

INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E DA MICROESTRUTURA NA USINABILIDADE DO AÇO DE CORTE FÁCIL COM ADIÇÃO DE CHUMBO (SAE 12L14)¹

Marcelo Francisco Pimentel²
Marcelo dos Santos Pereira³

Resumo

Nos componentes mecânicos em aço, a operação de usinagem pode representar mais de 50% do custo de produção. Por isso, tem-se procurado, com o desenvolvimento tecnológico, obter materiais que respondam adequadamente à solicitação de boa usinabilidade. No caso dos aços para construção mecânica, dentre os fatores que influenciam a usinabilidade, tem-se como principal fator a microestrutura do material, que por sua vez é definida pela composição química, tratamento térmico e o tipo, forma e distribuição das inclusões. No presente estudo, o principal objetivo é avaliar a influência da composição química e da microestrutura, basicamente o tipo, a morfologia e a distribuição das inclusões, na usinabilidade do aço de corte fácil baixo-carbono com adição de chumbo. Para caracterização do material, foram realizadas análises químicas e foram executados ensaios metalográficos. As análises químicas foram realizadas em amostras do material laminado. Os ensaios metalográficos foram realizados para avaliar os principais tipos de inclusões presentes no aço estudado, por meio de microscopia óptica. Nos ensaios de usinabilidade, foi utilizada ferramenta de corte de metal duro, sendo a usinabilidade avaliada pelo desgaste de flanco da ferramenta. Os resultados mostraram que a maior usinabilidade foi obtida nas regiões dos corpos-de-prova com os maiores teores de carbono, enxofre e chumbo. Nestas regiões, também se verificou a maior quantidade de inclusões de sulfeto de manganês globulares e homoganeamente distribuídas.

Palavras-chave: Composição química; Aço de corte fácil; Inclusões; Usinabilidade.

INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION AND MICROSTRUCTURE ON THE MACHINABILITY OF LEADED FREE-CUTTING STEEL (SAE 12L14)

Abstract

For mechanical steel components, the machinability could represent more than 50% of the production cost. Consequently, it's very important to develop steels with good performance in this kind of process. Microstructure is the main point, when it is analyzed all the factors that affect machinability. The microstructure can be defined by composition, heat treatment and inclusions type, shape and distribution. The present report has the target of evaluate how the chemical composition and microstructure influence the machinability of the leaded resulfurized low-carbon steel (leaded free-cutting steel). The material evaluation was based on chemical analysis and metallography of rolled samples. Metallography was used to evaluate inclusions (type, shape and distribution). In machinability tests, the machinability was evaluated by flank wear of cutting tool. The results indicated that the machinability was easier in the test specimen regions with high contents of carbon, sulfur and lead. In these regions, it was verified high amount of globular manganese sulfide inclusions with homogeneous distribution.

Key words: Chemical composition; Free-machining steel; Inclusions; Machinability.

¹ Contribuição técnica apresentada na 61º Congresso Anual da ABM, de 24 a 27 de julho de 2006, Rio de Janeiro – RJ

² Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, MSc.; Engenharia de Desenvolvimento e Produto da Aços Villares; Pindamonhangaba, SP.

³ Engenheiro Mecânico, Ph.d.; Prof. Livre-Docente da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista; Guaratinguetá, SP.

1 INTRODUÇÃO

Em um material, a usinabilidade é uma resposta ao sistema de usinagem (ferramenta de corte, velocidade, avanço, lubrificação) e, além do desgaste da ferramenta, ela pode ser medida de outras maneiras, tais como: tipo de cavaco removido, acabamento superficial e esforços durante a usinagem.

Nos aços para construção mecânica, de maneira geral, a operação de usinagem é um dos itens de maior custo, influenciando diretamente no preço final da peça. Por essa razão, tem-se procurado, com a pesquisa no campo da usinagem, desenvolver materiais que respondam adequadamente à solicitação de boa usinabilidade.

Desta forma, o objetivo deste estudo é avaliar a influência da composição química e da microestrutura dos aços resulfurados ao chumbo na usinabilidade. Quanto ao aspecto microestrutural, será verificado o efeito da quantidade, morfologia e distribuição das inclusões sobre a característica de usinabilidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Efeito da Composição Química e das Inclusões na Usinabilidade

A usinabilidade dos metais deve ser analisada por meio da influência das variáveis dos seguintes componentes, intimamente relacionados:⁽¹⁾

- Material da peça;
- Processo mecânico e condições de usinagem;
- Critério empregado na avaliação.

Com relação ao material da peça, os fatores que mais influem sobre a usinabilidade são:⁽¹⁾

- Composição química, que determina as propriedades do material;
- Abrasividade dos constituintes microestruturais;
- Natureza das inclusões e interfaces entre elas e a matriz metálica e a ferramenta de corte.

