

Desenvolvimento de um Software para cálculo da densidade de nódulos de grafita em ferro fundido nodular através de Processamento Digital de Imagens

Thiago Pinheiro

Sumário

01

Introdução

02

Materiais e Métodos

03

Resultados

04

Discussão

05

Conclusões





01


Introdução



O que é o Ferro Fundido

O Ferro Fundido é a liga ferro-carbono-silício com teores de carbono geralmente acima de 2,0%, em quantidade superior à que pode ser retida em solução sólida de austenita, de modo a resultar no carbono parcialmente livre que se apresenta na forma de veios ou lamelas de grafita.

Os fatores que determinam a estrutura do ferro fundido são a velocidade de resfriamento, composição química, inoculação e superaquecimento. A quantidade de grafita na estrutura dos ferros fundidos é muito importante, pois quanto maior ela é menor será a resistência mecânica do ferro.

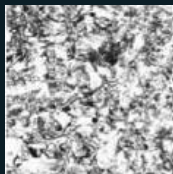




Cinzento



Branco



Mesclado




Maleável



Nodular


Classificação do Ferro Fundido

Existem diferentes classificações para os ferros fundidos de acordo com a estrutura da matriz metálica, podendo ser ferrítica, perlítica, ferrítico-perlítica, austenítica e martensítica, sendo que cada uma delas originará propriedades e classes de materiais diferentes. Sendo classificados em ferro fundido: cinzento, branco, mesclado, maleável e nodular.

A cluster of overlapping geometric shapes, including triangles and squares, in shades of orange, dark blue, and light grey, located in the top right corner of the slide.

Essa apresentação investiga a análise metalográfica das características do ferro fundido nodular, para isso necessitamos verificar a quantidade de nódulos de grafita em suas amostras utilizando normas técnicas, essa análise tradicionalmente é feita utilizando um microscópio óptico.


O artigo estudado propõe a criação de um Sistema de Visão Computacional (CVS) utilizando a biblioteca de código aberto OpenCV para automatização desse processo.

A cluster of overlapping geometric shapes, including triangles and squares, in shades of orange, dark blue, and light grey, located in the bottom left corner of the slide.



02

Materiais e Métodos




No ferro fundido nodular, o carbono encontra-se na forma de grafita esferoidal no estado bruto de fundição.

O ferro fundido nodular é conhecido por sua ductilidade, mas a vantagem mais importante tem sido seu alto módulo de elasticidade e resistência mecânica, em combinação com resistência a corrosão, fácil fundição e usinabilidade.

Este material substitui o ferro cinzento e o aço em variadas aplicações.

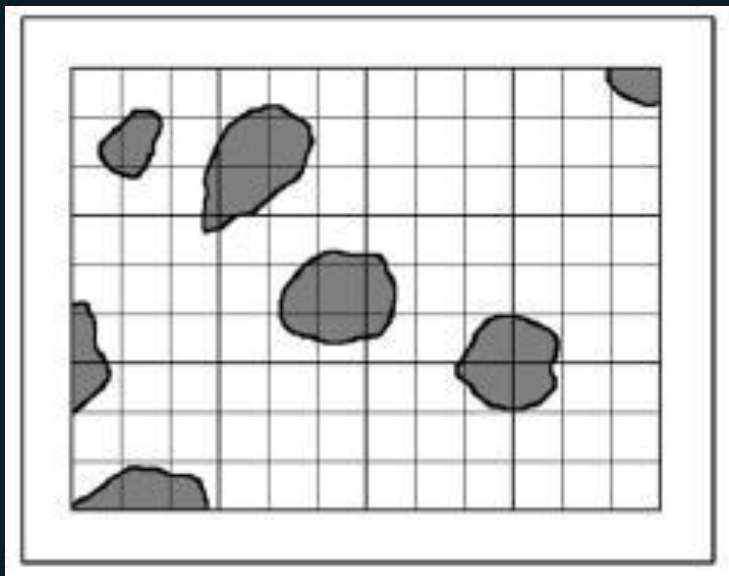
Deste modo, para cálculo de algumas destas propriedades, faz-se necessário a contagem dos nódulos de grafita em ferro fundido nodular utilizando a Norma Brasileira (NBR) 6913. Esta norma é utilizada como base no método proposto para cálculo automático utilizando imagens de metalografia.



