

# CLASSIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE INCLUSÕES EM AÇO

**Aluno: Aline Christina Stein Cechin**

**Orientador: Sidnei Paciornik**

## **Introdução – Princípios de Classificação de Inclusões**

O principal objetivo do projeto é desenvolver metodologia para automatizar o procedimento de classificação de inclusões em aços. Tradicionalmente, duas normas da ASTM são utilizadas como referência para este tipo de classificação:

- A norma E-45 – “Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steels” [i] – estabelece os procedimentos de classificação manual, em muitas das vezes baseados na técnica de comparação de quadros (“chart comparison”), na qual o observador obtém uma imagem da amostra ao microscópio e a compara com quadros de referência que contém exemplos esquemáticos dos diversos tipos de inclusão.
- A norma E-1122 – “Standard Practice for Obtaining JK Inclusion Ratings Using Automatic Image Analysis” [ii] – estabelece métodos quantitativos, baseados em análise digital de imagens, para identificar e classificar inclusões em imagens. Busca-se, neste caso, tornar o processo menos dependente da influência do operador humano.

Em ambos os casos acima, busca-se realizar a classificação de inclusões segundo os seguintes critérios:

- Tipo de Inclusão – dividindo as inclusões nos tipos A (Sulfetos), B (Alumina), C (Silicatos) e D (Óxidos).
- Formação de “stringers” – seqüências de inclusões alinhadas na direção de laminação, com espaçamento máximo definido pela norma, e que devem ser tratadas como um único objeto. Esta definição não se aplica às inclusões do tipo D.
- Espessura ou diâmetro das inclusões ou “stringers” – separando em séries grossa ou fina, com limites diferentes por tipo de inclusão.
- Severidade – uma medida da densidade de inclusões em cada campo. Esta medida é obtida, em cada campo, a partir do comprimento total dos “stringers”, para inclusões dos tipos A, B e C, e a partir da contagem de inclusões, para o tipo D.

Os dois pontos mais críticos, dentro os citados acima, são a identificação do tipo de inclusão e a formação dos “stringers”. A norma E-1122 propõe, inicialmente, separar inclusões do tipo A, que apareceriam com tonalidades mais claras que inclusões dos demais tipos. Em seguida, identificar inclusões do tipo C pela forma alongada, em contraposição à forma mais equiaxial das inclusões dos tipos B e D. Supondo que estes passos sejam bem sucedidos, é necessário agrupar inclusões que pertençam ao mesmo “stringer”, de forma a permitir a classificação nas séries grossa ou fina e, finalmente, medir o comprimento total, que leva à medida de severidade.

Fica bem evidente, a partir destas definições, que o processo de classificação pode ser muito dependente do operador, e uma solução automática seria bem-vinda.

### 1 Treinamento Baseado em Imagens de Referência

O primeiro passo do desenvolvimento da metodologia foi digitalizar, com alta resolução, o quadro de referência da norma E-45, que contém figuras para os 4 tipos, séries fina e grossa e 6 níveis de severidade (de 0,5 a 3,0, com passo de 0,5), em um total de 48 figuras. A partir das imagens digitais, foram desenvolvidas diversas rotinas de processamento e análise de imagens buscando automatizar a classificação. Como as imagens do quadro apresentam calibração precisa das dimensões x-y e também contém medidas manuais das severidades, elas se constituem em ótima referência para calibração das rotinas automáticas. A Figura 1 mostra um subconjunto das figuras do quadro para os 4 tipos, série grossa, e severidade de nível 3.

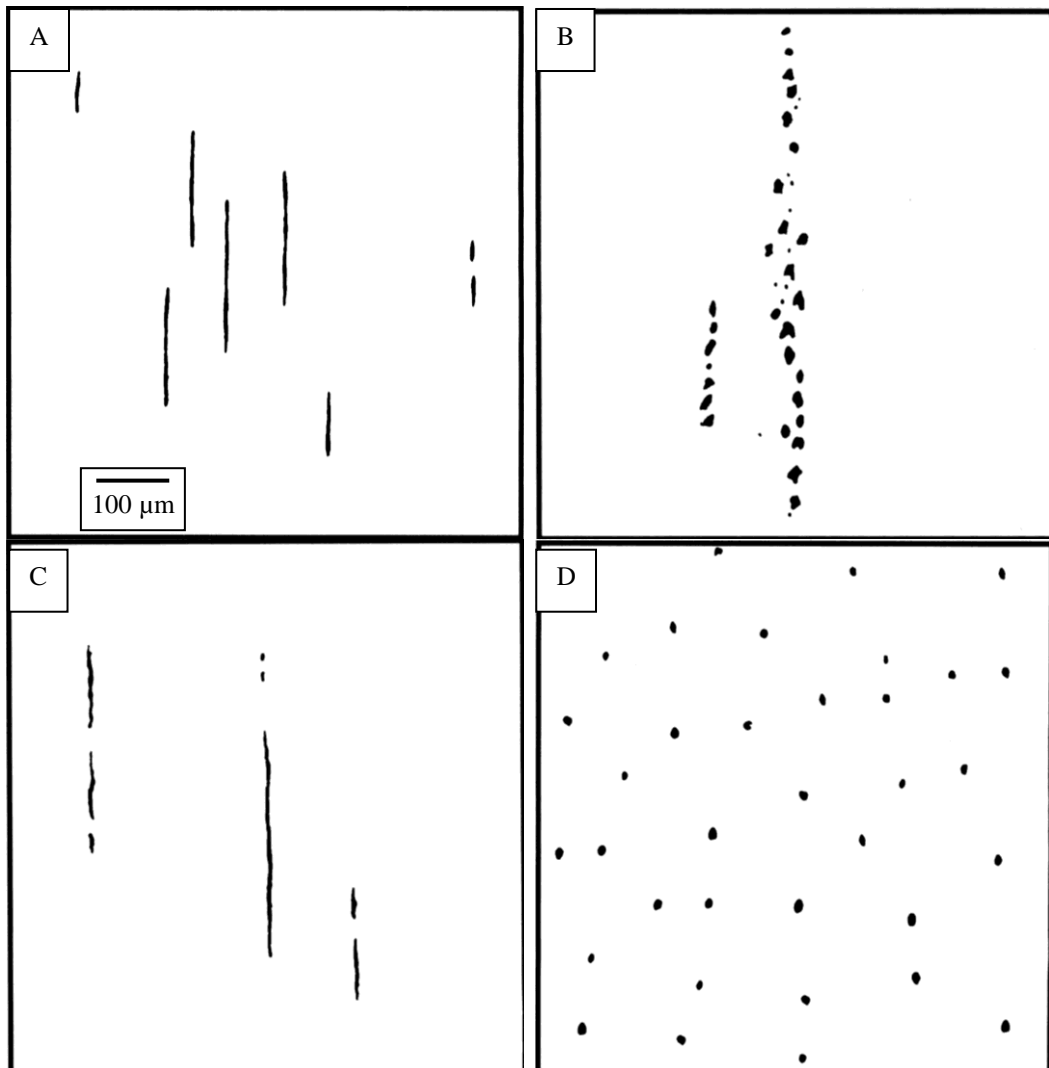


Figura 1 – Imagens digitalizadas do quadro de referência da norma ASTM E-45. Tipos A, B, C e D, série grossa.

## 1.1 Imagens de referência com tipos e espessuras separados

### 1.1.1 Construção de “stringers” e medidas de severidade

As 48 figuras foram processadas separadamente visando, inicialmente, medir as severidades através da análise de imagens e comparar com os valores informados na norma.

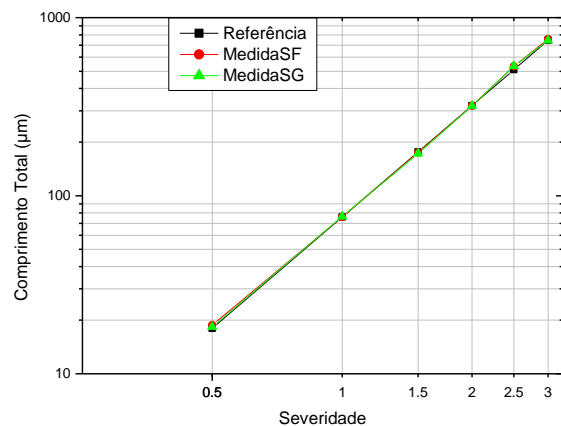
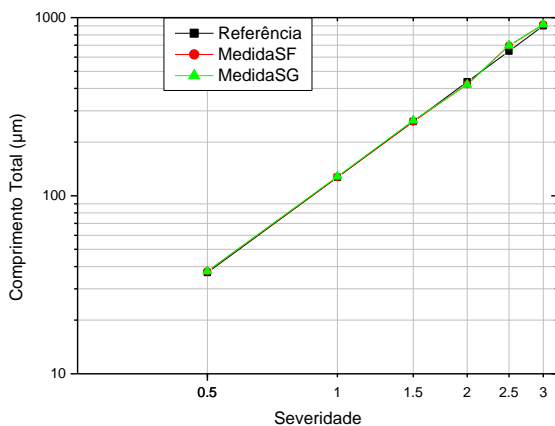
O tratamento das imagens do tipo D é trivial, uma vez que implica apenas em uma contagem do número de objetos. O tratamento do tipo A também é relativamente simples, uma vez que a severidade depende apenas do comprimento total de inclusões no campo.

Já o tratamento para os tipos B e C é mais complexo porque exige, primeiro, associar inclusões que formam “stringers” para então medir o comprimento total, que fornece a severidade. A norma estabelece definições claras para a concatenação de inclusões em um “stringer”.

Desta forma, desenvolveu-se um grupo de rotinas dentro do software KS400 (Carl Zeiss Vision) que processam imagens de cada tipo, discriminam as inclusões, impõem condições de dilatação controlada ao longo da direção de alinhamento de forma a conectar componentes de cada “stringer”, quando necessário, e realizam as medidas de comprimento total. Por exemplo, para o tipo C, duas inclusões devem ser incluídas em um único “stringer” se a distância entre elas, ao longo da direção de alinhamento, for  $\leq 40 \mu\text{m}$ .