2.1.1 Efeito da composição química na usinabilidade

2.1.1.1 Efeito do enxofre

Há muitos anos é conhecido que a boa usinabilidade nos aços baixo-carbono é obtida pelo aumento do teor de enxofre para valores acima de 0,40%.⁽²⁾ Devido ao fato de não ser um aditivo caro, o enxofre é o elemento mais extensivamente usado para melhorar a usinabilidade dos aços ao carbono. Em quase todos os tipos de aço comercialmente produzidos, o enxofre se apresenta, geralmente, combinado com o manganês na forma de inclusões de sulfeto de manganês, MnS. Para entender a influência do enxofre sobre a usinabilidade, ensaios de torneamento foram conduzidos com barras de diâmetro de 22,23 mm contendo 0,14% de carbono, 0,80% de manganês e teor de enxofre variando na faixa de 0,025 a 0,25%.⁽³⁾ Na Figura 1, pode-se verificar que, para um dado avanço, o aumento do teor de enxofre diminui a deformabilidade do cavaco, isto é, a quantidade de deformação plástica associada com a formação do cavaco. Desta maneira, o atrito entre o cavaco e a ferramenta de corte diminui com o aumento do teor de enxofre, implicando que os sulfetos de manganês exercem um efeito lubrificante. Estes sulfetos de manganês também diminuem o atrito entre a ferramenta de corte e a peça usinada.

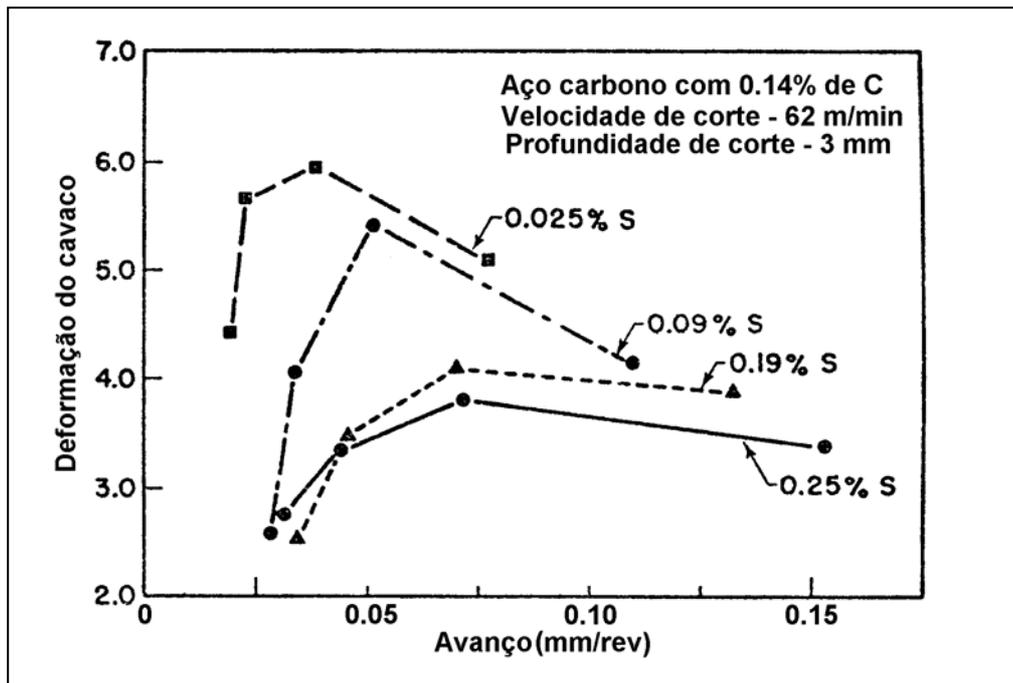


Figura 1. Relação entre o teor de enxofre e a deformação do cavaco a vários avanços em testes de torneamento.⁽³⁾

2.1.1.2 Efeito do carbono e do silício

Embora as normas internacionais AISI e SAE permitam teores de carbono acima de 0,13% nos aços resulfurados e refosforados baixo-carbono, respectivamente das séries 11XX e 12XX, a maioria dos aços de corte fácil freqüentemente utilizada apresenta teores de carbono abaixo de 0,10%. Este fato pode ser evidenciado a partir da análise criteriosa das curvas da Figura 2, onde pode ser verificado que os mais altos índices de usinabilidade são obtidos para baixos teores de carbono (abaixo de 0,10%). Adicionalmente, nestas curvas, também pode ser observada a existência de um teor de carbono ("pico" de carbono), acima do qual o índice de usinabilidade diminui.

Na Figura 2, também pode ser observado que o silício tem um efeito prejudicial sobre a usinabilidade dos aços baixo-carbono. O silício prejudica a usinabilidade por meio de dois modos.⁽²⁾ Quando o silício está presente no aço como inclusões abrasivas de silicato, a vida da ferramenta de corte diminui drasticamente. O silício também influencia no formato das inclusões de sulfeto de manganês. À medida que o teor de silício aumenta, diminui a proporção de inclusões de sulfeto de manganês globulares, prejudicando, desta maneira, a usinabilidade.