NBR 6913 - Ferro fundido nodular e ferro fundido maleável - Contagem de nódulos de grafita

Esta norma determina o procedimento de contagem de nódulos de grafita, em ferro fundido nodular e ferro fundido maleável, através da utilização de microscópio e corpo-de-prova.

A densidade de nódulos de grafita possui a unidade nódulos/mm², e é determinada por
$$\text{Densidade} = \frac{(NI + \frac{NP}{2})}{S \times n} \times A^2$$
 em que S é a área do retículo analisado, apresenta o aumento do microscópio em que a amostra está sendo analisada, n é o número de amostras, NI é o número de nódulos inteiros na região e NP é o número de nódulos que estão parcialmente dentro da região analisada. Vale ressaltar que NP considera os nódulos que estão completamente dentro da área analisada, enquanto NI considera os nódulos que estão na fronteira da área analisada, possuindo parte dentro da região e parte fora.



Modelo de retículo para determinação no número de nódulos.

Sistema de Visão Computacional Desenvolvido utilizando Watershed

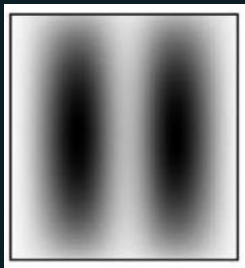
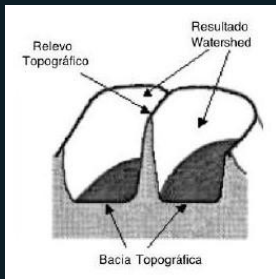



Imagem em tom de cinza




Demonstração topológica dos objetos

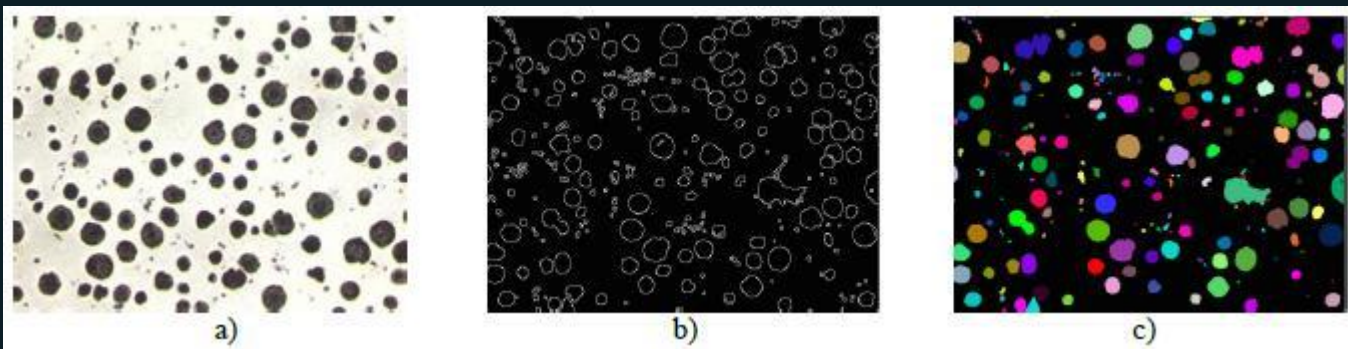
A Transformada de Watershed se baseia no fenômeno natural da enchente de relevos topográficos. Deve-se imaginar a imagem como sendo um relevo topográfico visto de cima, como se uma foto de satélite desta região fosse capturada. Qualquer imagem Tom de Cinza pode ser considerada como uma superfície topográfica. Caso uma superfície seja inundada, suas regiões de valores mínimos será a primeira a ser afetada, e a região inundada aumenta progressivamente, parando apenas quando encontrar outra região em crescimento. Por fim, têm-se a imagem dividida em dois grupos diferentes: Bacias hidrográficas e Linhas de bacias hidrográficas.

A cluster of overlapping geometric shapes in the top right corner, including a large orange triangle, a smaller white triangle, and a dark blue triangle.

As regiões mais escuras da imagem representam os vales e as regiões mais claras as montanhas. Ao se inundar a região com água, os vales vão se enchendo e transformam-se em bacias. Conforme vão enchendo, bacias maiores vão se formando pelo encontro das águas. Nos topos das montanhas, onde as bacias se dividem, são formadas as linhas divisórias de água, ou watersheds. Ao chegar neste ponto a inundação para, e as watersheds separam as regiões segmentadas.

