

**MARCELO FRANCISCO PIMENTEL**

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

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Projetos e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira

Guaratinguetá – SP  
2006

## **DADOS CURRICULARES**

**MARCELO FRANCISCO PIMENTEL**

|            |                                                                                       |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| NASCIMENTO | 03.11.1973 - Rio de Janeiro / RJ                                                      |
| FILIAÇÃO   | Domingos Francisco Pimentel<br>Jacyra Maria Pimentel                                  |
| 1994/1999  | Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica<br>Universidade Federal Fluminense - UFF |

À minha esposa, aos meus pais, às minhas irmãs e aos meus sobrinhos, que me possibilitaram a aquisição e aprimoramento de características essenciais a vida de um homem: solidariedade, humildade, paciência, amor e fé.

## AGRADECIMENTOS

- A Deus, por ter me dado muita força para a realização deste trabalho e por me permitir a conquista de muitos objetivos ao longo da minha vida;
- Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira, por sua orientação, apoio e paciência, sem os quais seria impossível a concretização deste trabalho;
- Aos engenheiros Dr. Kiyoshi Miyada e Edson Leme do Prado, da Aços Villares S.A., pelo apoio e incentivo depositados neste trabalho;
- Aos técnicos da Aços Villares S.A., João Paulo Maia, João Moreira da Motta e Raimundo Viana de Oliveira, pela execução das análises químicas, ensaios mecânicos e metalográficos;
- Aos funcionários da FEG, Célio José de Souza, Ely de Almeida Fornitano, Humberto Lopes Rodrigues, José Manoel Bernardes, Odir Vieira da Silva e Wilson Roberto Monteiro, pela ajuda no planejamento, realização e avaliação dos ensaios de usinabilidade;
- Ao Departamento de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNESP (*campus* de Guaratinguetá), pela utilização do Laboratório de Análise de Imagens de Materiais e do Laboratório de Usinagem;
- Ao Prof. Dr. Durval Rodrigues Jr. do DEMAR (FAENQUIL), pela realização das análises por microscopia eletrônica de varredura.

PIMENTEL, Marcelo Francisco. **Influência da composição química e da microestrutura na usinabilidade do aço de corte fácil com adição de chumbo (SAE 12L14)**, 2006. 120p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006.

## **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 trabalho, 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 executaram-se ensaios metalográficos. As análises químicas foram realizadas em amostras retiradas do lingotamento e em amostras retiradas do material laminado. Os ensaios metalográficos foram realizados para avaliar os principais tipos de microconstituintes e de inclusões presentes no aço estudado, por meio de microscopia óptica e eletrônica de varredura. 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 homogeneamente distribuídas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Composição química, aço de corte fácil, SAE 12L14, inclusões, usinabilidade.

PIMENTEL, Marcelo Francisco. **Influence of chemical composition and microstructure on the machinability of leaded free-cutting steel (SAE 12L14)**, 2006. 120p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006.

## **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 ladle and rolled samples. Metallography was used to identify the steel constituents and 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.

**KEYWORDS:** Chemical composition, free-machining steel, SAE 12L14, inclusions, machinability.

## LISTA DE FIGURAS

|             |                                                                                                                                                    |    |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1.1  | - Produção mensal de aço ao chumbo no período de Janeiro/2004 a Junho/2005.....                                                                    | 22 |
| FIGURA 1.2  | - Participação da produção de aço ao chumbo em relação ao peso total de aço produzido no período de Janeiro/2004 a Junho/2005.....                 | 22 |
| FIGURA 2.1  | - Esquema de um forno elétrico a arco.....                                                                                                         | 27 |
| FIGURA 2.2  | - Medidas para aumento de produtividade em aciaria elétrica.....                                                                                   | 28 |
| FIGURA 2.3  | - Representação esquemática de um Forno Panela.....                                                                                                | 33 |
| FIGURA 2.4  | - Processos de desgaseificação de aço.....                                                                                                         | 37 |
| FIGURA 2.5  | - Lingote para forjaria (típico).....                                                                                                              | 39 |
| FIGURA 2.6  | - Lingotamento direto (esquerda) e indireto.....                                                                                                   | 40 |
| FIGURA 2.7  | - Esquema da estrutura de um lingote.....                                                                                                          | 41 |
| FIGURA 2.8  | - Crescimento de cristais a partir dos cristais equiaxiais (E.F.) orientados favoravelmente.....                                                   | 42 |
| FIGURA 2.9  | - Microsegregação em aço de baixa liga, determinada por microsonda eletrônica.....                                                                 | 43 |
| FIGURA 2.10 | - Características estruturais de um lingote grande de aço acalmado.....                                                                            | 44 |
| FIGURA 2.11 | - Efeito da composição do aço em seu volume específico (inverso da densidade) a 1600°C.....                                                        | 45 |
| FIGURA 2.12 | - Diferença de densidade entre o líquido interdendrítico e o líquido não-segregado, durante a solidificação, em função da fração solidificada..... | 45 |
| FIGURA 2.13 | - Fluxograma do processo de fabricação do aço ao chumbo.....                                                                                       | 47 |
| FIGURA 2.14 | - Apresentação dos resultados do ensaio de vida da ferramenta (coordenadas cartesianas).....                                                       | 52 |
| FIGURA 2.15 | - Apresentação dos resultados do ensaio de vida da ferramenta (coordenadas logarítmicas).....                                                      | 53 |
| FIGURA 2.16 | - Desgaste frontal.....                                                                                                                            | 54 |
| FIGURA 2.17 | - Desgaste de cratera.....                                                                                                                         | 54 |

|             |                                                                                                                                                                                   |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 2.18 | - Relação entre o teor de enxofre e a deformação do cavaco a vários avanços em testes de torneamento.....                                                                         | 57 |
| FIGURA 2.19 | - Relação entre o teor de enxofre e o atrito cavaco-ferramenta a vários avanços em testes de torneamento.....                                                                     | 58 |
| FIGURA 2.20 | - Relação entre o teor de enxofre e o tamanho do cavaco.....                                                                                                                      | 59 |
| FIGURA 2.21 | - Efeito do teor de enxofre sobre a produtividade de usinagem dos aços do grau SAE 12XX.....                                                                                      | 60 |
| FIGURA 2.22 | - Efeito do teor de carbono sobre o índice de usinabilidade de barras de aço B1113 em testes de torneamento.....                                                                  | 61 |
| FIGURA 2.23 | - Efeito do teor de silício sobre o índice de usinabilidade de barras de aço B1113 em testes de torneamento.....                                                                  | 62 |
| FIGURA 2.24 | - Efeito do teor de silício sobre as características das inclusões de sulfeto de manganês em barras laminadas a quente do aço B1112 de 27 mm de diâmetro.....                     | 63 |
| FIGURA 2.25 | - Desempenho de barras trefiladas de aços de corte fácil baixo – carbono com vários teores de fósforo e nitrogênio, utilizadas na produção de tambores de porcas de parafuso..... | 66 |
| FIGURA 2.26 | - Relação entre os teores de fósforo e nitrogênio e o índice de usinabilidade de barras trefiladas de aço com 0,08% de C e 0,30% de S, em testes de torneamento.....              | 67 |
| FIGURA 2.27 | - Efeito da porcentagem de fósforo equivalente sobre a taxa de produção para os aços do grau 12XX, com e sem adição de chumbo.....                                                | 68 |
| FIGURA 2.28 | - Efeito da porcentagem de fósforo equivalente sobre as condições de usinagem para os aços do grau 12XX, com e sem adição de chumbo.....                                          | 69 |
| FIGURA 2.29 | - Formatos de inclusões de MnS no estado bruto de fusão e após deformação plástica.....                                                                                           | 73 |
| FIGURA 3.1  | - Correlação entre a análise química da amostra e o ensaio de usinabilidade.....                                                                                                  | 80 |
| FIGURA 3.2  | - Foto do torno utilizado nos ensaios de usinabilidade.....                                                                                                                       | 82 |
| FIGURA 3.3  | - Fotos do estereoscópio utilizado para a medição da profundidade de desgaste de flanco da ferramenta de corte.....                                                               | 83 |

|             |                                                                                                                                      |     |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FIGURA 3.4  | - Foto ilustrativa da medição do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte.....                                | 85  |
| FIGURA 4.1  | - Variação do teor de carbono em função do diâmetro final da amostra.....                                                            | 89  |
| FIGURA 4.2  | - Variação do teor de enxofre em função do diâmetro final da amostra.....                                                            | 90  |
| FIGURA 4.3  | - Variação do teor de chumbo em função da profundidade amostra.....                                                                  | 91  |
| FIGURA 4.4  | - Variação do teor de oxigênio em função da profundidade da amostra.....                                                             | 93  |
| FIGURA 4.5  | - Principais microconstituintes presentes nos aços resulfurados baixo-carbono com adição de chumbo.....                              | 95  |
| FIGURA 4.6  | - Foto do tamanho de grão austenítico.....                                                                                           | 96  |
| FIGURA 4.7  | - Foto das microinclusões encontradas na superfície da amostra 11.....                                                               | 98  |
| FIGURA 4.8  | - Foto das microinclusões encontradas a 28 mm da superfície da amostra 11.....                                                       | 98  |
| FIGURA 4.9  | - Foto das microinclusões encontradas no núcleo da amostra 11.....                                                                   | 99  |
| FIGURA 4.10 | - Foto das microinclusões 1 e 2 no núcleo da amostra 11....                                                                          | 99  |
| FIGURA 4.11 | - Espectro de Raios-X da microinclusão 1.....                                                                                        | 100 |
| FIGURA 4.12 | - Espectro de Raios-X da microinclusão 2.....                                                                                        | 100 |
| FIGURA 4.13 | - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte em função do percurso de corte.....                  | 106 |
| FIGURA 4.14 | - Desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte (após 6000 m) em função do diâmetro final dos corpos-de-prova..... | 108 |

## LISTA DE TABELAS

|             |                                                                                                                                              |     |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| TABELA 2.1  | - Composição química do aço ressulfurado SAE 1213.....                                                                                       | 24  |
| TABELA 2.2  | - Composição química do aço ressulfurado com adição de chumbo SAE 12L14.....                                                                 | 25  |
| TABELA 2.3  | - Efeito do teor de nitrogênio sobre o desempenho de barras de aço trefiladas, utilizadas na produção de tambores de porcas de parafuso..... | 65  |
| TABELA 2.4  | - Inclusões presentes nos aços.....                                                                                                          | 71  |
| TABELA 3.1  | - Profundidades em que foi realizada a análise química das amostras.....                                                                     | 79  |
| TABELA 3.2  | - Ensaios de usinabilidade realizados.....                                                                                                   | 86  |
| TABELA 4.1  | - Resultado da análise química de panela.....                                                                                                | 87  |
| TABELA 4.2  | - Média e desvio-padrão dos resultados da análise química de produto.....                                                                    | 88  |
| TABELA 4.3  | - Média e desvio-padrão dos resultados das análises de oxigênio e nitrogênio.....                                                            | 92  |
| TABELA 4.4  | - Média e desvio-padrão dos resultados dos ensaios de tração.....                                                                            | 94  |
| TABELA 4.5  | - Média e desvio-padrão dos resultados dos ensaios de dureza.....                                                                            | 94  |
| TABELA 4.6  | - Resultado da análise de microinclusões não-metálicas, conforme a norma SEP 1572.....                                                       | 97  |
| TABELA 4.7  | - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte no 1º ensaio de usinabilidade.....                           | 101 |
| TABELA 4.8  | - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte no 2º ensaio de usinabilidade.....                           | 102 |
| TABELA 4.9  | - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte no 3º ensaio de usinabilidade.....                           | 102 |
| TABELA 4.10 | - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte no 4º ensaio de usinabilidade.....                           | 102 |
| TABELA 4.11 | - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte no 5º ensaio de usinabilidade.....                           | 103 |
| TABELA 4.12 | - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da                                                                                  |     |

|             |                                                                                                                           |     |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|             | ferramenta de corte no 6° ensaio de usinabilidade.....                                                                    | 103 |
| TABELA 4.13 | - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da<br>ferramenta de corte no 7° ensaio de usinabilidade.....     | 103 |
| TABELA 4.14 | - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da<br>ferramenta de corte no 8° ensaio de usinabilidade.....     | 104 |
| TABELA 4.15 | - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da<br>ferramenta de corte no 9° ensaio de usinabilidade.....     | 104 |
| TABELA 4.16 | - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da<br>ferramenta de corte no 10° ensaio de<br>usinabilidade..... | 104 |
| TABELA 4.17 | - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da<br>ferramenta de corte no 11° ensaio de<br>usinabilidade..... | 105 |
| TABELA 4.18 | - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da<br>ferramenta de corte no 12° ensaio de<br>usinabilidade..... | 105 |
| TABELA 4.19 | - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da<br>ferramenta de corte no 13° ensaio de<br>usinabilidade..... | 105 |
| TABELA 4.20 | - Desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de<br>corte após um percurso de corte de 6000 m.....             | 107 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|          |                                                                      |
|----------|----------------------------------------------------------------------|
| ABNT     | - Associação Brasileira de Normas Técnicas                           |
| AISI     | - American Iron and Steel Institute                                  |
| ASTM     | - American Society for Testing and Materials                         |
| COJET    | - coerente jet (jato coerente)                                       |
| DEMAR    | - Departamento de Materiais                                          |
| DIN      | - Deutsches Institut für Normung e. V.                               |
| EP       | - equivalent phosphorus (fósforo equivalente)                        |
| FAENQUIL | - Faculdade de Engenharia Química de Lorena                          |
| FEA      | - forno elétrico a arco                                              |
| MEV      | - microscopia eletrônica de varredura                                |
| MI       | - machinability index (índice de usinabilidade)                      |
| MPI      | - machining productivity index (índice de produtividade de usinagem) |
| SAE      | - Society of Automotive Engineers                                    |
| SEP      | - Stahl – Eisen - Prüfblatt                                          |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                                |                              |
|--------------------------------|------------------------------|
| °C                             | - graus Celsius              |
| %                              | - porcentagem                |
| A                              | - ampère                     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | - óxido de alumínio          |
| C.                             | - zona colunar               |
| CaO                            | - óxido de cálcio            |
| (CaO)                          | - óxido de cálcio na escória |
| CaS                            | - sulfeto de cálcio          |
| CDP                            | - corpo-de-prova             |
| CO                             | - monóxido de carbono        |
| Δ                              | - diferença                  |
| D <sub>i</sub>                 | - diâmetro inicial           |
| D <sub>f</sub>                 | - diâmetro final             |
| E.C.                           | - zona equiaxial fina        |
| E.C.                           | - zona equiaxial central     |
| eV                             | - elétron-volts              |
| FeO                            | - óxido de ferro             |
| (FeO)                          | - óxido de ferro na escória  |
| f <sub>s</sub>                 | - fração solidificada        |
| g                              | - gramas                     |
| h                              | - hora                       |
| HB                             | - Dureza Brinell             |

|               |                                              |
|---------------|----------------------------------------------|
| kg            | - quilogramas                                |
| L             | - fase líquida                               |
| $l_c$         | - percurso de corte                          |
| L/W           | - fator de forma (comprimento sobre largura) |
| $\mu\text{m}$ | - micrometro                                 |
| m/min         | - metros por minuto                          |
| <u>M</u>      | - metal dissolvido no aço                    |
| mm/rev        | - milímetros por revolução                   |
| MnO           | - óxido de manganês                          |
| MnS           | - sulfeto de manganês                        |
| MnSe          | - seleneto de manganês                       |
| Mn(S, Se)     | - sulfeto de manganês contendo selênio       |
| MnTe          | - telureto de manganês                       |
| $M_xO_y$      | - óxido de um metal                          |
| MPa           | - megapascal                                 |
| N             | - Newton                                     |
| N°            | - número                                     |
| <u>O</u>      | - oxigênio dissolvido no aço                 |
| <u>P</u>      | - fósforo dissolvido no aço                  |
| $P_2O_5$      | - óxido de fósforo                           |
| ( $P_2O_5$ )  | - óxido de fósforo na escória                |
| ppm           | - partes por milhão                          |
| $\rho$        | - densidade                                  |
| <u>S</u>      | - enxofre dissolvido no aço                  |

|            |                                                                            |
|------------|----------------------------------------------------------------------------|
| $S^{-2}$   | - ânion enxofre                                                            |
| t          | - tonelada                                                                 |
| T          | - vida da ferramenta de corte                                              |
| V          | - volts                                                                    |
| $V_B$      | - desgaste de flanco                                                       |
| $V_{Bmax}$ | - desgaste máximo de flanco                                                |
| $V_t$      | - velocidade de corte necessária para uma vida de ferramenta t             |
| $V_{10}$   | - velocidade de corte necessária para uma vida de ferramenta de 10 minutos |
| $V_{30}$   | - velocidade de corte necessária para uma vida de ferramenta de 30 minutos |
| $V_{60}$   | - velocidade de corte necessária para uma vida de ferramenta de 60 minutos |
| x          | - número de moléculas de metal dissolvido no aço                           |
| y          | - número de moléculas de oxigênio dissolvido no aço                        |

## LISTA DE EQUAÇÕES

- 2.1 - 
$$\text{MPI (\%)} = \frac{\text{Taxa de produção máxima do aço testado} \times 100}{\text{Taxa de produção máxima do aço padrão}}$$
 60
- 2.2 - 
$$\% \text{ EP} = \% \text{ P} + 5(\% \text{ N}_2 - 0,010\%), \text{ se } \text{N}_2 < 0,010\%$$
 67
- 2.3 - 
$$\% \text{ EP} = \% \text{ P}, \text{ se } 0,010 \leq \text{N}_2 \leq 0,012$$
 67
- 2.4 - 
$$\% \text{ EP} = \% \text{ P} + 5(\% \text{ N}_2 - 0,012\%), \text{ se } 0,012 < \text{N}_2$$
 68

## SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LISTA DE SÍMBOLOS

|           |                                                                                             |    |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1</b>  | <b>INTRODUÇÃO</b> .....                                                                     | 20 |
| <b>2</b>  | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....                                                          | 23 |
| 2.1       | AÇO DE CORTE FÁCIL.....                                                                     | 23 |
| 2.2       | PRINCIPAIS TIPOS DE AÇOS DE CORTE FÁCIL BAIXO-<br>CARBONO.....                              | 23 |
| 2.2.1     | <b>Aços resulfurados</b> .....                                                              | 23 |
| 2.2.2     | <b>Aços resulfurados com adição de chumbo</b> .....                                         | 24 |
| 2.2.3     | <b>Aços resulfurados ao chumbo com aditivos especiais</b> .....                             | 25 |
| 2.3       | PROCESSO DE ELABORAÇÃO DE AÇOS ATRAVÉS DE<br>FORNOS ELÉTRICOS E REFINO EM FORNO PANELA..... | 26 |
| 2.3.1     | <b>Forno elétrico a arco</b> .....                                                          | 26 |
| 2.3.1.1   | Equipamento.....                                                                            | 27 |
| 2.3.1.2   | A carga.....                                                                                | 29 |
| 2.3.1.3   | Descarburação e desfosforação.....                                                          | 30 |
| 2.3.2     | <b>Forno Panela</b> .....                                                                   | 31 |
| 2.3.2.1   | Equipamento.....                                                                            | 32 |
| 2.3.2.2   | Desoxidação e dessulfuração.....                                                            | 32 |
| 2.3.2.2.1 | Desoxidação.....                                                                            | 32 |
| 2.3.2.2.2 | Dessulfuração.....                                                                          | 34 |
| 2.3.2.3   | Homogeneização e remoção de inclusões não-metálicas.....                                    | 34 |
| 2.3.3     | <b>Desgaseificação</b> .....                                                                | 35 |
| 2.3.3.1   | Processos de desgaseificação.....                                                           | 35 |
| 2.3.4     | <b>Lingotamento convencional</b> .....                                                      | 36 |

|              |                                                                       |           |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.3.4.1      | Tipos de lingoteiras – técnicas de lingotamento.....                  | 38        |
| 2.3.4.2      | Estrutura de lingotes.....                                            | 40        |
| 2.3.4.3      | Microsegregação.....                                                  | 42        |
| 2.3.4.4      | Macrosegregação.....                                                  | 43        |
| 2.3.4.4.1    | Segregação em “A”.....                                                | 44        |
| 2.3.4.4.2    | Segregação negativa (base) e positiva (topo).....                     | 46        |
| 2.3.4.4.3    | Segregação em “V”.....                                                | 46        |
| 2.4          | PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO AÇO SAE 12L14 NA<br>AÇOS VILLARES.....      | 47        |
| 2.5          | USINABILIDADE.....                                                    | 49        |
| 2.6          | ENSAIOS DE USINABILIDADE.....                                         | 50        |
| <b>2.6.1</b> | <b>Ensaio de “Vida da ferramenta x Velocidade de corte”.....</b>      | <b>50</b> |
| 2.6.1.1      | Procedimentos do ensaio de vida da ferramenta.....                    | 51        |
| 2.6.1.2      | Apresentação dos resultados do ensaio de vida da ferramenta.....      | 52        |
| 2.7          | TIPOS DE DESGASTES DA FERRAMENTA.....                                 | 53        |
| 2.8          | MEDIÇÃO DOS DESGASTES DA FERRAMENTA.....                              | 54        |
| 2.9          | EFEITO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA E DAS INCLUSÕES<br>NA USINABILIDADE..... | 55        |
| <b>2.9.1</b> | <b>Efeito da composição química na usinabilidade.....</b>             | <b>56</b> |
| 2.9.1.1      | Efeito do enxofre.....                                                | 56        |
| 2.9.1.2      | Efeito do carbono e do silício.....                                   | 60        |
| 2.9.1.3      | Efeito do fósforo e do nitrogênio.....                                | 64        |
| 2.9.1.4      | Efeito do cobre e do estanho.....                                     | 70        |
| <b>2.9.2</b> | <b>Efeito das inclusões na usinabilidade.....</b>                     | <b>70</b> |
| 2.9.2.1      | Efeito das inclusões de sulfeto de manganês.....                      | 72        |
| 2.9.2.2      | Efeito dos aditivos intensificadores de sulfetos de manganês.....     | 74        |
| 2.9.2.3      | Efeito das inclusões metálicas.....                                   | 75        |
| 2.9.2.4      | Efeito dos óxidos plásticos.....                                      | 76        |
| <b>3</b>     | <b>DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>                              | <b>78</b> |
| 3.1          | CARACTERIZAÇÃO DO AÇO SAE 12L14.....                                  | 78        |
| <b>3.1.1</b> | <b>Análise química.....</b>                                           | <b>78</b> |
| <b>3.1.2</b> | <b>Ensaio de tração.....</b>                                          | <b>80</b> |
| <b>3.1.3</b> | <b>Ensaio de dureza.....</b>                                          | <b>81</b> |
| <b>3.1.4</b> | <b>Ensaio metalográficos.....</b>                                     | <b>81</b> |
| 3.2          | ENSAIOS DE USINABILIDADE.....                                         | 82        |

|       |                                              |     |
|-------|----------------------------------------------|-----|
| 3.2.1 | <b>Equipamentos utilizados.....</b>          | 82  |
| 3.2.2 | <b>Condições de usinagem.....</b>            | 83  |
| 3.2.3 | <b>Metodologia do ensaio.....</b>            | 84  |
| 4     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>           | 87  |
| 4.1   | RESULTADOS DA ANÁLISE QUÍMICA.....           | 87  |
| 4.2   | RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS.....        | 94  |
| 4.3   | RESULTADOS DOS ENSAIOS METALOGRÁFICOS.....   | 95  |
| 4.4   | RESULTADOS DOS ENSAIOS DE USINABILIDADE..... | 101 |
| 5     | <b>CONCLUSÕES.....</b>                       | 111 |
|       | <b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b> | 112 |
|       | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>       | 113 |

## CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

Com a crescente utilização de máquinas-ferramenta, já no final do século XIX, a preocupação com a usinabilidade passou a ser objeto de estudo, sendo desta época, a criação das curvas de Taylor de tempo de vida de ferramenta (GARVEY; TATA, 1965). No entanto, devido às várias especificidades encontradas nas operações de usinagem, bem como devido aos diferentes objetivos de tais operações, o conceito de usinabilidade é bastante amplo, não existindo uma definição técnica que seja aceita universalmente. Porém, esta característica é geralmente vista como sendo relacionada com a maior taxa com que um material pode ser removido durante a produção de uma peça de qualidade aceitável.

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. Os ensaios de usinabilidade não são apenas importantes para comparar esta característica em diversos materiais. Eles possibilitam a definição de condições ótimas de usinagem que resultarão em ganho de produtividade e redução de custos.

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. Assim, a escolha do grupo de aços, mais adequado para determinada produção de peças que sofrerão operação de usinagem, dependerá, basicamente, das propriedades mecânicas que são exigidas no produto final e, do tipo de usinagem a ser empregado na sua produção. Para as aplicações onde as peças são solicitadas a grandes esforços e as velocidades de corte na usinagem são altas (maiores que 100 m/min), predomina o grupo de aços com controle de morfologia de óxidos. Para aplicações onde a propriedade mecânica da peça não é o fator mais importante, os aços de corte fácil resulfurados com adição de chumbo são os mais utilizados.

A empresa Aços Villares S.A., com uma produção da ordem de 1000 t/mês de aço de corte fácil resulfurado com adição de chumbo, nas usinas de Pindamonhangaba e Mogi das Cruzes, é a única produtora desse tipo de material no Brasil. Na Figura 1.1, é apresentada a evolução da produção de aços resulfurados ao chumbo nos últimos 18 meses, entre janeiro de 2004 e junho 2005. Na Figura 1.2, tem-se a participação da produção de aços resulfurados ao chumbo em relação ao total de aços produzidos no período de janeiro de 2004 a junho 2005 (MISKULIN, 2005). Por meio das Figuras 1.1 e 1.2, pode-se verificar que a produção desse tipo de material é significativa, ressaltando a importância do estudo dos fatores químicos e metalúrgicos capazes de melhorar o seu desempenho na usinabilidade. As principais aplicações dos aços resulfurados ao chumbo são: niple para roda de moto e bicicleta, miolo do volante para indústria automobilística, engates rápidos, conexões hidráulicas e mecânicas e peças para mecanismo de limpadores de pára-brisa (BOARETTO NETO, 2005).

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

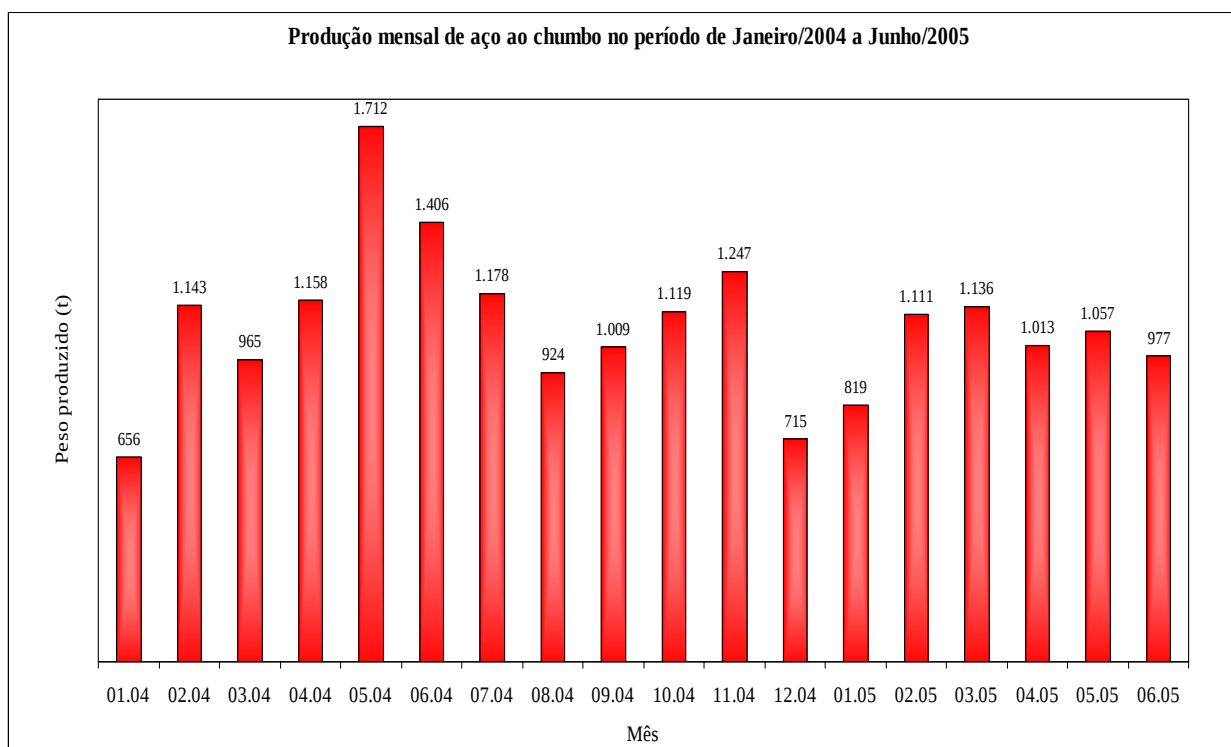


Figura 1.1 - Produção mensal de aço ao chumbo no período de Janeiro/2004 a Junho/2005 (MISKULIN, 2005).

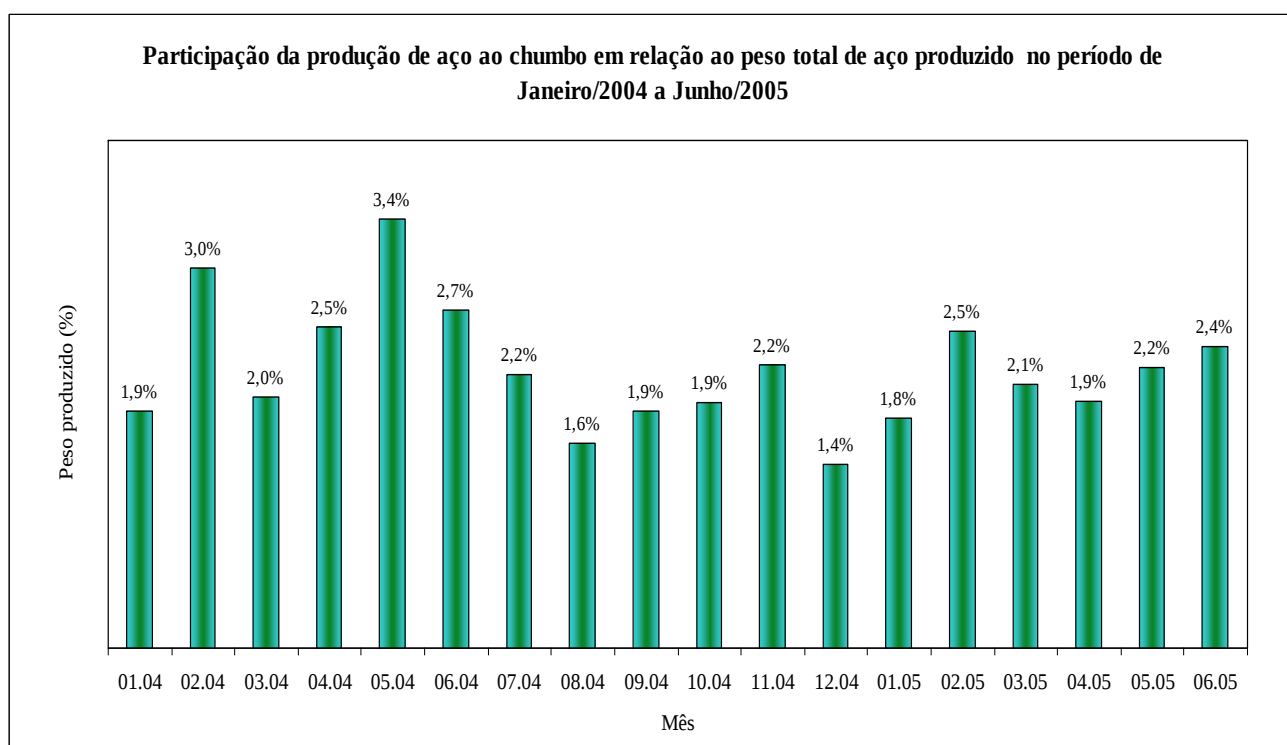


Figura 1.2 - Participação da produção de aço ao chumbo em relação ao peso total de aço produzido no período de Janeiro/2004 a Junho/2005 (MISKULIN, 2005).

## **CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 AÇO DE CORTE FÁCIL**

Aço mais facilmente usinável que outro de composição análoga quanto aos elementos principais. Esse tipo de aço contém adições propositadas de enxofre, chumbo, fósforo e outros elementos que asseguram melhoria da usinabilidade (ABNT, 1986). Conforme a norma SAE J 403 (SAE, 2004), os aços de corte fácil podem ser classificados em duas séries:

- Série 11XX (aço de corte fácil resulfurado): O teor de enxofre é de no mínimo 0,08%;
- Série 12XX (aço de corte fácil resulfurado e refosforado): Os teores de enxofre e fósforo são, respectivamente, de no mínimo 0,16% e 0,04%.

Os aços de corte fácil mais usuais ainda podem ser classificados em baixo e médio carbono. O aço baixo-carbono apresenta teor nominal de carbono inferior ou igual a 0,30%. O aço médio-carbono apresenta teor nominal de carbono superior a 0,30% e igual ou inferior a 0,50% (ABNT, 1986).

### **2.2 PRINCIPAIS TIPOS DE AÇOS DE CORTE FÁCIL BAIXO-CARBONO**

#### **2.2.1 Aços resulfurados**

Embora os aços resulfurados baixo-carbono que contêm 0,10, 0,20 e 0,30% de enxofre sejam comumente usados em aplicações de usinagem, os mais usuais são aqueles que contêm nominalmente 0,30% de enxofre.

O enxofre foi o primeiro aditivo a ser usado para melhorar a característica de boa usinabilidade nos aços. Devido a sua eficiência e baixo custo, o enxofre continua a ser fortemente utilizado até hoje como aditivo que proporciona bom desempenho de usinagem.