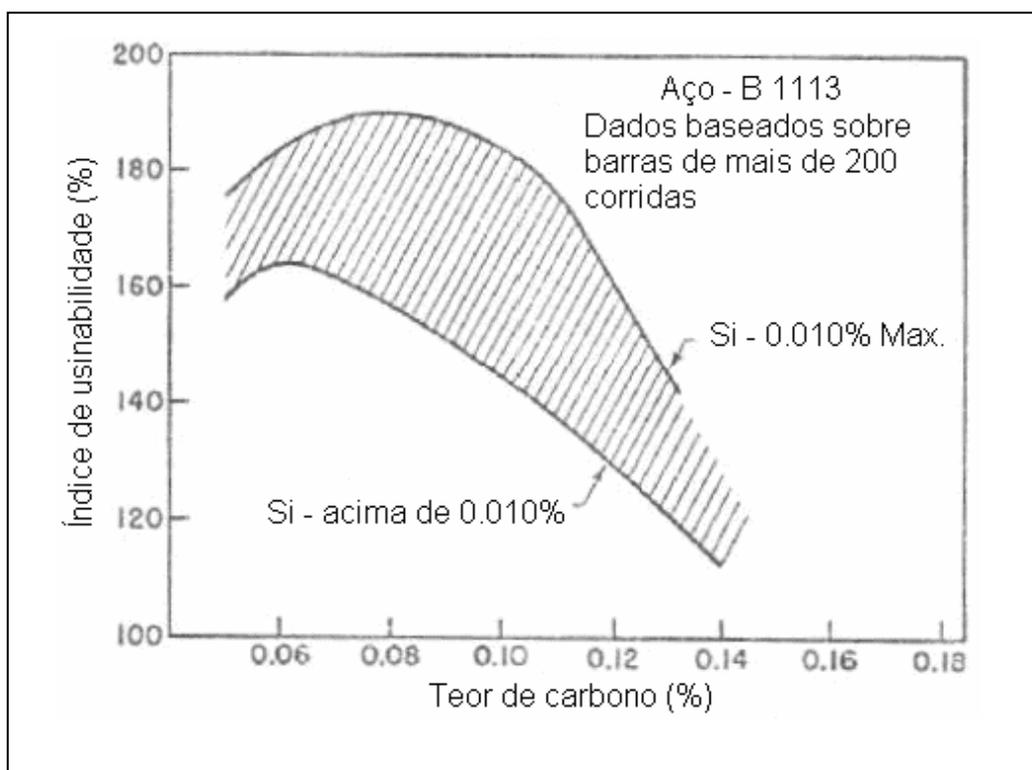


Figura 2. Efeito do teor de carbono sobre o índice de usinabilidade de barras de aço B1113 em testes de torneamento.⁽²⁾

2.1.2 Efeito das inclusões na usinabilidade

2.1.2.1 Efeito das inclusões de sulfeto de manganês

Dependendo do processo de elaboração e refino do aço, as inclusões de MnS podem assumir basicamente três morfologias,⁽⁴⁾ classificadas em:

- Tipo I: Sulfetos globulares uniformemente distribuídos.
- Tipo II: Sulfetos eutéticos intergranulares.
- Tipo III: Sulfetos angulares, os quais se situam nos pontos triplos dos limites dos grãos.

Com relação ao efeito sobre a usinabilidade, evidências experimentais⁽⁵⁾ mostram que aços contendo sulfetos globulares apresentam melhor usinabilidade do que aços com sulfetos finos e alongados. Os mecanismos pelos quais os sulfetos afetam a usinabilidade estão relacionados à sua influência no processo de formação do cavaco e na interação deste com a ferramenta, durante a usinagem. As inclusões de sulfeto agiram como concentradores de tensão e ponto de nucleação de vazios e trincas na zona primária de deformação, reduzindo a tensão necessária ao cisalhamento.⁽⁶⁾ Sulfetos maiores, globulares e pouco deformáveis, como os do tipo I, seriam os mais favoráveis à geração de vazios, explicando os resultados experimentais obtidos por Marston e Murray.⁽⁵⁾ A presença de trincas fragilizaria o cavaco, facilitando a sua quebra e remoção. Outro mecanismo atribuído ao sulfeto de manganês favorável à usinabilidade é um efeito lubrificante entre o cavaco e a ferramenta e entre a ferramenta e a peça.⁽⁷⁾ Resumidamente, a quantidade, a forma e a distribuição das inclusões de sulfeto de manganês influem na usinabilidade. Na classe de aços de corte fácil SAE 11XX e 12XX, o teor de enxofre varia entre 0,08 e 0,35%, que associado a teores de manganês acima de 1%, promove a formação de sulfetos de manganês, com atuação marcante no aumento da usinabilidade.

2.1.2.2 Efeito das inclusões metálicas

Embora teoricamente o chumbo ou o bismuto possa ser adicionado em qualquer tipo de aço, usualmente estas adições metálicas são limitadas aos aços de corte fácil das séries SAE 11XX e 12XX, pois a combinação de chumbo e sulfeto de manganês tem se mostrado como sendo a que proporciona a maior usinabilidade nos aços.⁽⁸⁾ Aços com adição de chumbo são identificados pela inclusão da letra L entre o segundo e terceiro dígito na classificação SAE/AISI, como por exemplo, SAE 12L14 ou SAE 10L45. O teor de chumbo varia entre 0,15 e 0,35%, e a sua adição por si só não proporciona diminuição significativa das propriedades mecânicas à temperatura ambiente. Em temperaturas próximas as do seu ponto de fusão, o chumbo pode provocar a fragilização do aço.⁽⁸⁾ Devido a preocupações no sentido ambiental e sanitário durante o processo de fabricação do aço, a utilização de chumbo como elemento de adição tem sido bastante restringida, a ponto de certos países terem abandonado a sua produção.⁽⁹⁾ No entanto, devido a sua superior usinabilidade, componentes fabricados com aços ao chumbo ainda são utilizados por praticamente todos os fabricantes de automóveis.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Análise Química

A análise química foi realizada em três amostras retiradas após a laminação do material. Em cada amostra com diâmetro de 66 mm, realizou-se análise química a diferentes profundidades, partindo-se da superfície em direção ao núcleo.