A cluster of overlapping geometric shapes in the bottom left corner, including a large orange triangle, a smaller white triangle, and a dark blue triangle.

Ao aplicar essa transformação ao gradiente de imagem, as bacias hidrográficas devem teoricamente corresponder às regiões de nível de cinza homogêneas desta imagem, enquanto os gradientes serão utilizados como base para encontrar os objetos topográficos. Sendo assim, para determinar os nódulos de grafita com a transformada watershed, na imagem tom de cinza é aplicado ao operador gradiente de Canny. O resultado obtido nesta etapa é utilizado para identificar as bacias hidrográficas, que nesta aplicação são os nódulos de grafita.




Aplicação da Transformada Watershed no cálculo dos nódulos de grafita, sendo a) imagem em tom de cinza com nódulos de grafita, b) Gradiente de Canny de a), c) resultado da Transformada Watershed.

Após encontrar os nódulos, verifica-se se os mesmos estão nas bordas da imagem ou não, e caso esteja nas extremidades da imagem este é contabilizado como Nódulo Parcial (NP), os outros que estão inteiramente dentro da imagem são contabilizados como Nódulos Inteiros (NI).

Sistema de Visão Computacional Desenvolvido utilizando Crescimento de Regiões


Um sistema de PDI é dividido em cinco etapas de execução. A aquisição de imagens consiste em obter a imagem através de um dispositivo de captura que em seguida digitaliza a imagem. O pré-processamento busca melhorar a qualidade da imagem através da redução de ruídos ou aberrações e ajustes de brilho e contraste, reforçando o contorno dos objetos da imagem, retirando regiões ou tonalidades não desejadas ou então reduzindo distorções. A fase de segmentação consiste em identificar e isolar as regiões de interesse na imagem digital. Finalmente, o objetivo da extração de atributos é extrair informações da imagem que sejam úteis para seus devidos fins.



A cluster of overlapping geometric shapes in the top right corner, including a large orange triangle, a smaller white triangle, and a dark blue triangle.

Neste trabalho foi desenvolvido um software utilizando a Linguagem C++ através da ferramenta de programação Visual C++ 2010. Para a implementação destes métodos, este trabalho utiliza a biblioteca livre de Visão Computacional (OpenCV). Esta biblioteca de programação, de código aberto, desenvolvida pela Intel Corporation que possui mais de 500 funções pode ser utilizada em diversas linguagens de programação, entretanto neste projeto é utilizada Linguagem C++

