



A INFLUÊNCIA DAS INCLUSÕES NA USINABILIDADE

Adriana Ana Pereira

GRUCON – Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina.
adrianap@emc.ufsc.br

Lourival Boehs

GRUCON – Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina.
boehs@emc.ufsc.br

Wilson L. Guesser

Tupy Fundições.
wguesser@tupy.com.br

Resumo: O comportamento das inclusões abrasivas e dúcteis, na usinagem do ferro fundido cinzento, foi estudado no torneamento externo longitudinal com ferramenta de metal-duro sem cobertura. Para elucidar a influência das inclusões no desgaste da ferramenta de corte de metal-duro, seções transversais de cavaco foram preparadas, nas quais pode-se observar que as inclusões de carboneto de titânio e as inclusões de carbonitreto de titânio, não são deformadas na região secundária de cisalhamento, ficando demonstrado como potencialmente prejudiciais à usinabilidade. As inclusões de sulfeto de manganês, são intensamente deformadas na região secundária de cisalhamento, durante a formação do cavaco, aderindo nas superfícies das ferramentas, contribuindo desta forma para a redução do desgaste da ferramenta, por adesão e difusão.

Palavras-chave: inclusões abrasivas, inclusões dúcteis, usinabilidade.

1. INTRODUÇÃO

As inclusões, presentes nos metais fundidos, podem ser obtidas como resultado de impurezas na liga ou propositalmente introduzidas para melhorar determinadas propriedades. Inclusões abrasivas e dúcteis são geralmente adicionadas para melhorar a resistência ao desgaste e a usinabilidade, respectivamente.

Melhorar a usinabilidade do material é de grande interesse, em razão do seu significativo impacto sobre a competitividade industrial. No entanto, a adição das inclusões abrasivas, com o intuito de melhorar a resistência ao desgaste de determinados componentes, resulta no detrimento da usinabilidade. Para facilitar o entendimento da relação existente entre a característica da inclusão e a sua influência na usinabilidade, é apresentada a caracterização das inclusões presentes no ferro fundido cinzento e o seu comportamento na região secundária de cisalhamento quando da formação do cavaco.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA PARA O TRABALHO

As inclusões podem ser obtidas devido à presença de impurezas na sucata, à elementos empregados na inoculação ou adicionados propositalmente para melhorar determinadas propriedades de alguns componentes.

Nos ferros fundidos, o titânio forma pequenas partículas de carboneto de titânio, inseridas na matriz, com dureza em torno de 3000 DPH. O titânio também consome boa parte de nitrogênio

disponível no metal, formando nitreto de titânio (Laird, 2000) e carbonitreto de titânio que é uma solução sólida de carboneto de titânio e de nitreto de titânio.

Nos discos de freios, produzidos com ferros fundidos de alto carbono, o aumento da quantidade de grafita é compensado pela adição de elementos formadores de carbonetos e/ou carbonitreto, como o titânio e o nióbio, introduzindo partículas duras na matriz para aumentar a resistência ao desgaste (Guesser, 2003). Além disto, o titânio melhora propriedades de fricção, evitando o travamento do sistema de freios (1981 apud. Guesser, 2003).

O nióbio pode ser intencionalmente adicionado para formar inclusões de carbonetos de nióbio, com dureza de 2000 – 2500 DPH (Laird, 2000), para melhorar a resistência ao desgaste das camisas de cilindro do ferro fundido cinzento (1984 apud. Guesser e Guedes, 1997) e em anéis de ferro fundido dúctil (1995 apud. Guesser e Guedes, 1997).

Nas camisas de cilindro é adicionado fósforo para formar steadita e assim melhorar a resistência ao desgaste. A steadita é uma fase eutética entre o ferro e o fósforo. Quando o fosfeto de ferro e o carboneto de ferro combinam, na microestrutura do ferro fundido, um eutético ternário de ferro, carbono e fósforo é formado.

O enxofre, presente na sucata e no coque, tem uma forte afinidade pelo manganês, resultando na formação das inclusões de sulfeto de manganês durante a solidificação. A presença destas inclusões na matriz não promove melhoras nas propriedades mecânicas do ferro fundido cinzento, no entanto, contribui de forma positiva na sua usinabilidade do material. Frequentemente, as inclusões de sulfeto de manganês aderem na ferramenta, formando uma película protetora e melhorando a usinabilidade. A seguir é apresentada a influência das inclusões dúcteis e abrasivas na usinabilidade do ferro fundido cinzento.