A Tabela 1 e os gráficos da Figura 2 mostram os resultados obtidos para os tipos A e C. **Tabela 1 – Medidas de severidade obtidas por análise de imagens comparadas com medidas da norma – Tipos A e C**

Severidade	Classe A			Classe C		
	Valor de Referência	Valor Medido Série Fina	Valor Medido Série Grossa	Valor de Referência	Valor Medido Série Fina	Valor Medido Série Grossa
0.5	37.0	37.57	37.57	18.0	18.8	18.4
1.0	127.0	127.23	128.08	76.0	76.0	76.4
1.5	261.0	260.86	264.7	176.0	174.6	172.5
2.0	436.0	422.67	420.11	320.0	320.2	319.4
2.5	649.0	696.76	696.34	510.0	532.4	533.7
3.0	898.0	914.93	916.64	746.0	758.7	744.2



**Figura 2 – Gráficos comparativos entre valores de referência da norma e valores obtidos por análise de imagens para as séries fina (SF) e grossa (SG) dos tipos A e C.**

Pode-se notar que as medidas obtidas por análise de imagens são acuradas, com erro máximo de 7,3% para o tipo A e 4,6% para o tipo C. Estas discrepâncias podem ser causadas por pequenos erros de calibração, distorções durante a digitalização, ou até mesmo por erros nas medidas de referência, que foram realizadas pelos métodos manuais tradicionais.

As medidas de severidade para o tipo B são mais difíceis porque a definição para formação de “stringers” é mais complexa. Os “stringers” são formados por ao menos 3 inclusões alinhadas ao longo do eixo de laminação, que devem estar a  $\pm 15 \mu\text{m}$  do ponto médio do “stringer” formado. Além disso, diferentemente das inclusões dos tipos A e C, que são alongadas ao longo do eixo de laminação, as inclusões do tipo B são objetos equiaxiais e angulosos. Desta forma, identificar seu eixo de alinhamento não é evidente, o que exige algumas etapas a mais de processamento, listadas a seguir:

- Determinação do retângulo envolvente [iii] de cada inclusão, alinhado com os eixos x-y. Este passo é realizado no plano gráfico, independente da imagem. Em seguida, o plano gráfico é incorporado à imagem, gerando um retângulo parcialmente preenchido pela inclusão que o originou.
- Preenchimento da área vazia remanescente no retângulo envolvente utilizando uma operação morfológica. Este passo transforma cada inclusão em um retângulo “bem comportado”, alinhado com os eixos x e y da imagem.
- Aplicação de uma operação morfológica de dilatação com elemento estruturante horizontal [iv]. Este passo alarga de maneira regular cada retângulo gerado no passo anterior. Este processo visa compensar eventual desalinhamento entre inclusões ao longo do eixo vertical, fazendo com que, no passo seguinte, possam ser identificadas como pertencentes ao mesmo “stringer”.
- Finalmente, aplica-se o critério da norma para concatenação de inclusões em “stringers”. Para isso, realiza-se uma operação morfológica de fechamento (dilatação seguida de erosão) com elemento estruturante vertical [iv] e número de passos calculado através da distância entre inclusões estabelecida na norma.

A Figura 3 mostra o resultado obtido. As inclusões originais são mostradas em vermelho, enquanto os “stringers” formados pelo processamento da imagem são mostrados em branco.

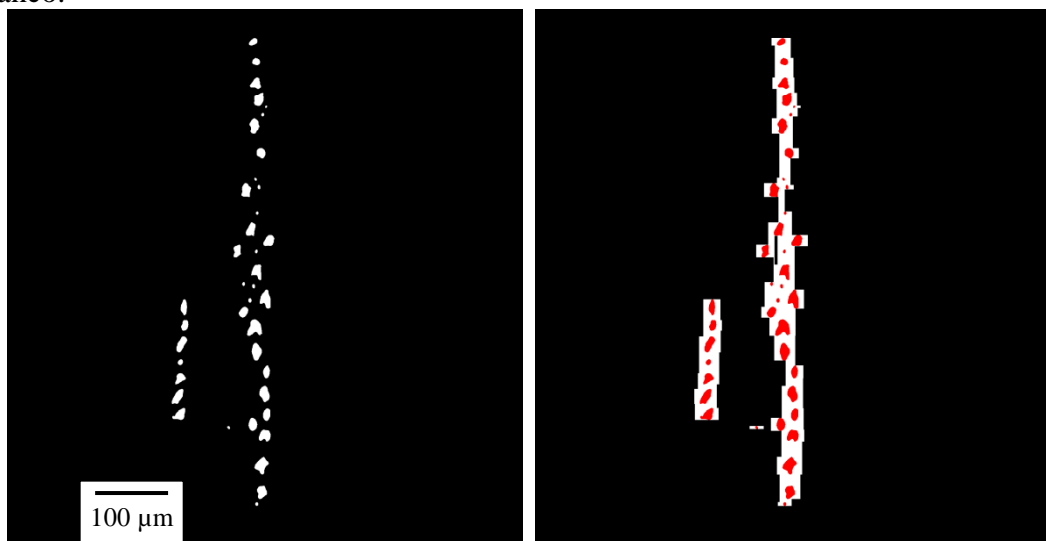
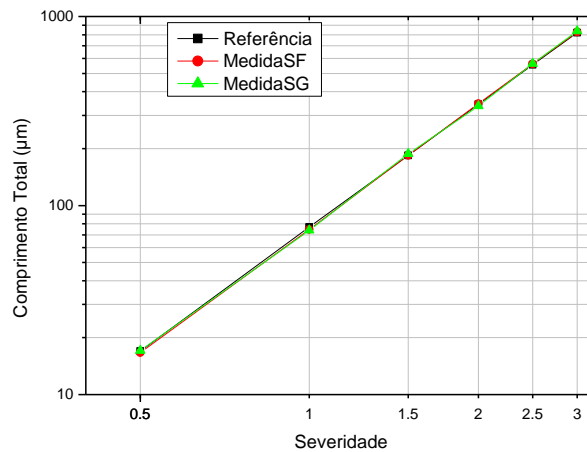


Figura 3 – Imagem original e processada de inclusões do tipo B, série grossa, severidade 3.

A partir da formação dos “stringers” foi possível medir seu comprimento total. A Tabela 2 e a Figura 4 mostram os resultados obtidos.

**Tabela 2 – Medidas de severidade obtidas por análise de imagens comparadas com medidas da norma – Classe B**

Severidade	Classe B		
	Valor de Referência	Valor Medido Série Fina	Valor Medido Série Grossa
0.5	17.0	16.65	17.08
1.0	77.0	74.71	73.86
1.5	184.0	184.01	187.43
2.0	343.0	353.08	336.00
2.5	555.0	563.56	565.27
3.0	822.0	828.26	837.23

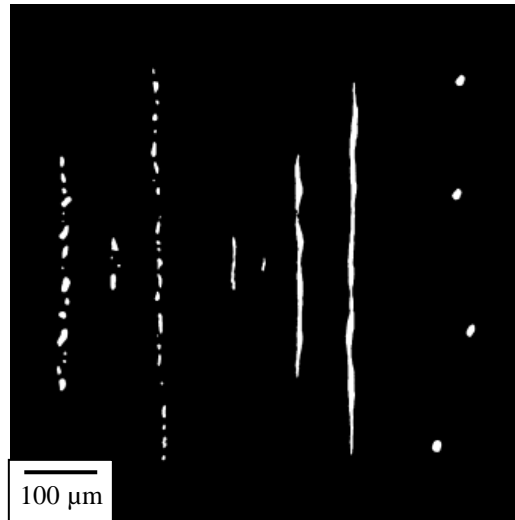


**Figura 4 – Gráfico comparativo entre valores de referência da norma e valores obtidos por análise de imagens para as séries fina (SF) e grossa (SG) do tipo B.**

O maior erro encontrado foi de 4% para a série grossa e severidade 1, novamente mostrando o sucesso da rotina desenvolvida.

## 1.2 Imagens de Referência Contendo Misturas de Tipos e Espessuras

Os testes descritos na seção anterior são simplificados pelo fato de que cada imagem contém apenas inclusões de um tipo e espessura. Visando se aproximar de uma situação mais realista, as imagens de referência foram combinadas de forma a possuírem inclusões de diferentes tipos e espessuras (Figura 5). Foram utilizadas as imagens de referência do tipo B com severidades 1,0, 2,0 e 2,5, do tipo C com severidades 0,5, 1,20, 2,0 e 2,5 e do tipo D com severidade 1,0.



**Figura 5 – Imagem sintética contendo inclusões dos tipos B, C e D oriundas de campos com diferentes severidades e espessuras.**

### **1.2.1 Identificação dos tipos de inclusões**

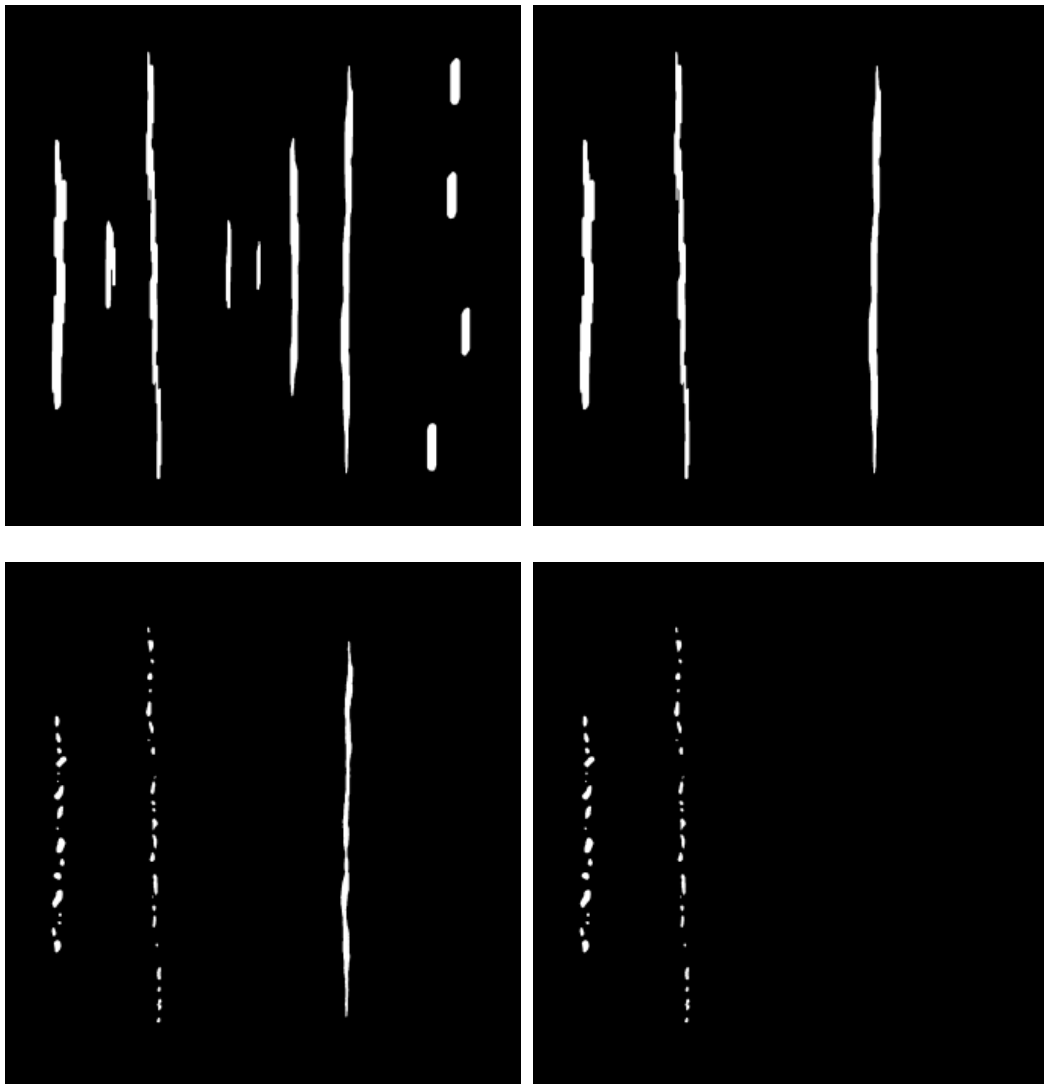
Em seguida, uma rotina de processamento de imagens foi desenvolvida para distinguir inclusões a partir de seu tipo (A, B, C, D). A rotina se baseia nas variações de forma das inclusões ou dos “stringers” formados, conforme descrito na seção anterior. A rotina segue os seguintes passos:

1. Separação das inclusões do tipo A.
2. Separação das inclusões do tipo B – severidade alta  $\geq 2,0$ .
3. Separação das inclusões do tipo C (menos as inclusões C 0,5).
4. Separação das inclusões do tipo B – severidade baixa  $< 2,0$ .
5. Separação das inclusões do tipo C 0,5 das inclusões do tipo D.
6. União das inclusões do tipo B.
7. União das inclusões do tipo C.

Os passos são detalhados a seguir:

1. Separação das inclusões tipo A pela tonalidade.  
De acordo com a norma, esta separação deveria ser feita a partir da tonalidade mais clara apresentada pelos sulfetos (tipo A) em comparação com os outros tipos. No entanto, como o quadro de referência apresenta imagens em preto e branco, não foi possível realizar esta separação nesta etapa. No entanto, ela será factível em imagens de amostras reais.
2. Foi realizada uma dilatação das inclusões para que as do tipo B fossem facilmente distinguidas das do tipo D e das outras inclusões ou stringers de severidade baixa. Utilizando o comprimento vertical do tipo B 2,0 dilatado como o limiar para eliminação de objetos na imagem, foram separadas as inclusões do tipo B  $\geq 20$  e as inclusões do tipo C suficientemente compridas. Em seguida foi realizada uma interseção entre a imagem inicial e a originada anteriormente para que as inclusões do tipo B retornassem a seu formato original. Depois, foi estabelecida a inclusão do tipo C 1,0 como referência para a

eliminação de objetos. Desta forma, obteve-se apenas as inclusões do tipo B com severidade  $\geq 2,0$ . Veja Figura 6.



**Figura 6 – Imagens processadas no segundo passo. a) Após a dilatação. b) Tipo B dilatado e C. c) Tipo B em sua forma original e C. d) Inclusões do tipo B  $\geq 20$ .**

3. Utilizando novamente o tamanho da inclusão do tipo C 1,0 como referência, foram separadas todas as inclusões do tipo C, exceto aquelas de severidade 0,5. Veja Figura 7.
4. Com o mesmo propósito do segundo passo, foram dilatadas as inclusões e estabelecido um valor limite um pouco menor que a inclusão B 10 dilatada para o novo corte. Assim feito, foi realizada uma interseção entre a imagem anterior e a recentemente formada. Formando uma imagem separada das inclusões do tipo B  $< 20$ . Veja Figura 8.

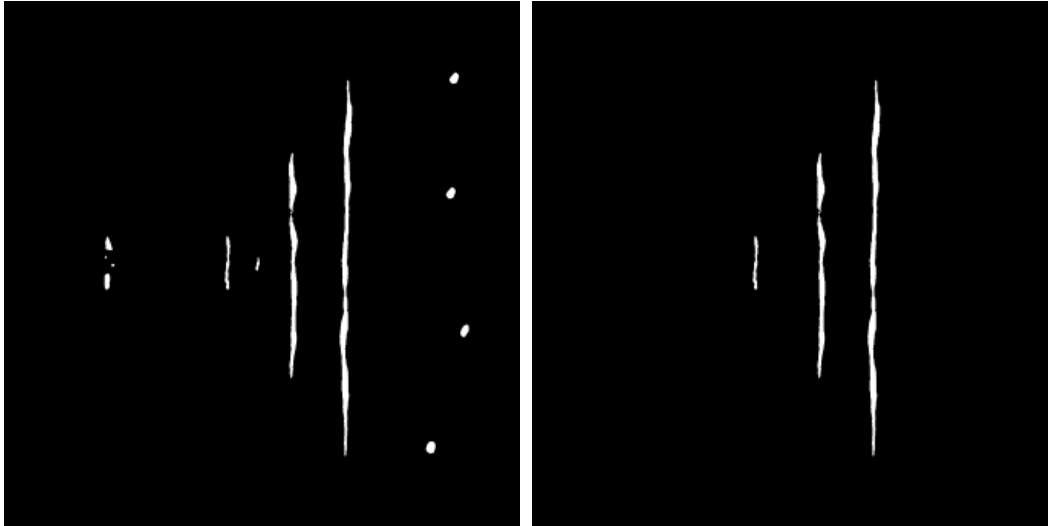


Figura 7 – a) Resultado de (Figura 5 - Figura 6d). b) Imagem processada no terceiro passo – inclusões tipo C>0,5.

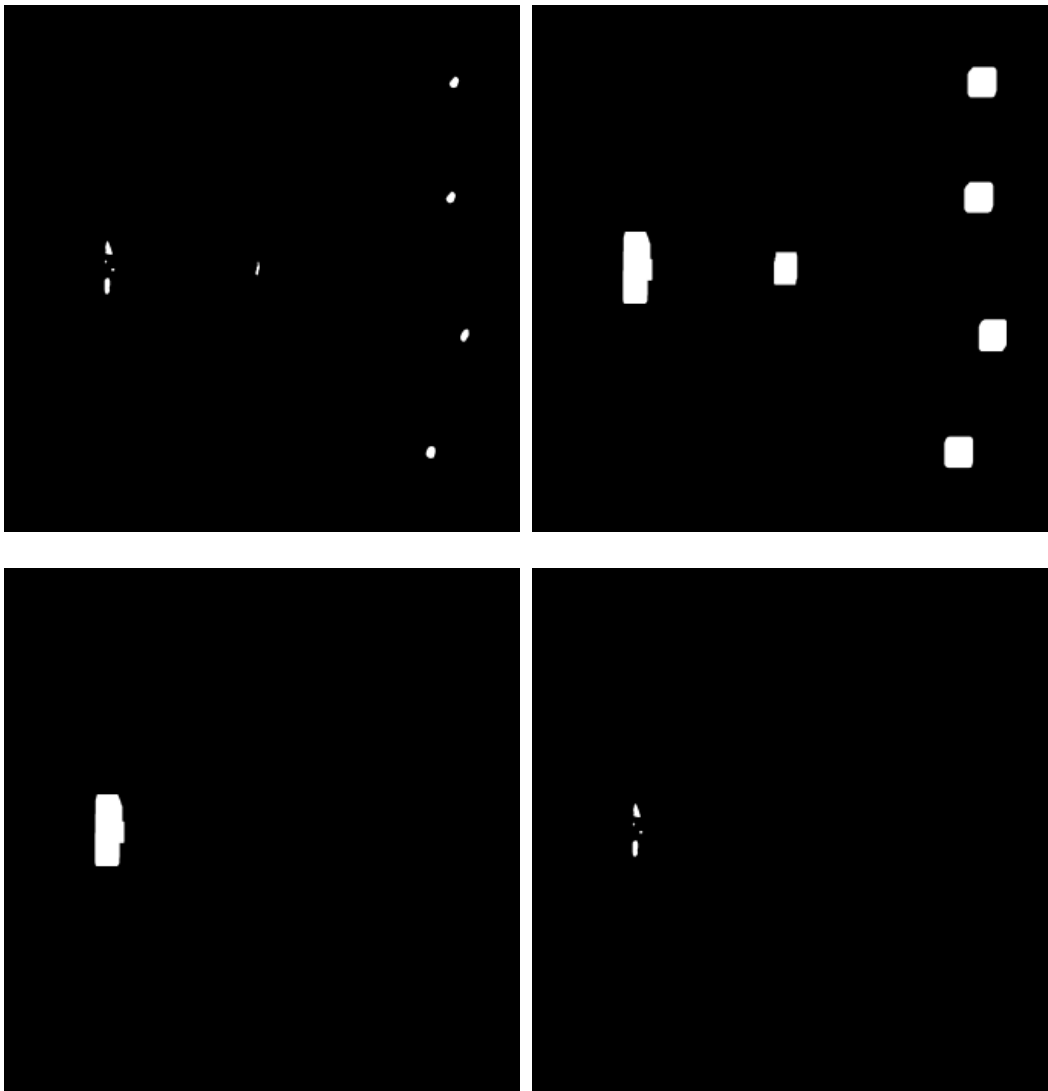
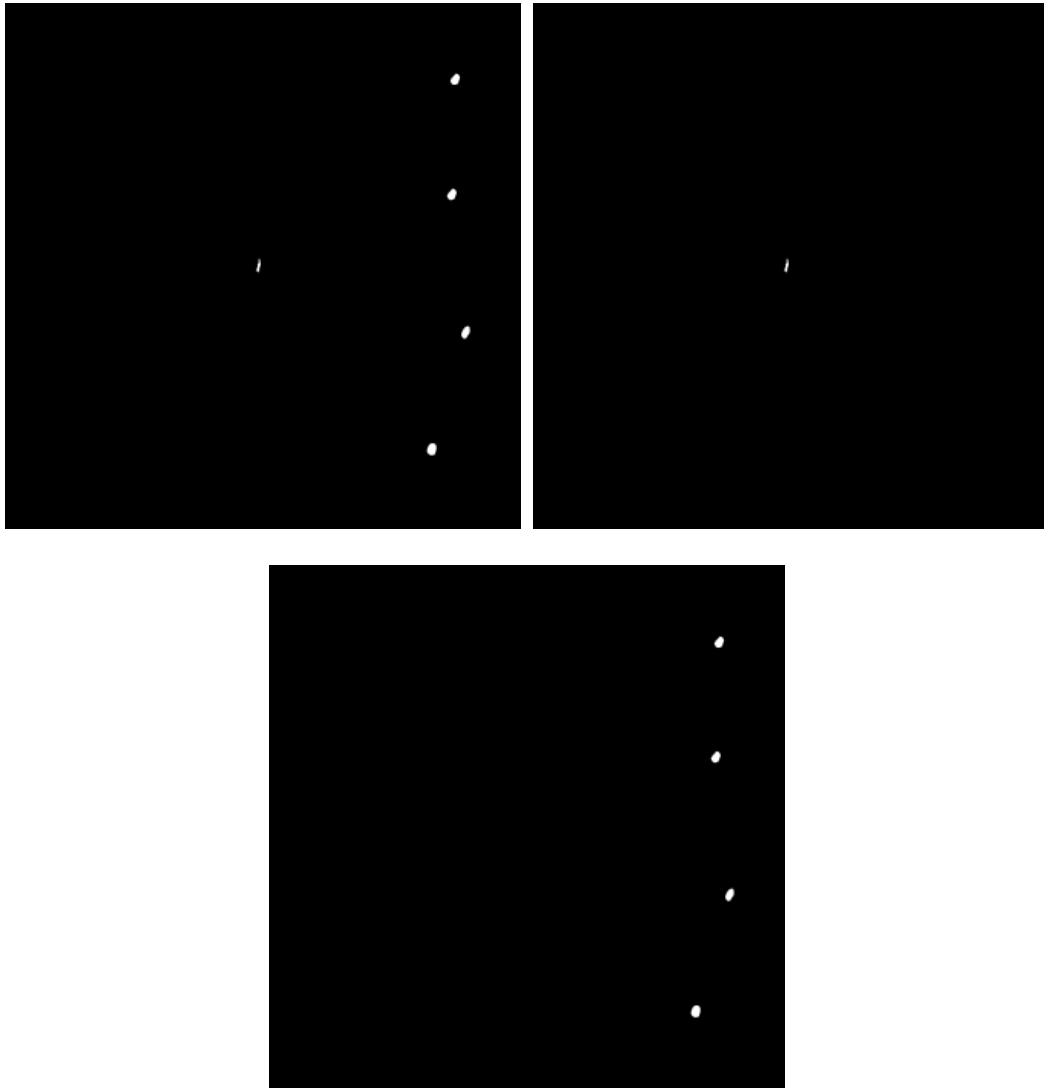