A composição química foi analisada utilizando os cavacos obtidos nos passes de usinagem com 1 mm de profundidade, conforme Tabela 1.

A análise química foi realizada em 13 profundidades diferentes com o objetivo de correlacionar a composição química das amostras com o desempenho da ferramenta de corte em 13 ensaios de usinabilidade.

Tabela 1. Profundidades em que foi realizada a análise química das amostras.

Profundidade	Diâmetro inicial da amostra - D_i (mm)	Diâmetro final da amostra - D_f (mm)
1 ^a	66	64
2 ^a	62	60
3 ^a	60	58
4 ^a	56	54
5 ^a	54	52
6 ^a	52	50
7 ^a	50	48
8 ^a	48	46
9 ^a	46	44
10 ^a	44	42
11 ^a	42	40
12 ^a	40	38
13 ^a	38	36

3.2 Análise de Microinclusões

As amostras para o exame metalográfico foram inicialmente submetidas a um lixamento, utilizando-se lixas d'água grana 100, 220, 320, 400 e 600. Em seguida, foi executado polimento com pasta de diamante de $6\mu\text{m}$ e $1\mu\text{m}$.

A análise de microinclusões foi feita em seis amostras sem ataque químico, conforme a norma SEP 1572⁽¹⁰⁾, por microscopia óptica.

3.3 Ensaio de usinabilidade

Neste estudo, foram realizados 13 ensaios de usinabilidade. Em cada ensaio, os corpos-de-prova foram usinados até um diâmetro mínimo de 36 mm para preservar a estabilidade da operação.

3.3.1 Condições de usinagem

Os ensaios de usinabilidade foram realizados a seco em torno CNC da marca Romi utilizando-se o torneamento cilíndrico externo de barras com perfil redondo e diâmetro de 69,85 mm. As condições de usinagem foram selecionadas de acordo com as mais usuais no mercado brasileiro, a saber:

- Velocidade de corte: 391 m/min;
- Avanço de corte: 0,3 mm/rev;
- Profundidade de usinagem: 1,0 mm;
- Ferramenta selecionada: metal duro (CCMT 12 04 04 – WM Classe 4015);
- Critério de avaliação da vida da ferramenta: desgaste máximo de flanco ($V_{B_{\max}}$).

A usinabilidade do material foi avaliada através do desgaste máximo de flanco da ferramenta de corte, ou seja, quanto menor o desgaste de flanco da ferramenta de corte, melhor será a usinabilidade.

3.3.2 Metodologia do ensaio

Os ensaios de usinabilidade foram realizados em corpos-de-prova com comprimento de 425 mm, cortados a partir de barras de aço SAE 12L14 com perfil redondo e diâmetro de 69,85 mm. Um passe inicial foi efetuado para remoção da camada oxidada e descarbonetada. Após esta operação, o diâmetro inicial dos corpos-de-prova passou para 66 mm. No total, foram realizados 13 ensaios de usinabilidade, sendo que em cada ensaio, foram utilizados corpos-de-prova com o mesmo diâmetro inicial, com o objetivo de avaliar o desgaste máximo de flanco ($V_{B_{\max}}$) da ferramenta de corte em função do seu percurso de corte (l_c). Assim, no 1º ensaio de usinabilidade, foram usinados corpos-de-prova com um diâmetro inicial de 66 mm, obtendo-se corpos-de-prova com um diâmetro final de 64 mm, tendo a ferramenta de corte realizado um percurso de 9648 m. No 2º ensaio de usinabilidade, foram usinados os corpos-de-prova resultantes do 1º ensaio de usinabilidade, porém com um diâmetro inicial de 62 mm, obtendo-se corpos-de-prova com um diâmetro final de 60 mm, tendo, neste caso, a ferramenta de corte realizado um percurso de 9036 m. E assim sucessivamente (Tabela 2). Para a usinagem de cada diâmetro inicial, foi utilizada uma aresta de corte diferente. Em cada ensaio de usinabilidade, foi medida a profundidade máxima de desgaste de flanco ($V_{B_{\max}}$) de cada aresta de corte, utilizando-se um estereoscópio da marca Leica . A medição do desgaste máximo de flanco (ampliação de 40x) de cada ferramenta foi realizada após determinados percursos de corte.

Tabela 2. Ensaios de usinabilidade realizados.

