

Revisão sobre as aplicações da metalografia quantitativa

A metalografia quantitativa vem se firmando cada vez mais como uma técnica experimental de grande utilidade tanto no estudo de fenômenos metalúrgicos como na caracterização das microestruturas e sua correlação com as propriedades mecânicas. Os autores deste artigo desenvolveram programas para cálculo de dureza Vickers, fração volumétrica de segunda fase, tamanho de grão para microestrutura monofásica, tamanho de grão para microestrutura com duas fases e fração volumétrica e tamanho e dispersão de precipitados.

A. A. Gorni e O. L. G. Branchini

A aplicação da metalografia quantitativa no estudo de fenômenos metalúrgicos e na caracterização de microestruturas não chega a ser propriamente uma novidade, mas esta técnica vem sendo crescentemente utilizada graças à maior sofisticação dos equipamentos disponíveis para análise de imagens. De fato, a grande redução no custo dos microprocessadores vem permitindo que a análise matemática e geométrica das microestruturas se torne rápida, confiável e econômica, o que está viabilizando seu uso numa escala cada vez maior (1, 2).

A metalografia quantitativa é uma ferramenta extremamente útil no estudo de fenômenos metalúrgicos, gerando informações que eventualmente podem embasar o correto dimensionamento de processos industriais. A seguir, alguns exemplos da aplicação desta técnica no estudo de fenômenos metalúrgicos:

- recristalização e crescimento de grão: determinação do tamanho e da superfície específica dos grãos recristalizados, bem como medição da fração recristalizada, após laminação a quente (3) ou tratamento térmico (4);

- precipitação: determinação de fração volumétrica, tamanho e grau de dispersão dos precipitados (5);

- transformação de fases: determinação de fração volumétrica e dureza de fases como auxílio na determinação de diagramas TRC (6) ou após a laminação a quente de aços bifásicos (7);

- solidificação: determinação da morfologia da grafita (8) e da microestrutura dos ferros fundidos em termos gerais (9).

Quanto à caracterização da microestrutura e sua correlação com as propriedades mecânicas, há mais de uma década estão sendo feitos estudos sistemáticos, particularmente no caso dos aços. Tais trabalhos são de fundamental importância, pois não só a dureza e as frações das fases presentes na microestrutura definem a resistência mecânica e a ductilidade do material: a morfologia — ou formato — das fases, bem como a natureza e a densidade dos contornos presentes podem atuar de maneira fundamental (10). Dentro desta linha de pesquisa há estudos voltados para diversos tipos de aços:

- microligados: relação entre resistência mecânica, ductilidade e propriedades de impacto em função do tamanho de grão ferrítico e fração volumétrica de perlita (11);

- bifásicos *dual phase*: caracterização topológica da microestrutura *dual* (12); relações estatísticas entre as propriedades mecânicas e o tamanho de grão e fração volumétrica das fases (13, 14); modelamento matemático da microestrutura e propriedades mecânicas (15); relações estatísticas entre o espaçamento da segunda fase e sua fração em volume como o coeficiente de encruamento do material (16);
- inclusões não-metálicas: determinação do grau de limpeza do aço, caracterizando a fração em volume e a morfologia das inclusões não-metálicas — óxidos, sulfetos, nitretos — que ele possa conter (17, 18).

Note-se que no caso dos aços bifásicos há uma grande quantidade de estudos sobre a relação microestrutura-propriedades mecânicas. Neste tipo de material, que se caracteriza por possuir microestrutura constituída de matriz ferrítica mole com 15 a 20% de martensita dura

dispersa na forma de ilhotas que lhe proporciona alta resistência mecânica e boa conformabilidade, o grau de sensibilidade das propriedades mecânicas em relação à microestrutura é bem maior do que o observado nos aços comuns, o que a torna particularmente fácil de ser analisada.

No Brasil a utilização da metalografia quantitativa ainda é um tanto quanto incipiente devido à inexistência de equipamentos automatizados para a análise de imagens metalográficas. Contudo, é provável que essa situação se altere num futuro próximo, dada a maior conscientização atual sobre a utilidade dessa técnica.