Como é bem conhecido, o enxofre tende a aumentar a fragilidade a quente dos aços como um resultado da formação de inclusões de sulfeto de ferro nos contornos de

grão, as quais se fundem nas temperaturas de laminação a quente. Os fabricantes de aços eliminam essa fragilidade a quente pela adição suficiente de manganês no aço líquido para garantir a formação de inclusões de sulfeto de manganês, que não se fundem nas temperaturas de laminação a quente. Assim, o enxofre está presente no aço principalmente como inclusões de sulfeto de manganês.

O enxofre tem um efeito benéfico sobre a qualidade interna do aço, pois tende a suprimir a formação de monóxido de carbono pela ação que exerce sobre a atividade química do carbono e/ou oxigênio (CARNEY; RUDOLPHY, 1953). Assim, o enxofre age como um agente “acalmante” e reduz a tendência de formação de bolhas conhecidas como “blowholes”, que se formam durante a solidificação dos aços de corte fácil baixo-carbono. Felizmente, os aços que são utilizados em aplicações que exigem um elevado nível de usinabilidade são elaborados com níveis de enxofre e manganês suficientemente altos. Assim, estes aços já são inerentemente semi-acalmados, não havendo a necessidade de adição de desoxidantes, tais como silício e alumínio, extremamente prejudiciais à usinabilidade.

Na Tabela 2.1, é apresentada a composição química do aço resulfurado SAE 1213 conforme a norma SAE J 403 (SAE, 2004).

Tabela 2.1 - Composição química do aço resulfurado SAE 1213 (SAE, 2004).

| C (%)     | Mn (%)    | P (%)     | S(%)      |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0,13 Max. | 0,70-1,00 | 0,07-0,12 | 0,24-0,33 |

### 2.2.2 Aços resulfurados com adição de chumbo

Os aços resulfurados com adição de chumbo constituem objeto de estudo há mais de 65 anos, entretanto foi somente a partir dos últimos 50 anos que este tipo de aço tornou-se fortemente aceito pelo mercado. Este atraso na aceitação total dos aços resulfurados ao chumbo é atribuído às grandes variações no seu desempenho de usinagem. De fato, as práticas de fabricação deste aço tiveram que ser melhoradas antes da produção consistente de um material com alta qualidade.

Como o chumbo apresenta uma solubilidade limitada e devido a sua maior densidade, este elemento tende a se aglomerar no aço líquido podendo originar uma forte segregação de chumbo. Esse tipo de defeito interno prejudica a usinabilidade do aço. Para detectar a ocorrência de segregação de chumbo, os fabricantes de aço utilizam habitualmente um tipo de ensaio chamado de teste de exudação de chumbo. Neste tipo de ensaio, uma amostra é retirada no sentido transversal de um tarugo (ou barra) e é aquecida a 700°C por 10 a 20 minutos. Após isto, a amostra é examinada visualmente e nas regiões onde existe segregação surgem “bolhas de chumbo”, que revelam a existência deste tipo de defeito interno.

Por muitos anos, acreditou-se que o chumbo existia no aço como uma dispersão submicroscópica. Entretanto, sabe-se que na verdade o chumbo está presente como pequenas inclusões visíveis ao microscópio e usualmente associadas com inclusões de sulfeto de manganês (CHALFANT, 1960). O chumbo não forma compostos com outros elementos, tais como sulfeto de chumbo, mesmo porque a energia livre de formação do sulfeto de chumbo é muito maior do que a do sulfeto de manganês. O efeito do chumbo sobre a usinabilidade será visto posteriormente.

Na Tabela 2.2, é apresentada a composição química do aço resulfurado com adição de chumbo, SAE 12L14, conforme a norma SAE J 403 (SAE, 2004).

Tabela 2.2 - Composição química do aço resulfurado com adição de chumbo SAE 12L14 (SAE, 2004).

| C (%)     | Mn (%)    | P (%)     | S(%)      | Pb (%)    |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0,15 Max. | 0,85-1,15 | 0,04-0,09 | 0,26-0,35 | 0,15-0,35 |

### 2.2.3 Aços resulfurados ao chumbo com aditivos especiais

Diversos outros aditivos, tais como bismuto, selênio e telúrio, podem ser usados em conjunto com chumbo e enxofre para melhorar a usinabilidade dos aços baixo-carbono. Estes aços são utilizados em aplicações, onde a taxa de remoção do metal é

maior do que a obtida com aços resulfurados com apenas adição de chumbo. A quantidade destes elementos presente no aço é em torno de 0,10% e eles se apresentam combinados com as inclusões de chumbo ou de sulfeto de manganês (ou ambas as inclusões).

## 2.3 PROCESSO DE ELABORAÇÃO DE AÇOS ATRAVÉS DE FORNOS ELÉTRICOS E REFINO EM FORNO PANELA

### 2.3.1 Forno elétrico a arco

Numerosos tipos de fornos empregando a eletricidade como fonte de energia para o metal têm sido desenvolvidos. Entretanto, em termos de utilização, o forno a arco e o forno de indução são os mais comuns. Especificamente, em aciaria, quase 100% da tonelagem produzida em fornos elétricos provém de fornos a arco. Como o emprego de escória no forno de indução é difícil (em função da dificuldade para seu aquecimento), estes fornos encontram maior emprego em fundições.

O forno elétrico a arco é, sem dúvida, um dos instrumentos mais versáteis na produção de aço, e vem se tornando também, nas últimas décadas, um dos mais eficientes. Algumas das importantes vantagens do forno elétrico a arco são:

- Permite produzir praticamente qualquer tipo de aço, em função do controle do aquecimento virtualmente independente de reações químicas;
- É um aparelho extremamente versátil, no que tange a carga, podendo ser operado com 100% de carga sólida;
- Permite operação intermitente e mudanças rápidas na produção;
- Tem alta eficiência energética.

O número crescente de fornos a arco instalados e a tendência de utilização de fornos cada vez maiores (de 200-250 t) são uma clara evidência da importância deste processo. Isto se deve, também, ao aumento do emprego de aços ligados, mais economicamente produzidos no forno a arco.

### 2.3.1.1 Equipamento

A Figura 2.1 mostra esquematicamente um forno a arco moderno. Os três eletrodos de grafite são ligados às três fases do secundário de um transformador de tensão variável cuja faixa de operação é, normalmente, de 100-300 V. O arco elétrico é estabelecido entre os eletrodos e a sucata, sendo a radiação emitida por este arco responsável pela fusão da carga.

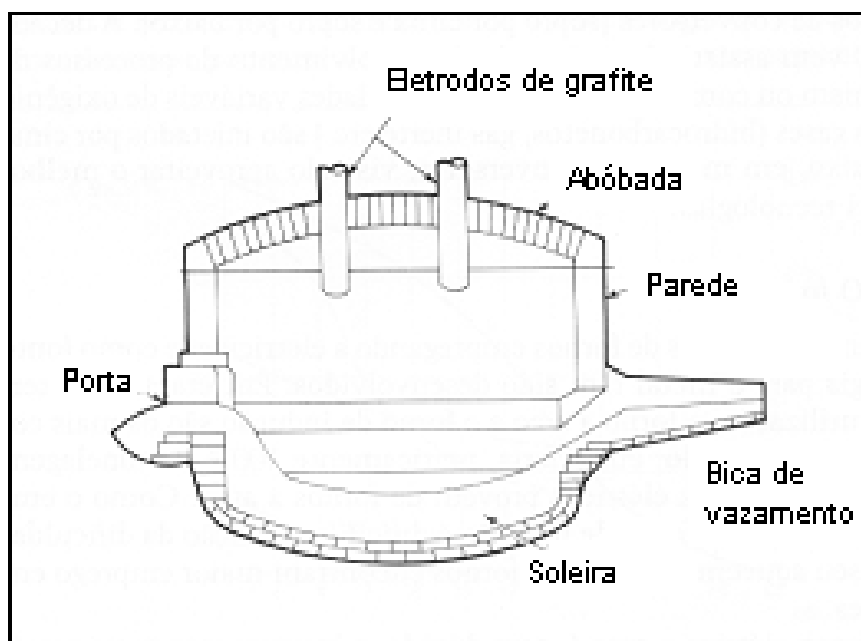


Figura 2.1 - Esquema de um forno elétrico a arco (AMELLING et al., 1986).

A Figura 2.2 sumariza as principais medidas adotadas em modernas aciarias elétricas com vistas ao aumento da produtividade (AMELLING et al., 1986).

O carregamento do forno a arco normalmente é feito pela abertura da abóbada, que gira, deixando o forno livre para carga. Há ainda uma porta, por onde são adicionados materiais como ligas, formadores de escórias etc. e, oposta a esta, há uma bica de vazamento, por onde, mediante o basculamento do forno, o aço vaza para a panela após se concluir a corrida.

A partir de 1983 (AMELLING et al., 1986), fornos com vazamento pelo fundo - EBT e OBT (válvula gaveta instalada excentricamente no fundo do forno) - foram desenvolvidos. Com este sistema, é possível vazar o aço completamente livre de

escória do forno, inconveniente para o refino no forno panela. Além disto, o ângulo de basculamento do forno é muito reduzido, o que permite a instalação segura de painéis refrigerados à água até muito próximo da linha de escória e reduz significativamente a complexidade e os custos da parte mecânica do forno.

Nos fornos modernos, há ainda um sistema de captação de fumos, evitando-se a emissão de pós poluentes para a atmosfera.

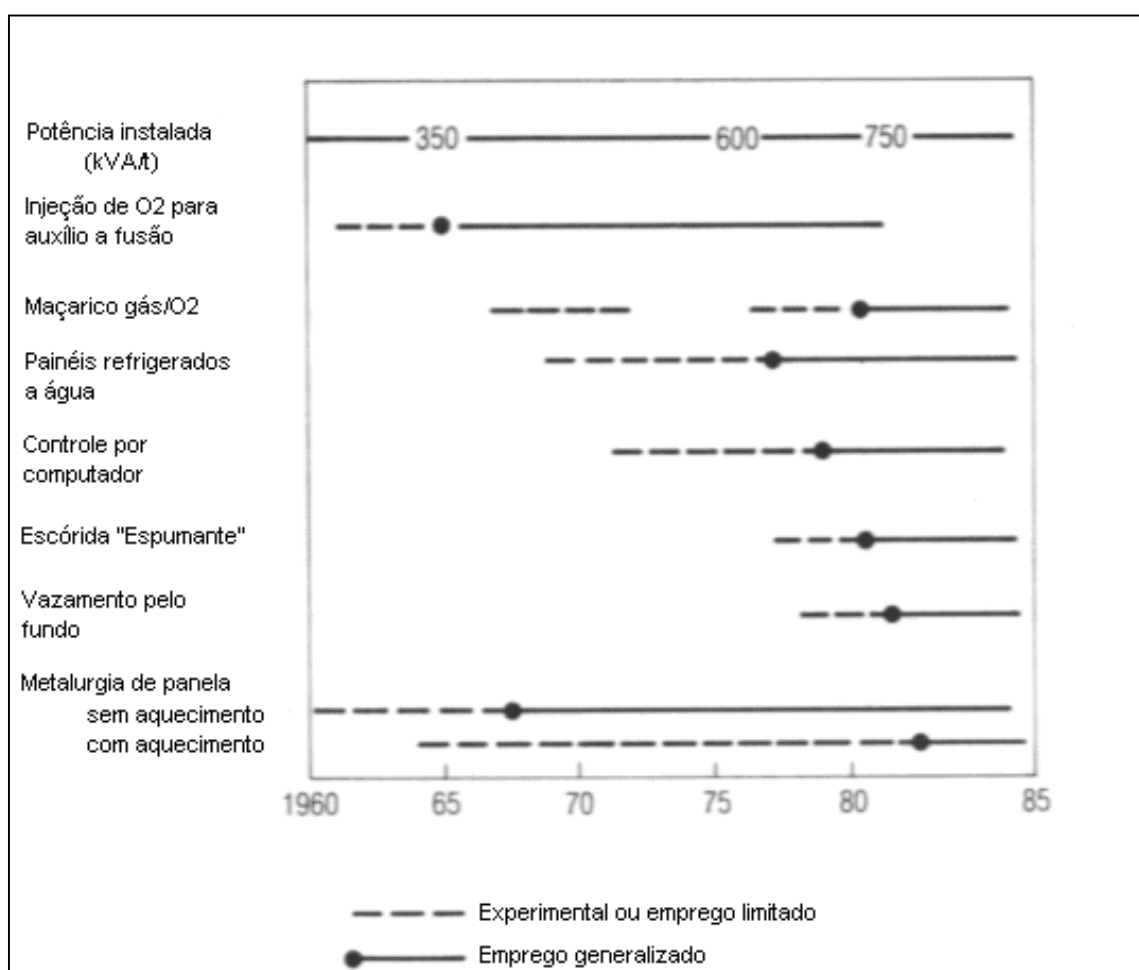


Figura 2.2 - Medidas para aumento de produtividade em aciaria elétrica (AMELLING et al., 1986).

As novas tecnologias desenvolvidas ou em andamento para os fornos elétricos a arco são (CHEVRAND, 2003):

- Uso de queimadores/injetores de oxigênio e combustíveis ou outros materiais;
- Substituição da energia elétrica por energia fóssil;

- Injeção de gás inerte pela soleira do forno;
- Aumento do uso de gusa sólido e gusa líquido;
- Utilização dos fornos tipo “Twin Shell” (forno com carcaça dupla) e “High Shell” (forno com carcaça elevada).

#### 2.3.1.2 A carga

Basicamente, a carga do forno a arco é composta de sucata. Devido à necessidade de se aproveitar os elementos de liga contidos na sucata e se evitar a presença de elementos indesejáveis em determinados aços, exige-se do operador de forno elétrico – especialmente nas usinas de aços especiais – uma cuidadosa separação e armazenamento da sucata. Normalmente, a sucata é armazenada em grupos (por família de aços), de modo que, ao ser empregada, possa ser prevista, com segurança, a composição química a ser obtida. Assim, uma usina de aços especiais chega a ter 50 diferentes grupos de sucata.

Por outro lado, o aspecto físico da sucata é também muito importante. Como a sucata pode ter densidade aparente muito baixa, é importante balancear corretamente a carga, para se evitar a necessidade de muitos carregamentos que comprometam a produtividade.

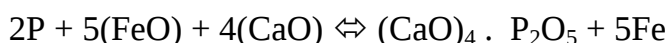
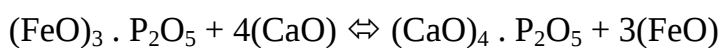
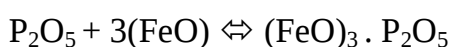
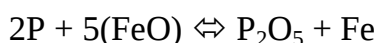
Além da sucata, são empregados ferro-ligas ou metais puros para compor a carga desejada para cada aço. Normalmente se evita carregar ferro-ligas de elementos oxidáveis (como cromo, vanádio) juntamente com a sucata para diminuir as perdas.

Dentre as ferro-ligas, há também várias opções. Há ligas de alto teor de carbono ou baixo teor de carbono, ligas de baixo fósforo e enxofre e ligas de alto teor de residuais. Obviamente, o operador deve realizar um balanço econômico das opções disponíveis para atingir determinada especificação de aço, escolhendo a opção que apresentar melhor equilíbrio econômico-operacional.

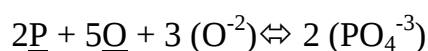
### 2.3.1.3 Descarburacão e desfosforação

Durante a fusão, normalmente ocorre a evolução de CO decorrente da oxidação do carbono pelo sopro de oxigênio ( $C + \frac{1}{2} O_2 \rightleftharpoons CO$ ), havendo agitação e eliminação de gases dissolvidos (CHEVRAND, 2003).

Neste estágio da corrida, ocorre também a desfosforação (HASSALL; JACKAMAN; HAWKINS, 1991), descrita molecularmente por:



Ou ionicamente por ( GAYE; GROSJEAN; RIBOUD, 1982):



As condições ideais para o progresso da desfosforação (HASSALL; JACKAMAN; HAWKINS, 1991) são:

- Baixa temperatura ( $\sim 1580^\circ C$ ), pois a oxidação do fósforo é exotérmica;
- Alta basicidade da escória, para abaixar a atividade de  $P_2O_5$ , formando  $(CaO)_4 \cdot P_2O_5$ ;
- Alta oxidação do aço.

Em termos práticos, obtêm-se estas condições pela adição de cal. Modernamente, tem sido empregado o sistema de lanças COJET, através do qual são injetados oxigênio e carburante. Além de excelentes resultados de desfosforação, o processo se passa em tempo mais curto do que o requerido pela desfosforação convencional (minério + cal).

Após o refino primário, o aço é vazado para uma panela, a qual é transferida para a estação do forno panela. É importante salientar que, antes do aço ir para o forno panela, a escória de desfosforação deve ser completamente removida.

### 2.3.2 Forno Panela

O forno panela é o equipamento siderúrgico cuja aplicação, provavelmente, experimentou a evolução mais rápida. A primeira unidade de produção estava operando no ano de 1965. O número de 200 instalações em funcionamento no mundo, incluindo aquelas com vácuo e transformadas de fornos elétricos a arco, foi superado 22 anos depois (AMBLARD; LEGRAND, 1988). Estes fornos, inicialmente existentes apenas na Europa, tiveram crescimento, em número, no Japão a partir de 1975. Na década de 80, na América do Norte e resto do mundo, o número de unidades ainda era proporcionalmente pequeno, indicando possibilidades de crescimento nos anos 90. No Brasil, estes equipamentos foram introduzidos em 1969, mas a utilização evoluiu a partir da década de 80.

O forno panela nada mais é que um forno elétrico a arco, cuja carga é o aço líquido em uma panela (daí o seu nome), proveniente do forno primário.

Pelo fato de permitir o aquecimento do aço líquido, o forno panela confere alta flexibilidade a uma aciaria, facilitando enormemente operações de refino do aço líquido:

- Adições de ligas, mesmo em grandes quantidades;
- Troca e controle da escória;
- Atmosfera não-oxidante;
- Agitação eletromagnética ou com gases.

De uma forma geral, as principais vantagens do forno panela são:

- Ajuste estreito da temperatura do aço (permitindo melhoria da qualidade de lingotes);
- Ajuste estreito da composição química (permitindo estabilidade de características entre corridas);
- Melhor limpeza dos aços (por meio da desoxidação, dessulfuração e remoção de inclusões).

### 2.3.2.1 Equipamento

O forno panela é um aparelho utilizado para aquecimento e refino de metal líquido, empregando energia elétrica como um forno elétrico a arco. A Figura 2.3 apresenta, esquematicamente, um forno panela com seus componentes principais assinalados.

Além dos componentes exibidos na Figura 2.3, podemos citar outros elementos que normalmente fazem parte do conjunto forno panela:

- Carro de transferência;
- Equipamento automático para amostragem;
- Sistema de despoeiramento.

### 2.3.2.2 Desoxidação e dessulfuração

O aço é submetido ao refino secundário no forno panela após a retirada da escória oriunda do processo de desfosforação,

#### 2.3.2.2.1 Desoxidação

A desoxidação em forno panela é um processo em que a adição de certos elementos promove a redução do teor de oxigênio dissolvido no aço para garantir a integridade interna e superficial dos produtos. A desoxidação é comumente obtida pelo acréscimo de carbono, silício e alumínio. Em algumas situações especiais pode ser utilizado o titânio.

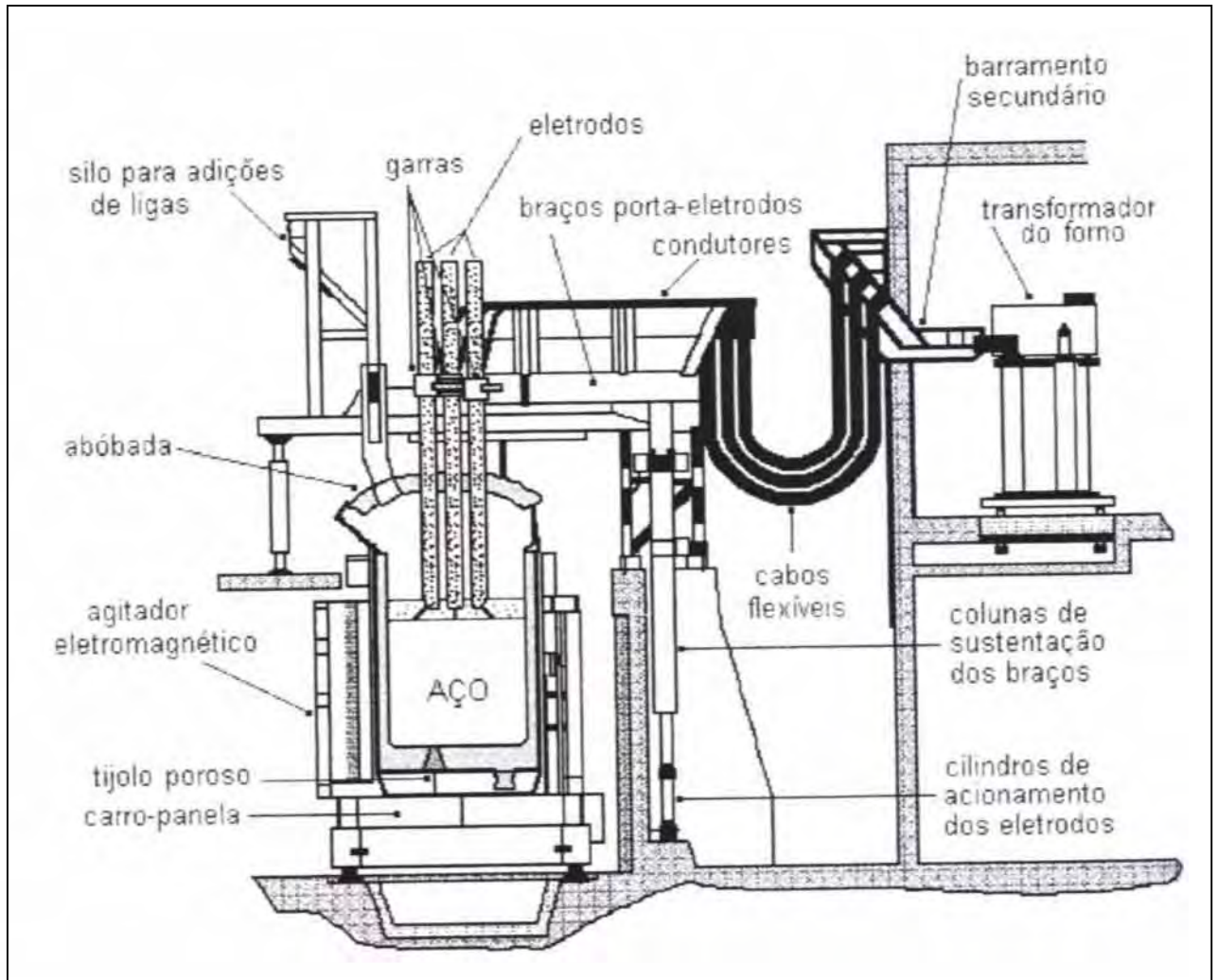
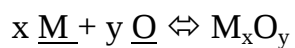


Figura 2.3 - Representação esquemática de um Forno Panela (AMBLARD; LEGRAND, 1988).

Seja a desoxidação representada pela equação genérica:



onde:  $\underline{M}$  é o metal desoxidante dissolvido no aço e  $M_xO_y$ , o óxido formado.

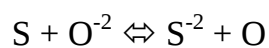
A desoxidação é favorecida pelo aumento da atividade do metal e diminuição da atividade do óxido formado (FRUEHAN, 1985).

### 2.3.2.2.2 Dessulfuração

A dessulfuração é representada, molecularmente, por (FRUEHAN, 1985):



Ou, ionicamente, por:



As condições para uma boa dessulfuração (FRUEHAN, 1985) serão, portanto:

- Escória de alta basicidade (alto CaO ou  $\text{O}^{-2}$ );
- Aço desoxidado (baixo FeO ou  $\underline{\text{O}}$ );
- Alta temperatura ( $\sim 1660^\circ\text{C}$ ).

Adicionam-se, então, desoxidantes (Al, Fe-Si e outros) e nova escória, aquecendo-se o aço para a temperatura de dessulfuração.

O processamento sob escória redutora, entretanto, favorece a absorção de gases (hidrogênio e nitrogênio) pelo aço líquido, de forma que, para produção de aços de qualidade, torna-se necessária a desgaseificação posterior.

### 2.3.2.3 Homogeneização e remoção de inclusões não-metálicas

A agitação com argônio permite a rápida homogeneização térmica e química do aço líquido.

Conseqüentemente, dispõe-se de melhor controle de composição química, obtendo-se menores desvios na composição química e maior reprodutibilidade nas propriedades mecânicas.

O controle preciso da temperatura, essencial para o lingotamento dos aços de alta qualidade, é possível até níveis de  $\pm 5^\circ\text{C}$  (AMELLING et al., 1986).

O uso de energia de agitação adequada favorece a remoção de inclusões, especialmente em presença de uma escória “sintética” de composição controlada capaz de absorvê-las.

A maior parte das inclusões presentes no aço líquido são óxidos, e para aços desoxidados com alumínio, a maior parte do oxigênio presente está associada a estas inclusões. Esta remoção permite obter aços com quantidades de inclusões reduzidas, como indicam os teores de oxigênio final, tipicamente abaixo de 10-20 ppm.

### **2.3.3 Desgaseificação**

A desgaseificação é uma operação em que o aço líquido é exposto a um vácuo médio (0,5-2mmHg) e agitado. O objetivo principal deste processo é retirar os gases dissolvidos no aço líquido, principalmente o hidrogênio.

Os defeitos causados pelo hidrogênio nos aços são conhecidos há bastante tempo. Entretanto, por força do altíssimo coeficiente de difusão do hidrogênio e sua baixa solubilidade no ferro, a correta caracterização do teor de hidrogênio associado à ocorrência de defeitos é, até hoje, motivo de discussão.

O principal efeito do hidrogênio no ferro e suas ligas é a fragilização que, associada à segregação e tensões (por exemplo, durante o tratamento térmico) pode causar o aparecimento de trincas internas, chamadas “flocos” (STEUBER, 1982).

#### **2.3.3.1 Processos de desgaseificação**

A evolução da desgaseificação conduziu a três principais sistemas, tendo cada um suas vantagens e desvantagens sendo que a opção entre os diversos processos depende dos produtos desejados e dos tipos de aço.

Os três principais sistemas de desgaseificação (PEHLKE, 1973) são:

- Desgaseificação no jato: ocorre no vazamento do forno ou no lingotamento sob vácuo. Apesar de ser, em termos de desgaseificação extremamente eficiente, uma vez que todo o metal é exposto com alta relação Área/Volume ao vácuo, tal sistema não apresenta a mesma flexibilidade dos processos em panela;

- Desgaseificação em panela: a panela contendo o aço é transferida para uma câmara, onde é feito o vácuo. A agitação pode ser feita por insuflação de argônio ou por aquecimento indutivo. Estes equipamentos são os mais adequados à realização de operações de metalurgia de panela;
- Desgaseificação por circulação: neste sistema, o aço líquido é mantido na panela e aspirado para dentro de uma câmara de vácuo capaz de conter uma parte da corrida. Com a circulação, todo o aço é exposto ao vácuo. Requer mecanismos e equipamentos complexos, sem ter a flexibilidade dos processos de panela.

Na Figura 2.4, são apresentados, esquematicamente, os mais importantes processos industriais de desgaseificação.

### **2.3.4 Lingotamento convencional**

A elaboração do aço em forno elétrico, seguida ou não de operações de refino secundário, produz uma massa líquida homogênea de metal. Este metal é transferido em panelas revestidas de refratários para a área de lingotamento onde é vazado em “formas” chamadas lingoteiras, originando fundidos chamados “lingotes”.

Um lingote ideal seria aquele homogêneo físico e quimicamente, com estrutura fina, equiaxial e isenta de segregação, porosidade, cavidades e inclusões não-metálicas. Entretanto, as próprias leis que regem a solidificação impedem a obtenção deste tipo de material homogêneo. Além destes problemas de qualidade interna, podem ocorrer também problemas superficiais, como dobras e trincas.

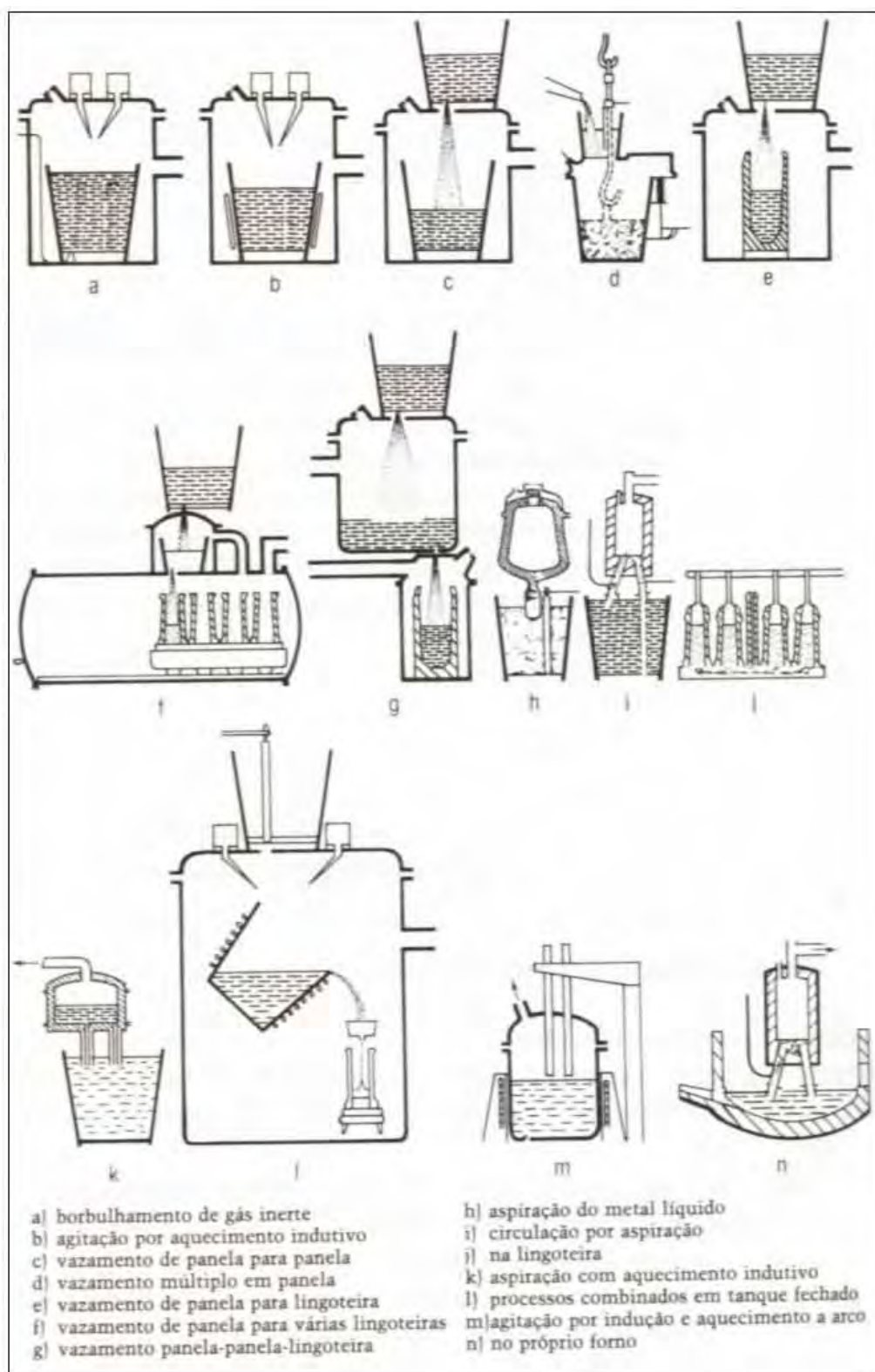


Figura 2.4 - Processos de desgaseificação de aço (PEHLKE, 1973).

#### 2.3.4.1 Tipos de lingoteiras – técnicas de lingotamento

Lingoteiras têm em geral a forma de uma caixa, feita de ferro-fundido, pesando 1-1,5 vezes o peso do lingote.

O projeto da lingoteira/lingote é feito visando otimizar as variáveis de solidificação e considerando sua conformação mecânica posterior. Normalmente, os lingotes são cônicos, o que facilita a desmontagem (estripagem).

Assim, podem-se ter dois principais tipos de lingotes: lingotes de topo maior que a base (Big end up) e lingotes de base maior que o topo (Big end down).

As faces dos lingotes podem ter diferentes configurações: faces planas, convexas ou corrugadas.

Lingotes destinados à forjaria pesada têm, em geral, seção transversal poligonal corrugada, cuja ilustração pode ser observada na Figura 2.5.

Tal fato está associado à prevenção de trincas na superfície de lingotes. Lingotes cilíndricos, em geral, trincam superficialmente, devido ao fato da casca sólida não resistir à pressão ferrostática do aço líquido contido em seu interior. Por outro lado, lingotes com a seção transversal como a da Figura 2.5 solidificarão mais rapidamente nos cantos (a). Quando a casca sólida se contrair, afastando-se da lingoteira, tais partes terão espessura suficiente para resistir à pressão. Enquanto isso, as faces (b), côncavas, resistirão melhor à pressão ferrostática.

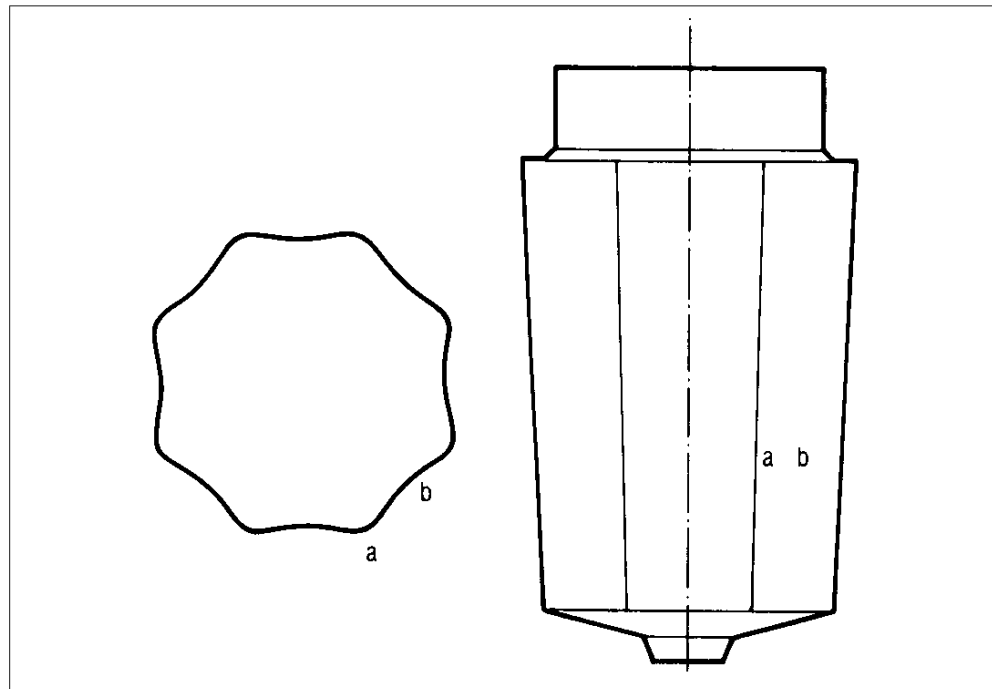


Figura 2.5 - Lingote para forjaria (típico).

