

CARACTERIZAÇÃO DE INCLUSÕES EM AÇOS ATRAVÉS DE TÉCNICAS DE ANÁLISE DE IMAGEM, ULTRA-SOM E ESTATÍSTICA DE VALORES EXTREMOS¹

Walter Andrey Fontana²
Carlos Alberto Mendes Moraes³
Gelson Theodoro Leão⁴
Jair Leopoldo Janoski⁵
Ayumi Yoshioka⁶
Rodrigo Silveira de Souza⁷
Rodrigo Soares Belloc⁸

Resumo

Em função da grande necessidade de melhoria da limpeza dos aços siderúrgicos, a avaliação crítica das diversas metodologias de caracterização de inclusões torna-se relevante. Três métodos de caracterização de inclusões foram estudados, sendo análise de imagens, a inspeção por ultra-som, e a técnica estatística de valores extremos, para procurar prever o tamanho máximo de inclusões em amostras. Foi desenvolvida uma metodologia de análise de inclusões por análise de imagem via microscopia ótica, e identificaram-se as potencialidades e estabeleceram-se as necessidades técnicas para a caracterização de inclusões via ultra-som. Também foi avaliada uma metodologia para o atendimento da norma ASTM para a Estatística de Valores Extremos para uma qualidade de aço, para obter a resposta probabilística do tamanho das inclusões. Estes métodos, adaptados para as condições específicas de cada planta, podem reduzir as incertezas de fabricação, melhorar os índices de qualidade na produção de aços limpos, reduzir a geração de resíduos e propiciar diminuição de custo nos processos siderúrgicos, de forma mais rápida e precisa.

Palavras-chaves: Inclusões; Aço; Análise de imagem; Ultra-som; Valores extremos.

INCLUSION CHARACTERIZATION OF STEEL USING IMAGE ANALYSIS, ULTRA-SOUND AND EXTREME VALUE STATISTIC TECHNIQUES

Abstract

As a function of increasing necessity better steel cleanness, a critical evaluation of the several methodologies of inclusion characterization becomes relevant. Three inclusion characterization methods were studied: image analysis, ultra-sound inspection, and the extreme value statistic technique to preview the maximum inclusion size from samples. A methodology to evaluate the inclusions via image analysis obtained from optical microscopy analysis was developed. It was identified the potentialities and identified the technical needs to inclusion characterization via ultra-sound inspection. Also, it was evaluated a methodology to attend the ASTM Norm for the Extreme values Statistics applied to an alloyed steel, obtaining a probabilistic answer to the inclusions size. Such methods, adapted to specific conditions of each plant, may reduce the manufacturing uncertainties, increase the quality of clean steel production, reduce the generation of waste and promote a cost reduction of the steelmaking processes, with inclusion analysis faster and more precise.

Keywords: Characterization; Steel inclusion; Image analysis; Ultra-sound; Extreme values.

¹ Artigo apresentado no 62º Congresso Anual da ABM realizado em Vitória, ES, 23 a 27/07/2007.

² Profo. Ms. - Engenharia Mecânica - Núcleo de Caracterização de Materiais - Universidade do Vale do Rio dos Sinos/UNISINOS. Av. Unisinos, 950 São Leopoldo – RS, Brasil, CEP 93022-000; wfontana@unisinos.br

³ Membro da ABM, Prof. Dr. - Engenharia Mecânica - Núcleo de Caracterização de Materiais, UNISINOS; cmoraes@unisinos.br

⁴ Eng. Mecânico, Engenharia Mecânica, UNISINOS, Gelsontl@unisinos.br

⁵ Assistente Técnico, Gerdau AEP, Avenida Getúlio Vargas, 3200, Charqueadas – RS, Brasil, CEP: 96745-000; e-mail: Jair.janoski@gerdau.com.br

⁶ Assistente Técnico, Gerdau AEP, e-mail: ayumi.yoshioka@gerdau.com.br

⁷ Técnico em inspeção, Gerdau, AEP, e-mail: rodrigo.souza2@gerdau.com.br

⁸ Ms. – Engenheiro Metalúrgico - Gerdau AEP, e-mail: Rodrigo.soares@gerdau.com.br

INTRODUÇÃO

O emprego de técnicas de análise de inclusões em aços tem evoluído recentemente devido ao emprego de novas tecnologias, como sistemas assistidos por computador para análise por imagens⁽¹⁾ e identificação em equipamentos de ultra-som.⁽²⁾ Entretanto, o domínio total dessa tecnologia exige o conhecimento das variáveis de influência nas respostas, e tende a pressionar o pessoal envolvido na análise de inclusões a adquirir novos conhecimentos e técnicas de interpretação dos resultados, o que provoca na maioria das pessoas um certo desconforto inicialmente. Passado o tempo de adaptação, os resultados indicam menores erros de repetibilidade e reprodutibilidade, além de menores tempos de resposta.