N° de ensaios	Percurso de corte (lc) (m)	Diâmetro inicial dos CDP's (mm)	Diâmetro final dos CDP's (mm)
1	9648	66	64
2	9036	62	60
3	8748	60	58
4	8136	56	54
5	7848	54	52
6	7524	52	50
7	7236	50	48
8	6948	48	46
9	6624	46	44
10	6336	44	42
11	6048	42	40
12	5724	40	38
13	5436	38	36

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados da Análise Química

Na Tabela 3, têm-se a média dos resultados da análise química realizada nas amostras retiradas do material laminado. Com base nesta tabela e comparando-se a média dos resultados das análises químicas realizadas nas amostras com diâmetro final de, respectivamente, 36 e 64 mm, pode-se constatar que: o teor de carbono é 17% maior; o teor de enxofre é 12% maior e o teor de chumbo é 11% maior.

Tabela 3. Média e desvio-padrão dos resultados da análise química de produto.

Diâmetro final das amostras (mm)	Porcentagem em peso de cada elemento (%)									
	C		Mn		P		S		Pb	
	Média	Desvio-Padrão	Média	Desvio-Padrão	Média	Desvio-Padrão	Média	Desvio-Padrão	Média	Desvio-Padrão
64	0,067	0,001	1,12	0,00	0,0478	0,0008	0,279	0,001	0,273	0,003
60	0,069	0,001	1,12	0,00	0,0478	0,0008	0,286	0,001	0,279	0,004
58	0,070	0,001	1,12	0,01	0,0483	0,0000	0,290	0,001	0,281	0,004
54	0,070	0,001	1,12	0,01	0,0483	0,0000	0,295	0,002	0,286	0,008
52	0,071	0,001	1,12	0,01	0,0487	0,0008	0,301	0,002	0,288	0,006
50	0,071	0,002	1,13	0,01	0,0492	0,0008	0,303	0,001	0,292	0,005
48	0,071	0,002	1,13	0,01	0,0492	0,0008	0,306	0,002	0,293	0,005
46	0,071	0,002	1,13	0,00	0,0496	0,0000	0,306	0,002	0,294	0,004
44	0,071	0,002	1,13	0,00	0,0496	0,0000	0,307	0,002	0,296	0,004
42	0,071	0,002	1,13	0,01	0,0496	0,0000	0,309	0,002	0,29	0,004
40	0,071	0,002	1,13	0,01	0,0496	0,0000	0,309	0,003	0,299	0,004
38	0,075	0,005	1,14	0,01	0,0500	0,0008	0,310	0,002	0,301	0,002
36	0,079	0,004	1,14	0,00	0,0512	0,0014	0,312	0,002	0,302	0,001

4.2 Resultados da Análise de Microinclusões

A análise de microinclusões não-metálicas foi realizada na superfície, a 28 mm da superfície e no núcleo de seis amostras diferentes. Os resultados desta análise, feita conforme a norma SEP 1572⁽¹⁰⁾, encontram-se na Tabela 4. Nesta tabela, também se pode verificar o fator de forma (L/W) das microinclusões não-metálicas, através da medição de seus comprimentos e larguras. Pode-se constatar que as microinclusões de sulfeto de manganês são mais globulares no núcleo e a 28 mm da superfície das amostras.

Quanto à análise das microinclusões metálicas realizada na superfície, a 28 mm da superfície e no núcleo das amostras, verifica-se que no núcleo e a 28 mm da superfície há uma maior quantidade de microinclusões grandes de chumbo e mais homoganeamente distribuídas.

Tabela 4. Resultado da análise de microinclusões não-metálicas, conforme a norma SEP 1572.⁽¹⁰⁾

Amostras	Classificação			L/W (fator de forma)*		
	Superfície	28 mm da superfície	Núcleo	Superfície	28 mm da superfície	Núcleo
1	2,1	2,2	2,2	3,00	2,20	1,92
2	2,1	2,2	2,2	2,77	1,95	1,67
3	2,1	2,2	2,2	2,19	2,03	1,90
4	2,1	2,2	2,2	2,75	1,90	1,66
5	2,0	2,2	2,2	2,95	2,15	1,93
6	2,0	2,2	2,2	2,18	2,00	1,91
*	L = Comprimento das microinclusões não-metálicas					
	W = Largura das microinclusões não-metálicas					

4.3 Resultados dos Ensaios de Usinabilidade

Através do gráfico dos resultados da medição do desgaste máximo de flanco de cada ferramenta de corte (Figura 3), pode-se constatar que o desgaste da ferramenta de corte aumenta à medida que aumenta a distância percorrida por ela. Considerando-se ainda estes resultados, verifica-se que o incremento de aumento do desgaste da ferramenta de corte foi maior no 1° ensaio e menor no 13° ensaio. Como neste estudo a usinabilidade do material foi avaliada através do desgaste máximo de flanco da ferramenta de corte, pode-se afirmar que a usinabilidade do material foi maior no 13° ensaio do que em relação ao 1° ensaio. Esta diferença de comportamento ocorre basicamente devido à variação de composição química (principalmente, carbono, enxofre e chumbo) e variação no formato das microinclusões de sulfeto de manganês ao longo do diâmetro dos corpos-de-prova.