As lingoteiras podem ser enchidas de aço líquido por cima ou por baixo. O enchimento por baixo requer o emprego de tubulações refratárias descartáveis, como mostra a Figura 2.6.

O lingotamento por baixo (indireto) permite o enchimento simultâneo de vários lingotes, produzindo, em geral, melhores superfícies e desgastando menos as lingoteiras. Por outro lado, o enchimento por cima (direto) economiza refratários e mão-de-obra.

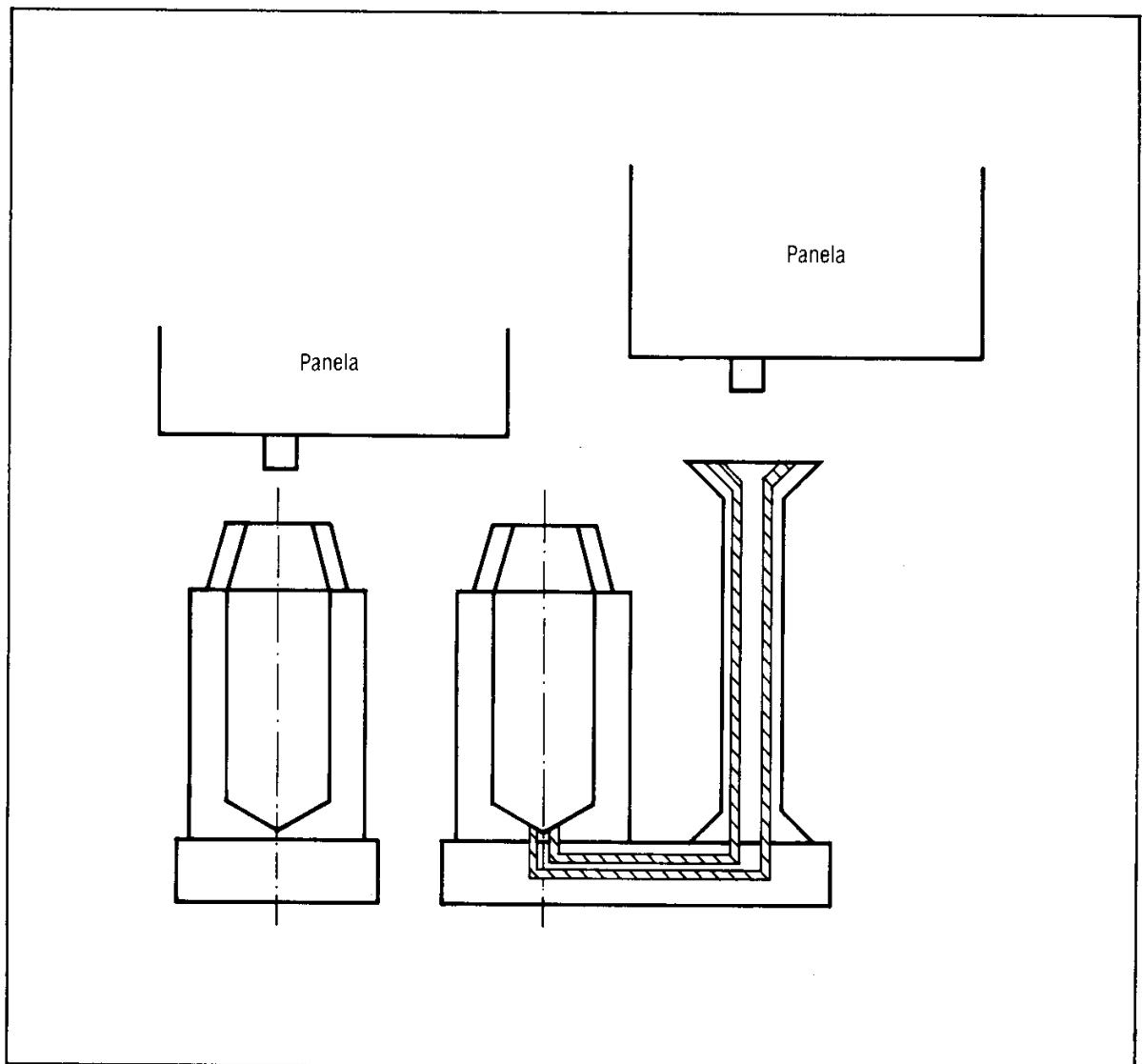


Figura 2.6 - Lingotamento direto (esquerda) e indireto.

#### 2.3.4.2 Estrutura de lingotes

Lingotes são fundidos projetados para otimizar a solidificação, levando em consideração o trabalho mecânico posterior a que serão submetidos (CHADWICK, 1972). A facilidade com que os lingotes podem ser conformados, bem como as propriedades do metal obtido, depende, freqüentemente, da estrutura do lingote, isto é:

- Forma, tamanho e orientação dos grãos;

- Localização e composição de eventuais heterogeneidades geradas durante a solidificação.

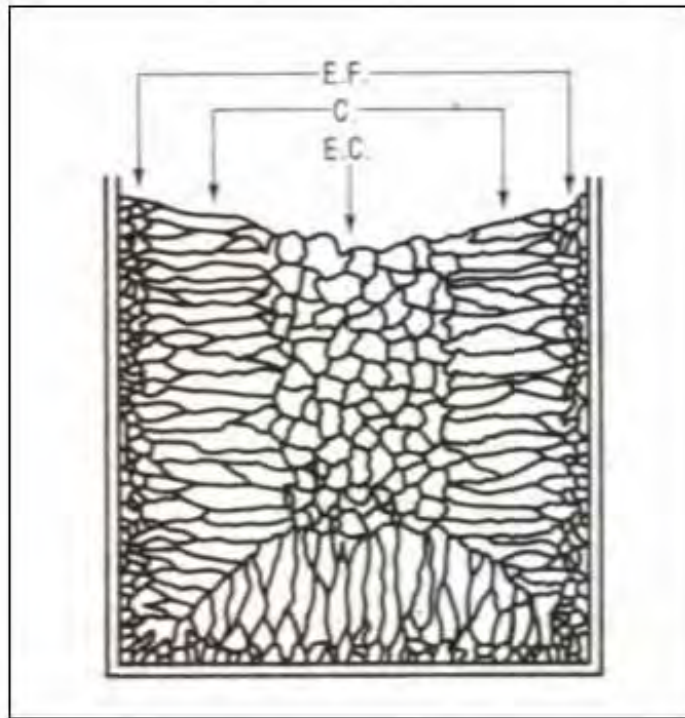


Figura 2.7 - Esquema da estrutura de um lingote (CHADWICK, 1972): zona equiaxial fina (E.F.), zona colunar (C.) e zona equiaxial central (E.C.).

Lingotes comerciais apresentam, em geral, três zonas de estruturas diferentes (CHADWICK, 1972), conforme poder ser verificado na Figura 2.7:

- Zona equiaxial fina, na superfície: esta zona aparece devido à farta nucleação que ocorre quando o metal é vazado e entra em contato com as paredes frias da lingoteira. Os cristais nesta região são dendríticos e equiaxiais. Seu crescimento é limitado pela presença de outros núcleos;
- Zona colunar: a proporção que o crescimento da zona equiaxial prossegue em direção ao interior do lingote, os cristais favoravelmente orientados em relação ao fluxo térmico crescerão mais rapidamente, como pode ser verificado, esquematicamente, na Figura 2.8;

- Zona equiaxial central: se o líquido no interior do lingote chegar a ficar superesfriado, pode ocorrer o crescimento equiaxial central. Este crescimento pode partir de núcleos existentes na região ou de pontas de dendritas trazidas por correntes de convecção.

É importante observar que nem sempre as três zonas estão presentes em lingotes comerciais. A ocorrência de cada uma das zonas pode ser favorecida ou dificultada por determinados fatores, inclusive o tipo da liga em questão.

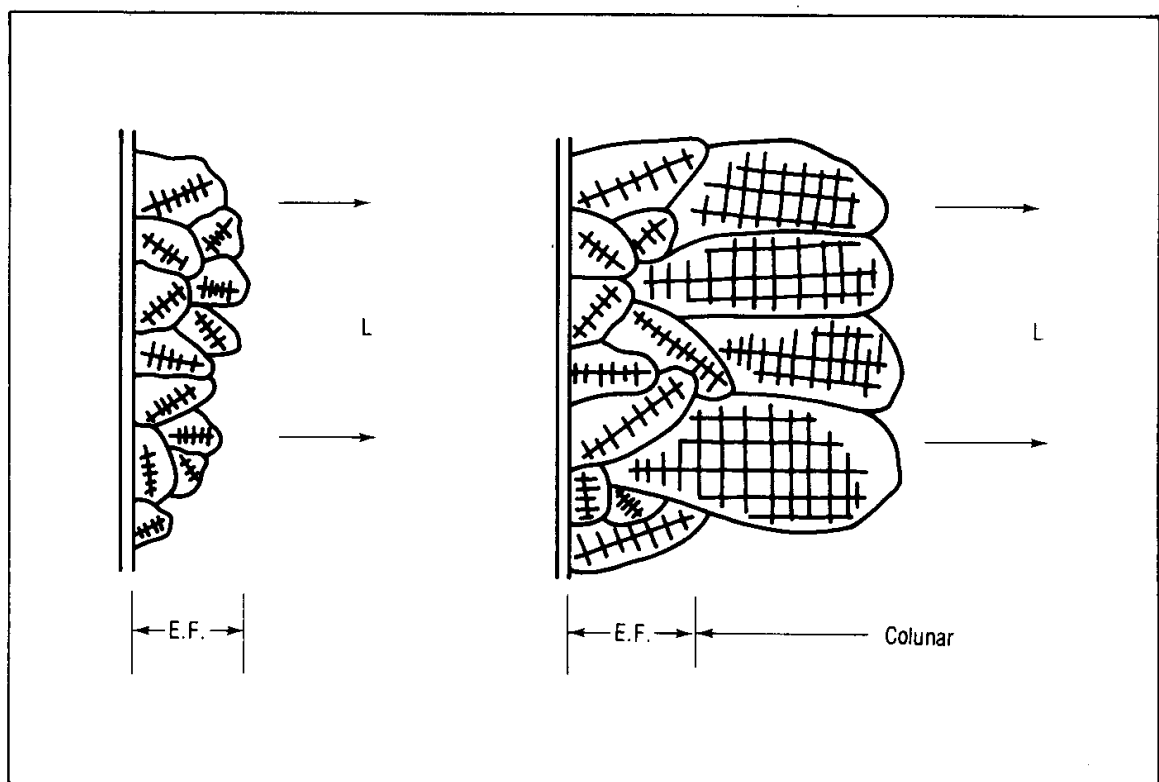


Figura 2.8 - Crescimento de cristais a partir dos cristais equiaxiais finos (E.F.) orientados favoravelmente (CHADWICK, 1972).

#### 2.3.4.3 Microsegregação

A segregação que ocorre na escala do espaçamento interdendrítico é chamada de microsegregação. O modelo de Tiller et al. (1953) permite descrever, com razoável precisão, a microsegregação interdendrítica em ligas comerciais.

Na Figura 2.9 é apresentado um exemplo de medida de microsegregação em um aço de baixo carbono (Ni-Cr), realizada com microsonda.

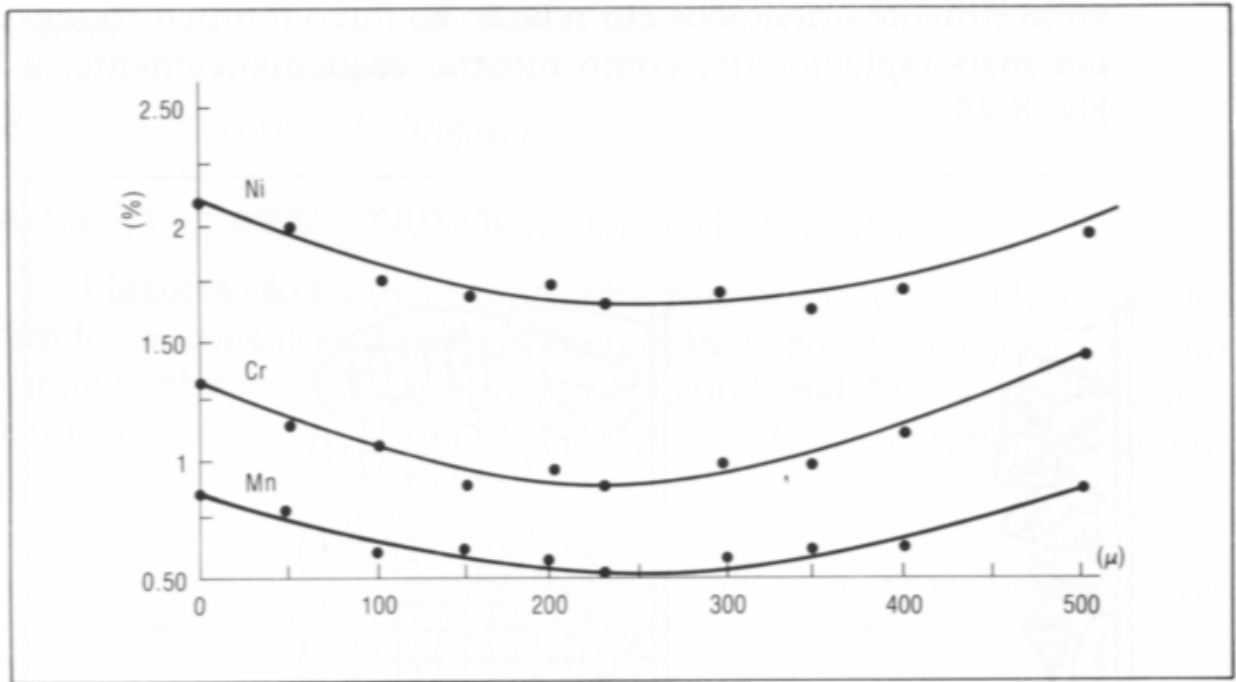


Figura 2.9 - Microsegregação em aço de baixa liga, determinada por microsonda eletrônica (FLEMINGS, 1974).

#### 2.3.4.4 Macrosegregação

Variações de composição química que ocorrem em distâncias superiores à ordem de grandeza do espaçamento dendrítico são chamadas macrosegregações.

Os principais tipos de macrosegregação (BAILEY, 1977) observados em lingotes convencionais, como ilustrados na Figura 2.10, são:

- Segregação em “A”;
- Segregação em “V”;
- Segregação positiva, no topo;
- Segregação negativa, na base.

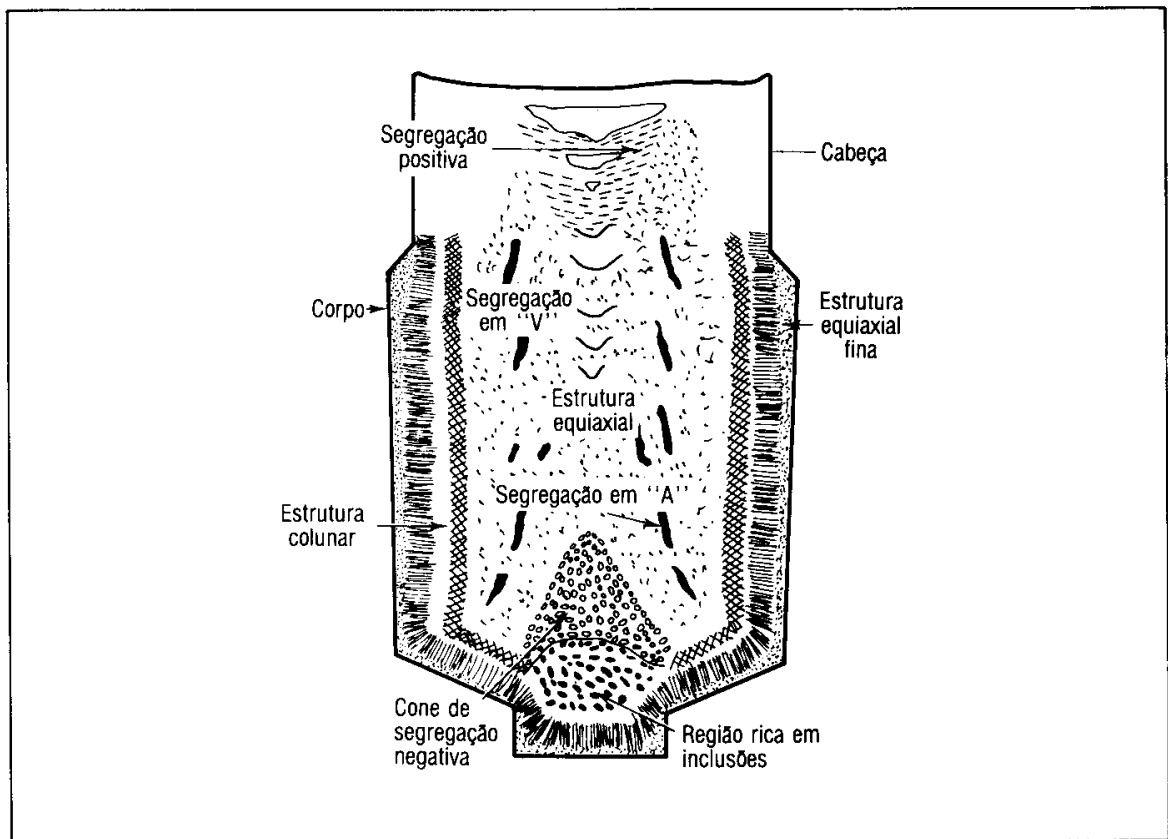


Figura 2.10 - Características estruturais de um lingote grande de aço acalmado (BAILEY, 1977).

#### 2.3.4.4.1 Segregação em “A”

Uma vez que os segregados em “A” têm, por vezes, vários centímetros de extensão, a hipótese de formação destes segregados por difusão pode ser descartada.

A teoria mais aceita para a formação dos segregados em “A” é a do movimento de líquido interdendrítico, durante a solidificação (MOORE; SHAH, 1983).

O líquido interdendrítico, enriquecido em solutos, tem densidade sensivelmente diferente do líquido no interior do lingote, não segregado (DEIHMANN, 1971). O efeito dos elementos em solução no aço sobre a densidade do aço líquido pode ser visto na Figura 2.11. Como pode ser observado na Figura 2.12, os elementos P, Si e S têm um efeito drástico na densidade do aço líquido (MOORE; SHAH, 1983).

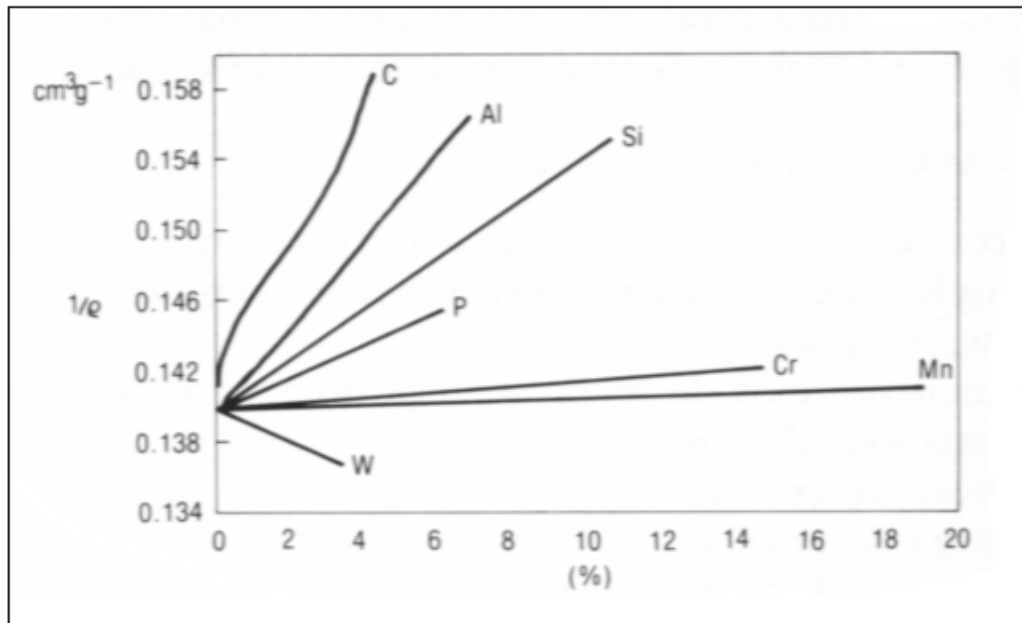


Figura 2.11 - Efeito da composição do aço em seu volume específico (inverso da densidade) a 1600°C (DEIHMANN, 1971).

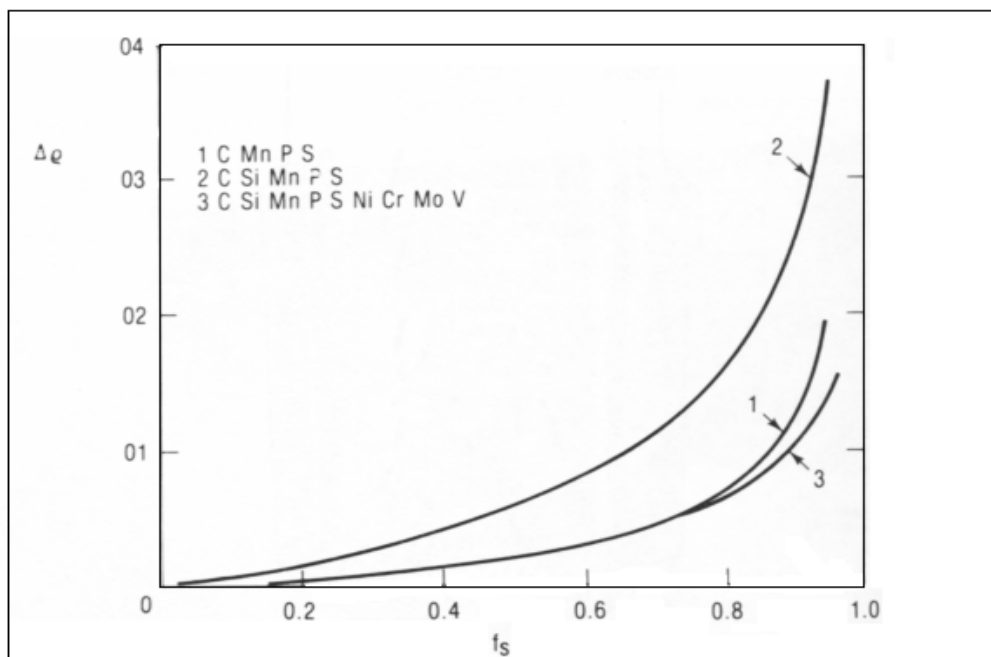


Figura 2.12 - Diferença de densidade entre o líquido interdendrítico e o líquido não-segregado, durante a solidificação, em função da fração solidificada (MOORE; SHAH, 1983).

O líquido de menor densidade (segregado) “flutua”, formando canais de fluxo preferencial que resultam nas segregações em “A”.

O controle dos elementos que têm forte efeito sobre a densidade do aço líquido (P, S, Si, por exemplo) é fundamental, portanto, para se minimizar a segregação em “A”.

#### 2.3.4.4.2 Segregação negativa (base) e positiva (topo)

Os canais formados pelo mecanismo de segregação em “A” conduzem líquido rico em soluto para o topo do lingote. Esta região ficaria, então, com um desvio positivo em relação à composição média do lingote, sendo chamada de região de segregação positiva (DEIHMANN, 1971).

A teoria mais aceita para explicar a formação da segregação negativa é a da queda ou “chuva” de cristais (WINEGARD, 1964). Segundo esta teoria, cristais equiaxiais, formados no interior do lingote, afundam (devido a maior densidade), criando, na base do lingote, um “cone sedimentado” de cristais de menor conteúdo de solutos. Estes cristais, durante o afundamento, arrastariam as inclusões não-metálicas presentes no metal líquido (óxidos, basicamente) criando uma região mais rica em inclusões no pé do lingote (Figura 2.10).

#### 2.3.4.4.3 Segregação em “V”

Nas etapas finais da solidificação de um lingote, pode ocorrer a formação de uma grande região central de sólido + líquido, onde o sólido tem a forma de cristais equiaxiais.

Durante a solidificação vertical desta região, haverá a necessidade de alimentação, de cima para baixo. Este fluxo e a própria contração de solidificação podem causar o aparecimento de canais descendentes a 45°C nesta massa pastosa (FLEMINGS, 1974).

Estes canais se solidificam como segregações em “V”.

## 2.4 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO AÇO SAE 12L14 NA AÇOS VILLARES

O aço ao chumbo utilizado nos ensaios de usinabilidade foi produzido na usina siderúrgica Aços Villares S.A. (unidade de Pindamonhangaba). Na Figura 2.13, pode ser observado o fluxograma do processo de fabricação do aço ao chumbo.

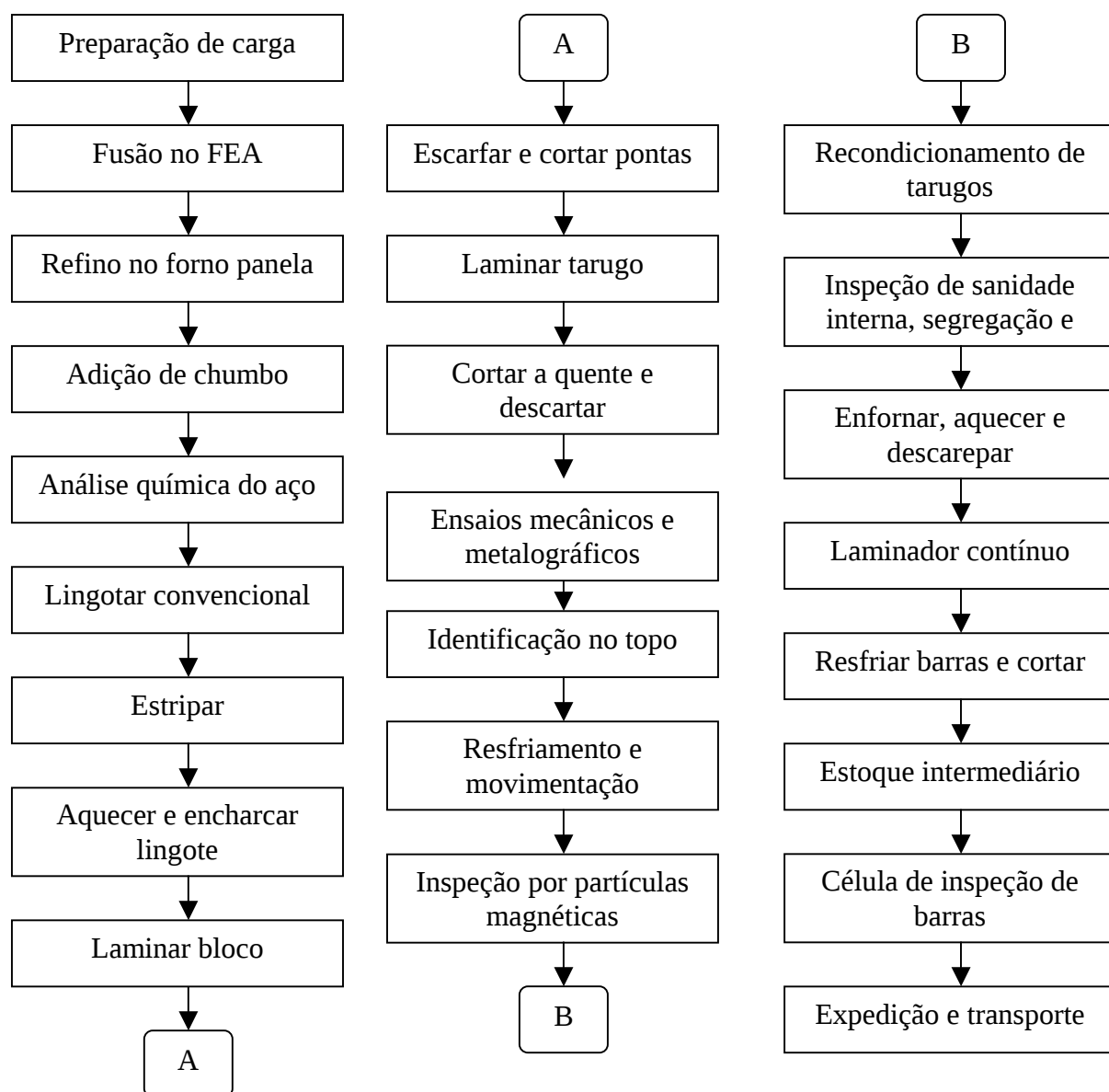


Figura 2.13 - Fluxograma do processo de fabricação do aço ao chumbo.

O processo de fabricação do aço ao chumbo começa na aciaria. Inicialmente, carrega-se um tamborão com sucata, ferro-gusa e cal. Por meio de ponte-rolante, este primeiro tamborão é deslocado e posicionado exatamente sobre o forno elétrico (que, neste momento, encontra-se totalmente aberto). O fundo do tamborão é aberto e o forno elétrico é carregado. Após o carregamento, a abóbada é fechada e o disjuntor é ligado. Os eletrodos iniciam a descida até tocar na carga metálica, quando se dá a abertura do arco elétrico.

Durante a fusão, insufla-se oxigênio e injeta-se carburante, através do equipamento COJET. Prossegue-se fundindo a carga até que suficiente volume interno no forno esteja liberado para o carregamento do segundo tamborão de sucata.

Após a fusão, tem-se a etapa de refino no forno panela. Nesta etapa, é feito o aquecimento do aço líquido e a adição de ferro-ligas e fundentes. Durante todo o período de refino, insufla-se argônio pelo fundo da panela para garantir homogeneização térmica e química do aço líquido. Retira-se mais uma amostra de aço para fazer análise química. Não havendo a necessidade de se fazer correções de composição, mede-se a temperatura do aço e libera-se a panela para a estação de adição de chumbo.

Na estação de adição de chumbo, como o próprio nome diz, é feita a adição de chumbo com o máximo de borbulhamento de argônio. Após a adição de chumbo, a panela vai para a área de lingotamento.

Na Aços Villares S.A. (usina de Pindamonhangaba), as corridas de aço ao chumbo são lingotadas convencionalmente. Durante o lingotamento, são tomados cuidados especiais para evitar problemas, tais como “vazamento de placas” (transbordamento de aço por entre os tijolos refratários localizados em baixo das lingoteiras). Depois do lingotamento, os lingotes são estripados e colocados em fornos-poço para aquecimento.

Atingida a temperatura de laminação, os lingotes são retirados dos fornos e são submetidos a uma primeira laminação duo-reversível originando os “blocos”. Os blocos apresentam uma seção quadrada de 188 x 188 mm. Os blocos são escarfados e submetidos a uma segunda laminação duo-reversível originando os “tarugos”. Os tarugos apresentam uma seção quadrada de 155 x 155 mm.

Os tarugos são cortados, identificados e transportados para a área de resfriamento. Nesta etapa de corte, também são retiradas amostras para ensaios mecânicos e metalográficos.

Após o resfriamento, os tarugos são inspecionados por ensaio de partículas magnéticas para a detecção de defeitos superficiais. Caso sejam encontrados defeitos superficiais com profundidade acima 0,30 mm, estes defeitos são eliminados por esmerilhamento automático.

Depois da inspeção, por partículas magnéticas, é realizado o ensaio de ultrassom para verificar a existência de defeitos internos. Nesta etapa do processo, também é realizado o teste de fagulha para detectar segregação e mistura de materiais.

Estando de acordo com os requisitos de qualidade interna e superficial, os tarugos são enfiados e aquecidos no forno de viga móvel. Atingida a temperatura de laminação, os tarugos são laminados no trem contínuo e originam barras com seção transversal redonda. Estas barras são cortadas, resfriadas e inspecionadas. Nesta inspeção, verifica-se a presença de defeitos superficiais. Não havendo defeitos superficiais com profundidade acima de 0,30 mm, as barras são embaladas, pesadas e expedidas para o cliente.

## 2.5 USINABILIDADE

Os métodos de usinagem estão entre os principais métodos pelos quais os metais são transformados, ou seja, adquirem as formas usuais de utilização. Podem ser exclusivamente usados na produção ou como parte de uma seqüência de operações que empregam outros meios de conformação, como o forjamento. O comportamento à usinagem é um assunto de interesse não somente para os fabricantes de metais, como também para os consumidores, para os fabricantes de ferramentas, enfim, para todos aqueles que se encontram envolvidos direta ou indiretamente na produção de peças por meio da formação de cavaco.

Usinabilidade é o termo mais freqüentemente usado para denotar o desempenho de usinagem de um material; pode ser definida pela capacidade de um material ser cortado ou usinado por uma ferramenta apropriada (MURPHY; AYLWARD, 1971). A

usinabilidade não é a propriedade de um único material, mas sim a propriedade resultante da combinação de dois materiais; isto é, da combinação ferramenta-peça usinada. Sob este ponto de vista, quando se fala em usinabilidade, esta grandeza tecnológica deve ser vista como uma propriedade resultante da combinação de dois materiais (FERRARESI, 1995).

