

INVESTIGAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM FERRAMENTAL PARA
PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE IMAGENS DE MATERIAIS
BASEADO EM ASSISTENTES DE INTERFACE

Fábio Duncan de Souza

Universidade Estadual do Norte Fluminense - Darcy
Ribeiro - UENF
Campos dos Goytacazes - RJ
Agosto-2018

INVESTIGAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM FERRAMENTAL PARA
PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE IMAGENS DE MATERIAIS
BASEADO EM ASSISTENTES DE INTERFACE

Fábio Duncan de Souza

"Tese de doutorado apresentada ao corpo docente do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências necessárias à obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais".

Orientador: Angelus Giuseppe Pereira da Silva

Coorientador: Italo de Oliveira Matias

Campos dos Goytacazes - RJ
Agosto-2018

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pelo autor.

S729

Souza, Fabio Duncan de.

INVESTIGAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM FERRAMENTAL PARA
PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE IMAGENS DE MATERIAIS BASEADO EM
ASSISTENTES DE INTERFACE / Fabio Duncan de Souza. - Campos dos Goytacazes,
RJ, 2018.

118 f. : il.

Bibliografia: 113 - 118.

Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual
do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2018.

Orientador: Angelus Giuseppe Pereira da Silva.

1. Caracterização de Materiais. 2. Processamento de Imagens. 3. Análise de
Imagens. 4. Software Livre. 5. ImageJ. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense
Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 620.11

INVESTIGAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM FERRAMENTAL PARA
PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE IMAGENS DE MATERIAIS
BASEADO EM ASSISTENTES DE INTERFACE

Fábio Duncan de Souza

Tese de doutorado apresentada ao corpo docente do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências necessárias à obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais

Trabalho aprovado em 24 de agosto de 2018

Comissão Examinadora:

Prof. Angelus Giuseppe Pereira da Silva
D.Sc. Ciências Técnicas (UENF) - Orientador

Prof. Eduardo Atem de Carvalho
Ph.D. Engenharia Mecânica (UENF) - Orientador

Prof. Fernando Luiz de Carvalho e Silva
D.Sc. Engenharia e Ciência dos Materiais (IFF)

Prof. Italo de Oliveira Matias
D.Sc. Sistemas Computacionais (UCAM)

Campos dos Goytacazes - RJ
Agosto-2018

Dedico este trabalho a minha mãe Neusa Duncan de Souza (in memoriam), pela sua dedicação e esforço para me proporcionar a melhor educação.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por permitir que caminhos fossem trilhados até a chegada deste momento.

Agradeço ao Doutor Angelus Giuseppe Pereira da Silva pelas orientações, pela paciência e principalmente pela amizade que me ofereceu ao longo deste trabalho.

Agradeço ao Doutor Ítalo de Oliveira Matias pelas dicas cirúrgicas para a confecção deste trabalho.

Agradeço ao grupo de pesquisa da professora Doutora Lioudmila Aleksandrovna Matlakhova, que aceitou a parceria no projeto. Agradeço em especial ao Douglas Vidal e ao Lucas Souza que cederam as micrografias para análise e tiraram uma série de dúvidas quanto aos projetos.

Agradeço ao amigo Fernando Luiz de Carvalho e Silva, pela parceria nos trabalhos e pela personalização do modelo *LaTeX* utilizado para o desenvolvimento desta tese.

Agradeço aos demais amigos que compartilharam e ajudaram a superar os desafios deste doutorado.

Agradeço a minha esposa Mônica Viana Ribeiro Gomes e aos meus filhos Maria Clara Ribeiro Gomes Duncan de Souza e Miguel Ribeiro Gomes Duncan de Souza pela paciência e entendimento da importância deste trabalho.

Agradeço ao Instituto Federal Fluminense e aos colegas docentes pelo apoio para que eu pudesse finalizar o meu doutoramento.

*“O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder entusiasmo.
(Winston Churchill)*

Resumo

A caracterização de micrografias de materiais demanda de sofisticados recursos tecnológicos disponíveis para aquisição, processamento e análise de imagens micrográficas. Além disso, o domínio das ferramentas disponíveis exige conhecimentos específicos para se obter resultados otimizados da caracterização de materiais. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é investigar formas de simplificar a análise de micrografias, otimizando o tempo, aumentando a eficiência e a precisão deste processo. Para tanto, foi desenvolvido o software *LAMAV-Wizard*, que possibilita a criação de assistentes que guiam o pesquisador através do processamento e da análise de imagens no software livre *ImageJ*. Além disso, o software desenvolvido viabiliza que lotes de micrografias com características semelhantes sejam analisados de uma única vez, otimizando assim o processo. Padrões utilizados como referência para a análise micrográfica de materiais foram estudados na literatura visando a automatização de soluções para problemas clássicos da área. Algumas técnicas de análise identificadas na literatura como necessárias para a criação dos assistentes foram implementadas como *plugins* para o *ImageJ*. O primeiro assistente criado utilizando o *LAMAV-Wizard* foi o *Graphite Analysis Wizard*, que objetiva caracterizar o ferro fundido nodular empregando como referência a metodologia automatizada proposta pela norma [ASTM-E2567 \(2016\)](#). Um estudo de caso foi realizado para comparar os resultados de análises obtidas com o método automatizado em face de resultados obtidos com o método manual já utilizado por pesquisadores do LAMAV-UENF. Quarenta micrografias foram utilizadas com a pretensão de se analisar a forma, o tamanho e a distribuição da grafita existente em amostras de ferros fundidos nodulares. Fenômenos foram avaliados estatisticamente e foi percebido que as curvas que descreviam estes fenômenos obedeciam às mesmas tendências de comportamento, evidenciando a proximidade dos resultados entre os métodos manual e automatizado. O segundo assistente criado foi o *Grain Analysis Wizard*, que objetiva caracterizar o tamanho do grão médio ASTM utilizando com referência a norma [ASTM-E1382 \(2015\)](#). Foi realizado um segundo estudo de caso para validar o assistente desenvolvido comparando o resultado da caracterização de uma micrografia da literatura com os resultados de três diferentes métodos disponibilizados. Os resultados apontaram que o ferramental proposto reduz o tempo de análise das imagens e viabiliza a reprodutibilidade dos experimentos otimizando assim o processo.

Palavras-chave: Caracterização de Materiais. Processamento de Imagens. Análise de Imagens. Software Livre. ImageJ.

Abstract

The characterization of materials micrographs demands sophisticated technological resources available to an acquisition, processing, and analysis of micrographic images. In addition, the available tools require specific knowledge in order to get optimized results of materials characterization. Therefore, the objective of this work is to investigate ways to simplify the micrography analysis, optimizing time, improving efficiency and the precision of this process. For this purpose, the LAMAV-Wizard software was developed, allowing the creation of assistants that guide the researcher through the processing and analysis of images using the free software ImageJ. Furthermore, the developed software enables that batches of micrographs with similar characteristics to be analyzed at once, optimizing the process. Standards used as a reference for the materials micrographic analysis were studied in the literature, aiming the automation of solutions for classic problems in the area. Some analysis techniques identified in the literature as necessary for the creation of the assistants were implemented as plugins for ImageJ. The first wizard created using the LAMAV-Wizard was the Graphite Analysis Wizard, which aims to characterize the nodular cast iron using as reference the automated methodology proposed by standard ASTM-E2567 (2016). A case study was developed to compare the automated analysis results with the results obtained from the manual method already used by researchers at LAMAV-UENF. Forty micrographs were used with the intention to analyze the shape, size, and distribution of the existent graphite in the ductile iron cast sample. Phenomena were statistically evaluated and it was noticed that the curves that describe these phenomena followed the same tendencies, showcasing the proximity of the results between the methods. The second assistant created was the Grain Analysis Wizard, that aims to characterize the ASTM grain size using as reference the ASTM E1382 (2015) standard. A second case study was developed to validate the implemented assistant comparing the literature's characterization of a micrography result with the results obtained in the three different methods available. The results showed that the proposed tool reduces the image analysis time span, enables the reproducibility of the experiments, optimizing the process.

Key-words: Materials Characterization. Image processing. Image Analysis. Free Software. ImageJ.

Lista de ilustrações

Figura 2.1 – Imagem de um aço com baixo teor de carbono obtida de microscópio óptico. Fonte: Russ (1986)	6
Figura 2.2 – Exemplo de uma estrutura de partículas seccionada por um plano de corte. Fonte: Baddeley e Jensen (2004)	6
Figura 2.3 – Exemplo de uma superfície seccionada por um plano de corte. Fonte: Baddeley e Jensen (2004)	7
Figura 2.4 – Exemplo de uma estrutura de partículas seccionada por um plano de corte. Fonte: Baddeley e Jensen (2004)	7
Figura 2.5 – Aplicação da técnica de intercepto sobre uma seção de rocha. Fonte: Baddeley e Jensen (2004)	9
Figura 2.6 – Aplicação da técnica de pontos de teste sobre uma seção de rocha. Fonte: Baddeley e Jensen (2004)	10
Figura 2.7 – Relações entre as equações estereológicas para estimativa da fração volumétrica. Fonte: West (2012).	10
Figura 2.8 – Exemplos de intercepções de linhas de teste sobre partículas e interseções de linhas de teste sobre limites de partículas. (a) Interseções simples, (b) interseção tangenciando grão e (c) interseção entre grãos da mesma fase. Fonte: Adaptado de Silva (2007)	11
Figura 2.9 – Retículo para realização do método de identificação do grão ASTM diretamente no microscópio. Fonte: Benjamin (2014).	14
Figura 2.10–Exemplo de utilização do método planimétrico de Jeffries. Fonte: Prakasan (2013).	15
Figura 2.11–Etapas que envolvem o processamento e a análise digital de imagens. Fonte: Gomes, Paciornik e Brocchi (2007).	18
Figura 2.12–Esquema gráfico do histograma de uma imagem em escala de cinza com baixo contraste. Adaptado de Eisenbeisser (2015).	20
Figura 2.13–Exemplo de aplicação da técnica de expansão de histograma. Adaptado de Eisenbeisser (2015).	21
Figura 2.14–Exemplo de aplicação da técnica de equalização de histograma. Adaptado de Eisenbeisser (2015).	21
Figura 2.15–Exemplo de aplicação do filtro linear de média. Adaptado de Eisenbeisser (2015).	23
Figura 2.16–Exemplo de aplicação do filtro não linear de mínimo. Adaptado de Eisenbeisser (2015).	24
Figura 2.17–Exemplo de processo de segmentação baseado em bordas. Imagem com regiões de intensidade constante (a), imagem com a borda detectada (b) e imagem segmentada (c). Fonte: Gonzalez e Woods (2009).	25

Figura 2.18–Exemplo de processo de segmentação baseado na região. Imagem com diferentes texturas (a), imagem com falha na detecção da borda (b) e imagem segmentada através das propriedades das regiões (c). Fonte: Gonzalez e Woods (2009).	25
Figura 2.19–Exemplo do processo de limiarização em uma imagem micrográfica de ferro fundido nodular. Imagem original (a), histograma da imagem (b) e imagem segmentada na tonalidade 90 da escala de cinza (c). Fonte: Adaptado de Vidal e Matlakhova (2017).	26
Figura 2.20–Exemplos de aplicação das operações morfológicas básicas de erosão (a) e dilatação (b) sobre uma imagem teste (a). Fonte: Wejrzanowski et al. (2008).	27
Figura 2.21–Exemplos de aplicação das operações morfológicas abertura (a), fechamento (b) e esqueletização (c). Fonte: Wejrzanowski et al. (2008).	28
Figura 2.22–Etapas de um processo de separação de partículas utilizando a técnica de <i>watershed</i> . Imagem binarizada (a), imagem após sucessivas erosões (b), mapa de distância das dilatações (c) e imagem resultante (d). Fonte: Heilbronner e Barrett (2013).	29
Figura 2.23–Exemplo de representação de DMFs e círculos de referência sobre diferentes partículas de grafita em uma microestrutura simulada. Fonte: Elaborado pelo autor.	35
Figura 3.1 – Fluxograma de funcionamento do <i>software</i> OPTGRAN-CS. Fonte: Sales e Silva (2014).	39
Figura 3.2 – Fluxograma de funcionamento do <i>software</i> OPTGRAN-CS. Fonte: Chávez et al. (2015).	39
Figura 3.3 – Interface do programa CellProfiler. Fonte: Lamprecht, Sabatini e Carpenter (2007).	40
Figura 3.4 – Interface do <i>software</i> Quanto. Fonte: Guimarães e Silva (2016).	41
Figura 3.5 – Interface do programa <i>Ilastik</i> . Fonte: Sommer et al. (2011).	42
Figura 3.6 – Interface do programa ImageJ. Fonte: Adaptado de Rueden et al. (2017).	43
Figura 3.7 – Linha do tempo da criação do <i>ImageJ</i> e dos demais <i>softwares</i> relacionados. Fonte: Rueden (2017).	44
Figura 3.8 – Micrografia de amostra de carvão ativado obtida com o MEV e processada com o <i>ImageJ</i> . Fonte: Adaptado de Chilev et al. (2017).	45
Figura 3.9 – Resultado da aplicação da técnica de threshold na seção fina de rocha. Fonte: Grove e Jerram (2011).	46
Figura 3.10–Aplicação da técnica de threshold e análise dos minerais contidos na amostra. Fonte: BARBOSA, SILVA e MENDES (2014).	46
Figura 3.11–Evolução do processo de melhoria da imagem, utilizando um dos conjuntos de algoritmos propostos por Latała e Wojnar (2001). (a) apresenta a imagem original, (b) a imagem binarizada, (c) o resultado da técnica de preenchimento de orifícios e (d) a imagem final.	48

Figura 3.12–Segmentação da ledeburita transformada utilizando técnicas de subtração e dilatação de imagens. Em (a) é apresentada a imagem original e em (b) a ledeburita segmentada. Fonte: Albuquerque, Tavares e Cortez (2011).	49
Figura 3.13–Imagens da microestrutura do material de uma das regiões do reator analisadas nos anos de 2004 (a) e 2007 (b). Fonte: Wejrzanowski et al. (2008).	49
Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia de construção deste trabalho. Fonte: Elaborado pelo autor.	51
Figura 4.2 – Exemplo de interface gerada com o <i>LAMAV-Wizard</i> . Fonte: Elaborado pelo autor.	54
Figura 4.3 – Interface para entrada do local de origem das imagens a serem processadas pela macro. Fonte: Elaborado pelo autor.	55
Figura 4.4 – Exemplo de relatório gerado pelo <i>plugin LAMAV-Report</i> , e carregado em um <i>software</i> de planilha eletrônica. Fonte: Elaborado pelo autor.	56
Figura 4.5 – Interface do <i>plugin LAMAV-Report</i> com todas as suas alternativas de conteúdos marcadas. Fonte: Elaborado pelo autor.	57
Figura 4.6 – Imagem de teste submetida ao <i>Graphite Analyzer</i> com os marcadores resultantes em destaque. Fonte: Elaborado pelo autor.	59
Figura 4.7 – Exemplo de janela com os atributos gerados para a análise dos nódulos de grafita. Fonte: Elaborado pelo autor.	60
Figura 4.8 – Janela com um exemplo de visão parcial dos resultados das análises dos nódulos de grafita de uma amostra de ferro fundido dúctil. Fonte: Elaborado pelo autor.	60
Figura 4.9 – Interface principal do <i>plugin Lineal Analyzer</i> . Fonte: Elaborada pelo autor.	62
Figura 4.10–Exemplo de disposição de linhas de teste horizontais sobre uma imagem binarizada de uma amostra de aço. Fonte: Adaptado de Lober (2018).	63
Figura 4.11–Exemplo de disposição de interceptos sobre grãos de ferrita em uma imagem binarizada de uma amostra de aço. Fonte: Adaptado de Lober (2018).	64
Figura 4.12–Exemplo da janela <i>Results</i> gerada pelo <i>plugin Lineal Analyzer</i> . Fonte: Elaborado pelo autor.	65
Figura 4.13–Exemplo da janela <i>Summary</i> gerada pelo <i>plugin Lineal Analyzer</i> . Fonte: Elaborado pelo autor.	65
Figura 4.14–Interface principal do <i>plugin Test Points Analyzer</i> . Fonte: Elaborada pelo autor.	66
Figura 4.15–Exemplo de disposição de uma malha de pontos de teste sobre uma imagem binarizada de ferro fundido. Fonte: Adaptado de Vidal e Matlakhova (2017).	67
Figura 4.16–Exemplo da janela <i>Results</i> gerada pelo <i>plugin Test Points Analyzer</i> . Fonte: Elaborado pelo autor.	68
Figura 4.17–Exemplo da janela <i>Summary</i> gerada pelo <i>plugin Test Points Analyzer</i> . Fonte: Elaborado pelo autor.	68
Figura 5.1 – Fluxograma das etapas de PADI utilizadas na construção do <i>plugin Graphite Analysis Wizard</i> . Fonte: Elaborado pelo autor.	72

Figura 5.2 – Painel do <i>Wizard</i> para definição da escala da imagem. Fonte: Elaborado pelo autor.	73
Figura 5.3 – Janela de definição de escala da imagem nativa do <i>ImageJ</i> . Fonte: Elaborado pelo autor.	74
Figura 5.4 – Janela do <i>Wizard</i> para alteração da imagem para o modo escala de cinza. Fonte: Elaborado pelo autor.	75
Figura 5.5 – Janela do <i>Wizard</i> que direciona para o processo de segmentação da grafita. Fonte: Elaborado pelo autor.	76
Figura 5.6 – Interface da funcionalidade <i>threshold</i> do <i>ImageJ</i> . Fonte: Elaborado pelo autor.	76
Figura 5.7 – Janela do <i>Wizard</i> que realiza a separação automática e/ou manual dos nódulos de grafita. Fonte: Elaborado pelo autor.	77
Figura 5.8 – Exemplificação do resultado dos processos de segmentação e separação automática dos nódulos de grafita. (a) Imagem como obtida do microscópio. (b) Imagem segmentada com nódulos de grafita desmembrados. Fonte: Adaptado de Vidal e Matlakhova (2017).	78
Figura 5.9 – Janela do <i>Wizard</i> que realiza o processo de análise dos nódulos de grafita. Fonte: Elaborado pelo autor.	78
Figura 5.10–Janela do <i>Wizard</i> que viabiliza a conferência do resultado da análise e a geração de um relatório final do processo. Fonte: Elaborado pelo autor.	79
Figura 5.11–Imagem original de uma amostra de ferro fundido nodular com a camada de marcação identificando os nódulos de grafita analisados. Fonte: Adaptado de Vidal e Matlakhova (2017).	80
Figura 5.12–Micrografias das amostra T3 (a) e T8 (b). Fonte: Adaptado de Vidal e Matlakhova (2017).	81
Figura 5.13–Micrografia segmentada da amostra T8. Fonte: Adaptado de Vidal e Matlakhova (2017).	82
Figura 5.14–Gráfico apresentando valores atípicos para a quantidade de nódulos por mm^2 das amostras T5 e T8. Fonte: Elaborado pelo autor.	83
Figura 5.15–Micrografia da amostra T3 com a marcação da grafita realizada com o método manual. Fonte: Vidal e Matlakhova (2017).	84
Figura 5.16–Micrografia da amostra T3 com a marcação da grafita realizada com o método automatizado. Fonte: Adaptado de Vidal e Matlakhova (2017).	85
Figura 5.17–Exemplo de resultado da aplicação da funcionalidade de separação de partículas em parte da amostra T4. Imagem original (a), partículas detectadas como um único nódulo (b) e partículas detectadas como nódulos distintos (c). Fonte: Adaptado de Vidal e Matlakhova (2017).	86
Figura 5.18–Histograma da grafita da amostra T1 obtido via método automatizado (a) e via método manual (b). Fonte: (a) Elaborado pelo autor, (b) Vidal e Matlakhova (2017).	88