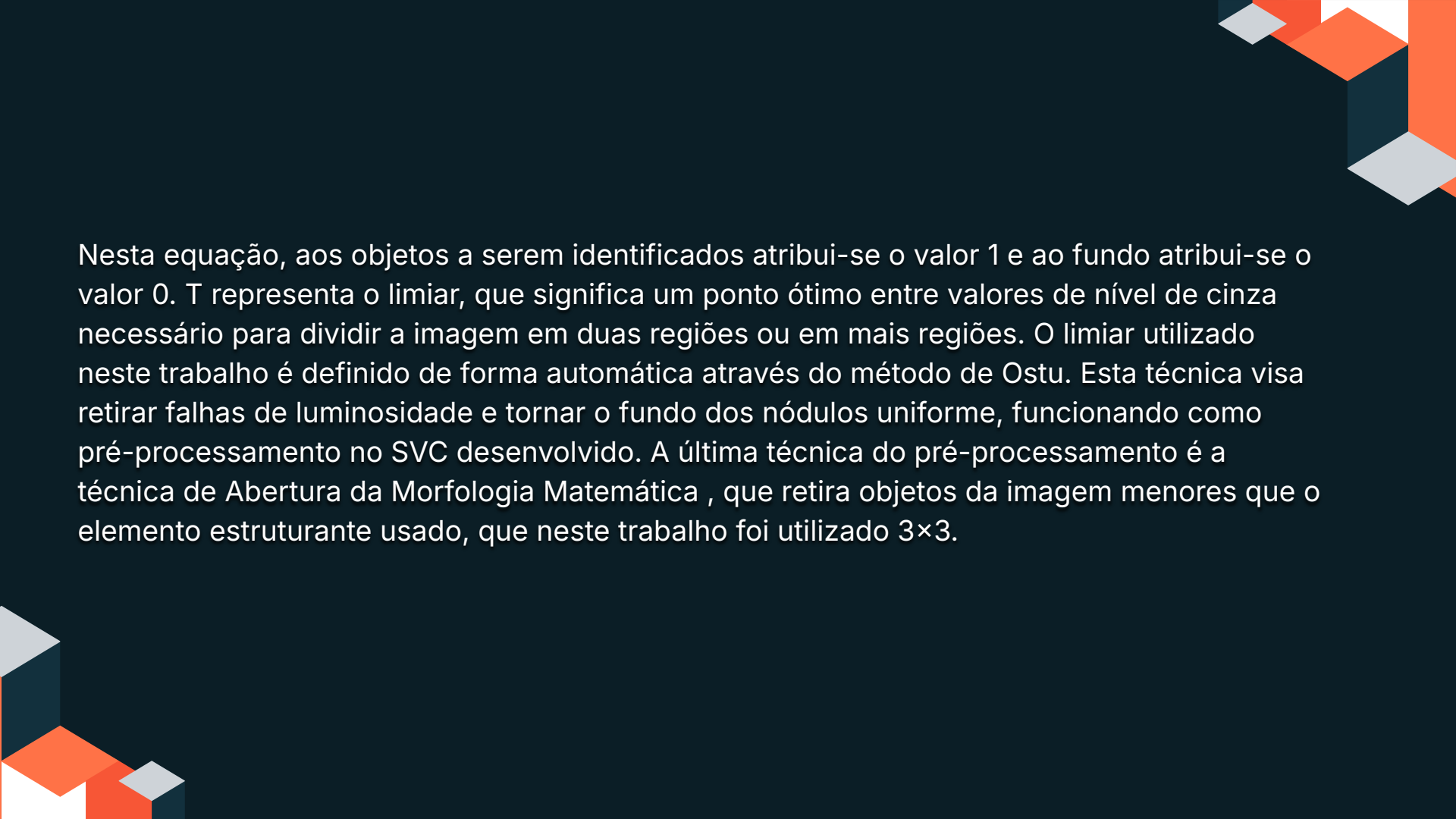
O início do algoritmo se dá através da abertura das imagens para que, posteriormente, seja realizado o processamento digital das mesmas. Vale ressaltar que neste trabalho, as imagens são adquiridas utilizando um microscópio óptico para capturar imagens de amostras de ferro fundido nodular preparadas por metalografia.

A cluster of overlapping geometric shapes in the bottom left corner, including a large orange triangle, a smaller white triangle, and a dark blue triangle.