A avaliação quantitativa da usinabilidade, no entanto, é um problema de dificuldade considerável, devido à variedade de conotações associadas com o termo. Não é possível descrever usinabilidade em função de unidades fundamentais, e, como resultado, a mais prática expressão usada para avaliar a usinabilidade de um material é comparativa. Assim, o desempenho de usinagem de um aço, por exemplo, é usualmente dado em termos de uma taxa percentual por comparação com o desempenho de um outro aço tomado como padrão.

## 2.6 ENSAIOS DE USINABILIDADE

Os métodos de ensaio de usinabilidade podem ser de longa ou curta duração. Os ensaios de longa duração são usados principalmente quando se deseja obter curvas de vida de uma ferramenta para um determinado material, com uma precisão razoável. Já os ensaios de curta duração empregam condições de usinagem exageradas e determinam desgastes pequenos. Os ensaios de curta duração apresentam a vantagem de necessitarem um consumo mínimo de material e de serem realizados num tempo relativamente pequeno (FERRARESI, 1995).

### 2.6.1 Ensaio de “Vida da ferramenta x Velocidade de corte”

Um dos ensaios de curta duração mais freqüentemente usado é o ensaio de “vida da ferramenta x velocidade de corte”, originalmente desenvolvido por F.W. Taylor como um meio de avaliar o desempenho de aço-ferramenta. Desde aquele tempo, o procedimento do ensaio tem sido adaptado para a avaliação da usinabilidade de materiais sob uma variedade de condições. Embora o ensaio possa ser executado em muitos tipos de máquina-ferramenta, ele é freqüentemente conduzido em

operações de torneamento mecânico para fácil obtenção dos dados (MURPHY; AYLRWARD, 1971).

Três termos básicos para a operação de torneamento e, conseqüentemente, para o ensaio de “vida da ferramenta x velocidade de corte”, devem ser mencionados: velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem. **Velocidade de corte ( $v_c$ )** é a velocidade da superfície de trabalho e pode ser, usualmente, medida em pés por minuto ou metros por minuto. **Avanço ( $f$ )** é a distância longitudinal percorrida pela ferramenta em relação ao metal de trabalho, podendo ser medido, usualmente, em polegadas por revolução ou milímetros por revolução. **Profundidade de usinagem ( $a_p$ )** é a distância radial entre as superfícies (antes do corte e após o corte) de trabalho do metal e, geralmente, é medida em polegadas ou milímetros. Estes termos identificam três dos fatores que influenciam a vida da ferramenta. Para maior facilidade, sempre se irá referir ao ensaio de “vida da ferramenta x velocidade de corte” como, simplesmente, ensaio de vida da ferramenta.

#### 2.6.1.1 Procedimentos do ensaio de vida da ferramenta

O ensaio de vida da ferramenta estabelece a relação entre a velocidade de corte e a vida da ferramenta para condições e materiais particulares. Para este ensaio, a vida da ferramenta é definida como o tempo total de usinagem até o momento da falha da ferramenta. A falha da ferramenta (o fim da vida da ferramenta) pode ser indicada pela quebra total da ponta da ferramenta, por uma quantidade de desgaste da ferramenta, ou por alguma outra condição pertinente ao desenvolvimento dos dados desejados da vida da ferramenta.

O ensaio é executado pelo torneamento de uma barra de aço ou outro material sob condições selecionadas de velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem com ferramentas de mesmo formato até a ocorrência da falha da ferramenta. O corte é, freqüentemente, executado a seco, embora algum fluido de corte possa ser usado. Pela repetição do ensaio a uma série de velocidades de corte, dados adicionais podem ser obtidos para mostrar o efeito da velocidade de corte sobre a vida da ferramenta.

### 2.6.1.2 Apresentação dos resultados do ensaio de vida da ferramenta

Os resultados dos ensaios de vida da ferramenta são, usualmente, plotados em coordenadas cartesianas ou logarítmicas para mostrar a relação entre velocidade de corte e vida da ferramenta. Os resultados típicos do ensaio originam curvas exponenciais quando plotados em coordenadas cartesianas (Figura 2.14), enquanto os mesmos resultados apresentam relação linear aparente entre velocidade de corte e vida da ferramenta, quando plotados em coordenadas logarítmicas (Figura 2.15).

Em qualquer tipo de sistema de coordenadas, é possível determinar a velocidade de corte que irá proporcionar uma vida desejada da ferramenta. Esta velocidade é designada por  $V_t$  (por exemplo,  $V_{10}$ ,  $V_{30}$ , ou  $V_{60}$  significa a velocidade de corte necessária para uma vida da ferramenta de 10, 30, ou 60 minutos). Pela comparação dos valores de velocidade de corte de diversos aços a uma dada vida de ferramenta, tal como  $V_{60}$ , é possível desenvolver taxas para estes aços que podem ser usadas como uma indicação de sua usinabilidade relativa.

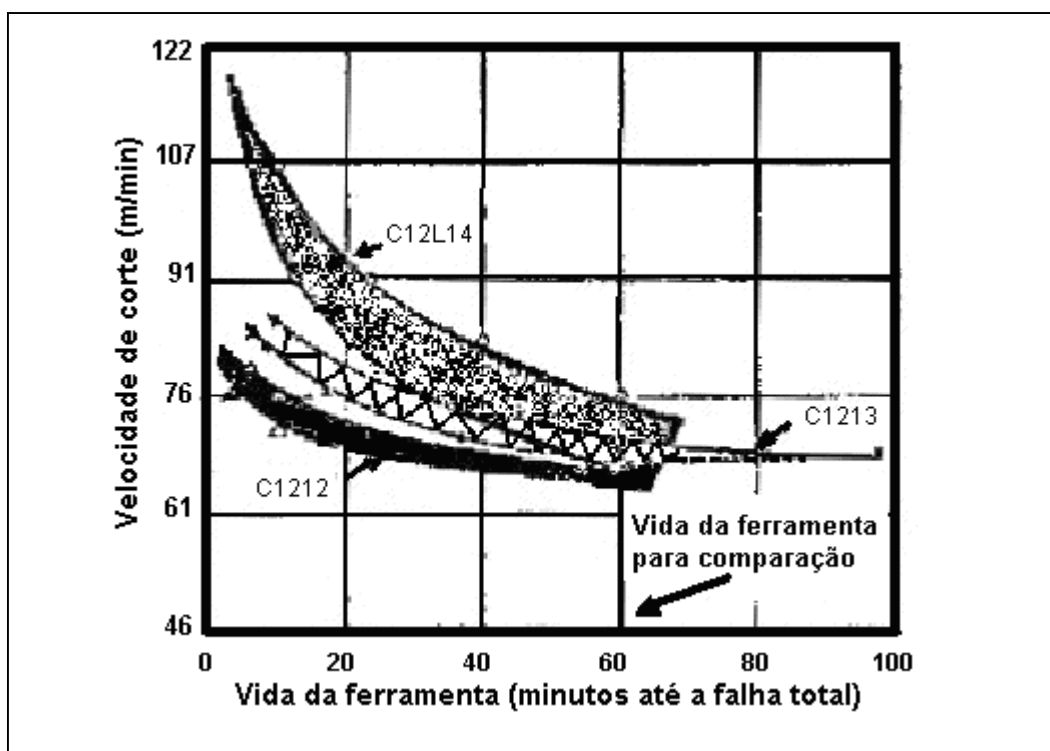


Figura 2.14 - Apresentação dos resultados do ensaio de vida da ferramenta (coordenadas cartesianas) (MURPHY; AYLWARD, 1971).

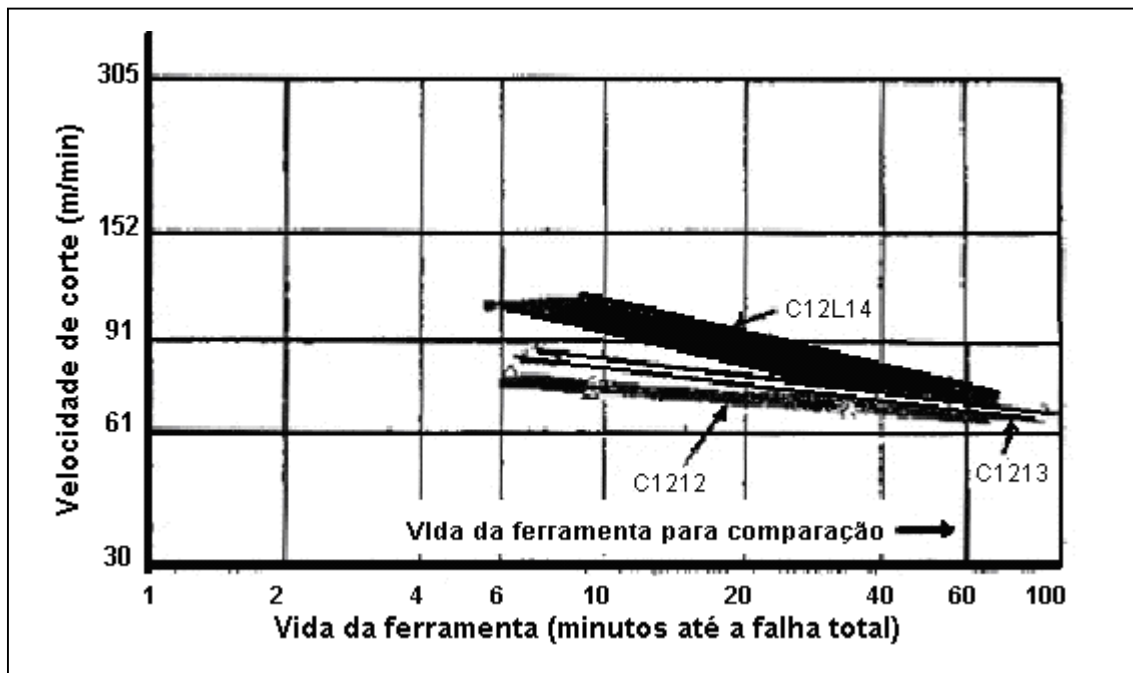


Figura 2.15 - Apresentação dos resultados do ensaio de vida da ferramenta (coordenadas logarítmicas) (MURPHY; AYLWARD, 1971).

## 2.7 TIPOS DE DESGASTES DA FERRAMENTA

Numa ferramenta de usinagem, podem ocorrer diversos tipos de desgastes. Os principais são (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001):

- Desgaste frontal (ou de flanco): é o tipo de desgaste que ocorre na superfície de folga da ferramenta, causado pelo contato entre ferramenta e peça. Todo processo de usinagem causa desgaste frontal. O acabamento superficial da peça é deteriorado por esse tipo de desgaste, devido à modificação total da forma da aresta de corte original;
- Desgaste de cratera: ocorre na superfície de saída da ferramenta, causado pelo atrito entre ferramenta e cavaco. Quando o desgaste de cratera se encontra com o desgaste frontal, ocorre a quebra da ferramenta.

Nas Figuras 2.16 e 2.17, podem ser verificados, respectivamente, os desenhos esquemáticos dos desgastes frontal (indicado pela letra **a**) e de cratera.

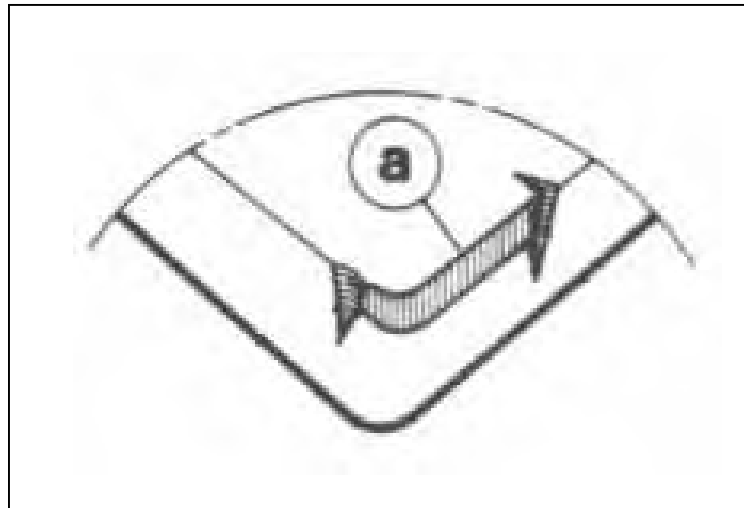


Figura 2.16 - Desgaste frontal (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

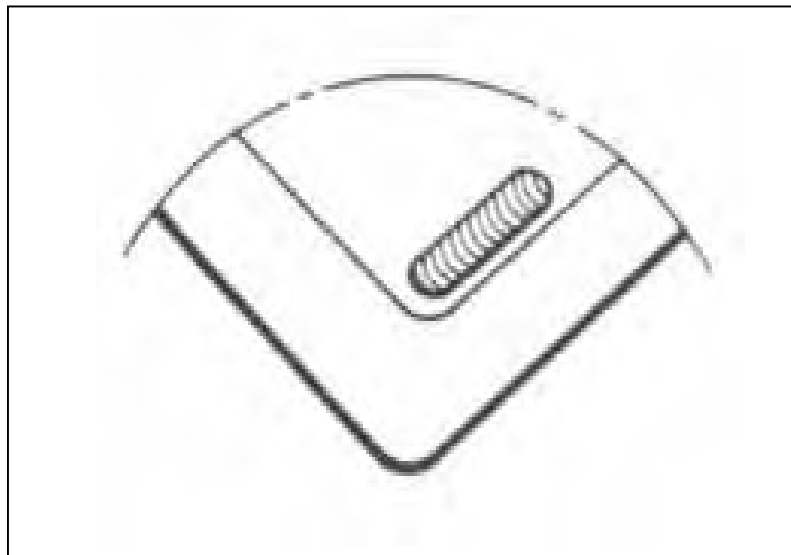


Figura 2.17 - Desgaste de cratera (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2001).

## 2.8 MEDIÇÃO DOS DESGASTES DA FERRAMENTA

Na superfície de saída da ferramenta, têm-se os seguintes desgastes: profundidade de cratera, largura da cratera e distância do centro da cratera à aresta de corte. Na superfície de folga da ferramenta, mede-se a largura do desgaste de flanco ( $V_B$ ), que é um valor médio do desgaste na superfície de folga, e a largura máxima do desgaste de flanco ( $V_{Bmax}$ ).

## 2.9 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 (TROUP, 1966; FERRARESI, 1995):

- 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 (TROUP, 1966; FERRARESI, 1995):

- Composição química, que determina as propriedades do material;
- Resistência ao cisalhamento, que pode ser calculada a partir do ângulo de cisalhamento medido e das forças de corte sendo freqüentemente maior do que a resistência à tração;
- Endurecimento por trabalho a frio, medido pela taxa de aumento da resistência e diminuição da ductilidade com o aumento da deformação plástica (SMITH, 1970);
- Ductilidade, a capacidade de deformar plasticamente sem ruptura;
- Abrasividade dos constituintes microestruturais que são mais duros do que a ferramenta de corte;
- Natureza das inclusões e interfaces entre elas e a matriz metálica e a ferramenta de corte.

Os processos mecânicos e as condições de usinagem que mais influem sobre a usinabilidade são (TROUP, 1966; FERRARESI, 1995):

- Material da ferramenta;
- Condições de usinagem (velocidade de corte, avanço, profundidade, geometria da ferramenta, etc.);
- Fluidos de corte;
- Rigidez da máquina, ferramenta e do sistema de fixação da peça;

- Tipos de trabalhos executados pela ferramenta (operação empregada, corte contínuo ou intermitente, condições de entrada e saída da ferramenta).

## **2.9.1 Efeito da composição química na usinabilidade**

### **2.9.1.1 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% (GARVEY; TATA, 1965). 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. As características desse tipo de inclusões, tais como tamanho, morfologia, frequência e distribuição, exercem notadamente grande influência sobre a usinabilidade dos aços de corte fácil.

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% (BOULGER et al., 1957). Na Figura 2.18, 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, Figura 2.19. Estes sulfetos de manganês também diminuem o atrito entre a ferramenta de corte e a peça usinada.

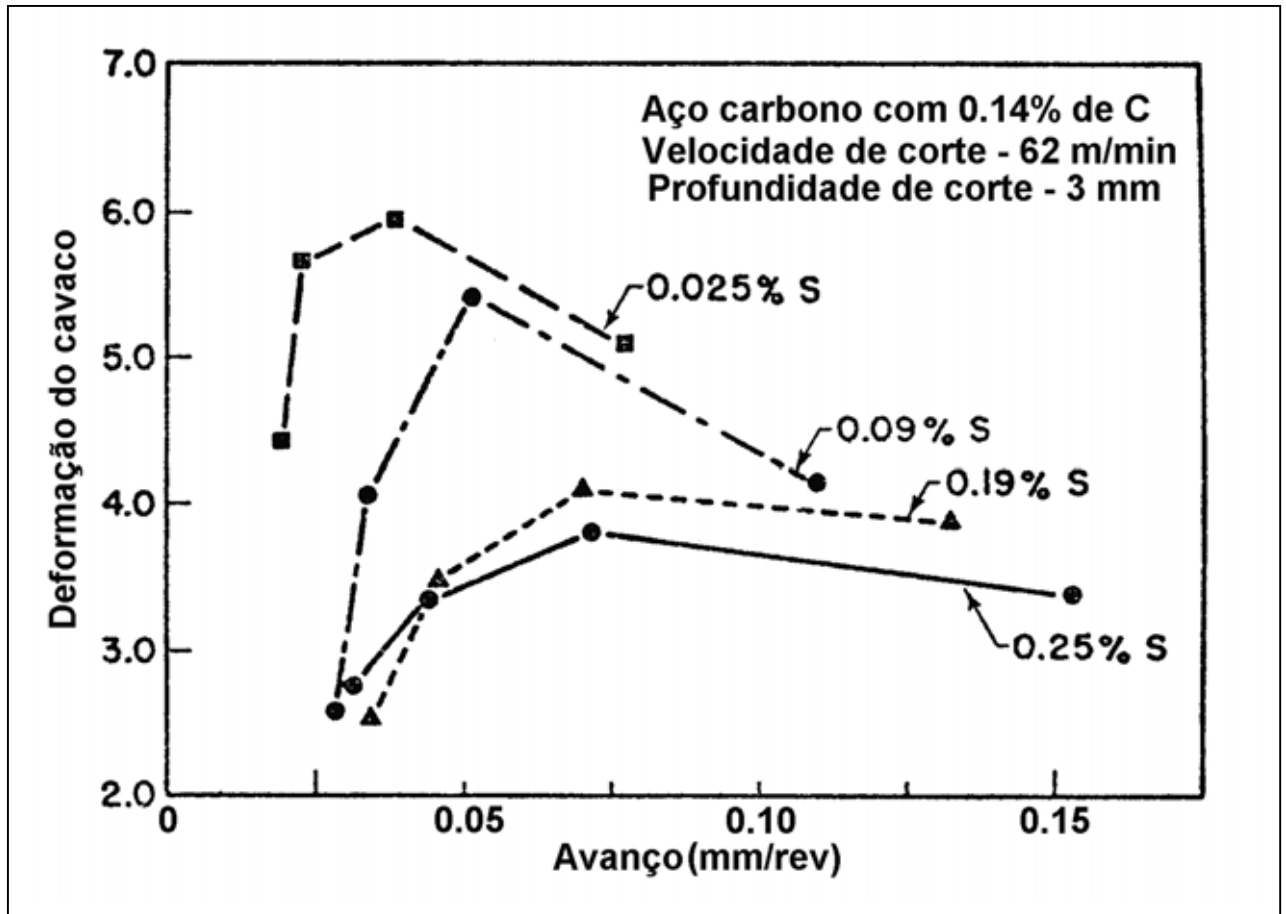


Figura 2.18 - Relação entre o teor de enxofre e a deformação do cavaco a vários avanços em testes de torneamento (BOULGER et al., 1957).

Uma investigação para determinar a influência do enxofre sobre a formação do cavaco foi conduzida utilizando-se uma série de aços ao carbono refosforados com 0,08% de carbono e contendo vários teores de enxofre (SHAW; USUI; SMITH, 1961). Neste estudo, conduzido pela U. S. Steel com auxílio do Instituto de Tecnologia de Massachusetts, barras laminadas a quente foram usinadas com diferentes velocidades e avanços de corte. Todos os testes foram realizados sem uso de fluido de corte. Os cavacos produzidos em cada condição de usinagem foram cuidadosamente avaliados com o objetivo de se investigar a relação entre o formato do cavaco e o teor de enxofre.

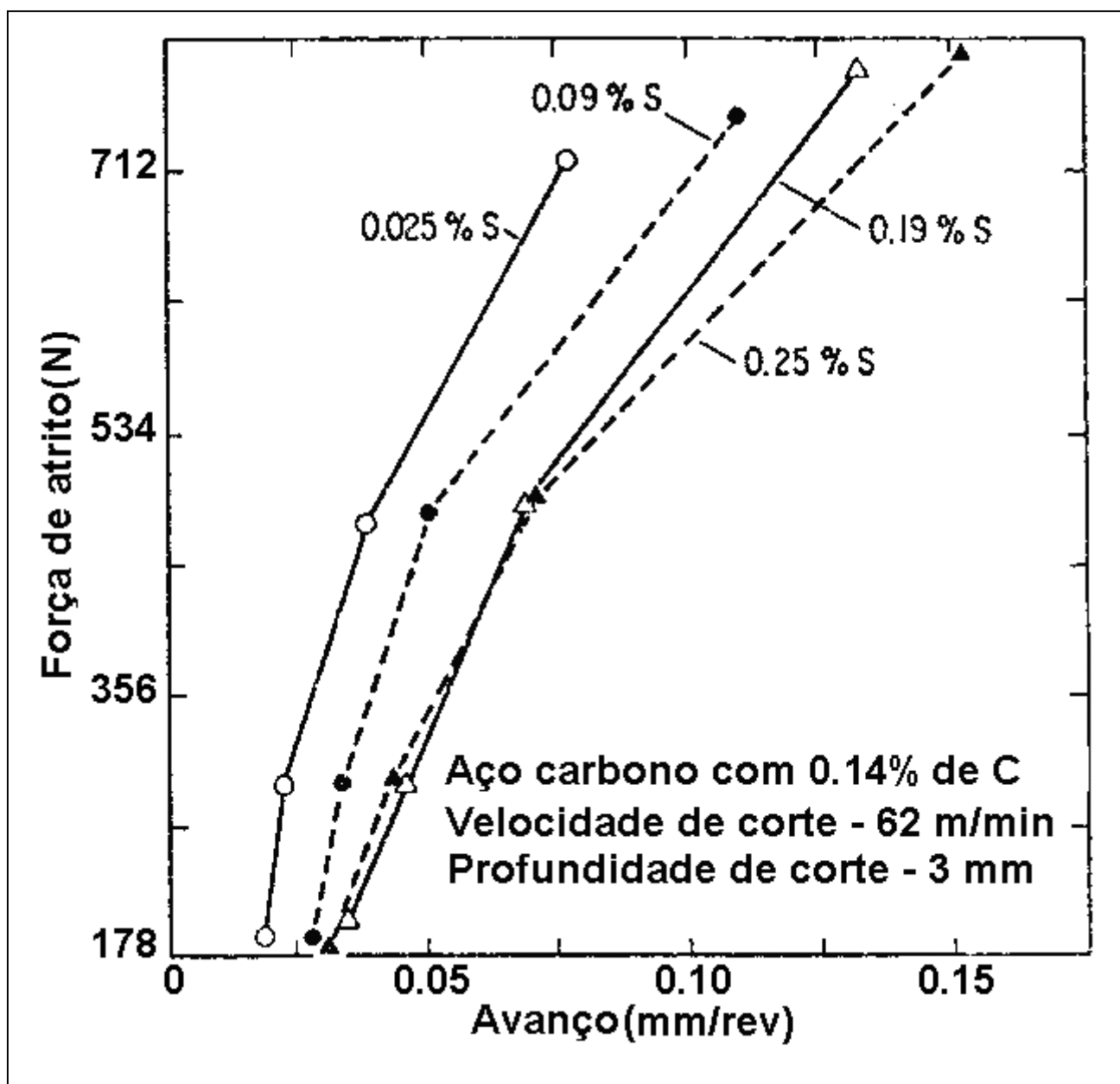


Figura 2.19 - Relação entre o teor de enxofre e o atrito cavaco-ferramenta a vários avanços em testes de torneamento (BOULGER et al., 1957).

O efeito do enxofre sobre o tamanho do cavaco é mostrado esquematicamente na Figura 2.20 (SHAW; USUI; SMITH, 1961). Nota-se que o tamanho do cavaco diminui com o aumento do teor de enxofre, proporcionando menor área de contato entre o cavaco e a ferramenta de corte. Conseqüentemente, as forças de atrito entre o cavaco e a ferramenta de corte ficam menores, causando um desgaste menos intenso da ferramenta de corte.

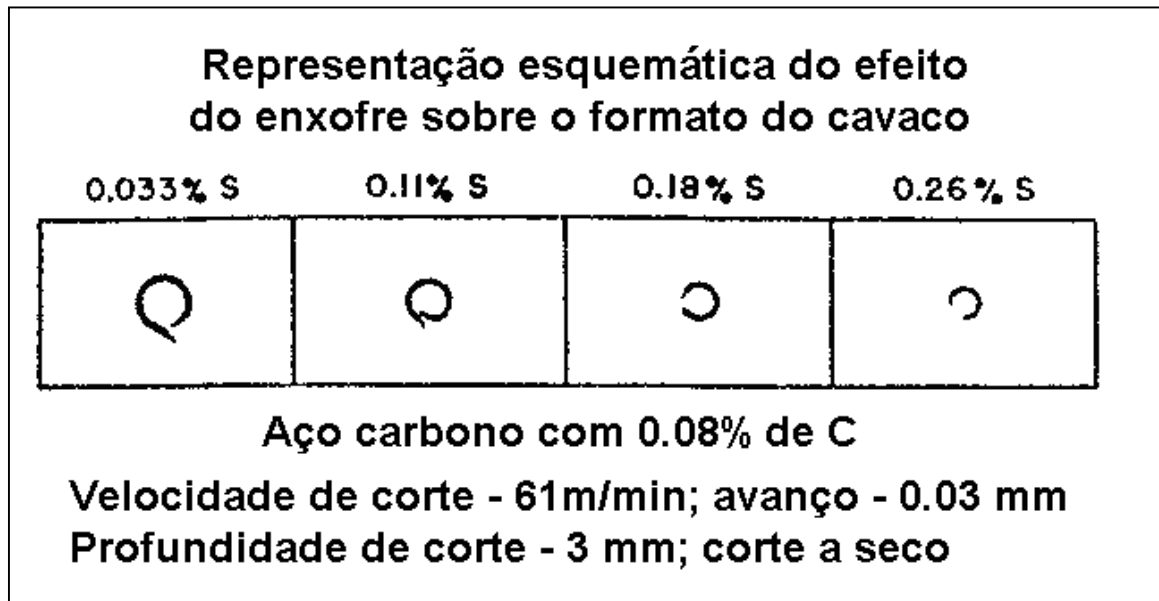


Figura 2.20 - Relação entre o teor de enxofre e o tamanho do cavaco (SHAW; USUI; SMITH, 1961).

Em suma, o aumento do teor de enxofre no aço resulta na formação de cavacos pequenos na usinagem. Cavacos menores implicam na redução da área de contato entre o cavaco e a ferramenta de corte. Conseqüentemente, o atrito na interface cavaco-ferramenta de corte é menor, proporcionando um aumento na vida da ferramenta de corte. Além disso, devido à presença das inclusões de sulfeto de manganês, o atrito na interface ferramenta-peça também é menor, favorecendo um menor desgaste de flanco da ferramenta de corte (BOULGER et al., 1957).

O efeito do enxofre sobre a usinabilidade dos aços de corte fácil do grau SAE 12XX trefilado encontra-se ilustrado na Figura 2.21, onde se pode verificar que as taxas de produção e o MPI (índice de produtividade de usinagem) aumentam com o teor de enxofre, quando o acabamento da superfície usinada e a vida da ferramenta são mantidos constantes (AYLWARD, 1973). O MPI é aumentado em 45%, isto é, de 100 para 145%, quando o teor de enxofre passa de 0,195% (o teor médio de enxofre do grau SAE 1212) para 0,285% (o teor médio de enxofre do grau SAE 1213). Assim, o MPI aumenta na taxa de 5% para cada aumento de 0.01% no teor de enxofre desses aços.

O MPI pode ser definido, conforme fórmula abaixo:

$$\text{MPI (\%)} = \frac{\text{Taxa de produção máxima do aço testado} \times 100}{\text{Taxa de produção máxima do aço padrão}} \quad (2.1)$$

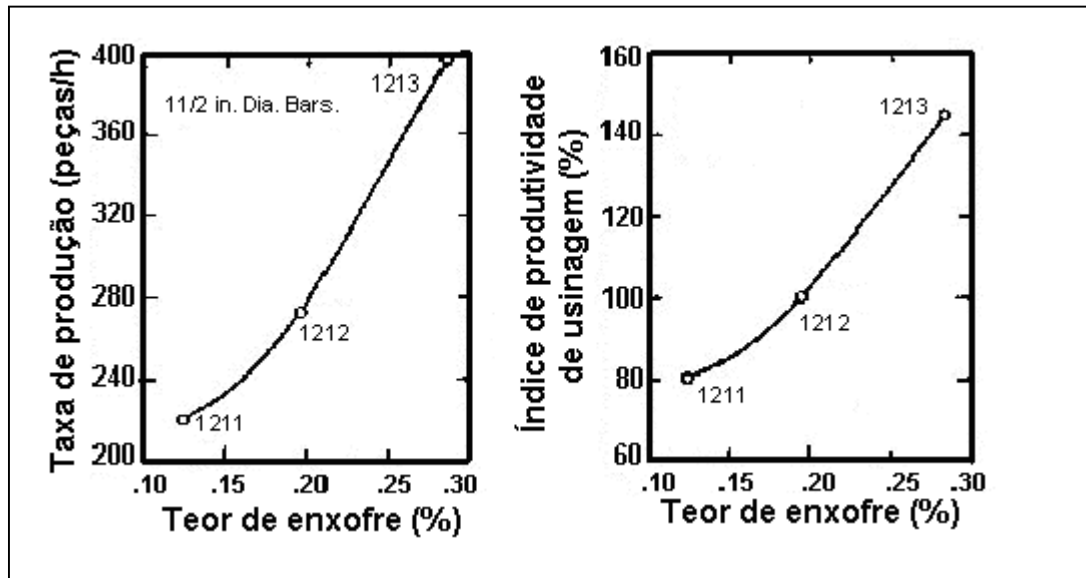


Figura 2.21 - Efeito do teor de enxofre sobre a produtividade de usinagem dos aços do grau SAE 12XX (AYLWARD, 1973).

#### 2.9.1.2 Efeito do carbono e do silício

Embora as normas internacionais AISI e SAE permitam teores de carbono acima de 0,13% nos aços ressulfurados 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 2.22, 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.

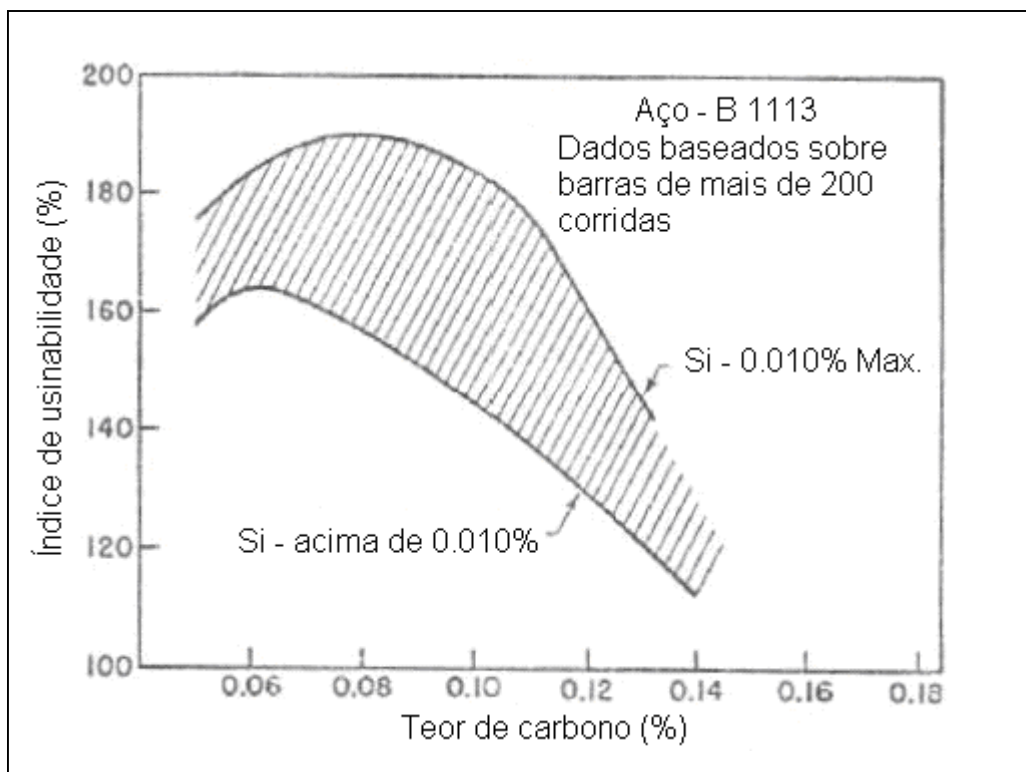


Figura 2.22 - Efeito do teor de carbono sobre o índice de usinabilidade de barras de aço B1113 em testes de torneamento (GARVEY; TATA, 1965).

Na Figura 2.22, também pode ser observado que o silício tem um efeito prejudicial sobre a usinabilidade dos aços baixo-carbono. Este efeito está mais claramente ilustrado na Figura 2.23, onde se pode verificar que o índice de usinabilidade diminui linearmente a medida que o teor de silício aumenta de 0,003% para 0,03%.