O desenvolvimento de estudos sobre a recristalização de aços microligados e sobre processos de laminação a quente de aços bifásicos, realizado através do convênio entre o Departamento de Engenharia Metalúrgica da EPUSP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e a Companhia Siderúrgica Paulista (Cosipa), exigiu a aplicação intensiva de algumas técnicas de metalografia quantitativa. Em consequência, foram desenvolvidos programas para microcomputador para efetuar o processamento dos dados provenientes da análise visual da microestrutura em banco metalográfico, os quais calculam os parâmetros requeridos da microestrutura juntamente com sua análise estatística.

DESCRIÇÃO DOS PROGRAMAS

Os projetos para estudo da recristalização dos aços microligados e da laminação a quente de aços bifásicos requeriam que as amostras provenientes dos ensaios metalúrgicos fossem analisadas em termos de:

- a) dureza Vickers (global ou de fases discretas);

- b) fração volumétrica de segunda fase;

- c) tamanho de grão da microestrutura monofásica;

- d) tamanho de grão da microestrutura com duas fases;

- e) fração volumétrica, tamanho e dispersão de precipitados.

Normalmente a microestrutura varia estatisticamente de um ponto a outro da amostra que está sendo analisada. Logo, para que o valor final do parâmetro em estudo tenha significado estatístico, é neces-

sário que ele seja calculado a partir da média de um número mínimo de observações — ou campos metalográficos —, o qual é função do grau de flutuação estatística das medidas na microestrutura e da precisão desejada. A necessidade de cálculos estatísticos motivou o desenvolvimento dos programas para microcomputador para o cálculo dos parâmetros acima e de sua análise estatística a partir de um número relativamente grande de campos metalográficos — o qual variou normalmente entre 20 e 130.

Tais programas permitem entrada flexível dos dados (via teclado e/ou arquivo em disco flexível, com recursos de supressão de dados errados e inserção de novos dados via teclado e/ou arquivo), sua listagem em monitor ou impressora e seu armazenamento em disco flexível. Como resultado esses programas calculam o respectivo parâmetro de metalografia quantitativa juntamente com sua análise estatística, que consiste no cálculo de sua média, desvio-padrão, número de medidas necessário para se alcançar precisão de ± 1 , ± 3 e $\pm 5\%$, a precisão percentual efetivamente obtida, precisão da média e sua faixa de variação. O relatório de resultados pode ser visto no monitor ou impresso.

Os programas desenvolvidos serão descritos resumidamente a seguir. Os procedimentos e fórmulas neles utilizados não serão citados aqui, uma vez que eles se

encontram extensivamente explicados em outras referências (19, 20).

Dureza Vickers - Como se sabe, o ensaio de dureza Vickers consiste em se aplicar, sob uma carga preestabelecida, um penetrador piramidal sobre a superfície polida do material em estudo. A impressão, assim, tem o aspecto de uma pirâmide, e o valor de dureza é calculado a partir da média das duas diagonais de sua base, que forma um losango regular. Essas diagonais são medidas através de uma ocular presente na máquina de dureza.

A magnitude da carga a ser aplicada no ensaio é função da dureza do material em estudo, gerando uma impressão regular, sem deformação e com tamanho adequado para medição através da ocular da máquina. Obviamente, para um mesmo material, quanto maior o valor da carga maior será a impressão produzida. A seleção do valor de carga permite ainda a medição da dureza de fases discretas da microestrutura, que devem ser reveladas previamente através de polimento e ataque metalográfico. Neste caso, o valor da carga tem de ser pequeno — 25 a 50 g, ou até menos. A dureza assim medida representa um grande auxílio na identificação de fases ou dos mecanismos metalúrgicos que a geraram.

O programa requer os seguintes dados: carga utilizada, e para cada ensaio, o tama-

nho das duas diagonais da impressão.

Fração volumétrica - A determinação da fração volumétrica de uma fase particular presente na microestrutura é feita através da aplicação de uma rede sobre a imagem da microestrutura, e contando-se o número de pontos coincidentes entre a rede e a fase em estudo. Essa contagem pode ser feita em fotos ou diretamente no microscópio. A fração volumétrica da fase é calculada a partir da média do quociente do número de pontos coincidentes com o número de pontos total da rede a partir das diversas medidas efetuadas.