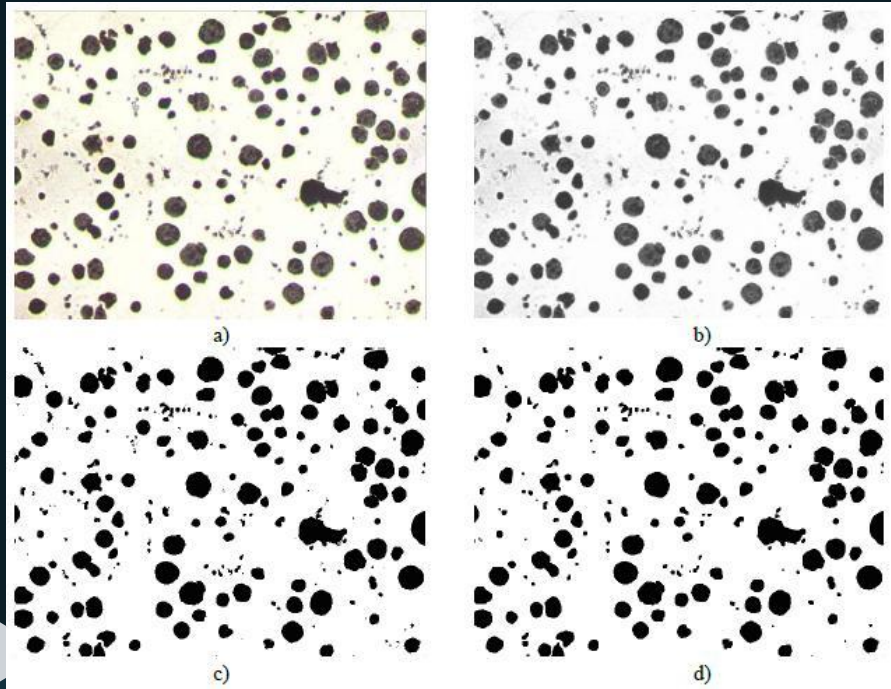


Após a abertura das imagens são aplicados, em cada imagem, transformação para escalas de cinza e limiarização, que corresponde a as etapas de pré-processamento. Pode-se descrever limiarização, matematicamente, como sendo uma técnica de PDI onde uma imagem de entrada de n níveis de cinza gera uma imagem de saída g , com um número de níveis de cinza menor que n . Normalmente, g apresenta dois níveis de cinza, onde $g(x,y)$ representa um pixel na coordenada (x, y) da imagem g conforme a equação.


$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{se } f(x, y) \geq T \\ 0, & \text{se } f(x, y) < T \end{cases}$$

The slide features a dark blue background. In the top right corner, there is a cluster of overlapping geometric shapes in orange, dark blue, and light gray. Similarly, in the bottom left corner, there is another cluster of overlapping geometric shapes in the same color palette. The main text is centered on the slide.

Nesta equação, aos objetos a serem identificados atribui-se o valor 1 e ao fundo atribui-se o valor 0. T representa o limiar, que significa um ponto ótimo entre valores de nível de cinza necessário para dividir a imagem em duas regiões ou em mais regiões. O limiar utilizado neste trabalho é definido de forma automática através do método de Otsu. Esta técnica visa retirar falhas de luminosidade e tornar o fundo dos nódulos uniforme, funcionando como pré-processamento no SVC desenvolvido. A última técnica do pré-processamento é a técnica de Abertura da Morfologia Matemática, que retira objetos da imagem menores que o elemento estruturante usado, que neste trabalho foi utilizado 3×3 .




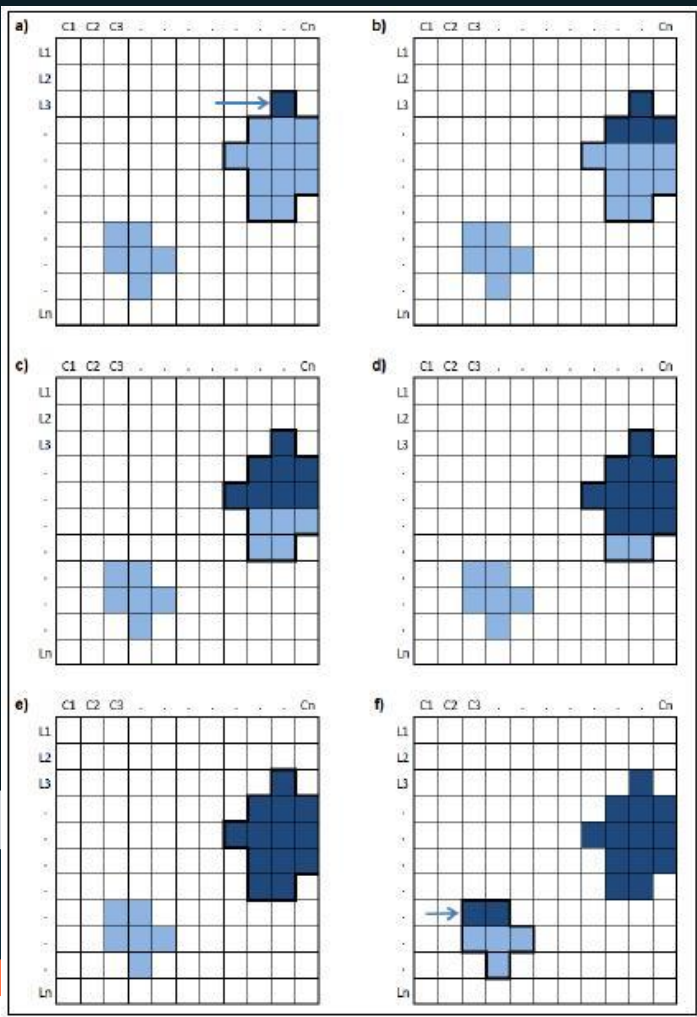
Etapas de pré-processamento do SVC desenvolvido, em que (a) Imagem original, (b) imagem em escala de cinza e (c) imagem limiarizada por Otsu e (d) Operação morfológica de Abertura de (c) com elemento estruturante 3×3 .