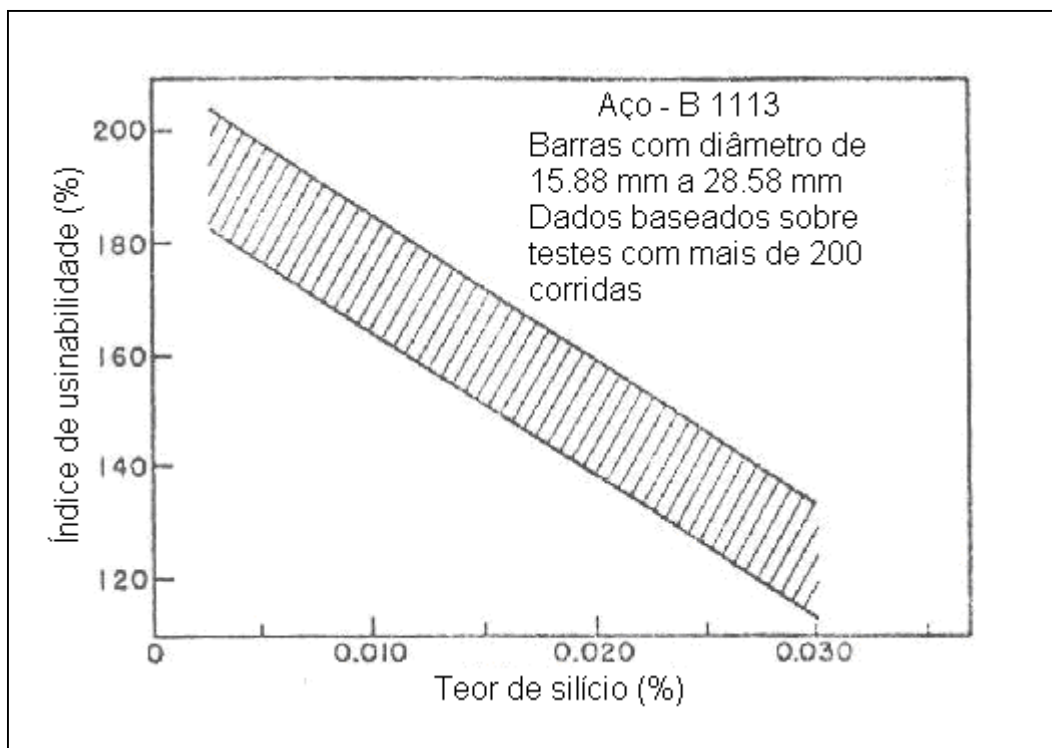


Figura 2.23 - Efeito do teor de silício sobre o índice de usinabilidade de barras de aço B1113 em testes de torneamento (GARVEY; TATA, 1965).

O silício prejudica a usinabilidade por meio de dois modos (GARVEY; TATA, 1965). 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. Este efeito do teor de silício sobre o formato das inclusões de sulfeto é mostrado na Figura 2.24, onde se comparam as características das inclusões encontradas em barras de aço B1112 contendo 0,009%, 0,029% e 0,040% de silício.

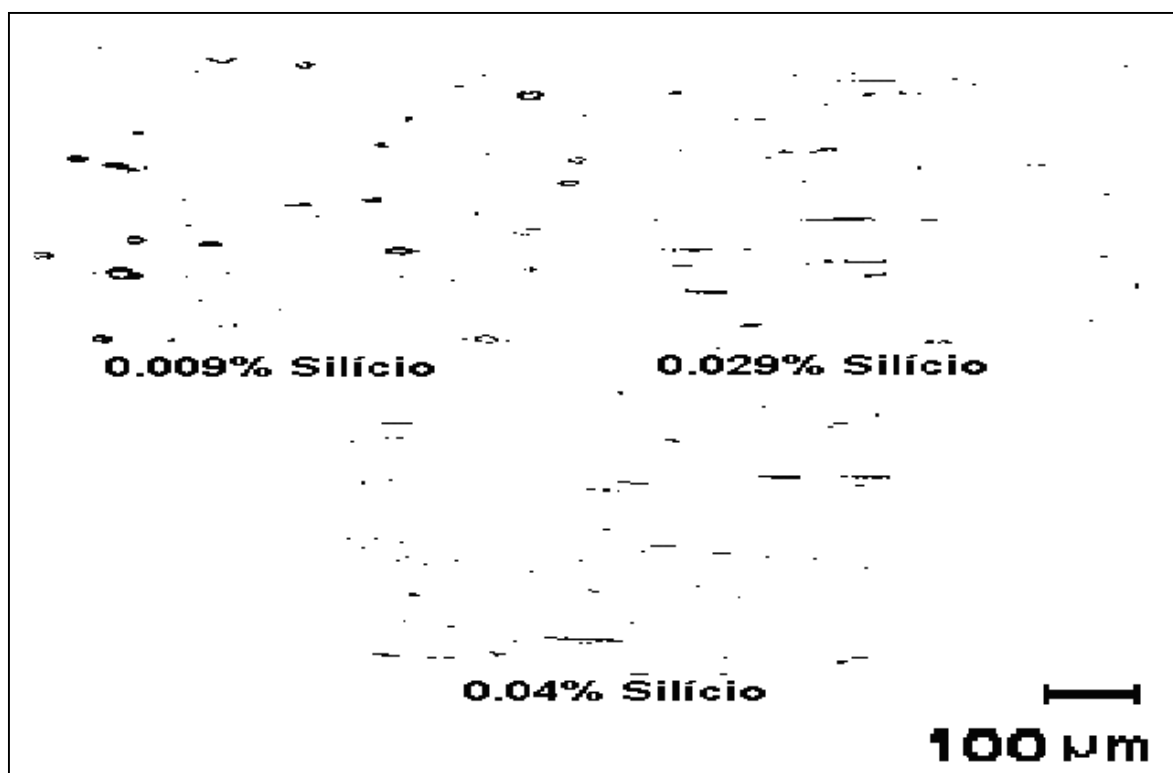


Figura 2.24 - Efeito do teor de silício sobre as características das inclusões de sulfeto de manganês em barras laminadas a quente do aço B1112 de 27 mm de diâmetro (BOULGER; MOORHEAD; GARVEY, 1951). Sem ataque.

O efeito nocivo de pequenas quantidades de silício na usinabilidade e a necessidade de baixos teores de carbono e silício nos aços de corte fácil foram, inicialmente, reconhecidos em um programa de pesquisa da U.S. Steel conduzido pelo Battelle Memorial Institute (MACLAREN; OSWALD, 1950). Os resultados deste programa levaram ao desenvolvimento dos aços MX (BOULGER; MOORHEAD; GARVEY, 1951).

Por outro lado, há pesquisas nas quais se verifica a utilização do silício como uma forma de se melhorar a usinabilidade. Trabalho conduzido por Catanoiu et al. (2002) argumenta que o uso de silício em torno de 0,20% aumenta a camada de sulfeto de manganês depositada nas ferramentas de corte quando se usinam aços de corte fácil, melhorando assim a usinabilidade do aço.

### 2.9.1.3 Efeito do fósforo e do nitrogênio

Dentro de certos limites, o fósforo beneficia a usinabilidade dos aços de corte fácil baixo-carbono pela melhoria da qualidade superficial da peça usinada e por meio da contribuição à formação de cavacos frágeis (BAS, 2000). Adições moderadas de nitrogênio também atuam de uma maneira similar (GARVEY; TATA, 1965).

Se por um lado, pequenas adições de nitrogênio e fósforo melhoram a usinabilidade dos aços de corte fácil baixo-carbono, por outro lado, grandes adições destes elementos podem ser altamente nocivas, devido à redução da vida da ferramenta de corte. Por exemplo, como pode ser visto na Tabela 2.3, o aumento do teor de nitrogênio de 0,003% para 0,028% exerce um efeito nocivo à vida da ferramenta obtida na usinagem de aços de corte fácil com baixos e altos teores de fósforo. Adicionalmente, também deve ser notado que, para altos níveis de nitrogênio, o melhor desempenho de usinabilidade é exibido pelo aço com uma quantidade residual de fósforo (0,018%) em comparação com o aço refosforado (0,12%). É importante lembrar que grandes quantidades de fósforo e nitrogênio prejudicam a conformabilidade a frio (principalmente, a capacidade de trefilação). Portanto, o controle dos teores destes elementos é necessário para garantir uma combinação ótima de vida da ferramenta, acabamento superficial da peça usinada e capacidade de conformação a frio.

O efeito dos teores de fósforo e nitrogênio na usinabilidade dos aços de corte fácil baixo-carbono, utilizados na produção de tambores de porcas de parafuso, é mostrado na Figura 2.25, onde se comparam as vidas das ferramentas de corte obtidas na usinagem de barras trefiladas dos aços B1113, C1213, C1213 modificado (contendo 0,05 a 0,07% de fósforo e menos do que 0,005% de nitrogênio) e 1215 (contendo 0,05 a 0,07% de fósforo e 0,008 a 0,011% de nitrogênio). Todos estes aços testados contêm menos do que 0,10% de carbono e menos do que 0,010% de silício.

Tabela 2.3 - Efeito do teor de nitrogênio sobre o desempenho de barras de aço trefiladas, utilizadas na produção de tambores de porcas de parafuso (GARVEY; TATA, 1965).

| Aço <sup>a</sup> | P, %                                                                    | N <sub>2</sub> , % | Vida média da ferramenta, horas |          |          |           |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------|----------|----------|-----------|
|                  |                                                                         |                    | 77 m/min                        | 86 m/min | 95 m/min | 105 m/min |
| 1                | 0,018                                                                   | 0,003              | b                               | b        | 6,2      | 7,3       |
| 1                | 0,018                                                                   | 0,028              | b                               | 12,1     | 3,3      | b         |
| 2                | 0,09                                                                    | 0,003              | b                               | b        | b        | 8,4       |
| 2                | 0,12                                                                    | 0,028              | 12,0                            | 3,8      | 1,6      | b         |
| a                | Composição química                                                      | Aço 1              | 0,09% C                         | 0,87% Mn | 0,29% S  | 0,008% Si |
|                  |                                                                         | Aço 2              | 0,09% C                         | 0,96% Mn | 0,28% S  | 0,004% Si |
| b                | Não testado                                                             |                    |                                 |          |          |           |
| Nota             | Todos os testes foram feitos em barras trefiladas com diâmetro de 19 mm |                    |                                 |          |          |           |

Na Figura 2.25, pode ser verificado que o aço C1213 modificado foi notadamente o que apresentou maior vida da ferramenta de corte. Muitas toneladas deste aço foram satisfatoriamente usadas nas máquinas de fazer parafusos. Embora a combinação de fósforo e nitrogênio do aço C1213 modificado seja excelente para aplicações em que somente a vida da ferramenta de corte é importante, esta combinação pode não ser desejável para aplicações, nas quais se requer boa qualidade de acabamento superficial.

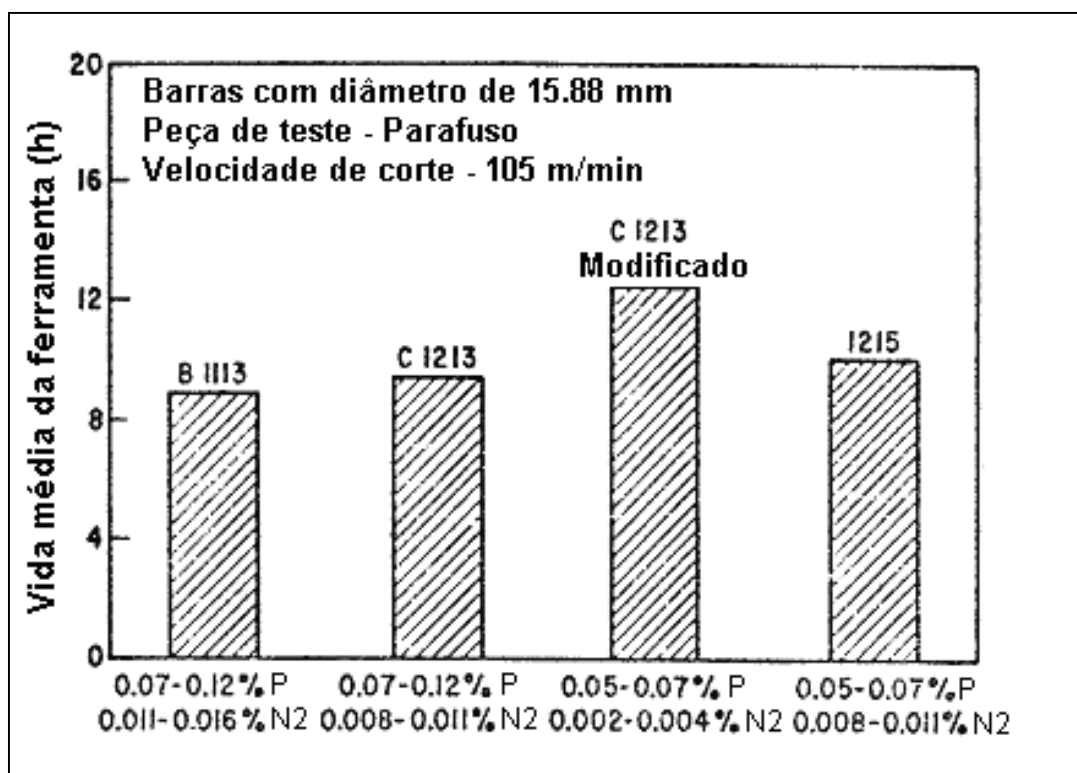


Figura 2.25 - Desempenho de barras trefiladas de aços de corte fácil baixo – carbono com vários teores de fósforo e nitrogênio, utilizadas na produção de tambores de porcas de parafuso (GARVEY; TATA, 1965).

Para estabelecer precisamente a combinação ótima de fósforo e nitrogênio, foi feita uma investigação laboratorial com uso de várias corridas (com 0,08% de carbono, 0,90% de manganês, 0,30% de enxofre, e menos do que 0,010% de silício) fornecidas pela U.S. Steel e contendo diferentes teores de fósforo, variando na faixa de 0,005 a 0,13% e diferentes teores de nitrogênio, variando na faixa de 0,005 a 0,018%. Os resultados dos testes conduzidos em tornos, utilizando-se barras trefiladas de diâmetro de 19,05 mm, estão sumarizados na Figura 2.26. Nesta figura, está representada a influência simultânea dos teores de fósforo e nitrogênio sobre o índice de usinabilidade. A partir da observação da Figura 2.26, verifica-se que os mais altos índices de usinabilidade foram obtidos com os aços contendo cerca de 0,04 a 0,08% de fósforo e 0,007 a 0,012% de nitrogênio.

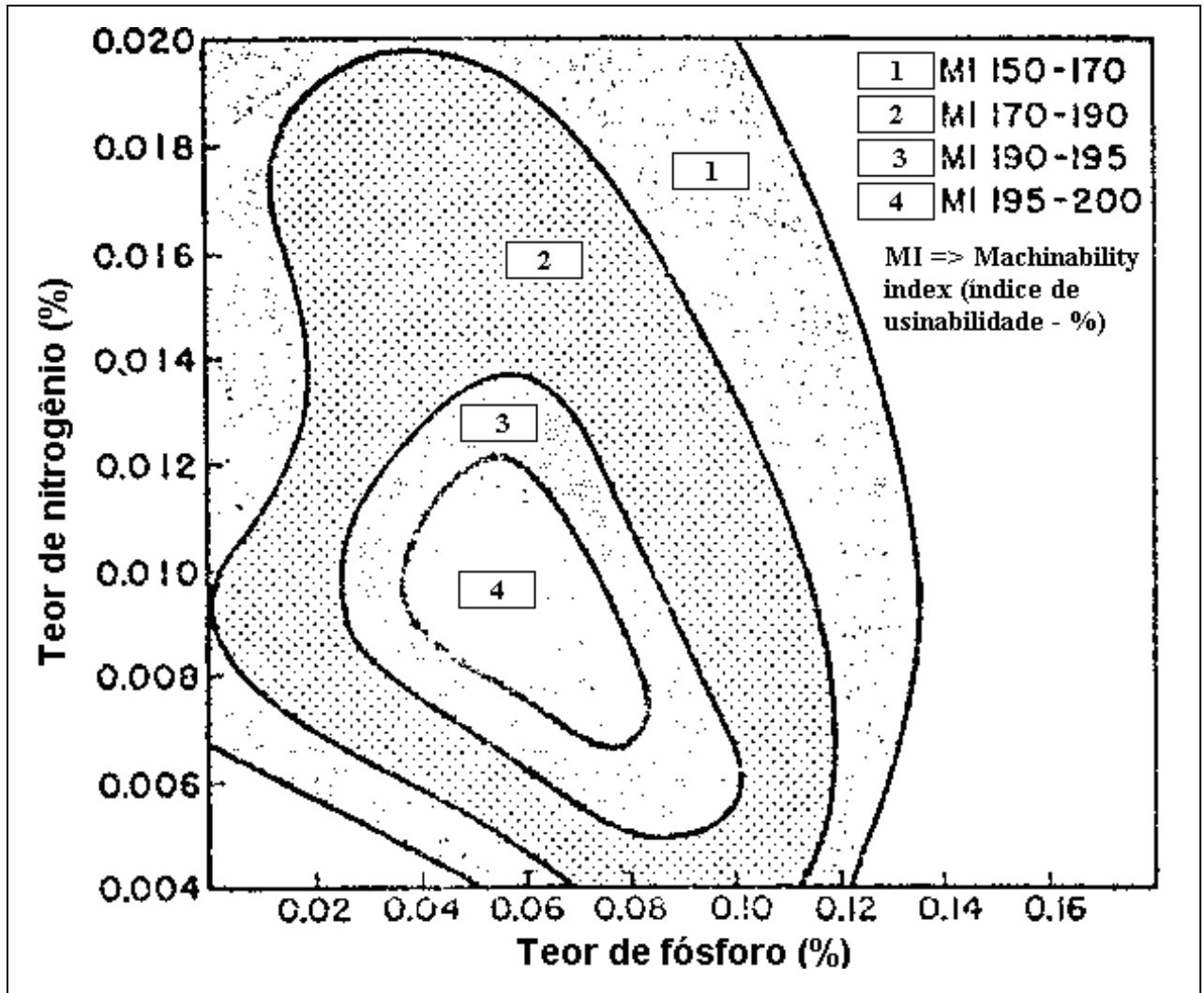


Figura 2.26 - Relação entre os teores de fósforo e nitrogênio e o índice de usinabilidade de barras trefiladas de aço com 0,08% de C e 0,30% de S, em testes de torneamento (GARVEY; TATA, 1965).

Murphy e Aylward (1971) avaliaram o efeito do fósforo e do nitrogênio na usinabilidade, por meio da formulação do “Fósforo Equivalente” (%EP), visto que estes dois elementos possuem comportamentos similares. A porcentagem de fósforo equivalente é calculada da seguinte maneira:

- % de Fósforo Equivalente =  $\%P + 5(\%N_2 - 0,010\%)$ , quando o teor de nitrogênio é menor do que 0,010%; (2.2)
- % de Fósforo Equivalente =  $\%P$ , quando o teor de nitrogênio está entre 0,010 e 0,012%; (2.3)

- % de Fósforo Equivalente =  $\%P + 5(\%N_2 - 0,012\%)$ , quando o teor de nitrogênio é maior do que 0,012%. (2.4)

Na Figura 2.27, pode ser observada uma correlação entre a taxa de produção e a porcentagem de fósforo equivalente de algumas corridas de aços do grupo 12XX. Por este gráfico, observa-se que as taxas de produção aumentam linearmente com a porcentagem de fósforo equivalente. Esta melhoria nas taxas de produção (atribuída à porcentagem de fósforo equivalente) ocorre devido ao aumento da velocidade de corte e do avanço da ferramenta, enquanto se mantêm constantes, o acabamento da superfície usinada e a vida da ferramenta de corte. Esta relação entre porcentagem de fósforo equivalente e condições de usinagem é mostrada nas Figuras 2.28 (a) e (b); por exemplo, aços contendo 0,09% de fósforo equivalente podem ser usinados com velocidades 7 a 15% maiores e com avanços 24 a 31% maiores que no caso dos aços com 0,035% de fósforo equivalente.

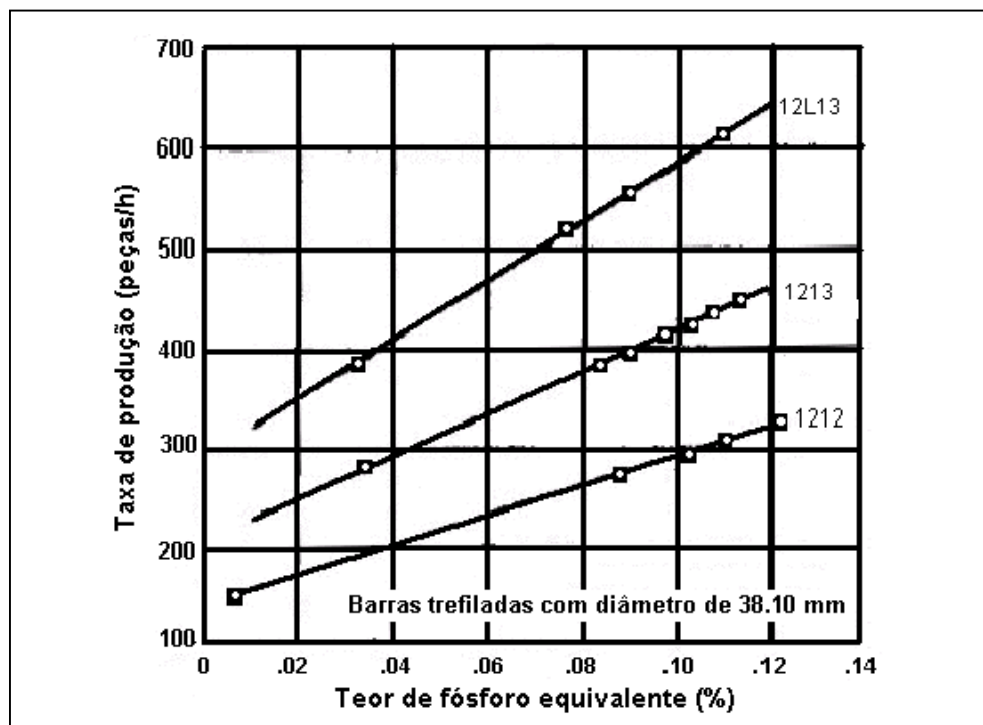


Figura 2.27 - Efeito da porcentagem de fósforo equivalente sobre a taxa de produção para os aços do grau 12XX, com e sem adição de chumbo (MURPHY; AYLWARD, 1971).

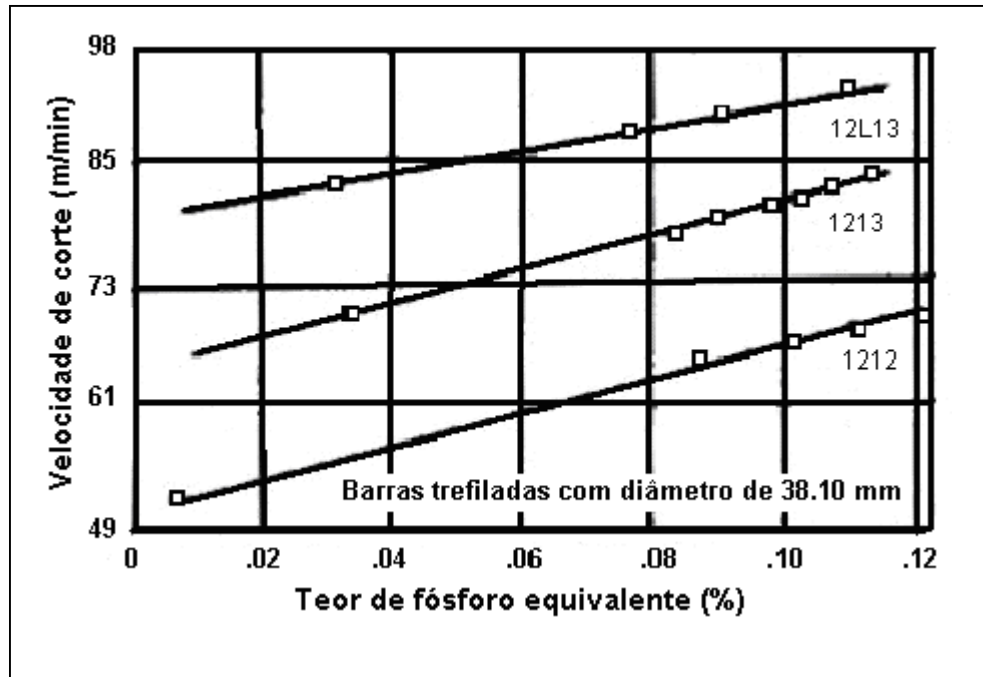


Figura 2.28 (a) - Efeito da porcentagem de fósforo equivalente sobre as condições de usinagem para os aços do grau 12XX, com e sem adição de chumbo (MURPHY; AYLWARD, 1971).

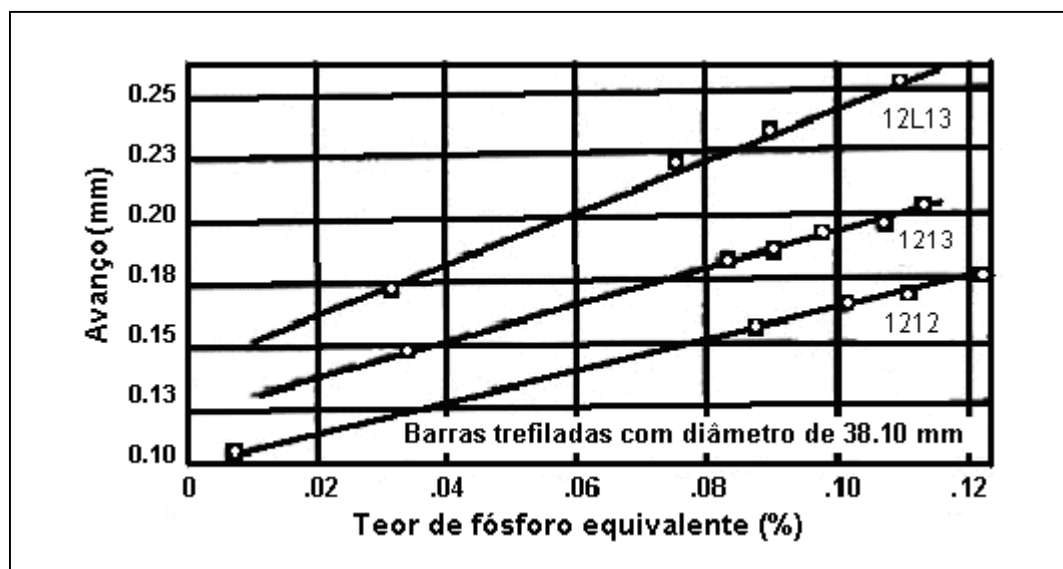


Figura 2.28 (b) - Efeito da porcentagem de fósforo equivalente sobre as condições de usinagem para os aços do grau 12XX, com e sem adição de chumbo (MURPHY; AYLWARD, 1971).

#### 2.9.1.4 Efeito do cobre e do estanho

Como definido previamente, pequenas quantidades de elementos que formam soluções sólidas com a ferrita (tais como o fósforo e o nitrogênio) apresentam efeito benéfico sobre a usinabilidade dos aços de corte fácil baixo – carbono. Por outro lado, grandes quantidades destes elementos prejudicam a usinabilidade (MURPHY; AYLWARD, 1971). Para determinar o efeito do cobre (que tem uma grande solubilidade na ferrita) sobre a usinabilidade, uma investigação foi conduzida com barras trefiladas de aço ao chumbo nitrogenados (0,010% de nitrogênio), contendo 0,09%, 0,27%, 0,40% e 0,56% de cobre. Os resultados deste estudo mostraram que na produção de tambores de porcas de parafuso, um aumento no teor de cobre de 0,09% para 0,56% não possibilitou uma melhora expressiva no desempenho das ferramentas de corte. De uma forma geral, a média da vida da ferramenta de corte foi acima de 8 horas para os aços contendo 0,09%, 0,27% e 0,40% de cobre e abaixo de 8 horas para o aço contendo 0,56% de cobre. A redução na vida da ferramenta de corte, no caso do aço contendo 0,56% de cobre, foi devida, basicamente, ao aumento na dureza e resistência à tração do aço.

Já o estanho, se apropriadamente distribuído em contornos de grão, confere um efeito fragilizante ao aço (GARCIA; HUA; DEARDO, 2002), facilitando a quebra de cavaco. O nível de estanho empregado (0,04 a 0,08%) e o teor de elementos (cobre <0,05%) que possam competir pela localização preferencial nos contornos de grão devem ser bem controlados para que os efeitos positivos do estanho não desapareçam.

#### 2.9.2 Efeito das inclusões na usinabilidade

Todos os aços produzidos comercialmente contêm uma quantidade mensurável de inclusões, que podem ser endógenas, isto é, intrínsecas ao processo de fabricação e resultantes de reações químicas que ocorrem dentro do metal, ou exógenas, isto é, de origem externa e resultantes da erosão mecânica do refratário ou da reação química entre o metal e o refratário ou entre o metal e a escória (KIESSLING, 1978). Com relação às inclusões endógenas, certos tipos, quando apropriadamente controladas,

podem se tornar desejáveis, e isto é o que ocorre nos aços em que a usinabilidade é a principal preocupação. Na Tabela 2.4, são apresentadas as inclusões que mais afetam a usinabilidade dos aços.

Tabela 2.4 - Inclusões presentes nos aços (APPLE, 1989).

| <b>Categoria</b>                                                                                                      | <b>Efeito</b> | <b>Exemplo</b>                 | <b>Forma de presença no aço</b>                                                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Sulfetos: <ul style="list-style-type: none"> <li>• MnS</li> <li>• MnSe</li> <li>• Mn(S,Se)</li> <li>• MnTe</li> </ul> | Positivo      | MnS                            | Até ~2% vol. em aços resulfurados. Tamanho depende da taxa de solidificação. O tipo é controlado pela forma de desoxidação.                         |
| Metálicas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pb</li> <li>• Bi</li> </ul>                                       | Positivo      | Pb                             | Até 0,24% vol. em aços ao chumbo. Presente como partículas alongadas em produtos laminados a quente ou em caudas de sulfetos.                       |
| Óxidos plásticos: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Silicato Ca-Al</li> <li>• Silicato Ca-Al-Mn</li> </ul>     | Positivo      | Anortita                       | Menor que 0,10% vol. em aços tratados com cálcio. Inclusões esféricas ou alongadas, podendo ser envolvidas por CaS.                                 |
| Não-metálicos duros: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aluminatos</li> <li>• Nitretos</li> </ul>               | Negativo      | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Menor que 0,05% vol. em aços desoxidados com alumínio. Presentes isoladamente ou em estrias, com partículas <5µm. Podem ser modificadas com cálcio. |

### 2.9.2.1 Efeito das inclusões de sulfeto de manganês

O enxofre está presente em quantidade mensurável em quase todos os tipos de aço comercialmente produzidos, apresentando-se, geralmente, combinado com o manganês na forma de sulfeto de manganês (MnS). Dependendo do processo de elaboração e refino do aço, as inclusões de MnS podem assumir basicamente três morfologias (SIMS ; FORGENG, 1967), classificadas em:

- Tipo I: Sulfetos globulares uniformemente distribuídos. Normalmente estão associados a óxidos de manganês (MnO) ou a silicatos e de acordo com Kiessling (1978), ocorrem em aços efervescentes ou acalmados com silício (Si), onde o teor de alumínio (Al) solúvel for inferior a 0,001%;
- Tipo II: Sulfetos eutéticos intergranulares. Ocorrem em banhos com teores reduzidos de oxigênio, precipitando na forma eutética, segundo os contornos de grão primário. São observados nos aços acalmados ao Si e Al e, de acordo com a literatura (BHATTACHARYA; QUINTO, 1980), esse tipo de inclusão ocorre com cerca de 0,007% Al em solução. Portanto, a transformação de sulfetos do tipo I para o tipo II depende, principalmente, do grau de desoxidação.

Dahl, Hengstenberg e Duren (1966) mostram que a transição de I para II, nos aços baixo carbono (C), com cerca de 0,20% de enxofre (S), corresponde a 0,01 a 0,02% de oxigênio (O), cumprindo a relação  $O/S > 0,05$ .

Desforges, Duckworth e Ryan (1976) afirmam que as inclusões de oxi-sulfetos verificam-se em geral, para teores de O superiores a 0,01%.

- Tipo III: Sulfetos angulares, os quais se situam nos pontos triplos dos limites dos grãos. Precipitam-se em aços contendo excesso de Al ou com teores elevados de C e Si. A presença de elementos que possuem grande afinidade por S, como titânio (Ti) e zircônio (Zr), faz com que sejam igualmente formados sulfetos angulosos, correspondentes ao tipo III (BELLOT, 1978). O mesmo ocorre com a presença de desoxidantes fortes, tais como cálcio e cério.

Sims, Forgen (1967) e Kiessling (1978) classificam ainda outros dois tipos de sulfetos, o tipo IV em que a cristalização é segundo um arranjo de plaquetas e o tipo Widmanstätten em forma de finas plaquetas de distribuição triangular.

Na Figura 2.29, estão ilustrados os tipos de inclusões de sulfeto de manganês (MnS), de acordo com a sua morfologia.

