

**INFLUÊNCIA DE PARTÍCULAS METÁLICAS NA USINABILIDADE DE AÇOS SOB ELEVADAS VELOCIDADES DE CORTE ( $v_c > 100$  m/min) EM OPERAÇÕES DE TORNEAMENTO.**

**WALTER LINDOLFO WEINGAERTNER**

Laboratório de Mecânica de Precisão - LMP  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Caixa Postal - 476 - EMC  
Campus Universitário - Trindade  
88.040-970 - Florianópolis - SC  
Fone: (048) 331 9395 ou 234 5277  
Fax: (048) 234 1519  
e-mail: wlw@emc.ufsc.br

**ELIENE OLIVEIRA LUCAS**

Laboratório de Mecânica de Precisão - LMP  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Universidade Federal de Santa Catarina  
e-mail: eliene@lmp.ufsc.br

**PEDRO AMADEO NANNETTI BERNARDINNI**

Laboratório de Materiais - LABMAT  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Universidade Federal de Santa Catarina  
e-mail: pedro@materiais.ufsc.br

**Resumo.** *Historicamente o aumento da produtividade na usinagem tem sido obtido mediante: a) aumento da potência do equipamento, b) emprego de ferramentas que propiciem maior resistência às solicitações de usinagem, c) otimização dos parâmetros de usinagem e d) desenvolvimento de aços de melhor usinabilidade. Existem diferentes técnicas de melhoria da usinabilidade de aços, sendo que cada uma delas é eficaz dentro de um contexto específico. Assim, em aços sem responsabilidade de desempenho mecânico, a usinabilidade é a propriedade principal, então utiliza-se teores mais elevados de S e Mn visando maior fração de sulfetos de manganês (aços de corte fácil). Por outro lado, em aços onde a usinabilidade não é a principal exigência, pode-se empregar partículas metálicas insolúveis na matriz visando melhoria de usinabilidade sem prejuízo do quesito principal (por exemplo: propriedades mecânicas). O emprego de tais partículas já é conhecido há algumas décadas, época na qual as velocidades de corte utilizadas eram inferiores às atuais. Entretanto, desconhecem-se dados de literatura referentes ao benefício do emprego desta estratégia sob elevadas velocidades de corte. O objetivo deste trabalho consiste na caracterização da influência da presença de partículas metálicas de bismuto na usinabilidade de aços sob*

*condições elevadas de velocidade de corte. Apresenta-se ainda uma revisão bibliográfica referente às solicitações do material (sob condições de usinagem), critérios de avaliação de usinabilidade, fatores microestruturais que afetam a usinabilidade e os resultados referentes à presença de partículas metálicas sob elevadas velocidades de corte.*

**Palavras-chave:** *Usinabilidade, Microestrutura e Inclusões metálicas.*

## 1. INTRODUÇÃO

A usinabilidade é uma propriedade dos materiais dependente das condições de corte e de muitos outros parâmetros. Desta forma, grandezas características do processo de usinagem são consideradas como critérios de avaliação da usinabilidade. Os critérios de vida da ferramenta, acabamento superficial, força de corte e formação de cavaco são considerados, independentes ou combinados, como medida da usinabilidade de um sistema. A avaliação da usinabilidade, em termos de tais parâmetros, requer uma razoável repetibilidade dos dados, de forma a alcançar resultados significativos e para se obter um índice de usinabilidade é necessário utilizar métodos baseados na comparação dos resultados obtidos na usinagem de diferentes materiais (Micheletti, 1986).

