

CARACTERIZAÇÃO TOPOLÓGICA DA MICROESTRUTURA DOS AÇOS BIFÁSICOS ¹

Antonio Augusto Gorni ²

RESUMO

São definidos neste trabalho diversos parâmetros topológicos, calculados a partir de dados obtidos por metalografia quantitativa, relativos a microestruturas com duas fases, os quais permitem identificá-las e caracterizá-las. Eles são particularmente úteis no estudo da microestrutura peculiar dos aços bifásicos ("dual phase"). É mostrado um exemplo do cálculo desses parâmetros para um exemplo de microestrutura com duas fases, permitindo sua caracterização e previsão qualitativa de suas propriedades mecânicas.

- INTRODUÇÃO

Nas microestruturas onde estão presentes duas fases, as propriedades mecânicas do material serão influenciadas não só pelo tamanho de grão da fase predominante - ou fase matriz - e da segunda fase, como também pela maneira como esta última está disposta.

HORNBOGEN e outros [1] classificaram as microestruturas com duas fases em três tipos principais:

- . *Duplex*: as duas fases dominam igualmente a microestrutura e estão presentes em cristalitos de igual tamanho, distribuídos estatisticamente e vizinhos entre si;
- . *Dispersão*: é caracterizada pelas partículas de segunda fase totalmente espalhadas e isoladas entre si pela fase matriz;
- . *Rede*: a segunda fase se localiza exclusivamente nos contornos de grão da fase matriz.

Microestruturas com duas fases são comuns em aços, e sua análise quantitativa provou ser particularmente útil no estudo dos aços bifásicos ("dual phase") [2-6]. A microestrutura desses aços consiste de uma matriz de ferrita poligonal, com 10 a 20% de martensita dispersa na forma de ilhotas, fazendo com que o material apresente escoamento contínuo - ou seja, ausência de patamar de escoamento -, baixo limite de escoamento, alto coeficiente de encruamento n e alto limite de resistência, conferindo baixa razão elástica a esse material. Isto se traduz em boa conformabilidade - ou estampabilidade - numa chapa com alta resistência, duas características dificilmente presentes de forma simultânea.

¹ Artigo publicado na REM – Revista Escola de Minas, 48:1, Janeiro-Março 1995, 40-44.

² Engenheiro de Materiais, M.Eng., Divisão de Pesquisa e Tecnologia da Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Professor do Departamento de Metalurgia da Faculdade de Engenharia Industrial - FEI.

HORNBOGEN e outros [1] propuseram ainda um modelo topológico para a microestrutura bifásica, que agrega características dos três tipos fundamentais de microestruturas com duas fases, ou seja:

- . Da microestrutura duplex decorre que *as quantidades de grãos das duas fases por volume devem ser iguais*. Logo, as razões entre os volumes de grão das duas fases e as frações em volume devem ser iguais;
- . Da microestrutura de dispersão vem a condição de que *a segunda fase deve ser totalmente isolada pela matriz*, para se garantir a ductilidade e conformabilidade do material.
- . Da microestrutura em rede surge a imposição de que *a segunda fase se localize exclusivamente nos contornos de grão da fase matriz*.

Os quatro tipos de microestrutura podem ser vistos esquematicamente na figura 1. Já a tabela I mostra os parâmetros microestruturais que influenciam as propriedades mecânicas do produto, incluindo-se aí o tamanho de grão da fase ferrítica e das ilhotas de martensita.

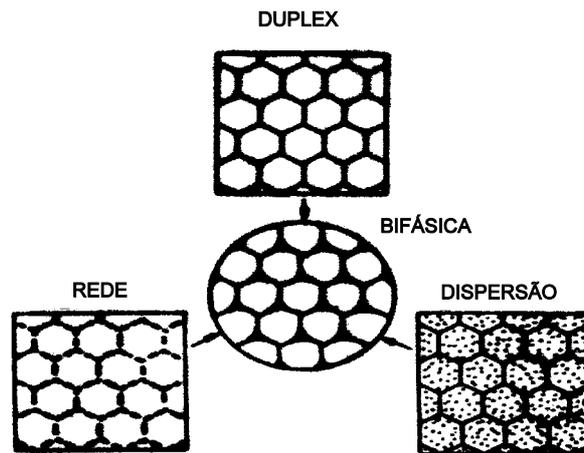


Figura 1: Representação esquemática da topologia das microestruturas com duas fases [2].