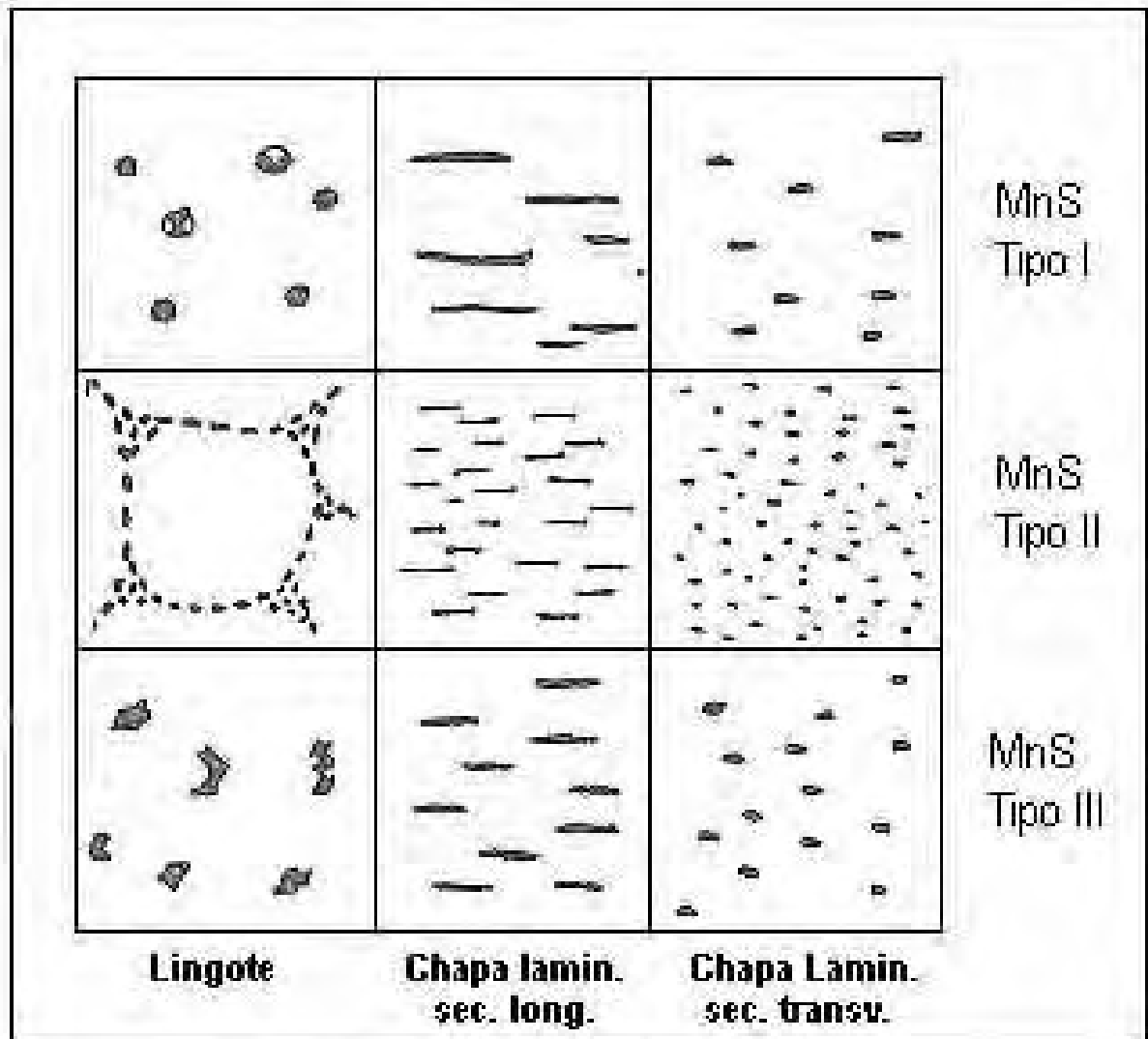


Figura 2.29 - Formatos de inclusões de MnS no estado bruto de fusão e após deformação plástica (SIMS; FORGENG, 1967).

Com relação ao efeito sobre a usinabilidade, evidências experimentais (MARSTON; MURRAY, 1970) 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 agiriam como concentradores de tensão e ponto de nucleação de vazios e trincas na zona primária de deformação, reduzindo a tensão necessária ao cisalhamento (SIDJANIN; KOVAC, 1997). A intensidade com que este fenômeno ocorre depende do formato, tamanho, fração volumétrica e distribuição das inclusões de sulfeto, bem como do comportamento à deformação em relação à matriz. 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 (1970). 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 (BARRETOS, 1999).

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 dispersos e em grande quantidade, com atuação marcante no aumento da usinabilidade. Por outro lado, como a grande quantidade de inclusões diminui as propriedades mecânicas, estes aços são geralmente utilizados em componentes de pouca ou nenhuma solicitação, onde a usinabilidade é o principal fator de desempenho.

#### 2.9.2.2 Efeito dos aditivos intensificadores de sulfetos de manganês

Vários tipos de aditivos podem ser utilizados, tanto em aços com teor normal de enxofre como em aços ressulfurados, para intensificar o efeito das inclusões de sulfeto de manganês sobre a usinabilidade, aumentando a fração volumétrica efetiva e/ou provendo controle do tamanho e forma dos sulfetos. Dois aditivos particularmente eficazes são o selênio e o telúrio (JHA; SHARMA, 1990). Na ausência de enxofre, estes elementos formam compostos análogos ao MnS, isto é, MnSe e MnTe, que segundo Yaguchi e Onodera (1998) são bastante efetivos na redução da força de corte

e na melhoria da formação de cavaco. No caso de aços resulfurados, pequenas quantidades de Se ou Te são suficientes para alterar a morfologia das inclusões de MnS, tornando-as mais globulares e assim intensificando o seu efeito sobre a usinabilidade (MALMBERG; RUNNSJÖ; ARONSSON, 1974).

Por fim, Shiiki et al. (2003) reportam que o uso de cálcio combinado com titânio é capaz de reduzir o tamanho das inclusões de sulfeto de manganês em aços de corte fácil sem chumbo e que esta melhoria na distribuição das inclusões aumenta o poder de lubrificação da ferramenta de corte pelo aço.

### 2.9.2.3 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 (WARKE; BREYER, 1971; PIMENTEL; PRADO; MIYADA, 2004). 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 (WARKE; BREYER, 1971).

A título de exemplificação, o efeito do chumbo sobre a usinabilidade do aço 1213 pode ser verificado na Figura 2.27. Por este gráfico, considerando-se uma determinada porcentagem de fósforo equivalente, observa-se que o chumbo melhora a produtividade do aço 1213 em aproximadamente 40%. Assim, para uma porcentagem de fósforo equivalente de 0,09%, a adição de chumbo proporciona um aumento de produtividade de 400 peças/h para 560 peças/h. Esse aumento de 40% na produtividade é devido às velocidades de corte e aos avanços da ferramenta que podem ser aumentados na ordem de 12 –18% e 20-25%, respectivamente, conforme pode ser visto nas Figuras 2.28 (a) e (b). Do mesmo modo como nos aços do grau

12XX sem adição de chumbo, um aumento na porcentagem de fósforo equivalente proporciona uma melhora na usinabilidade dos aços ao chumbo, devido a possibilidade de se operar sob maiores condições de corte sem sacrifício da qualidade superficial ou sem comprometer a vida da ferramenta de corte (MURPHY; AYLWARD, 1971).

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 (SOMEKAWA; KAISO; MATSUSHIMA, 2001). No entanto, devido a sua superior usinabilidade, componentes fabricados com aços ao chumbo ainda são utilizados por praticamente todos os fabricantes de automóveis. Apesar de existir a cerca de 30 anos no mercado, os aços ao bismuto, criados para serem substitutos dos aços ao chumbo, ainda apresentam desempenho inferior, sobretudo em velocidades de corte baixas e médias (YAGUCHI, 1989), o que restringe seu uso como eventual substituto. Segundo Bertrand e Del Solar (1998), para um mesmo resultado em usinabilidade, somente uma terça parte de bismuto em comparação ao chumbo deve ser utilizada. Esta menor adição traduz-se em maior resistência à fadiga dos componentes fabricados a partir do aço, bem como conferem um melhor acabamento superficial (BERTRAND; COUSO, 1998). Segundo Evangelista et al. (1999), o bismuto adicionado ao aço DIN 9SMn28 permite um acréscimo de usinabilidade similar ao aço com chumbo.

#### 2.9.2.4 Efeito dos óxidos plásticos

Com a evolução da metalurgia de panela, o tratamento com cálcio passou a ser uma forma eficiente de controlar a composição, as propriedades e a morfologia das inclusões de óxidos presentes no aço. A modificação das inclusões através deste tratamento promove a melhoria da usinabilidade através de dois fenômenos: neutralização das inclusões de alumina e formação de óxidos plásticos.

As inclusões de alumina são originárias da desoxidação do aço utilizando alumínio, ainda durante o processamento na aciaria. A alumina é um óxido extremamente duro, prejudicando diretamente a usinabilidade do material por provocar abrasão na aresta de corte da ferramenta e, indiretamente, por arrancar a camada

protetora de elementos lubrificantes, como o MnS, que por ventura tenha se formado na superfície de saída da ferramenta. O tratamento com cálcio, após a desoxidação com alumínio, atua, também, nas inclusões de sulfeto de manganês e promove a modificação das inclusões de alumina em inclusões do tipo (Ca, Mn)S. Estas inclusões apresentam dureza menor, reduzindo a abrasão tanto nas ferramentas de aço rápido como nas de metal duro (SUBRAMANIAN; KAY, 1997).

A elevação das velocidades de corte usualmente encontradas nas operações de usinagem, promovida pela evolução dos materiais utilizados nas ferramentas de corte, também vem a favorecer um maior emprego dos aços com modificação de inclusões de óxidos, pois os mecanismos associados ao aumento de usinabilidade estão diretamente associados à velocidade de corte e ao tipo de ferramenta. Esta tendência de aumento de velocidade e emprego de ferramentas mais sofisticadas motivou a proposta de substituição dos aços de corte fácil ao chumbo por aços com morfologia de inclusões controladas, tanto de sulfetos de manganês (PIERSON, 1990) quanto de óxidos plásticos (SUBRAMANIAN; RAMANUJACHAR, 1996), pois se observa que para altas velocidades de corte ( $>120\text{m/min}$ ), os aços com morfologia de inclusões controlada apresentam melhor usinabilidade que os aços ao chumbo. Subramanian e colaboradores, em várias publicações (SUBRAMANIAN; RAMANUJACHAR, 1997; SUBRAMANIAN et al., 1998; SUBRAMANIAN et al., 1999; SUBRAMANIAN et al., 2002; SUBRAMANIAN et al., 2004) mostraram que, na usinagem a altas velocidades de corte, o controle das inclusões de óxidos no aço é muito mais efetivo do que o mais avançado dos revestimentos de ferramentas para prevenir o desgaste por craterização.

## **CAPÍTULO 3 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL**

### **3.1 CARACTERIZAÇÃO DO AÇO SAE 12L14**

Para a caracterização química, mecânica e metalúrgica do material, utilizado nos ensaios de usinabilidade, foram realizados os seguintes ensaios: análise química, ensaio de tração, ensaio de dureza e ensaios metalográficos. Todos estes ensaios foram realizados nos laboratórios internos da Aços Villares S.A. (usina de Pindamonhangaba).

Também foi feito microscopia eletrônica de varredura para caracterizar as inclusões encontradas no material. A microscopia eletrônica de varredura foi executada no laboratório do DEMAR (FAENQUIL).

#### **3.1.1 Análise química**

As análises químicas foram realizadas em amostras retiradas do lingotamento (análise química de panela) e em amostras retiradas do material laminado (análise química de produto realizada nas amostras 1, 2, 3, 4, 5 e 6).

Nas amostras do lingotamento, as análises químicas para determinação das porcentagens de carbono, enxofre, oxigênio e nitrogênio foram realizadas pelo método de combustão direta. Os demais elementos (manganês, silício, fósforo, cromo, níquel, molibdênio, cobre e chumbo) foram quantificados por espectrômetro de Raios-X (fabricante do equipamento: ARL Modelo: 72000S).

Nas amostras do material laminado, as análises químicas para determinação das porcentagens de carbono, enxofre, oxigênio e nitrogênio foram realizadas pelo método de combustão direta, utilizando-se o equipamento LECO. Já as análises químicas para determinação das porcentagens de manganês, silício, cromo, níquel, molibdênio, cobre e chumbo foram realizadas por espectrofotômetro de absorção atômica (fabricante do equipamento: Perkin Elmer Modelo: 460). O teor de fósforo foi quantificado pelo método alcalinimétrico.

A análise química de produto foi realizada em três amostras (amostras 1, 2 e 3) retiradas aleatoriamente 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 3.1.

Tabela 3.1 - 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 <sup>a</sup>  | 66                                       | 64                                     |
| 2 <sup>a</sup>  | 62                                       | 60                                     |
| 3 <sup>a</sup>  | 60                                       | 58                                     |
| 4 <sup>a</sup>  | 56                                       | 54                                     |
| 5 <sup>a</sup>  | 54                                       | 52                                     |
| 6 <sup>a</sup>  | 52                                       | 50                                     |
| 7 <sup>a</sup>  | 50                                       | 48                                     |
| 8 <sup>a</sup>  | 48                                       | 46                                     |
| 9 <sup>a</sup>  | 46                                       | 44                                     |
| 10 <sup>a</sup> | 44                                       | 42                                     |
| 11 <sup>a</sup> | 42                                       | 40                                     |
| 12 <sup>a</sup> | 40                                       | 38                                     |
| 13 <sup>a</sup> | 38                                       | 36                                     |

Portanto, as análises químicas foram realizadas, utilizando os cavacos obtidos por meio da usinagem das amostras, partindo-se do diâmetro  $D_i$  até o diâmetro  $D_f$ .

A análise química de produto foi realizada em 13 profundidades diferentes com o objetivo de correlacionar a composição química das amostras com o desempenho da ferramenta de corte nos 13 ensaios de usinabilidade realizados neste trabalho, conforme a Figura 3.1. Segundo a literatura (TROUP, 1966; FERRARESI, 1995), a composição química do material da peça usinada influencia fortemente na

usinabilidade, cuja avaliação neste trabalho será feita através da medição da profundidade máxima do desgaste de flanco da ferramenta de corte.

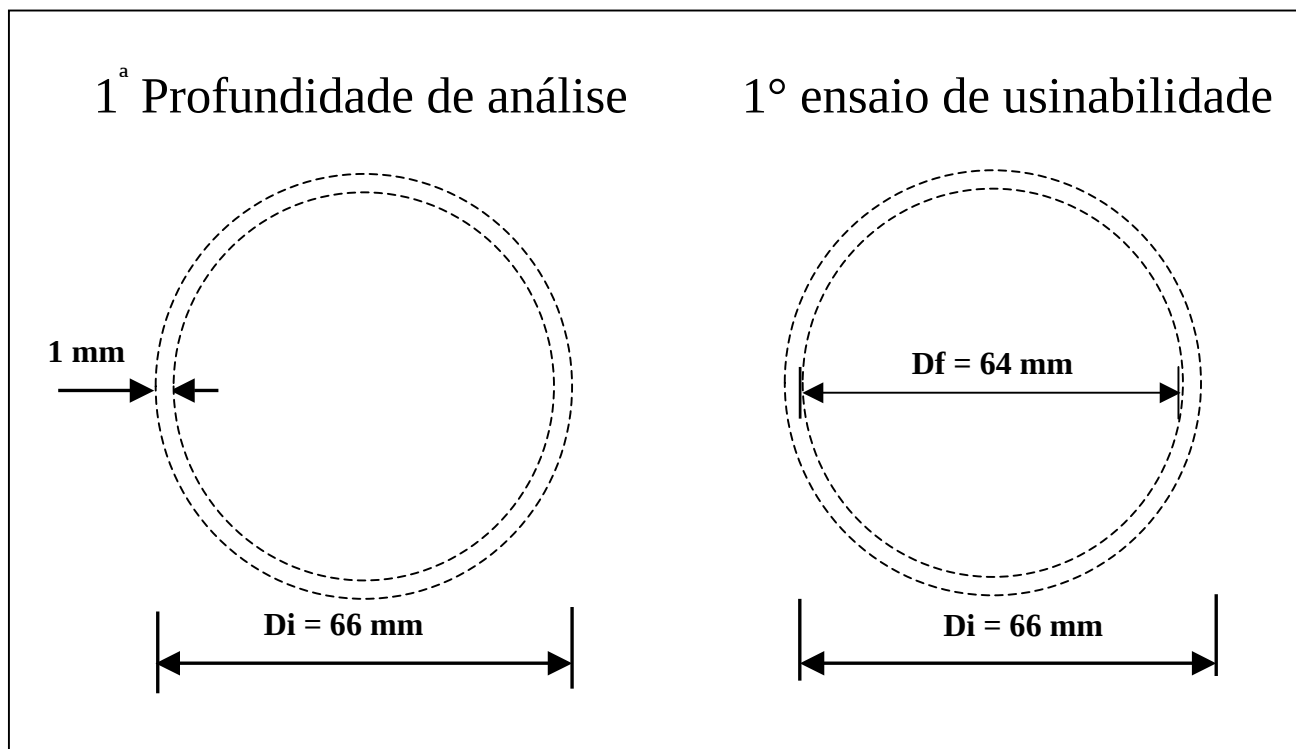


Figura 3.1 - Correlação entre a análise química da amostra e o ensaio de usinabilidade.

### 3.1.2 Ensaio de tração

O ensaio de tração foi realizado conforme método de ensaio definido pela norma ASTM E 8. O equipamento utilizado foi uma máquina universal de ensaio da marca Kratos. O ensaio foi executado em três amostras (amostras 7, 8 e 9) com o objetivo de determinar a resistência à tração, o limite de escoamento, a redução de área e o alongamento do material.

### 3.1.3 Ensaio de dureza

O ensaio de dureza Brinell foi realizado conforme a norma ASTM E 10. O equipamento utilizado foi um durômetro da marca Shimadzu. O ensaio foi executado na superfície, a 28 mm da superfície e no núcleo das amostras 7, 8 e 9.

### 3.1.4 Ensaios metalográficos

As amostras para o exame metalográfico (amostras 10, 11, 12, 13, 14 e 15) 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 6µm e 1µm, onde se pretendeu obter uma superfície isenta de riscos para a análise metalográfica.

Para o ataque químico, foram utilizados dois tipos de soluções: Nital 2% (98% de álcool etílico e 2% de ácido nítrico) e picrato de sódio. O ataque foi feito por imersão durante 30 segundos, seguido de lavagem em água corrente, e secagem por ar quente após aplicação de álcool.

As micrografias foram feitas em um microscópio óptico Olympus (modelo: BX51M) com ampliações de 100 e 500 vezes.

A análise de microinclusões foi feita em seis amostras (amostras 10, 11, 12, 13, 14 e 15) sem ataque químico (exame micrográfico com ampliação de 100 vezes), conforme a norma SEP 1572. A análise das fases presentes nas microinclusões foi feita por microscopia eletrônica de varredura (marca: LEO modelo: 1450VP) em uma amostra (amostra 11) sem ataque químico (exame micrográfico com ampliação de 500 vezes). A análise do tamanho de grão austenítico foi realizada em uma amostra (amostra 10) submetida ao ataque químico com picrato de sódio (exame micrográfico com ampliação de 100 vezes), conforme a norma ASTM E 112 (método McQuaid-Ehn). Já os microconstituintes presentes no aço foram identificados por meio de microscopia óptica em uma amostra (amostra 12) submetida ao ataque químico com Nital 2% (exame micrográfico com ampliação de 100 vezes).

Na análise inclusionária, ainda foi avaliada a morfologia das inclusões de sulfeto de manganês, por meio da medição dos seus comprimentos e larguras.

## 3.2 ENSAIOS DE USINABILIDADE

### 3.2.1 Equipamentos utilizados

Nos ensaios de usinabilidade, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Torno CNC Romi - Modelo: Centur 30S (Figura 3.2);
- Estereoscópio Leica – Modelo: GZ 6 (Figura 3.3);



Figura 3.2 - Foto do torno utilizado nos ensaios de usinabilidade.



Figura 3.3 - Fotos do estereoscópio utilizado para a medição da profundidade de desgaste de flanco da ferramenta de corte.

### 3.2.2 Condições de usinagem

Os ensaios de usinabilidade foram realizados a seco, utilizando-se como processo de usinagem 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 de corte: desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ).

### 3.2.3 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. Os corpos-de-prova foram faceados e os furos de centro foram então executados. Um passe inicial foi efetuado para remoção da camada oxidada e descarbonetada, oriunda do processo de laminação. Após esta operação, o diâmetro inicial dos corpos-de-prova passou para 66 mm. No sistema de fixação usado na usinagem, cada corpo-de-prova foi preso em placa de três castanhas suportado pelo contraponto rotativo.

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 ( $V_{Bmax}$ ) 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. No 3º ensaio de usinabilidade, foram usinados os mesmos corpos-de-prova resultantes do 2º ensaio de usinabilidade, com um diâmetro inicial de 60 mm, obtendo-se corpos-de-prova com um diâmetro final de 58 mm, tendo, neste caso, a ferramenta de corte realizado um percurso de 8748 m. No 4º ensaio de usinabilidade, foram usinados os corpos-de-prova resultantes do 3º ensaio de usinabilidade, porém com um diâmetro inicial de 56 mm, obtendo-se corpos-de-prova com um diâmetro final de 54 mm, tendo, neste caso, a ferramenta de corte realizado um percurso de 10170 m. No 5º ensaio de usinabilidade, foram usinados os mesmos corpos-de-prova resultantes do 4º ensaio de usinabilidade, com um diâmetro inicial de 54 mm, obtendo-se corpos-de-prova com um diâmetro final de 52 mm, tendo, neste caso, a ferramenta de corte realizado um percurso de 9810 m. No 6º ensaio de usinabilidade, foram usinados os mesmos corpos-de-prova resultantes do 5º

ensaio de usinabilidade, com um diâmetro inicial de 52 mm, obtendo-se corpos-de-prova com um diâmetro final de 50 mm, tendo, neste caso, a ferramenta de corte realizado um percurso de 9405 m. E assim sucessivamente.

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 ( $V_{Bmax}$ ) de cada aresta de corte, utilizando-se o estereoscópio (ampliação de 40x). A medição do desgaste máximo de flanco de cada ferramenta foi realizada após determinados percursos de corte, conforme pode ser verificado nas Tabelas 4.7 a 4.19. Na Figura 3.4, pode ser verificada uma foto que ilustra o modo como foi realizada a medição do desgaste máximo de flanco da ferramenta de corte.



Figura 3.4 - Foto ilustrativa da medição do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte.

De uma forma mais clara, foram realizados os ensaios de usinabilidade, conforme a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Ensaios de usinabilidade realizados.

| Nº de ensaios | Percurso de corte<br>(lc) (m) | Diâmetro inicial dos<br>CDP's (mm) | Diâmetro final dos<br>CDP's (mm) |
|---------------|-------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| 1             | 9648                          | 66                                 | 64                               |
| 2             | 9036                          | 62                                 | 60                               |
| 3             | 8748                          | 60                                 | 58                               |
| 4             | 10170                         | 56                                 | 54                               |
| 5             | 9810                          | 54                                 | 52                               |
| 6             | 9405                          | 52                                 | 50                               |
| 7             | 9045                          | 50                                 | 48                               |
| 8             | 8685                          | 48                                 | 46                               |
| 9             | 8280                          | 46                                 | 44                               |
| 10            | 7920                          | 44                                 | 42                               |
| 11            | 7560                          | 42                                 | 40                               |
| 12            | 7155                          | 40                                 | 38                               |
| 13            | 6795                          | 38                                 | 36                               |

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 RESULTADOS DA ANÁLISE QUÍMICA

Na Tabela 4.1, tem-se o resultado da análise química (exceto o oxigênio) realizada na amostra retirada durante o lingotamento. Desta análise, pode-se verificar que a composição do aço está em conformidade com a composição especificada na norma SAE J 403.

Tabela 4.1 - Resultado da análise química de panela.

| Porcentagem em peso de cada elemento (%) |      |       |      |      |      |      |      |      |                |       |
|------------------------------------------|------|-------|------|------|------|------|------|------|----------------|-------|
| C                                        | Mn   | P     | S    | Si   | Ni   | Cr   | Mo   | Cu   | N <sub>2</sub> | Pb    |
| 0,080                                    | 1,14 | 0,045 | 0,30 | 0,02 | 0,06 | 0,14 | 0,02 | 0,21 | 0,0075         | 0,276 |

Na Tabela 4.2, têm-se a média e o desvio-padrão dos resultados da análise química (exceto o oxigênio) realizada nas amostras 1, 2 e 3, retiradas do material laminado. Com base na Tabela 4.2, foram construídos os gráficos das Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 que representam, respectivamente, a variação dos teores de carbono, enxofre e chumbo em função da profundidade das amostras (diâmetro final dos CDP's utilizados nos ensaios de usinabilidade). Analisando-se estas figuras, pode-se verificar que os teores de carbono, enxofre e chumbo aumentam à medida que diminui o diâmetro final das amostras. Esta variação ocorre devida ao fenômeno de segregação.

A análise do oxigênio e do nitrogênio foi realizada em três outras amostras (amostras 4, 5 e 6) com diâmetro de 66 mm. Estes gases foram analisados na superfície, a 28 mm da superfície e no núcleo de cada amostra, visando-se avaliar o seu perfil de variação. Na Tabela 4.3, têm-se a média e o desvio-padrão dos resultados desta análise. Baseando-se na Tabela 4.3, foi construído o gráfico da Figura 4.4, que representa a variação do teor de oxigênio em função da profundidade das amostras. Analisando-se esta figura, pode-se verificar que o teor de oxigênio aumenta à medida que diminui o diâmetro final das amostras. Esta variação ocorre devida também ao fenômeno de segregação.

Tabela 4.2 - 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     |               | Si    |               |
|                                  | 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         | 0,01  | 0,00          |
| 60                               | 0,069                                    | 0,001         | 1,12  | 0,00          | 0,0478 | 0,0008        | 0,286 | 0,001         | 0,01  | 0,00          |
| 58                               | 0,070                                    | 0,001         | 1,12  | 0,01          | 0,0483 | 0,0000        | 0,290 | 0,001         | 0,01  | 0,00          |
| 54                               | 0,070                                    | 0,001         | 1,12  | 0,01          | 0,0483 | 0,0000        | 0,295 | 0,002         | 0,01  | 0,00          |
| 52                               | 0,071                                    | 0,001         | 1,12  | 0,01          | 0,0487 | 0,0008        | 0,301 | 0,002         | 0,01  | 0,00          |
| 50                               | 0,071                                    | 0,002         | 1,13  | 0,01          | 0,0492 | 0,0008        | 0,303 | 0,001         | 0,01  | 0,00          |
| 48                               | 0,071                                    | 0,002         | 1,13  | 0,01          | 0,0492 | 0,0008        | 0,306 | 0,002         | 0,01  | 0,01          |
| 46                               | 0,071                                    | 0,002         | 1,13  | 0,00          | 0,0496 | 0,0000        | 0,306 | 0,002         | 0,01  | 0,01          |
| 44                               | 0,071                                    | 0,002         | 1,13  | 0,00          | 0,0496 | 0,0000        | 0,307 | 0,002         | 0,01  | 0,01          |
| 42                               | 0,071                                    | 0,002         | 1,13  | 0,01          | 0,0496 | 0,0000        | 0,309 | 0,002         | 0,01  | 0,01          |
| 40                               | 0,071                                    | 0,002         | 1,13  | 0,01          | 0,0496 | 0,0000        | 0,309 | 0,003         | 0,02  | 0,01          |
| 38                               | 0,075                                    | 0,005         | 1,14  | 0,01          | 0,0500 | 0,0008        | 0,310 | 0,002         | 0,02  | 0,00          |
| 36                               | 0,079                                    | 0,004         | 1,14  | 0,00          | 0,0512 | 0,0014        | 0,312 | 0,002         | 0,02  | 0,00          |

| Diâmetro final das amostras (mm) | Porcentagem em peso de cada elemento (%) |               |       |               |       |               |       |               |       |               |
|----------------------------------|------------------------------------------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|-------|---------------|
|                                  | Ni                                       |               | Cr    |               | Mo    |               | Cu    |               | Pb    |               |
|                                  | Média                                    | Desvio-Padrão | Média | Desvio-Padrão | Média | Desvio-Padrão | Média | Desvio-Padrão | Média | Desvio-Padrão |
| 64                               | 0,06                                     | 0,00          | 0,14  | 0,01          | 0,02  | 0,00          | 0,22  | 0,01          | 0,273 | 0,003         |
| 60                               | 0,06                                     | 0,00          | 0,14  | 0,01          | 0,02  | 0,00          | 0,22  | 0,00          | 0,279 | 0,004         |
| 58                               | 0,06                                     | 0,00          | 0,14  | 0,01          | 0,02  | 0,00          | 0,22  | 0,00          | 0,281 | 0,004         |
| 54                               | 0,06                                     | 0,00          | 0,14  | 0,01          | 0,02  | 0,00          | 0,22  | 0,00          | 0,286 | 0,008         |
| 52                               | 0,06                                     | 0,00          | 0,14  | 0,01          | 0,02  | 0,00          | 0,22  | 0,00          | 0,288 | 0,006         |
| 50                               | 0,06                                     | 0,00          | 0,14  | 0,00          | 0,02  | 0,00          | 0,22  | 0,00          | 0,292 | 0,005         |
| 48                               | 0,06                                     | 0,00          | 0,14  | 0,00          | 0,02  | 0,00          | 0,22  | 0,00          | 0,293 | 0,005         |
| 46                               | 0,06                                     | 0,00          | 0,14  | 0,00          | 0,02  | 0,00          | 0,22  | 0,00          | 0,294 | 0,004         |
| 44                               | 0,06                                     | 0,00          | 0,14  | 0,00          | 0,02  | 0,00          | 0,22  | 0,00          | 0,296 | 0,004         |
| 42                               | 0,06                                     | 0,00          | 0,14  | 0,00          | 0,02  | 0,00          | 0,22  | 0,00          | 0,297 | 0,004         |
| 40                               | 0,06                                     | 0,00          | 0,14  | 0,00          | 0,02  | 0,00          | 0,22  | 0,01          | 0,299 | 0,004         |
| 38                               | 0,06                                     | 0,00          | 0,14  | 0,00          | 0,02  | 0,00          | 0,23  | 0,01          | 0,301 | 0,002         |
| 36                               | 0,06                                     | 0,00          | 0,14  | 0,00          | 0,02  | 0,00          | 0,23  | 0,00          | 0,302 | 0,001         |

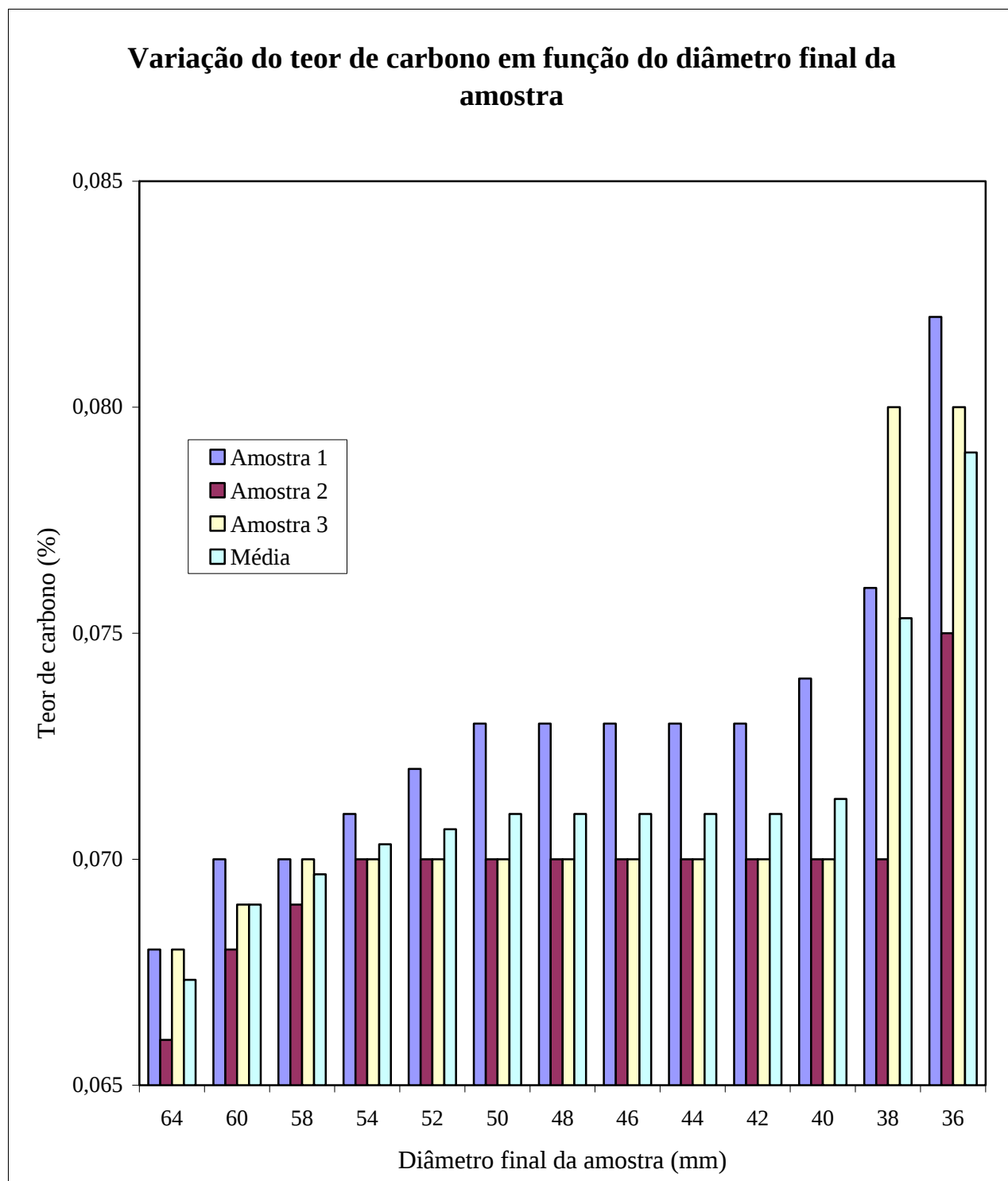


Figura 4.1 - Variação do teor de carbono em função do diâmetro final da amostra.

