



**Spectru Instrumental Científico Ltda**  
Informática para Ciência, Ensino e Pesquisa

**Divisão Metalurgia / Pesquisa**

## **ASPECTOS METALÚRGICOS NA AVALIAÇÃO DA USINABILIDADE DE AÇOS**

**André Luís de Brito Baptista <sup>(1)</sup>**  
**Ivaldo de Assis do Nascimento <sup>(2)</sup>**

- (1) Técnico Industrial Metalúrgico – Técnico de Ensino do Laboratório de Metalografia e Tratamentos Térmicos / Dept° de Ciências dos Materiais – Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda – Universidade Federal Fluminense.  
(2) Engenheiro Mecânico – Diretor Técnico da Spectru Instrumental Científico Ltda

### **Resumo**

A usinabilidade é uma propriedade que depende da interação entre o processo de fabricação e as características do material da peça.

No caso dos aços, a composição química, a microestrutura e os tratamentos térmicos e mecânicos, tem um efeito acentuado na usinabilidade desta classe de materiais metálicos.

No presente trabalho de revisão, cita-se os critérios de avaliação desta propriedade, bem como o modo de atuação destes fatores na usinabilidade.

**Palavras chaves : aços, usinabilidade, avaliação**

---

## **ASPECTS METALLURGIST IN APPRECIATION OFF STEELS MACHINABILITY**

### **Abstract**

The nachinability is a propriety that depend of interaction between the process of ma-nucfature and characteristic of piece material.

At case of steels, the composition chemistry, the microstruture and the heat treating and mechanic, have one effect accentuated in machinability of this category of materials me-tallic.

In present work of revision, macking reference criterions in appreciation of this pro-priety thought as the method of actuation of this agents machinability.

**Key-words : steels, machinability, appreciation.**



**Spectru Instrumental Científico Ltda**  
Informática para Ciência, Ensino e Pesquisa

**Divisão Metalurgia / Pesquisa**

## 1 - Introdução

Na usinagem de um metal, no início do corte, a ferramenta penetra no material da peça, e este se deforma elástica e plasticamente. Após ultrapassar a tensão máxima de cisalhamento do material, este começa a escoar. Em dependência da geometria da cunha de corte, o material deformado passa a formar um cavaco que desliza sobre a face da cunha de corte. O desempenho do material frente a este trabalho de usinagem, é que vai caracterizar a usinabilidade do mesmo.

Ainda não está definida em termos precisos, a usinabilidade dos materiais metálicos e, por isso, a citação de um único número para taxa de usinabilidade, é freqüentemente enganadora.

A usinabilidade dos materiais é uma propriedade difícil de ser determinada pois depende de diversos fatores dos próprios processos de usinagem, ou sejam : velocidade de corte, avanço, profundidade de corte e tipos das ferramentas, das máquinas operatrizes e dos fluidos de corte. Cada material apresenta condições particulares que ditam as normas mais adequadas de usinagem .

Tão importante como as propriedades de desempenho (resistência mecânica, à corrosão, etc.) as propriedades de fabricação como a soldabilidade e a usinabilidade devem ser sempre consideradas na seleção de materiais metálicos. Em princípio, não se pode dizer que um material é melhor que outro. Dependendo das condições de contorno impostas em determinada seleção, é que se pode analisar se a seleção de um determinado material apresenta vantagens sobre outro. Deste modo, deve-se considerar as características exigidas pelo projeto e engenharia, que são as características técnicas, em seguida, devem ser considerados os aspectos de fabricação da peça, inclusive pensando nos equipamentos disponíveis em determinada instalação. São as características tecnológicas. E, por último, deve-se considerar o aspecto comercial.

A melhora na operação de usinagem está relacionada com a obtenção de componentes com as dimensões desejadas e qualidade superficial satisfatória. Além disto, podem ser obtidos grandes aumentos de produtividade. As vantagens econômicas da escolha certa do material a ser usinado, assim como as ferramentas, fluido de corte, equipamento e condições de usinagem, são consideráveis. Os custos e tempos de produção podem ser significativamente reduzidos através da escolha certa destes parâmetros{2}.

## 2 - Usinabilidade

Arfeld e Hanum {1} comentam que a usinabilidade de um material pode ser definida por um valor numérico comparativo, que expressa um conjunto de propriedades de usinagem de um determinado material em relação a outro tomado como padrão. Estas propriedades são : vida da ferramenta de corte; força de usinagem; acabamento superficial da peça; temperatura de corte; produtividade da máquina operatriz; e as características do cavaco. Os resultados destas medidas são difíceis de serem analisados devido ao número de variáveis que intervêm no processo. Industrialmente, a avaliação mais expressiva da usinabilidade do aço ou ferro fundido se faz através do custo necessário para produzir um grupo de peças em máquina operatriz. As peças devem atender a uma avaliação de qualidade, sendo necessário que tenham tolerância dimensional, acabamento superficial e integridade funcional. Considerados estes fatores como necessários, o custo mínimo das peças somente pode ser alcançado através de uma alta produtividade obtida com elevadas velocidades de corte e baixo desgaste das ferramentas.