	L.E.	L.E.	L.E./L.R.	Al. Unif.	Al. Total
↑ Fração de Martensita	↑↑	↑↑	-	↓	↓
↑ Fração de Bainita	↑	↑	-	↓	↓
↑ Dureza da Martensita	↑	↑	↓	↓	↓
↑ Dureza da Ferrita	↑	↑	↓	↓	↓
↓ Tam. Grão Seg. Fase	-	↑↑	↓	↑	↑
↓ Tam. Grão Ferrita	↑	↑	(↑)	↑	↑

Tabela I: Esquema do efeito dos diversos parâmetros microestruturais sobre as propriedades mecânicas dos aços bifásicos [2].

Logo, o objetivo deste estudo é a definição de um procedimento prático para a determinação de diversos parâmetros topológicos, visando descrever quantitativamente a microestrutura com duas fases, permitindo desse modo sua classificação e a correlação posterior com as propriedades mecânicas de um material. Sua aplicação imediata será em aços bifásicos, mas a mesma técnica pode ser estendida para outras ligas metálicas e mesmo para outros tipos de materiais.

- DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS TOPOLÓGICOS DA MICROESTRUTURA COM DUAS FASES α E β

Os dados requeridos para o cálculo dos diversos parâmetros topológicos de uma microestrutura com duas fases α e β são:

- a) Dados que definem as condições em que foram feitas as medidas:
 - Aumento M, [número de vezes];
 - Comprimento da Linha Teste L_T [μm];
 - Fração Volumétrica da Segunda Fase β , f_β ;
- b) Dados da microestrutura: número de intersecções da Linha Teste com os contornos de grão, $P_L^{\alpha\beta}$ e $P_L^{\beta\beta}$, e com os contornos de fase $P_L^{\alpha\beta}$.

Uma vez que esses dados flutuam estatisticamente, o número de campos a serem medidos variará de acordo com uma série de fatores: grau de anisotropia do material, heterogeneidade e periodicidade da microestrutura e percentagem requerida de precisão, entre outros fatores. Além disso, outras fontes de erro tem de ser consideradas, como as oriundas da natureza estatística da observação e a distorção dos parâmetros observados [7]. Maior contraste obtido pelo aumento da intensidade do ataque metalográfico leva a um aumento da distorção da microestrutura observada devido à elevação da fração do constituinte resistente à corrosão, à revelação de outros constituintes e à geração de sinais espúrios na microestrutura que está sendo revelada.

A partir desses dados são calculados os seguintes parâmetros:

- a) *Tamanho de Grão Médio da Fase Matriz D_α e da Segunda Fase D_β .* Como já foi afirmado anteriormente, o tamanho de grão das duas fases presentes na microestrutura é um parâmetro importante na determinação de suas propriedades mecânicas. Supondo-se duas fases α e β , eles podem ser calculados pelas seguintes fórmulas [8]:

$$N_{L\alpha} = \frac{2 P_L^{\alpha\alpha} + P_L^{\alpha\beta}}{2} \qquad N_{L\beta} = \frac{2 P_L^{\alpha\beta} + P_L^{\beta\beta}}{2} \quad (1)$$

$$D_\alpha = \frac{(1 - f_\beta) L_T}{N_{L\alpha} M} \qquad D_\beta = \frac{f_\beta L_T}{N_{L\alpha} M} \quad (2)$$

onde $N_{L\alpha}$ e $N_{L\beta}$ são o número de objetos interceptados por unidade de linha teste, relativos à fase matriz e à segunda fase, respectivamente.

b) *Adjacência ou Contiguidade das Fases C_α e C_β* . O tamanho de grão das duas fases é o parâmetro mais importante na descrição da microestrutura, mas há outros que também podem vir a ser úteis. A determinação do grau de continuidade entre as duas fases revelou-se ser bastante útil no estudo da plasticidade dos aços bifásicos [9,10]. Uma vez que tal medida requer uma grande carga de trabalho, ela pode ser substituída pela adjacência entre as fases, ou seja, o grau de contato entre os grãos de uma mesma fase. Esses parâmetro é calculado pelas seguintes fórmulas:

$$C_\alpha = \frac{2 S_v^{\alpha\alpha}}{2 S_v^{\alpha\alpha} + S_{v\alpha\beta}} \quad C_\beta = \frac{2 S_{vv}^{\beta\beta}}{2 S_v^{\beta\beta} + S_v^{\alpha\beta}} \quad (3)$$

onde S_v é a superfície específica entre os contornos de grão ou fases:

$$S_v^{\alpha\alpha} = \frac{2 P_L^{\alpha\alpha}}{L_T} \quad S_v^{\alpha\beta} = \frac{2 P_L^{\alpha\beta}}{L_T} \quad S_v^{\beta\beta} = \frac{2 P_L^{\beta\beta}}{L_T} \quad (4)$$