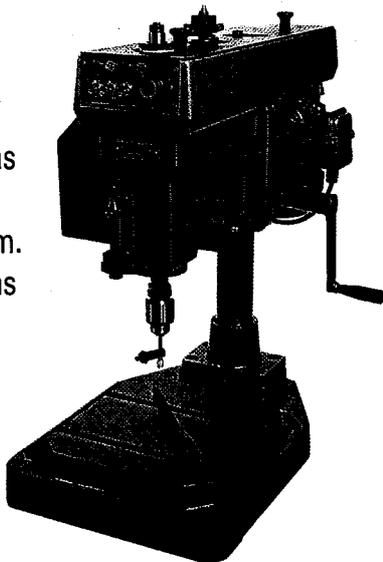
Desse modo, o programa requer como dados o número de pontos total da rede e, para cada campo observado, o número de intersecções com a fase estudada.

Tamanho de grão de microestrutura monofásica - A determinação do tamanho é feita através da sobreposição de uma linha-teste sobre a imagem da microestrutura em estudo e contando-se o número de intersecções dos contornos de grão da microestrutura com ela. Essa linha-teste pode ser um segmento de reta ou um círculo, com comprimento conhecido. Recomenda-se o uso de círculos quando se quer evitar o efeito da orientação preferencial dos grãos, minimizando-se dessa forma o erro estatístico produzido.

Os dados a serem fornecidos a este pro-

MÁQUINAS DAUER

- Rosqueadeiras automáticas de 1 a 32 mm.
- Rosqueadeiras múltiplas



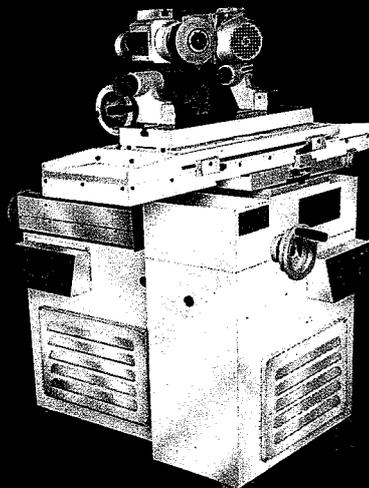
Máquinas Daurer Indústria e Comércio Ltda

Av. Nossa Senhora do Sabará, 4986
Tel.: (011) 247-2177 - Tlx.: (11) 55 030 DAUR BR
04686 - Santo Amaro - São Paulo - SP.

Serviço de consulta 2978

AFIADORA RETIFICADORA UNIVERSAL AF-400

Tecnologia de ponta e praticidade, prestando soluções aos mais variados serviços na indústria mecânica.



Serviço de consulta 2979

FERRAMENTARIA E USINAGEM

Ferramentaria

- Confecção de moldes plásticos
 - Ferramentas de corte, dobra e repuxo
- Dispositivos e máquinas especiais

Usinagem

- Tornos mecânicos e automáticos
- Peças em materiais ferrosos e não ferrosos

Plásticos

- Serviços de injeção plástica em máquinas de até 100 grs.

Atuamos também na área eletro-eletrônica



GR Indústria e Comércio Ltda.
Rua Eng. Silva Braga, 22/26
04163 — Saúde — São Paulo — SP.
Tel.: (011) 578-9972 - Tlx.: (11) 56009

Serviço de consulta 2982

SOLDA
POR
SIMPLES
CONTATO

ROISCHUPP INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA.
Av. São Miguel, 4090 — Ponte Rasa
03740 — C.P. 6787 — São Paulo - SP.
Tels.: (011) 206-7622/206-7774
Tlx.: (11) 62 294 ROIS BR

Serviço de consulta 2981

grama são: o aumento utilizado na observação da microestrutura, tamanho da linha-teste e, para cada campo observado, o número de intersecções entre os contornos de grão e a linha-teste.

Além do diâmetro médio, este programa ainda calcula a superfície específica média dos grãos (Sv). Este último parâmetro é muito importante em estudos sobre laminação controlada, pois permite que se saiba a área superficial dos grãos austeníticos que está disponível para a formação da microestrutura final após a laminação a quente, o que permite avaliar se a austenita foi bem condicionada pela conformação (3). Outra aplicação deste parâmetro está na análise da cinética de recristalização (4).

Tamanho de grão da microestrutura com duas fases - Neste tópico, a determinação dos tamanhos é análoga ao caso anterior, com a ressalva de que aqui é necessário considerar três tipos de contorno que interceptam a linha-teste: os contornos entre a mesma fase (dois) e entre uma fase e outra (um).

Este programa requer que sejam fornecidos os seguintes dados: aumento com que a microestrutura foi observada, fração volumétrica de segunda fase determinada previamente, o comprimento da linha-teste e, para cada campo observado, o número de intersecções entre os três tipos de contornos e a linha-teste para cada campo observado.