Esta necessidade levou à criação de uma rede de pesquisadores de várias universidades, centros de pesquisa e siderúrgicas brasileiras denominada rede TECOMAT⁽³⁾ (da qual os autores fazem parte), onde os resultados iniciais indicam que a escolha dos temas foi acertada em vista do potencial de benefícios pré-competitivos esperados de:

- (a) definição de um protocolo único, uniforme, para os exames por Microscopia Ótica tomando como base a ASTM E45⁽⁴⁾ (durante a realização do projeto observou-se a necessidade de reavaliação desta norma),
- (b) potencial de realização de um *round robin* das técnicas mais empregadas, visando qualificar sua confiabilidade e reprodutibilidade, características básicas de uma técnica de caracterização efetiva e,
- (c) confirmação das dificuldades antecipadas na comparação e correlação entre diferentes tipos de análises que visam a caracterizar a limpidez interna, em especial considerando as diferentes práticas de elaboração e desoxidação empregadas nos aços usados como amostras.

Este trabalho focou na utilização das técnicas de análise de imagens de amostras caracterizadas em microscopia ótica, de ultra-som, e estatística de valores extremos, para procurar determinar com mais precisão e avaliar o tamanho máximo previsto de inclusões endógenas em um volume amostral, desenvolvendo-se uma planilha de cálculo para reduzir os tempos de resposta.

MATERIAIS E MÉTODOS

Três tipos de aço foram estudados, aços A (ressulfurado) e B (produzido com tecnologia clean steel) nas técnicas de análise de imagem e ultra-som, e aço C (aço ligado) no desenvolvimento da técnica de estatística dos valores extremos.⁽⁵⁻⁷⁾

As técnicas de análise de imagens, ultra-som e estatística de valores extremos, foram abordadas nesta seqüência. A técnica de análise de imagem foi a primeira a ser desenvolvida, pois é a referência para as outras duas, além de apresentar o maior potencial de utilização. A estatística de valores extremos foi a última, pois ela necessita de dados provenientes das técnicas de imageamento digital.

Análise de Imagens

Descrição do equipamento

O equipamento de análise de imagens utilizado é um programa da Leica, denominado Qwin, que opera em sistema operacional DOS em um computador dedicado. O programa controla e adquire imagens de um microscópio Olympus BX60, equipado com platina motorizada nos três eixos. O revólver do microscópio é manual não havendo sensor de posição no mesmo, o que exige que o analista certifique-se que haja coincidência entre a objetiva empregada e a calibração do programa, para que não ocorram inconsistências entre as leituras realizadas. A qualidade da imagem obtida pelo equipamento é excelente, o que permite a obtenção de parâmetros morfológicos com maior exatidão.

As principais funcionalidades do programa são a aquisição de imagens, o controle da platina, as medições via detecção e diretamente na tela, e o modo de programação. A aquisição de imagens é feita através de uma câmera CCD de alta resolução, onde se podem salvar imagens em preto e branco e colorido. O controle da platina (Stage) permite fazer varreduras em pente, com as distâncias entre os campos totalmente ajustáveis. O sistema movimenta a platina em X e Y de forma bastante rápida, porém o ajuste de foco (em Z) não é ágil, tendendo a reduzir o desempenho com campos de poucos contrastes, como por exemplo, em análises de inclusões. As medições via detecção com limite de tons de cinza (threshold) permite a medição de vários parâmetros morfológicos, como área, razão de aspecto, comprimento, largura e diâmetro equivalente, além de informar a posição em X e Y e a contagem de objetos.

Metodologia de análise de imagens

Inicialmente, procurou-se estabelecer a seqüência de análise de imagens no sistema Qwin. No tocante ao sistema de análise de imagens, foram montadas rotinas para efetuar varreduras em vários campos. A área total de varredura depende do número de campos e da magnificação da objetiva. Com base nas informações e convergindo para a análise de inclusões relativamente grandes, montaram-se várias versões da rotina de análise de dados. Observaram-se os tempos de análise e as facilidades de extração de dados. Também foram observadas as necessidades de preparação de amostras, pois as técnicas de imageamento digital são mais criteriosas neste aspecto, o que exigiu modificações nas rotinas convencionais para análise de inclusões, para garantir a repetibilidade e reprodutibilidade das análises. Com a última rotina definida (varredur.q5r), na objetiva de 5x e com 100 campos de avaliação, as amostras da seção longitudinal das barras dos aços A e B, com diâmetro de 64,9 mm foram analisadas. As barras passaram previamente pela inspeção por ultra-som e os cortes feitos para a preparação metalográfica foram marcados de forma a poderem-se cruzar os dados de análise de imagens com os resultados de ultra-som. Os resultados da varredura foram exportados para uma planilha do Excel e quantificados, obtendo-se os valores de máxima inclusão nos campos, distribuição de tamanhos, percentual de área ocupada e razão de aspecto.

Inspeção por ultra-som

A inspeção por ultra-som foi executada no equipamento Krautkramer UPR-4, que consiste em um equipamento para varreduras tridimensionais, com capacidade de saída de dados em 2 dimensões. Para a inspeção, as barras de aço com comprimento de cerca de 400 mm do aço A no diâmetro de 64,9 mm e do aço B do diâmetro de 59,6 mm foram inspecionadas. Posteriormente, as mesmas barras tiveram os seus diâmetros reduzidos para 40,75 mm e para 14,40 mm, através de torneamento cilíndrico, tendo a sua superfície lixada para permitir que o acabamento superficial fosse similar em todos os diâmetros, não sendo uma variável de ensaio. Os parâmetros de varredura foram cabeçote de 10 MHz, com diâmetro de 8,95 mm, ganho de 63,8 dB, com os comprimentos de portão (gate) de 29,01, 16,77 e 3,7mm, para os diâmetros de 64,9 e 59,6, 40,75 e 14,4, respectivamente. O acoplante empregado foi água. Em todas as inspeções o transdutor permaneceu a uma distância de 20 mm da superfície da barra. Os resultados foram exportados no formato padrão dos relatórios de análise do equipamento (.rtf) e posteriormente a parte gráfica dos relatórios (onde aparecem as distribuições de inclusões) foi analisada.