A usinabilidade, não é uma propriedade intrínseca do material, mas sim um resultado da interação do metal com a operação de usinagem. As condições de usinagem são estabelecidas para cada tipo de material e ferramenta. O avanço e a velocidade são limitadas pelo calor gerado pelos atritos e pela deformação plástica do cavaco. Quanto maior a usinabilidade do material da peça e a resistência ao desgaste do material da ferramenta maiores podem ser os avanços e as velocidades de corte. Deve-se levar em consi-



**Spectru Instrumental Científico Ltda**  
Informática para Ciência, Ensino e Pesquisa

**Divisão Metalurgia / Pesquisa**

deração os fluidos de corte que tem ação lubrificante e refrigerante. A profundidade de corte é um fator que limita o avanço e a velocidade de corte : Em operações de acabamento, ao invés das de desgaste, utilizam-se avanços menores e velocidades maiores para atender as especificações de rugosidade superficial e a precisão das dimensões. Em qualquer trabalho de usinagem, a produção depende dos avanços e velocidades de corte; entretanto, as condições mais econômicas de usinagem dependem também de outros como tempos e custos de preparação e colocação das ferramentas nas máquinas {2,3}.

### **3- Avaliação da Usinabilidade {2,4,5,7,8,11,16,17,20}**

Entende-se como propriedades de usinagem de um metal aquelas que expressam o seu efeito sobre grandezas mensuráveis inerentes ao processo de usinagem.

Para avaliação da usinabilidade são geralmente usados quatro critérios, utilizados isoladamente ou em conjunto :

- Vida da ferramenta
- Força de Usinagem
- Qualidade Superficial da Peça
- Formação de Cavacos (forma e tamanho dos cavacos)

Os fatores que influem na determinação da usinabilidade são :

- a) material da peça (composição química, microestrutura, dureza, propriedades mecânicas, rigidez da peça)
- b) processos mecânicos e condições de usinagem ( material e geometria da ferramenta, condições de trabalho, fluido de corte, rigidez da máquina e do sistema de fixação, tipo de operação a ser realizada.

#### Critério vida da Ferramenta {20}

A vida da ferramenta é normalmente o critério de maior importância na caracterização da usinabilidade de um material. A vida “T” é o tempo mínimo que uma ferramenta resiste do início do corte até sua utilização total, e é definida através da fórmula :

$$T = V_C^K \cdot C_V$$

Onde :

T = vida da ferramenta [ min ]

$V_C$  = velocidade de corte [ m / min ]

$C_V$  = vida para  $V_C = 1$  m / min [constante]

K = coeficiente angular da curva de vida

A dependência entre T e  $V_C$  é exponencial e, em sistema bilogarítmico, representada por uma reta. Os fatores mais importantes para aparecimento de desgaste na ferramenta são as partículas duras e abrasivas da peça, bem como a resistência da matriz, além do material da ferramenta empregado.



**Spectru Instrumental Científico Ltda**  
Informática para Ciência, Ensino e Pesquisa

**Divisão Metalurgia / Pesquisa**

### Critério Força de Usinagem {20}

Existem dois fenômenos importantes no corte : cisalhamento do metal diante do ângulo de corte; e atrito na interface ferramenta-cavaco. O trabalho necessário ao corte é composto pelos trabalhos de cisalhamento e pelo de atrito. Qualquer redução destes trabalhos implica na redução do aquecimento e dos esforços no corte e conseqüentemente há um menor desgaste das ferramentas.

A grandeza da força de usinagem, que pode ser decomposta em força de corte, força de avanço e força passiva, é um critério de usinabilidade, pois geralmente materiais de difícil usinagem também apresentam forças de trabalho maiores.

As componentes da força de usinagem são influenciadas principalmente pelo material da peça condições de corte e geometria da ferramenta. Elas obedecem à fórmula de Kienzle (empírica), que relaciona as características do material, a seção de usinagem e a força de corte.

