

CARACTERIZAÇÃO AUTOMÁTICA DE INCLUSÕES EM AÇOS POR ANÁLISE DIGITAL DE IMAGENS ¹

Mauricio Radtke ²

Marcos Henrique de Pinho Mauricio ³

Roberto Ribeiro de Avillez ⁴

Sidnei Paciornik ⁵

Resumo

Neste trabalho foram estabelecidos os princípios de um procedimento automatizado, baseado em análise digital de imagens de microscopia, para a classificação qualitativa e quantitativa de inclusões em aços. A metodologia desenvolvida utiliza uma análise morfológica das inclusões. Parâmetros de forma característicos destas inclusões, tais como alongamento, tamanho, distância entre vizinhos e densidade, foram utilizados nesta análise. O método proposto baseou-se nas figuras de referência da norma ASTM E 45. As imagens digitalizadas da norma foram empregadas para a escolha dos parâmetros mais adequados para a classificação dos diferentes tipos de inclusões.

Palavras-chave: Inclusões; Análise de imagens; Morfologia; Aços limpos

AUTOMATIC CHARACTERIZATION OF INCLUSIONS IN STEELS THROUGH DIGITAL IMAGE ANALYSIS

Abstract

In the present work the basis of a procedure for the automatic classification of inclusions in steels through image analysis is discussed. The developed method is based in the morphology of the inclusions. Shape parameters such as elongation, size, nearest neighbor distance and area density were employed. The reference charts from ASTM E45 were used as a reference. The digitized images of the charts were used to select the proper parameters to distinguish the different kinds of inclusions.

Key words: Inclusions; Image analysis; Morphology; Clear steels.

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

² Engenheiro Metalúrgico, UDEC - Chile

³ Doutor em Engenharia Metalúrgica, Pesquisador, DCMM PUC-Rio

⁴ Doutor em Engenharia Metalúrgica, Professor, DCMM PUC-Rio

⁵ Doutor em Física, Professor, DCMM PUC-Rio

INTRODUÇÃO

Atualmente, os processos de fabricação de aços avançados possuem um monitoramento muito mais apurado. Desta forma a microestrutura final do aço é muito bem controlada. Dentre as diversas características microestruturais, as inclusões são reconhecidamente de grande importância, influenciando no comportamento mecânico do material. Nos aços mais avançados o teor destas inclusões é muito baixo, mas mesmo assim é necessário um controle rigoroso da sua presença.

De forma geral, as inclusões são impurezas presentes em aços, oriundas do processo de fabricação. Elas se formam ainda durante o processamento na fase líquida do aço, devido a reações entre o metal líquido e as superfícies dos diversos equipamentos (exógenas), e também devido a solubilização de gases e outros elementos de liga (endógenas), que posteriormente se precipitam, durante o resfriamento do aço.⁽¹⁾

A caracterização de inclusões ainda é realizada através de métodos manuais. É comum nas aciarias modernas um técnico, através de comparações com figuras de normas estabelecidas, determinar o tipo, o teor, e o tamanho destas inclusões. Nestes casos, as análises são restritas a poucos campos de observação e os resultados sujeitos a uma interpretação própria do técnico encarregado.⁽²⁾

A proposta deste trabalho é desenvolver uma metodologia de caracterização de inclusões através das técnicas de processamento digital de imagens (PDI). O método se baseia numa varredura automática da amostra em um microscópio dotado de câmera digital e mesa XY motorizada, com a captura de diversas imagens e uma posterior análise por PDI para classificação e quantificação das inclusões, utilizando parâmetros morfológicos (tamanho, forma, distribuição espacial, entre outros).

Um método deste tipo apresenta diversas vantagens em relação aos convencionais (manuais). Além da qualidade estatística que um método automático traz, por analisar muito mais campos que o método manual, os resultados são independentes da interpretação de um técnico, por serem obtidos a partir de parâmetros matemáticos bem definidos. Um método automático é ainda mais vantajoso no caso de aços muito puros, quando é necessária uma varredura de grandes áreas para encontrar um número representativo de inclusões.

As inclusões mais comumente encontradas nos aços comerciais são sulfetos, aluminas, silicatos e outros óxidos. Cada um desses grupos possui características próprias com relação à sua morfologia e à sua distribuição espacial. O método aqui proposto pretende parametrizar as características morfológicas mais relevantes destes grupos de inclusões, permitindo assim, posteriormente, sua caracterização automática.

MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento da metodologia, que é descrito a seguir, pode ser dividido em 4 etapas distintas. A primeira consiste na digitalização das imagens da norma ASTM E 45.⁽³⁾ Estas serão utilizadas como imagens de entrada na rotina de processamento e análise de imagens (2ª etapa). A 3ª etapa consiste na definição dos parâmetros morfológicos que permitam a classificação das quatro classes de inclusões. A 4ª etapa consiste na captura de imagens reais de inclusões de aços e o teste de funcionalidade da rotina com estas imagens. Esta última etapa ainda está em desenvolvimento e está fora do escopo do presente trabalho.

Digitalização

O método aqui proposto, como já mencionado, baseou-se nas figuras da norma ASTM E 45, onde são apresentados desenhos representativos dos quatro principais grupos de inclusões em aços, a saber: sulfetos (A), aluminas (B), silicatos (C) e outros óxidos (D). Dentro de cada grupo a norma define duas classificações quanto ao tamanho das inclusões: série grossa e série fina, conforme apresentado na Tabela 1. Além disto, a norma também define para cada classificação 5 níveis (1,2,3,4,5) de densidade de inclusões por unidade de área.

Tabela 1. Classificação de inclusões segundo a norma ASTM E 45

Tipo de Inclusão	A (Sulfeto)		B (Alumina)		C (Silicato)		D (Óxido)	
	Fina	Grossa	Fina	Grossa	Fina	Grossa	Fina	Grossa
Tamanho	< 4µm	< 6µm	< 9µm	<15µm	< 5µm	< 9µm	< 8µm	<12µm

Inicialmente as imagens de referência, da mencionada norma, foram digitalizadas com uma resolução de 300 dpi. A Figura 1(a) e (b) mostra como exemplo duas dessas imagens. Com a resolução utilizada e a magnificação especificada, obteve-se a dimensão de um pixel ($0,847 \mu\text{m} = 1 \text{ pixel}$). Ao todo foram obtidas 40 imagens de referência.

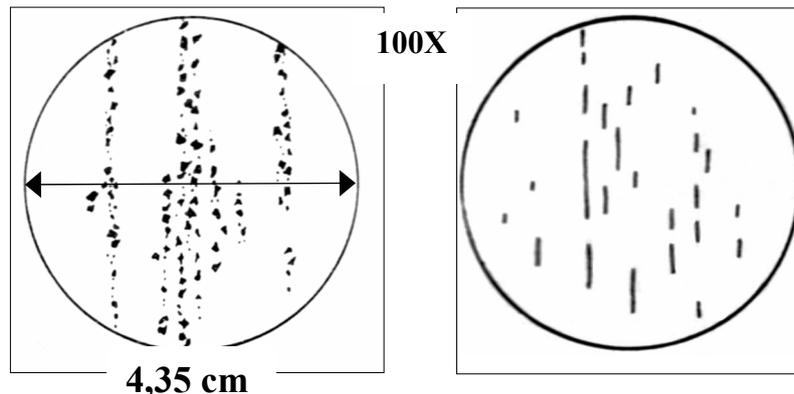


Figura 1. Imagens digitalizadas de inclusões: (a) do Tipo B, grossa, nível 5; (b) do Tipo A, sulfetos, fina, nível 4. A magnificação e o diâmetro da figura impressa estão assinalados.

Desenvolvimento da Rotina

A rotina de processamento e análise de imagens (PDI) foi desenvolvida na plataforma do software KS 400, da Carl Zeiss Vision. O ambiente deste software permite a gravação de macros, que posteriormente podem ser executadas para um banco de imagens existentes, bem como a elaboração de rotinas que integram o controle do microscópio e a análise de imagens.

A rotina desenvolvida seguiu a seqüência clássica de PDI, ou seja, pré-processamento, segmentação, pós-processamento, extração de tributos e classificação.⁽⁴⁾

No pré-processamento é executada uma operação de correção de fundo, através da aplicação de um filtro “passa-alta”. Como resultado a imagem obtida possui um fundo mais uniforme que o da imagem original.