Os ensaios com variação de rugosidade foram feitos em duas barras de 400 mm, com diâmetro de aproximadamente 60 mm do aço A e aço B. As amostras foram inicialmente identificadas e tratadas termicamente. A amostra do aço A foi submetida ao tratamento de recozimento, sendo mantida por 13 horas a 890°C e após resfriada em forno até 600°C, sendo então resfriada ao ar. A amostra do aço B foi submetida a esferoidização de 16,5 horas a 840°C, sendo resfriada em forno até 600°C e após ao ar. Os tratamentos térmicos foram feitos em um forno Brasimet K250. As barras tiveram a sua superfície cilíndrica usinada (cilindrada) em um torno mecânico Romi IH40, com uma ferramenta de metal duro revestida com TiN, com raio de ponta de 1,2 mm, com a velocidade de corte de 150 m/min, de forma a evitar a formação de aresta postíça de corte. A profundidade de corte empregada foi de 2 mm e os avanços, em mm por rotação de 0,05, 0,21, 0,64 e 0,80. Com estes parâmetros, pode-se obter a rugosidade $R_{máx}$ teórica através da equação:

$$R_{máx,teórico}(\mu m) = \frac{f_n^2}{8.r_e} . 1000, \text{ Equação 1}$$

Onde f_n é o avanço, em mm/rot, r_e é o raio de ponta em mm.

Os comprimentos de corte foram de cerca de 60 mm e uma parte (cerca de 30 mm) da região usinada com avanço de 0,05 mm/rot foi lixada com lixa grana 1200. A seguir, as amostras foram inspecionadas. Os parâmetros de varredura foram cabeçote de 10 MHz, com diâmetro de 8,95 mm, ganho de 63,8 dB, com o comprimento de portão (gate) de cerca de 29,00. Em todas as inspeções o transdutor permaneceu a uma distância de 20 mm da superfície da barra. Os resultados foram exportados no formato padrão dos relatórios de análise do equipamento (.rtf) e posteriormente a parte gráfica dos relatórios (onde aparecem as distribuições de inclusões) foi analisada. Os tratamentos térmicos (normalização, recozimento, têmpera e esferoidização) foram feitos em um forno tipo mufla Brasimet K250 (localizado no Laboratório de Metalurgia Física da UNISINOS) nos aços A e B. Os parâmetros dos tratamentos térmicos foram sugeridos pelo fabricante dos aços. Após o tratamento térmico, as barras foram torneadas para remover a carepa e conferir um bom acabamento superficial para evitar ruídos na inspeção por ultra-som.

Estatística de valores extremos

A norma ASTM E2283-03⁽⁸⁾ foi analisada e as suas capacidades de aplicação foram estudadas. A norma descreve a metodologia para caracterizar estatisticamente a distribuição das maiores inclusões endógenas em aços, baseada em medidas metalográficas quantitativas. Também se fundamenta na captura de dados pela norma ASTM E1122⁽⁹⁾ e na validação de dados da distribuição pela norma E178⁽¹⁰⁾. A norma E1122⁽⁹⁾ descreve a metodologia de captura de dados de inclusões e sua classificação. O emprego da rotina de campos múltiplos no analisador de imagens (varredur.q5r) e do programa de ordenação de dados desenvolvido pela Unisinos fornece as condições para os dados de entrada da planilha de estatística de valores extremos, de forma a reduzir os tempos de resposta de no tratamento estatístico das inclusões.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise de Imagens

A análise de imagens de cerca de 100 campos foi executada com sucesso. O programa varredur.q5r (routine) teve evoluções devido as necessidades observadas no decorrer das atividades. Os resultados das implementações feitas mostraram que 100 campos de amostragem podem ser executados no tempo de 12 minutos, analisando diversos parâmetros morfológicos de cerca de 8200 objetos. A área amostrada depende da objetiva utilizada, porém na situação de análise foi de 130 mm² (objetiva de 5x). Os dados de cada campo são exportados em um arquivo com extensão .q5d, onde os resultados de cada campo são dispostos em linhas com cada campo ordenado de forma crescente. Os arquivos gerados (com extensão .q5d) foram então abertos na planilha Excel e manipulados. O tempo de geração e cruzamento de dados foi bastante demorado (cerca de 4 horas por arquivo) devido a grande quantidade de linhas e dificuldade de ordenar os campos de interesse. Assim, um programa em linguagem C foi desenvolvido para permitir a ordenação e o agrupamento de dados de forma rápida. Este programa agrupa os parâmetros morfológicos de cada campo, como área, razão de aspecto, diâmetro equivalente, fornece o número de inclusões por campo, e mostra a média aritmética, o desvio padrão, o maior e menor valor a e soma de cada um dos parâmetros estudados. O arquivo gerado pelo programa de ordenação de dados pode então ser aberto em uma planilha Excel e a compilação de dados é feita de forma bastante ágil.