Para a força de corte  $F_C$  vale :

$$F_C / b = K_{C 1.1} \cdot h^{(1 - m_C)}$$

Onde :

$F_C$  = força de corte [ N ]

$b$  = largura de corte [ mm ]

$h$  = espessura de corte [ mm ]

$1 - m_C$  = coeficiente angular

$K_{C 1.1}$  = força específica de corte para seção de 1 mm<sup>2</sup>

A influência do material é dada pelo expoente  $1 - m_C$  e pela força específica  $K_{C 1.1}$ . Não é possível estabelecer uma relação perfeita entre a estrutura do material e a força específica de corte, assim como com o coeficiente angular, devido aos diversos fatores de influência que surgem. Normalmente a força de corte cai com o aumento da temperatura na zona de corte. Devido a isso, normalmente altas velocidades de corte levam a menores forças de corte. Ao mesmo tempo, todas as medidas que facilitam o fluxo de cavaco (fluido de corte, grande ângulo de saída) levam a uma diminuição das forças.

### Critério Qualidade Superficial da Peça {20}

A qualidade das superfícies obtidas na usinagem podem ser um critério para determinação dos parâmetros de entrada.

A rugosidade é decorrente da forma da quina da ferramenta e do movimento relativo entre peça e ferramenta. No torneamento, ela é influenciada principalmente pela forma do raio de quina da ferramenta e pelo avanço.

A rugosidade aumenta com o aumento do avanço e diminui com o aumento do raio de quina. Com relação à velocidade de corte, a rugosidade inicialmente tende a aumentar com o aumento da velocidade de corte, diminuindo após uma certa velocidade. Isso se deve à formação de gume postiço que pode ocorrer a pequenas velocidades de corte, fator que desaparece com o emprego de velocidades de corte mais altas.

A profundidade de corte praticamente não tem influência sobre a qualidade superficial, quando a profundidade for superior a um valor mínimo.



**Spectru Instrumental Científico Ltda**  
Informática para Ciência, Ensino e Pesquisa

**Divisão Metalurgia / Pesquisa**

Dos ângulos da ferramenta, o ângulo de saída e o ângulo de posição tem a maior influência sobre a qualidade superficial. Com o aumento positivo do ângulo de saída a rugosidade diminui.

A diminuição do ângulo de posição leva a um aumento da força passiva, e em decorrência aumenta a possibilidade de vibrações regenerativas, que levam a uma piora da qualidade superficial.

Também o desgaste da ferramenta tem influência sobre a qualidade superficial da peça.

### Critério Formação de Cavacos {1,8,20}

Quando se usina um material mole, se forma uma apra espessa e em forma de fita, e um acabamento superficial ruim. A ferramenta de corte atua como uma cunha, deformando o metal a sua frente por cisalhamento, até que em algum ponto seja atingida a tensão de ruptura e a porção de metal deformada se destaque, formando o cavaco.

Pelo fato de o material ser mole é necessária uma grande deformação para que seja atingido o ponto de ruptura, e a apra resultante é espessa, indicativa de uma má qualidade de usinagem. Também em consequência dessa grande deformação, o contato entre ferramenta e cavaco é maior, com existência de pontos de soldagem entre os dois materiais, e aumento do atrito.

Durante a deformação o material da apra é encruado, aumentando a sua resistência. A ruptura passa a se dar abaixo da superfície de corte, no metal mais mole, produzindo arrancamentos que prejudicam o acabamento da peça usinada. Quando a diferença de resistência do material da apra e do metal de base torna-se menos significativa, diminui-se a tendência a romper abaixo da superfície da peça; a deformação necessária para se atingir a tensão de ruptura do cavaco é menor, formando uma apra menos espessa, reduzindo também o atrito e o arrasto sobre a ferramenta.

Um dos fatores que mais limita a velocidade de usinagem é a forma dos cavacos. As pesquisas levaram ao conhecimento de que os metais ao serem usinados devem produzir um cavaco frágil e, portanto quebradiço dando maior facilidade de manuseio e operação. Paralelamente, os cavacos devem ter um raio de curvatura pequeno, para haver menor área de contato e conseqüentemente menor atrito com a ferramenta de corte, proporcionando maior vida útil.

No instante do corte, juntamente com a formação do cavaco, ocorre a formação de um ângulo de deformação ( $\psi$ ) e um ângulo de cisalhamento ( $\theta$ ).

Um aumento dos ângulos  $\theta$  e  $\psi$  significa que o volume de metal implicado na deformação diminui, aumentando a usinabilidade.

A forma e o tamanho do cavaco são muito importantes, principalmente para os processos de usinagem onde há pouco espaço para os cavacos ou em máquinas-ferramentas com pouco espaço de trabalho.

Cavacos helicoidais planos preferencialmente apresentam a sua saída tangenciando o flanco da ferramenta, e em decorrência disso danificam o suporte e a quina da ferramenta. Cavacos em fita, cavacos emaranhados e cavacos fragmentados apresentam um perigo para o operador da máquina.