Figura 5.19–Histograma da grafita da amostra T4 obtido via método automatizado (a) e via método manual (b). Fonte: (a) Elaborado pelo autor, (b) Vidal e Matlakhova (2017).	88
Figura 5.20–Histograma da grafita da amostra T7 obtido via método automatizado (a) e via método manual (b). Fonte: (a) Elaborado pelo autor, (b) Vidal e Matlakhova (2017).	88
Figura 5.21–Exemplo de uma imagem ampliada de parte da amostra T1 em seu formato original (a), binarizado (b) e classificado (c). Fonte: Adaptado de Vidal e Matlakhova (2017).	89
Figura 5.22–Imagem micrográfica da amostra T4. (a) Antes da efetivação da análise. (b) Depois da efetivação da análise. Fonte: Adaptado de Vidal e Matlakhova (2017).	90
Figura 5.23–Grau de nodularidade da grafita para cada amostra, calculado através do método manual e do método automatizado. Fonte: Elaborado pelo autor, dados do autor e de Vidal e Matlakhova (2017).	91
Figura 5.24–Quantidade de nódulos de grafita por mm^2 , calculada através do método manual e do método automatizado. Fonte: Elaborado pelo autor, dados do autor e de Vidal e Matlakhova (2017).	92
Figura 5.25–Histograma da grafita da amostra T1 obtido via método automatizado (a) e via método manual (b). Fonte: (a) Elaborado pelo autor, (b) Vidal e Matlakhova (2017).	93
Figura 5.26–Histograma da grafita da amostra T4 obtido via método automatizado (a) e via método manual (b). Fonte: (a) Elaborado pelo autor, (b) Vidal e Matlakhova (2017).	93
Figura 5.27–Histograma da grafita da amostra T7 obtido via método automatizado (a) e via método manual (b). Fonte: (a) Elaborado pelo autor, (b) Vidal e Matlakhova (2017).	94
Figura 5.28–Grau de nodularidade da grafita para cada amostra, calculado através do método manual e do método automatizado (ASTM-E2567 (2016)). Fonte: Elaborado pelo autor, dados do autor e de Vidal e Matlakhova (2017).	95
Figura 5.29–Micrografia da amostra T3 com a marcação da grafita realizada com o método automatizado baseado na norma ASTM-E2567 (2016). Fonte: Adaptado de Vidal e Matlakhova (2017).	95
Figura 5.30–Micrografia da amostra T2 com a marcação da grafita realizada com o método automatizado ISO-945 (2008) (a) e com o método automatizado baseado na norma ASTM-E2567 (2016) (b). Fonte: Adaptado de Vidal e Matlakhova (2017).	96
Figura 5.31–Quantidade de nódulos de grafita por mm^2 , calculada através do método manual e do método automatizado. Fonte: Elaborado pelo autor, dados do autor e de Vidal e Matlakhova (2017).	97

Figura 6.1 – Fluxograma das etapas de PADI utilizadas na construção do <i>plugin Grain Analysis Wizard</i> . Fonte: Elaborado pelo autor.	99
Figura 6.2 – Interface do <i>plugin Grain Analysis Wizard</i> com a etapa de análise em destaque. Fonte: Elaborado pelo autor.	100
Figura 6.3 – Micrografia da amostra de aço. Fonte: Lober (2018).	101
Figura 6.4 – Micrografia segmentada da amostra aço analisada pelo <i>Lineal Analyzer</i> . Fonte: Adaptado de Lober (2018).	102
Figura 6.5 – Micrografia original da amostra de aço com a camada de análise sobreposta para conferência. Fonte: Adaptado de Lober (2018).	103
Figura 6.6 – Micrografia original da amostra de aço sobreposta pela camada de análise gerada pelo <i>Analyze Particles</i> . Fonte: Adaptado de Lober (2018).	104
Figura 6.7 – Micrografia analisada pelo <i>Analyze Particles</i> com grão erroneamente detectado em destaque. Fonte: Adaptado de Lober (2018).	105
Figura 6.8 – Coeficiente de variação dos tamanhos dos grãos obtidos pelas ferramentas <i>Lineal Analyzer</i> e <i>Analyze Particles</i> . Fonte: Elaborado pelo autor.	105
Figura 6.9 – Micrografia segmentada sobreposta pela camada de análise gerada pelo <i>plugin Test Points Analyzer</i> . Fonte: Adaptado de Lober (2018).	106
Figura 6.10–Micrografia original sobreposta pela camada de análise gerada pelo <i>plugin Test Points Analyzer</i> . Fonte: Adaptado de Lober (2018).	107
Figura 6.11–Gráfico comparativo dos percentuais das fases obtidos pelas diferentes estratégias de análise do material. Fonte: Elaborado pelo autor.	108

Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Classificação de tamanhos de grão G calculados para grãos uniformes, aleatoriamente orientados e equiaxiais. Fonte: ASTM-E112 (2013)	13
Tabela 2.2 – Normas ASTM para a determinação de características microestruturais. Fonte: Wojnar et al. (2016).	31
Tabela 5.1 – Tempos de vazamento e temperatura das ligas de ferro fundido analisadas.	71
Tabela 5.2 – Limiares utilizados para a realização da segmentação da grafita existente nas amostras de ferro fundido.	85

Siglas

A_{cr}	área do círculo referente ao diâmetro máximo de <i>Feret</i> da partícula	36
ASTM	<i>American Society of Testing and Materials</i>	vii, xiii, 12, 13, 16, 30, 31, 32, 105, 108
ASTM-E1382	<i>Standard Test Methods for Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis</i>	31
ASTM-E112	<i>Standard Test Methods for Determining Average Grain Size</i>	31
ASTM-E2567	<i>Standard Test Method for Determining Nodularity And Nodule Count In Ductile Iron Using Image Analysis</i>	31
ASTM-A247	<i>Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings</i>	31
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior	38
DMF	diâmetro máximo de <i>Feret</i>	35, 36, 59, 60, 61, 89, 92, 96
FF	fator de forma da partícula	36
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>	30
ISS	International Society for Stereology	5
JIS	<i>Japanese Industrial Standards</i>	30
LAMAV-UENF	Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro	69

MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura	viii, 45
PADI	processamento e análise de imagem	ix, xi, 8, 29, 30, 32, 34, 38, 40, 41, 42, 44, 49, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 70, 72, 98, 99, 102
UENF	Laboratório de Materiais Avançados da UENF	69

Símbolos

\bar{A}	área média dos grãos	11, 12, 15, 16
\bar{A}_α	área média da fase α	11
\bar{L}	valor do intercepto médio	12, 16, 33, 65
$\%NA$	porcentagem de nódulos por unidade de área	36
$(A_A)_\alpha$	fração de área da fase α	8, 11
$(L_L)_\alpha$	fração linear da fase α	9
$(N_A)_\alpha$	número de partículas por unidade de área da fase α	11
$(P_P)_\alpha$	fração de pontos da fase α	10
A	área total da seção	8
A_α	área da fase α	8
A_A	fração de área	8
A_i	área da partícula	36
$A_{nod,i}$	área das partículas de grafita classificadas como nodulares	36
G	número ASTM de classificação de grão	xiii, 12, 13, 14, 16, 31, 32, 33, 65, 101
L	comprimento total da linha de teste	9, 65
L_α	comprimento da linha de teste sobre a fase α	9
L_L	fração linear	8, 9, 65
M	fator de ampliação	15
N	número de interceptos ou partículas medidas	65
N_A	número de grãos por mm^2	11, 12, 14, 15, 16
N_{AE}	número de grãos por polegada quadrada em uma ampliação de 100X	12
N_L	número de interceptos por unidade de comprimento da linha de teste	11, 12, 16, 65
P	total de pontos de teste sobre a seção	10
P_α	total de pontos de teste sobre a fase α	10

P_L	número de contornos de grãos interceptados por unidade de comprimento das linhas de teste	11, 16, 65
P_P	fração de pontos	9, 10, 66, 68
T	valor utilizado como limiar para o processo de segmentação por limiarização	25, 26
V_V	fração de volume	8, 9
f	multiplicador de Jeffries relacionado ao fator de ampliação utilizado	15
f	intensidade de um pixel da imagem	16
$f(x, y)$	função bidimensional que define a intensidade da imagem em (x, y)	16, 26
$g(x, y)$	função bidimensional que define a intensidade da imagem binarizada em (x, y)	26
n_1	número de grãos presentes de forma integral na área de análise	14, 15
n_2	número de grãos presentes de forma parcial na área de análise	14, 15
x	coordenada de um <i>pixel</i> da imagem no eixo da abcissa	16, 26
y	coordenada de um <i>pixel</i> da imagem no eixo da ordenada	16, 26

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa	2
1.1.1	Importância científica	2
1.1.2	Importância tecnológica	2
1.1.3	Importância econômica	2
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Objetivos específicos	3
1.3	Ineditismo	3
1.4	Organização do trabalho	4
1.4.1	Organização dos estudos de caso	4
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
2.1	Estereologia	5
2.1.1	Número de partículas por unidade de área	11
2.1.2	Interseções e intercepções por unidade de comprimento da linha teste	11
2.1.3	Caracterização do tamanho médio de grão	12
2.1.3.1	Método de comparação visual	13
2.1.3.2	Método Planimétrico de Jeffries	14
2.1.3.3	Método de contagem de interceptos	16
2.2	Processamento e análise digital de imagens	17
2.2.1	Modificação de histograma	19
2.2.1.1	Expansão de histograma	20
2.2.1.2	Equalização de histograma	21
2.2.2	Filtragem de imagens	22
2.2.2.1	Filtragem no domínio espacial	22
2.2.2.1.1	Filtragem linear	22
2.2.2.1.2	Filtragem não linear	23
2.2.2.2	Filtragem no domínio da frequência	24
2.2.3	Segmentação	24
2.2.3.1	Segmentação por Limiarização	26
2.2.4	Morfologia matemática	27
2.2.4.1	<i>Watershed</i>	29
2.3	Caracterização automática de microestruturas de materiais	29
2.3.1	Norma ASTM-E1382 (2015)	32
2.3.1.1	Preparação das amostras e das micrografias	32
2.3.1.2	Método de análise por comprimento de intercepto	33
2.3.2	Norma ASTM-E2567 (2016)	34

2.3.2.1	Preparação da amostra	34
2.3.2.2	Procedimento de análise	35
2.4	Padrão Wizard de interface de software	37
3	TRABALHOS RELACIONADOS	38
3.1	Softwares relacionados	39
3.1.1	ImageJ	42
3.2	Pesquisas relacionadas	45
4	MATERIAIS E MÉTODOS	51
4.1	LAMAV-Wizard	53
4.2	LAMAV-Report	56
4.3	Graphite Analyzer	58
4.4	Lineal Analyzer	61
4.5	Test Points Analyzer	66
5	ESTUDO DE CASO I	69
5.1	Introdução	69
5.2	Metodologia	70
5.2.1	Graphite Analysis Wizard	73
5.3	Resultados e discussões	80
5.3.1	Comparativo entre o método manual ISO-945 e o método automatizado ISO-945 (Aproximado)	87
5.3.2	Comparativo entre o método manual ISO-945 e o método automatizado ASTM-2567	92
5.4	Conclusão do estudo de caso I	97
6	ESTUDO DE CASO II	98
6.1	Introdução	98
6.2	Metodologia	98
6.3	Resultados e discussões	101
6.4	Conclusão do estudo de caso II	108
7	CONCLUSÃO	110
7.1	Trabalhos futuros	111
	REFERÊNCIAS	113

1 Introdução

A área de ciência e engenharia dos materiais abrange metalurgia, semicondutores, engenharia cerâmica e ciência dos polímeros. É um campo multidisciplinar que viabiliza a existência de novas tecnologias necessárias para enfrentar uma grande variedade de desafios críticos da sociedade. Embora tradicionalmente vista como uma disciplina experimental, os pesquisadores começaram a tirar vantagem da evolução tecnológica para acelerar a pesquisa e o projeto de materiais (THORNTON et al., 2009).

Diferentes propriedades mecânicas dos materiais são influenciadas pelas características morfológicas das microestruturas que os compõem (WANG et al., 1995; CAVALCANTE et al., 2009). A caracterização quantitativa destas microestruturas viabiliza o desenvolvimento e o entendimento do comportamento dos materiais (SILVA; NAZAR, 2000). Contudo, a determinação de parâmetros microestruturais, como: quantidade de grãos, tamanho de grãos, densidade de precipitados, etc., exige o desenvolvimento de métodos que não são mais compatíveis com as medições manuais (SILVA; NAZAR, 2000).

O uso de recursos computacionais na área de ciência e engenharia de materiais tem oferecido oportunidades significativas para aumentar a competitividade industrial, reduzir tempo e custo de projeto, acelerar o desenvolvimento e incorporação de novos materiais, melhorar processos e treinar pessoal (DUVAL et al., 2014). Dentre estes recursos pode-se destacar o processamento e a análise de imagens (PADI), amplamente utilizados na caracterização de materiais (WOJNAR, 1998).

Assim, a possibilidade de projetar e analisar materiais a partir de imagens se revela de grande importância. A aparência do material em uma imagem digital pode mudar significativamente dependendo da técnica de obtenção da imagem, da escala de análise, da configuração da imagem, das propriedades físicas do material e da preparação do material. Entender esses aspectos é de fundamental importância para realizar a análise e a modelagem de materiais (DUVAL et al., 2014).

No entanto, soluções adequadas de PADI requerem uma compreensão profunda do processo e anos de experiência que dificilmente podem ser resumidos em minutos ou horas (LATAŁA; WOJNAR, 2001). A explicação e compreensão de técnicas isoladas utilizadas no PADI, estão amplamente disponibilizadas na literatura, porém isto não é suficiente para a construção de estratégias eficazes. Este fato aponta a necessidade de desenvolvimento de procedimentos para atender a esta demanda. Latała e Wojnar (2001) citam em seu trabalho um outro complicador, que é a limitada disponibilidade de utilizar especialistas em ciência da computação ou equipes interdisciplinares para esta finalidade.

1.1 Justificativa

Dado o contexto apresentado anteriormente, percebe-se que construir um software com recursos de PADI que demandem grande experiência do utilizador, limita o uso deste software aos usuários com conhecimentos técnicos que na maioria das vezes não são inerentes as suas áreas de atuação.

O Software Livre *ImageJ*, tem o potencial de atender a usuários das mais diferentes áreas da ciência no que diz respeito ao PADI. Contudo, para que as imagens micrográficas sejam submetidas com sucesso à análise do software *ImageJ*, estas precisam ser tratadas digitalmente. Apesar dos recursos existentes no software *ImageJ* serem os mais diversos, estes se encontram dispersos na sua interface e não são específicos para a área de ciência e engenharia dos materiais, dificultando assim o seu uso otimizado por pesquisadores pouco experientes na área de PADI.

1.1.1 Importância científica

Ao disponibilizar um ferramental que viabiliza a utilização de PADI de forma acessível para a caracterização de micrografias, acredita-se que serão potencializadas investigações científicas na área de ciência e engenharia dos materiais.

As características de *software livre* inerentes ao ferramental democratizam o acesso à caracterização de imagens digitais para pesquisadores, professores, técnicos e alunos da área de ciência e engenharia de materiais.

Fazendo uso do ferramental automatizado, o tempo dispensado a processos manuais e repetitivos de análise poderão ser redirecionados para áreas mais nobres da pesquisa.

1.1.2 Importância tecnológica

Este trabalho disponibiliza um ferramental tecnológico que poderá ser expandido para as mais diversas demandas de PADI para a área de materiais.

Etapas de PADI previamente criadas podem ser reutilizadas para o desenvolvimento de novos *Wizards*, padronizando e criando um potencial de colaboração e reaproveitamento de trabalho.

Normas internacionais para automatização do processo de análise de micrografias podem ser colocadas em prática através da utilização deste ferramental.

1.1.3 Importância econômica

Na indústria, gastos com aquisição de software e treinamento por vezes podem ser elementos impeditivos na utilização de novas tecnologias. A disponibilização de um ferramental para análise de micrografia de materiais, gratuito, expansível e auditável, habilita a indústria a otimizar processos e melhorar a qualidade de seus produtos.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver um ferramental que viabilize e facilite a aplicação de técnicas de PADI para a caracterização de materiais em consonância com padrões internacionais.

1.2.1 Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos deste trabalho pode-se destacar:

- Criar uma base de conhecimento de PADI aplicado à caracterização de materiais que possa servir de referência para nortear diferentes trabalhos;
- Desenvolver módulos para o software livre *ImageJ* contendo as técnicas mais comumente utilizadas para análise de imagens micrográficas de materiais;
- Produzir um software base que viabilize a criação de assistentes para orientar o usuário do *ImageJ* no PADI de micrografias de materiais;
- Implementar recursos para permitir que fluxos de PADI anteriormente utilizados no assistente possam ser aplicados a lotes de micrografias de uma mesma amostra sem a necessidade de iteração com o usuário;
- Criar dois assistentes de PADI para micrografias de materiais que estejam aderentes a normas de organizações internacionais;
- Gerar dois estudos de caso para validar os assistentes criados e comparar os resultados obtidos com resultados provenientes da literatura;
- Viabilizar o uso do software *ImageJ* por profissionais da área de materiais sem que para isto sejam necessários conhecimentos aprofundados de análise e processamento de imagens;
- Prover autossuficiência ao software livre *ImageJ* no que tange aos recursos de análise estereológica por fração de pontos, fração linear e fração de área.