Os resultados gráficos podem ser visualizados nas Figuras 1 e 2. Nestas figuras, podem ser observadas as tendências de evolução do número de inclusões e a fração de área ocupada quando se faz uma análise do centro da amostra para a periferia, para os aços A e B. Em ambos aços, o número de inclusões por área tende a decrescer a medida que se aproxima da periferia. Como esperado, o número de inclusões do aço B é inferior ao do A.

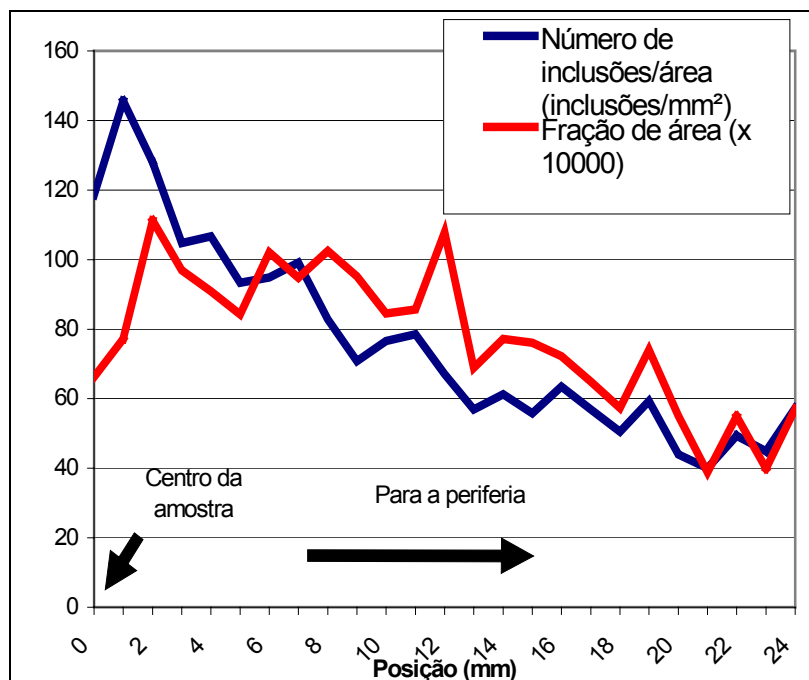


Figura 1: Evolução do número de inclusões e fração de área em função da posição, para o aço A.

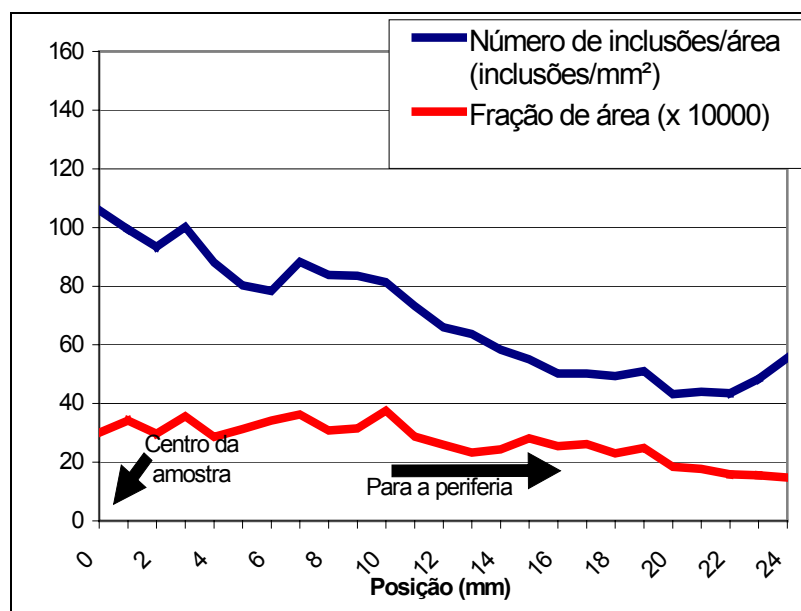


Figura 2: Evolução do número de inclusões e fração de área em função da posição, para o aço B.

Foi possível avaliar também as evoluções da presença de maiores inclusões em área e comprimento, para ambos aços. Verificou-se a tendência de haver grandes inclusões em área e comprimento mais a meio raio, sendo que os maiores objetos que aparecem no aço B são significativamente menores que os do aço A, como é esperado. Além disso, avaliou-se a razão de aspecto (comprimento/largura) em função da posição da amostra, tanto em valores máximos como em valores médios. Valores de razão de aspecto acima de 2,81 sugerem que os objetos são inclusões de sulfetos (ou silicatos, se existirem na amostra). É possível verificar que a tendência de no aço A para a razão

de aspecto médio é aumentar, indicando que as inclusões tendem a ser mais alongadas a medida que se aproxima da periferia. No aço B o valor se mantém relativamente constante, em valores médios abaixo de 2, indicando a maior presença de óxidos globulares. Os valores máximos da razão de aspecto são maiores no aço A, devido a maior presença de sulfetos deformáveis que no aço B.

Ultra-som

Variação de diâmetro

A inspeção com ultra-som foi realizada nos diâmetros de cerca de 60 mm e de 40 mm. Os resultados indicaram uma forte tendência de redução de indicações para o aço A, à medida que o diâmetro é reduzido, apesar de não haver a figura disponível para o diâmetro de 15 mm, foi possível constatar que as indicações tendem a zerar. No caso do aço B não foram identificadas indicações com nenhum dos diâmetros analisados. Os dados do aço A foram cruzados com a análise de imagem e não se obteve correlação entre ambos, provavelmente em função das dimensões de varredura (tridimensional no ultra-som e bidimensional na metalografia).