Figura 8 – a) Resultado de (Figura 7a - Figura 7b). b) Após a dilatação. c) Tipo B dilatado. d) Inclusões do tipo B<20.

- Como o formato das inclusões do tipo C é mais alongado que as do tipo D, foi utilizada a condição razão de aspectos para separar as inclusões do tipo C severidade 0,5 das do tipo D. Veja Figura 9.



**Figura 9 – a) Resultado de (Figura 8a - Figura 8d). b) Inclusões tipo C=05. c) Inclusões tipo D.**

- Realizando a união entre as imagens obtidas no segundo e quarto passos, tem-se uma única imagem com todas as inclusões do tipo B. Veja a Figura 10a.
- Realizando a união entre as imagens obtidas no terceiro e quinto passos, tem-se uma única imagem com todas as inclusões do tipo C. Veja a Figura 10b.

O resultado final da sequência descrita acima é apresentado na Figura 11, onde cada tipo de inclusão discriminada é apresentado em uma cor.

Os resultados correspondem exatamente aos tipos originais utilizados para criar a imagem sintética, mostrando o sucesso do algoritmo. O método foi aplicado a diversas outras imagens sintéticas, com o mesmo sucesso.

Após a separação de tipos, foi feita a classificação de acordo com a espessura e o cálculo da severidade.

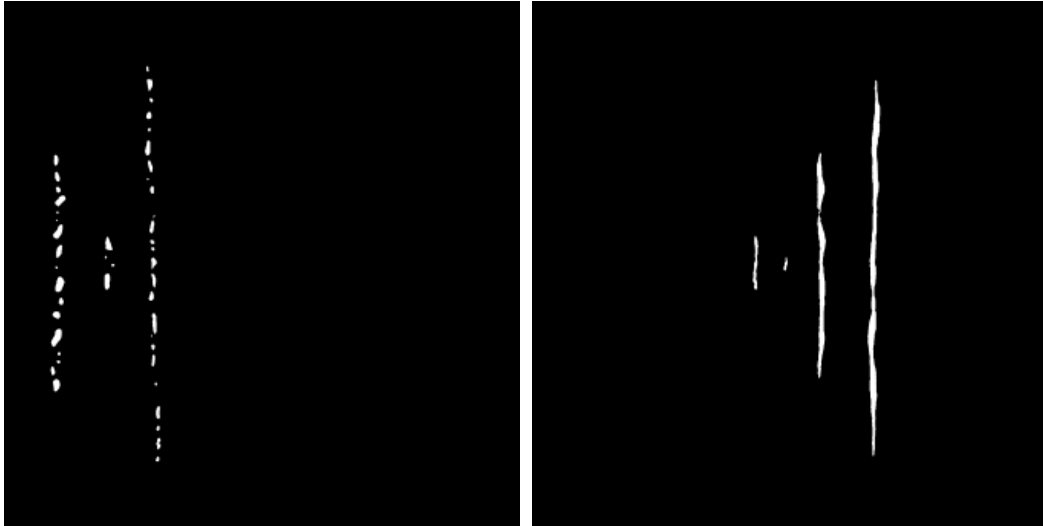


Figura 10 – a) Imagem contendo todas as inclusões tipo B. b) Imagem contendo todas as inclusões tipo C.

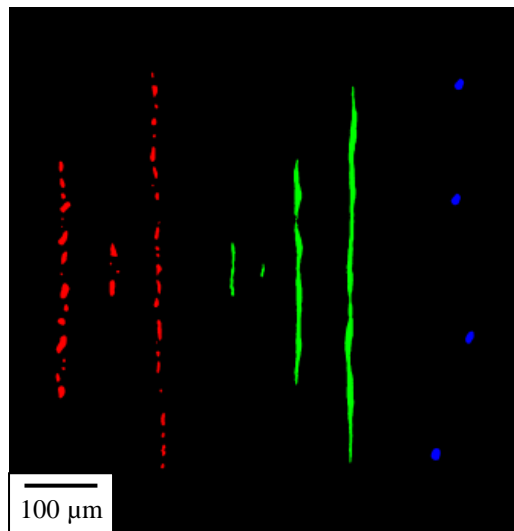
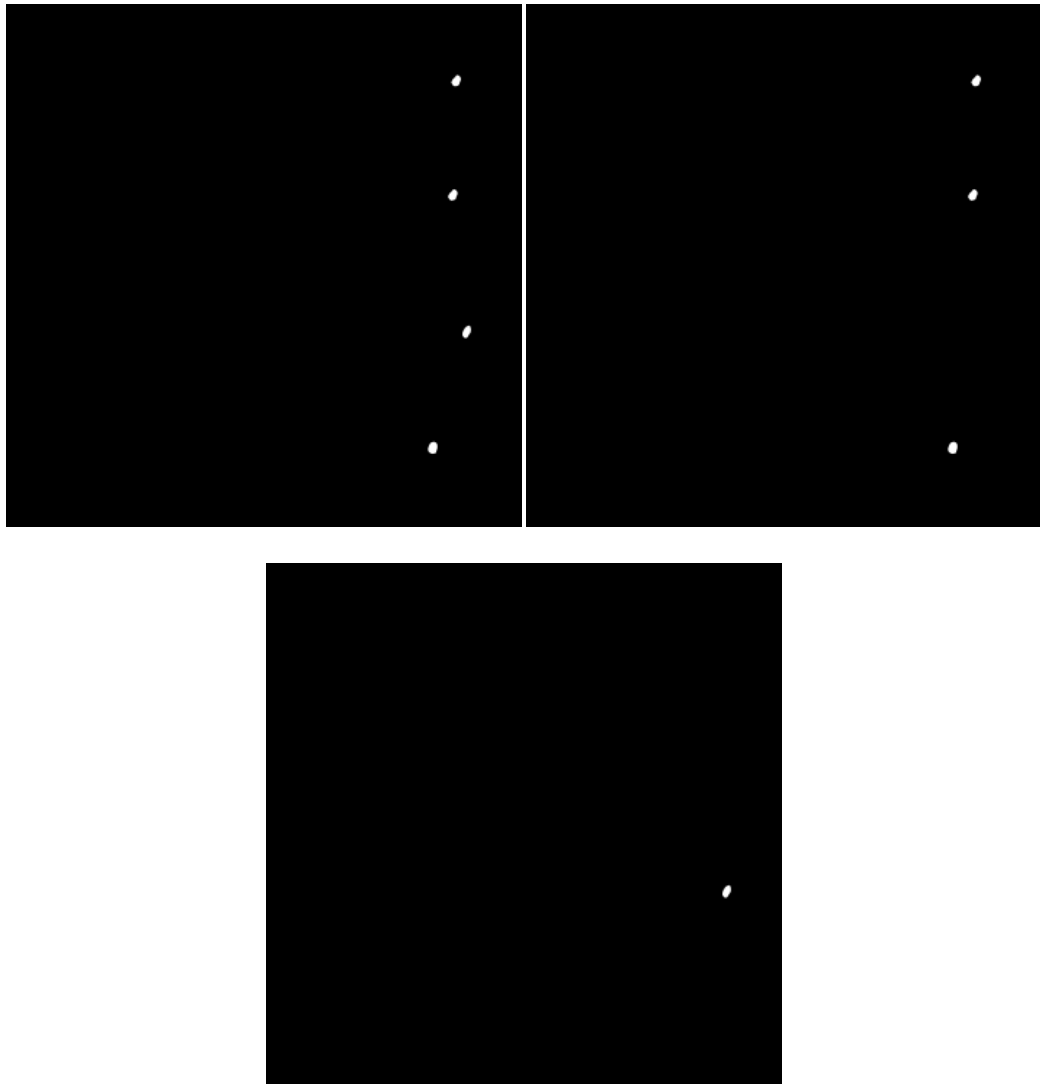


Figura 11 – Resultado do processamento da imagem para a separação de tipos. Tipo B- vermelho. Tipo C- verde. Tipo D- azul.