Além do tamanho de grão das duas fases presentes na microestrutura e do tamanho de grão global também são determinados outros parâmetros importantes para a caracterização da microestrutura com duas fases, a saber: grau de adjacência e caminho médio livre de ambas as fases, além do espaçamento entre os grãos de segunda fase. São ainda calculados os parâmetros topológicos recomendados por Hornbogen et al. (12) para se caracterizar a microestrutura *dual*: relação da densidade dos contornos de grão, relação da densidade de contornos de grão/contornos de fase, razão das frações volumétricas e de diâmetros de grão entre as fases.

Fração volumétrica, tamanho e dispersão de precipitados - Para este caso é necessário determinar alternativamente num mesmo campo metalográfico o número de precipitados que coincide com os pontos de uma rede aplicada sobre a imagem da microestrutura e o número de intersecções dos precipitados com uma linha-teste também aplicada sobre a imagem da microestrutura. Como se pode observar, este caso é uma fusão entre os programas b e c.

Desse modo, é preciso fornecer ao programa o aumento utilizado na observação da microestrutura, o número de pontos totais da rede, o comprimento total da

linha-teste e, para cada campo observado, o número de intersecções entre os precipitados e a rede, e entre os precipitados e a linha-teste. A partir destes dados o programa determina a fração volumétrica de precipitados, a distância e o espaçamento médio entre eles, bem como seu tamanho e a relação N_L .

CONCLUSÃO

Os programas para cálculo de dureza Vickers, fração volumétrica de segunda fase, tamanho de grão para microestrutura monofásica, tamanho de grão para microestrutura com duas fases e fração volumétrica, tamanho e dispersão de precipitados foram escritos na Linguagem Applesoft Basic e são altamente compatíveis com a linha Apple II+. Cópias dos mesmos poderão ser obtidas junto aos autores deste artigo, desde que seja fornecido um disco flexível de 5 1/4", simples face/dupla densidade. A utilização e cópia destes programas são livres desde que seja dado o devido crédito aos autores.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Chermant, J. L. - Les memoires et etudes scientifiques de la revue de metallurgie, Janvier 1986, 15-34.
- 2) Exner, H. E. - Acta stereologica, 1987, 6/III, 1023-1028.
- 3) De Ardo, H. E. - Canadian Metallurgical Quarterly, 1988, 141-154.
- 4) Hellman, P. e Hillert, M. - Scandinavian Journal of Metallurgy, April 1975, 211-219.
- 5) Prasser, C. et al. - Praktische Metallgraphie, 1989, 17-24.
- 6) Lotter, U. et al. - Thyssen Technische Berichte, 1984, 13-23.
- 7) Beenken, H. et al. - Forschungsbericht T86-143, RWTH Aachen, Aachen, Dez. 1986, 109 p.
- 8) Poech, M. H. et al. - Sonderblatt Praktische Metallographie, B-18, 1987, 535-545.
- 9) Exner, H. E. et al. In: Erstarrung metallischer Schmelzen, DGM Informationsgesellschaft-Verlag, Stuttgart, 1988.
- 10) Hornbogen, E. - Zeitschrift fuer Metallkunde, Nov. 1982, 739-745.
- 11) Pickering, F. B. In: Microalloying '75, Union Carbide Corp, New York, 1975, 9-31.
- 12) Hornbogen, E. et al. - Zeitschrift fuer Metallkunde, Jan. 1980, 27-31.
- 13) Lanzilloto, E. e Pickering, F. B. - Metal Science, Aug. 1982, 371-382.
- 14) Maid, O. et al. - Stahl und Eisen, 18 April 1988, 355-364.
- 15) Uggowitz, P. et al. - Zeitschrift fuer Metallkunde, Mai 1982, 277-285.
- 16) Balliger, N. K. e Gladman, T. - Metal Science, March 1981, 95-108.
- 17) Yoshida, Y. et al. - Kawasaki Steel Giho, Dec. 1980, 93-104.
- 18) Jacobi, H. et al. - Stahl und Eisen, 1987, 27-34.
- 19) Underwood, E. - Quantitative Stereology, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, 1970, 274 p.
- 20) Padilha, A. F. e Ambrozio, F. - Técnicas de análise microestrutural. São Paulo, Hemus Editora, 1985, Cap. 5. □