1.3 Ineditismo

Os softwares tradicionais da área de PADI comumente utilizam interfaces das quais o utilizador precisa de conhecimento técnico especializado. Não foram identificadas na literatura investigações sobre a aplicação da metodologia de assistentes de software direcionados a problemas de PADI para aplicação em micrografias de materiais.

Além disso a atual pesquisa permite a automatização e flexibilização de processos de análise de micrografias focados em normas para materiais.

Assim, este projeto contribui de forma inédita para a área de engenharia e ciência dos materiais, disponibilizando um conjunto de soluções para o software livre *ImageJ* que ajudará o pesquisador na tomada de decisão da estratégia a ser utilizada no processamento da imagem para

análise, valendo-se de um processo passo a passo, dinâmico, interativo, sensível ao contexto do problema e automatizável.

1.4 Organização do trabalho

Este trabalho está dividido em sete capítulos. O presente capítulo expõe o contexto do estudo, as justificativas desta pesquisa e os objetivos a serem atingidos. O segundo apresenta conceitos de caracterização de materiais, relata algumas normas de organizações internacionais para este fim e faz uma explanação sobre a área de processamento e análise de imagens. O capítulo três aponta alguns trabalhos relacionados, destacando as suas qualidades, limitações, e comparando-os ao presente trabalho. O capítulo quatro apresenta a metodologia de desenvolvimento deste trabalho e do ferramental proposto. O capítulo cinco detalha o estudo de caso sobre a caracterização da grafita em ferros fundidos nodulares. O capítulo seis detalha o estudo de caso sobre caracterização de tamanhos de grãos e percentuais de fases em micrografias de materiais. Finalmente, o capítulo sete apresenta a conclusão e os potenciais trabalhos futuros a serem desenvolvidos.

1.4.1 Organização dos estudos de caso

Cada estudo de caso foi dividido em quatro seções. A primeira seção apresenta a contextualização, justificativas, hipótese e objetivos do estudo de caso. Na segunda seção é exposta a metodologia da construção do estudo de caso e do ferramental para este desenvolvido. Na terceira seção são apontados resultados alcançados e as discussões realizadas. Na última seção são apresentadas as conclusões.

2 Fundamentação Teórica

2.1 Estereologia

A possibilidade de quantificar as características microestruturais de materiais vem se desenvolvendo desde os meados do século XIX (FRIEL, 2000; MANNHEIMER, 2002). As propriedades típicas e o comportamento mecânico dos materiais na sua maioria são influenciados pelas suas microestruturas. Nas ligas metálicas por exemplo, a microestrutura é caracterizada pelo número de fases presentes, suas proporções e a maneira na qual estas são distribuídas. Dai vem o interesse de engenheiros em investigar e caracterizar as microestruturas de seus objetos de estudo (CALLISTER, 2012).

A origem da microscopia quantitativa vem da necessidade de medir parâmetros microestruturais como as dimensões de uma determinada região de interesse ou a fração de um determinado constituinte de material. Porém, as estruturas dos materiais são normalmente tridimensionais, opacas e microscópicas, o que representa uma grande dificuldade de observação do seu interior. Para solucionar este problema a área de microscopia quantitativa precisou evoluir, se tornando o que é hoje a área de estereologia quantitativa, ou somente, estereologia (FRIEL, 2000; MANNHEIMER, 2002).

A estereologia tem o objetivo de estimar as frações de volume dos constituintes de um material relacionando observações feitas usando um microscópio de campo de visão bidimensional a três dimensões (FRIEL, 2000). Apesar da teoria da estereológica básica ser conhecida desde o século XIX, a estereologia como disciplina científica independente foi formalizada em 1961, com a fundação da *International Society for Stereology* (ISS), organizada pelo professor alemão Hans Elias, considerado o fundador da estereologia moderna (BADDELEY; JENSEN, 2004; MIYAMOTO, 1994). Dentre as ações da ISS está a criação do padrão de notação para a área de estereologia, o qual será utilizado no decorrer deste trabalho.

Definições semelhantes de estereologia podem ser encontradas na literatura, dentre estas uma das mais adequadas é a definição de UNDERWOOD (1970): "Estereologia é o conjunto de métodos para a exploração do espaço tridimensional, quando apenas seções bidimensionais de corpos sólidos ou suas projeções em uma superfície estão disponíveis"(UNDERWOOD, 1970, Tradução nossa).

Depois de mais de dois séculos desde sua origem, a estereologia é parte integrante de muitos campos científicos, como a mineralogia, metalografia, biologia, dentre outros (MIYAMOTO, 1994; RUSS, 1986; FRIEL, 2000; BADDELEY; JENSEN, 2004; MANNHEIMER, 2002).

O uso mais intensivo da estereologia tem sido em conjunto com imagens de microscópio, que inclui microscópios ópticos, microscópios eletrônicos, dentre outros. A Figura 2.1

apresenta um exemplo de imagem obtida por um microscópio óptico. A imagem foi originada de uma amostra de aço com baixo teor de carbono, polida e atacada quimicamente, de onde podem ser visualizadas linhas escuras destacando os contornos de grãos do material.

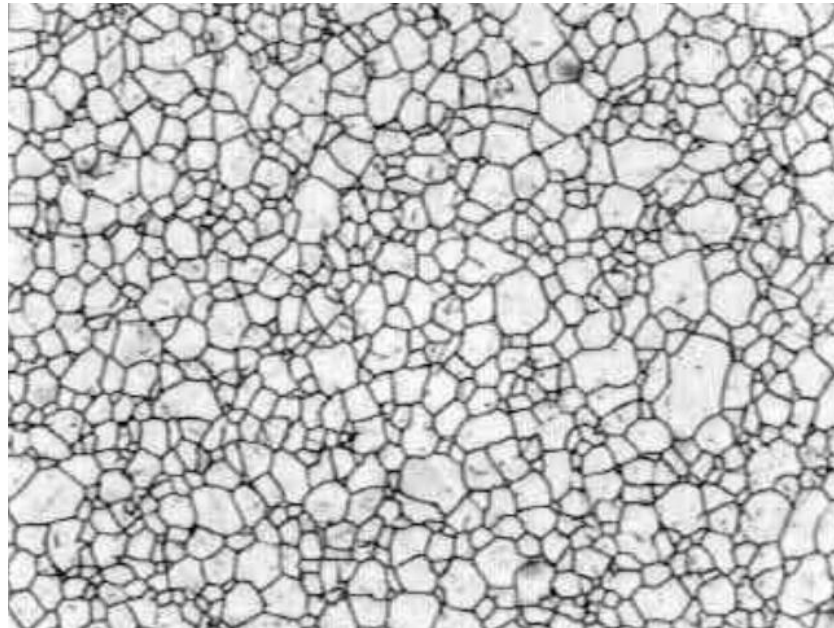


Figura 2.1 – Imagem de um aço com baixo teor de carbono obtida de microscópio óptico. Fonte: Russ (1986)

A imagem da Figura 2.1 representa um seção através de uma estrutura tridimensional de uma amostra opaca, sendo este o tipo mais comum de imagem utilizada na microscopia (BADDELEY; JENSEN, 2004; RUSS, 1986; MANNHEIMER, 2002). No entanto, a geração de imagens a partir de seções resulta na perda de informação, fazendo com que características dos materiais não estejam prontamente aparentes. Quando uma seção intercepta elementos na microestrutura, as imagens resultantes destes elementos são reduzidas em uma dimensão Baddeley e Jensen (2004), Russ (1986). A Figura 2.2 apresenta um exemplo de uma população de partículas tridimensionais transformada em um plano de corte bidimensional.

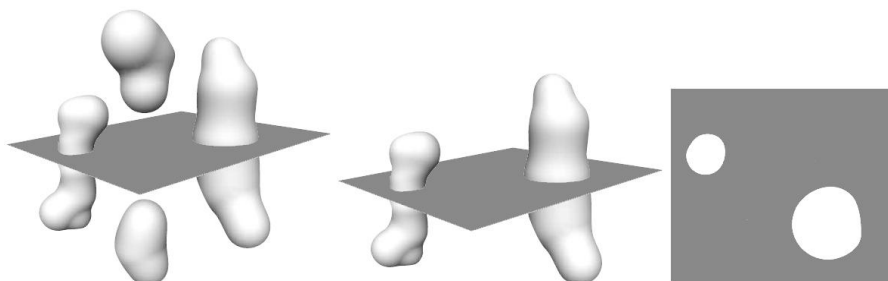


Figura 2.2 – Exemplo de uma estrutura de partículas seccionada por um plano de corte. Fonte: Baddeley e Jensen (2004)

Na Figura 2.2 a população original de partículas é seccionada de forma aleatória com

probabilidade de amostragem proporcional às alturas das partículas. Também pode ser percebido que cada partícula seccionada foi revelada como uma área superficial bidimensional.

Quando se obtém um plano de corte de uma superfície tridimensional contendo um objeto cuja geometria é uma superfície bidimensional, este será revelado como uma curva de perfil unidimensional. A Figura 2.3 apresenta um exemplo de superfície bidimensional seccionada por um plano de corte.

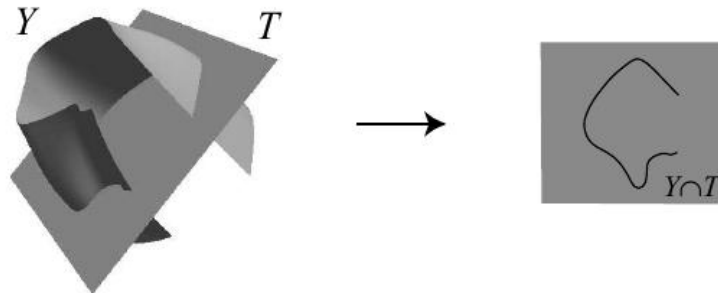


Figura 2.3 – Exemplo de uma superfície seccionada por um plano de corte. Fonte: [Baddeley e Jensen \(2004\)](#)

Na Figura 2.3 pode ser observado que a superfície Y interceptada pelo plano de corte T resulta na linha formada pela interseção de Y com T ($Y \cap T$).

No momento que se obtém um plano de corte de uma superfície tridimensional contendo um objeto cuja geometria é uma linha bidimensional, este será revelado como pontos dispersos na superfície. A Figura 2.4 apresenta um exemplo de objeto na forma de linha seccionado por um plano de corte.

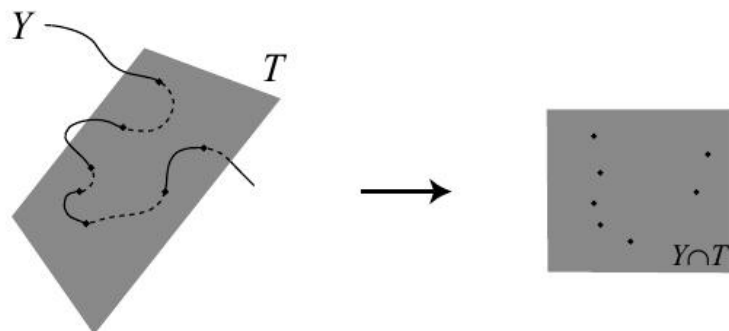


Figura 2.4 – Exemplo de uma estrutura de partículas seccionada por um plano de corte. Fonte: [Baddeley e Jensen \(2004\)](#)

Na Figura 2.4 pode ser observado que a linha Y interceptada pelo plano de corte T resulta nos pontos formados pela interseção de Y com T ($Y \cap T$).

Estes fenômenos podem ser percebidos na prática observando a micrografia da amostra de aço presente na Figura 2.1. Nesta, os grãos que compõem a estrutura do material são

representados pelas superfícies claras. Já os contornos de grãos, formados pelos limites das superfícies bidimensionais destes grãos, são revelados pela linha escura presente na micrografia. Apesar de não ser tão aparente, o encontro entre três ou mais destes grãos formam uma curva de perfil unidimensional no material sólido que na micrografia são identificados como pontos.

A primeira relação estereológica quantitativa desenvolvida com microscopia é atribuída ao geólogo francês Delesse (1847 apud BADDELEY; JENSEN, 2004). No seu trabalho foi estimada a proporção de um mineral em uma amostra de rocha e comprovada a equivalência entre a fração de área (A_A) e a fração de volume (V_V) (PABST; GREGOROVA; UHLIROVA, 2015; WEST, 2012; FRIEL, 2000). A introdução da técnica de Delesse reduziu o esforço necessário para obter uma estimativa razoavelmente precisa da composição mineral da rocha. Devido a este método a comunidade científica passou a aceitar gradualmente a ideia de que a amostragem pode produzir resultados precisos (FRIEL, 2000; BADDELEY; JENSEN, 2004).

Para por em prática esse método estereológico, a seção plana e polida de uma rocha foi sobreposta com uma espécie de papel pesado, constituído de parafina, onde foram marcadas e recortadas as representações dos componentes do material. Pelo princípio de Delesse, a fração do peso da parafina atribuído a um determinado mineral, é uma estimativa da fração de rocha ocupada por este mesmo mineral (BADDELEY; JENSEN, 2004).

Atualmente, com o advento de sistemas computacionais, este método foi simplificado pela utilização das técnicas de processamento e análise de imagens (PADI), as quais serão discutidas no decorrer deste trabalho.

A determinação da fração de área (A_A) é dada pela Equação 2.1.

$$(A_A)_\alpha = \frac{A_\alpha}{A} \quad (2.1)$$

onde:

$(A_A)_\alpha$ fração de área da fase α
 A_α área da fase α
 A área total da seção

Delesse também afirmou que a fração de volume poderia ser determinada por uma abordagem de análise linear, mas não definiu tal método (FRIEL, 2000). A relação entre fração linear (L_L) e fração de volume (V_V) foi demonstrada pelo geólogo alemão Rosiwal (1898 apud BADDELEY; JENSEN, 2004). Este pesquisador demonstrou que a soma dos comprimentos dos segmentos de linha dentro da fase de interesse dividida pelo comprimento total forneceria uma estimativa válida da fração de volume com menos esforço do que a análise por área (PABST; GREGOROVA; UHLIROVA, 2015; WEST, 2012; BADDELEY; JENSEN, 2004; FRIEL, 2000; RUSS, 1986).

Este método pode ser posto em prática utilizando uma grade de linhas paralelas igualmente espaçadas e sobrepostas ao plano de corte de um material. A Figura 2.5 apresenta um

exemplo de aplicação da grade de linhas de teste para o cálculo da fração linear (L_L) dos minerais presentes em uma seção de rocha.

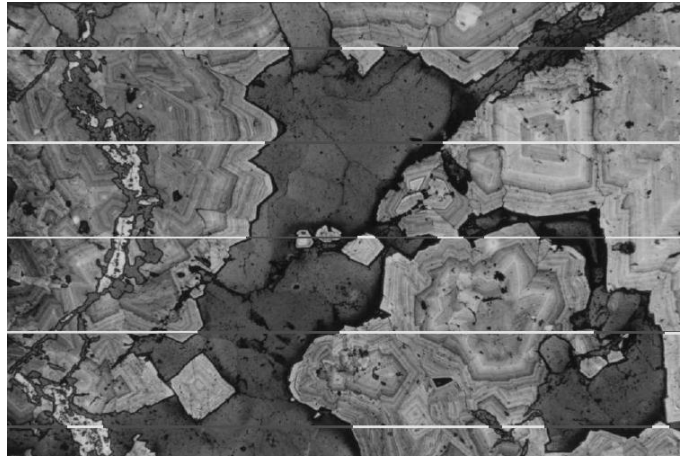


Figura 2.5 – Aplicação da técnica de intercepto sobre uma seção de rocha. Fonte: [Baddeley e Jensen \(2004\)](#)

Na Figura 2.5, a fração do comprimento total das linhas de grade que sobrepõem o mineral de interesse (L_L) é uma aproximação da fração do volume deste mineral na rocha (V_V). Em materiais com microestruturas espacialmente homogêneas, a técnica mais simples de ser utilizada é a de linhas paralelas. Estas comumente são dispostas na horizontal ou na vertical, contudo diferentes disposições de linhas de teste podem ser utilizadas sobre o plano de corte ([BADDELEY; JENSEN, 2004](#)). Para materiais com estruturas espaciais heterogêneas é recomendado que as linhas de teste estejam dispostas em diferentes direções visando a obtenção da fração correta do constituinte analisado ([FRIEL, 2000](#)).

A determinação da fração de linear (L_L) é dada pela [Equação 2.2](#).

$$(L_L)_\alpha = \frac{L_\alpha}{L} \quad (2.2)$$

onde:

- $(L_L)_\alpha$ fração linear da fase α
- L_α comprimento da linha de teste sobre a fase α
- L comprimento total da linha de teste

Posteriormente, a relação entre fração de volume e pontos em uma matriz de teste foi estabelecida por [Thompson \(1930 apud BADDELEY; JENSEN, 2004\)](#), estabelecendo a relação entre (P_P) e (V_V), onde (P_P) é a contagem de pontos. Este método oferece a mesma precisão dos anteriores, porém com menor esforço ([PABST; GREGOROVA; UHLIROVA, 2015; BADDELEY; JENSEN, 2004; FRIEL, 2000](#)).

Este método é utilizado sobrepondo uma grade de pontos igualmente espaçados sobre um plano de corte do material. A Figura 2.6 apresenta um exemplo de aplicação da grade de

pontos de teste para o cálculo da fração linear (P_P) dos minerais presentes em uma seção de rocha.