Em seguida é realizada uma segmentação, etapa na qual os objetos de interesse (inclusões) são separados do fundo. O resultado é uma imagem binária, onde objetos tem a cor branca sobre um fundo preto. O método de segmentação utilizado é baseado no algoritmo de Otsu,⁽⁵⁾ que através da análise do histograma da imagem de entrada define um limiar a partir do qual todos os tons de cinza se tornarão brancos (intensidade = 255); abaixo deste limiar os pixels se tornam pretos (intensidade = 0).

No pós-processamento a imagem binária é tratada para que a borda e objetos que toquem a borda sejam removidos, para que não sejam levados em consideração na fase de medidas. Além disto, numa etapa seguinte, os objetos restantes na imagem são dilatados até encontrarem seus vizinhos, para avaliação das distâncias entre primeiros vizinhos.⁽⁶⁾ Na Figura 2 é apresentada uma seqüência que ilustra as principais etapas da rotina.

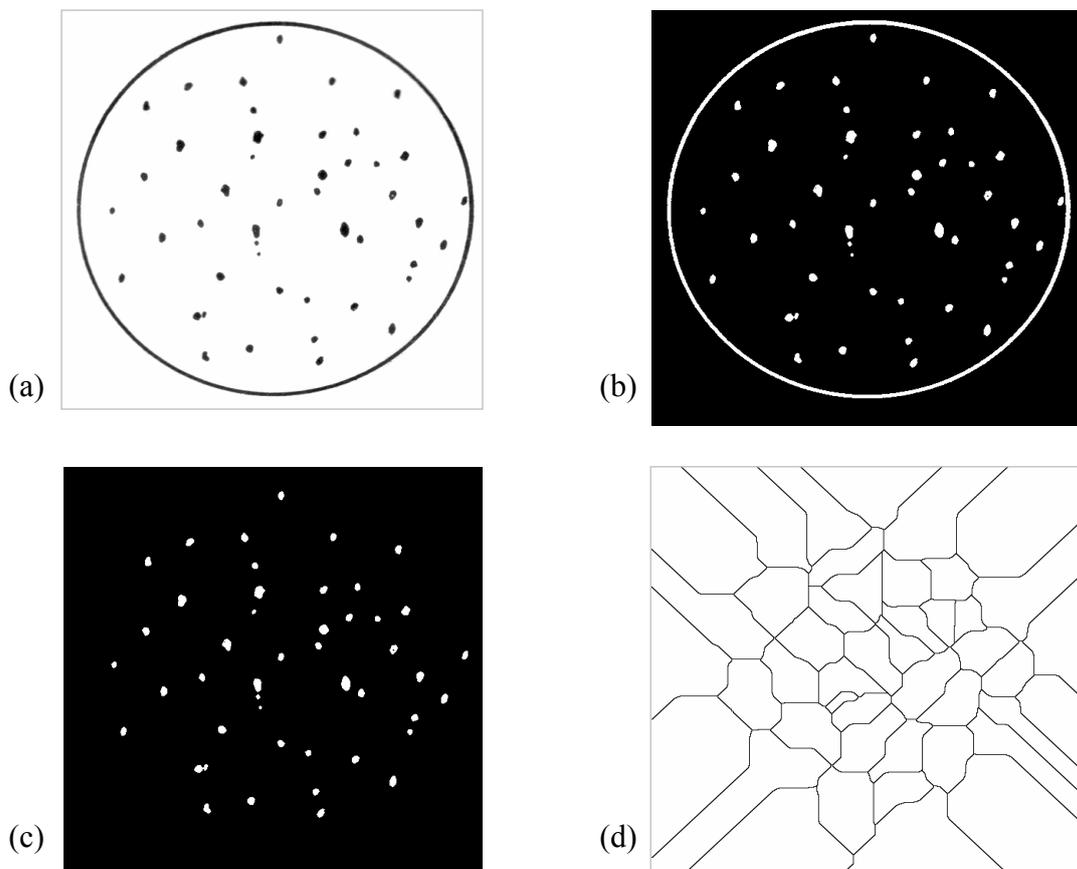


Figura 2. Seqüência simplificada de processamento digital das imagens, para inclusões do tipo D, óxido globular, série grossa, nível 4: (a) imagem original gerada na digitalização, (b) imagem segmentada (binária), (c) imagem binária após a eliminação da borda, e (d) imagem com os objetos dilatados.