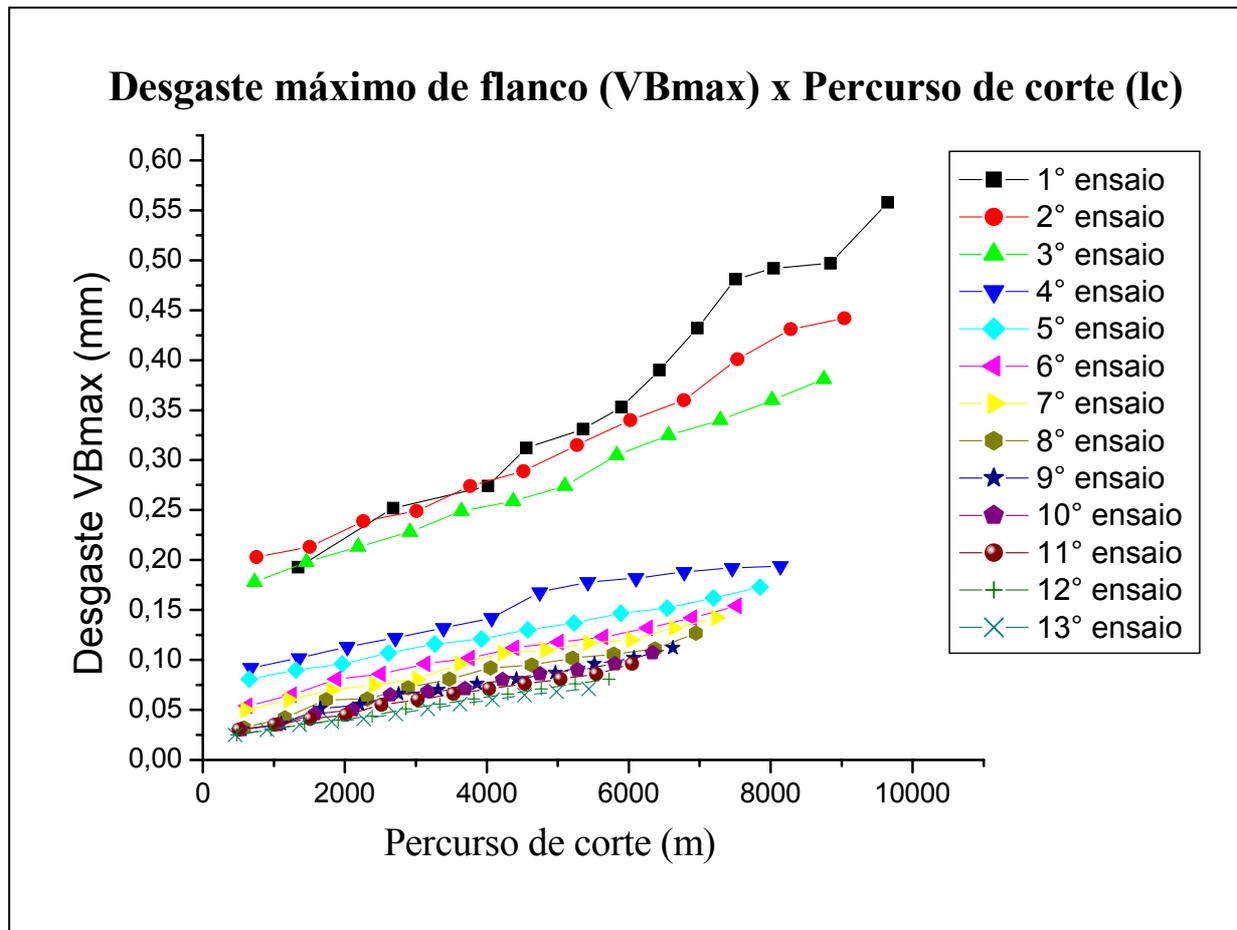


Figura 3. Resultados do desgaste máximo de flanco (V_{Bmax}) da ferramenta de corte em função do percurso de corte.

Na Figura 4, tem-se o gráfico do desgaste máximo de flanco da ferramenta de corte (após um percurso de corte de 5000 m) em função do diâmetro final dos corpos-de-prova de cada ensaio de usinabilidade. Avaliando-se o desgaste máximo de flanco (V_{Bmax}) de cada ferramenta de corte após um percurso de corte de 5000 m, pode-se verificar que o valor desta característica reduz à medida que diminui o diâmetro final dos corpos-de-prova, ou seja, a usinabilidade do material aumenta à medida que diminui o diâmetro final dos corpos-de-prova. Pode-se constatar que o desgaste da ferramenta de corte no 13º ensaio de usinabilidade é cerca de 79% menor do que o desgaste da ferramenta de corte no 1º ensaio. Esta diferença de usinabilidade ocorre basicamente devida à variação de composição química (principalmente, carbono, enxofre e chumbo) e variação no formato das microinclusões de sulfeto de manganês ao longo do diâmetro dos corpos-de-prova.