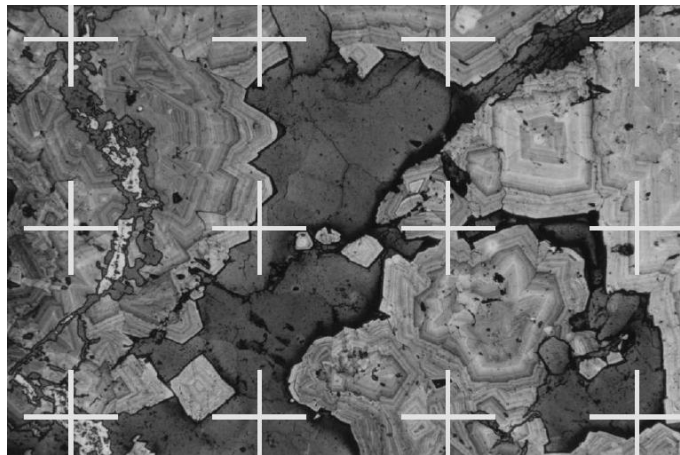


Figura 2.6 – Aplicação da técnica de pontos de teste sobre uma seção de rocha. Fonte: [Baddeley e Jensen \(2004\)](#)

O cálculo da fração de pontos (P_P) é realizado contando-se os pontos sobrepostos à fase de interesse e dividindo este valor pelo total de pontos da grade [Equação 2.3](#).

$$(P_P)_\alpha = \frac{P_\alpha}{P} \tag{2.3}$$

onde:

- $(P_P)_\alpha$ fração de pontos da fase α
- P_α total de pontos de teste sobre a fase α
- P total de pontos de teste sobre a seção

A Figura 2.7 ilustra as relações de igualdade das equações matemáticas referentes à fração de volume, fração de área, fração linear e fração de pontos.

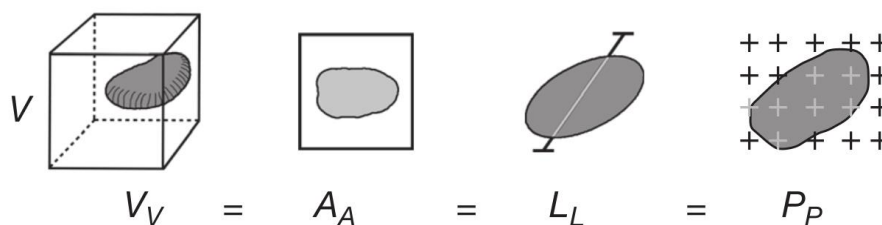


Figura 2.7 – Relações entre as equações estereológicas para estimativa da fração volumétrica. Fonte: [West \(2012\)](#).

Os métodos apresentados até aqui são básicos e remontam à história da estereologia. Contudo, existe uma variedade de métodos disponíveis na literatura para os mais diferentes

fins (PABST; GREGOROVA; UHLIROVA, 2015; ASTM-E1382, 2015; WEST, 2012; BAD-DELEY; JENSEN, 2004; MANNHEIMER, 2002; FRIEL, 2000; MIYAMOTO, 1994; RUSS, 1986). Neste trabalho foram aplicados, além dos métodos apresentados, alguns métodos que viabilizam a obtenção do tamanho médio de grão, os quais serão apresentados nas próximas seções.

2.1.1 Número de partículas por unidade de área

A contagem do número de partículas dentro de uma determinada área de medição (N_A) é um parâmetro microestrutural utilizado em diferentes contextos. A área média das partículas (\bar{A}) pode ser calculada de acordo com a Equação 2.4.

$$\bar{A}_\alpha = \frac{(A_A)_\alpha}{(N_A)_\alpha} \quad (2.4)$$

onde:

- \bar{A}_α área média da fase α
- $(A_A)_\alpha$ fração de área da fase α
- $(N_A)_\alpha$ número de partículas por unidade de área da fase α

2.1.2 Interseções e intercepções por unidade de comprimento da linha teste

Dois parâmetros microestruturais úteis obtidos de análises lineares são o número de interseções por unidade de comprimento de linha de teste (P_L) e o número de intercepções por unidade de comprimento da linha teste (N_L) (SILVA, 2007; FRIEL, 2000; UNDERWOOD, 1970). A Figura 2.8 apresenta três exemplos de utilização destas técnicas.

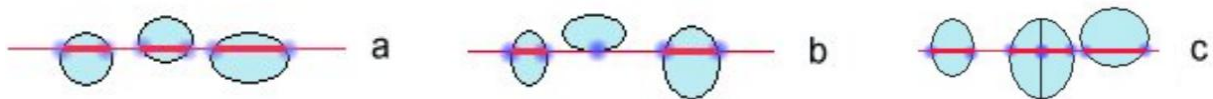


Figura 2.8 – Exemplos de intercepções de linhas de teste sobre partículas e interseções de linhas de teste sobre limites de partículas. (a) Interseções simples, (b) interseção tangenciando grão e (c) interseção entre grãos da mesma fase. Fonte: Adaptado de Silva (2007)

Para o cálculo de P_L são contadas as interseções existentes entre os contornos das fases, ou dos grãos do material, sobrepostos pelas linhas teste. Pode ser observado nos exemplos da Figura 2.8 que os pontos de interface entre as fases estão destacados pela cor azul escuro.

As interseções devem ser contadas com peso 1, porém, aquelas que apenas tangenciam os grãos da fase de interesse devem ser contadas com peso 1/2. Na Figura 2.8(b), pode ser

percebido que o grão central é apenas tangenciado pela linha teste, sendo contabilizado como 1/2. Tem-se então 6 interseções para o exemplo (a), 4,5 interseções para o exemplo (b) e 7 interseções para o exemplo (c).

Para o cálculo de N_L são contados os componentes da fase de interesse interceptados pela linha teste. Os interceptos deverão ser contabilizados com valor 1, com exceção daqueles que estiverem tangenciando grãos e daqueles que estiverem tocando os limites da amostra, os quais deverão ser contados com valor 1/2. Nos exemplos da Figura 2.8, as linhas teste sobrepostas às fases de interesse foram destacadas na cor vermelha.

Para estruturas monofásicas considera-se, $P_L = N_L$. No exemplo (a), a quantidade de interceptos é 3 enquanto a quantidade de interseções é 6, mostrando que para estruturas de duas fases $P_L = 2 \cdot N_L$. No exemplo (b), esta expressão continua válida para uma amostra com um conjunto reduzido de grãos tangenciados. Já para o exemplo (c) o cálculo passa a ser diferenciado, pois existe interseção entre grãos da mesma fase que serão contabilizados com peso 1 (SILVA, 2007).

2.1.3 Caracterização do tamanho médio de grão

Uma das caracterizações microestruturais mais comumente realizadas é a identificação do tamanho de grão médio de materiais como metais, ligas e cerâmicas (GOKHALE, 2013; BRANDON; KAPLAN, 2013; FRIEL, 2000).

Existe uma variedade de parâmetros que podem ser utilizados para medir o tamanho dos grãos como: diâmetro médio (d), área média de grãos (\bar{A}), número de grãos por unidade de área (N_A), comprimento médio de intercepto (\bar{L}), número de grãos interceptados por linha teste (N_L), dentre outros (GOKHALE, 2013; BRANDON; KAPLAN, 2013; FRIEL, 2000).

A fim de padronizar testes e medições para a área de materiais, a *American Society for Testing and Materials* (ASTM) desenvolveu normas que guiam e permitem a reprodução de testes de análise quantitativa de imagens. A norma ASTM-E112 (2013) apresenta um material de referência para classificar o que denominou de grão médio G .

A escala de ampliação utilizada como padrão para o cálculo do grão G é de 100X, sendo assim, para micrografias capturadas com diferentes graus de ampliação faz-se necessária a adequação da escala. O grão G foi originalmente definido pela Equação 2.5.

$$N_{AE} = 2^{G-1} \quad (2.5)$$

onde:

N_{AE} número de grãos por polegada quadrada em uma ampliação de 100X
 G número ASTM de classificação de grão

Os tamanhos de grão G são classificados de 00 a 14, com gradação de 0.5, totalizando 30 índices (ASTM-E112, 2013). A Tabela 2.1 apresenta a classificação de grão G em conjunto com as propriedades grãos por unidade de área, área média, diâmetro médio e intercepto médio.

Tabela 2.1 – Classificação de tamanhos de grão G calculados para grãos uniformes, aleatoriamente orientados e equiaxiais. Fonte: ASTM-E112 (2013)

Nº do tamanho de grão G	\tilde{N}_A Grãos /Unidade de Área		\tilde{A} Área média do grão		\tilde{d} Diâmetro médio		\tilde{l} Intercepto médio	
	No./in. ² - 100X	No./mm ² - 1X	mm ²	µm ²	mm	µm	mm	µm
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0	0.4525	452.5
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2	0.3200	320.0
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1	0.2691	269.1
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0	0.2263	226.3
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6	0.1903	190.3
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6	0.1600	160.0
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0	0.1345	134.5
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0	0.1131	113.1
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8	0.0951	95.1
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8	0.0800	80.0
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5	0.0673	67.3
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5	0.0566	56.6
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4	0.0476	47.6
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9	0.0400	40.0
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8	0.0336	33.6
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8	0.0283	28.3
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7	0.0238	23.8
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5	0.0200	20.0
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9	0.0168	16.8
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9	0.0141	14.1
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3	0.0119	11.9
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2	0.0100	10.0
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4	0.0084	8.4
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9	0.0071	7.1
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7	0.0060	5.9
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6	0.0050	5.0
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7	0.0042	4.2
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0	0.0035	3.5
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3	0.0030	3.0
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8	0.0025	2.5

Na Tabela 2.1 são apresentadas as quantidades de grãos por unidade de área nas escalas de 100X e 1X. Enquanto para a escala de 100X a unidade de medida é definida como número de grãos por polegada quadrada, na escala de 1X é definida como número de grãos por milímetro quadrado. Observando as colunas 2 e 3 da tabela pode-se constatar que para converter o número de grãos da unidade de polegada quadrada para milímetros quadrados basta multiplicar por 15,5 (ASTM-E112, 2013; FRIEL, 2000).

A norma ASTM-E112 (2013) apresenta três diferentes métodos para a obtenção do tamanho de grão: o método de comparação visual, o método planimétrico e o método por interceptos (ASTM-E112, 2013; FRIEL, 2000).

2.1.3.1 Método de comparação visual

Para a realização do método por comparação não são exigidas contagens por parte do pesquisador, apenas é realizada a comparação qualitativa da estrutura dos grãos com uma série de imagens padronizadas (ASTM-E112, 2013). A Figura 2.9 apresenta um exemplo de retículo para ser utilizado no microscópio óptico, que consiste em imagens de padrões de tamanhos de grãos pré-definidos para comparação, utilizando ampliação de 100X.

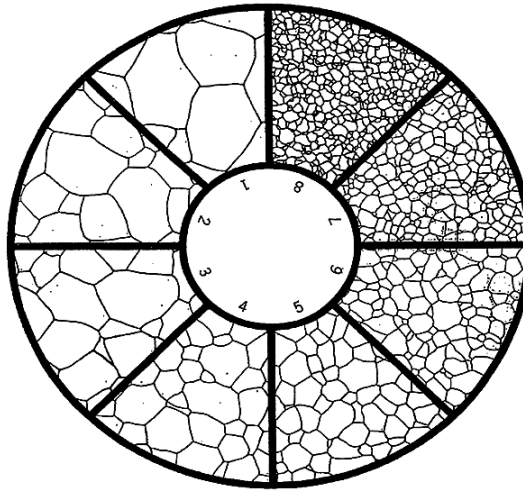


Figura 2.9 – Retículo para realização do método de identificação do grão ASTM diretamente no microscópio. Fonte: Benjamin (2014).

Pode ser observado na Figura 2.9 que os grãos presentes no retículo possuem índices (G) de 1 a 8, onde os valores menores são referentes aos grãos maiores e vice-versa (ASTM-E112, 2013).

2.1.3.2 Método Planimétrico de Jeffries

Este método envolve a contagem do número de grãos contidos em uma área conhecida da amostra (N_A). Este valor é então utilizado para determinar o número do tamanho médio de grão G .

Segundo a norma ASTM-E112 (2013), um círculo com 79,8 mm de diâmetro (5000 mm² de área) deverá ser traçado sobre a micrografia da amostra em análise. A micrografia deverá possuir um fator de ampliação que permita que no mínimo 50 e no máximo 100 grãos estejam presentes no interior do círculo. O número de grãos presentes de forma integral dentro do círculo (n_1) deve ser contabilizado separadamente do número de grãos interceptados pelo contorno do círculo (n_2). A Figura 2.10 apresenta um exemplo de aplicação do método planimétrico.

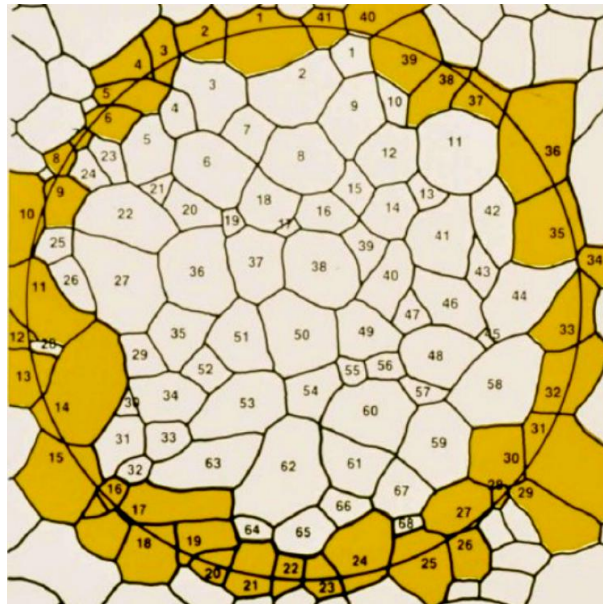


Figura 2.10 – Exemplo de utilização do método planimétrico de Jeffries. Fonte: [Prakasan \(2013\)](#).

Para melhorar a precisão do processo manual os grãos são numerados à medida que são contados, o que torna este método lento (Figura 2.10). O número de grãos por milímetro quadrado (N_A), é determinado pela [Equação 2.6](#).

$$N_A = f \cdot \left(n_1 + \frac{n_2}{2} \right) \quad (2.6)$$

onde:

N_A número de grãos por mm^2

f multiplicador de Jeffries relacionado ao fator de ampliação utilizado

n_1 número de grãos presentes de forma integral na área de análise

n_2 número de grãos presentes de forma parcial na área de análise

O valor de f pode ser calculado para qualquer fator de ampliação utilizando a [Equação 2.7](#).

$$f = \frac{M^2}{5000} \quad (2.7)$$

onde:

M fator de ampliação

5000 área do círculo de referência

A área média do grão (\bar{A}) é determinada em milímetros quadrados pela [Equação 2.8](#).

$$\bar{A} = \frac{1}{N_A} \quad (2.8)$$

onde:

\bar{A} área média dos grãos
 N_A número de grãos por mm^2

Utilizando N_A ou \bar{A} pode-se obter o tamanho de grão G através da tabela disponível pela [ASTM-E112 \(2013\)](#). O valor do grão G , também poderá ser obtido em função de N_A utilizando a [Equação 2.9](#).

$$G = -3.322 \cdot (\log_{10} N_A) - 2.95 \quad (2.9)$$

onde:

G número ASTM de classificação de grão
 N_A número de grãos por mm^2

2.1.3.3 Método de contagem de interceptos

A norma [ASTM-E112 \(2013\)](#) recomenda que sejam utilizadas linhas de teste para interceptar no mínimo 50 grãos. É necessário que seja realizada uma combinação adequada entre o comprimento da linha de teste e a ampliação para produzir o número mínimo de interceptações.

O método para estimar o tamanho de grão G por contagem de interceptos pode ser realizado em função de N_L , P_L ou \bar{L} . A norma ([ASTM-E112, 2013](#)) disponibiliza tabelas e equações matemáticas para a realização das devidas conversões.

Dentre os três parâmetros citados o intercepto médio (\bar{L}) é o único que pode ser utilizado em materiais polifásicos. Devido a isto, este foi o método utilizado neste trabalho para caracterização do tamanho de grão G . A [Equação 2.10](#) determina o grão médio ASTM (G) em função do intercepto médio (\bar{L}).

$$G = -6.644 \cdot (\log \bar{L}) - 3.288 \quad (2.10)$$

onde:

G número ASTM de classificação de grão
 \bar{L} valor do intercepto médio

O fato de se obter precisão na contagem, sem a necessidade de marcar todos os grãos da área da amostra, torna o método de análise linear por intercepto mais rápido que o método planimétrico para o mesmo nível de precisão ([ASTM-E112, 2013](#)).

2.2 Processamento e análise digital de imagens

Uma imagem pode ser definida matematicamente como uma função bidimensional, $f(x, y)$, em que x e y são coordenadas espaciais, e a amplitude de f em qualquer par de coordenadas (x, y) é chamada de intensidade naquele ponto. Quando os valores de x , y e f são finitos e discretos, a imagem é considerada digital (HEILBRONNER; BARRETT, 2013; GONZALEZ; WOODS, 2009). A imagem digital é composta por um número finito de elementos distribuídos chamados *pixels*. Estes possuem valores particulares que representam as informações referentes à luminosidade e cor.

A área de processamento digital de imagens se refere ao processamento de imagens digitais via computador (GONZALEZ; WOODS, 2009; PEDRINI; SCHWARTZ, 2008). O processamento de imagens permite destacar informações de interesse das imagens, corrigir defeitos existentes e melhorar a qualidade visual de aspectos estruturais, facilitando assim, a percepção humana ou a interpretação automática por meio de máquinas (HEILBRONNER; BARRETT, 2013; PEDRINI; SCHWARTZ, 2008). O resultado final do processamento digital de uma imagem é uma imagem secundária contendo as alterações realizadas.

A análise de imagem, se diferencia do processamento de imagem, não tanto pelos algoritmos que são empregados, mas para o fim ao qual se destina. Ao contrário do processamento de imagens, o resultado final da análise de imagem é um conjunto de números ou um gráfico referente a extração de alguma informação da imagem (HEILBRONNER; BARRETT, 2013; GONZALEZ; WOODS, 2009; WOJNAR, 1998).

Gonzalez e Woods (2009) afirmam em seu trabalho que não existem limites claros para um sistema composto de uma linha contínua com o processamento de imagem de um lado e a análise de imagem de outro. Contudo, os autores apresentam um paradigma composto de três diferentes processos computacionais: processos de nível baixo, nível médio e nível alto.

Processos de nível baixo são aqueles que envolvem operações como o pré-processamento de imagens para reduzir ruídos, realce de contraste e aguçamento de imagens. Já os processos de nível médio envolvem tarefas como a separação de uma imagem em regiões ou objetos e o reconhecimento de objetos individuais. Os processos de nível alto envolvem um conjunto de dados sobre os objetos reconhecidos, isto é, a análise de imagens.

Já na visão de (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008) existem apenas os níveis baixo e alto. No referido trabalho, os níveis baixo e médio apresentados por (GONZALEZ; WOODS, 2009) compõem um único nível, o baixo.

Um sistema que envolve processamento e análise de imagens tem como objetivo extrair dados relevantes para uma determinada aplicação. A Figura 2.11 apresenta as diferentes etapas que envolvem o processamento e a análise de imagens.

