rebarbas tenderam a ser removidas devido à ocorrência de cisalhamento e consequente formação de cavaco.

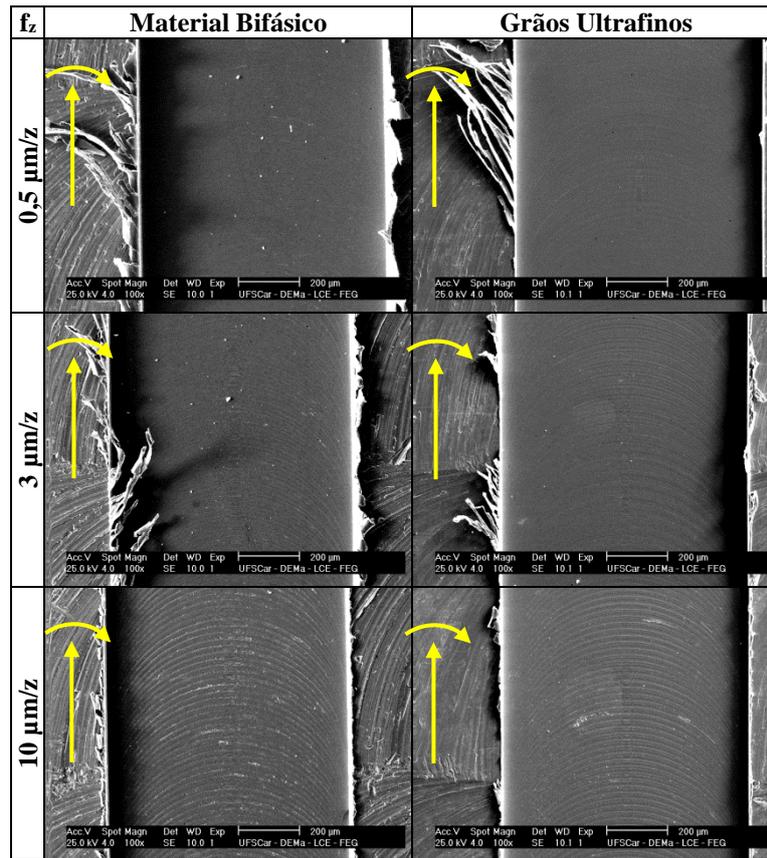


Figura 7. Imagens de MEV das rebarbas para microfresa de 800 µm de diâmetro e 54000 rpm.

Para complemento destes resultados de acabamento, a Figura 8 apresenta o comportamento da rugosidade  $S_a$  medida na superfície da base dos canais. A escolha do parâmetro  $S_a$  para quantificar o acabamento das superfícies usinadas visou facilitar comparações com a literatura. O gráfico da Figura 8a revela o comportamento da rugosidade  $S_a$  considerando microfresas de 200 e 800 µm de diâmetro e velocidade de rotação do eixo-árvore de 10000 rpm. De acordo com a análise do gráfico, a rugosidade aumentou em ambos os materiais de acordo com o incremento de avanço por dente, sendo este aumento mais expressivo no material GUF para microfresa de 200 µm. O material GUF microusinado com microfresa de 800 µm, apresentou menor rugosidade dentre todas as condições. Para ambos os materiais, as microfresas de 800 µm apresentaram menor rugosidade em comparação às microfresas de 200 µm.

Diferentemente do trabalho de Aramcharoen e Mativenga (2009) com aço endurecido e Vogler, DeVor e Kapoor (2004) na microusinagem de aço ferrítico-perlítico, a rugosidade foi crescente com o aumento de  $f_z$  para as condições apresentadas pelos gráficos da Figura 8. A variação da rugosidade no microfresamento com microfresas de 200 µm, observada na Figura 8a, revelou comportamento distinto entre os dois materiais. Enquanto o material CR apresentou aumento quase linear e expressivo da rugosidade, no material GUF a elevação acentuada da rugosidade ocorreu apenas quando o avanço por dente passou a ser maior que o raio de aresta de corte. Para ambos os diâmetros de microfresa, o material GUF apresentou o mesmo comportamento da rugosidade com a variação do avanço por dente.