As principais influências sobre a formação dos cavacos são as condições de corte, a geometria da ferramenta e, por parte do material da peça, a deformabilidade, a tenacidade e a resistência ou estado metalúrgico do material.

Através da diminuição da velocidade de corte ou do ângulo de saída, a fragilidade dos cavacos de materiais não muito elásticos aumenta, devido à maior deformação do cavaco. De maior importância é a influência do avanço e do ângulo de posição. Um aumento na espessura do cavaco leva a uma deformação demasiada na superfície de cisalhamento, isto é, aparecem cavacos curtos. Como com um aumento crescente da profundidade de corte devem-se escolher valores maiores de avanços para uma quebra mais favorável do cavaco, utiliza-se normalmente a relação profundidade x avanço como critério de formação de cavaco.



**Spectru Instrumental Científico Ltda**  
Informática para Ciência, Ensino e Pesquisa

**Divisão Metalurgia / Pesquisa**

A formação de cavacos é bastante influenciada pela resistência e conformabilidade do material. Uma resistência crescente favorece a quebra dos cavacos. Impurezas como inclusões na matriz do metal provocam uma forma de cavaco irregular, de quebra facilitada. Os elementos de liga exercem grande influência sobre a formação dos cavacos.

#### **4 - Aspectos Metalúrgicos que Interferem na Usinabilidade**

Os melhores parâmetros de corte e as características das ferramentas, devem ser associadas também às condições metalúrgicas do aço ou ferro : análise química, dureza e microestrutura, para identificar as melhores combinações, capazes de promover vantagens na usinabilidade {4}.

A aquisição de melhores condições de corte com remoção de cavaco em processos de usinagem de alta produtividade na indústria, é atribuída, divergentemente, à fatores metalúrgicos de fragilidade do cavaco ou à fatores mecânicos como a precisão dimensional e ausência de carepa abrasiva. Dentre as melhorias obtidas, são notáveis o aumento da vida da ferramenta, melhor qualidade da superfície usinada, menor força de corte e conseqüente menor consumo de energia, ou seja, redução de custos {4,5}.

Os fatores básicos que influenciam na obtenção destes requisitos são o trabalho a frio, a microestrutura, características mecânicas, composição química e inclusões {4}.

**Trabalho a Frio** - A deformação a frio pode melhorar a usinagem, através do encruamento provocado, o que aumenta a dureza e dificulta o empastamento do cavaco sobre a ferramenta e a formação da aresta postiça de corte. Se a dureza da peça for elevada excessivamente, haverá um desgaste exagerado da ferramenta e um acréscimo na potência necessária {6}.

O saldo entre a diminuição da força-de-corte e o efeito oposto pelo aumento da resistência mecânica à deformação, representam os parâmetros de análise que definem o compromisso para obtenção da melhoria de usinabilidade {5}.

Nakamura e col. {5}, confirmaram que a taxa de desgaste da ferramenta é reduzida pelo trabalho a frio. Atribuindo este resultado à redução da energia de corte necessária e queda da temperatura de trabalho.

Porém em materiais que apresentam alta taxa de encruamento e alta ductilidade, o trabalho a frio provoca queda acentuada na usinabilidade {2}.

Yamamoto {4}, analisou e concluiu que o efeito resultante de dois fatores (queda de ductilidade versus aumento de dureza ) é que vai determinar a melhoria ou não da usinabilidade.

Comprovou-se {5}, que há uma melhora na performance de produção, após o trabalho a frio, atribuída também aos aspectos mecânicos. Neste estudo, barras trefiladas permitiram obter ganho de produtividade em relação a barras bruto de laminação. E barras retificadas obtiveram maiores ganhos do que as barras trefiladas. Os resultados mostram que a melhor performance na usinagem, foi obtida, basicamente pelas melhores características dimensionais e de superfície.

**Micro Estrutura** - Do ponto de vista tecnológico, a estrutura do material é de suma importância, tendo em vista que a mesma está correlacionada com as propriedades mecânicas, físicas e químicas da peça {7}.

No tocante a microestrutura, Ferraresi {8}, cita que em função da possibilidade da transformação da microestrutura do aço ou ferro fundido, sem alteração da composição química, ela se constitui num importante fator de influência na usinabilidade. Os microconstituíntes , alteram características de ductilidade e fragilidade em função da sua presença, quantidade e forma, promovendo diferentes condições de quebra de cavaco abrasividade, força e temperatura de corte. A presença de fases aciculares tipo bainita e martensita, em função do efeito extremamente abrasivo, também são indesejáveis na usinagem {9}.