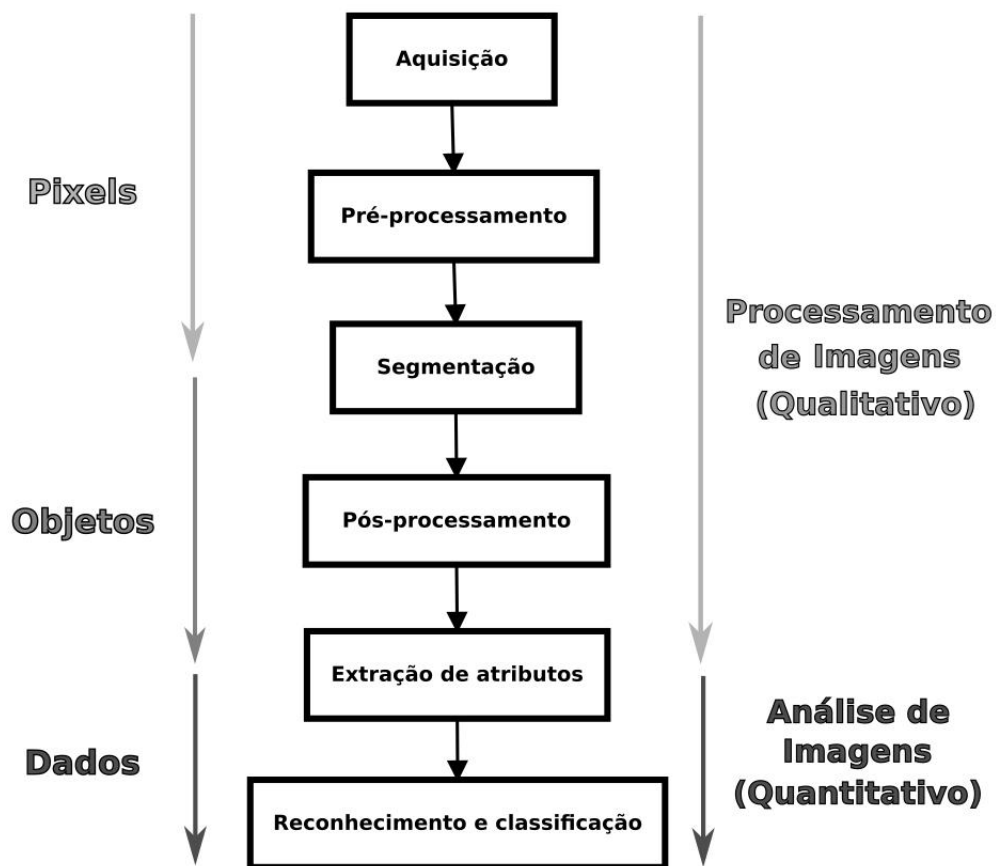


Figura 2.11 – Etapas que envolvem o processamento e a análise digital de imagens. Fonte: [Gomes, Paciornik e Brocchi \(2007\)](#).

A aquisição da imagem é o primeiro passo do processo. Nesta etapa a imagem é digitalizada, isto é, transformada em uma representação numérica utilizando um sensor de imagens com capacidade para digitalizar o sinal. Alguns exemplos de dispositivos para aquisição de imagens são: câmeras de vídeo, tomógrafos, microscópios, satélites e scanners ([HEILBRONNER; BARRETT, 2013](#); [FRIEL, 2000](#)).

A etapa de pré-processamento tem por objetivo melhorar a imagem, corrigindo defeitos provenientes da aquisição e realçando características de interesse, de modo a facilitar sua visualização ou viabilizar a sua análise. Técnicas como atenuação de ruído, correção de contraste ou brilho e suavização de determinadas propriedades da imagem são aplicadas nesta etapa ([HEILBRONNER; BARRETT, 2013](#); [GONZALEZ; WOODS, 2009](#); [WOJNAR, 1998](#)).

A etapa de segmentação visa extrair e identificar regiões da imagem similares em termos de características como intensidade, cor e textura. A imagem é subdividida em objetos constituintes ou partes de interesse do estudo. Quanto mais precisa for esta etapa maiores são as chances de sucesso da análise a ser realizada ([HEILBRONNER; BARRETT, 2013](#); [GONZALEZ; WOODS, 2009](#); [WOJNAR, 1998](#)).

O pós-processamento é a etapa em que tenta-se realçar os elementos de interesse anteriormente segmentados. Características existentes nestes elementos são refinadas para obter resultados otimizados na análise. Um exemplo de estratégia de pós-processamento é afinar bordas

de elementos anteriormente obtidos na etapa de segmentação, viabilizando assim uma análise mais precisa dos mesmos (HEILBRONNER; BARRETT, 2013; GONZALEZ; WOODS, 2009; WOJNAR, 1998).

Na etapa de extração de atributos as características da imagem são transformadas em dados quantitativos a serem utilizados na pesquisa. Nesta etapa os objetos são identificados e características como tamanho, forma, posição e textura, são medidas (GONZALEZ; WOODS, 2009; GOMES; PACIORNIK; BROCCHI, 2007; FRIEL, 2000).

Na etapa de reconhecimento e classificação os dados quantitativos são analisados e os dados são transformados em informação (HEILBRONNER; BARRETT, 2013; GONZALEZ; WOODS, 2009; WOJNAR, 1998).

Para que o processamento e a análise de imagens ocorram de forma satisfatória, faz-se necessário conhecer o domínio do problema. Este conhecimento deverá estar codificado na forma de uma base de conhecimentos que, dependente da aplicação, guiará a comunicação entre os módulos de processamento a fim de executar uma determinada tarefa (GONZALEZ; WOODS, 2009; PEDRINI; SCHWARTZ, 2008).

A seguir serão apresentadas algumas das principais técnicas de processamento de imagens disponibilizadas na literatura.

2.2.1 Modificação de histograma

Um histograma é uma representação gráfica da distribuição das intensidades dos *pixels* que compõem uma imagem, ou seja, o número de *pixels* existentes para cada intensidade luminosa. Por convenção, um histograma representa o nível de intensidade dos *pixels* no eixo das abcissas, partindo dos de menor intensidade (à esquerda) aos de maior intensidade (à direita) (HEILBRONNER; BARRETT, 2013; GONZALEZ; WOODS, 2009; PEDRINI; SCHWARTZ, 2008; FILHO; NETO, 1999; WOJNAR, 1998).

Por exemplo, o histograma de uma imagem com 256 níveis de cinza será representado por um gráfico que possua 256 valores em abcissas, com a quantidade de *pixels* da imagem representado para cada valor no eixo das ordenadas.

Na Figura 2.12 é apresentado um exemplo de histograma de uma imagem micrográfica do metal bronze em níveis de cinza.



Figura 2.12 – Esquema gráfico do histograma de uma imagem em escala de cinza com baixo contraste. Adaptado de [Eisenbeisser \(2015\)](#).

Através da representação do histograma de uma imagem pode-se ter uma avaliação de sua qualidade quanto ao seu brilho e nível de contraste ([PEDRINI; SCHWARTZ, 2008](#)).

Histogramas são a base para várias técnicas de processamento de imagens no domínio espacial. As técnicas baseadas na modificação de histograma são conhecidas como ponto-a-ponto, devido a alteração do tom de cinza de um *pixel* depender apenas do seu valor original ([GONZALEZ; WOODS, 2009](#); [FILHO; NETO, 1999](#)).

A seguir são apresentadas duas das mais conhecidas técnicas de processamento de imagens baseadas na modificação de histogramas.

2.2.1.1 Expansão de histograma

Nesta técnica, o histograma original de uma imagem é alterado de forma que parte dele seja expandido para ocupar toda a faixa de cinza da imagem. A técnica produz benefícios mais relevantes em casos em que uma faixa reduzida de níveis de cinza é utilizada, produzindo uma imagem com maior contraste e conseqüentemente mais rica em detalhes ([HEILBRONNER; BARRETT, 2013](#); [GONZALEZ; WOODS, 2009](#); [PEDRINI; SCHWARTZ, 2008](#); [FILHO; NETO, 1999](#); [WOJNAR, 1998](#)). Um exemplo de aplicação da técnica de expansão de histograma, sobre a imagem original da Figura 2.12, é apresentado na Figura 2.13.

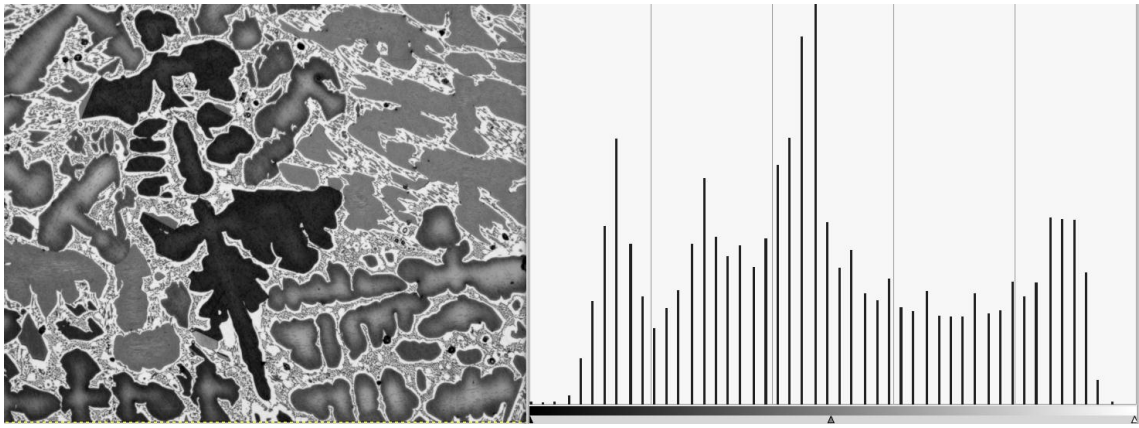


Figura 2.13 – Exemplo de aplicação da técnica de expansão de histograma. Adaptado de Eisenbeisser (2015).

2.2.1.2 Equalização de histograma

Técnica que modifica o histograma da imagem original de forma que a imagem transformada possua uma distribuição mais uniforme dos seus níveis de cinza, fazendo com que estes apareçam na imagem com frequências aproximadas. O resultado final obtido pela equalização de histograma é uma melhoria do contraste geral da imagem original (HEILBRONNER; BARRETT, 2013; GONZALEZ; WOODS, 2009; PEDRINI; SCHWARTZ, 2008; FILHO; NETO, 1999; WOJNAR, 1998).

Na equalização de histograma é preservada a sequência original dos tons de cinza da imagem, porém a quantidade de cada um dos tons de cinza pode ser alterada, visando tornar mais plana a representação dos níveis de cinza na imagem.

As imagens geradas por esta técnica podem apresentar imagens pouco naturais, porém, produz imagens com maior contraste, preservando os detalhes da imagem inicial (WOJNAR, 1998). Um exemplo de aplicação da técnica de equalização de histograma, sobre a imagem original da Figura 2.12, é apresentado na Figura 2.14.

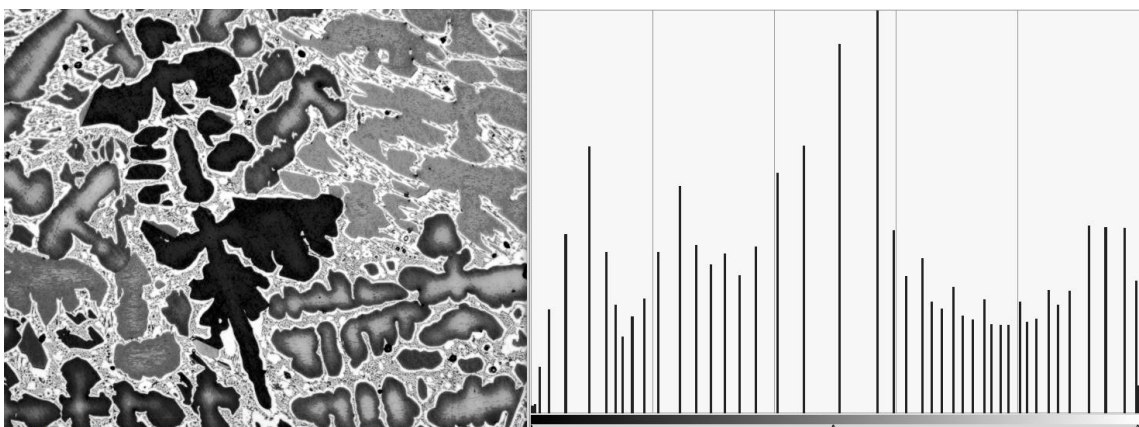


Figura 2.14 – Exemplo de aplicação da técnica de equalização de histograma. Adaptado de Eisenbeisser (2015).

2.2.2 Filtragem de imagens

A filtragem é uma técnica para modificar ou melhorar uma imagem. Por exemplo, pode-se filtrar uma imagem para realçar certas características ou remover outras. Algumas das operações de processamento de imagem implementadas com filtragem incluem suavização, nitidez e realce de bordas (HEILBRONNER; BARRETT, 2013; WOJNAR, 1998). Os filtros são normalmente classificados em três categorias: passa-baixas, passa-altas e passa-faixa (GONZALEZ; WOODS, 2009; PEDRINI; SCHWARTZ, 2008; FILHO; NETO, 1999).

Os filtros passa-baixas atenuam as altas frequências, as quais estão relacionadas com os detalhes da imagem. O efeito visual deste filtro é a suavização da imagem e a minimização de ruídos da mesma. Por outro lado, também provoca a redução da nitidez e da definição da imagem (GONZALEZ; WOODS, 2009; PEDRINI; SCHWARTZ, 2008; FILHO; NETO, 1999).

Os filtros passa-altas atenuam as baixas frequências, realçando os detalhes da imagem. Os detalhes abruptos da imagem como bordas, linhas e curvas se tornam mais nítidos, uma vez que são caracterizados por componentes de alta frequência. Como consequência, obtém-se uma imagem com maior contraste e detalhes, porém, os ruídos presentes na imagem também são destacados (GONZALEZ; WOODS, 2009; PEDRINI; SCHWARTZ, 2008; FILHO; NETO, 1999).

Os filtros passa-faixa selecionam um intervalo de frequências do sinal para ser realçado, consequentemente atenuando componentes fora da faixa selecionada. Possui pouca utilização prática no processamento de imagens (FILHO; NETO, 1999).

2.2.2.1 Filtragem no domínio espacial

Este tipo de técnica utiliza máscaras espaciais no processamento de imagens, também conhecidas como filtro ou *kernel* (GONZALEZ; WOODS, 2009; PEDRINI; SCHWARTZ, 2008; FILHO; NETO, 1999). Nesta técnica, as operações de filtragem são executadas diretamente nos *pixels* que formam a imagem. Vale ressaltar que, a técnica de filtragem no domínio espacial é uma técnica local, uma vez que o valor resultante da aplicação de um filtro em um determinado *pixel* dependerá não somente do valor original deste *pixel*, mas também dos valores originais dos *pixels* que pertencem a sua vizinhança.

O processo consiste de mover a máscara do filtro por cada ponto da imagem. A resposta do filtro para cada ponto é calculada utilizando uma coeficiente predefinido (PEDRINI; SCHWARTZ, 2008). Este processo permite suavizar uma imagem original, remover ruído, discriminar fronteiras, bem como, realçar elementos em uma imagem.

2.2.2.1.1 Filtragem linear

Os filtros lineares podem suavizar ou realçar detalhes da imagem, bem como minimizar efeitos de ruído, sem que o nível médio de cinza da imagem seja alterado. Estes filtros utilizam máscaras que realizam somas ponderadas das intensidades de *pixels* ao longo da imagem. Caso

pesos diferentes sejam utilizados em diferentes partes da imagem, o filtro linear é considerado espacialmente variante. Dois exemplos de filtros lineares passa-baixas são os de média e o de média ponderada.

No filtro de média (Figura 2.15), o valor original de cinza de cada *pixel* é substituído pela média aritmética dos valores dos *pixels* da sua vizinhança. O efeito visual resultante é a suavização ou desfocagem da imagem original. Ocorre ainda a eliminação do conjunto de *pixels* mais claros ou mais escuros em relação aos *pixels* vizinhos, gerando a consequente redução de ruídos (GONZALEZ; WOODS, 2009).



Figura 2.15 – Exemplo de aplicação do filtro linear de média. Adaptado de Eisenbeisser (2015).

O filtro de média ponderada atribui pesos aos *pixels* em função de sua distância do *pixel* central. Aumentando-se o peso do *pixel* central, reduz-se o efeito de suavização.

Para estes filtros a utilização de uma máscara maior implicará em uma superior perda de detalhes, contudo obtém-se uma maior redução de ruído (FILHO; NETO, 1999).

Dois exemplos de filtros passa-altas lineares são filtros baseados na função gradiente e filtros baseados na função laplaciano. Estes filtros são comumente utilizados na detecção de bordas da imagem em conjunto com operadores de Roberts e Sobel (FILHO; NETO, 1999).

2.2.2.1.2 Filtragem não linear

Aplicam transformações sem o compromisso de manterem o nível médio de cinza da imagem original. Para estes filtros não existe uma formulação matemática linear que descreve o processo de aplicação dos mesmos sobre uma imagem (GONZALEZ; WOODS, 2009). Exemplos de filtros passa-baixas não-lineares são os filtros de mediana, de moda, de máximo e de mínimo.

Nestes filtros, os pontos da vizinhança de um *pixel* central, dentro de uma janela na imagem, são ordenados e é identificado um novo valor. No filtro de mediana, o *pixel* central é substituído pelo *pixel* de valor mediano da ordenação previamente realizada. Este filtro, remove

ruídos sem afetar severamente a nitidez e preservando os contornos dos objetos presentes na imagem (GONZALEZ; WOODS, 2009).

Já o filtro de moda, identifica como novo valor para o *pixel* central o valor mais frequente da lista de vizinhos previamente ordenada. Este filtro também elimina ruídos pontuais, sem alterar muito as informações da imagem.

O filtro de máximo identifica como novo valor para o *pixel* central o maior valor existente na lista de vizinhos previamente ordenada.

Já o filtro de mínimo (Figura 2.16) realiza uma operação semelhante ao de máximo, porém, em busca do menor valor da lista. Os filtros de máximo e mínimo tem a tendência de, respectivamente, clarear e escurecer a imagem.