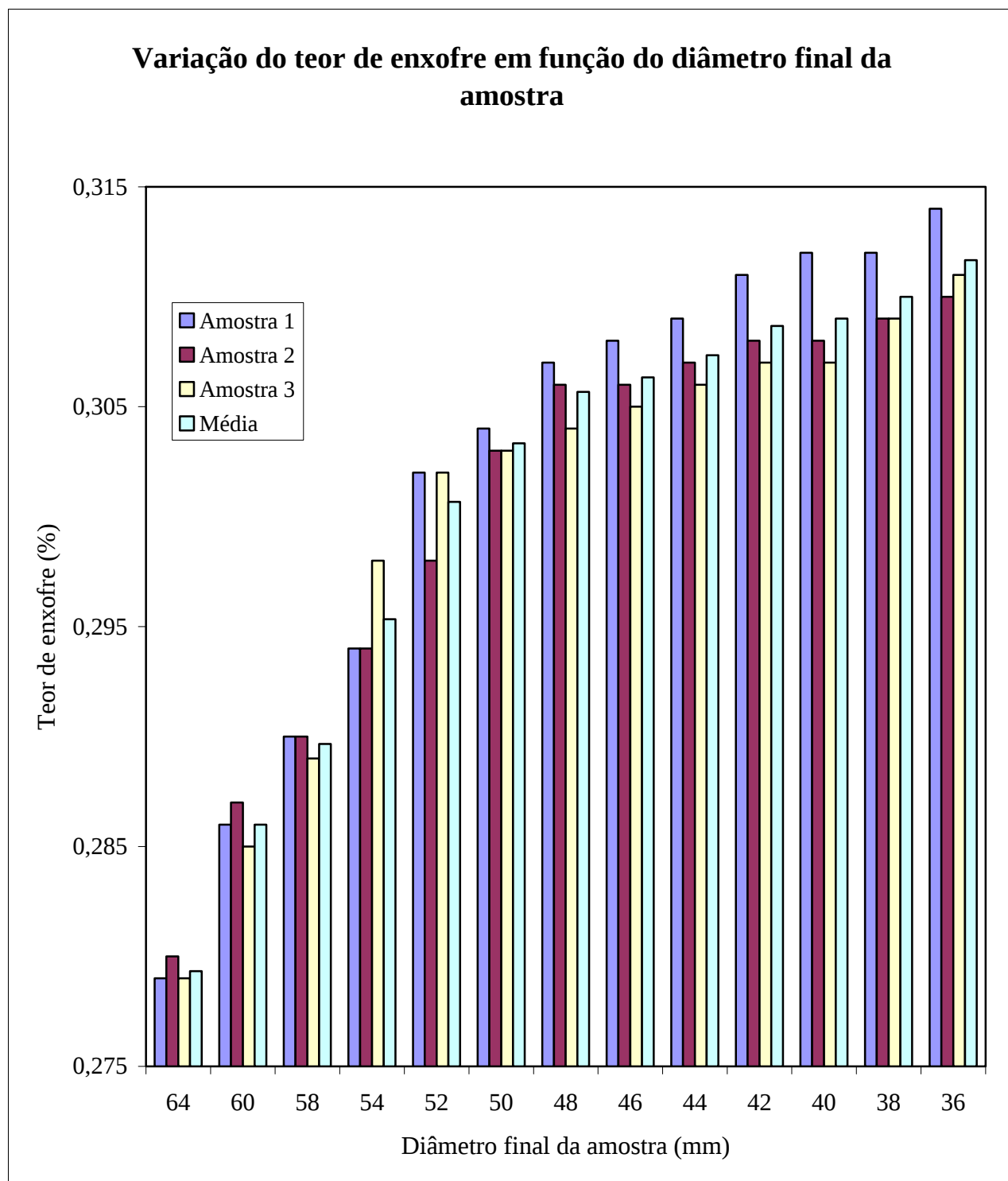


Figura 4.2 - Variação do teor de enxofre em função do diâmetro final da amostra.

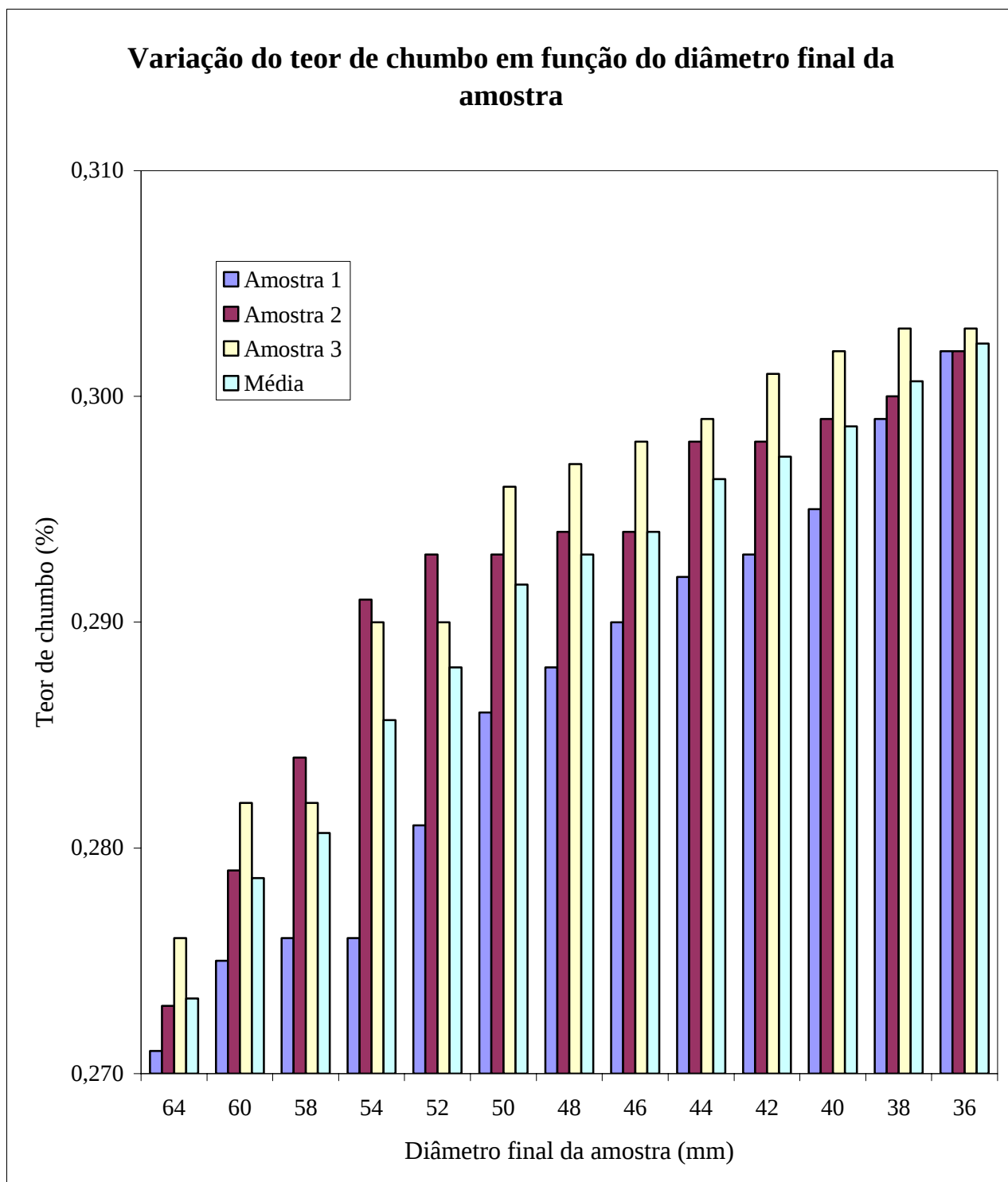


Figura 4.3 - Variação do teor de chumbo em função da profundidade da amostra.

Considerando-se os resultados das análises químicas realizadas nas amostras 1, 2 e 3, pode-se verificar que os teores de carbono, fósforo, enxofre, silício e chumbo apresentaram uma considerável variação a partir da superfície em direção ao núcleo.

Por outro lado, os teores de manganês, níquel, cromo, molibdênio e cobre permaneceram praticamente constantes nas análises realizadas.

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; o teor de fósforo é 7% maior e o teor de chumbo é 11% maior. Esta variação ocorre devida ao fenômeno de segregação.

Tabela 4.3 - Média e desvio-padrão dos resultados das análises de oxigênio e nitrogênio.

|               | Peso em ppm de cada elemento |                     |        |                |                     |        |
|---------------|------------------------------|---------------------|--------|----------------|---------------------|--------|
|               | O <sub>2</sub>               |                     |        | N <sub>2</sub> |                     |        |
|               | Superfície                   | 28 mm da superfície | Núcleo | Superfície     | 28 mm da superfície | Núcleo |
| Média         | 128                          | 136                 | 144    | 73             | 74                  | 77     |
| Desvio-padrão | 3                            | 0                   | 1      | 1              | 1                   | 1      |

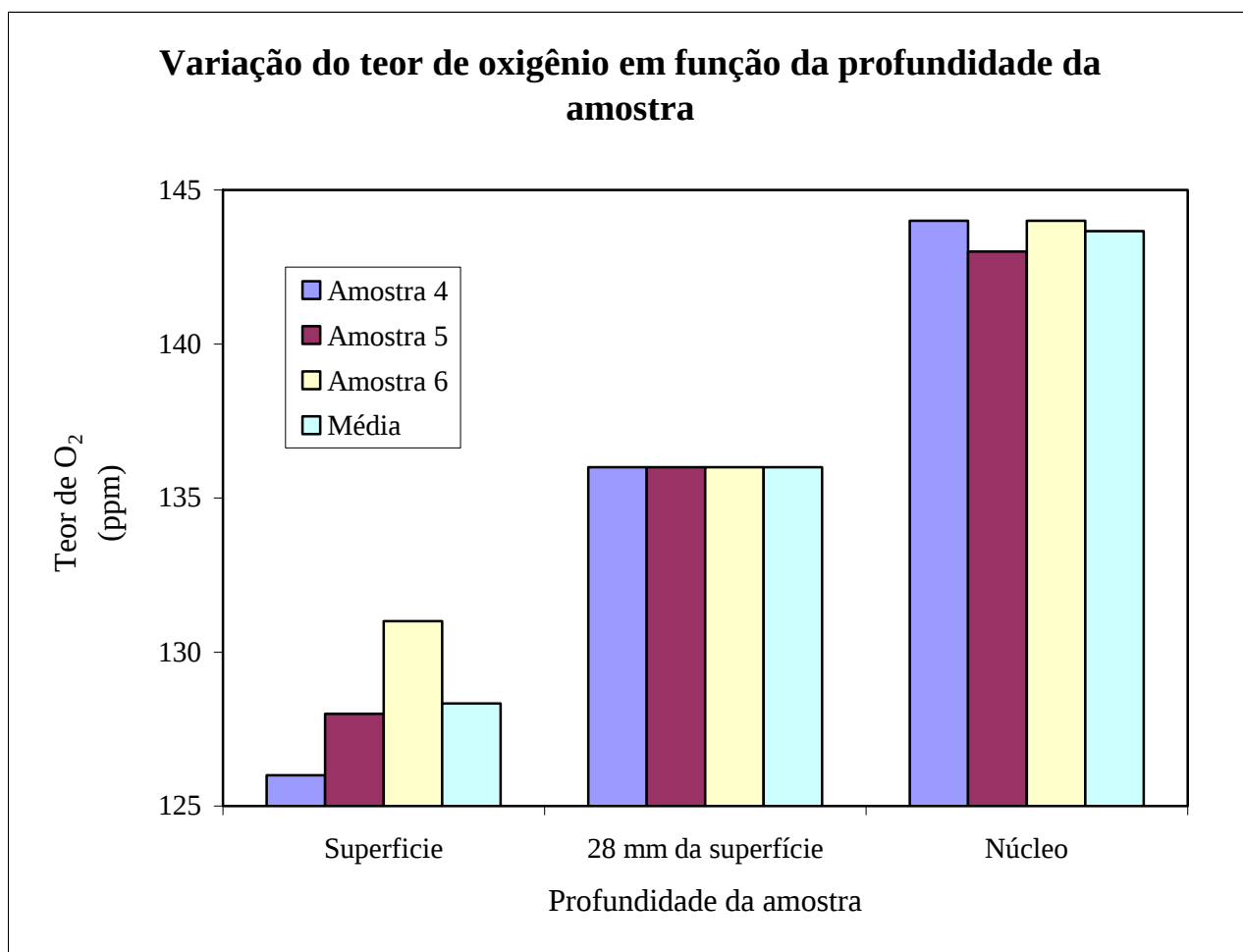


Figura 4.4 - Variação do teor de oxigênio em função da profundidade da amostra.

Considerando-se os resultados da análise do oxigênio e do nitrogênio realizada nas amostras 4, 5 e 6, pode-se verificar que o teor de oxigênio apresentou uma considerável variação a partir da superfície em direção ao núcleo. Por outro lado, o teor de nitrogênio praticamente não variou na análise realizada.

Analisando-se a média dos resultados da análise de oxigênio, pode-se constatar que: houve uma variação de 13%, quando se compara o núcleo com a superfície e houve uma variação de 6%, quando se compara o teor de oxigênio na superfície e o teor de oxigênio a uma profundidade de 28 mm da superfície. Esta variação ocorre devida também ao fenômeno de segregação.

## 4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS MECÂNICOS

Na Tabela 4.4, têm-se a média e o desvio-padrão dos resultados dos ensaios de tração. Na Tabela 4.5, têm-se, respectivamente, os resultados dos ensaios de dureza e a média destes resultados. Estes ensaios mecânicos foram realizados visando-se caracterizar mecanicamente o material utilizado nos ensaios de usinabilidade.

Tabela 4.4 - Média e desvio-padrão dos resultados dos ensaios de tração.

|               | Resistência à tração (MPa) | Limite de escoamento (MPa) | Redução de área (%) | Alongamento (%) |
|---------------|----------------------------|----------------------------|---------------------|-----------------|
| Média         | 420                        | 279                        | 57,8                | 28,4            |
| Desvio-padrão | 7                          | 22                         | 1,1                 | 2,0             |

Tabela 4.5 - Média e desvio-padrão dos resultados dos ensaios de dureza.

|               | Dureza na superfície (HB) | Dureza a 28 mm da superfície (HB) | Dureza no núcleo (HB) |
|---------------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Média         | 114                       | 119                               | 125                   |
| Desvio-padrão | 1                         | 1                                 | 1                     |

Quando se consideram os resultados dos ensaios de dureza realizados nas amostras 7, 8 e 9, pode-se verificar que a dureza é maior no núcleo do que em relação à superfície. Avaliando-se a média destes resultados, verifica-se que a dureza no núcleo é cerca de 10% maior do que a dureza na superfície. Este perfil de variação da dureza está relacionado basicamente com a variação do teor de carbono existente nas amostras.

### 4.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS METALOGRAFICOS

Os ensaios metalográficos foram realizados basicamente com o objetivo de avaliar o tamanho de grão austenítico e os principais tipos de microconstituintes e de inclusões presentes no aço estudado.

Na Figura 4.5, tem-se a foto dos principais microconstituintes presentes nos aços resulfurados baixo-carbono com adição de chumbo (análise da amostra 12): ferrita e perlita. Em aços de corte fácil baixo-carbono, a microestrutura mais favorável à usinagem é a constituída por ferrita e perlita fina (DOANE, 1988).

O tamanho de grão austenítico pode ser verificado na foto da Figura 4.6 (análise da amostra 10). O aço estudado apresentou tamanho de grão austenítico 5 e 4 (tamanho de grão grosso), conforme a norma ASTM E112. O tamanho de grão austenítico foi avaliado para caracterização do aço em termos de medição da textura granular.

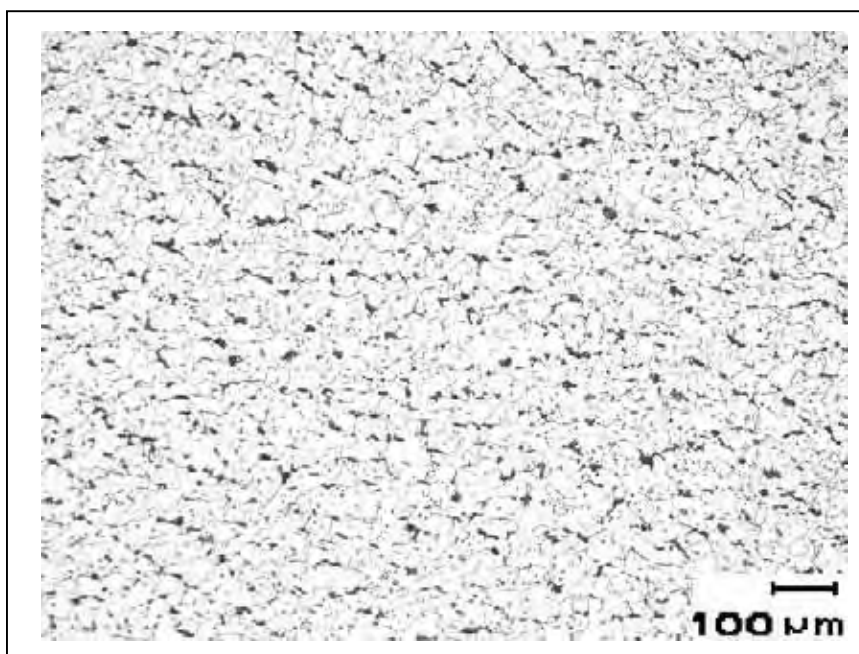


Figura 4.5 - Principais microconstituintes presentes nos aços resulfurados baixo-carbono com adição de chumbo: ferrita e perlita. Ataque: Nital 2%.

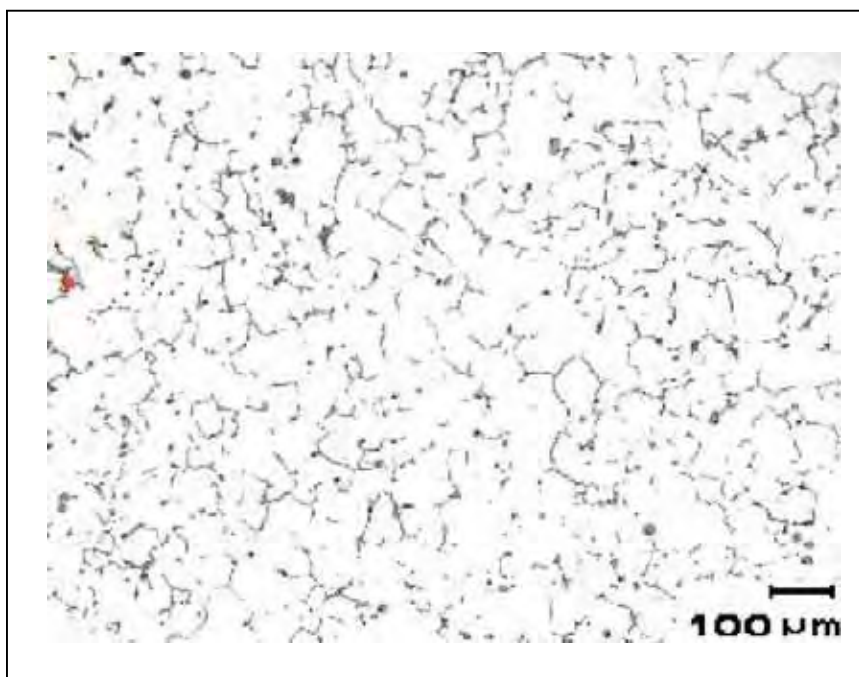


Figura 4.6 - Foto do tamanho de grão austenítico. Ataque: Picrato de sódio.

A análise de microinclusões não-metálicas foi realizada na superfície, a 28 mm da superfície e no núcleo de seis amostras diferentes (amostras 10, 11, 12, 13, 14 e 15). Esta análise foi realizada com o objetivo de caracterizar este tipo de microinclusões, pois com relação ao seu efeito sobre a usinabilidade, evidências experimentais (MARSTON; MURRAY, 1970) mostram que aços contendo sulfetos globulares apresentam melhor usinabilidade do que aços com sulfetos finos e alongados. Os sulfetos globulares possuem maior fração volumétrica efetiva, o que lhes possibilita maior efeito lubrificante.

Os resultados da análise de microinclusões não-metálicas, feita conforme a norma SEP 1572, encontram-se na Tabela 4.6. Nesta tabela, também se pode verificar o fator de forma ( $L/W$ ) das microinclusões não-metálicas, através da medição de seus comprimentos e larguras.

Tabela 4.6 - Resultado da análise de microinclusões não-metálicas, conforme a norma SEP 1572.

| Amostras | Classificação                                    |                     |        | L/W (fator de forma)* |                     |        |
|----------|--------------------------------------------------|---------------------|--------|-----------------------|---------------------|--------|
|          | Superfície                                       | 28 mm da superfície | Núcleo | Superfície            | 28 mm da superfície | Núcleo |
| 10       | 2,1                                              | 2,2                 | 2,2    | 3,00                  | 2,20                | 1,92   |
| 11       | 2,1                                              | 2,2                 | 2,2    | 2,77                  | 1,95                | 1,67   |
| 12       | 2,1                                              | 2,2                 | 2,2    | 2,19                  | 2,03                | 1,90   |
| 13       | 2,1                                              | 2,2                 | 2,2    | 2,75                  | 1,90                | 1,66   |
| 14       | 2,0                                              | 2,2                 | 2,2    | 2,95                  | 2,15                | 1,93   |
| 15       | 2,0                                              | 2,2                 | 2,2    | 2,18                  | 2,00                | 1,91   |
| *        | L = Comprimento das microinclusões não-metálicas |                     |        |                       |                     |        |
|          | W = Largura das microinclusões não-metálicas     |                     |        |                       |                     |        |

Nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9, têm-se as fotos das microinclusões não-metálicas encontradas na superfície, a 28 mm da superfície e no núcleo da amostra 11. Devido ao seu aspecto e coloração (cinzenta) (COLPAERT, 2000), estas microinclusões não-metálicas são do tipo sulfeto de manganês. A partir das fotos e dos resultados da Tabela 4.6, 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 10, 11, 12, 13, 14 e 15, verifica-se que no núcleo e a 28 mm da superfície há uma maior quantidade de microinclusões grandes de chumbo e mais homogeneamente distribuídas. Esta constatação pode ser verificada por meio das Figuras 4.7, 4.8 e 4.9. Quando observadas em microscópio, as microinclusões de chumbo se apresentam com uma coloração escura (COLPAERT, 2000).

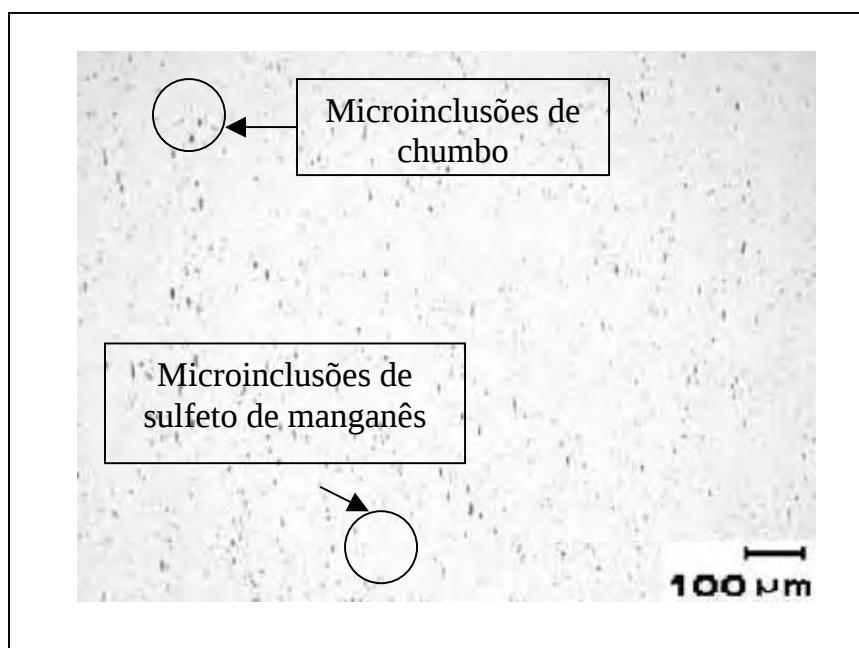


Figura 4.7 - Foto das microinclusões encontradas na superfície da amostra 11. Sem ataque.

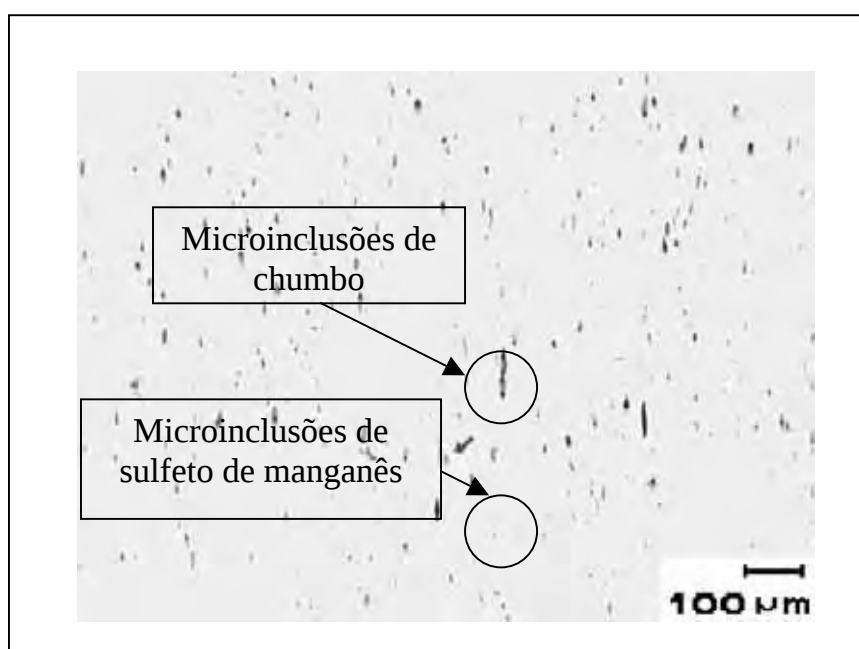


Figura 4.8 - Foto das microinclusões encontradas a 28 mm da superfície da amostra 11. Sem ataque.

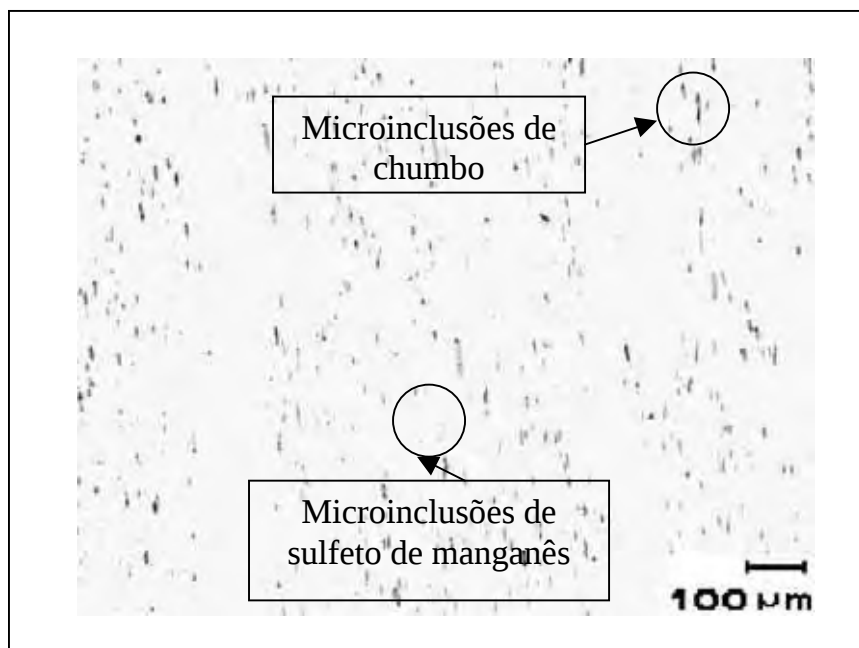


Figura 4.9 - Foto das microinclusões encontradas no núcleo da amostra 11. Sem ataque.

Com o objetivo de se confirmar a composição química das microinclusões encontradas no aço, realizou-se microscopia eletrônica de varredura na região do núcleo da amostra 11. A análise química foi feita em duas microinclusões da amostra 11 (microinclusões 1 e 2), cuja identificação pode ser vista na Figura 4.10.

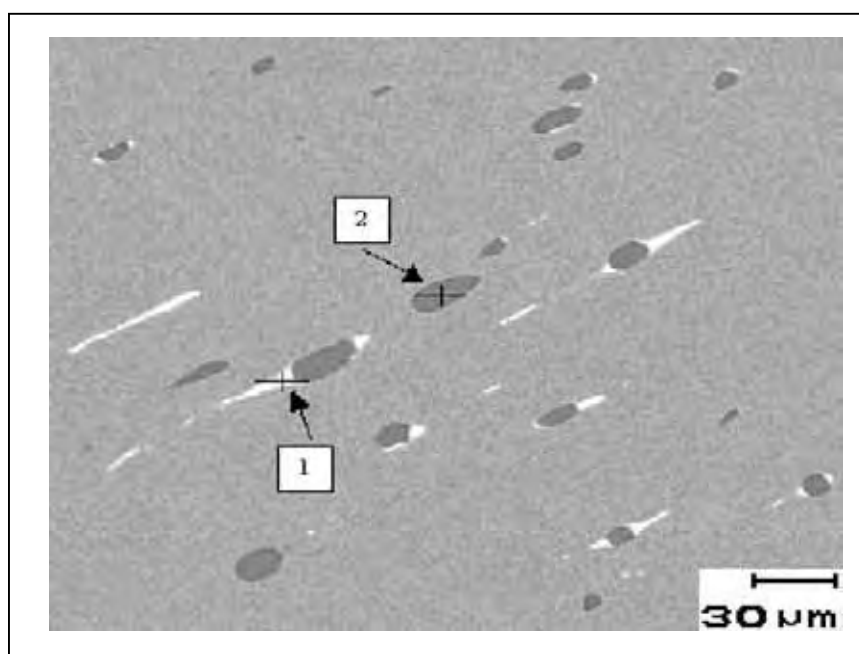


Figura 4.10 - Foto das microinclusões 1 e 2 no núcleo da amostra 11. Sem ataque

Nas Figuras 4.11 e 4.12, têm-se, respectivamente, os espectros de Raios-X das microinclusões 1 e 2.

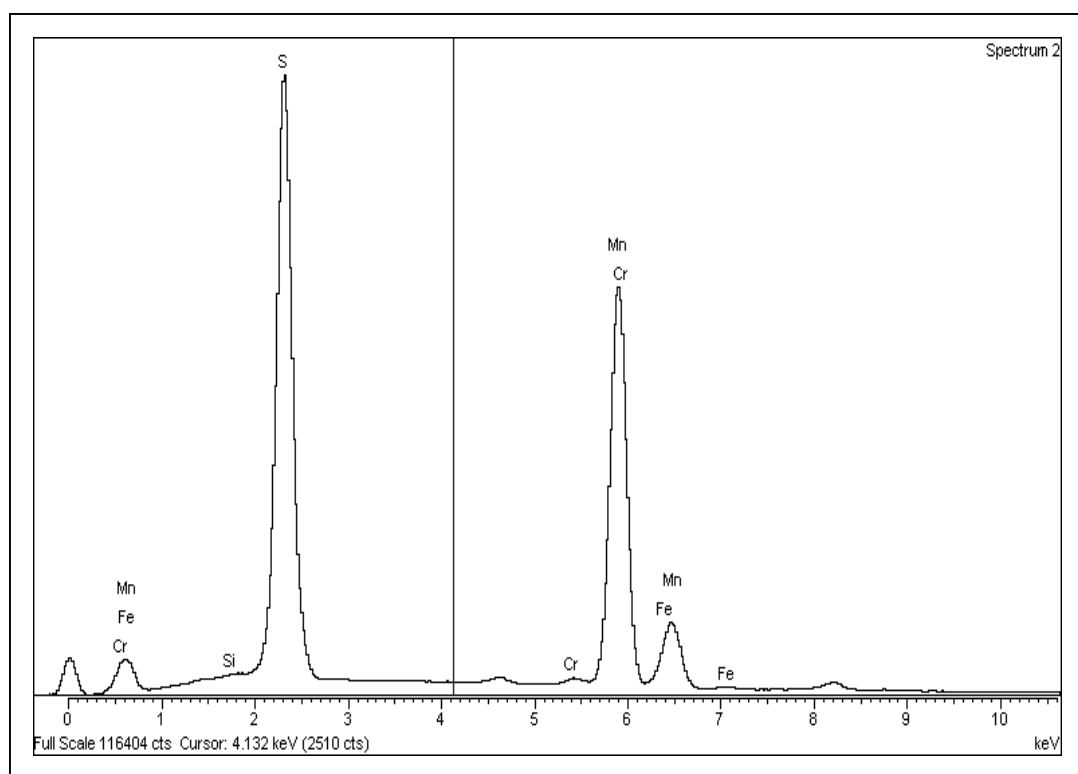


Figura 4.11 - Espectro de Raios-X da microinclusão 1.

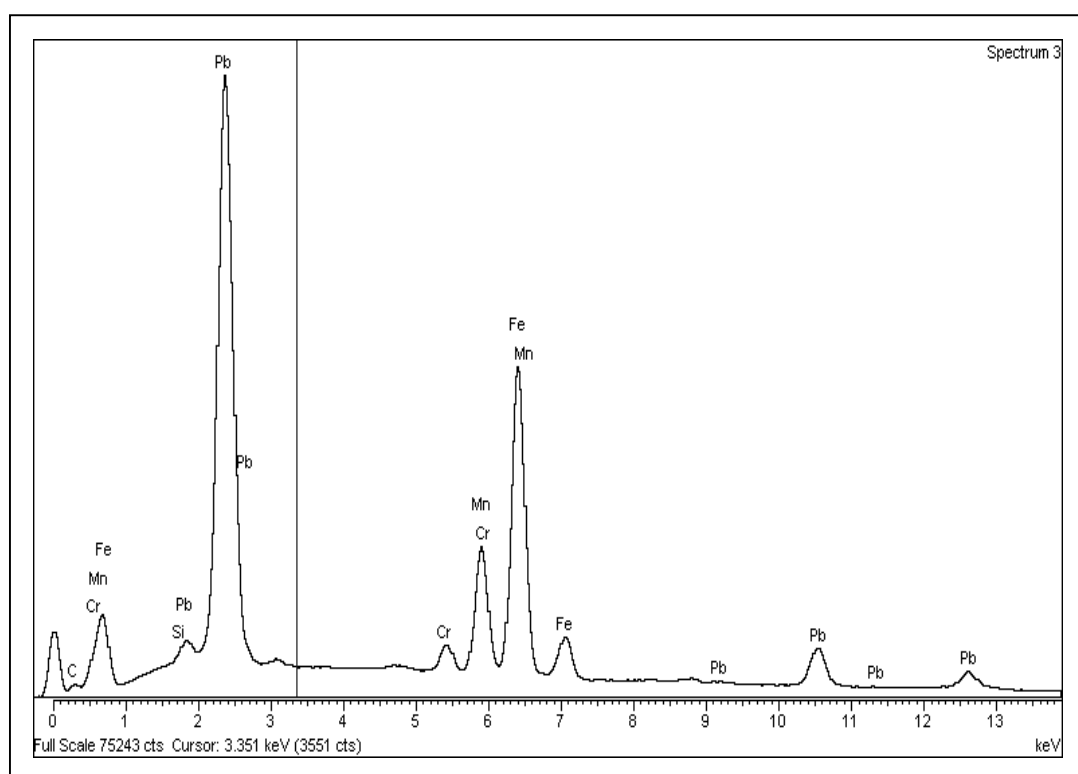


Figura 4.12 - Espectro de Raios-X da microinclusão 2.