Os parâmetros medidos foram escolhidos a partir de uma análise prévia da morfologia das inclusões de interesse. A medida de parâmetros como área, diâmetro circular equivalente, eixo menor, razão entre o menor e o maior eixo⁽⁷⁾ é realizada sobre os objetos na imagem binária antes do procedimento de dilatação. Além disto para cada campo foi contabilizado o número de objetos presentes para medida posterior da densidade de inclusões. Na imagem após a dilatação são medidos o

diâmetro circular equivalente e a razão entre o menor e o maior eixo de cada objeto. Todos os parâmetros são armazenados em base de dados para posterior análise.

Metodologia de Classificação

Os parâmetros medidos foram empregados na construção de gráficos uni e bi-variável para identificação dos pares de parâmetros que melhor discriminassem as quatro classes de inclusões.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente as 40 imagens digitalizadas da norma ASTM E 45 foram analisadas pela rotina desenvolvida. Todos os parâmetros medidos relativos a cada imagem, foram armazenados em base de dados. Na Figura 4, a distribuição de diâmetro circular equivalente para a classe D (óxidos globulares), densidade 4, séries grossa e fina é apresentada. Observa-se que, apesar da dispersão de tamanho dos diâmetros, as duas séries são facilmente distinguidas pelo valor médio do diâmetro circular equivalente. Mesmo nas imagens com baixa densidade de inclusões (níveis 1 e 2) é possível discriminar as duas séries usando o valor médio do diâmetro circular equivalente e o limite imposto pela norma. A comparação das duas séries através de um teste t de Student, com 95% de confiança, indicou que as séries são estatisticamente distintas.

No caso das inclusões mais alongadas (Tipo A e C), principalmente nas séries mais densas, o diâmetro circular equivalente não é adequado. Como a área de algumas destas partículas é grande, o diâmetro equivalente não representa o tamanho das inclusões. Para estes dois tipos, o parâmetro eixo menor (definido junto com o eixo maior na Figura 5) é o que melhor representa a medida de tamanho. Na Figura 6 a classe A (sulfetos), densidade 3, séries grossa e fina é apresentada e a respectiva distribuição do valor do eixo menor é mostrada na Figura 7. Nesta última Figura percebe-se que o valor médio da série fina (4,5 μm) ultrapassa ligeiramente o valor determinado pela norma (4 μm). Mas apesar disto e da dispersão dos valores, as séries fina e grossa podem ser distinguidas por este valor médio do seu eixo menor. A comparação das duas séries através de um teste t de Student, com 95% de confiança, indicou que as séries são estatisticamente distintas.

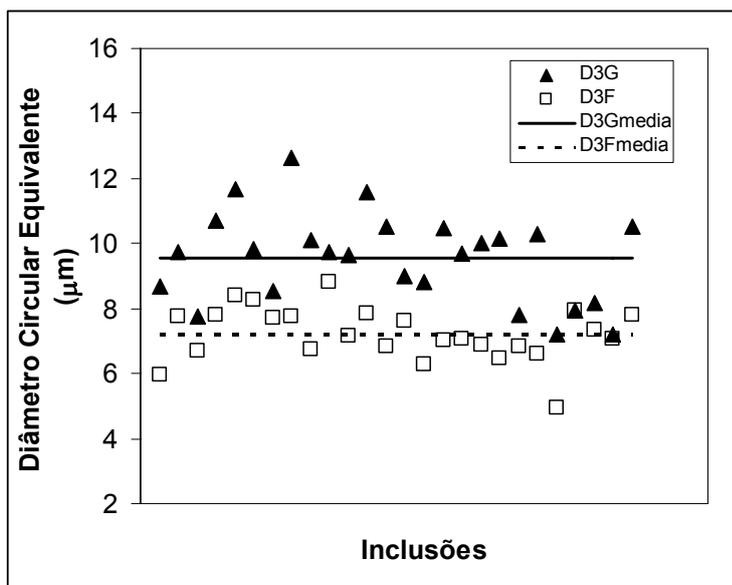


Figura 4. Diâmetro circular equivalente das inclusões das imagens da norma ASTM E 45 da série D, óxidos globulares, densidade 3, séries grossa e fina (D3G e D3F). São representados os valores medidos do diâmetro de cada inclusão (pontos) e as respectivas médias (retas).