### 1.2.2 Classificação de acordo com a espessura

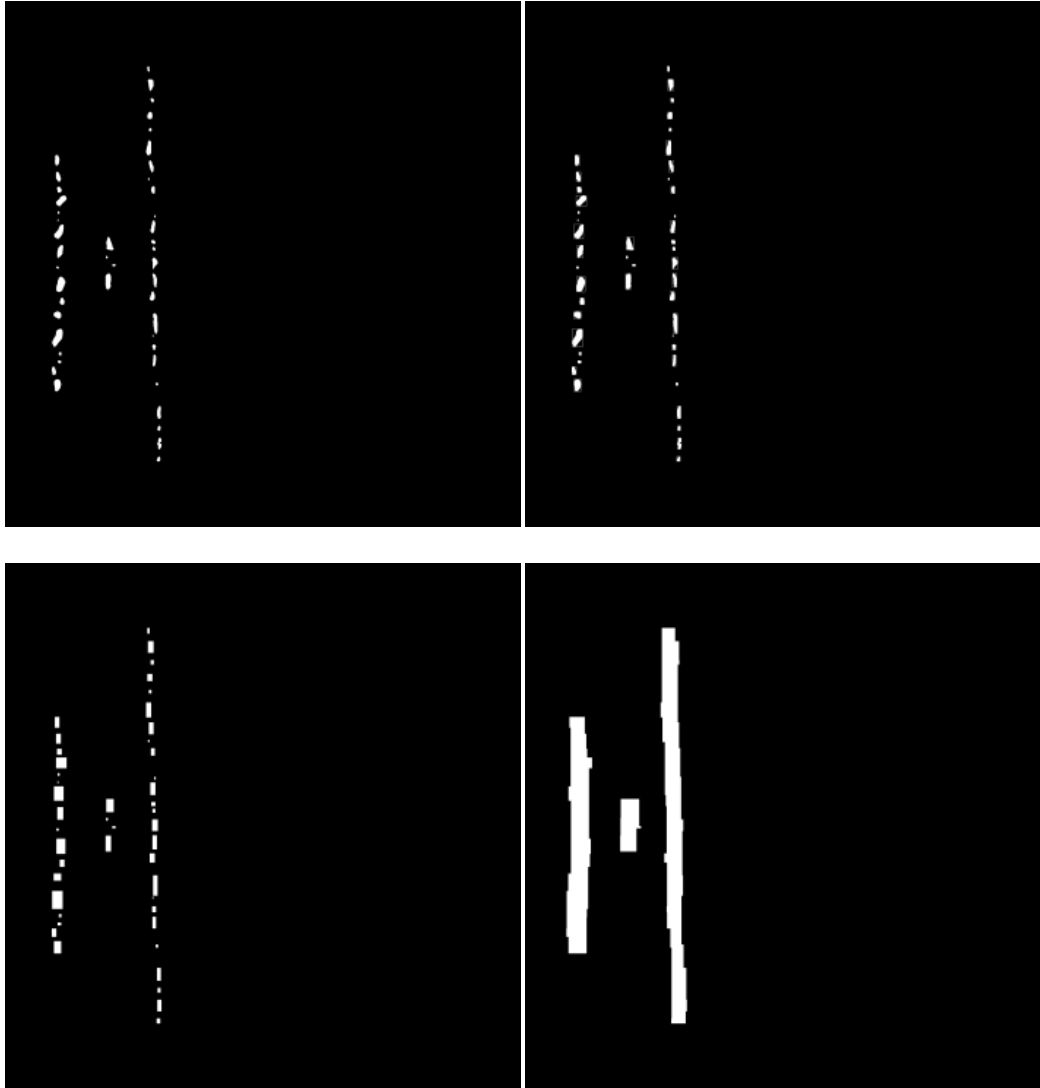
Para os Tipos A e D a classificação por espessura é bem simples já que não depende da formação de “stringers”. A norma apenas estabelece as faixas de espessura para as classes fina e grossa. Assim, basta medir, para cada inclusão, sua projeção no eixo x (também conhecida como calibre x ou “feret” x [iii]), e comparar com as faixas da norma. Veja a classificação do Tipo D na Figura 12.



**Figura 12 – Classificação do Tipo D de acordo com a espessura. a) Inclusões Tipo D. b) Inclusões finas. c) Inclusões grossas.**

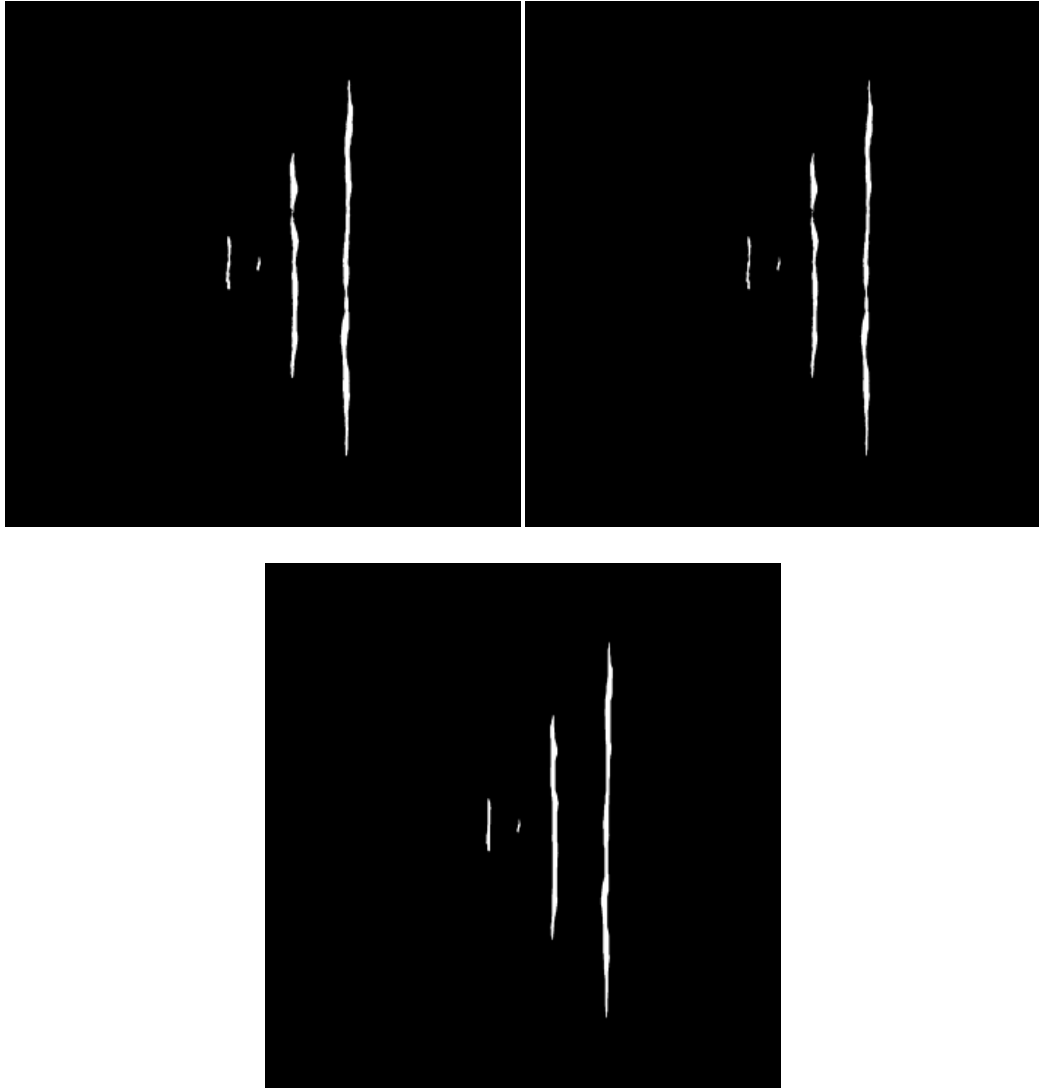
Já para os Tipos B e C a classificação de espessura se aplica a cada “stringer”. Por outro lado, a espessura final atribuída a um “stringer”, grossa ou fina, depende do comprimento somado das inclusões de cada espessura naquela “stringer”. Se o comprimento somado das inclusões finas é mais do que 50% do comprimento total, o “stringer” é classificado como fino. Caso contrário, é classificado como grosso. Portanto, foi necessário primeiro construir os “stringers”, conforme descrito anteriormente.

A Figura 13 mostra a sequência para as inclusões do tipo B identificadas na imagem sintética na seção anterior.



**Figura 13 – Identificação dos “stringers” Tipo B. a) Inclusões Tipo B. b) Cada elemento envolvido por um retângulo. c) Retângulos preenchidos. d) Dilatação horizontal e fechamento vertical.**

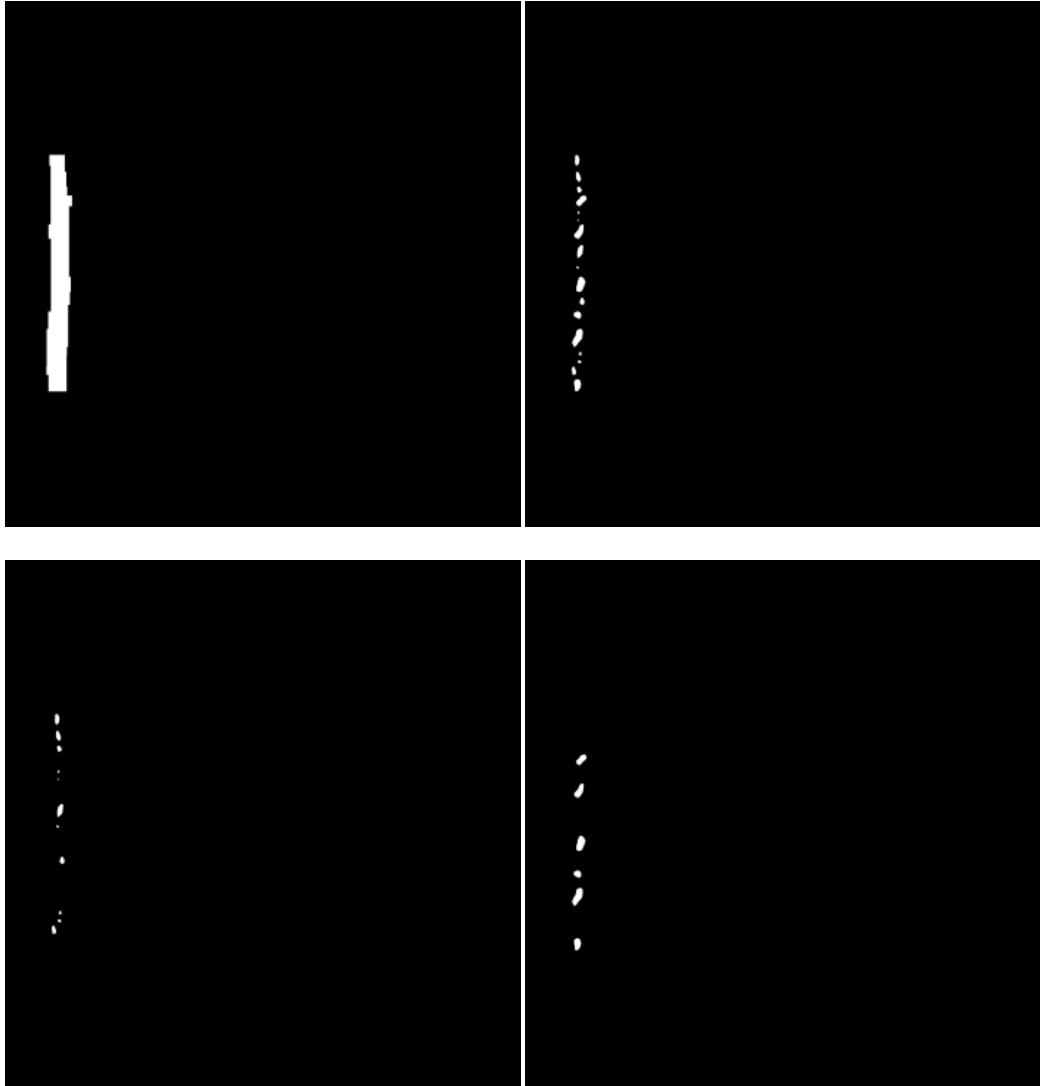
Para as inclusões do Tipo C é necessário, inicialmente, realizar uma erosão [iv] na direção horizontal, que afina cada inclusão e reduz pequenas irregularidades do contorno. Este processo torna mais robusta a etapa seguinte, de fechamento morfológico na vertical, que concatena as inclusões em seus respectivos “stringers”. Veja a Figura 14. Nesta figura, o resultado da erosão é pouco visível.