Quanto à diferença de indicações para a variação de diâmetro para o aço A (Figuras 3, e 4), torna-se difícil ter uma análise conclusiva. Não há evidências de que haja inclusões com cerca de 20 mm de comprimento, em uma frequência tão grande, dispostas a menos de 10 mm da superfície. Provavelmente, em função da microestrutura, está ocorrendo a atenuação das ondas sônicas, que induz o equipamento ao erro. Isto pode ser embasado na análise da Figuras 5a e 5b, que representam a visualização da tela para o aço A e B, respectivamente. Ao observar-se a tela do osciloscópio, pode ser verificada a presença de um ruído de maior magnitude na curva de resposta do feixe sônico no aço A, comparando-se com o aço B (Figura 5b), sugerindo problemas de ordem microestrutural que afetam a interpretação da análise. A inspeção com barras no diâmetro de 14,40 mm não mostrou a presença de indicações para o aço A e para o aço B, associado a um baixo ruído. Isto reforça a hipótese de que um pequeno percurso do feixe sônico reduz a probabilidade de haver falsas indicações, devido a menor atenuação da energia durante a passagem pelos grãos dos materiais.

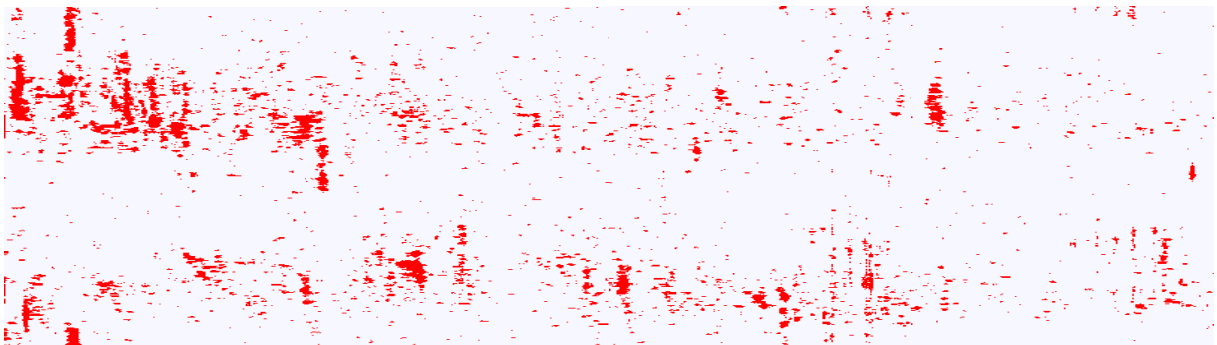


Figura 3: Varredura de ultra-som nas distâncias 400-0mm, para o aço A, diâmetro de 64,9 mm.



Figura 4: Varredura de ultra-som na distância 400-0mm, para o aço A com diâmetro de 40 mm.

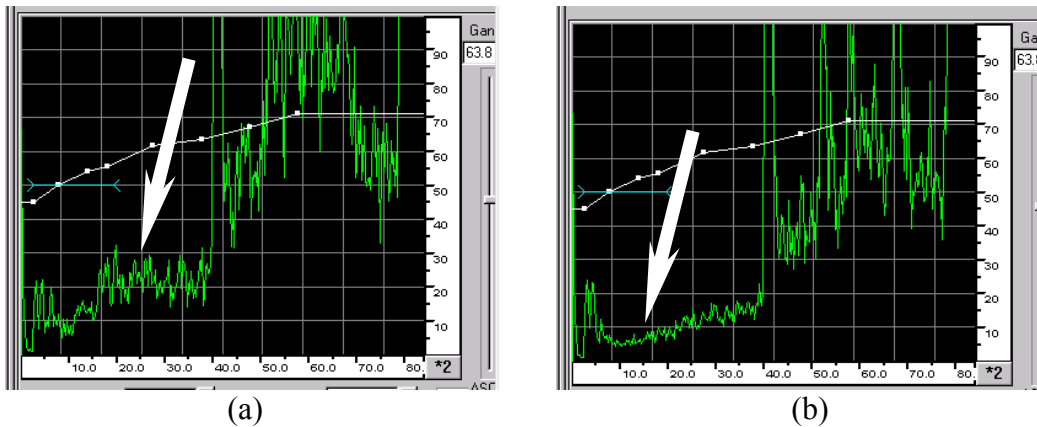


Figura 5: Maior ruído do sinal para o aço A (a) do que para o aço B (b).

Rugosidade

A rugosidade influencia a detecção principalmente devido a fenômenos de difração, atenuação e espalhamento de ondas sônicas. Conforme Blessing et al.,⁽¹¹⁾ a difração tende a ser o fenômeno preponderante em baixas frequências (até 1 MHz). Entretanto, acima deste valor a difração tende a ser menor e a atenuação e o espalhamento tem a sua influência potencializada. A presença de rugosidades em elevadas frequências, como a empregada neste trabalho (10 MHz), tende a agir como um suave refletor, quando a altura das irregularidades atinge menos que 1/3 do comprimento de onda sonoro. O comprimento de onda, a 10 MHz é de cerca de 600 μm , portanto este efeito deve ter influência significativa. A influência da rugosidade na inspeção é mostrada na Figura 6, para o aço B. É possível identificar que a medida que a rugosidade é reduzida, o número de indicações também cai, devido a magnitude do ruído. Abaixo de 6,6 μm , a influência é menos significativa. A tendência é similar para o aço A.