Quando C tende a um, a fase está aglomerada, ou seja, ela é contínua. Do mesmo modo, quando C se aproxima de zero, ela está isolada. Outro parâmetro correlato é o *volume de contiguidade* V_c^α e V_c^β , que indica a fração de fase que se encontra na forma aglomerada, ainda que não necessariamente de forma contínua [10]. Ele é descrito pela fórmula:

$$V_c^\alpha = C_\alpha (1 - f_\beta) \quad V_c^\beta = C_\beta f_\beta \quad (5)$$

c) *Caminho Livre Médio \bar{L}_α e \bar{L}_β* . Considerando-se que os contornos de fase preponderantes para o movimento das discordâncias e desprezando-se o papel dos contornos de grão, pode-se calcular o caminho livre médio percorrido pelas discordâncias através da seguinte fórmula [10]:

$$\bar{L}_\alpha = \frac{D_\alpha}{(1 - C_\alpha)} \quad \bar{L}_\beta = \frac{D_\beta}{(1 - C_\beta)} \quad (6)$$

Tal parâmetro é importante, uma vez que a distância livre que as discordâncias podem percorrer tem papel fundamental na determinação das propriedades plásticas do material. A diminuição dessa distância tende a aumentar sua resistência mecânica [10].

d) *Razão da densidade de contornos de grão entre as duas fases - Δ* . Este é um dos parâmetros propostos por HORNBOGEN e outros [1] para caracterizar os diversos tipos de microestruturas com duas fases. Ele é calculado pela fórmula

$$\Delta = \frac{\rho^{\beta\beta}}{\rho^{\alpha\alpha}} \quad (7)$$

onde ρ é a densidade de contornos de grão para cada fase. A partir do valor de ρ pode-se definir o tipo de microestrutura com duas fases: 1, duplex; 0, dispersão ou bifásica; infinito, em rede.

- e) *Grau de Dispersão* δ , ou razão entre a densidade dos contornos de grão e os contornos de fase. É outro parâmetro proposto por HORNBOGEN e outros [1], e definido pela equação

$$\delta = \frac{\rho^{\alpha\beta}}{\rho^{\alpha\alpha}} \quad (8)$$

A partir deste parâmetro também é possível caracterizar o tipo de microestrutura com duas fases: menor que dois, dispersão; entre 0,3 e 1,2, bifásica; 2, duplex; infinito, em rede.

- f) *Relação entre Fração em Volume e Diâmetro de Grão*. Ainda de acordo com HORNBOGEN e outros [1], na microestrutura bifásica ideal a quantidade de grãos por volume das duas fases α e β deve ser igual. Logo, a seguinte relação deve ser válida:

$$\frac{f_\beta}{(1-f_\beta)} = \left(\frac{D_\beta}{D_\alpha}\right)^3 \quad (9)$$

- g) *Distância entre as Ilhas de Segunda Fase*. De acordo com MAID e outros [6], o tamanho e fração em volume das ilhas de martensita num aço bifásico definem seu grau de distribuição através da distância entre elas, definida pela fórmula

$$d_\beta = 0,98 D_\beta (0,885 f_\beta^{-\frac{1}{2}} - 1) \quad (10)$$

Quanto menor for o valor de d_β , mais uniformemente estará distribuída a segunda fase. Isto leva a alterações nas propriedades mecânicas do material, como o abaixamento do limite de escoamento e da razão elástica, aumento do limite de resistência e alongamento, o que, conseqüentemente, melhora sua conformabilidade a frio, ou seja, sua estampabilidade.

- h) *Análise Estatística*. Para se determinar a precisão estatística de cada parâmetro topológico calculado, bem como o número de campos que devem ser observados para se atingir um dado nível de precisão, foram utilizadas as seguintes fórmulas [8]:

$$\sigma = \sqrt{\sum \frac{(x^2 - \bar{x}^2)}{(n-1)}} \quad (11)$$

$$p = \frac{200 \sigma}{\bar{x} n^2} \quad (12)$$

$$n_r = \left(\frac{200 \sigma}{p_0 \bar{x}} \right)^2 \quad (13)$$

onde:

- . σ = desvio padrão;
- . \bar{x} = parâmetro em análise;
- . n = número de campos observados;
- . p = precisão obtida, [%];
- . p_0 = precisão objetivada, [%];
- . n_r = número de campos a serem observados para se atingir a precisão objetivada.