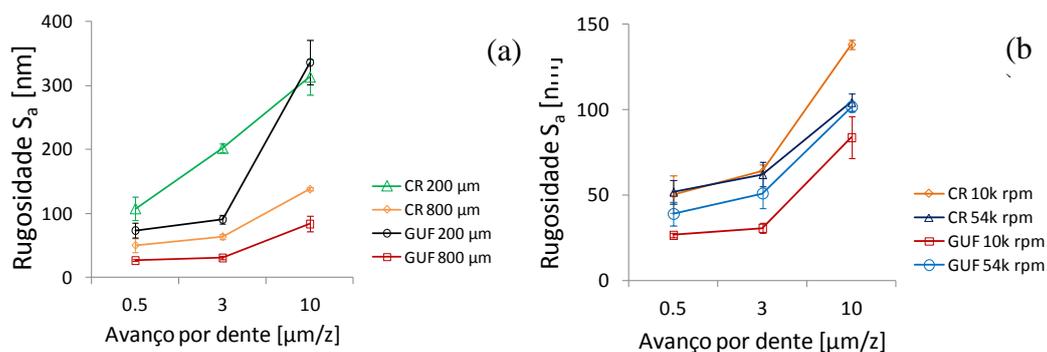


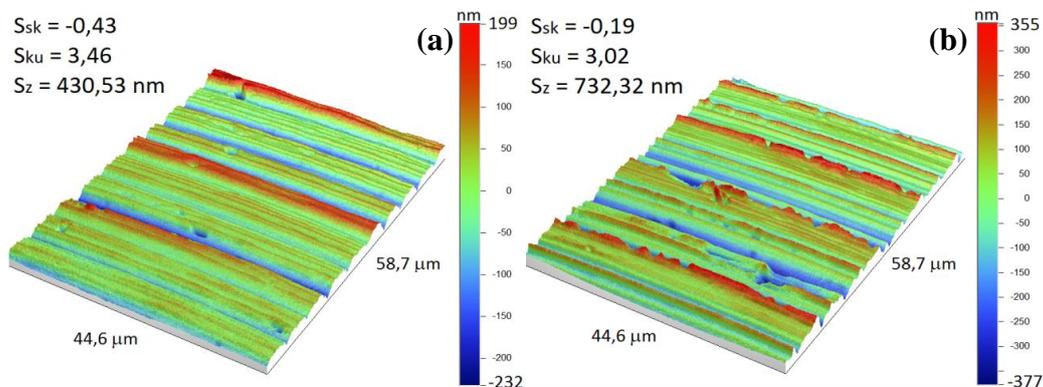
Figura 8. Gráficos de rugosidade média  $S_a$ .

Os resultados apresentados na Figura 8a sustentam as hipóteses feitas nas análises das imagens de MEV das superfícies microfresadas e rebarbas para microfresas com diferentes diâmetros e mesma rotação do eixo-árvores. Com o aumento do diâmetro da ferramenta, o cisalhamento passa a ser o mecanismo de remoção de material preponderante, com formação de cavaco e respectiva redução da formação de rebarbas no lado de saída da aresta de corte, com melhora do acabamento da base do canal, enquanto para as microfresas de menor diâmetro o mecanismo preponderante é o de deformação plástica e fratura.

O gráfico da Figura 8b corresponde ao comportamento da rugosidade  $S_a$  com a variação da velocidade de rotação do eixo-árvores e mesmo diâmetro das microfresas (800  $\mu\text{m}$ ). Conforme observado, a rugosidade aumentou em ambos os materiais de acordo com o incremento de avanço por dente, sendo este aumento mais expressivo no material CR para a rotação de 10000 rpm. O material GUF, para a rotação de 10000 rpm, teve melhor acabamento em comparação a todas as outras condições. Por outro lado o aumento da velocidade de corte prejudicou o acabamento da base do canal. Para o material CR o aumento da velocidade de corte surtiu efeito significativo na rugosidade apenas no avanço de 10  $\mu\text{m}/\text{z}$ .