A importância em se compreender o comportamento dos fatores influentes tem estimulado uma quantidade razoável de pesquisas que tratam da verificação da usinabilidade dos aços, principalmente em operações de torneamento, fresamento e furação. As pesquisas realizadas até os dias atuais confirmam que a usinabilidade depende em grande parte dos seguintes fatores relativos ao material da peça: microestrutura, propriedades mecânicas, composição química, processos de conformação a quente e/ou a frio e tratamento térmico. Tais fatores são considerados pelos metalurgistas que visam estabelecer uma relação entre a estrutura cristalina dos aços e os critérios de avaliação da usinabilidade. O desgaste da ferramenta e a formação do cavaco são dois critérios distintos considerados pela metalurgia voltada à otimização da usinagem. O desgaste da ferramenta depende em grande parte das condições de atrito desenvolvidas entre as inclusões presentes no material da peça e a ferramenta durante o processo de corte. A compreensão do processo de fratura, associado à formação do cavaco no corte dos metais, é fundamental para melhorar a usinabilidade de uma determinada classe de aços. O mecanismo de formação de cavaco é fortemente influenciado pela presença de inclusões na microestrutura do material a ser usinado.

Tradicionalmente, aditivos de corte fácil, tais como enxofre, chumbo ou bismuto, são adicionados aos aços (combinados ou isoladamente) formando inclusões, que favorecem o processo de fratura do cavaco em baixas e moderadas velocidades de corte ( $v_c < 100$  m/min) através do processo de formação, crescimento e coalescimento de microtrincas.

As pesquisas atuais, voltadas à otimização da microestrutura ao corte sugerem a combinação de técnicas de controle das inclusões, ajustando-se às necessidades dos fabricantes de peça, melhorando desta forma a usinabilidade sem comprometer as características de emprego do material. Em altas velocidades de corte ( $v_c > 100$  m/min) tem-se procurado reduzir ou modificar as partículas duras e abrasivas da matriz. Isto pode ser alcançado, por exemplo, através da obtenção de aços com baixo teor de oxigênio, ou através do tratamento ao cálcio. Em baixas velocidades de corte ( $v_c < 100$  m/min) é conveniente favorecer a formação de inclusões metálicas (chumbo ou bismuto) ou aumentar o teor de enxofre (favorecendo a formação de sulfetos de manganês) nos aços. O efeito benéfico da adição de inclusões metálicas de chumbo aos aços, tendo em vista a melhoria da usinabilidade, foi reconhecido há mais de quarenta anos. Entretanto, em virtude da natureza

tóxica do chumbo (geração de vapores tóxicos na fabricação dos aços) há uma forte pressão dos órgãos ambientalistas internacionais em proibir sua adição aos aços, o que tem levado as indústrias siderúrgicas a eliminarem completamente o chumbo do espaço de fabricação (Lucas, 1998).

O bismuto tem sido utilizado como inclusão metálica, de forma substitutiva ao chumbo, pelo fato de ser um metal comprovadamente atóxico. Resultados satisfatórios alcançados em ensaios de usinabilidade de algumas classes de aços, com microestrutura modificada pela adição de inclusões metálicas de bismuto, têm estimulado pesquisas que visam o desenvolvimento de novas classes de aços de usinabilidade melhorada. Entretanto não há referência na literatura sobre a usinabilidade de aços com inclusões metálicas, em operações de torneamento, com o uso de altas velocidades de corte.

## 2. USINABILIDADE DOS METAIS

### 2.1. Correlação entre propriedades mecânicas e usinabilidade

O mecanismo de formação de cavaco envolve cisalhamento, sendo razoável se esperar que a ductilidade seja o parâmetro controlador da usinabilidade. Por outro lado as solicitações durante a usinagem de um material se caracterizam por:

- Elevada taxa de cisalhamento (tipicamente da ordem de  $10^5/s$ );
- Elevada quantidade de cisalhamento (de 200 a 400 %);
- Cisalhamento em uma região (volume) extremamente localizada (“plano” de cisalhamento);
- Temperaturas elevadas.

Os ensaios de laboratório utilizados para avaliação da ductilidade (ou fragilidade) dos materiais, tais como tração, impacto (desde “charpy” até por explosão) situam-se sob condições de solicitação distintas daquelas existentes na usinagem e, por isso, não geram correlações válidas entre as propriedades (mecânicas) e desempenho na usinabilidade (Lucas, 1998).