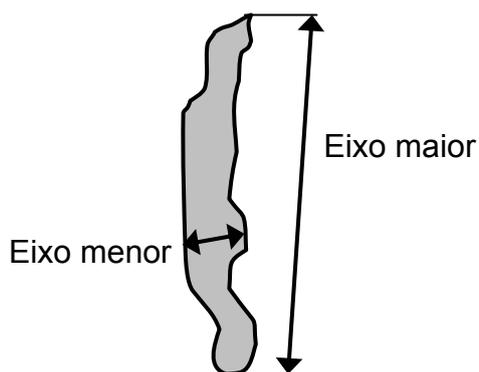


Figura 5. Definição de eixo menor e eixo maior de uma partícula.

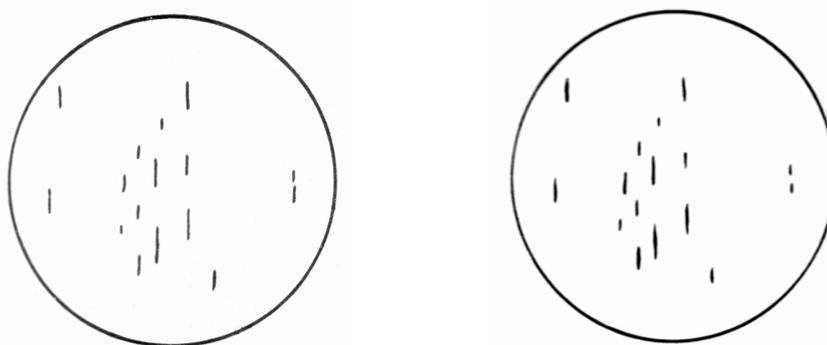


Figura 6. Imagens da norma ASTM E 45: série A, sulfetos, densidade 3, séries fina e grossa (D3F e D3G).

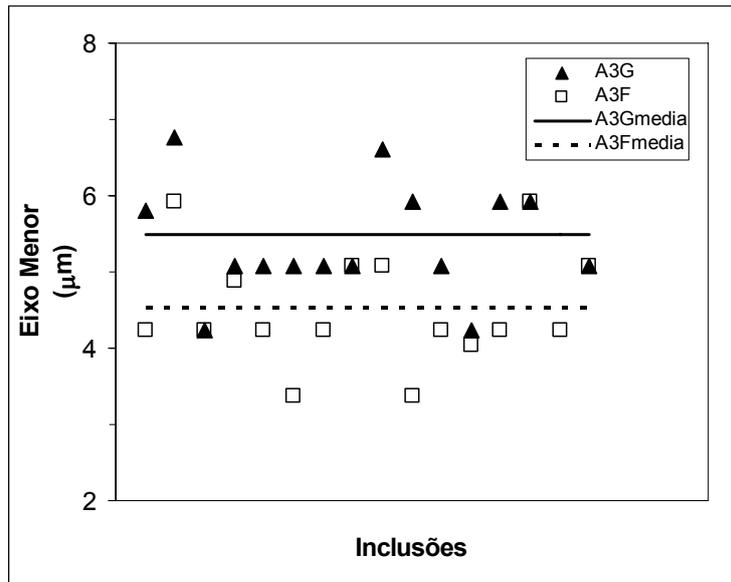


Figura 7. Eixo menor das inclusões das imagens da Figura 6. São representados os valores medidos do eixo menor de cada inclusão (A3F e A3G) e as respectivas médias (A3Fmédio e A3Gmédio).

Além da classificação por tamanho, as inclusões precisam ser classificadas quanto a sua densidade (níveis 1 à 5, segunda a referida norma). Os parâmetros que melhor podem exprimir esta diferença são a área ocupada pelas inclusões por campo e o número de partículas. Nos gráficos da Figura 8 (a) e (b) estão representadas a área ocupada e o número de partículas, para as inclusões do Tipo C, dos níveis 1 à 5. Os dois parâmetros podem ser utilizados na discriminação de níveis de um determinado tipo de inclusão, se especificada uma faixa de valores para cada nível. Por exemplo, para inclusões do tipo C o nível 1 deverá ter uma área ocupada pelas inclusões entre 0 à 0,1 % do campo observado, para o nível 2 entre 0,1 e 0,3 e assim por diante.