2.1 Influência das Inclusões Abrasivas e Dúcteis na Usinabilidade

Os carbonitreto de titânio, Figura 1a e a steadita, Figura 1b, quando pressionadas sobre outra superfície de menor dureza, geram um fluxo plástico na região de contato. Nas ferramentas de corte, as inclusões abrasivas presentes na peça geram uma elevada tensão localizada, resultando na deformação plástica da superfície da ferramenta. Quando um movimento relativo é imposto às superfícies, ocorre uma micro-usinagem na superfície da ferramenta com remoção de material pela ação das partículas abrasivas presentes na peça.

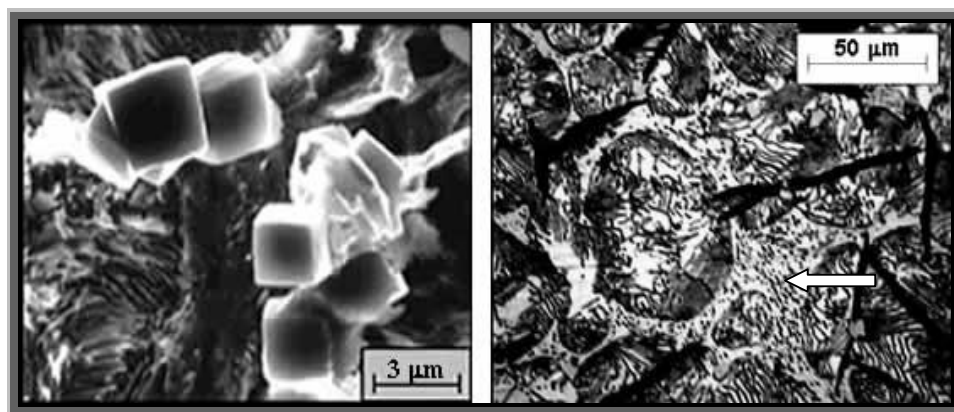


Figura 1: (a) Inclusões de carbonitreto de titânio (Kassack e Reuter, 2002).
(b) Steadita no ferro fundido cinzento (Cortesia da empresa Tupy Fundições)

Uma alteração na quantidade de titânio no material da peça, de 0,01 para 0,02%, é suficiente para reduzir a vida da ferramenta de metal-duro em aproximadamente 50%, devido à maior dureza das inclusões de carbonitreto de titânio presente no material da peça, Figura 1a, em relação as inclusões de carbonetos de titânio encontrado nas ferramentas de metal-duro (Dawson, 1999; Sahm, 2002).

No ferro fundido cinzento, além das inclusões prejudiciais à usinabilidade, é possível encontrar inclusões benéficas, por exemplo, o sulfeto de manganês. Em condições favoráveis estas inclusões promovem a formação de um filme, quimicamente estável (Poulachon, 2002), tipicamente observado no torneamento (Sahm, 2002; Fang e Zhang, 1996, Qi e Mills, 1996), protegendo a ferramenta dos desgastes por adesão e difusão (Qi e Mills, 1996).

Na região secundária de cisalhamento, Figura 2, as inclusões de MnS atuam no interior do material reduzindo a tensão de cisalhamento (Araki e Yamamoto, 1975) através da propagação de micro-trincas (Poulachon, 2002), conseqüentemente, reduzindo a força de corte.

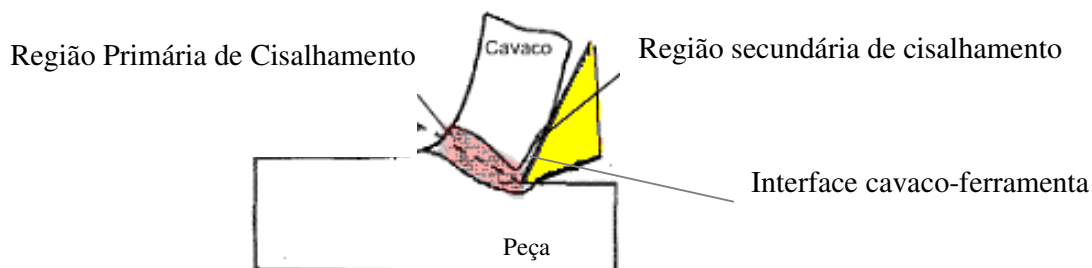


Figura 2: Regiões de atuação das inclusões de MnS.

A interação entre as inclusões e a matriz, na região primária de cisalhamento, Figura 2, gera uma intensa concentração de tensão em torno das inclusões, induzindo a formação de micro-trincas na região primária de cisalhamento, reduzindo, conseqüentemente, a força de corte.

A iniciação de micro-trincas na região primária de cisalhamento, como resultado da diferente deformabilidade entre as inclusões e a matriz, favorece a fragmentação do cavaco e conseqüentemente a redução do comprimento de contato cavaco-ferramenta contribuindo para a diminuição da temperatura na ferramenta.