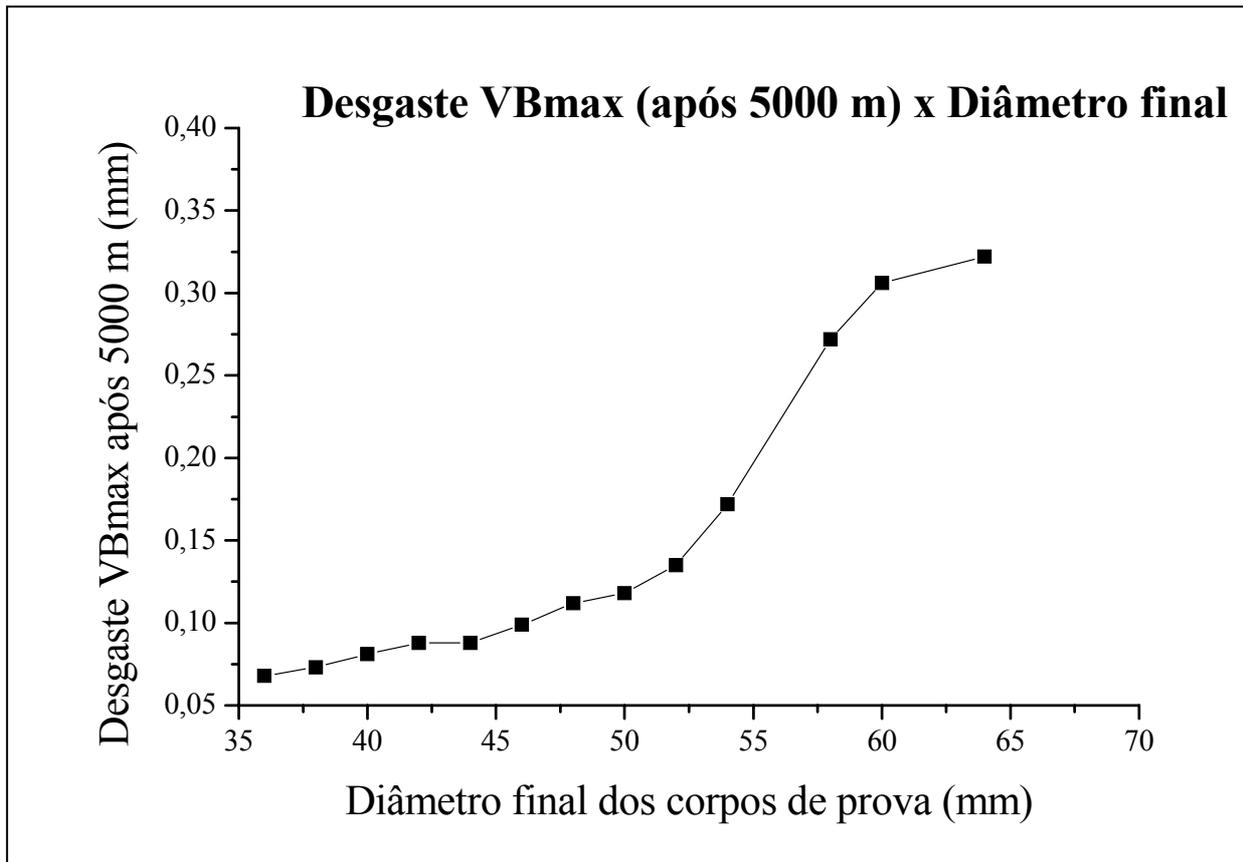


Figura 4. Desgaste máximo de flanco (V_{Bmax}) da ferramenta de corte (após 5000 m) em função do diâmetro final dos corpos-de-prova.

4.4 Correlação entre os Resultados da Análise Química, da Análise de Microinclusões e dos Ensaios de Usinabilidade

A superfície dos corpos-de-prova com diâmetro final de 36 mm apresenta teor de carbono em torno de 0,08%. Este valor, segundo a teoria,⁽²⁾ representa o teor de carbono onde se tem o máximo índice de usinabilidade. A variação do teor de carbono ao longo do diâmetro dos corpos-de-prova ocorre devida ao fenômeno metalúrgico da segregação.

Os teores de enxofre na superfície dos corpos-de-prova com diâmetro final de 36 mm são maiores do que os teores de enxofre na superfície dos corpos-de-prova com diâmetro final de 64 mm. A variação deste elemento químico foi de 12%. O enxofre influencia fortemente na usinabilidade.^(2,3,11-13) Os teores de enxofre variam ao longo do diâmetro dos corpos-de-prova devido ao fenômeno metalúrgico da segregação.

A superfície dos corpos-de-prova do 13º ensaio de usinabilidade apresenta microinclusões de sulfeto de manganês mais globulares e mais homoganeamente distribuídas do que as da superfície dos corpos-de-prova do 1º ensaio de usinabilidade. Esta avaliação foi realizada por meio da medição do fator de forma (L/W) das microinclusões de sulfeto de manganês. Segundo a teoria,⁽⁵⁾ as microinclusões de sulfeto de manganês globulares são mais favoráveis à usinabilidade do que as microinclusões de sulfeto de manganês alongadas. As microinclusões de sulfeto de manganês globulares apresentam maior fração volumétrica efetiva, o que lhes possibilita um maior efeito lubrificante. Um maior

efeito lubrificante entre a ferramenta de corte e a peça usinada proporciona um menor desgaste de flanco da ferramenta de corte.