**Spectru Instrumental Científico Ltda**  
Informática para Ciência, Ensino e Pesquisa

**Divisão Metalurgia / Pesquisa**

O tamanho de grão é um dos parâmetros à controlar devido ao efeito de fragilização do cavaco, produzido em função de uma estrutura de grãos grosseiros {9}. Porém, com uma estrutura mais refinada, menores são as fronteiras intergranulares e maiores são os contatos de natureza química e eletrostática, melhorando o comportamento frente as solicitações mecânicas impostas no trabalho de usinagem {7}.

**Características Mecânicas** - Desde o início deste século, desenvolveram-se estudos visando relacionar as propriedades mecânicas com a usinabilidade do material, lançando mão dos valores de resistência a tração, limite de escoamento, alongamento e dureza, como referência para comparação {8}.

Gonzales e Cupini, citam que dentre as propriedades mecânicas, principalmente a dureza, exerce uma influência marcante sobre a usinabilidade dos materiais{5}.

Chiaverini {10}, afirma que valores altos para a dureza significam dificuldades de usinagem, ao passo que valores médios e baixos associam-se com boas propriedades de usinabilidade, mas que as medidas de dureza não serviriam de um modo absoluto como guia para determinação de verdadeira usinabilidade.

Cita-se que a melhora da usinabilidade, se obtém em condições conflitantes de alta ductilidade, baixa resistência a tração e maior fragilidade, ou seja baixa elasticidade{1}. Porém encontra-se a citação que, a melhor usinabilidade, estaria associada a uma condição de baixa dureza (e resistência) e baixa ductilidade {2}.

As propriedades intrínsecas, são de grande influência, dependendo do tipo de operação de fabricação a que o material está submetido, significando que algumas propriedades terão uma influência mais nítida em um determinado tipo de operação e efeitos menores ou até mesmo nulos em outro tipo.

Deve-se destacar que as propriedades mecânicas dos materiais quanto as características dimensionais serem assumidas como sendo homogêneas, na realidade as peças não se apresentam assim pois são não-homogêneas. Isto significa que pode haver pequenas variações na espessura, devido a vazios, inclusões, variações no tamanho de grão, textura ou concentração de soluto, todas originando variações na resistência local do metal.

**Composição Química** - As primeiras tentativas de se determinar a usinabilidade de um metal a partir de sua composição química, foram em 1948 por J. Sorensen, e dez anos mais tarde por Bodart e colaboradores {8}.

A adição de elementos de liga, produz modificações microestruturais, conduzindo a um endurecimento, que tem reflexo sobre as propriedades mecânicas obtidas e sobre a usinabilidade, dependendo da quantidade, forma e distribuição desses elementos {11}.

Os átomos de soluto permanecem em solução, aumentando a dureza através dos efeitos endurecedores de solução sólida supersaturada. O notável efeito endurecedor, pode ser justificado pela grande diferença de raios atômicos e de eletronegatividade. Os átomos de impurezas interagiram com os campos de tensões hidrostáticas e cisalhantes, formando uma atmosfera com as discordâncias em cunha em hélice, resultando também em um impedimento ao movimento das mesmas, facilitando assim o rompimento do cavaco {7}.

De um modo geral os efeitos dos elementos químicos participante da composição do material na usinagem, podem ser encarados da seguinte maneira : Primeiro, os elementos que aumentam a proporção de perlita, diminuem o teor de carbono no ponto eutetoide e que causam endurecimento por solução sólida. Segundo, elementos que atuam na fragilização da ferrita. Um terceiro ponto, são os elementos residuais e os provenientes da fusão/vazamento, que podem promover efeitos diversos além da presença de inclusões{1,9}

Os elementos ligantes podem também formar partículas duras e abrasivas, prejudicando a usinabilidade {2}.



**Spectru Instrumental Científico Ltda**  
Informática para Ciência, Ensino e Pesquisa

**Divisão Metalurgia / Pesquisa**

**Inclusões** - A presença de partículas que são insolúveis no metal e que interrompem a continuidade da matriz, tanto pode exercer efeitos benéficos quanto prejudiciais à usinagem, o que vai depender da sua dureza, forma e distribuição {11}.

As inclusões podem consistir num dos maiores nucleadores de danos no interior dos materiais metálicos podendo originar poros e trincas conforme se processa a deformação. Esses defeitos funcionariam como uma heterogeneidade na espessura do material e seriam condições suficientes para o aparecimento de estrição localizada, especialmente próximo a superfície do metal, favorecendo assim o trabalho de corte.

Efeito das inclusões na matriz metálica{12,13,14,15} - O metal não é uma matéria contínua, quando se faz a análise do seu comportamento toma-se em consideração aspectos estruturais, tais como, tamanho e distribuição de vazios, inclusões e partículas de segunda fase, tamanho de grão, microtopografias superficiais e texturas cristalográficas.