Devido ao importante papel das inclusões na interface cavaco-ferramenta e peça-ferramenta este trabalho tem por objetivo investigar o comportamento e a influência das inclusões abrasivas e dúcteis na usinagem do ferro fundido cinzento

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Caracterização do Material da Peça

O ferro fundido cinzento FC 25 foi empregado nesta pesquisa. O material da peça apresenta uma dureza de 200 HB e limite de resistência à tração de 240 MPa. O número de células eutéticas por mm^2 , Figura 3c, é de 80. O material é formado por uma matriz perlítica, Figura 3b, contendo grafita tipo A, Figura 3a.

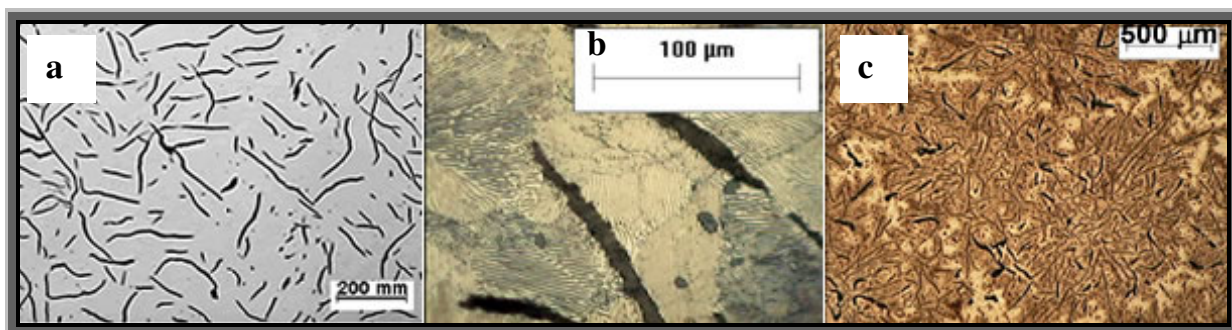


Figura 3: (a) classificação da grafita segundo a norma ASTM A247. (b) matriz perlítica. Reagente: Nital. (c) células eutéticas. Reagente: Stead.

Para assegurar homogeneidade microestrutural ao longo da seção transversal, os corpos de prova foram fundidos com espessura de 30 mm, 400 mm de comprimento e 120 mm de diâmetro externo.

3.2 Caracterização das inclusões

Um microscópio eletrônico de varredura, modelo Phillips XL30, com filamento de tungstênio e janela de polímero superfina, permitindo detectar elementos com número atômico maior que cinco, foi empregado para identificação das inclusões presentes no material da peça. Este equipamento possui acoplado um espectrômetro de energia dispersiva, através do qual foi possível realizar a microanálise química das inclusões presentes na peça e no cavaco.

Os cavacos utilizados na análise foram obtidos no processo de torneamento externo longitudinal num torno convencional com ferramentas SNMA 120408 de metal duro, sem cobertura, classe KR3015. Os parâmetros de corte empregados foram $f = 0,257$ mm e $a_p = 2$ mm. As amostras metalográficas das seções transversais do cavaco foram preparadas para observar o comportamento das inclusões durante a usinagem. Inicialmente, o cavaco foi coberto com nitrato de prata para reduzir a sua fragilidade, facilitando o manuseio. Para retenção de bordas durante o polimento, as amostras de cavaco foram embutidas em resina de alta dureza. A preparação das amostras metalográficas consistiu no lixamento, com lixas de carbetto de silício, até a lixa com tamanho de grão de 1500 mesh, e no polimento com pasta de diamante de granulometria $0,25 \mu\text{m}$. Como lubrificante, durante o polimento, foi utilizado álcool etílico.

Para revelar a microestrutura das amostras metalográficas das seções transversais dos cavacos foi utilizado o reagente nital. Assim, foi possível correlacionar a deformação das inclusões com a deformação da microestrutura na região secundária de cisalhamento.

A medição da microdureza na região secundária de cisalhamento, apresentada na Figura 8, foi realizada empregando um microdurômetro da marca Schimadzu, modelo HMV-2. Utilizou-se uma carga de 0,05 kgf durante um tempo de 5 segundos. A pequena carga aplicada deve-se à pequena área disponível para medição.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como apresentado na breve revisão bibliográfica, tão importante quanto a caracterização da matriz é a identificação e a quantificação das inclusões, devido à sua influência na usinabilidade. A identificação e a quantificação das inclusões presentes na matriz possibilita avaliar qualitativamente a usinabilidade do material da peça. No ferro fundido cinzento empregado nesta pesquisa há tanto inclusões benéficas quanto prejudiciais à usinabilidade. Como inclusões prejudiciais à usinabilidade, encontra-se o carboneto de titânio, Figura 4, o carboneto de molibdênio, Figura 5, e o carbonitreto de titânio e nióbio, Figura 6.