Por meio da análise dos espectros de Raios-X, pode-se verificar que a microinclusão 1 é uma microinclusão não-metálica de sulfeto de manganês e a microinclusão 2 é uma microinclusão metálica de chumbo. Segundo a teoria, a combinação de chumbo e sulfeto de manganês tem-se mostrado como sendo a que proporciona a maior usinabilidade nos aços (WARKE; BREYER, 1971; PIMENTEL; PRADO; MIYADA, 2004).

#### 4.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE USINABILIDADE

Nas Tabelas de 4.7 a 4.19, têm-se os resultados da medição do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) de cada ferramenta de corte bem como a distância percorrida por ela em cada ensaio de usinabilidade. Nestas tabelas, ainda pode ser encontrado o diâmetro final dos corpos-de-prova utilizados em cada ensaio.

Na Figura 4.13, tem-se o gráfico do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte em função do percurso de corte ( $l_c$ ) realizado em cada ensaio de usinabilidade.

Tabela 4.7 - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte no 1º ensaio de usinabilidade.

| Diâmetro final dos corpos-de-prova = 64 mm |                 |           |                 |
|--------------------------------------------|-----------------|-----------|-----------------|
| $l_c$ (m)                                  | $V_{Bmax}$ (mm) | $l_c$ (m) | $V_{Bmax}$ (mm) |
| 1340                                       | 0,193           | 6432      | 0,390           |
| 2680                                       | 0,252           | 6968      | 0,432           |
| 4020                                       | 0,274           | 7504      | 0,481           |
| 4556                                       | 0,312           | 8040      | 0,492           |
| 5360                                       | 0,331           | 8844      | 0,497           |
| 5896                                       | 0,353           | 9648      | 0,558           |

Tabela 4.8 - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte no 2º ensaio de usinabilidade.

| Diâmetro final dos corpos-de-prova = 60 mm |                 |        |                 |
|--------------------------------------------|-----------------|--------|-----------------|
| lc (m)                                     | $V_{Bmax}$ (mm) | lc (m) | $V_{Bmax}$ (mm) |
| 753                                        | 0,203           | 5271   | 0,315           |
| 1506                                       | 0,213           | 6024   | 0,340           |
| 2259                                       | 0,239           | 6777   | 0,360           |
| 3012                                       | 0,249           | 7530   | 0,401           |
| 3765                                       | 0,274           | 8283   | 0,431           |
| 4518                                       | 0,289           | 9036   | 0,442           |

Tabela 4.9 - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte no 3º ensaio de usinabilidade.

| Diâmetro final dos corpos-de-prova = 58 mm |                 |        |                 |
|--------------------------------------------|-----------------|--------|-----------------|
| lc (m)                                     | $V_{Bmax}$ (mm) | lc (m) | $V_{Bmax}$ (mm) |
| 729                                        | 0,178           | 5103   | 0,274           |
| 1458                                       | 0,198           | 5832   | 0,305           |
| 2187                                       | 0,213           | 6561   | 0,325           |
| 2916                                       | 0,228           | 7290   | 0,34            |
| 3645                                       | 0,249           | 8019   | 0,360           |
| 4374                                       | 0,259           | 8748   | 0,381           |

Tabela 4.10 - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte no 4º ensaio de usinabilidade.

| Diâmetro final dos corpos-de-prova = 54 mm |                 |        |                 |        |                 |
|--------------------------------------------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|
| lc (m)                                     | $V_{Bmax}$ (mm) | lc (m) | $V_{Bmax}$ (mm) | lc (m) | $V_{Bmax}$ (mm) |
| 678                                        | 0,092           | 4068   | 0,142           | 7458   | 0,192           |
| 1356                                       | 0,102           | 4746   | 0,168           | 8136   | 0,194           |
| 2034                                       | 0,113           | 5424   | 0,178           | 8814   | 0,196           |
| 2712                                       | 0,122           | 6102   | 0,182           | 9492   | 0,198           |
| 3390                                       | 0,132           | 6780   | 0,188           | 10170  | 0,218           |

Tabela 4.11 - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte no 5º ensaio de usinabilidade.

| Diâmetro final dos corpos-de-prova = 52 mm |                 |        |                 |        |                 |
|--------------------------------------------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|
| lc (m)                                     | $V_{Bmax}$ (mm) | lc (m) | $V_{Bmax}$ (mm) | lc (m) | $V_{Bmax}$ (mm) |
| 654                                        | 0,081           | 3924   | 0,121           | 7194   | 0,162           |
| 1308                                       | 0,090           | 4578   | 0,130           | 7848   | 0,173           |
| 1962                                       | 0,096           | 5232   | 0,137           | 8502   | 0,178           |
| 2616                                       | 0,107           | 5886   | 0,147           | 9156   | 0,183           |
| 3270                                       | 0,116           | 6540   | 0,152           | 9810   | 0,200           |

Tabela 4.12 - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte no 6º ensaio de usinabilidade.

| Diâmetro final dos corpos-de-prova = 50 mm |                 |        |                 |        |                 |
|--------------------------------------------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|
| lc (m)                                     | $V_{Bmax}$ (mm) | lc (m) | $V_{Bmax}$ (mm) | lc (m) | $V_{Bmax}$ (mm) |
| 627                                        | 0,054           | 3762   | 0,102           | 6897   | 0,142           |
| 1254                                       | 0,065           | 4389   | 0,112           | 7524   | 0,154           |
| 1881                                       | 0,081           | 5016   | 0,118           | 8151   | 0,168           |
| 2508                                       | 0,086           | 5643   | 0,123           | 8778   | 0,178           |
| 3135                                       | 0,096           | 6270   | 0,132           | 9405   | 0,190           |

Tabela 4.13 - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte no 7º ensaio de usinabilidade.

| Diâmetro final dos corpos-de-prova = 48 mm |                 |        |                 |        |                 |
|--------------------------------------------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|
| lc (m)                                     | $V_{Bmax}$ (mm) | lc (m) | $V_{Bmax}$ (mm) | lc (m) | $V_{Bmax}$ (mm) |
| 603                                        | 0,050           | 3618   | 0,096           | 6633   | 0,132           |
| 1206                                       | 0,060           | 4221   | 0,107           | 7236   | 0,142           |
| 1809                                       | 0,070           | 4824   | 0,110           | 7839   | 0,148           |
| 2412                                       | 0,075           | 5427   | 0,117           | 8442   | 0,152           |
| 3015                                       | 0,081           | 6030   | 0,120           | 9045   | 0,168           |

Tabela 4.14 - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte no 8º ensaio de usinabilidade.

| Diâmetro final dos corpos-de-prova = 46 mm |                 |        |                 |        |                 |
|--------------------------------------------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|
| lc (m)                                     | $V_{Bmax}$ (mm) | lc (m) | $V_{Bmax}$ (mm) | lc (m) | $V_{Bmax}$ (mm) |
| 579                                        | 0,032           | 3474   | 0,081           | 6369   | 0,111           |
| 1158                                       | 0,042           | 4053   | 0,092           | 6948   | 0,127           |
| 1737                                       | 0,060           | 4632   | 0,095           | 7527   | 0,132           |
| 2316                                       | 0,061           | 5211   | 0,102           | 8106   | 0,140           |
| 2895                                       | 0,072           | 5790   | 0,106           | 8685   | 0,149           |

Tabela 4.15 - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte no 9º ensaio de usinabilidade.

| Diâmetro final dos corpos-de-prova = 44 mm |                 |        |                 |        |                 |
|--------------------------------------------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|
| lc (m)                                     | $V_{Bmax}$ (mm) | lc (m) | $V_{Bmax}$ (mm) | lc (m) | $V_{Bmax}$ (mm) |
| 552                                        | 0,030           | 3312   | 0,070           | 6072   | 0,102           |
| 1104                                       | 0,036           | 3864   | 0,076           | 6624   | 0,112           |
| 1656                                       | 0,051           | 4416   | 0,081           | 7176   | 0,122           |
| 2208                                       | 0,055           | 4968   | 0,087           | 7728   | 0,128           |
| 2760                                       | 0,066           | 5520   | 0,096           | 8280   | 0,132           |

Tabela 4.16 - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte no 10º ensaio de usinabilidade.

| Diâmetro final dos corpos-de-prova = 42 mm |                 |        |                 |        |                 |
|--------------------------------------------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|
| lc (m)                                     | $V_{Bmax}$ (mm) | lc (m) | $V_{Bmax}$ (mm) | lc (m) | $V_{Bmax}$ (mm) |
| 528                                        | 0,030           | 3168   | 0,068           | 5808   | 0,096           |
| 1056                                       | 0,035           | 3696   | 0,071           | 6336   | 0,107           |
| 1584                                       | 0,046           | 4224   | 0,080           | 6864   | 0,117           |
| 2112                                       | 0,050           | 4752   | 0,086           | 7392   | 0,122           |
| 2640                                       | 0,065           | 5280   | 0,090           | 7920   | 0,126           |

Tabela 4.17 - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte no 11º ensaio de usinabilidade.

| Diâmetro final dos corpos-de-prova = 40 mm |                 |        |                 |        |                 |
|--------------------------------------------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|
| lc (m)                                     | $V_{Bmax}$ (mm) | lc (m) | $V_{Bmax}$ (mm) | lc (m) | $V_{Bmax}$ (mm) |
| 504                                        | 0,030           | 3024   | 0,060           | 5544   | 0,086           |
| 1008                                       | 0,035           | 3528   | 0,066           | 6048   | 0,096           |
| 1512                                       | 0,041           | 4032   | 0,071           | 6552   | 0,102           |
| 2016                                       | 0,045           | 4536   | 0,076           | 7056   | 0,110           |
| 2520                                       | 0,055           | 5040   | 0,081           | 7560   | 0,117           |

Tabela 4.18 - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte no 12º ensaio de usinabilidade.

| Diâmetro final dos corpos-de-prova = 38 mm |                 |        |                 |        |                 |
|--------------------------------------------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|
| lc (m)                                     | $V_{Bmax}$ (mm) | lc (m) | $V_{Bmax}$ (mm) | lc (m) | $V_{Bmax}$ (mm) |
| 477                                        | 0,025           | 2862   | 0,051           | 5247   | 0,076           |
| 954                                        | 0,030           | 3339   | 0,056           | 5724   | 0,081           |
| 1431                                       | 0,036           | 3816   | 0,061           | 6201   | 0,091           |
| 1908                                       | 0,040           | 4293   | 0,066           | 6678   | 0,100           |
| 2385                                       | 0,044           | 4770   | 0,071           | 7155   | 0,107           |

Tabela 4.19 - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte no 13º ensaio de usinabilidade.

| Diâmetro final dos corpos-de-prova = 36 mm |                 |        |                 |        |                 |
|--------------------------------------------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|
| lc (m)                                     | $V_{Bmax}$ (mm) | lc (m) | $V_{Bmax}$ (mm) | lc (m) | $V_{Bmax}$ (mm) |
| 453                                        | 0,025           | 2718   | 0,046           | 4983   | 0,068           |
| 906                                        | 0,030           | 3171   | 0,051           | 5436   | 0,071           |
| 1359                                       | 0,035           | 3624   | 0,056           | 5889   | 0,076           |
| 1812                                       | 0,038           | 4077   | 0,060           | 6342   | 0,081           |
| 2265                                       | 0,041           | 4530   | 0,065           | 6795   | 0,096           |

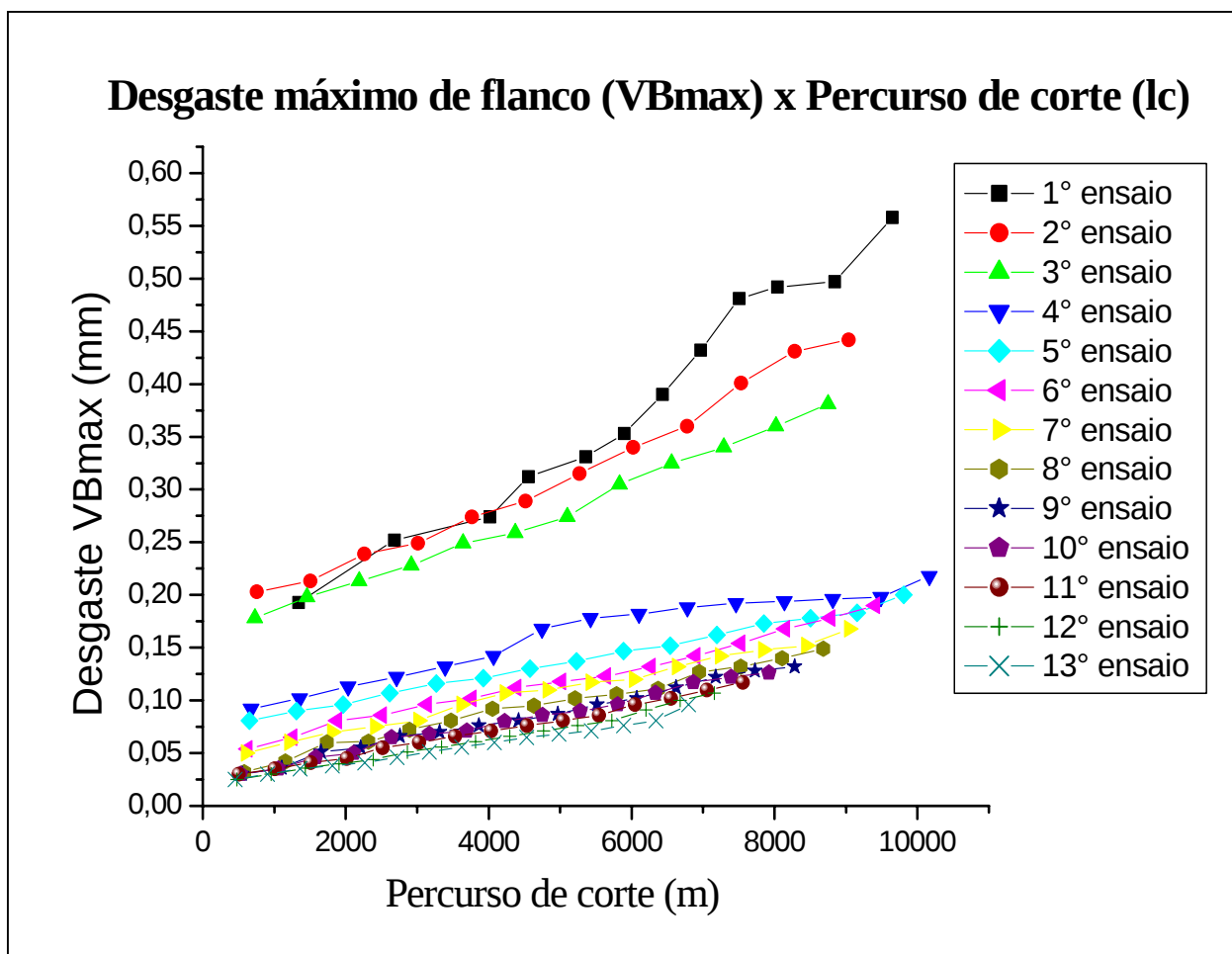


Figura 4.13 - Resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte em função do percurso de corte.

Por meio dos resultados da medição do desgaste máximo de flanco de cada ferramenta de corte, 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 1º ensaio e menor no 13º ensaio. Neste trabalho, a usinabilidade do material será 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. Assim, levando-se em consideração este critério, pode-se afirmar que a usinabilidade do material foi maior no 13º ensaio do que em relação ao 1º ensaio. Esta diferença de comportamento ocorre basicamente devido à variação de composição

química (principalmente, carbono, enxofre, oxigênio e chumbo) e variação no formato das microinclusões de sulfeto de manganês ao longo do diâmetro dos corpos-de-prova.

Na Tabela 4.20, têm-se os resultados do desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte após um percurso de corte de 6000 m em cada ensaio de usinabilidade. Na Figura 4.14, tem-se o gráfico do desgaste máximo de flanco da ferramenta de corte (após um percurso de corte de 6000 m) em função do diâmetro final dos corpos-de-prova de cada ensaio de usinabilidade. A Tabela 4.20 e a Figura 4.14 foram elaboradas com o objetivo de avaliar o perfil de variação da usinabilidade em função do diâmetro dos corpos-de-prova.

Tabela 4.20 - Desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte após um percurso de corte de 6000 m.

| Ensaio de usinabilidade | Diâmetro inicial dos CDP's (mm) | Diâmetro final dos CDP's (mm) | Desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte após 6000 m (mm) |
|-------------------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 1°                      | 66                              | 64                            | 0,360                                                                            |
| 2°                      | 62                              | 60                            | 0,339                                                                            |
| 3°                      | 60                              | 58                            | 0,310                                                                            |
| 4°                      | 56                              | 54                            | 0,181                                                                            |
| 5°                      | 54                              | 52                            | 0,148                                                                            |
| 6°                      | 52                              | 50                            | 0,128                                                                            |
| 7°                      | 50                              | 48                            | 0,120                                                                            |
| 8°                      | 48                              | 46                            | 0,108                                                                            |
| 9°                      | 46                              | 44                            | 0,101                                                                            |
| 10°                     | 44                              | 42                            | 0,100                                                                            |
| 11°                     | 42                              | 40                            | 0,095                                                                            |
| 12°                     | 40                              | 38                            | 0,087                                                                            |
| 13°                     | 38                              | 36                            | 0,077                                                                            |

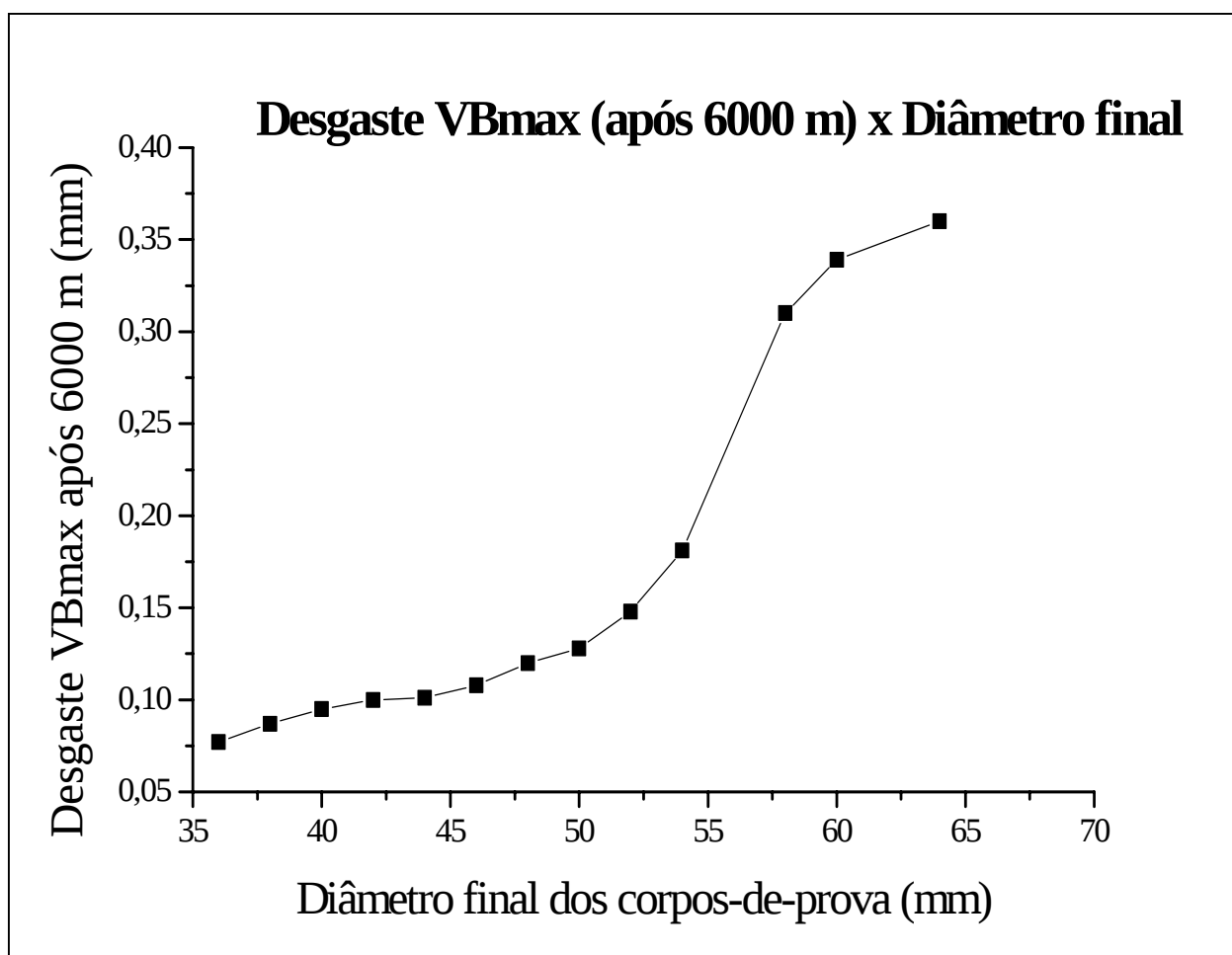


Figura 4.14 - Desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) da ferramenta de corte (após 6000 m) em função do diâmetro final dos corpos-de-prova.

Avaliando-se o desgaste máximo de flanco ( $V_{Bmax}$ ) de cada ferramenta de corte após um percurso de corte de 6000 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. Considerando-se a Tabela 4.20, 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, oxigênio e chumbo) e variação no formato das microinclusões de sulfeto de manganês ao longo do diâmetro dos corpos-de-prova.

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 (GARVEY; TATA, 1965), 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 (BOULGER et al., 1957; SHAW; USUI; SMITH, 1961; GARVEY; TATA, 1965; AYLLWARD, 1973; BAS, 2000). Os teores de enxofre variam ao longo do diâmetro dos corpos-de-prova devido ao fenômeno metalúrgico da segregação.

Os teores de oxigênio no núcleo e na superfície dos corpos-de-prova com diâmetro final de 36 mm são maiores do que os teores de oxigênio na superfície dos corpos-de-prova com diâmetro final de 64 mm. A variação deste elemento químico foi de, respectivamente, 13% e 6%. O oxigênio influencia na morfologia das microinclusões de sulfeto de manganês, tornando-as mais globulares (MULLER; ZIMMERMAN, 1966).

A superfície dos corpos-de-prova do 13º ensaio de usinabilidade apresenta microinclusões de sulfeto de manganês mais globulares e mais homogeneamente 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 (MARSTON; MURRAY, 1970), 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 (GARVEY; TATA, 1965). 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 (WARKE; BREYER, 1971; PIMENTEL; PRADO; MIYADA, 2004). 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.

## CAPÍTULO 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 (aço de corte fácil com adição de chumbo), pode-se concluir que:

- O aumento dos teores dos elementos químicos carbono, enxofre e chumbo ao longo do diâmetro dos corpos-de-prova, ocasionado pelo fenômeno metalúrgico da segregação, influencia fortemente no desgaste de flanco da ferramenta de corte, mostrando-se benéfico à melhoria da usinabilidade;
- 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 homoganeamente distribuídas. Este fato comprova que as inclusões de sulfeto de manganês globulares melhoram a usinabilidade do aço.

## **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Avaliar o efeito de teores de carbono acima de 0,08% na usinabilidade do aço SAE 12L14;
- Desenvolver aço de corte fácil baixo-carbono sem adição de chumbo, através da otimização da composição química do aço SAE 1213;
- Desenvolver aço de corte fácil baixo-carbono sem adição de chumbo, através do emprego da engenharia de inclusões;
- Utilizar simulação numérica para prever a usinabilidade de um aço de corte fácil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6215: Produtos siderúrgicos-Terminologia**. Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, p. 1-27, 1986.

AMBLARD, M; LEGRAND, H. L'évolution du Four-Poche. **La Revue de Métallurgie**, p.317, 1988.

AMELLING, D. et al. **Stahl und Eisen**, v.106, n.1, p. 35, 1986.

APPLE, C.A. The relationship between inclusions and the machinability of steel. In: MECHANICAL WORK AND STEEL PROCESSING CONFERENCE, 31., 1989, Chicago.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 8-04: Standard test methods for tension testing of metallic materials**. Annual Book of ASTM Standards, v. 03.01, p. 62-85, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 10-01: Standard test method for Brinell hardness of metallic materials**. Annual Book of ASTM Standards, v. 03.01, p. 119-127, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 112-96: Standard test methods for determining average grain size**. Annual Book of ASTM Standards, v. 03.01, p. 267-292, 2005.

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.

BAILEY, W. H. **Iron & Steelmaking**, v.2, p. 72, 1977.

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.

BAS, J. Aços especiais de usinabilidade melhorada. In: USINAGEM 2000, FEIRA E CONGRESSO, 2000, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Aranda Eventos, 2000.

BELLOT, J. Propiedades mecánicas de los aceros de construcción de maquinabilidad mejorada. **Rev. Metal. CENIM**, Madrid, v. 14, n. 2, p. 63-81, 1978.

BERTRAND, C.; COUSO, J. Desarrollo de aceros de construcción mecánica com adición de bismuto para mejorar la maquinabilidad sin deteriorar otras características de empleo. **ECSC Informe EUR 16830 ES**, 1998.

BERTRAND, C.; DEL SOLAR, M. Can we survive without leaded steels? In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BEHAVIOUR OF MATERIALS IN MACHINING, 4, 1998, New York. **Proceedings...** New York, 1998. p. 123-132.

BHATTACHARYA, D.; QUINTO, D. T. Mechanism of hot-shortness in leaded and tellurized free-machining steels. **Met. Transactions**, v. 11, n. 6, p. 919-934, jun. 1980.

BOARETTO NETO, R. **Aplicação de aço de corte fácil com adição de chumbo**. Disponível em:

<<http://www.acosvic.com.br/contato>>. Acesso em: 30 nov. 2005.

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.

BOULGER, F. W.; MOORHEAD, H. A.; GARVEY, T. M. Superior machinability of MX explained. **Iron Age**, New York, v. 167, n. 5, p. 90, may. 1951.

CARNEY, D. J.; RUDOLPHY, E. C. Examination of high sulfur free-machining ingot, bloom, and billet sections. **Transactions AIME**, v. 197, p. 99-1008, 1953.

CATANIOU, A. M. et al. Free cutting steels: na SEM and TEM study. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BEHAVIOUR OF MATERIALS IN MACHINING, 5, 2002, New York. **Proceedings...** New York, 2002. p. 241-244.

CHADWICK, G. A. **Metallography of phase transformations**. New York: Crane Russak & Co, 1972. 320p.

CHALFANT, G. M. Revealing lead inclusions in leaded steel. **Metal Progress**, v.78, n.3, p. 77-79, sept. 1960.

CHEVRAND, J. L. S. **Aciaria elétrica**. São Paulo: ABM, 2003. 308p.

COLPAERT, H. Micrografia. In: \_\_\_\_\_. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo: Edgard Blücher, 2000. p. 121-198.

DAHL, W.; HENGSTENBERG, H.; DUREN, C. **Stahl und Eisen**, vol. 86, p. 782-817, 1966.

DEIHMANN, W. **Radex Rundschau**, v.3, n.2, p. 455, 1971.

DESFORGES, C. D.; DUCKWORTH, W. E; RYAN, T. F. Manganese in ferrous metallurgy. **Manganese Centre**, New York, v. 5, n. 1, p. 50-55, 1976.

DOANE, D.V. Softening high hardenability steels for machining and cold forming. **J. Heat Treating**, v. 6, n. 2, p. 97-109, 1988.

EVANGELISTA, N. et al. Usinabilidade dos aços de corte livre com inclusões metálicas: Uma tecnologia CORFAC<sup>®</sup>. In: Congresso da ABM, 54, 1999, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABM, 1999. p. 500-510.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 9.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1995. v.1, 751p.

FLEMINGS, M. **Solidification processing**. New York: Mc Graw-Hill, 1974. 315p.

FRUEHAN, R. J. Ladle metallurgy principles and practices. **The Iron and Steel Society Inc**, p. 5, 1985.

GARCIA, C. I.; HUA, M.; DEARDO, A. J. Application of grain boundary engineering in the development of green steel. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BEHAVIOUR OF MATERIALS IN MACHINING, 5, 2002, New York. **Proceedings...** New York, 2002. p. 215-226.

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.

GAYE, H.; GROSJEAN, J. C.; RIBOUD, P. V. Modele d'estimations l'équilibre entre metal liquide et laitiers basiques liquides. In:\_\_\_\_. **Donnés thermochimiques pour la Siderurgie**. IRSID, v. 2, 1982. p. 18.1-18.24.

HASSALL, G. J.; JACKAMAN, D. P.; HAWKINS, R. Phosphorus and sulphur removal from liquid steel in ladle steelmaking processes. **Ironmaking and Steelmaking**, v.18, n.5, p. 359, 1991.

JHA, G.; SHARMA, S. Development of free machining steels. **Tools & Alloy Steels**, New York, p. 5-12, 1990.

KIESSLING, R. Inclusions belong to the systems  $\text{MgO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  and related oxide systems. Sulphide inclusions. In: \_\_\_\_\_. **Non metallic inclusions in steel**. London: The metals society, 1978. p. 1-162.

MACLAREN, A. W.; OSWALD, L. W. Better machinability with MX steel. **Iron Age**, New York, v. 165, n. 1, p. 86-88, feb. 1950.

MALMBERG, T.; RUNNSJÖ, G.; ARONSSON, B. The addition of selenium and tellurium to carbon steels: Their recovery and effect on inclusions and machinability. **Scandinavian Journal of Metallurgy**, vol. 3, p. 169-172, 1974.

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.

MISKULIN, M. **Produção de aço de corte fácil com adição de chumbo na Aços Villares S.A.** Disponível em:

<<http://www.villares.com.br/faleconosco>>. Acesso em: 11 jul. 2005.

MOORE, J. J.; SHAH, N. A. **Intl. Met. Rev.**, v.28, n.6, p. 338, 1983.

MULLER, C. A.; ZIMMERMAN, E. Effect of deoxidation processes on free-machining steels. **Arch. Eisenh.**, v. 37, p. 145-153, 1966.

MURPHY, D. W.; AYLWARD, P. T. **Machinability of steel**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1971. 39p.

PEHLKE, R. D. **Unit process in extractive metallurgy**. New York: American Elsevier, 1973. 413p.

PIERSON, G. Free machining steels: Evolution of process and product performance. **Wire Journal International**, v. 23, n.4, p. 40-45, 1990.

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.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **SAE J 403 – 2001**: Chemical compositions of SAE carbon steels. SAE Handbook, v. 1, p. 13-17, 2004.

SEP 1572. Mikroskopische prüfung von automatenstählen auf sulfidische nichtmetallische einschüsse mit bildreihen. 1971.

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.

SHIIKI, K. et al. Development of shape-controlled-sulfide free machining steel for application in automobile parts. **SAE International**, 2003.

SIDJANIN, L.; KOVAC, P. Fracture mechanisms in chip formation processes. **Materials Science and Technology**, New York, v. 13, n. 5, p. 439-444, 1997.

SIMS, C. E.; FORGENG, W. D. Non metallic inclusions: Electric Furnace Steelmaking. **Transactions AIME**, v. 2, n. 1, p. 35-47, 1967.

SMITH, G. V. Strain hardening. **Metal Progress**, New York, v.1, n.1, p.73-78, dec. 1970.

SOMEKAWA, M.; KAISO, M; MATSUSHIMA, Y. Free cutting non-leaded steels. **Kobelco Technology Review, CIDADE**, n. 24, p. 9-13, 2001.

STEUBER, J. E. Current solutions to hydrogen problems in steels. **ASM – Metal Park**, p. 55, 1982.

SUBRAMANIAN, S. V.; KAY, D. A. R. Microstructural engineering for enhanced machinability. In: MECHANICAL WORK AND STEEL PROCESSING CONFERENCE, 38, 1997, New York. **Proceedings...** New York, 1997. p. 125-135.

SUBRAMANIAN, S. V.; RAMANUJACHAR, K. Strategies to replace lead in free-cutting steel. In: MECHANICAL WORK AND STEEL PROCESSING CONFERENCE, 37, 1996, Hamilton. **Proceedings...** Hamilton, 1996. p. 341-353.

SUBRAMANIAN, S. V.; RAMANUJACHAR, K. Micromechanisms of tool wear in machining free cutting steels. **Wear**, Hamilton, n. 197, p. 45-55, 1997.

SUBRAMANIAN et al. Inclusion engineering of steels for high speed machining. **CIM bulletin**, Hamilton, v. 91, n.1021, p. 107-115, jun. 1998.

SUBRAMANIAN et al. Design of steels for high speed machining. **Ironmaking and Steelmaking**, Hamilton, v.26, n.5, p. 333-338, 1999.

SUBRAMANIAN et al. Influence of microstructural softening events on chip morphology and tool wear. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BEHAVIOUR OF MATERIALS IN MACHINING, 5., 2002, Hamilton. **Proceedings...** Hamilton, 2002. p. 201-211.

SUBRAMANIAN et al. Application of thermodynamic model for inclusion control in steelmaking to improve the machinability of low carbon free cutting steels. **Steel Research Int.**, v.75, n.5, p. 314-321, 2004.

TILLER, W. et al. **Acta Met**, v.1, n.1, p. 428, 1953.

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.

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.

WINEGARD, W. C. **An introduction to the solidification of metals**. London: Mc Gannon, 1964. 211p.

YAGUCHI, H. Effect of soft additives (Pb/Bi) on machinability of low carbon resulphurized free machining steels. **Materials Science and Technology**, New York, v. 5, n. 3, p. 255-267, 1989.

YAGUCHI, H.; ONODERA, N. The effect of tellurium on the machinability of AISI 12L14+Te steel. **Transactions of ISIJ**, New York, v. 28, p. 1051-1059, 1998.