Todas as fórmulas acima descritas foram implementadas num programa de microcomputador em linguagem BASIC, o que permitiu o armazenamento dos dados obtidos por microscopia ótica em disquetes, o rápido cálculo dos parâmetros ao longo das medições e o acompanhamento da evolução da precisão ao longo das contagens. Numa primeira abordagem, estas rotinas foram escritas em Applesoft Basic [11] e atualizadas posteriormente para o GwBasic e QuickBasic, tornando o programa compatível para os microcomputadores da linha IBM.

- DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DOS PARÂMETROS MICROESTRUTURAIS

Pode-se ilustrar o cálculo e utilização dos parâmetros descritos na seção anterior através da análise da microestrutura bifásica da figura 3. Ela foi obtida a partir de um aço de composição química 0,063% C; 0,87% Mn; 1,46% Si; 0,41% Cr e 0,38% Mo. Este tipo de liga é típica para materiais que se destinam à produção de chapas com microestrutura bifásica diretamente da saída do Laminador de Tiras a Quente [12].

Esta microestrutura foi obtida a partir da laminação a quente de uma barra de 38 mm de espessura por 50 mm de largura. Ela foi reaquecida a 1050°C por uma hora e laminada a quente, atingindo espessura de 29 mm após quatro passes. A temperatura de acabamento foi da ordem de 850°C. O resfriamento posterior foi feito sob ar calmo.

Foi retirada uma amostra do centro da barra para análise metalográfica. O polimento das amostras foi feito de forma convencional: lixamento na sequência de granas #180, #240, #320, #400 e #600, seguido de polimento giratório utilizando pasta de diamante com granulometria de 6, 3 e 1 μm , sucessivamente. O ataque utilizado foi Nital 5% durante 25 segundos.

Foi efetuada a determinação da fração volumétrica da segunda fase presente na amostra de acordo com a Norma ASTM E-562. Utilizou-se uma rede com 121 pontos e aumento de 250 vezes. O número de campos observados foi determinado em função da precisão requerida, $\pm 5\%$.

A determinação do tamanho de grão das duas fases presentes na microestrutura foi efetuado pelo procedimento de Hilliard, de acordo com a Norma ASTM E-112. Foi utilizado um círculo com raio de 4 mm, o que resulta num comprimento total de Linha Teste de 25,1327 mm. O aumento foi escolhido de forma que, em cada campo, a Linha

Teste interceptava pelo menos 35 contornos de grão. Isto levou à utilização de um aumento de 500 vezes. Também aqui a precisão requerida foi de pelo menos $\pm 5\%$.

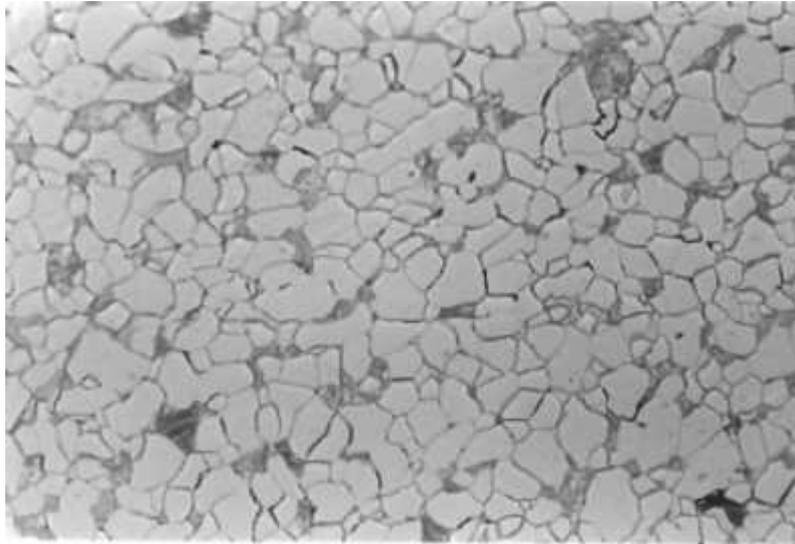


Figura 3: Microestrutura obtida a partir da laminação a quente de um aço bifásico ao Mn-Si-Cr-Mo. Matriz de ferrita poligonal e ilhas de constituinte bainítico-martensítico. Ataque: Nital 5%. Aumento: 400 x.