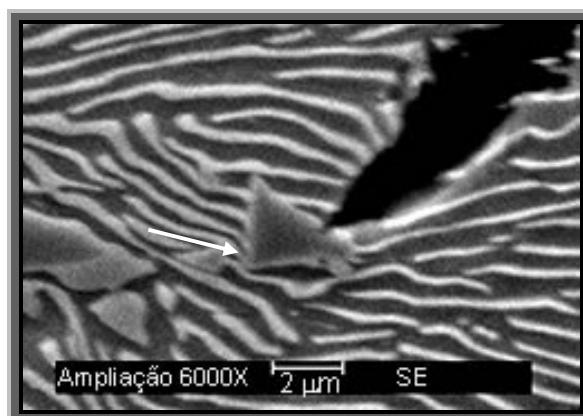


Figura 4: Inclusão de Ti(C,N) com cromo dissolvido.

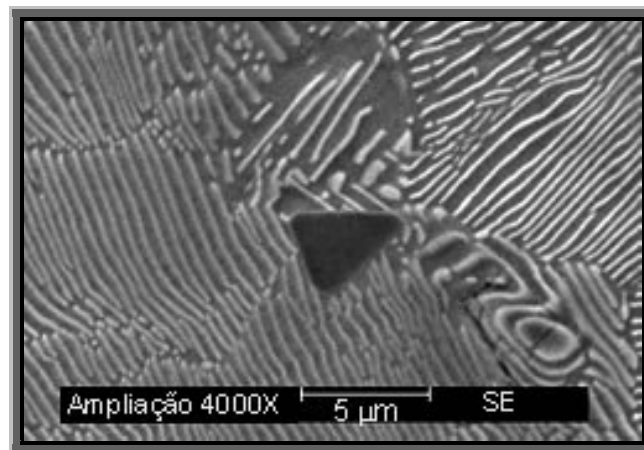


Figura 5: Inclusão de Mo_2C com manganês dissolvido.

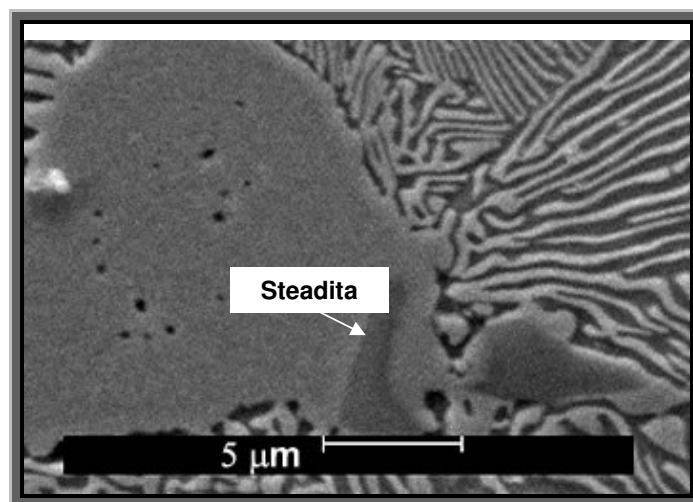


Figura 6: Inclusão de carbonitreto de titânio e nióbio com cromo dissolvido.

Pode-se observar na Figura 7 que as inclusões com alta dureza, em relação à matriz perlítica, não são deformadas plasticamente na região secundária de cisalhamento, mesmo quando as condições de temperatura e pressão desenvolvidas na interface cavaco-ferramenta são suficientes para promover alterações microestruturais na região secundária de cisalhamento. Assim, fica demonstrado que as inclusões de TiC são potencialmente prejudiciais à usinabilidade

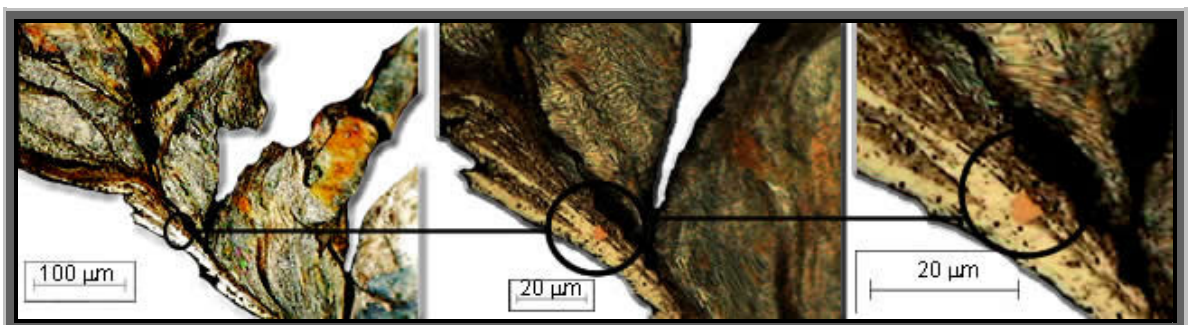


Figura 7: Inclusão de carbonitreto de titânio na região secundária de cisalhamento. Reagente: nital

Apesar da intensa pressão e da elevada tensão de compressão e de cisalhamento na região secundária de cisalhamento, Figura 8, a inclusão de TiC não foi deformada plasticamente, Figura 7, devido à sua elevada dureza, contribuindo, possivelmente, para o desgaste por abrasão na ferramenta de corte. É esperado também, devido à sua dureza, que as inclusões de Mo₂C, Figura 5, sejam prejudiciais à usinabilidade.