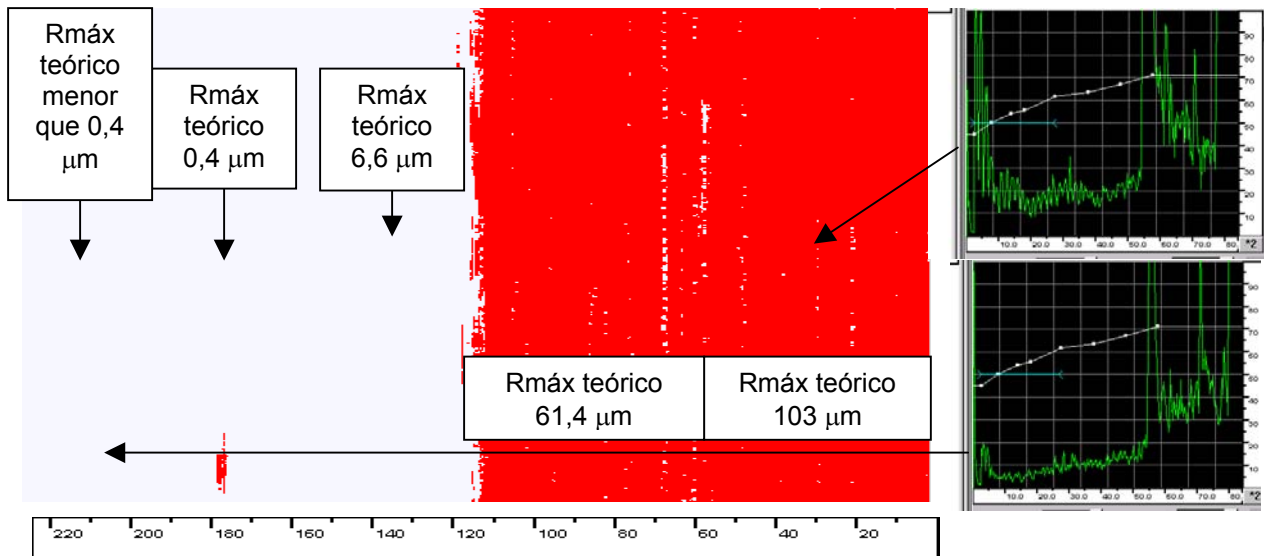


Figura 6: Menores rugosidades representam menos ruídos do sinal (osciloscópio, a direita) reduzindo a incidência de falsas indicações.

Influência do tratamento térmico/microestrutura

No caso do aço A, parece que as estruturas com perlita e ferrita, de grãos menos poligonais, como as presentes no tratamento de recozimento e esferoidização 1 (que não obteve a estrutura esferoidizada devido a temperatura) fornecem um menor ruído e, portanto são menos sujeitas a falsas indicações. A presença de uma estrutura de grãos poligonais parece favorecer o ruído, pois a superfície dos grãos são mais propensas a reflexão em grãos poligonais, como os da normalização. No tratamento de têmpera, a temperatura de revenimento objetivou obter uma estrutura de ferrita e diminutos carbonetos, que em tese são menos refletores que a perlita. Porém o ruído também foi significativo, pois estes diminutos carbonetos permaneceram em grandes “clusters”, que potencializa a característica de reflexão do ultra-som. A esferoidização 2 obteve a presença de indicações e um ruído significativo, muito provavelmente devido à heterogeneidade do tamanho dos grãos.

No caso do aço B, o tratamento que forneceu o menor ruído foi o de têmpera, que também foi realizado com revenimento em alta temperatura (600°), para permitir a formação de diminutos carbonetos. Os tratamentos de esferoidização não obtiveram sucesso, pois o resultado da observação metalográfica mostra a presença de uma grande quantidade de carbonetos em lamelas, sendo mais visível na tratada com menos tempo (esferoidização 2). A presença de carbonetos em lamelas e em rede favorece a reflexão, especialmente se estiverem em com grãos grandes ou em rede, sendo potencializadoras de falsas indicações. Os tratamentos de normalização e recozimento do aço B geraram grãos bastante grandes e heterogêneos, provavelmente devido ao tempo de permanência no forno. Também foi observada a presença de “clusters” de carbonetos, na amostra normalizada, que favorece a reflexão e a presença de falsas indicações.

Estatística de Valores Extremos

Análise estatística de valores extremos para o aço C

Inicialmente, foram obtidos os pirulitos das provas P1, P2 e P3 durante o refino secundário. Posteriormente, os pirulitos foram conformados, para evitar a presença de porosidades. Eles foram aquecidos a 850°C por 30 minutos e então deformados por martelamento, tendo sido reduzida a sua altura em 50% (inicialmente os pirulitos tinham cerca de 12 mm de altura). Posteriormente, foram cortados, embutidos e preparados conforme o procedimento padrão do laboratório metalúrgico. Na Figura 7 pode ser visualizada uma micrografia obtida para a prova P1, P2 e P3.