Todos os procedimentos de metalografia quantitativa foram realizados no Banco Metalográfico Neophot 30 do Departamento de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Mediu-se ainda a microdureza Vickers das fases presentes, com carga de 25 g. Efetuou-se um número de medidas suficiente para garantir precisão mínima de $\pm 5\%$ no valor médio final.

- RESULTADOS E DISCUSSÃO

A microestrutura da amostra foi constituída de matriz de ferrita poligonal e um constituinte bainítico-martensítico, típico dos aços bifásicos obtidos diretamente do calor de laminação [12]. Esse constituinte corresponde à martensita presente na microestrutura ideal dos aços bifásicos obtidos por recozimento intercrítico. Para se manter a uniformidade da terminologia, ele continuará sendo designado neste trabalho pela expressão "segunda fase", embora isso não seja rigorosamente correto, uma vez que se trata de um constituinte, ou seja, um arranjo de várias fases, e não uma fase isolada. A dureza da ferrita foi de 167 HV, enquanto que a do constituinte bainítico-martensítico foi de 680 HV.

A tabela II lista os resultados obtidos a partir da análise microestrutural quantitativa efetuada na amostra-exemplo para cada uma das fases presentes. Já a tabela III mostra os parâmetros globais obtidos para a microestrutura bifásica em questão.

A fração de segunda fase presente neste amostra foi de 9%, o que é um pouco inferior à faixa tradicionalmente estabelecida de 10 a 20% para uma microestrutura bifásica típica [1-6]. De todo modo, essa pequena fração faz com que não haja contato entre as ilhotas de segunda fase, o que é favorável para a ductilidade e conformabilidade do ma-

terial [1]. Isto é confirmado pela contiguidade e pela densidade de contornos de grão da segunda fase, que foram nulos.

Parâmetros Microestruturais	Ferrita	Segunda Fase
Fração Volumétrica [%]	91,0 ± 0,4	9,0 ± 0,4
Tamanho de Grão [μm]	17,8 ± 0,4	8,9 ± 0,4
Contiguidade [%]	80,0 ± 1,0	0,0 ± 0,0
Volume de Contiguidade [%]	83,0 ± 1,0	0,0 ± 0,0
Caminho Livre Médio [μm]	90,0 ± 4,1	8,9 ± 0,4

Tabela II: Dados relativos às duas fases presentes na microestrutura-exemplo.

d_{β} [μm]	17,0 ± 0,70
Δ	0,00 ± 0,00
δ	0,51 ± 0,03
$\frac{f_{\beta}}{(1 - f_{\beta})}$	0,10 ± 0,01
$\left(\frac{D_{\beta}}{D_{\alpha}}\right)^3$	0,13 ± 0,01

Tabela III: Parâmetros globais da microestrutura-exemplo.

O tamanho de grão das duas fases foi um pouco superior ao tipicamente observado para aços bifásicos laminados a quente: 17,8 e 8,9 μm para a ferrita poligonal e a segunda fase, respectivamente. BEENKEN e outros [13] apontam um tamanho de grão de 12 μm para a ferrita e 10 μm para a segunda fase em amostras resfriadas sob as mesmas condições após deformação a quente.

O comprimento do caminho livre foi relativamente alto: 90,0 μm para a matriz de ferrita poligonal e 8,9 μm para as ilhotas de segunda fase. A grande diferença entre esses dois valores se deve à pequena fração de segunda fase presente na microestrutura, o que resultou num alto valor de contiguidade para a fase ferrítica. Tal fato, em consequência, levou a um aumento do comprimento do caminho livre dessa fase, como mostra a fórmula (6). Assim, um valor moderado na fração de segunda fase, sem que ocorra contato entre seus grãos, abaixará os valores de contiguidade da matriz ferrítica, diminuindo o caminho livre disponível para a migração de discordâncias. Desse modo, o material sofrerá aumento em sua resistência mecânica [1-6].

Além disso, de acordo com a equação (10), o aumento da fração de segunda fase presente, aliado a redução no seu tamanho de grão, levará à redução da distância entre as ilhas de segunda fase, o que melhorará as características de conformabilidade do material. Para a amostra aqui estudada esta distância foi de 17,0 μm.