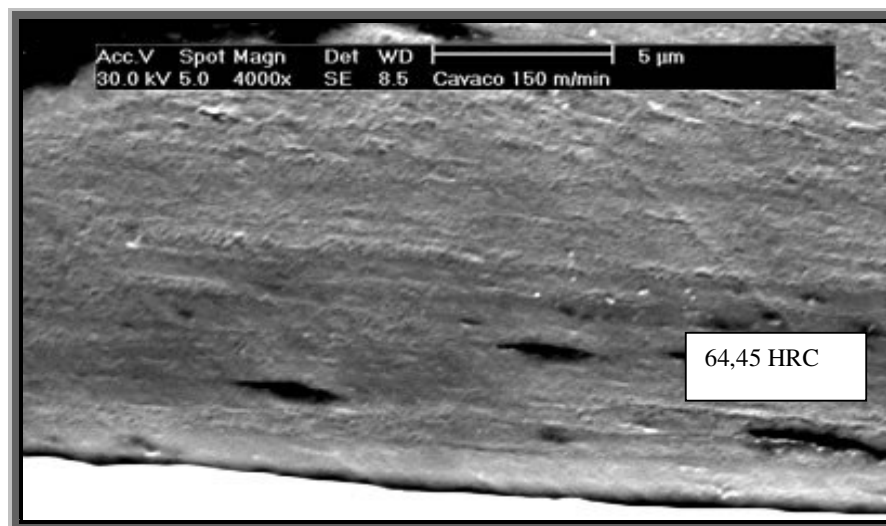


Figura 8: Região secundária de cisalhamento. (0,065% S e $v_c = 150\text{m/min}$). Reagente: nital.

Embora o eutético Fe-P-C, Figura 9, não seja uma inclusão, segundo Goodrich (1997) este também é prejudicial à usinabilidade, devido à sua dureza.

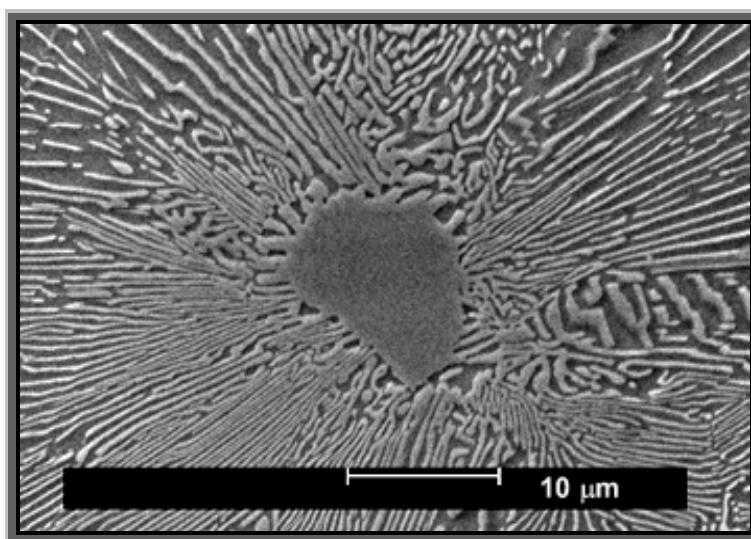


Figura 9: Eutético Fe-C-P, no ferro fundido cinzento, com Cr e Mn dissolvido. Reagente: nital.

Um eutético de Fe-C-P não deformado plasticamente é mostrado na região secundária de cisalhamento, Figura 10, apesar da elevada temperatura e da intensa tensão compressiva e de cisalhamento reinante nesta parte do cavaco.

A Figura 10 mostra o comportamento do eutético Fe-C-P na região secundária de cisalhamento. Comparando com a deformação das inclusões de MnS, Figura 12 e 13, e com a inclusão de carboneto de titânio, Figura 7, na mesma região, fica demonstrado que o eutético Fe-C-P pode ser considerado como particularmente prejudicial à usinabilidade.