A velocidades de deformação na usinagem são muito superiores às aquelas normalmente alcançadas em ensaios convencionais de tração e impacto:

- Na usinagem com formação de cavaco  $\dot{\gamma} = 10^2$  a  $10^6$  /s;
- Em ensaios de tração estática  $\dot{\gamma} = 0,01/ s$ ;
- Nos ensaios de impacto  $\dot{\gamma} = 10^2$  a  $10^3$  /s .

Devido a estas considerações é possível compreender as dificuldades encontradas em se correlacionar as características do material, através de dados obtidos em ensaios convencionais, com as condições reais que o material apresenta quando sujeito ao processo de usinagem com formação de cavaco.

A dureza é uma propriedade comumente utilizada pelos fabricantes de peças como um indicador de usinabilidade , de forma que um material com maior dureza é considerado como de pior usinabilidade. Mas tem sido demonstrado que a correlação entre dureza e usinabilidade é muito fraca, no sentido de que aços de mesma dureza e mesma composição química, porém com microestruturas diferentes, podem apresentar usinabilidades diferentes (Lucas, 1998).

Para os materiais moles (aços ferríticos e ferríticos-perlíticos de baixo carbono) um aumento da dureza se reflete na melhoria da usinabilidade, ao passo que para os aços duros um aumento complementar na dureza piora a usinabilidade.

Esta inversão de tendência se deve ao fato de que materiais moles, por possuírem excesso de ductilidade, geram fenômenos de gume posição ou formação de cavacos contínuos,

portanto, um aumento na dureza tende a melhorar a usinabilidade. Materiais duros geram excessivo desgaste da ferramenta, elevados esforços de corte bem como temperaturas de corte elevadas, portanto, uma redução na dureza tende a aumentar a usinabilidade (Lucas, 1998).

Embora não se disponha de um método laboratorial de avaliação de uma propriedade mecânica fundamental que se correlaciona satisfatoriamente com usinabilidade, a propriedade de um material é determinada pela microestrutura e, neste sentido, o controle microestrutural tem conseqüências imediatas na usinabilidade (Lucas, 1998).

## **2.2. Fatores que influenciam a usinabilidade**

Os custos relativamente elevados dos processos de usinagem tais como torneamento, furação e fresamento têm atraído a atenção de forma a melhorar a produtividade. O aumento da produtividade no processo de usinagem do aço só pode ser alcançado através de um estreito controle dos fatores que afetam a usinabilidade.

A metalurgia voltada à usinabilidade tem como seu principal foco a modificação da microestrutura, particularmente atuando sobre as inclusões, sem entretanto comprometer as características de aplicação do componente usinado. Os resultados obtidos durante a usinagem de um material sob este aspecto, são basicamente relacionados com as condições de atrito entre o par ferramenta/peça (o que incide diretamente no mecanismo de desgaste por abrasão) e no aumento da fragmentabilidade do cavaco, que por sua vez favorece a automatização dos processos reduzindo os custos.

## **2.3. Fatores relativos à microestrutura do material**

A microestrutura (caracterizada pela natureza, forma, quantidade e distribuição das fases presentes no material) determina as propriedades mecânicas e, portanto, a usinabilidade do material. Uma dada microestrutura é resultante da composição química e das etapas de processamento pelas quais são submetidos os aços. Por outro lado, esta microestrutura pode se alterada mediante tratamentos térmicos ou termo-mecânicos posteriores (Lucas, 1998).

Assim, no âmbito industrial (usinas siderúrgicas), a obtenção de uma microestrutura com melhor usinabilidade tem por estratégia a manipulação de variáveis de processo nas etapas de:

- Elaboração do aço (composição química base do material, técnicas de desoxidação);
- Tratamento termo-mecânico (seqüência de passes e respectivas temperaturas na laminação);
- Tratamentos térmicos anteriores à usinagem.

### **Presença de inclusões**

Inclusões são partículas ou fases presentes na matriz metálica não oriundas do sistema Fe-C. Estas partículas são usualmente compostas de substâncias tais como óxidos, sulfetos ou silicatos, embora possam também ser consideradas outras substâncias metálicas e insolúveis na matriz. A tentativa em se promover a melhoria da usinabilidade de uma determinada classe de aços, recorrendo-se à utilização da técnica de adição de elementos químicos, deve ser feita através de um estreito e rigoroso controle dos demais fatores influentes, de forma que se possa verificar, avaliar e justificar os custos decorrentes do emprego de tal técnica (Lucas, 1998).