Em operações de microusinagem o mecanismo de corte é diferente do tradicional. Devido às baixas velocidades de corte empregadas, a aresta de corte falha em remover material por cisalhamento e o efeito de *ploughing* prevalece (Chern et al., 2007). No entanto, a microestrutura do material GUF não gerou defeitos aparentes na superfície da base dos canais e o amassamento do material da peça com a passagem da ferramenta resultou em uma superfície com menor rugosidade, enquanto no aumento da velocidade de corte o material passou a ser removido por cisalhamento. Fato este verificado pela redução das rebarbas no lado de saída da aresta de corte (Figura 7). Estas diferenças na formação da superfície da base dos canais resultaram no melhor acabamento do material GUF, verificado no microfresamento com menor velocidade de corte.

Esta hipótese pode ser avaliada com a análise da Figura 9, através das imagens em 3D das superfícies da base dos canais do material GUF e dos parâmetros de rugosidade *skewness*, *kurtosis* e  $S_z$ , no microfresamento com microfresa de 800  $\mu\text{m}$  de diâmetro na condição de  $f_z = 3 \mu\text{m}/\text{z}$ . O parâmetro de rugosidade *skewness* indica maior preponderância de vales ( $S_{sk} < 0$ ) no microfresamento com 10000 rpm e formação simétrica da superfície ( $S_{sk} \approx 0$ ) no microfresamento com 54000 rpm. Além disso, a natureza da distribuição das elevações (*kurtosis*), indica distribuição normal (curva de sino) no microfresamento com 54000 rpm ( $S_{ku} \approx 3$ ), característica típica de superfícies usinadas geradas por cisalhamento. Esta diferença na formação da superfície causou menor rugosidade no microfresamento com 10000 rpm, conforme análise do parâmetro  $S_z$ , o qual foi de 431 nm com 10000 rpm e 732 nm com 54000 rpm de rotação do eixo-árvores.



**Figura 9. Imagens em 3D das superfícies da base dos canais microfresados do material GUF com microfresas de 800  $\mu\text{m}$  de diâmetro e avanço de 3  $\mu\text{m}/\text{z}$ , e velocidades de rotação do eixo-árvores de (a) 10000 e (b) 54000 rpm.**

Com a redução do volume de material a ser removido, efeitos decorrentes da presença de uma segunda fase mais dura na microestrutura do material (perlita), além da influência de contornos de grão e precipitados, alteram o processo de corte, na medida em que a espessura de corte encontra-se na mesma dimensão do tamanho médio de grão do material. O material com grãos ultrafinos continuou a apresentar o mesmo comportamento da rugosidade, independente da redução do diâmetro das microfresas, ou seja, a homogeneidade da microestrutura e o tamanho reduzido dos grãos favoreceu a usinagem com a redução da escala de usinagem.

As análises realizadas contribuem para a hipótese de que a homogeneização e refino de grão da microestrutura é um caminho viável para a adequação de materiais para a fabricação de componentes em microescala. A formação de defeitos foi substancialmente menor na microusinagem de canais no material GUF. Além disso, o aumento da velocidade de corte não se mostrou eficiente para melhora da qualidade no acabamento da peça no material GUF, apesar de ter favorecido o cisalhamento como mecanismo de remoção de material. Dessa forma, ao invés de viabilizar maiores velocidades de rotação do eixo árvore para sanar problemas de acabamento da peça na microusinagem, a intervenção metalúrgica na microestrutura do material seria uma alternativa para usinagens com baixas velocidades de corte.

#### 4. CONCLUSÕES

Um aço baixo-carbono bifásico (ferrita-perlita) passou por processamento termomecânico para homogeneização e refino dos grãos da microestrutura. Ensaios de microfresamento foram realizados em ambas as condições metalúrgicas. Velocidade de corte, avanço por dente e diâmetro das microfresas foram os parâmetros de controle. Superfície usinada, rugosidade e rebarbas foram avaliados. Com base na análise dos resultados e da literatura, as principais conclusões são apresentadas a seguir:

- O refinamento da microestrutura dos corpos de prova favoreceu o acabamento dos canais microfresados sob diferentes condições de usinagem e diâmetros de ferramentas;
- A microestrutura de grãos ultrafinos apresentou menor valor de rugosidade em comparação ao aço bifásico. Isto foi mais evidente quando o avanço por dente foi similar ou menor que o raio de aresta de ambos diâmetros de microfresa;
- Os resultados mostraram que o mecanismo de formação da superfície foi afetado pelo diâmetro da microfresa, considerando os parâmetros de superfície de máxima rugosidade e kurtosis. Os corpos de prova com grãos ultrafinos apresentaram uma superfície mais lisa quando o avanço por dente foi reduzido, enquanto o material bifásico apresentou vazios na superfície usinada;
- Com o aumento da velocidade de corte, as falhas na superfície das peças foram atenuadas no aço bifásico tanto quanto a formação de rebarbas em ambos os materiais.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradem a FAPESP pelo fomento à pesquisa através do projeto 2013/21526-0 e a Mitsubishi por ceder as microfresas.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Aramcharoen, A., Mativenga, P. T., 2009, "Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel", *Precision Engineering*, Vol. 33, pp. 402-407.
- Assis, C. L. F., Jasinovicus, R. G., Rodrigues, A. R., 2014, "Micro end-milling of channels using ultrafine-grained low-carbon steel", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, online printed.
- Chern et al., G., 2007, "Study on burr formation in micro-machining using micro-tools fabricated by micro-EDM", *Precision Engineering*, Vol. 31, pp. 122-129.
- Fang, N., 2003, "Slip-line modeling of machining with a rounded-edge tool - Part II: analysis of the size effect and the shear strain-rate", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 51, pp. 743-762.
- Li, K., & Chou, S., 2010, "Experimental evaluation of minimum quantity lubrication in near micro-milling", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, pp. 2163-2170.
- Liu et al., X., 2004, "The Mechanics of Machining at the Microscale: Assessment of the Current State of the Science", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 126, pp. 666-679.
- Mian, A. J., Driver, N., & Mativenga, P. T., 2011, "Identification of factors that dominate size effect in micro-machining", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 51, pp. 383-394.
- Okitsu, Y., Takata, N., & Tsuji, N., 2009, "A new route to fabricate ultrafine-grained structures in carbon steels without severe plastic deformation", *Scripta Materialia*, Vol. 60, pp. 76-79.
- Rodrigues A. R., et al., 2010, "Effects of milling condition on the surface integrity of hot forged steel", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science & Engineering*, Vol. 32, pp. 37-43.
- Rodrigues et al., A. R., 2012, "Surface integrity analysis when milling ultrafine-grained steels", *Materials Research*, Vol. 15, pp. 125-130.
- Simoneau, A., Ng, E., & Elbestawi, M. A., 2006, "Chip formation during microscale cutting of a medium carbon steel", *Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, pp. 467-481.
- Vogler, M. P., DeVor, R. E., & Kapoor, S. G., 2004, "On the modeling and analysis of machining performance in micro-endmilling, Part I: surface generation", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 126, pp. 685-694.
- Wang et al., T. S., 2008, "A novel process to obtain ultrafine-grained low carbon steel with bimodal grain size distribution for potentially improving ductility", *Materials Science & Engineering A*, Vol. 485, pp. 456-460.
- Weng, Y., 2009, "Ultra-fine grained steels", Beijing: China Iron & Steel Research Institute Group.

#### 7. DIREITOS AUTORAIS

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

## MICROMILLING OF CHANNELS IN ULTRAFINE GRAINED STEEL

Cleiton Lazaro Fazolo de Assis, fazolocla@usp.br<sup>1</sup>

Renato Goulart Jasinevicius, renatogj@sc.usp.br<sup>1</sup>

Alessandro Roger Rodrigues, roger@sc.usp.br<sup>1</sup>

Reginaldo Teixeira Coelho, rtcoelho@sc.usp.br<sup>1</sup>

<sup>1</sup>São Carlos School of Engineering, Avenida Trabalhador São-carlense 400, Zip Code 13566-590, São Carlos - SP

**Resumo:** During micromachining, the tool/material interaction presents problems related to the material deformation, surface damages and burrs. As a solution to these problems, the use of materials with microstructure in the same scale of the cutting parameters, could be a good agreement. This paper evaluated the effect of microstructures dual-phase (ferrite-pearlite) and ultrafine grained (ferrite) in the micromilling process. The cutting parameters adopted considered the edge radius effect of the micromills. Ultrafine grained material showed better results of finishing, roughness and less burrs. The grain refinement was favorable to the micromilling, enabling new applications to this steel class.

**Palavras-chave:** micromilling, microchannels, microstructure, roughness, burrs

### 1. RESPONSIBILITY NOTICE

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