O exame dos parâmetros utilizados para classificação da microestrutura bifásica, propostos por HORNBOGEN e outros [1], mostram que a microestrutura em estudo atende a quase todas as condições requeridas: a razão da densidade de contornos de grãos entre a matriz e a segunda fase Δ foi igual a zero e o parâmetro de dispersão δ foi igual a 0,51. A razão $f_{\beta}/(1-f_{\beta})$ foi igual a 0,10, enquanto que a razão $(D_{\beta}/D_{\alpha})^3$ assumiu valor

da ordem de 0,13. Verifica-se a partir daí que, para a razão de diâmetros de grão obtida, a fração de segunda fase deveria ser ligeiramente maior para que a microestrutura fosse considerada plenamente bifásica. Por outro lado, os valores aqui obtidos podem ser considerados bem próximos, especialmente se forem considerados os erros estatísticos associados às medidas.

Finalizando, um exemplo do estabelecimento de correlações quantitativas entre os parâmetros quantitativos da microestrutura e as propriedades mecânicas de um aço bifásico pode ser visto em outros trabalhos [4,5].

- CONCLUSÕES

Foram apresentados neste trabalho um conjunto de parâmetros topológicos determinados a partir de metalografia quantitativa, os quais permitem caracterizar uma microestrutura com duas fases e, em particular, as observadas em aços bifásicos ("dual phase").

Tais grandezas são: tamanho de grão médio, grau de contiguidade e comprimento da distância livre para a movimentação de discordâncias, relativos à duas fases presentes, bem como a distância média entre as ilhas de segunda fase. Além disso, devem ser considerados parâmetros concebidos especialmente para se identificar a microestrutura peculiar dos aços bifásicos, como a relação de densidade dos contornos de grão entre as fases, grau de dispersão e a relação entre a fração de segunda fase presente e a razão dos volumes de grão.

Todas essas relações podem ser calculadas a partir de dados coletados por procedimentos padronizados de metalografia quantitativa. No presente caso, este cálculo foi efetuado através de um programa de computador, facilitando a análise da precisão ao longo da coleta dos dados.

Os resultados obtidos permitem que se caracterize se uma dada microestrutura pode ser considerada como sendo efetivamente típica de um aço bifásico, a partir dos parâmetros de avaliação propostos por HORNBOGEN e outros [1]. Além disso, a análise das demais grandezas microestruturais e da microdureza das diversas fases presentes permitirá, a partir das correlações estabelecidas por vários autores [4,6,9,10], que se possa estimar, ainda que qualitativamente, as características mecânicas decorrentes de uma dada microestrutura com duas fases.

Os interessados em obter uma cópia do programa desenvolvido podem conseguí-la gratuitamente desde que seja mandado um disquete livre para o Autor.

- BIBLIOGRAFIA

1. HORNBOGEN, E. e outros. **Zeitschrift für Metallkunde**, Januar 1980, 27-31.
2. GORNI, A.A. **Dissertação de Mestrado**, Escola Politécnica da U.S.P., 1989. 156 p.
3. CRIBB, W.R. **Scripta Metallurgica**, 1978, 893-898.
4. PICKERING, F.B. & LANZILOTTO, C.A.N. **Metal Science**, August 1982, 371-382.

5. GORNI, A.A. & BRANCHINI, O.L.G. In: **SEMINÁRIO SOBRE CHAPAS METÁLICAS PARA A INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA**. Anais. Associação Brasileira de Metais, São Paulo, 1992, 127-145.
6. MAID, O. e outros. **Stahl und Eisen**, 18 April 1988, 355-364.
7. LAMBERT, N. e outros. **C.R.M. Metallurgical Reports**, June 1975, 33-47.
8. UNDERWOOD, E. **Quantitative Stereology**. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, 1970. 274 p.
9. FISCHMEISTER, H. & KARLSONN, B. **Zeitschrift für Metallkunde**, Mai 1977, 311-327.
10. UGGOWITZER, P. & STUEWE, H.P. **Zeitschrift für Metallkunde**, Mai 1982, 277-285.
11. BRANCHINI, O.L.G. & GORNI, A.A. **Mineração e Metalurgia**, Setembro de 1989.
12. ELDIS, G.T. e outros. In: **ALLOYS FOR THE EIGHTIES**. Proceedings. Climax Molybdenum Company, Ann Arbor, 1980, 37-57.
13. BEENKEN, H. e outros. **Dr.-Ing. Dissertation**. RWTH Aachen, Aachen, Dezember 1986. 109 p.