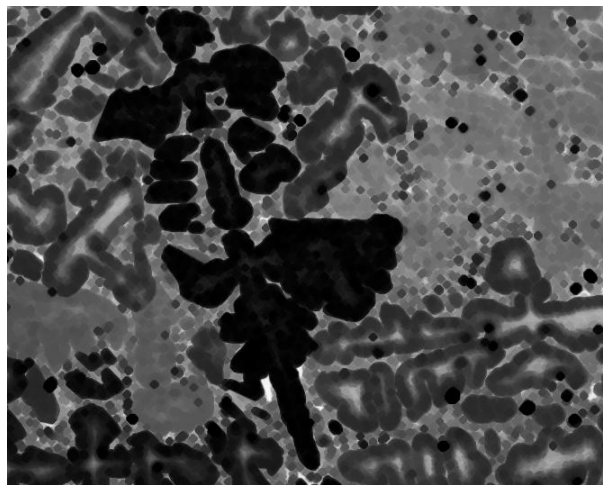


Figura 2.16 – Exemplo de aplicação do filtro não linear de mínimo. Adaptado de Eisenbeisser (2015).

2.2.2.2 Filtragem no domínio da frequência

Utiliza operações matemáticas complexas para separar os vários componentes de frequência. A transformada de *Fourier* utilizada neste processo torna mais fácil processar ou examinar certas frequências que influenciam na estrutura geométrica da imagem. Como exemplo, este tipo de técnica é bastante eficiente na remoção de ruídos periódicos encontrados nas imagens (GONZALEZ; WOODS, 2009).

2.2.3 Segmentação

O processo de segmentação tem por objetivo dividir uma imagem em suas unidades significativas, isto é, nos objetos de interesse que a compõem. Apesar de ser simples de descrever, é uma das tarefas mais difíceis de se implementar em imagens não triviais (GONZALEZ; WOODS, 2009; FILHO; NETO, 1999).

Em geral, os algoritmos de segmentação baseiam-se em uma das seguintes propriedades básicas de valores de intensidade: descontinuidade e similaridade. A primeira abordagem

considera que as fronteiras das regiões são suficientemente diferentes entre si e em relação ao fundo da imagem, possibilitando detectar limites com base nas discontinuidades locais em valores de intensidade. A principal técnica utilizada nesta categoria é a segmentação baseada nas bordas. A Figura 2.17 apresenta um exemplo de aplicação desta abordagem. Neste exemplo pode-se perceber duas regiões de intensidades constantes na imagem (a), o resultado do cálculo da fronteira (b) e a imagem segmentada (c).

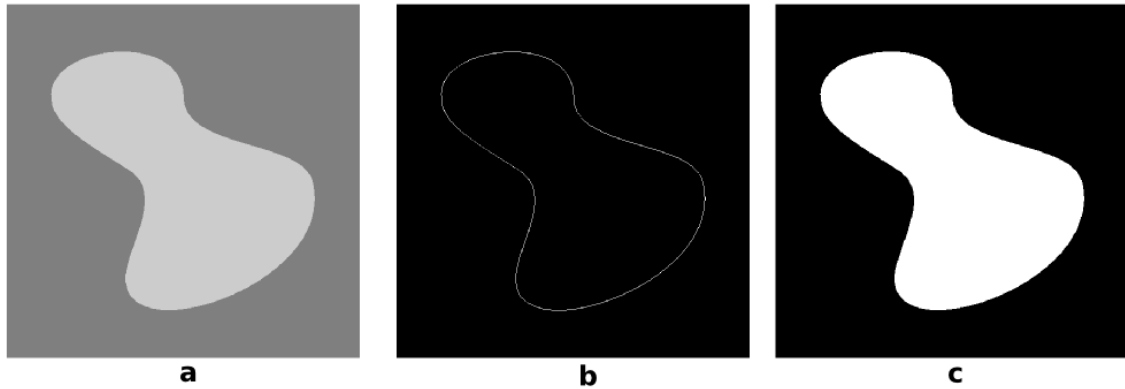


Figura 2.17 – Exemplo de processo de segmentação baseado em bordas. Imagem com regiões de intensidade constante (a), imagem com a borda detectada (b) e imagem segmentada (c). Fonte: [Gonzalez e Woods \(2009\)](#).

A segunda abordagem visa dividir a imagem em regiões semelhantes de acordo com um conjunto de critérios pré-definidos. A limiarização, o crescimento de regiões e a divisão e fusão de regiões são exemplos de métodos dessa categoria (Gonzalez, Woods, 2010). A Figura 2.18 apresenta um exemplo de aplicação desta abordagem. Pode ser percebido que a imagem (a) apresenta um padrão texturizado. Na imagem (b) existe a tentativa sem sucesso de identificação da borda. Já na imagem (c) é apresentado o resultado da segmentação baseada em regiões.

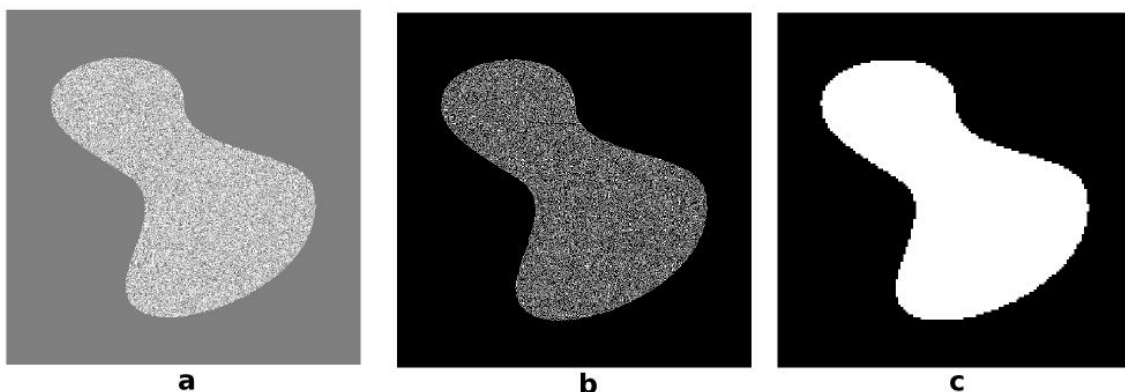


Figura 2.18 – Exemplo de processo de segmentação baseado na região. Imagem com diferentes texturas (a), imagem com falha na detecção da borda (b) e imagem segmentada através das propriedades das regiões (c). Fonte: [Gonzalez e Woods \(2009\)](#).

2.2.3.1 Segmentação por Limiarização

A limiarização é uma das técnicas mais simples de segmentação e consiste na classificação dos pixels de uma imagem de acordo com a especificação de um ou mais limiares, também conhecidos como *thresholds* (T) (GRANDE, 2012; GONZALEZ; WOODS, 2009; PEDRINI; SCHWARTZ, 2008). Esta técnica se baseia no princípio de que cada fase de interesse é formada por *pixels* que estão dentro de uma determinada faixa de intensidade. A Figura 2.19 apresenta um exemplo do processo de limiarização de uma micrografia de ferro fundido nodular.

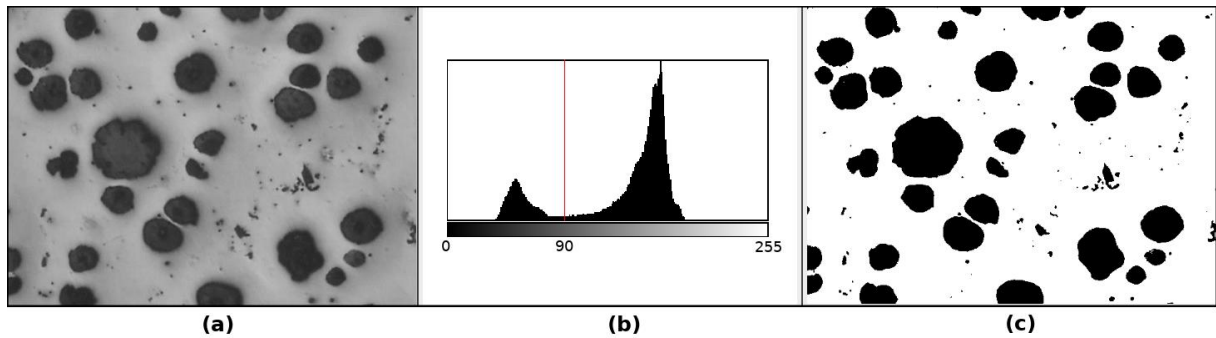


Figura 2.19 – Exemplo do processo de limiarização em uma imagem micrográfica de ferro fundido nodular. Imagem original (a), histograma da imagem (b) e imagem segmentada na tonalidade 90 da escala de cinza (c). Fonte: Adaptado de Vidal e Matlakhova (2017).

Na Figura 2.19 (a) é apresentada a imagem original a ser segmentada. Em (b) foi disponibilizado o histograma da imagem com um exemplo de limiar marcado na tonalidade 90. Já na imagem (c) pode ser visualizado o resultado do processo de segmentação por limiarização utilizando o limiar definido.

Pode ser percebido no exemplo que as partículas e o fundo foram delimitados por um valor de T localizado entre os dois picos do histograma. As tonalidades referentes às partículas de interesse tiveram os seus níveis de cinza convertidos para o valor 0, enquanto as tonalidades referentes ao fundo foram convertidas para o valor 1. Estes valores poderiam ser invertidos de acordo com a necessidade do usuário ou característica do software utilizado.

Nesse caso, o processo de limiarização também é conhecido por binarização, pois a imagem resultante possui apenas dois valores de tonalidade para os *pixels*, 0 para o preto e 1 para o branco.

$$g(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{se } f(x, y) \leq T \\ 1, & \text{se } f(x, y) > T \end{cases} \quad (2.11)$$

onde:

- $g(x, y)$ função bidimensional que define a intensidade da imagem binarizada em (x, y)
 x coordenada de um *pixel* da imagem no eixo da abcissa
 y coordenada de um *pixel* da imagem no eixo da ordenada
 $f(x, y)$ função bidimensional que define a intensidade da imagem em (x, y)
 T valor utilizado como limiar para o processo de segmentação por limiarização

2.2.4 Morfologia matemática

A morfologia matemática é uma ferramenta baseada na teoria dos conjuntos que pode ser aplicada objetivando a filtragem de imagens, segmentação, detecção de bordas, esqueletização, dentre outras aplicações. Tais conjuntos são a representação dos objetos encontrados em uma imagem (HEILBRONNER; BARRETT, 2013; GONZALEZ; WOODS, 2009; FILHO; NETO, 1999).

Basicamente a técnica consiste em extrair informações relativas à geometria e à topologia de um conjunto de uma imagem pela transformação através de outro conjunto predefinido, conhecido como elemento estruturante.

Inicialmente a morfologia matemática foi idealizada para imagens binárias, sendo posteriormente adaptada para imagens em tons de cinza (GONZALEZ; WOODS, 2009).

As operações de dilatação e erosão são as mais elementares da morfologia matemática. Enquanto na dilatação *pixels* são acrescentados aos limites dos objetos, na erosão, estes são removidos. Estas operações possuem aplicações na remoção do ruído e na segmentação da imagem para classificação (HEILBRONNER; BARRETT, 2013; GRANDE, 2012; GONZALEZ; WOODS, 2009; FILHO; NETO, 1999). A Figura 2.20 exemplifica a aplicação dos operadores morfológicos de dilatação e erosão em uma imagem binária.

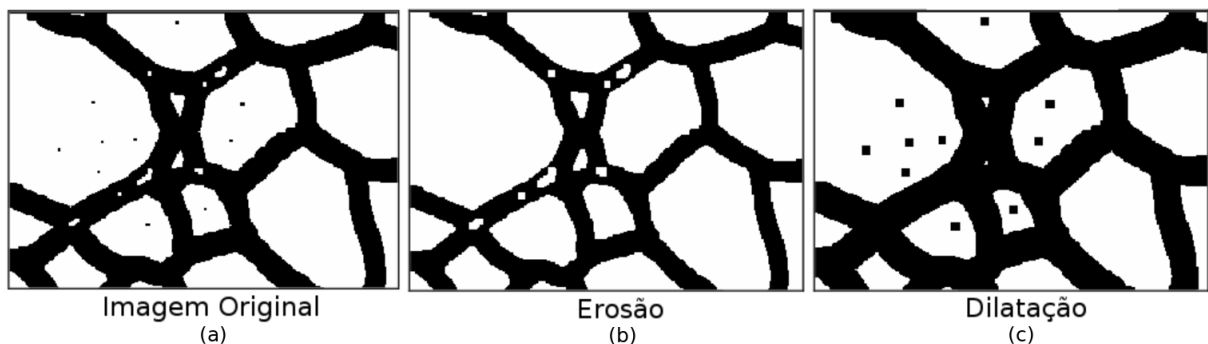


Figura 2.20 – Exemplos de aplicação das operações morfológicas básicas de erosão (a) e dilatação (b) sobre uma imagem teste (a). Fonte: Wejrzanowski et al. (2008).

Na Figura 2.20 (b) pode ser percebido que devido a erosão as extremidades dos componentes da fase preta foram reduzidas em relação à imagem original (a). Além disso, pequenos pontos presentes na imagem original desapareceram durante o processo. Já na imagem (c) pode

ser percebido que o contrário ocorreu. O processo de dilatação expandiu as extremidades da fase preta e os pequenos pontos existentes na imagem (a) também se destacaram.

A partir da erosão e da dilatação são derivadas outras operações como: abertura, fechamento e esqueletização (HEILBRONNER; BARRETT, 2013; GRANDE, 2012; GONZALEZ; WOODS, 2009; WOJNAR, 1998). A Figura 2.21 apresenta exemplos de transformações realizadas com esses operadores morfológicos.

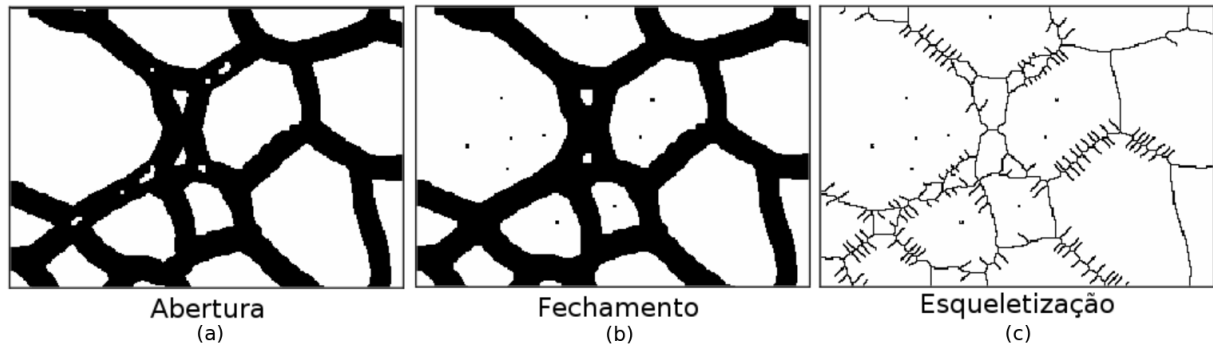


Figura 2.21 – Exemplos de aplicação das operações morfológicas abertura (a), fechamento (b) e esqueletização (c). Fonte: Wejrzanowski et al. (2008).

Uma operação de abertura é formada por uma operação de erosão seguida de uma dilatação. Nesta operação os elementos que compõem a imagem sofrem suavização dos seus contornos, pequenas ligações são rompidas e as saliências finas são eliminadas (GONZALEZ; WOODS, 2009; FILHO; NETO, 1999). Na Figura 2.21 (a) é exemplificado o resultado de uma operação de abertura. Neste exemplo pode ser percebido que a fase preta se mantém na mesma proporção da imagem original (Figura 2.20 (a)), contudo os pequenos pontos pretos foram eliminados.

Ao contrário da operação de abertura, a operação de fechamento é formada por uma operação de dilatação seguida de uma erosão. Nesta operação a imagem também sofre suavização dos seus contornos, porém, geralmente funde descontinuidades estreitas, elimina pequenos buracos e preenche pequenas lacunas em contornos (GONZALEZ; WOODS, 2009; FILHO; NETO, 1999). Na Figura 2.21 (b) é exemplificado o resultado de uma operação de fechamento. Neste exemplo pode ser percebido que a fase preta também se mantém na mesma proporção da imagem original (Figura 2.20 (a)), contudo pequenos buracos presentes na fase preta foram fechados.

A operação de esqueletização é formada por uma sucessão de afinamentos no objeto até que a sua largura se torne igual a um pixel. Por ser baseada em sucessivas operações de erosão e abertura, pode consumir tempo e memória (GONZALEZ; WOODS, 2009). Na Figura 2.21 (c) é exemplificado o resultado de uma operação de esqueletização. No exemplo pode ser percebido que a fase preta é afinada até a largura de um pixel.

2.2.4.1 Watershed

Watershed é uma técnica de processamento de imagens comumente utilizada em imagens binarizadas para a separação de elementos conectados. A técnica consiste basicamente da aplicação de sucessivas erosões sobre os elementos pertencentes a fase de interesse, até que seja atingido os pontos finais do processo (HEILBRONNER; BARRETT, 2013; WOJNAR, 1998). Em seguida, são realizadas sucessivas dilatações sobre os pontos finais até que os elementos se toquem novamente, porém deixando o último pixel branco.

A Figura 2.22 apresenta um exemplo do processo de separação de partículas utilizando a técnica *watershed* sobre uma imagem binarizada.

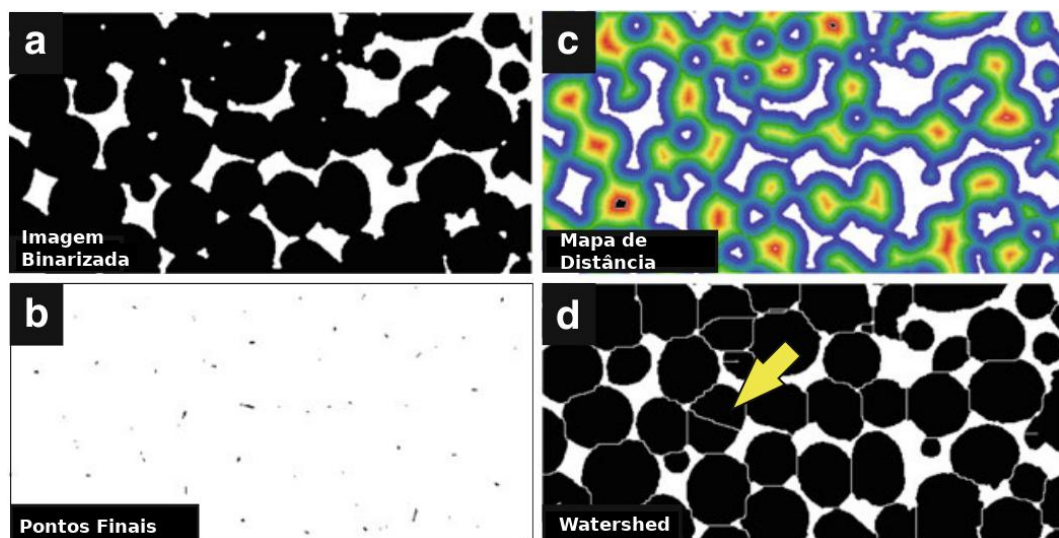


Figura 2.22 – Etapas de um processo de separação de partículas utilizando a técnica de *watershed*. Imagem binarizada (a), imagem após sucessivas erosões (b), mapa de distância das dilatações (c) e imagem resultante (d). Fonte: Heilbronner e Barrett (2013).