Em relação a deterioração de propriedades do metal, comprovou-se que a maior razão tamanho da inclusão / espessura do material, possui efeito equivalente a relação tamanho de grão / espessura da peça.

Materiais provenientes de lingoteiras iguais, forjados com bitolas muito próximas e que tiveram o mesmo tratamento térmico, apresentaram resultados diferentes nos ensaios, essa diferença de propriedades mecânicas, foi atribuída principalmente às diferenças de inclusões não metálicas.

O principal fator contribuinte para a anisotropia das propriedades mecânicas, é a presença de inclusões não metálicas que atuam como iniciadoras de fratura .

As propriedades de ductilidade, tenacidade e limite de fadiga são menores na direção transversal que na direção longitudinal, o mesmo não ocorrendo com os limites de escoamento e de resistência, que apresentam valores praticamente iguais. Isto se deve ao alinhamento de inclusões, na direção longitudinal de impurezas segregadas e de outros microconstituintes. O grau de deformação a quente e a estrutura bruta de solidificação do material, também contribuem para o problema.

A máxima deformação que um material pode sofrer está limitada pelo fenômeno de localização da deformação e/ou fratura. A localização da deformação ocorre como consequência da perda de estabilidade plástica da peça.

A evolução de danos durante o processo de deformação depende, além da trajetória de deformação, da distribuição, forma, natureza e tamanho médio das inclusões não metálicas inicialmente presentes no material.

É aceito que o mecanismo de fratura das ligas que contêm inclusões não metálicas, envolve a nucleação e o crescimento e coalescência destes vazios.

Os vazios são nucleados em volta de inclusões, ou pela quebra das inclusões, ou pela separação da matriz e inclusão na interface matriz-partícula (descolamento). Os vazios parecem ser primeiro nucleados nas inclusões maiores; nos últimos estágios de deformação, os menores precipitados podem também servir para nuclear cavidades. Os mecanismos de nucleação envolvem relaxação de partes das tensões existentes em volta das partículas. O amolecimento local devido a esta relaxação durante a formação do vazio pode ser um dos fatores para a localização de bandas de cisalhamento. A forma das inclusões também exerce efeito na nucleação de vazios, inclusões alongadas tendem a se quebrar e as arredondadas a sofrer descolamento.

Superposto ao efeito de forma tem-se ainda o efeito da composição das inclusões. Dependendo da composição química das inclusões não metálicas, estas apresentaram diferentes comportamentos mecânicos durante o processamento a quente e a frio, o que influenciará o modo de nucleação de vazios durante a posterior utilização do material.



**Spectru Instrumental Científico Ltda**  
Informática para Ciência, Ensino e Pesquisa

**Divisão Metalurgia / Pesquisa**

As inclusões de óxidos, quando alongadas, geram vazios pela quebra de partículas; quando arredondadas, nucleiam vazios pela descoesão da partícula matriz. As inclusões de oxi-sulfeto de mangânes e sulfeto de manganês, apesar de apresentarem formas alongadas, nucleiam cavidades pelo descolamento de partículas da matriz. As inclusões de silício, de forma sempre arredondadas, nucleiam vazios pela separação da interface partícula/matriz.

Materiais com mais baixa energia de falha de empilhamento vão nuclear mais rápido os vazios em volta das inclusões, pois as discordâncias em volta da partícula tendem a se mover melhor de um modo planar do que ondulado.

Pode-se dizer que das inclusões, a composição química, a morfologia, a deformabilidade a frio e a quente e coeficiente de expansão térmica, devem ser analisadas em conjunto, pois, o comportamento das partículas dependem desses fatores.

As inclusões de óxido de manganês tem alta deformabilidade a frio e a quente, enquanto que os silicatos e as inclusões de alumina são indeformáveis durante o trabalho a frio e a quente, respectivamente, e as inclusões de sulfeto de mangânes são deformáveis até a temperatura de 100°C.

As diferentes contrações térmicas das inclusões com relação à matriz, durante todo o processo de fabricação, contribuem para a formação de vazios. As inclusões de óxido de mangânes possuem coeficiente de expansão térmica similar ao do aço, isto é, contraem-se a uma mesma velocidade do que a matriz, enquanto que as inclusões de sulfeto de mangânes apresentam coeficiente de expansão térmica maior que a matriz, de maneira a favorecer a formação de vazios ao redor dessas partículas.