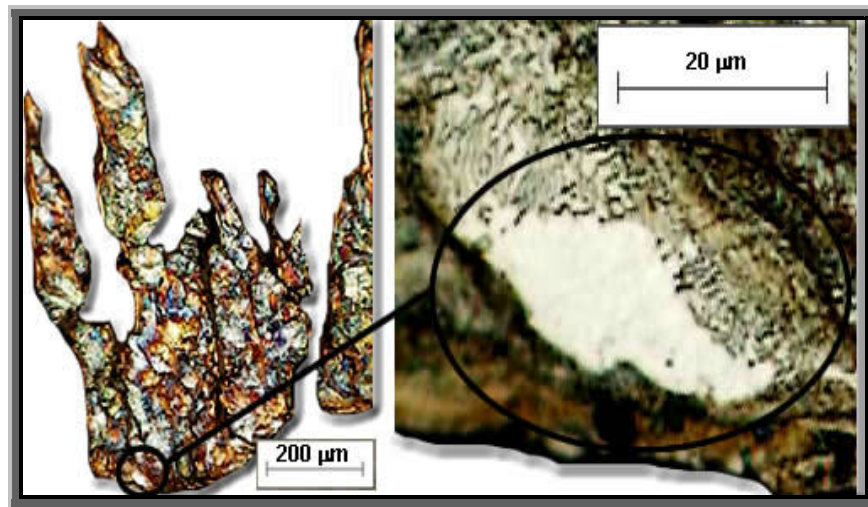


Figura 10: Eutético Fe-C-P no cavaco do ferro fundido cinzento FC 25. Reagente: nital.

Como inclusão benéfica à usinabilidade, encontra-se o sulfeto de manganês, Figura 11. Quando na interface cavaco-ferramenta, esta inclusão promove a redução do desgaste por adesão e difusão da ferramenta de corte (Ana Pereira et al, 2005). A Figura 12 e Figura 13 mostram a inclusão de sulfeto de manganês na região secundária de cisalhamento.

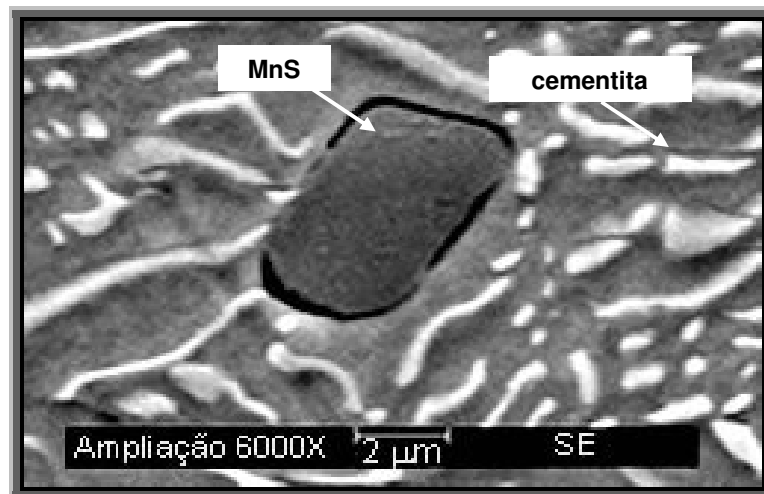


Figura 11: Inclusão de MnS no ferro fundido cinzento FC 25 com 0,15% S. Reagente: nital.

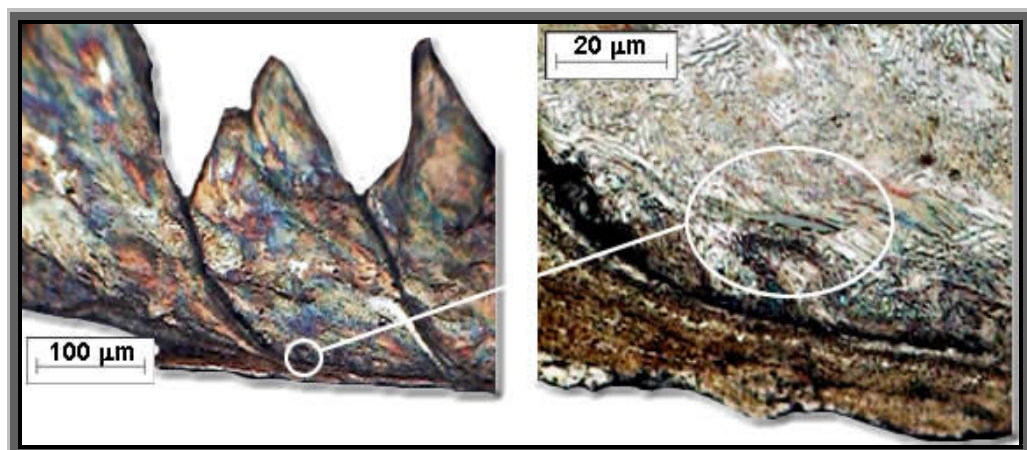


Figura 12: Inclusão de MnS. (0,065% S e $v_c = 150\text{m/min}$). Reagente: nital.