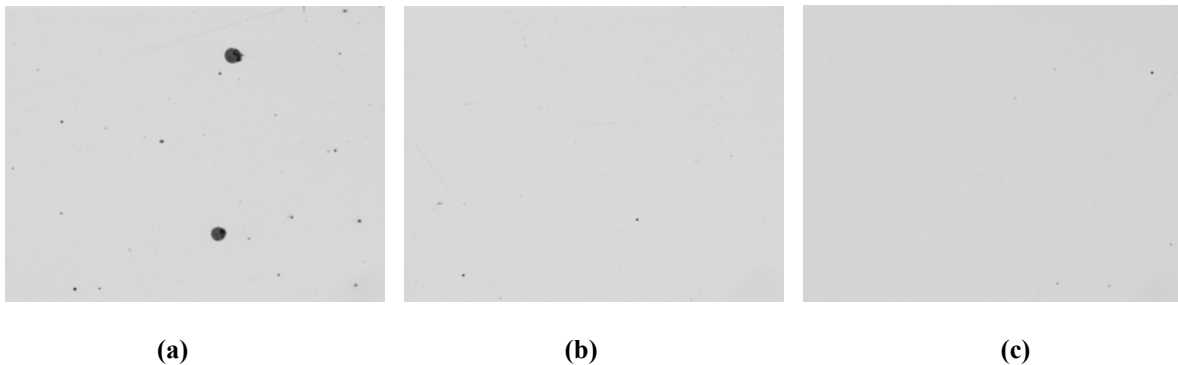


Figura 7 – Micrografia das provas P1 (a), P2 (b) e P3 (c), com magnificação de 75x. Observa-se a presença de inclusões esféricas de diversos tamanhos, com tendência a reduzir em tamanho e quantidade à medida que o processo de refino é executado.

O procedimento de varredura da amostra foi executado. Inicialmente, os parâmetros da motorização da platina foram ajustados. Apesar de nesta etapa serem utilizados os 24 maiores valores do diâmetro equivalente (*feret diameter*), foram analisados 32, pois existe a probabilidade de haver necessidade de se excluir campos de análise durante a varredura, devido presença de objetos que não devem ser analisados, porém não são distinguíveis para o analisador de imagens. O limite de detecção (*Threshold*) foi ajustado indo no menu *Detect* e ajustando-se a barra de rolagem, de maneira que com a iluminação empregada os objetos de interesse são realçados (em cor azul). O valor é do limite de detecção é anotado e será configurado na rotina *varredur.q5r*.

Após concluída esta etapa, a rotina “*varredur.q5r*” foi aberta. O emprego da rotina abre uma janela com a frase “Ajuste de foco” e o foco (visualizando-se na tela do computador) é ajustado manualmente no ajuste fino da platina do microscópio. Com um comando, é feita a detecção dos objetos dos objetos, com o “*threshold*” estabelecido (no caso 160) e aparece a janela “Aceita o campo”. Em caso positivo, os objetos são mensurados nos parâmetros de área, comprimento (*length*), largura (*breadth*), razão de aspecto (*aspect ratio*), circularidade (*roundness*) e diâmetro equivalente (*equivalent diameter*, ou *feret diameter*). O campo pode não ser aceito, devido a presença de objetos estranhos à análise, como riscos, sujeira ou poros, com a decisão sendo tomada pelo analista.

Os dados obtidos foram salvos em um arquivo com extensão *q5d*. Em seguida, o programa de análise de campos múltiplos, desenvolvido pela Unisinos, foi empregado

para fornecer o diâmetro do maior objeto em cada campo. O programa é de operação bastante simples. O arquivo de resultado de análise possui o nome do arquivo original acrescido do sufixo .TXT que pode ser aberto com o bloco de notas ou o Excel.

Os 24 maiores valores de diâmetro equivalente foram obtidos e ordenados em forma crescente. Posteriormente, é calculado pelo Solver do Excel os parâmetros de λ ML (parâmetro localizador) e δ ML (parâmetro de escala), pelo método de verossimilhança.. A planilha é automaticamente atualizada, e pode ser impresso o relatório de análise estatística de valores extremos do lote analisado. A Figura 8 representa os resultado da planilha. Pode-se observar que o máximo tamanho de inclusão previsto ($L_{m\acute{a}x}$) tende a decrescer das amostras P1 a P2 e pouca evolução da amostra P2 para a P3. Também a declividade do gráfico de tamanho de inclusão x log da área da amostra tende a ser menor, ressaltando o efeito da limpeza do aço.