### Inclusões Não-Metálicas

**Sulfetos** - A presença de enxofre em níveis elevados exerce um efeito prejudicial no ensaio de estrição e, conseqüentemente, na qualidade dos produtos {15}. A temperatura de transição também sofre alterações, primeiramente ocorre um aumento, caindo posteriormente {15}. O enxofre, nos aços, está praticamente todo na forma de sulfeto. Estes sulfetos, possuem baixo ponto de fusão e se localizam nos contornos de grão, se tornando prejudiciais, sem qualquer interesse industrial. A solução do problema veio com a adição de certos níveis de manganês ao banho, o qual além de propiciar melhor rendimento metalúrgico, colabora na usinabilidade, permitindo aumentar a velocidade de corte, a vida da ferramenta, a segurança e produtividade {1}.

No tocante a usinabilidade, a forma, o tamanho, a distribuição e a composição dos sulfetos, tem um papel importante {6}.

Prefere-se, como favorável, a morfologia globular dos sulfetos, que dependerá do processamento do material {1}.

O manganês possui a maior afinidade química pelo enxôfre, a medida que cresce o seu teor, aumenta-se a usinabilidade, devido o sulfeto deste metal ser mais macio e deformável, do que os compostos com outros metais. Esta vantagens porém não compensa o maior desgaste das ferramentas, a perda de conformabilidade a quente e ductilidade à temperatura ambiente, os piores acabamentos superficiais e a diminuição da resistência a corrosão { 6 }.

**Alumina** - As inclusões de  $Al_2O_3$  originam-se no metal líquido, durante o trabalho a quente, as mesmas tornam-se alinhadas. Este óxido é duro e abrasivo, portanto prejudicial a usinabilidade {2,15}.

Controle de Morfologia de Inclusões - O objetivo é a formação de óxidos que são, menos deformáveis no trabalho a quente e de baixo ponto de fusão, no lugar de inclusões duras. Este óxido atua de forma muito parecida com os sulfetos: formam durante a usinagem, um filme lubrificante sobre a resta de corte, devido às altas temperaturas desenvolvidas (1000°C a 1250°C), e favorecem a quebra dos cavacos {2,14,18,19}.



**Spectru Instrumental Científico Ltda**  
Informática para Ciência, Ensino e Pesquisa

**Divisão Metalurgia / Pesquisa**

Inclusões Metálicas - Uma grande melhoria pode ser conseguida adicionando-se em teores da ordem de 1%, elementos especiais, sós ou em conjunto. Tais elementos como Pb e Bi, originam inclusões que, por sua forma, tamanho e distribuição, facilitam a usinagem {7,11}.

A solubilidade desses elementos no metal é quase nula, durante a solidificação, estes separam-se na forma de partículas discretas e fracas, permanecendo em suspensão submicroscópica, criando-se uma pseudo liga, e os glóbulos formados tem baixa resistência e baixa coesão, atuando como descontinuidades, proporcionando a redução da resistência ao cisalhamento que facilita o rompimento dos cavacos, que são menores e de menor diâmetro, tendo assim menor área de contato ferramenta - cavaco. Por terem ponto de fusão baixos, esses elementos fundem-se ao contato com a ferramenta, formando uma película líquida e aderente sobre ela, com ação lubrificante, reduzindo a resistência à fricção {1,2,4,11,17}.

Existem afirmações de outras formas de atuação dos metais macios, liquação do chumbo, causando fragilidade pela formação de microtrincas nas zonas primária e secundária de cisalhamento. Concentração de tensões introduzidas pela diferença de propriedades mecânicas entre as inclusões e a matriz. Redução na deformabilidade do sulfeto de manganês, pela presença do chumbo na interface {4}.

## 5 - CONCLUSÃO

A usinabilidade é um conjunto de características que compõem uma resposta do metal às solicitações encontradas durante a sua usinagem. Assim sendo, esta é influenciada pela operação específica em uso, pelo tipo de teste, velocidade máxima de corte para um dado acabamento de superfície, quantidade de material arrancado, pelo desgaste da ferramenta, condições metalúrgicas do metal, etc ...

Os aspectos metalúrgicos envolvidos na obtenção de propriedades reprodutíveis de usinabilidade variam de acordo com o material a trabalhar.

## 6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [ 1 ] ARFELD, E. D. & HANUM, A. L. Aços de Corte Fácil de Baixo Carbono. *Metalurgia - ABM*, vol. 33, nº 241, Dezembro de 1977, págs.: 773 à 776
- [ 2 ] TESSLER, M. B. & BARBOSA, C. A. A Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis. *Metalurgia e Materiais - ABM*, vol. 49, nº 413, Janeiro de 1993, págs.: 32 à 41.
- [ 3 ] GOMES, M. R. & FILHO, E. B. Propriedades e Usos de Metais Não-Ferrosos Alumínio, Chumbo, Cobre, Estanho e Zinco . III Impressão , ABM, São Paulo, 1977.
- [ 4 ] GONZALES, G. S. & CUPINI, N. L. Aspectos Metalúrgicos na Avaliação da Usinabilidade do Aço SAE 12L14 Submetido a Crescentes Graus de Encruamento por Trefilação. In: *47º Congresso Anual da ABM* , Belo Horizonte , 1992 - pág.: 171 à 188.
- [ 5 ] GONZALES, G. S. & CUPINI, N. L. Influência do Grau de Encruamento após Trefilação em Ensaios de Usinabilidade por Torneamento no Aço SAE 12L14. In : *45º Congresso Anual da ABM - RJ*, 1990, págs.: 343 à 357.