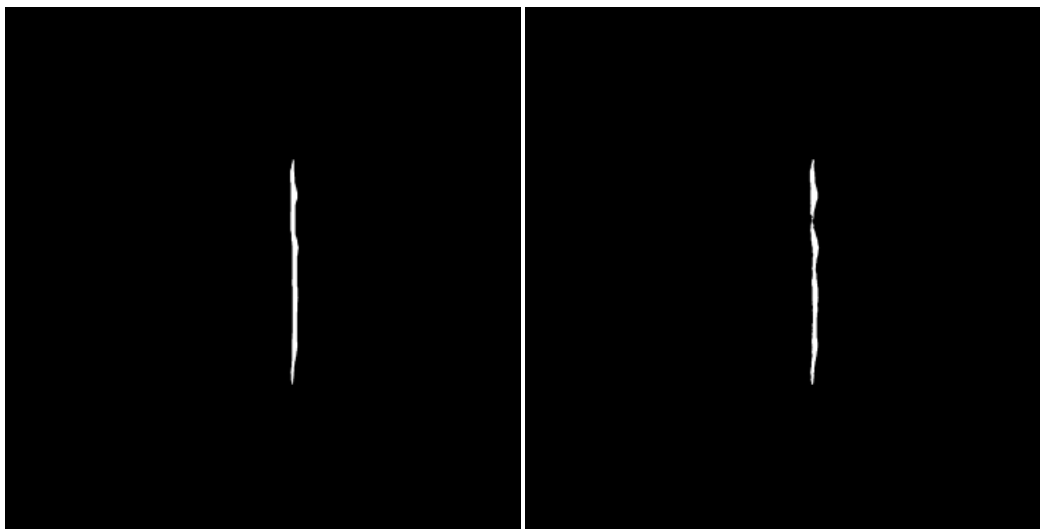
**Figura 14 – Identificação dos “stringers” Tipo C. a) Inclusões Tipo C. b) Erosão derradeira. c) Fechamento vertical.**

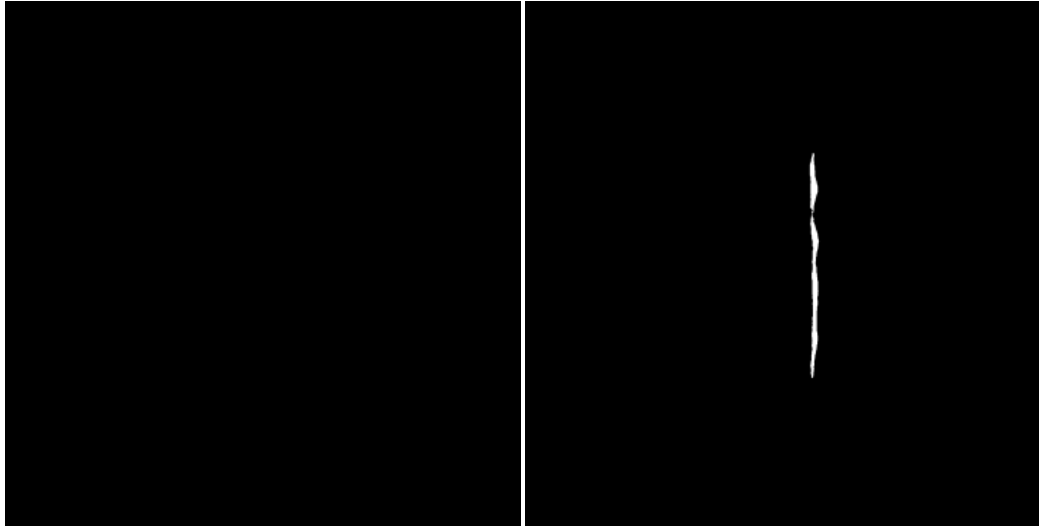
Identificados os “stringers”, foi necessário avaliar a espessura de cada inclusão de cada um dos “stringers”, tanto para o Tipo B quanto para o Tipo C. Para isso, realizou-se um “looping” para cada stringer, com um número de passos dado pelo número de inclusões que compõe aquele “stringer”.

Em cada passo do looping, mede-se a espessura de uma inclusão, compara-se com a faixa de valor especificada pela norma, e o resultado é acumulado, separadamente, para inclusões finas e grossas. Aquele que tivesse o maior comprimento era o que caracterizaria o “stringer” como fino ou grosso. Veja a Figura 15 para um “stringer” do tipo B com espessura fina, e a Figura 16 para um “stringer” do tipo C com espessura grossa.



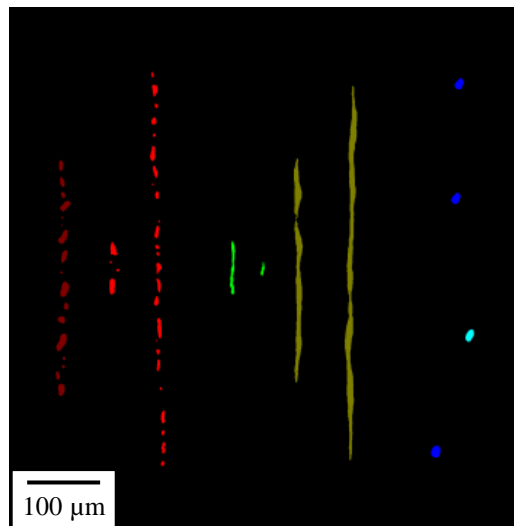
**Figura 15 – Exemplo de um “stringer” do Tipo B no looping. a) “Stringer” do Tipo B dilatado. b) “Stringer” em seu formato original. c) Elementos finos do “stringer”. d) Elementos grossos do “stringer”.**





**Figura 16 – Exemplo de um “stringer” do Tipo C no looping. a) “Stringer” do Tipo C dilatado. b) “Stringer” em seu formato original. c) Elementos finos do “stringer” (vazio). d) Elementos grossos do “stringer”.**

A Figura 17 mostra o resultado da classificação de espessura aplicado sobre o resultado da Figura 11. Aqui, diferentes espessuras para cada tipo são apresentadas como variações sobre o tom básico.



**Figura 17 – Resultado da Classificação de acordo com tipo e espessura. Vermelho claro – Tipo B fino. Vermelho escuro – Tipo B grosso. Verde claro – Tipo C fino. Verde escuro – Tipo C grosso. Azul claro – Tipo D grosso. Azul escuro – Tipo D fino.**

### 1.2.3 Cálculo da severidade

Uma vez que os tipos e espessuras das inclusões ou “stringers” tenham sido identificados, é possível calcular a severidade, conforme detalhado na seção 1.1.1. Da mesma forma que nos casos simples de tipos e severidades separados, os resultados para as imagens sintéticas com misturas de tipos apresentaram erros pequenos.