Após o pré-processamento, realiza-se a busca dos nódulos contidos na mesma através de uma varredura nos eixos X e Y da imagem de dimensões $L_n \times C_n$ pixels, através do método Crescimento de Região.

O crescimento por agregação de pixels, utilizado neste trabalho, é o mais simples de ser implementado. Nele inicia-se por um conjunto de pontos, chamado de semente, e a partir desta, a região cresce anexando a cada ponto somente aqueles pixels que possuem propriedades similares, como nível de cinza, cor, entre outras. Este método de segmentação agrupa pixels ou sub-regiões em regiões maiores. De acordo com Rebouças Filho, nesta técnica, para um pixel ser agregado à região é necessário que este esteja na vizinhança da mesma e que obedeça a um critério pré-estabelecido. Este, geralmente, baseia-se em parâmetros pré-definidos, como intensidade de tom de cinza, média de tom de cinza na região, entre outros.





Ao aplicar a Limiarização, todos os objetos de interesse estão na cor preta e o fundo está branco. Deste modo, quando um objeto preto é detectado, uma semente é criada naquele pixel. A partir da semente, a região cresce até estabilizar, estado em que o objeto foi totalmente segmentado. Após segmentar cada objeto, a varredura continua procurando novos objetos. Vale ressaltar, que apenas objetos novos são contabilizados para incrementar a contagem dos objetos.

Segmentação de um nódulo de grafita, em que (a) Detecção da semente, (b, c, d) crescimento de região, (e) detecção final do objeto e (f) detecção da semente de um novo objeto.


Ao fim da varredura em toda a imagem tem-se o próximo passo é o cálculo da densidade de nódulos das amostras, de acordo com a norma técnica NBR 6913 MB-1512 da ABNT. Após encontrar os nódulos, verifica-se se os mesmos estão nas bordas da imagem ou não, e caso esteja nas extremidades da imagem este é contabilizado como Nódulo Parcial (NP), os outros que estão inteiramente dentro da imagem são contabilizados como Nódulos Inteiros (NI).

```
Numero de nodulos no interior de cada amostra:  
Amostra 1 = 115  
Amostra 2 = 89  
Amostra 3 = 89  
Amostra 4 = 109  
Amostra 5 = 91  
Amostra 6 = 101  
  
Numero de nodulos na periferia de cada amostra:  
Amostra 1 = 14  
Amostra 2 = 16  
Amostra 3 = 18  
Amostra 4 = 17  
Amostra 5 = 12  
Amostra 6 = 15
```

```
Densidade: 0.119 nodulos/mm2
```


Resultados obtidos com o software

Além da densidade, é apresentada a quantidade de nódulos na periferia e no interior de cada amostra.

A cluster of overlapping geometric shapes in the top right corner, including a large orange triangle, a smaller white triangle, and a dark blue triangle.

Após a abertura das imagens são aplicados, em cada imagem, transformação para escalas de cinza e limiarização, que corresponde a as etapas de pré-processamento. Pode-se descrever limiarização, matematicamente, como sendo uma técnica de PDI onde uma imagem de entrada de n níveis de cinza gera uma imagem de saída g , com um número de níveis de cinza menor que n . Normalmente, g apresenta dois níveis de cinza, onde $g(x,y)$ representa um pixel na coordenada (x, y) da imagem g conforme a equação

O início do algoritmo se dá através da abertura das imagens para que, posteriormente, seja realizado o processamento digital das mesmas. Vale ressaltar que neste trabalho, as imagens são adquiridas utilizando um microscópio óptico para capturar imagens de amostras de ferro fundido nodular preparadas por metalografia.

A cluster of overlapping geometric shapes in the bottom left corner, including a large orange triangle, a smaller white triangle, and a dark blue triangle.



03

Resultados

Tabela 1: Contagem dos nódulos através do método tradicional.