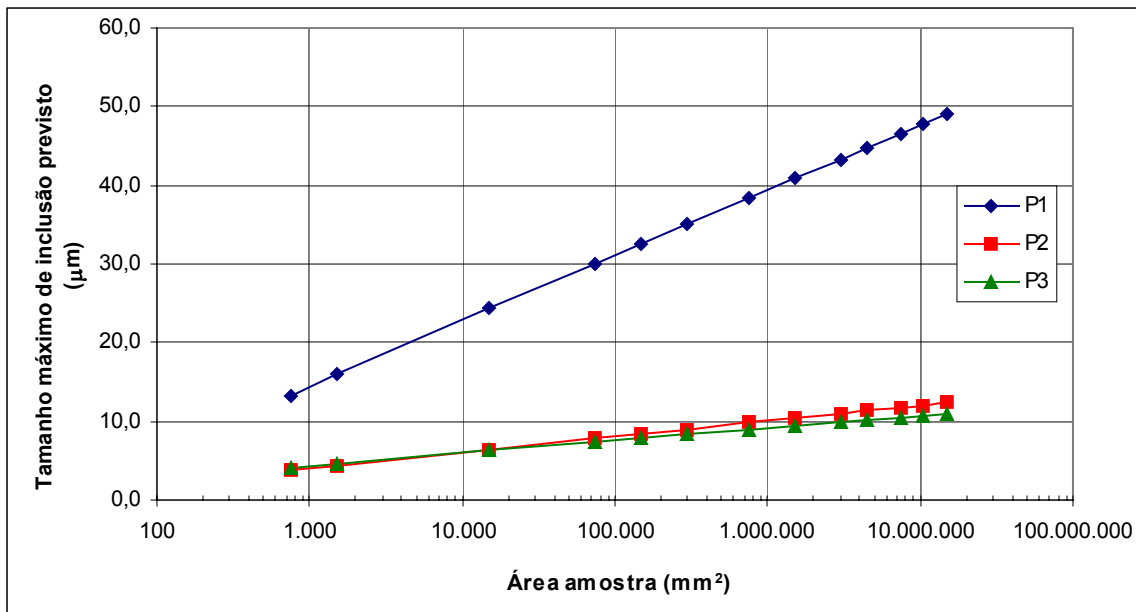


Figura 8: Tamanho máximo de inclusão previsto versus área da amostra, para as provas P1, P2 e P3.

CONCLUSÕES

A partir dos resultados da aplicação das 3 técnicas de caracterização de aços, pode-se fazer as seguintes considerações finais:

- Com relação ao desenvolvimento da técnica de análise de imagem de amostras caracterizada em microscópio ótico para uso on-line na liberação de produtos, permite que um analista faça a varredura de grandes áreas de amostras de forma quantitativa e obtenha os dados de forma rápida. Para tanto, devem ser empregados o programa de campos múltiplos desenvolvido e a rotina varredur.Q5R.
- Quanto à técnica de ultra-som, aspectos relacionados à influência do diâmetro da amostra, da microestrutura e do acabamento superficial foram investigados. A menor probabilidade de falsas indicações parece estar relacionada com menores diâmetros (abaixo de 40 mm), microestrutura fina, homogeneamente distribuída e com grãos mais arredondados e rugosidade superficial $R_{m\acute{a}x}$ abaixo de 7 μ m, que é facilmente obtida através da seleção correta de parâmetros de corte.

- A metodologia para análise estatística de valores extremos foi obtida e aplicada em um aço C a partir de amostras de pirulitos nas provas P1, P2 e P3, e demonstrou a evolução da eficácia da limpeza no decorrer do processo de fabricação. Foi desenvolvida uma planilha que fornece os resultados de saída conforme solicita a norma ASTM E2283⁽⁸⁾ (normaliza a seqüência de cálculos para a estatística de valores extremos), de maneira a garantir o atendimento aos requisitos da norma. A metodologia desenvolvida amplia o leque de aplicação, podendo ser empregada para prever o tamanho máximo de inclusões em aços sólidos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa GERDAU Unidade Aços Especiais Piratini pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- 1 RADTKE, M.; MAURICIO, M. H. de P.; AVILLEZ, R. R. de; PACIORNIK, S. Caracterização automática de inclusões em aços por análise digital de imagens. 61º Congresso Anual da ABM. São Paulo, 2006. v. 1. p. 1315-1323.
- 2 BLESSING, G. V ., BAGLEY, P.P. e JAMES, J . E. The effect of surface roughness on ultrasonic echo amplitude in steel, Ultrasonics Symposium, 1983.
- 3 AVILLEZ, R. et al. Rede de termodinâmica computacional aplicada ao desenvolvimento de materiais avançados: inclusões em aços. 61º Congresso Anual da ABM, 2006. p. 1247 – 1253.
- 4 ASTM E45-05e1. Standard test methods for determining the inclusion content of steel. ASTM International, 1997. 15 p.
- 5 BERETTA, S.; ANDERSON, C.; MURAKAMI, Y.; Extreme value models for the assessment of steels Containing multiple types of inclusion, Acta Materialia 54 (2006) 2277–2289.
- 6 ANDERSON C.W. ; DE MARE, J; ROOTZE´N H. Methods for estimating the sizes of large inclusions in clean steels. Acta Materialia 53 (2005) 2295–2304.
- 7 BAUTISTA, E. L.; A. distribuição generalizada de valores extremos no estudo da velocidade máxima do vento em Piracicaba, SP, Dissertação de Mestrado, USP, 2002.
- 8 ASTM E2283-03. Standard practice for extreme value analysis of nonmetallic inclusions in steel and other microstructural features. ASTM International.
- 9 ASTM E1122-96. Practice for Obtaining JK Inclusions Rating Using Automatic Inclusion Analysis. ASTM International, 2002, 8 p.
- 10 ASTM E178-02. Practice for dealing with outlying observations. ASTM INTERNATIONAL. ASTM International, 1994, 17p.
- 11 BLESSING, G. V ., BAGLEY, P.P. e JAMES, J . E. The effect of surface roughness on ultrasonic amplitude in steel. Ultrasonics Symposium, 1983.