Na Figura 2.22 (b) podem ser visualizados os pontos finais resultantes das sucessivas erosões realizadas sobre a imagem binarizada (a). Na imagem (c) é apresentado o mapa de distância representativo do processo de dilatação. Sucessivas dilatações foram aplicadas, até que os resultados da dilatação de diferentes elementos se tocassem formando o "divisor de águas" ou *watershed*. Na Figura 2.22 (d) podem ser observados os divisores sobrepostos à imagem binarizada (a) separando as partículas anteriormente conectadas.

2.3 Caracterização automática de microestruturas de materiais

A evolução tecnológica tem alterado o paradigma da análise das microestruturas dos materiais que cada vez mais deixam de ser realizadas através das oculares dos microscópios e passam a ser realizadas utilizando câmeras montadas e softwares de PADI (O'FLAHERTY; EDWARDS, 2011; LATAŁA; WOJNAR, 2001; FRIEL, 2000). Atualmente uma imagem micrográfica pode ser capturada, analisada e arquivada para a recuperação dos seus dados *a posteriori*.

Estratégias típicas para a caracterização das microestruturas dos materiais incluem análise da fração de área de um constituinte, obtenção do tamanho do grão, identificação de formatos e tamanhos de partículas, etc. (LATAŁA; WOJNAR, 2001; FRIEL, 2000).

Sistemas de PADI oferecem uma variedade de ferramentas para medições interativas, como comprimentos, áreas de objetos, ângulos, grades de contagem de pontos, etc. Estes tipos de ferramentas são um meio eficiente para medir diferentes parâmetros em uma micrografia. Contudo, quando a pesquisa implica em avaliar uma quantidade significativa de imagens, métodos totalmente automatizados tornam-se necessários (O'FLAHERTY; EDWARDS, 2011).

Organizações como *International Organization for Standardization* (ISO), *American Society of Testing and Materials* (ASTM), *Japanese Industrial Standards* (JIS), dentre outras, historicamente tem publicado padrões e métodos com as melhores práticas da indústria para analisar materiais ao nível microestrutural. Contudo, diferentes normas que antes utilizavam metodologias qualitativas de análise, evoluíram para trabalhar principalmente com análises quantitativas utilizando softwares (O'FLAHERTY; EDWARDS, 2011).

A Tabela 2.2 apresenta algumas normas relevantes da ASTM no que diz respeito à caracterização de microestruturas de materiais.

Tabela 2.2 – Normas [ASTM](#) para a determinação de características microestruturais. Fonte: [Wojnar et al. \(2016\)](#).

Número da Norma	Nome da Norma
ASTM E112 – 13	Standard Test Methods for Determining Average Grain Size (image analysis methods described in E1382)
ASTM E1382 – 97(2015)	Standard Test Methods for Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis
ASTM E562 – 11	Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count (image analysis methods described in E1245)
ASTM E45 – 13	Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel (image analysis in E1245)
ASTM E1245 – 03(2016)	Standard Practice for Determining the Inclusion or Second-Phase Constituent Content of Metals by Automatic Image Analysis
ASTM E2109 – 01(2014)	Standard Test Methods for Determining Area Percentage Porosity in Thermal Sprayed Coatings
ASTM E1268 – 01(2016)	Standard Practice for Assessing the Degree of Banding or Orientation of Microstructures
ASTM E2283 – 08(2014)	Standard Practice for Extreme Value Analysis of Nonmetallic Inclusions in Steel and Other Microstructural Features
ASTM E1181 – 02(2015)	Standard Test Methods for Characterizing Duplex Grain Sizes
ASTM E930 – 99(2015)	Standard Test Methods for Estimating the Largest Grain Observed in a Metallographic Section (ALA Grain Size)
ASTM E2627 – 13	Standard Practice for Determining Average Grain Size Using Electron Backscatter Diffraction (EBSD) in Fully Recrystallized Polycrystalline Materials
ASTM A247 – 16a	Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings (image analysis methods described in E2567)
ASTM E2567 – 16a	Standard Test Method for Determining Nodularity and Nodule Count in Ductile Iron Using Image Analysis

Um exemplo claro do exposto é a evolução da norma [ASTM-A247](#) (*Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings*) para a norma [ASTM-E2567](#) (*Standard Test Method for Determining Nodularity And Nodule Count In Ductile Iron Using Image Analysis*). As duas normas visam analisar a grafita presente em amostras de ferros fundidos nodulares. Contudo, enquanto a norma [ASTM-A247](#) utiliza métodos qualitativos, baseado em comparações realizadas visualmente com padrões previamente estabelecidos, a norma [ASTM-E2567](#) automatiza o processo e obtém resultados quantitativos para a análise do mesmo constituinte.

Um outro exemplo é a evolução da norma [ASTM-E112](#) (*Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*) para a norma [ASTM-E1382](#) (*Standard Test Methods for Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis*). As duas normas visam obter o tamanho do grão médio [ASTM](#) (G). Contudo, enquanto a norma [ASTM-E112](#) recomenda estratégias manuais de análise estereológica, a norma [ASTM-E1382](#) recomenda a utilização de métodos automáticos ou semi-automáticos de análise.

As normas [ASTM-E1382](#) e [ASTM-E2567](#) foram utilizadas como referência para a construção de parte do ferramental desenvolvido neste trabalho e serão destacadas, respectivamente, na [subseção 2.3.1](#) e na [subseção 2.3.2](#).

2.3.1 Norma [ASTM-E1382 \(2015\)](#)

A norma [ASTM-E1382 \(2015\)](#) recomenda uma série de métodos automáticos e semi-automáticos que podem ser utilizados para determinar o tamanho médio de grãos [ASTM \(G\)](#) de materiais policristalinos metálicos e não metálicos. Os métodos de análise podem ser aplicados às amostras com estruturas de grãos equiaxiais ou alongadas.

Os métodos de análise propostos são utilizados para determinar o tamanho médio de grão em função do comprimento do intercepto médio, da contagem de interceptos, da contagem de interseções, do comprimento de contorno de grãos e das áreas de grãos.

Dentre as recomendações disponibilizadas pela norma foram utilizadas neste trabalho aquelas referentes à automatização do método de análise por intercepto linear. Desta forma, apenas os aspectos da norma referentes a esta metodologia serão mencionados durante esta seção.

Diferentes técnicas de [PADI](#) apresentadas na norma [ASTM-E1382 \(2015\)](#) são direcionadas para materiais monofásicos. Apesar dos estudos de caso desenvolvidos neste trabalho não incluírem materiais monofásicos, as técnicas de processamento de imagens sugeridas pela norma serão aqui apresentadas em função da relevância do tema.

2.3.1.1 Preparação das amostras e das micrografias

A preparação das amostras deve ser cuidadosamente controlada para produzir micrografias com qualidade suficiente para a realização da análise automática. As superfícies deverão ser polidas de tal forma que as deformações originárias do corte e do lixamento das amostras sejam removidas.

O ataque químico deverá ser eficiente para que ocorra corrosão nos contornos de grãos a fim de que estes sejam destacados na micrografia obtida. Caso necessário, técnicas de processamento de imagens como *skeletonização* e *watershed* poderão ser utilizadas para complementar os contornos dos grãos não destacados. Contudo a norma recomenda cautela no uso destas técnicas pois podem ser produzidos contornos de grãos falsos, da mesma forma que contornos existentes podem permanecer não detectados. A norma indica ainda a possibilidade de edição dos contornos de forma interativa, utilizando o *mouse* ou outro dispositivo apontador, porém este é um processo lento e que inviabiliza a operação automática sobre lotes de imagens.

Um número suficiente de campos deve ser selecionado de forma não tendenciosa e microfotografados utilizando as ampliações necessárias para assegurar a precisão estatística do processo de análise.

A norma disponibiliza um conjunto de micrografias previamente avaliadas para que o leitor perceba as especificações mínimas necessárias para a submissão das mesmas à análise automatizada com sucesso.

No processo de obtenção das micrografias deve ser utilizada uma retícula micrométrica para que seja possível realizar a calibração do processo de análise.

A imagem micrográfica precisa ser processada de forma que sejam destacados o interior ou os limites dos grãos, dependendo da natureza da técnica de análise. A tonalidade da micrografia deve ser ajustada para níveis de cinza.

A técnica de limiarização precisa ser aplicada, sendo sugerido que durante o processo se alterne o modo de visualização entre a imagem original e a imagem limiarizada (método *flicker*) visando aumentar a precisão da técnica.

Quando a análise for realizada em função do comprimento dos interceptos, os grãos interceptados pela borda da micrografia deverão ser excluídos. A técnica de erosão pode ser utilizada para afinar o contorno de grão e retirar possíveis ruídos.

É sugerido que na imagem final os contornos de grãos sejam afinados para um ou dois *pixels* de largura para que estes não interfiram de forma significativa no comprimento dos interceptos.

2.3.1.2 Método de análise por comprimento de intercepto

O tamanho médio de grão pode ser determinado pela média do comprimento dos interceptos.

Se os grãos forem equiaxiais medições poderão ser realizadas utilizando linhas de teste em qualquer orientação. No entanto, se os grãos exibirem anisotropia, ou seja, se não forem equiaxiais, a imagem digitalizada deverá ser girada ou linhas de teste deverão ser traçadas em diferentes orientações.

O intercepto médio deve ser calculado para os campos analisados. Para tanto, o comprimento dos interceptos sobrepostos aos grãos da fase de interesse deverão ser somados e posteriormente divididos pelo número de interceptos dos campos obtendo assim o intercepto médio (\bar{L}). Em função do \bar{L} o grão médio G poderá ser obtido da tabela anexada a norma ou calculado pela [Equação 2.10](#), a mesma apresentada anteriormente para a norma [ASTM-E112 \(2013\)](#).

A norma [ASTM-E1382 \(2015\)](#) possui vinte e duas páginas tratando de diferentes metodologias para a obtenção do grão médio G . O conteúdo aqui apresentado teve como objetivo apenas contextualizar a norma para o leitor dentro dos passos utilizados neste trabalho.

2.3.2 Norma [ASTM-E2567 \(2016\)](#)

O ferro fundido dúctil, também conhecido como ferro fundido nodular, é produzido com grafita na forma esferoidal. A norma [ASTM-A536 \(2014\)](#) considera a presença de 3,5% a 3,8% de carbono para a constituição deste material. Elementos nodulizantes são adicionados ao metal fundido utilizando uma composição química adequada para produzir partículas de grafita esferoidais. O controle da forma da grafita é fundamental para as propriedades do ferro fundido nodular, que tende a ser macio e maleável.

A análise visual qualitativa vem sendo utilizada durante anos para avaliar o grau de nodularidade e a quantidade de nódulos de grafita presentes em ferros fundidos nodulares. Porém, a forma dos nódulos é um parâmetro difícil de avaliar usando métodos visuais, a menos que estas estejam muito próximas de formas geométricas bem reconhecidas. Os métodos visuais possuem ainda difícil reprodutibilidade e repetibilidade.

A utilização da análise de imagens por computador permite que pesquisadores meçam e contem partículas de interesse presentes nas microestruturas do ferro fundido com precisão. Isso reduz as variações nas medições quando comparado ao método de análise visual.

Este método de teste utiliza um analisador de imagem para medir o grau de esfericidade das partículas de grafita, visualizadas em uma seção de ferro fundido, para determinar o percentual de nodularidade e a quantidade de nódulos por unidade de área. A ampliação recomendada para ser aplicada na captura da micrografia é de 100X. Contudo, ampliações de 50X podem ser utilizadas para a caracterização de grandes nódulos e 200X para a caracterização de pequenos nódulos.

O plano de polimento pode ser paralelo ou perpendicular a direção da solidificação, ou escolhido aleatoriamente, dependendo das necessidades do estudo.

As medições devem ser realizadas usando um sistema computacional com um software de [PADI](#). O número de campos de análise precisa ser definido para que no mínimo 500 partículas sejam analisadas.

2.3.2.1 Preparação da amostra

A preparação das amostras deve ser controlada para produzir uma superfície de qualidade para a análise da micrografia. O procedimento de polimento deve remover todas as deformações e danos induzidos pelo processo de corte e lixamento. Arranhões e manchas devem ser removidos com polimento final utilizando um material abrasivo com granulometria de cerca de 1 μm ou menos de tamanho. O processo deve ser realizado com cuidado para evitar que partículas de grafita se desprendam do material. As amostras devem ser cuidadosamente limpas e secas após o polimento.

Os riscos devem ser pequenos o suficiente para não serem detectados durante a etapa de limiarização que ocorre durante o processamento da imagem.

O resultado da preparação da amostra deve apresentar qualidade suficiente para revelar

o contorno dos nódulos sem que tenha sido feito o ataque químico.

As micrografias das amostras deverão ser capturadas em conjunto com uma retícula micrométrica para que as escalas possam ser definidas no *software* de análise.

2.3.2.2 Procedimento de análise

A imagem micrográfica pode precisar ser processada para destacar as fases de interesse, porém as formas e os tamanhos das partículas de grafita devem ser preservados no processo.

O processo de segmentação das partículas pode ser realizado utilizando a técnica de limiarização. Contudo, as configurações da limiarização devem ser ajustadas para evitar a detecção de características indesejáveis como poros ou inclusões.

Esta norma recomenda que as partículas com diâmetro máximo de *Feret* (DMF) menores do que $10\ \mu\text{m}$ sejam desconsideradas da análise. O DMF é a maior distância existente entre duas extremidades de uma partícula. A Figura 2.23 apresenta um exemplo de microestrutura simulada, contendo diferentes formatos de partículas com os seus respectivos DMFs.

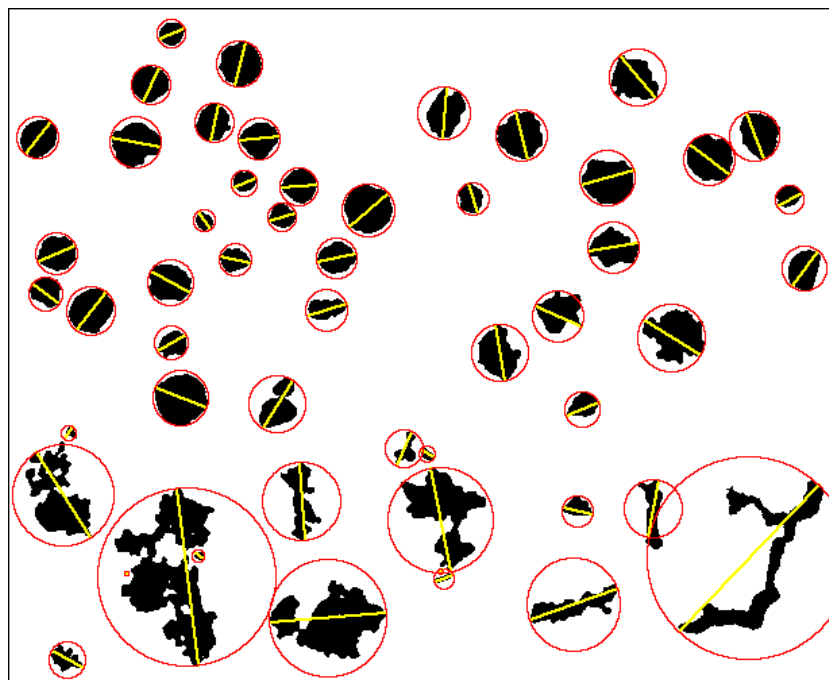


Figura 2.23 – Exemplo de representação de DMFs e círculos de referência sobre diferentes partículas de grafita em uma microestrutura simulada. Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 2.23 apresenta para cada partícula uma linha longitudinal amarela representando o DMF.

A remoção das partículas com DMFs menores do que $10\ \mu\text{m}$ gera o efeito colateral positivo de também remover possíveis ruídos da imagem, contribuindo assim com a análise.

É definido pela norma que somente as partículas inteiras de grafita sejam analisadas. Um quadro de guarda de tamanho apropriado deve ser utilizado para envolver essas partículas,

e no mínimo 500 destas partículas devem ser medidas nos diferentes campos de observação da amostra.

Para classificar uma partícula de grafita como nódulo deve ser comparada a sua área com a área do seu círculo de referência. O círculo de referência pode ser entendido como o menor círculo que envolve a partícula, ou, o círculo que possui como diâmetro o DMF da partícula. A Figura 2.23 ilustra na cor vermelha os círculos de referência das partículas de grafita simuladas.

Para cada partícula, a área do círculo de referência (A_{cr}) é calculado utilizando a Equação 2.12.

$$A_{cr} = \frac{\pi \cdot DMF^2}{4} \quad (2.12)$$

onde:

A_{cr} área do círculo referente ao diâmetro máximo de *Feret* da partícula
DMF diâmetro máximo de *Feret*

De acordo com a norma, para que a grafita seja considerada nodular a sua área precisa ser maior ou igual a 60% da área do seu círculo de referência. Este cálculo, denominado fator de forma (FF), é representado na Equação 2.13.

$$FF = \frac{A_i}{A_{cr}} \quad (2.13)$$

onde:

FF fator de forma da partícula
 A_i área da partícula
 A_{cr} área do círculo referente ao diâmetro máximo de *Feret* da partícula

Para um círculo perfeito o FF é igual a 1. Na medida que o formato da partícula se torna menos arredondado o FF vai se aproximando de 0. O menor valor de FF requerido para classificar uma partícula de grafita como nodular é 0,6. Contudo, a norma cita que outros valores podem ser definidos em acordos entre entidades interessadas.