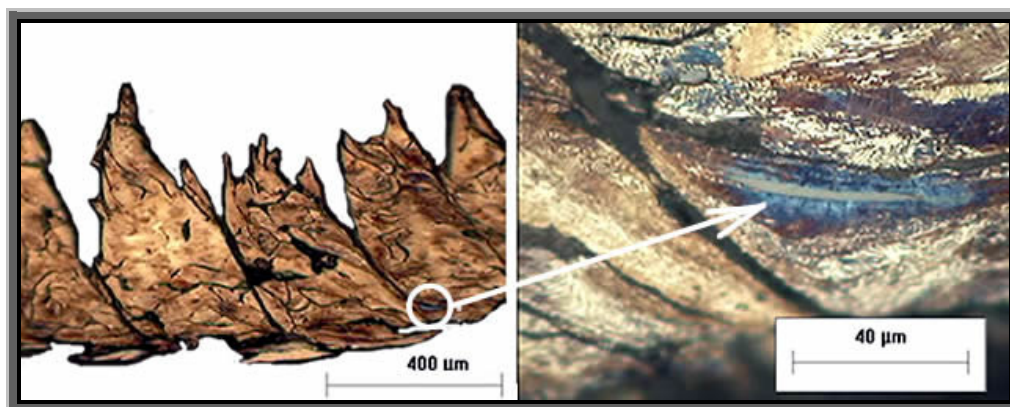


Figura 13: Inclusão de MnS. (0,12% S e $v_c = 150\text{m/min}$). Reagente: nital.

A intensa deformação plástica das inclusões de sulfeto de manganês, na região secundária de cisalhamento, pode ser observada nas Figuras 12 e 13. É possível constatar, também, a influência do teor de enxofre na área da inclusão de sulfeto de manganês. Para o material com 0,065% de enxofre a inclusão de sulfeto de manganês apresenta um comprimento de aproximadamente 20 μm , enquanto que a inclusão de sulfeto de manganês no ferro fundido cinzento com 0,12% S apresenta um comprimento de aproximadamente 40 μm . Desta forma, é esperado que o percentual de enxofre conduza a diferentes resultados de usinabilidade em razão da alteração das características das inclusões de MnS. Segundo Ana Pereira et al. (2005) um aumento no teor de enxofre de 0,065% para 0,12% de enxofre, no ferro fundido cinzento FC25, promove um aumento na vida da ferramenta de corte de 24%, 32% e 38%, para as velocidades de 100, 150 e 200 m/min, respectivamente.

A amostra metalográfica de cavaco, Figura 14, mostra a inclusão de MnS encapsulada pelo eutético Fe-P-C. Embora a matriz perlítica apresente-se deformada plasticamente, o mesmo não é observado nas inclusões de sulfeto de manganês, isto porque o eutético Fe-P-C inibiu a deformação das inclusões de MnS.

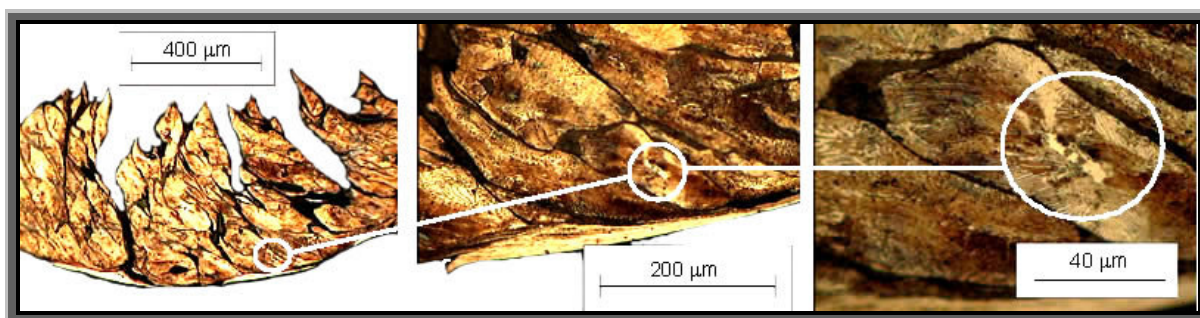


Figura 14: Inclusão de MnS encapsulada pela steadita no cavaco do ferro fundido cinzento usinado a $v_c=150\text{ m/min}$. Reagente: Nital.

Dentro deste quadro de resultados são apresentadas as conclusões aqui discutidas.