Número da contagem	1ª		2ª		3ª		4ª		5ª		6ª	
Amostra n	NI	NP	NI	NP	NI	NP	NI	NP	NI	NP	NI	NP
N=1	99	19	105	17	101	17	100	17	101	17	98	19
N=2	94	18	96	17	94	19	89	17	84	18	94	18
N=3	82	18	77	18	87	19	82	19	80	18	83	18
N=4	92	20	93	22	84	21	97	20	94	22	98	20
N=5	95	14	90	13	86	14	89	13	90	14	92	14
N=6	88	13	89	14	82	17	88	15	89	13	92	17
Densidade(nódulos/mm²)	0,111		0,111		0,109		0,110		0,109		0,113	
Densidade média	0,110 nódulos/mm²											

Contagem dos nódulos através do método tradicional.

Após a implementação do software foi possível realizar a contagem dos nódulos de grafita computacionalmente e comparar os dois métodos de contagem: Tradicional e Computacional.

Para contagem pelo método tradicional foram realizadas 6 contagens, independentes, dos nódulos em seis regiões distintas da amostra através de um microscópio numa escala de 200X. O tempo médio da contagem de cada amostra foi de 1min47seg pelo método tradicional. Como no trabalho são realizadas contagens em 6 amostras tem-se um tempo total aproximado de 11 minutos.

Após as contagens, foram realizados os cálculos de densidade de nódulos de grafita para cada uma das seis contagens, para uma comparação com a posterior contagem através do software, a fim de comprovar a eficiência do método computacional de contagem em relação ao método tradicional.

Amostra n	Resultado da contagem com Watershed		Resultado da contagem com Crescimento de regiões	
	NI	NP	NI	NP
N=1	115	14	107	14
N=2	89	16	85	10
N=3	89	18	94	17
N=4	109	17	117	17
N=5	91	12	80	14
N=6	101	15	107	17
Densidade(nódulos/mm ²)	0, 119		0, 117	

Contagem dos nódulos através dos métodos computacionais desenvolvidos utilizando os métodos Watershed e Crescimento de Regiões.

Com a implementação dos Sistemas de Visão Computacionais propostos foi possível realizar a contagem dos nódulos de grafita em cada amostra sem a necessidade de contá-los visualmente, o que acelerou o processo, em que os dois métodos demoraram aproximadamente 6 segundos para contabilizar os nódulos em todas as imagens, isto para ambos os métodos propostos.




04

Discussões

Comparação entre os cálculos de densidade através dos métodos tradicional e computacional


Cálculo tradicional		SVC com Watershed			SVC com Crescimento de Regiões		
		Densidade	Desvios	Desvio padrão	Densidade	Desvios	Desvio padrão
1ª Contagem	0,111	0,119	0,008	0,0087	0,117	0,005	0,0061
2ª Contagem	0,111		0,008			0,005	
3ª Contagem	0,109		0,01			0,008	
4ª Contagem	0,11		0,009			0,007	
5ª Contagem	0,109		0,01			0,008	
6ª Contagem	0,113		0,007			0,004	



Aplicando os métodos Watershed e Crescimento de Regiões nas amostras para contagem de nódulo de grafita, torna-se possível uma avaliação mais detalhada utilizando as contagens dos especialistas como padrão.

Percebe-se que o método Crescimento de Regiões obtém um melhor resultado que o método Watershed considerando a densidade obtida por cada método e seus respectivos desvios padrões.

O método de Watershed pode sofrer diferenças na sua configuração ocasionadas por pequenas bordas internas no nódulo, pequenos objetos e falhas de luminosidade.




Os métodos propostos levam em torno de 1 segundo para examinar cada imagem, sendo 6 segundos no total, enquanto o método tradicional demora aproximadamente 640 segundos no total.



05

Conclusões



O método tradicional de contagem é custoso e não tão confiável devido à fadiga do operador após análise de muitas imagens, os softwares desenvolvidos para automatizar esse processo atenderam as expectativas gerando resultados satisfatórios. Os softwares demonstraram ser mais confiáveis e ágeis que a contagem tradicional.

Dentre os métodos utilizados, observou-se superioridade do método Crescimento de Regiões em relação à transformada Watershed, visto que foi mais robusto à falhas.