### **Tipos de inclusões**

O estudo das inclusões, principalmente quanto à sua característica de deformação, é um fator de suma importância pelo fato não só por comprometer o desempenho dos componentes em serviço (risco de falha por fratura), mas principalmente devido à influência que exerce no comportamento do material quando submetido a processos de conformação a quente ou a frio (tais como: laminação, forjamento, trefilação) e usinagem.

As inclusões podem ser classificadas de acordo com sua natureza química e/ou sua capacidade de deformação:

- Alumina ( $Al_2O_3$ ) e cálcio aluminatos – Frágeis e indeformáveis mesmo em elevadas temperaturas.
- Silicatos de cálcio e manganês - Frágeis à temperatura ambiente, mas aumentam sua capacidade de deformação em elevadas temperaturas;
- Sulfeto de manganês (MnS) - Grande capacidade de deformação;
- Chumbo e bismuto – Inclusões metálicas geralmente finamente dispersas e insolúveis na matriz do aço. São deformáveis e se liquefazem nas temperaturas alcançadas no processo de usinagem.

### **Bismuto como inclusão metálica**

A melhoria da usinabilidade através da adição de elementos que formam inclusões metálicas, tais como chumbo e bismuto, seguem o seguinte princípio:

➤ Favorecem a ruptura por cisalhamento através da formação de microtrincas, favorecidas pela liquefação do metal (entre 250 a 300 °C).

➤ Melhoria da quebra do cavaco (através de inclusões de Pb e Bi) devido ao mecanismo de fragilização por metal líquido.

➤ Redução na resistência ao corte mesmo em baixas temperatura na região de corte.

## **3. RESULTADOS DOS ENSAIOS**

O principal critério no estudo da usinabilidade dos aços ensaiados foi o critério de vida da ferramenta.

Foram testadas as faixas velocidades de corte ( $v_c > 100$  m/min) comumente utilizadas pela indústria nas operações de torneamento, com o uso de ferramentas de metal-duro. Quanto aos parâmetros de avanço e profundidade de corte, estes foram selecionados para a faixa de trabalho de desbaste leve ( $f = 0,2$  mm e  $a_p = 2,5$  mm). Foram utilizados os AISI 1040 provenientes de corridas distintas, sendo uma delas com microestrutura modificada pela adição de bismuto (Lucas, 1998).

Para avaliar, de forma comparativa, os valores de desgastes das ferramentas, foi necessário que estes fossem definidos pelo mesmo critério de fim de vida. O critério dominante foi o de desgaste de flanco, observados em ensaios prévios, sendo este portanto adotado. Foi definido um desgaste médio de flanco  $VB = 0,3$  mm para as ferramentas de metal-duro (Lucas, 1998).

Verificou-se em todos os ensaios que o desgaste das ferramentas apresentou um comportamento discreto após a estabilização do gume, sendo progressivo na fase final da vida.

As ferramentas de corte apresentaram um comportamento de desgaste de flanco regular crescente com o aumento do tempo de corte. Com o aumento da velocidade de corte (de 250 a 315 m/min) o desgaste da ferramenta foi conforme esperado, ou seja, aumenta o desgaste com o aumento da velocidade de corte. Disto resulta que a vida da ferramenta decresce com o aumento da velocidade de corte, conforme mostra a “Figura 1”.