## 2 Processamento de Imagens Reais

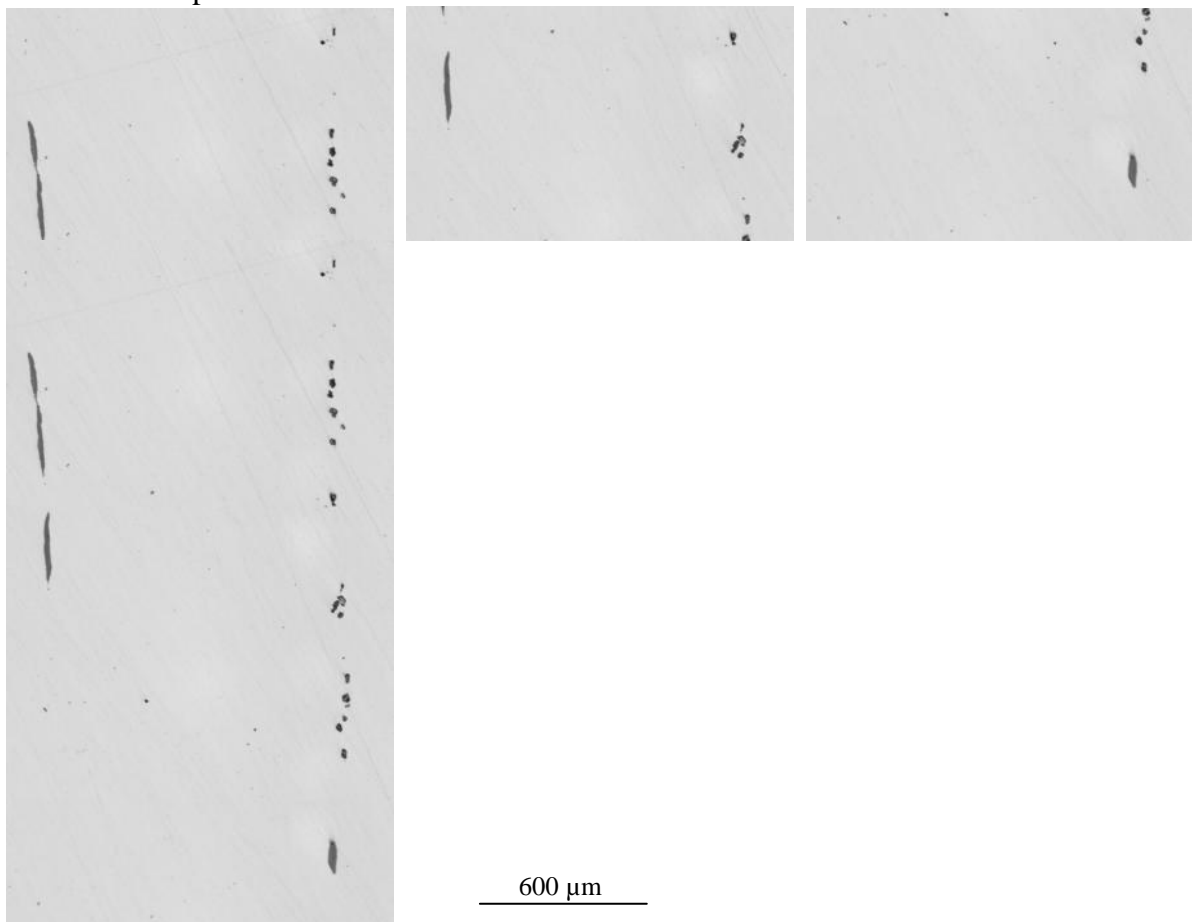
A norma ASTM recomenda que a classificação, manual ou automática, de inclusões avalie uma área total de  $160 \text{ mm}^2$  por amostra. Esta área total pode ser obtida através do acúmulo de campos visualizados em qualquer aumento, desde que as medidas de severidade sejam obtidas a partir de áreas de ao menos  $0,5 \text{ mm}^2$ .

Estas especificações são enormemente facilitadas com o uso de um sistema de microscopia digital. O Laboratório de Microscopia Digital do DCMM PUC-Rio dispõe de um microscópio óptico Zeiss Axioplan 2ie mot, com motorização controlada por software da platina x-y, do eixo z de foco e das trocas das lentes. Acoplado a uma câmera digital AxioCam HR e controlado pelo software Axiovision, o sistema permite automatizar inúmeros procedimentos de captura de imagens, além de processamento e análise.

As imagens capturadas podem ser analisadas para detectar a presença de inclusões. O programa pode então retornar automaticamente para um campo de interesse e capturar imagens de maior aumento que permitem uma melhor visualização das inclusões presentes.

Em maior aumento, no entanto, o campo de visualização pode ser pequeno demais para representar adequadamente duas possíveis características da microestrutura: inclusões muito alongadas e aglomerados alinhados (*stringers*) que se estendem por mais do que um campo. Como o processo de classificação depende da detecção correta destas características, esta restrição deve ser resolvida. Nestas situações, o sistema de microscopia digital pode montar uma imagem de *mosaico* composta por diversos campos concatenados, cobrindo uma área grande o suficiente para conter toda a inclusão alongada ou “stringer” de inclusões.

Esta situação é ilustrada na Figura 18, onde se vê 3 imagens de campos individuais e uma imagem de mosaico concatenando os 3 campos. É bem evidente que as imagens individuais não revelam adequadamente as características relevantes a serem detectadas. Já na imagem de mosaico, as inclusões alongadas, à esquerda, e o “stringer” de inclusões, à direita, são corretamente apresentados.



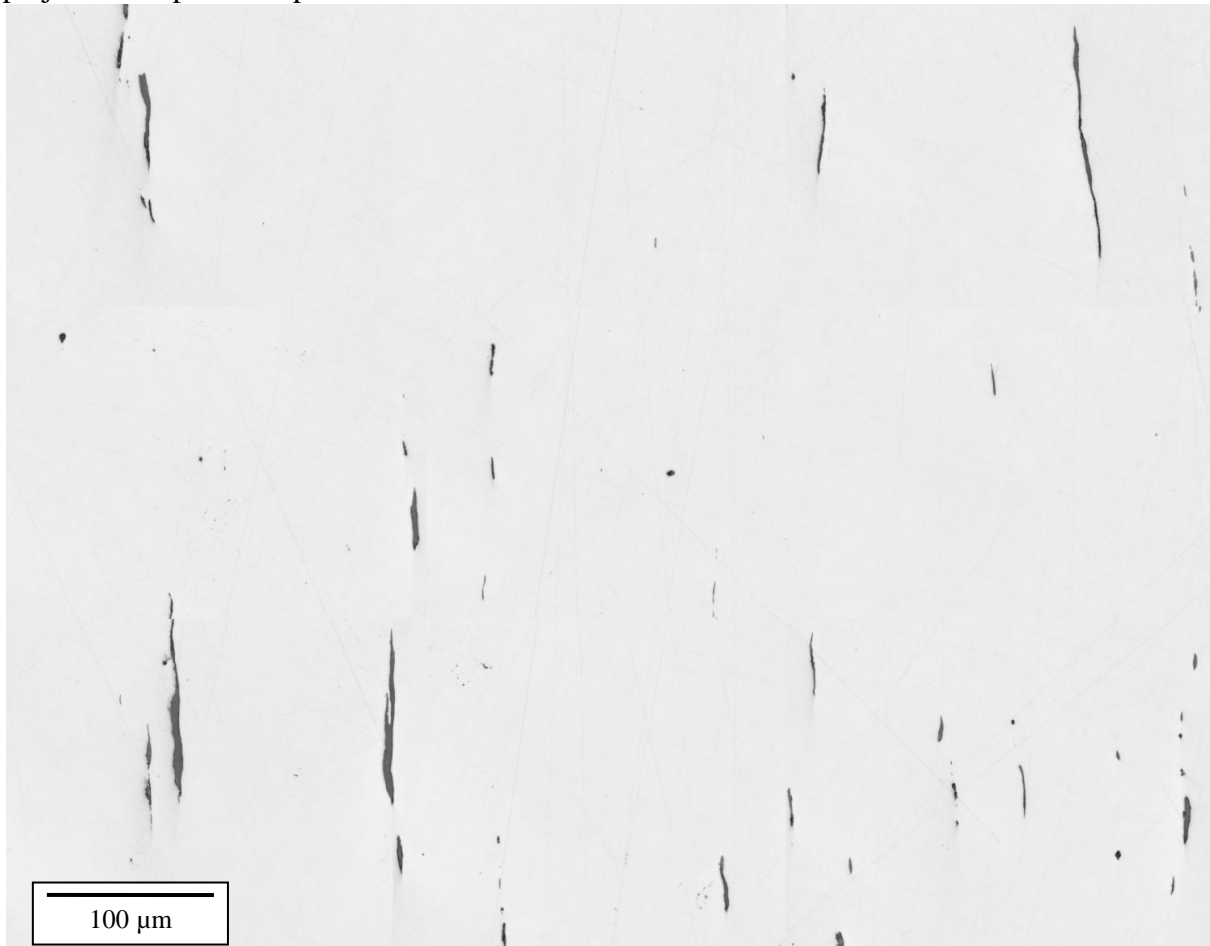
**Figura 18 – Campos individuais apresentando inclusões e imagem de mosaico concatenando os 3 campos.**

Em princípio, o sistema de microscopia digital permitiria capturar mosaicos de tamanho arbitrariamente grande, podendo até mesmo cobrir toda a área recomendada pela norma em

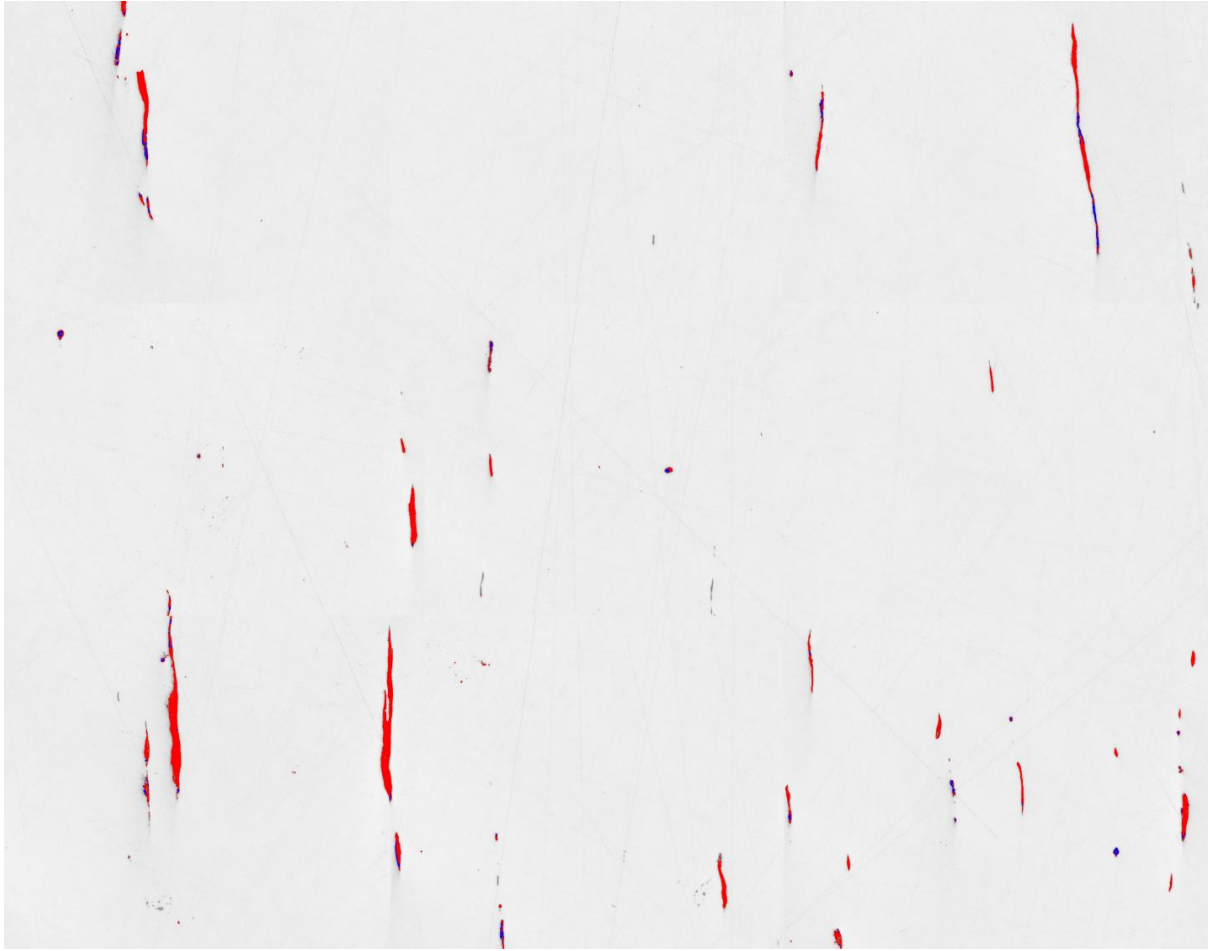
uma única imagem. No entanto, para que isto faça sentido deve-se usar uma lente objetiva com resolução suficiente para discriminar as inclusões. Quanto maior o aumento e a resolução da objetiva, menor é o campo de cada imagem. Assim, os mosaicos seriam potencialmente formados por uma quantidade enorme de campos, o que pode gerar um arquivo tão grande que se torna impossível de processar. Um compromisso entre resolução, tamanho das inclusões e “stringers”, tamanho do arquivo da imagem de mosaico e capacidade de discriminar inclusões deve ser atingido.