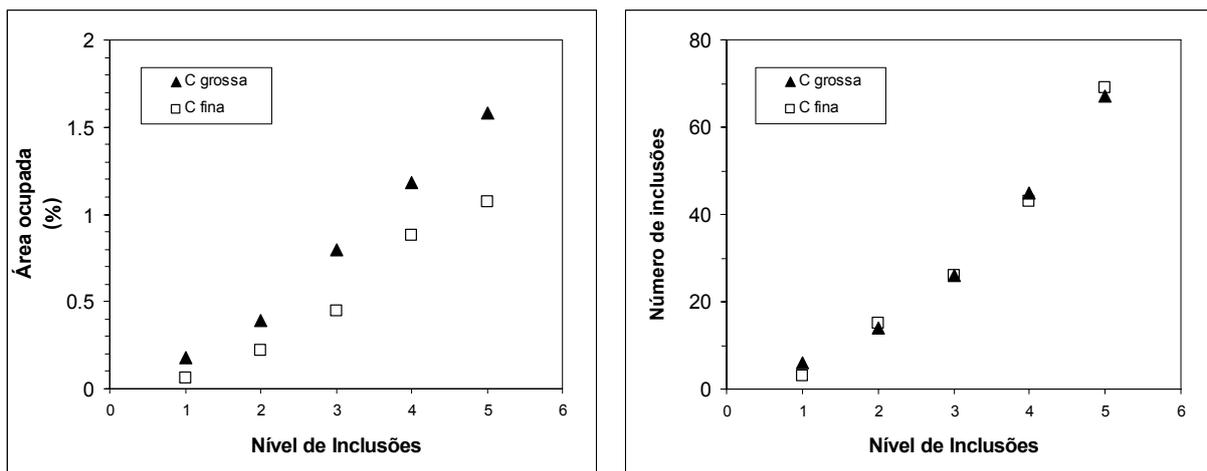


Figura 8. (a) Variação da área ocupada pelas inclusões do Tipo C (silicatos), com seus níveis (1 à 5). (b) Variação do número de inclusões do Tipo C, com seus níveis.

Como até aqui demonstrado, o nível (densidade) de inclusões e de seus tamanhos (série) podem ser avaliados empregando um parâmetro específico para cada tipo de inclusão. Portanto, fica claro que é necessária como primeira classificação a determinação do tipo de inclusão observada. Para isto a avaliação de um único parâmetro não é suficiente. Neste caso, o uso de gráficos bi-variáveis

podem ser úteis para discriminar os 4 tipos. Na Figura 9 é apresentado um gráfico relacionando a razão entre os eixos de cada partícula (medida de alongamento de uma partícula) e a razão entre eixos dos objetos dilatados (medida de distribuição), como os da imagem mostrada na Figura 2 (d), para inclusões dos 4 tipos de nível 4. Neste gráfico aparentemente duas regiões podem ser discriminadas. A região 1 agrupa as inclusões do tipo A e C, enquanto que a região 2 as do tipo B e D.