## Curvas de Vida do Aço AISI 1040

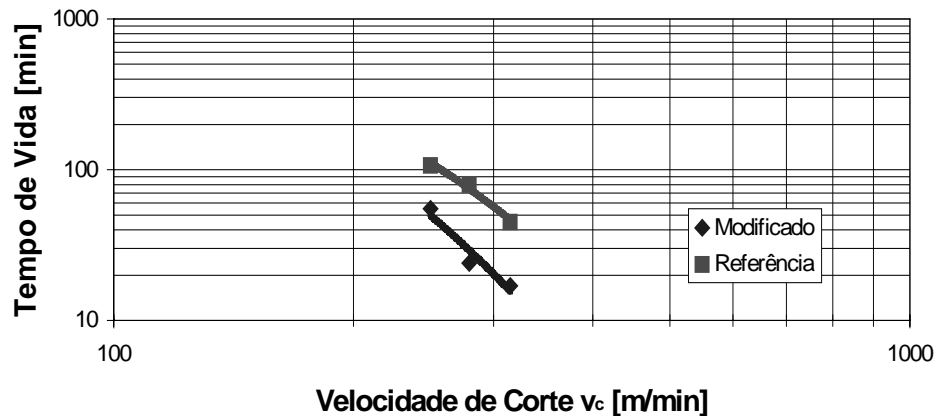


Figura 1 - Curvas de vida das ferramentas obtidas na usinagem dos aços AISI 1040 com emprego de ferramentas de metal duro (Geometria:  $\gamma = 6^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\chi = 93^\circ$  e  $r_e = 0,8$  mm) (Weingaertner et al. 1998)

Devido às condições severas de atrito alcançadas nestas condições de corte, observou-se que as ferramentas de corte utilizadas na usinagem dos aços de referência apresentavam uma maior incidência de desgaste de entalhe que nos aços modificados, entretanto não se pode atribuir com segurança o comportamento de desgaste ocorrido à microestrutura do material às condições de corte utilizadas e aos demais fatores influentes no processo. As “Figuras” 2 e 3, mostram os desgastes de flanco e de entalhe na usinagem dos aços de referência e modificado.

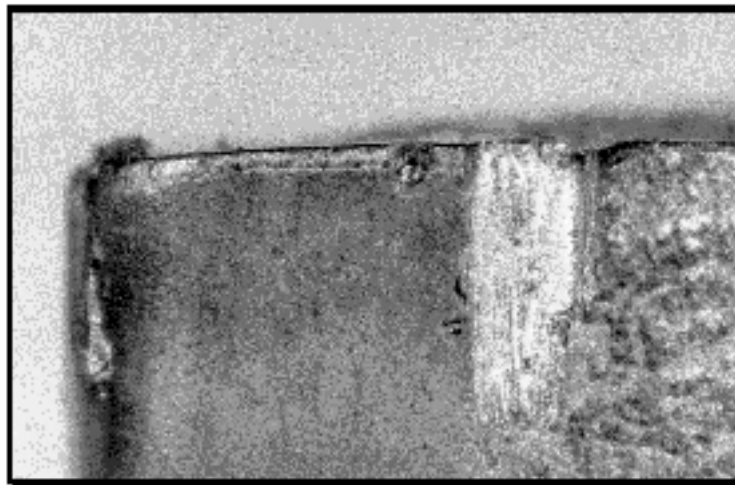


Figura 2 - Desgaste de entalhe da ferramenta de metal-duro na usinagem do aço AISI 1040 referência (Weingaertner et al. 1998)

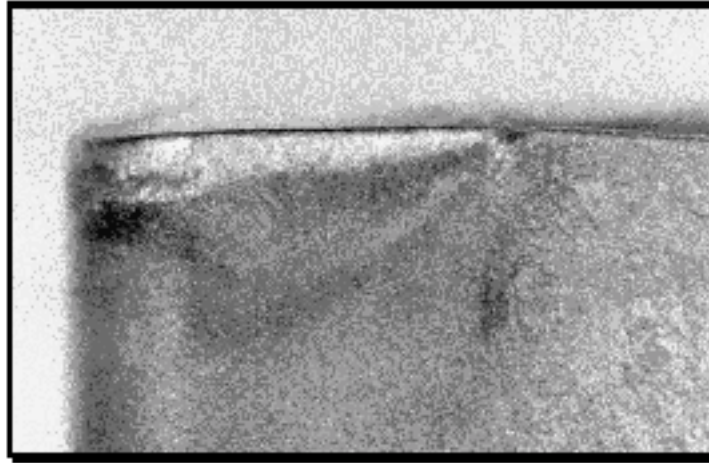


Figura 3 - Desgaste de flanco médio da ferramenta de metal-duro na usinagem do Aço AISI 1040 Modificado (Weingaertner et al. 1998)