**Spectru Instrumental Científico Ltda**  
Informática para Ciência, Ensino e Pesquisa

**Divisão Metalurgia / Pesquisa**

- [ 6 ] DINIZ, A. E. & CUPINI, N. L.                      Estudo do Processo de Furação de Aços Inoxidáveis Austeníticos . *Metalurgia - ABM*, vol. 41, nº 349, Dezembro de 1986, págs.: 881 à 886.
- [ 7 ] BAPTÍSTA, A. L. B. & col.                      Melhoria das Propriedades Mecânicas e Usinabilidade de Ligas de Alumínio Centrifugadas. Projeto EEIMVR/ETPC , Volta Redonda, 1997.
- [ 8 ] FERRARESI, D.                                      Fundamentos da Usinagem dos Metais, Editora Edgard Blucher, São Paulo, 1970.
- [ 9 ] AMARO, J. P. M. et all                              Desenvolvimento de Aços Baixa-Liga de Construção Mecânica com Usinabilidade Melhorada. In : *XXXVII Congresso da ABM*, Rio de Janeiro, Julho de 1982, págs.: 271 à 281.
- [ 10 ] CHIAVERINI, V.                                      Aços e Ferros Fundidos. 6ª Edição, ABM, 1988.
- [ 11 ] OLIVEIRA JR. , G. G.                              Fatores Metalúrgicos que Condicionam a Usinabilidade das Ligas de Alumínio. In.: *42º Congresso Anual da ABM*, vol. IV , Outubro de 1987, Salvador , Bahia - págs.: 203 à 216.
- [ 12 ] NÓBREGA, M. C. S. & FERRAN, G.                              Nucleação e Crescimento de Trincas em Chapas Conformadas de Aço. *Metalurgia - ABM*, vol. 37, nº 282, Maio de 1981, págs.: 269 à 274.
- [ 13 ] CAVALLANTE, F. L. & col.                              Uma Nova Tecnologia Aplicada à Fabricação de Aços Ferramenta para Trabalho a Quente. In.: *XXXVII Congresso Anual da ABM* , Rio de Janeiro, 1982 - págs.: 415
- [ 14 ] RATNAPULI, R. C. ; ETRUSCO, G. S. ; ESTEVÃO, A.                              Fabricação de Aços de Alta Resistência na Usiminas, com Controle de Morfologia dos Sulfetos . In.: *XXXVII Congresso Anual da ABM*, Rio de Janeiro, Julho de 1982 - págs.: 401 à 414.
- [ 15 ] ANDRADE, S. L. ; BARROS, H. N. O. ; MANGUALDE, A. H. S.                              Desenvolvimento de Aços Resistentes à Trinca Lamelar na Usiminas. In.: *XXXVII Congresso Anual da ABM*, Rio de Janeiro, Julho de 1982, vol. II, págs.: 389 à 399.
- [ 16 ] GONZALES, G. & col.                              Controle de Usinabilidade do Aço AISI 416. Critérios Metalúrgicos e de Produção. *Metalurgia - ABM*, vol. 38, nº 300, Novembro de 1982, págs.: 659 à 663.
- [ 17 ] BIRD, A. W.    Latões de Corte Fácil . *Metalurgia - ABM*, vol. 32, nº 220, Março de 1976, págs.: 157 à 166.
- [ 18 ] CASTRO, F. & GATELLIER, C.                              Aspestos Termodinâmicos Relativos ao Tratamento do Aço Líquido com Cálcio e às Inclusões Formadas em sua Conse-



**Spectru Instrumental Científico Ltda**  
Informática para Ciência, Ensino e Pesquisa

**Divisão Metalurgia / Pesquisa**

qüência. *Metalurgia - ABM*, vol. 45, nº 381, Agosto de 1989, págs.: 784 à 787.

- [ 19 ] FILHO, S. B. F.                      Controle da Morfologia de Inclusões pelo Cálcio. UFF/EEIMVR.
- [ 20 ] WEINGAERTNER, W. L. &            Tecnologia de Usinagem do Alumínio e Suas Ligas. Alcan Alumínio do Brasil S.A., 1991.