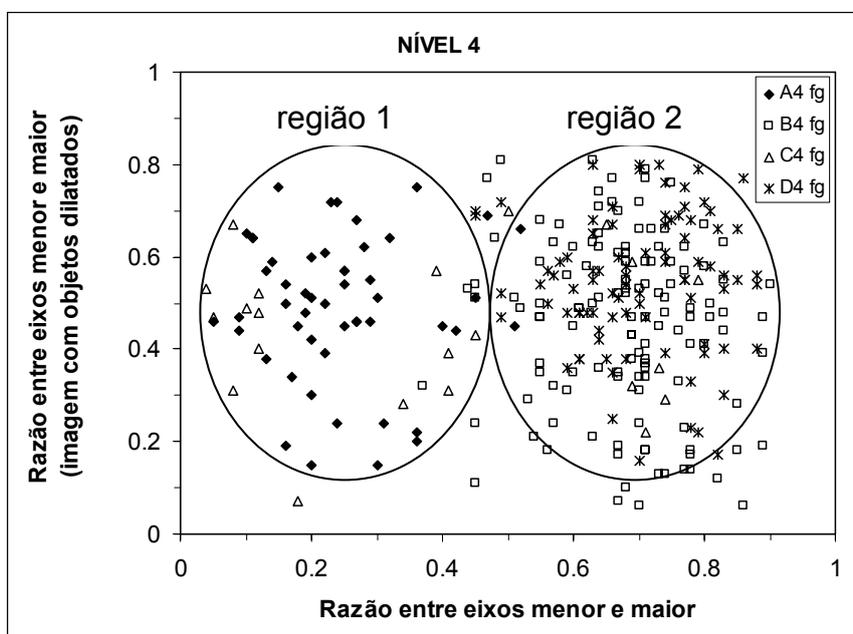


Figura 9. Gráfico de todas as inclusões medidas de nível 4, Tipos A, B, C e D, séries grossa e fina (A4fg, B4fg, C4fg e D4fg), relacionando a razão entre os seus eixos menor e maior e a razão entre eixos das mesmas partículas dilatadas.

A mesma distribuição em duas regiões pode ser observada para os outros níveis (1, 2, 3 e 5). Sendo assim os limites dessas regiões podem ser empregados para discriminar sulfetos e silicatos de aluminas e óxidos. Até o momento não foi possível separar sulfetos de silicatos e aluminas de óxidos através de parametrizações morfológicas simples.

Com a determinação dos parâmetros básicos de discriminação, foi elaborada uma nova rotina seguindo uma árvore de decisões, onde inicialmente é discriminado o Tipo de inclusão (A e C ou B e D), em seguida determina-se a série (grossa ou fina) e por último discrimina-se o nível (1 à 5).

CONCLUSÕES

As vantagens do uso de recursos integrando técnicas de aquisição e processamento digital de imagens e microscópios motorizados na análise de inclusões mostraram-se bem evidentes. Em aços avançados, com baixa densidade de inclusões, a grande amostragem com relevância estatística, em um pequeno intervalo de tempo, torna o método proposto muito mais confiável quando comparado aos procedimentos metalográficos tradicionais.

Com este propósito, neste trabalho foi proposta e desenvolvida a base de um método automático de classificação de inclusões em aços. As figuras da norma ASTM E 45 foram utilizadas como referência para a parametrização das características morfológicas mais relevantes destas inclusões.

A série e o nível de inclusões podem ser determinados empregando uma faixa de valores para alguns parâmetros específicos como o diâmetro circular equivalente médio (B e D), o eixo menor médio (A e C) e a área ocupada pelas mesmas.

A classificação entre os 4 tipos mostrou-se mais complexa, sendo que até o momento é possível discriminar inclusões em 2 grupos: sulfetos/silicatos e aluminas/óxidos, por uma análise bi-variável, relacionando alongamento e distribuição espacial.

Como desdobramento deste trabalho, os critérios de classificação deverão ser aplicados em imagens reais. Além disto, novos métodos de classificação estão sendo estudados, como algoritmos baseados em correlações multivariáveis, para melhor discriminação dos diferentes grupos de inclusões., e a introdução da informação da cor, característica das inclusões, que também pode ser obtida por microscopia óptica.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do CNPq.

REFERÊNCIAS

- 1 COSTA E SILVA, A., Refino dos Aços - Avanços e Perspectivas. In: Simpósio Aços: Perspectivas para os próximos 10 anos, Rio de Janeiro, 2002, p. 55-62.
- 2 ATKINSON, H.V.; SHI, G. Characterization of inclusions in clean steels: Review including the statistics of extremes methods. *Progress in Materials Science*, v. 48, p. 457–520, 2003.
- 3 ASTM E45-97 Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel. *Annual Book of ASTM Standards v. 03.01*, ASM International, 1999, p. 163-176
- 4 PACIORNIK, S.; MAURICIO, M.H.P. Digital Imaging. In: VANDER VOORT, G. (Ed.). *ASM Handbook, Volume 9, Metallography and Microstructures*. Materials Park, 2004, v. 9, p. 368-402.
- 5 OTSU, N. A Threshold Selection Method from Grayscale Histograms, *IEEE Trans. Sys. Man. Cyb. SMC-9*, p. 62-66, 1979.
- 6 SHEHATA, M.T., Characterization of Particle Dispersion. In: *Practical Guide to Image Analysis*, ASM International, 2000, p. 141-143.
- 7 RUSS, J.C. *Computer Assisted Microscopy, The Measurement and Analysis of Images*. New York: Plenum Press, 1990.