#### 4. CONCLUSÕES

Quanto às condições de corte adotadas nos ensaios, verificou-se que a influência das inclusões metálicas sobre os vários critérios de avaliação da usinabilidade difere em dependência da velocidade de corte utilizada. Verifica-se também que quando é adotado um número limitado de condições de corte (velocidade, avanço e profundidade de corte) para avaliar o comportamento de usinabilidade de um material, os ensaios não retratam fielmente o desempenho do material usinado.

Nas velocidades de corte de 250 a 315 m/min, utilizadas pela indústria no torneamento dos aços AISI 1040 com ferramentas de metal-duro revestidas, as taxas de deformação, localizadas entre lamelas adjacentes, impostas à microestrutura do material são significativas, e podem por sua vez não justificar a adição de inclusões metálicas de forma a favorecer a nucleação de trincas no material. Nas condições de corte utilizadas o efeito do estado inclusionário do material parece ser mais efetivo que os outros aspectos (Lucas, 1998).

A dispersão dos resultados obtidos nos ensaios de vida das ferramentas e principalmente a forte ação abrasiva exercida pelo material ensaiado sobre a ferramenta de corte, permitem referenciar que o efeito favorável das inclusões metálicas sobre a usinabilidade provavelmente foi mascarado pelo efeito negativo causado pelas inclusões não-metálicas abrasivas presentes na microestrutura do aço. Os aços modificados, disponibilizados para esta pesquisa, não permitiram comprovar uma melhoria na usinabilidade, quando comparados a aços pertencentes à mesma classe porém sem modificações na microestrutura.

#### *Agradecimentos*

Os autores agradecem a colaboração da Aços Finos Piratini – Grupo Gerdau S.A pelo fornecimento dos materiais utilizados nestas pesquisas apresentadas neste trabalho.

#### REFERÊNCIAS

- Lucas, E. O., 1998, Análise da influência da modificação da microestrutura do aço carbono AISI 1040 pela técnica de adição de bismuto. Florianópolis, SC. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC, 154 p.
- Micheletti, G. F., 1986, Mecanizado por Arranque de Viruta. 1 ed. Barcelona: Blume, 426 p.
- Weingaertner, W.L., Schroeter, R. B et al, 1998, Ensaios de Usinabilidade dos Aços AISI 1040 – Lotes 1 e 2. Convênio LMP-UFSC/GERDAU. Florianópolis.

**Influence of metallic inclusions on the steels machinability under high cutting speeds ( $v_c > 100$  m/min) in turning tests.**

*Abstract. Historically the increase of the productivity in the machining has been obtained by means of: the a) increase of the potency of the equipment, b) employment of tools that they propitiate larger resistance to the machining solicitations, c) Improvement machining parameters and d) development of steels of better machinability. Different techniques of improvement of the machinability of steels exist, and each one of them is inside effective of a specific context. Thus, in steels without responsibility of mechanical action, the machinability is the main property, then it is used elevated amount of S and Mn seeking larger fraction of sulfide of manganese (steels). On the other hand, in steels where the machinability is not the main demand, it can be used insoluble metallic particles in the head office seeking machinability improvement without damage of the main inquiry (for example: mechanical properties). The employment of such particles is already acquaintance there are some decades, time in which the used cutting speeds were lower to the current ones. However, they are ignored literature data regarding the benefit of the employment of this strategy under high cutting speeds. The objective of this work consists of the characterization of the influence of the presence of metallic particles of bismuth in the machinability of steels under high conditions of cutting speed. It is still comes a bibliographical revision regarding the solicitations of the material (under machining conditions), approaches of machinability evaluation, microstructurals factors that affect the machinability and the referring results to the presence of metallic particles under high cutting speeds.*

**Key word:** Machinability, Microstructure, Metallic inclusions.