A Figura 19 mostra um mosaico formado por 9 imagens capturadas com uma lente objetiva de 50X, com aumento total de  $\approx 500X$ ,  $0,2 \mu\text{m}/\text{pixel}$  e área total de  $0,48 \text{ mm}^2$ . Esta área é bem próxima da área mínima de um campo para análise, recomendada pela norma para cálculos de severidade,  $0,5 \text{ mm}^2$ .

Este aço tem alto teor de enxofre e mostra inclusões do Tipo A em grande quantidade e inclusões do Tipo D em menor quantidade. A recomendação da norma, citada na seção 0, relativa a separar as inclusões do tipo A por sua tonalidade mais clara pode ser aplicada neste caso. No entanto, alguns problemas aparecem neste caso, e estão ilustrados na Figura 20. Diversas inclusões do tipo D, com tonalidade mais escura, aparecem misturadas às inclusões do tipo A. Além disso, pequenas variações tonais dentro de inclusões do tipo A podem levar à identificação falsa de inclusões do tipo D. As medidas de severidade e espessura ficam prejudicadas por estes problemas.



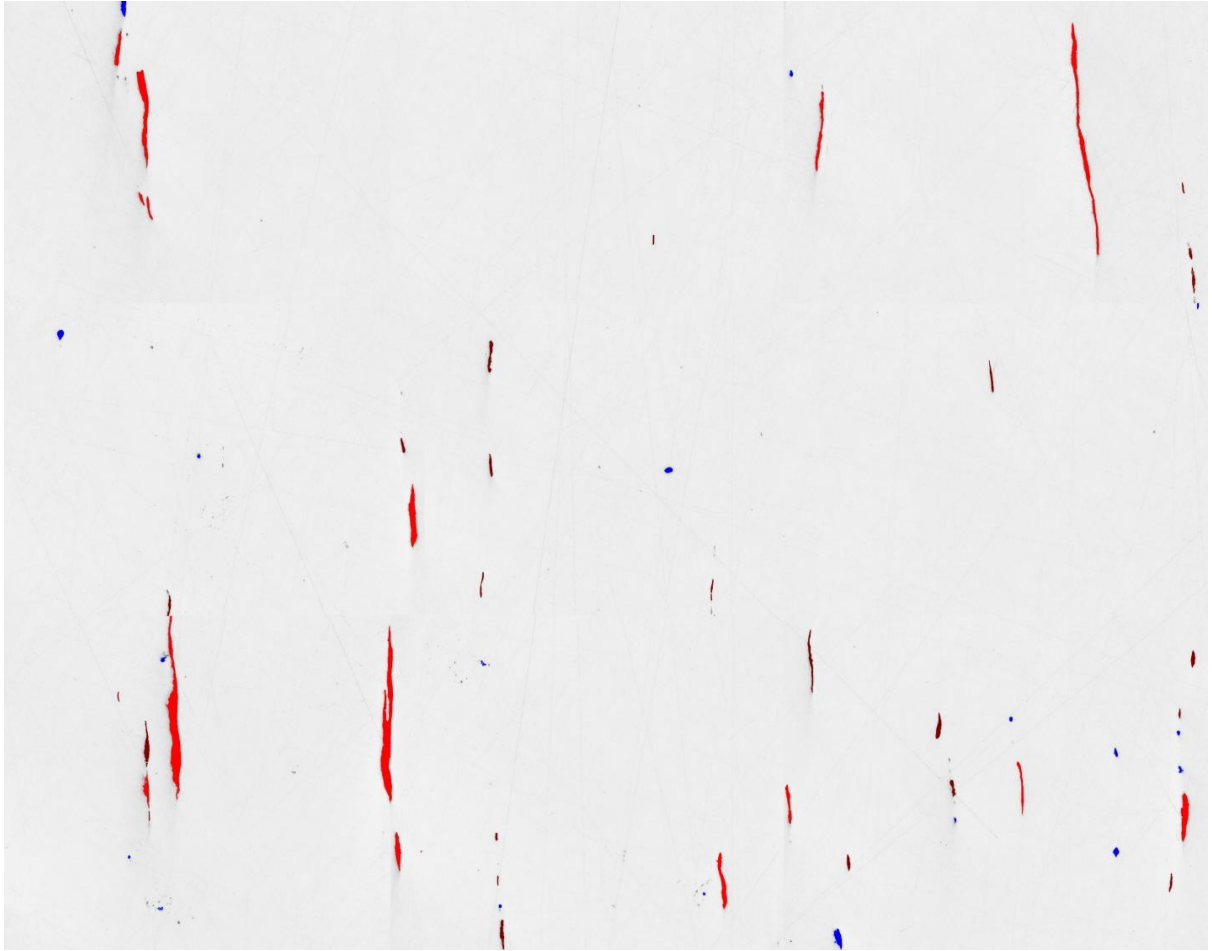
**Figura 19 – Mosaico de uma amostra de aço com alto teor de enxofre, mostrando grande quantidade de inclusões de sulfeto (Tipo A).**



**Figura 20 – Resultado do processamento por tonalidade da Figura 19, mostrando inclusões dos tipos A (vermelho) e D (azul). Algumas inclusões são mistas, dificultando a análise.**

Uma possível simplificação desta situação pode ser obtida alterando o enfoque para detecção original das inclusões. Utilizando apenas uma faixa tonal que inclua todas as inclusões do campo, é possível, posteriormente, discriminar as inclusões do tipo D que estão separadas das do tipo A, através de um critério de alongamento. Este resultado é apresentado na Figura 21. Aqui, as possíveis inclusões mistas foram ignoradas e tratadas como do tipo A, que foram separadas nas séries fina e grossa. As inclusões do tipo D separadas são corretamente identificadas. Nesta imagem, entretanto todas são da série fina, dado automaticamente identificado pelo programa.

A severidade dos dois tipos de inclusões foi então automaticamente calculada. Para o tipo A mediu-se um comprimento total de 759  $\mu\text{m}$  para inclusões da série grossa, o que corresponde a uma severidade 2,5, e de 326  $\mu\text{m}$  para a série fina, correspondente à severidade 1,5, de acordo com a norma. Este valor é similar à análise feita visualmente por operador experiente, que identificou severidade 3 para a série grossa e 1 para a série fina. Para o tipo D contou-se 19 inclusões da série grossa, o que corresponde a uma severidade nível 2. Neste caso, o resultado obtido por análise visual foi apenas 0,5. É provável que o resultado de análise de imagens seja mais acurado, já que é muito difícil discriminar e contar todas as inclusões visualmente. Além disso, a análise visual havia sido feita com aumento de apenas 100X, e pequenas inclusões podem não ter sido reveladas em função da pior resolução.



**Figura 21 – Resultado do processamento por forma da Figura 19, mostrando inclusões dos tipos A-grossa (vermelho), A-fina (vermelho escuro) e D-fina (azul).**

### 3 Conclusões

Um procedimento de automação do processo de classificação de inclusões em aços foi desenvolvido. Este procedimento se baseia em uma rotina de processamento e análise de imagens que codifica as regras estabelecidas pela norma ASTM E-1122.

Utilizando as imagens de referência oriundas da norma ASTM E-45, o algoritmo foi desenvolvido e otimizado. A rotina separa inclusões dos tipos A, B, C e D, concatena, quando pertinente, inclusões alinhadas em “stringers”, mede suas espessuras e calcula suas severidades.

A aplicação da rotina a imagens de amostras reais também apresentou bons resultados, mas alguns problemas foram identificados.

A principal limitação foi obter amostras de aços suficientemente “sujos” para apresentar inclusões dos diversos tipos em quantidades suficientes para permitir testar a robustez da rotina.

Foi muito difícil obter amostras que apresentassem, no mesmo campo, inclusões dos tipos A, B e C, que são mais difíceis de discriminar. Desta forma, não foi possível testar o sucesso da rotina neste quesito. Por outro lado, em amostras contendo inclusões dos tipos A e D, enfrentou-se o problema de inclusões mistas. Este tipo de inclusão está previsto na norma, mas seu tratamento é bem mais complexo. No enfoque aqui apresentado, buscou-se uma simplificação na qual estas inclusões foram tratadas como de apenas um tipo, o que permitiu uma identificação aproximadamente correta de inclusões separadas, bem como das medidas de severidade e espessura. O tratamento detalhado de inclusões mistas é uma das possíveis

continuações do presente projeto.

Outras evoluções deste projeto contemplam trabalhar com imagens de microscopia eletrônica de varredura, permitindo avaliar inclusões de tamanho menor. Neste caso, seria possível combinar o processamento de imagens com informações de análise química obtidas por EDX, o que permitiria uma identificação mais precisa das inclusões em geral, e das inclusões mistas, em particular.

## **Referências**

---

- i - ASTM E45-97 - Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steels – Annual Books of ASTM Standards, Section 3, Volume 03.01, ASTM, West Conshohocken, p163-176,1999.
- ii - ASTM E1122-96 - Standard Practice for Obtaining JK Inclusion Ratings Using Automatic Image Analysis – Annual Books of ASTM Standards, Section 3, Volume 03.01, ASTM, West Conshohocken, p729-736,1999.
- iii - RUSS, J. C., Computer Assisted Microscopy, Plenum Press, New York, 1992.
- iv - PACIORNIK, S.; MAURICIO, M. H. P., Digital Imaging in ASM Handbook – Metallography and Microstructures, ed. VANDER VOORT, G. F. , Vol. 9, ASM International, Materials Park, p368-402, 2004.