Os teores de chumbo na superfície dos corpos-de-prova com diâmetro final de 36 mm são maiores do que os teores de chumbo na superfície dos corpos-de-prova com diâmetro final de 64 mm. A variação deste elemento químico foi de 11%. O chumbo está presente no aço SAE 12L14 sob a forma de microinclusões metálicas isoladas ou associadas às microinclusões de sulfeto de manganês.⁽²⁾ A superfície dos corpos-de-prova do 13º ensaio de usinabilidade apresenta uma maior quantidade de microinclusões grandes de chumbo e mais homogeneamente distribuídas. Segundo a teoria, a combinação de chumbo e sulfeto de manganês tem-se mostrado como sendo a que proporciona a maior usinabilidade nos aços.^(8,14) As microinclusões de chumbo melhoram a usinabilidade por meio do seu efeito lubrificante, reduzindo o atrito entre a ferramenta de corte e a peça usinada.

5 CONCLUSÕES

A partir da caracterização microestrutural (realizada por meio de análise química e análise do tipo, morfologia e distribuição das inclusões) e caracterização da usinabilidade (realizada por meio da avaliação do desgaste máximo de flanco da ferramenta de corte) de uma corrida de aço SAE 12L14, pode-se concluir que:

- 1 O aumento dos teores dos elementos químicos carbono, enxofre e chumbo ao longo do diâmetro dos corpos-de-prova influencia fortemente no desgaste de flanco da ferramenta de corte, mostrando-se benéfico à melhoria da usinabilidade;
- 2 A região dos corpos-de-prova com teor de carbono em torno de 0,08% foi a região que proporcionou o menor desgaste de flanco da ferramenta de corte;
- 3 A região dos corpos-de-prova com os maiores teores de enxofre (em torno de 0,31%) foi a região onde se verificou a maior usinabilidade (menor desgaste de flanco da ferramenta de corte);
- 4 A região dos corpos-de-prova com os maiores teores de chumbo (em torno de 0,30%) foi a região que proporcionou o menor desgaste de flanco da ferramenta de corte;
- 5 O menor desgaste de flanco da ferramenta de corte foi obtido na usinagem das regiões dos corpos-de-prova com a maior quantidade de inclusões de sulfeto de manganês globulares e mais homogeneamente distribuídas. Este fato comprova que as inclusões de sulfeto de manganês globulares melhoram a usinabilidade do aço.

REFERÊNCIAS

- 1 TROUP, G. B. An evaluation of the present understanding of metal cutting. **Metallurgical Guide to Machinability**, New York, v.20, n.3, p. 66-73, oct. 1966.
- 2 GARVEY, T. M.; TATA, H. J. Factors affecting the machinability of low-carbon free-machining steels. **Mechanical Working of Steel**, New York, v. 2, n. 26, p. 99-132, 1965.
- 3 BOULGER, F. W. et al. Force relationships in the machining of low-carbon steels of different sulphur contents. **Transactions ASME**, New York, v. 79, n. 1, p. 1155-1164, 1957.
- 4 SIMS, C. E.; FORGENG, W. D. Non metallic inclusions: Electric Furnace Steelmaking. **Transactions AIME**, v. 2, n. 1, p. 35-47, 1967.
- 5 MARSTON, G. J.; MURRAY, J. D. Machinability of low-carbon free-cutting steel. **Journal of The Iron and Steel Institute**, New York, v. 208, n. 6, p. 568-575, 1970.
- 6 SIDJANIN, L.; KOVAC, P. Fracture mechanisms in chip formation processes. **Materials Science and Technology**, New York, v. 13, n. 5, p. 439-444, 1997.
- 7 BARRETOS, M. S. **Influência das inclusões metálicas de bismuto na tenacidade e fadiga de um aço SAE 1045 com usinabilidade melhorada**. 1999. 140f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica – Projetos e Materiais) – Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Metalúrgica e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- 8 WARKE, W. R.; BREYER, N. N. Effect of steel composition on lead embrittlement. **Journal of The Iron and Steel Institute**, New York, v. 209, n. 10, p.779-784, 1971.
- 9 SOMEKAWA, M.; KAISO, M; MATSUSHIMA, Y. Free cutting non-leaded steels. **Kobelco Technology Review, CIDADE**, n. 24, p. 9-13, 2001.
- 10 SEP 1572. Mikroskopische prüfung von automatenstählen auf sulfidische nichtmetallische einschlüsse mit bildreihen. 1971.
- 11 SHAW, M. C.; USUI, E.; SMITH, A. Free machining steel: cutting forces, surface finish, and chip formation. **Transactions ASME**, New York, v. 83, n. 1, p. 181-193, 1961.
- 12 AYLWARD, P. T. Machinability as influenced by the composition, microstructure, and cold extrusion of steel. **Iron and Steel Engineer**, New York, v. 5, n. 2, p. 261-294, jan. 1973.
- 13 BAS, J. Aços especiais de usinabilidade melhorada. In: USINAGEM 2000, FEIRA E CONGRESSO, 2000, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Aranda Eventos, 2000.
- 14 PIMENTEL, M. F.; PRADO, E. L.; MIYADA, K. Avaliação da usinabilidade dos aços de corte fácil através da elaboração de curvas de usinabilidade (Curvas de Taylor) com uso de ferramentas de corte de aço rápido. In: Congresso Anual da ABM, 60., 2004, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABM, 2004. p. 3928-3936.