5. CONCLUSÕES

Dependendo das características e quantidade das inclusões presentes na peça, diferentes resultados de usinabilidade podem ser obtidos. Assim, a caracterização das inclusões presentes no material da peça torna-se um assunto sublinhado como importante. Para elucidar a influência das inclusões na vida da ferramenta, secções transversais de cavaco foram preparadas, das quais pode-

se observar que as inclusões com alta dureza, em relação à matriz perlítica, não são deformadas plasticamente na região secundária de cisalhamento, ficando demonstrado como potencialmente prejudiciais à usinabilidade. Entre as inclusões prejudiciais à usinabilidade destacam-se: TiC, Ti(C,N) e Mo₂C.

Resultante da demonstração do comportamento das inclusões de sulfeto de manganês na região secundária de cisalhamento, se apóia a afirmação da característica dúctil destas inclusões durante a usinagem. Pode-se observar, também, a influência do teor de enxofre na área da inclusão de sulfeto de manganês. Desta forma, é esperado que o percentual de enxofre conduza a diferentes resultados de usinabilidade em razão da alteração das características das inclusões de MnS.

6. AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica (PosMec) da Universidade Federal de Santa Catarina e ao Usicon pelo suporte financeiro, a Capes pela bolsa de pesquisa e a empresa Tupy Fundições Ltda. pelo apoio técnico, fornecimento de matéria prima e bibliográfico utilizados neste trabalho.

7. REFERÊNCIAS

- ANA PEREIRA, Adriana., et all. 2005, “The Influence of Sulfur on Machinability of Gray Cast Iron FC25”. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON MANUFACTURING SYSTEMS, 38th, Florianópolis. Anais eletrônicos... Brazil-Florianópolis: CIRP, 2005. CD-ROM.
- ARAKI, T. e YAMAMOTO, S., 1975, In: INFLUENCE OF METALLURGY ON MACHINABILITY, 7, 1975. Proceedings of the International Symposium on Influence of Metallurgy on Machinability. United States of America: American Society for Metals. p.159-173.
- DAWSON, S. et all., 1999, “The Effect of Metallurgical Variables on The Machinability of Compacted Graphite Iron”. In: COMPACTED GRAPHITE IRON DESIGN AND MACHINING WORKSHOP. Bad Nauheim, Germany.
- FANG, X. D., e ZHANG, D., 1996, Wear, n. 197, p.169-178.
- GUESSER, Wilson L. et all., 2003, “Ferros Fundidos Empregados para Discos e Tambores de Freio”. In: BRAKE COLLOQUIUM, SAE, 2003, Brasil-Gramado.
- GUESSER, Wilson L., e GUEDES, Carlos L. , 1997, “Desenvolvimentos Recentes em Ferros Fundidos Aplicados à Industria Automobilística”. SEMINÁRIO DA ASSOCIAÇÃO DE ENGENHARIA, AEA, 1997, Brasil-São Paulo.
- KASSACK, J., e REUTER, U., 2002, “Audi CGI Production Planning”. In: COMPACTED GRAPHITE IRON, 2002, Darmstadt. Machining Workshop.
- LAIRD, G. et al. Abrasion Resistant - Cast Iron Handbook. Illinois: AFS American Foundry Society, 2000. p.9-103.
- POULACHON, G. et all., 2002, Wear, n. 253, p. 339–356.
- QI, H. S., e MILLS, B., 1996, “On the Formation Mechanism of Adherent Layers on a Cutting Tool”. Wear, n. 198, p. 192-196.
- SAHM, A. et all., 2002, In: COMPACTED GRAPHITE IRON, 2002, Darmstadt. Machining Workshop.
- TONG, C.P. et al. , 1989 “Eutectic Solidification of High Chromium Cast Irons”. Proceedings of the Fourth International Symposium on the Physical Metallurgy of Cast Iron. Tokyo, Jpan: Materials Research Society. p.403-410.

THE INFLUENCE OF INCLUSIONS ON MACHINABILITY

Adriana Ana Pereira

GRUCON – Dept. of Mechanical Engineering. Federal University at Santa Catarina.
adrianap@emc.ufsc.br

Lourival Boehs

GRUCON – Dept. of Mechanical Engineering. Federal University at Santa Catarina.
boehs@emc.ufsc.br

Wilson L. Guessser

Tupy Fundições. Metallurgical Engineering. Joinville/SC.
wguessser@tupy.com.br

Abstract: *The behavior of hard and ductile inclusions, on machinability of gray cast iron, was studied on longitudinal turning process with uncoated cemented carbide tool. To clarify the influence of inclusions on tool wear, chips were prepared. They show that inclusions of titanium carbide and titanium carbonitride, do not are deformed on secondary shear zone. The inclusions of manganese sulfide are extremely deformed on secondary shear zone, during the chip formation, adhering on tool surface, reducing the adhesive and diffusive wear.*

Keywords: *abrasive inclusions, ductile inclusions, machinability.*