O percentual de nodularidade por área é uma outra métrica apontada pela norma como de referência para a caracterização do ferro fundido nodular. Este é definido como a soma das áreas das partículas nodulares dividida pelas áreas de todas as partículas de grafita que atendem ao requisito mínimo de tamanho, conforme pode ser observado na Equação 2.14.

$$\%NA = \frac{100 \cdot \sum A_{nod,i}}{\sum A_i} \quad (2.14)$$

onde:

$\%NA$ porcentagem de nódulos por unidade de área

$A_{nod,i}$ área das partículas de grafita classificadas como nodulares

A_i área da partícula

Uma outra métrica referida pela norma é a densidade de nódulos, representada pelo número de partículas nodulares dividido pela área de análise em mm^2 .

Para obter a contagem correta dos nódulos é necessário medir somente as partículas que estiverem presentes de forma integral no quadro de guarda. A área total medida corresponde a soma das áreas internas dos quadros de guarda.

A norma encerra apresentando alguns requisitos quanto à apresentação dos relatórios, incluindo: o grau de nodularidade por área, densidade de nódulos, as imagens micrográficas, dentre outros.

2.4 Padrão *Wizard* de interface de software

Um dos objetivos deste trabalho é a implementação de uma interface intuitiva, que reduza o grau de conhecimento necessário para se processar e analisar imagens no software livre *ImageJ*. Para tanto pretende-se utilizar o padrão de interface de software *Wizard* (assistente).

O *Wizard* é um tipo de projeto de interface gráfica de software comumente utilizado para simplificar a execução de tarefas que envolvam uma série de passos a serem executados em uma ordem específica (FOWLER, 2002; TIDWELL, 2010).

Comumente os *Wizards* são utilizados em tarefas longas e complicadas para novos usuários. Os *Wizards* apostam na premissa de que, para aquele tipo de tarefa, o software saberá melhor como conduzir as ações do usuário no sistema do que se o mesmo estivesse operando o sistema sozinho. Este fato é realidade principalmente se os usuários tiverem conhecimentos limitados dos recursos do sistema.

O *Wizard* é formado basicamente por uma série de telas ou caixas de diálogo que guiam e orientam o usuário para completar uma tarefa. Geralmente as telas do *Wizard* solicitam a entrada de informação pelo usuário através de marcações ou preenchimento de campos. Após a entrada desses dados, o usuário poderá utilizar botões de navegação para avançar, voltar ou concluir uma tarefa (FOWLER, 2002).

Normalmente, um recurso do software utilizado na forma de *Wizard* também é disponibilizado para acesso direto pelo usuário. Isto é uma necessidade pois os *Wizards* conduzem bem o usuário iniciante, porém podem ser limitantes para usuários experientes em termos de otimização de tempo e de flexibilidade de acesso aos recursos do sistema.

3 Trabalhos Relacionados

Como já mencionado, as soluções de microscopia quantitativa são utilizadas nas mais diferentes áreas da ciência. Neste sentido, a área de tecnologia da informação tem produzido *softwares* de [PADI](#) que visam automatizar e facilitar a aplicação digital destas soluções.

Acompanhando as tendências tecnológicas, grandes empresas da área de microscopia passaram a produzir e distribuir *softwares* de [PADI](#) em conjunto com os seus equipamentos de ponta. Contudo, estas soluções possuem alto custo, o que dificulta o acesso às mesmas por parte da maioria dos pesquisadores. Somado a isso, a natureza proprietária do código impede que os pesquisadores conheçam a estratégia de um determinado algoritmo e que façam modificações visando a obtenção de melhores resultados.

Em contrapartida, *softwares* livres para soluções na área de microscopia quantitativa também têm sido desenvolvidos ao redor do mundo. Estes *softwares* se baseiam em quatro preceitos, à saber: a possibilidade de execução do programa para qualquer propósito, o acesso ao código-fonte para estudo e modificação, a livre redistribuição de cópias, e a liberdade de aperfeiçoar o programa e liberar os seus aperfeiçoamentos, de modo que toda a comunidade se beneficie ([STALLMAN, 2004](#)).

No entanto, a maior parte dos *softwares* livres que disponibilizam soluções de microscopia quantitativa possuem foco na área biomédica. Dentre estes destacam-se: *ImageJ* ([SCHNEIDER; RASBAND; ELICEIRI, 2012](#)), *FIJI* ([SCHINDELIN et al., 2012](#)), *CellProfiler* ([LAMPRECHT; SABATINI; CARPENTER, 2007](#)), *Ilastik* ([SOMMER et al., 2011](#)) e *Icy* ([CHAUMONT et al., 2012](#)).

Dentre os *softwares* citados, o *ImageJ* se tornou referência como *software* livre na área de análise de imagens. Como exemplo, uma busca realizada no portal Periódicos [CAPES \(MEC, 2018\)](#), com a palavra chave "*ImageJ*", retornou 176089 referências. Dada a maturidade do *ImageJ* e do seu conjunto de funcionalidades este foi utilizado como ferramenta base para a criação deste trabalho e receberá destaque na seção [seção 3.1](#).

Na atualidade, poucos são os *softwares* livres dedicados à análise de imagens micrográficas de materiais. Em buscas realizadas nos portais Periódicos [CAPES \(MEC, 2018\)](#), *Google Scholar* ([GOOGLE, 2018b](#)) e *Google* ([GOOGLE, 2018a](#)), utilizando *strings* de busca contendo as palavras-chave "*Free Software*" e a identificação de uma dentre as normas [ASTM-E112 \(2013\)](#), [ASTM-E1382 \(2015\)](#), [ASTM-E2567 \(2016\)](#) e [ASTM-A247 \(2010\)](#), nenhum resultado positivo foi retornado. O mesmo ocorreu quando foram realizadas buscas na língua portuguesa. Apesar disto, três *softwares* de interesse foram identificados e também serão mencionados na [seção 3.1](#).

3.1 Softwares relacionados

Sales e Silva (2014) desenvolveram o Goitacá, um *software* livre especializado na área de análise estereológica de materiais. Dentre os principais recursos do *software* se encontram os cálculos de fração de área, fração de pontos, fração linear, área superficial por unidade de volume-teste, área superficial específica e comprimento de intercepto linear por unidade de volume-teste. O *software* foi desenvolvido na linguagem C++ e possui licença livre. A Figura 3.2 apresenta a interface principal do *software*.

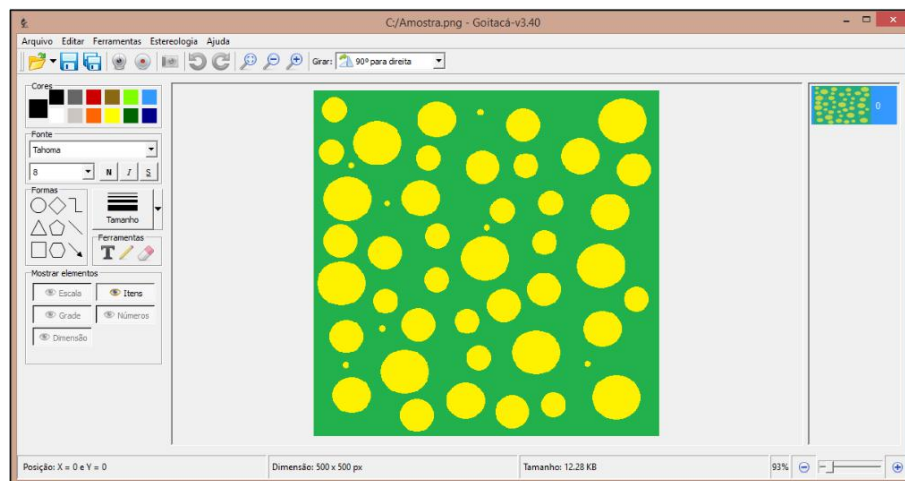


Figura 3.1 – Fluxograma de funcionamento do *software* OPTGRAN-CS. Fonte: Sales e Silva (2014).

Na lateral esquerda da interface pode ser percebida uma barra de ferramentas para ajudar na edição da imagem. As edições realizadas podem ser desfeitas através do histórico localizado no lado direito da interface. Apesar dos recursos, as imagens são analisadas uma a uma sem a possibilidade de automatização do processo. Os resultados das análises podem ser exportados para planilhas de cálculo compatíveis com *softwares* do mercado.

Chávez et al. (2015) desenvolveram o *software* OPTGRAN-CS para a área de geologia com o objetivo de realizar a análise de distribuição granulométrica de sedimentos. O *software* é baseado na segmentação de imagens coloridas e na aplicação do método de interceptos lineares. O fluxograma do funcionamento do *software* é apresentado na Figura 3.2.

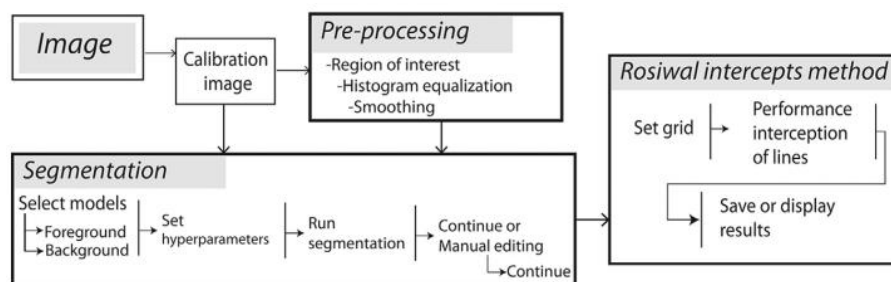


Figura 3.2 – Fluxograma de funcionamento do *software* OPTGRAN-CS. Fonte: Chávez et al. (2015).

O *software* se destaca pelos algoritmos utilizados que viabilizam um processo de segmentação assistida para análise de imagens com diferentes fases. A análise pelo método do intercepto pode ser realizada sobre um conjunto de imagens previamente segmentadas, automatizando o processo. Os resultados textuais da análise podem ser armazenados em planilhas de cálculo compatíveis com *softwares* do mercado. Devido à fase de pré-processamento ser assistida, esta não possui a mesma opção de automatização.

Chávez et al. (2015) realizaram testes em diferentes amostras de sedimentos e os resultados foram comparados com análises realizadas manualmente, também pelo método do intercepto. Os autores apontam que a ferramenta obteve precisão similar ao processo manual, contudo a aplicação da metodologia simplificou e gerou ganhos de produtividade no processo. O *software* é disponibilizado gratuitamente porém o seu código fonte não é fornecido livremente para estudo e alteração.

O *software* livre *CellProfiler* desenvolvido por Lamprecht, Sabatini e Carpenter (2007) foi projetado para analisar lotes de micrografias de forma flexível. O *CellProfiler* mede simultaneamente o tamanho, forma, intensidade e textura de uma variedade de tipos de células. A Figura 3.3 apresenta a interface do *software*.

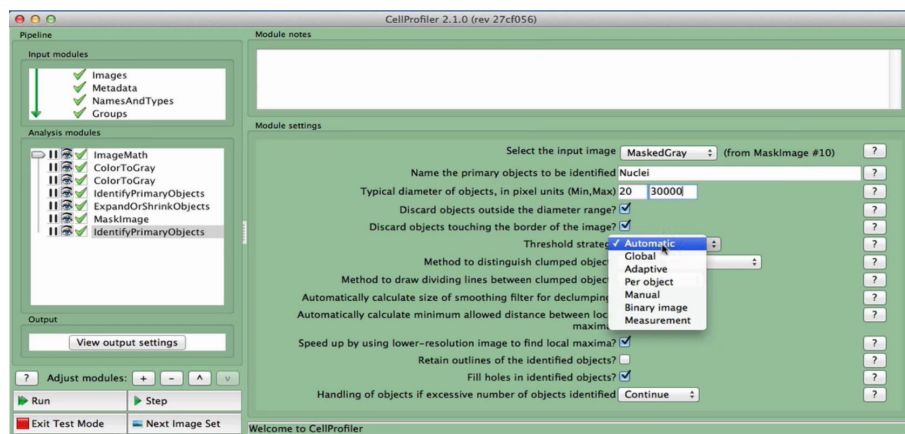


Figura 3.3 – Interface do programa CellProfiler. Fonte: Lamprecht, Sabatini e Carpenter (2007).

Pode ser percebido na Figura 3.3 a inexistência de uma imagem para análise. Isto faz parte do processo de funcionamento do *software*, que não é interativo, mas sim dedicado a execução de fluxos de trabalho construídos com base em perguntas e respostas sobre micrografias da área biomédica. Após a definição do fluxo de trabalho, as estratégias de PADI são aplicadas e os resultados das etapas de processamento apresentadas em uma nova janela da aplicação.

O *Quanto* é um *software* livre com foco na classificação e análise estereológica de constituintes, desenvolvido por Guimarães e Silva (2016). Este apresenta uma interface simples e intuitiva para a realização de processos de contagem de elementos em imagens, podendo substituir processos tradicionalmente executados de forma manual. A Figura 3.4 apresenta a interface do *software Quanto*.

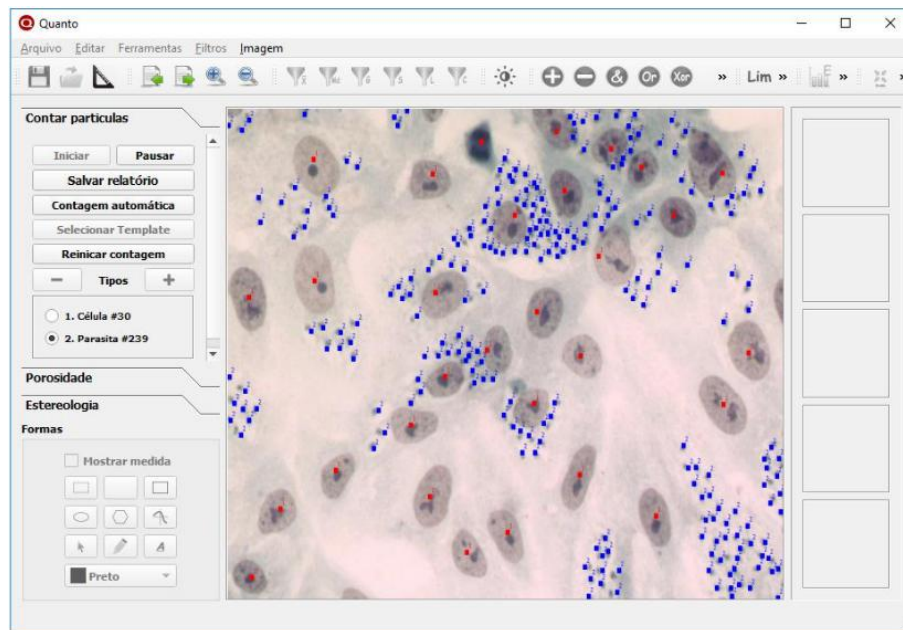


Figura 3.4 – Interface do *software* Quanto. Fonte: [Guimarães e Silva \(2016\)](#).

Além das funcionalidades de contagem manual e automatizada, o *software* possui recursos de tratamento de imagens, tais como: opções de segmentação, operações morfológicas, criação de formas, entre outros. Experimentos práticos foram realizados em ambientes reais de pesquisa envolvendo contagem de células e parasitas, contagem de produção de nematoides e quantificação de ferrita delta. Os resultados mostraram que seu uso pode reduzir o tempo de trabalho em até 95%, otimizando o processo de análise [Guimarães e Silva \(2016\)](#).

[Sommer et al. \(2011\)](#) desenvolveram o *software* livre *Ilastik* específico para segmentação e classificação de conteúdos em imagens biológicas. Desenvolvido na linguagem de programação *Python*, o *software* se baseia na simplicidade de uso, permitindo ao usuário sem experiência na área de [PADI](#) segmentar e classificar imagens de forma unificada. A interface do *Ilasticé* apresentada na Figura 3.5.

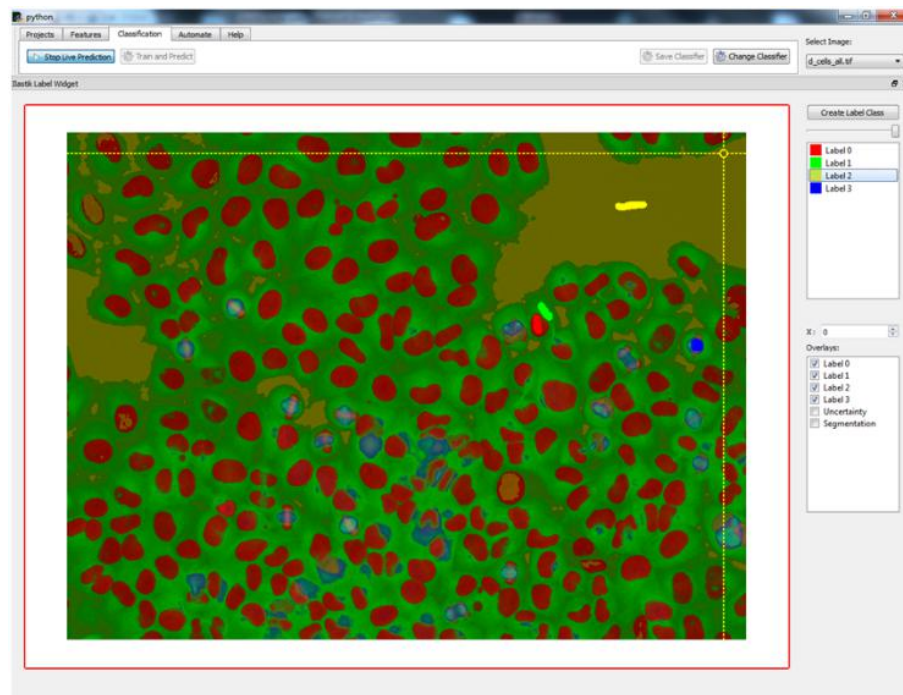


Figura 3.5 – Interface do programa *Ilastik*. Fonte: Sommer et al. (2011).

O *software* permite que o usuário indique com o mouse áreas a serem capturadas para a identificação de padrões relativos aos constituintes da amostra, para segmentar e classificar as fases de interesse. O *software* fornece *feedback* em tempo real possibilitando que o resultado da segmentação seja refinado de forma interativa, aperfeiçoando o classificador. Uma vez obtido o resultado da classificação, o processo poderá ser aplicado a um lote de imagens semelhantes ou exportado e utilizado com o *software* CellProfiler.

O *software* livre *ImageJ* (SCHNEIDER; RASBAND; ELICEIRI, 2012) por ter sido utilizado como base para este trabalho e ser referência na literatura da área de análise de imagens, será destacado a seguir.

3.1.1 ImageJ

O *ImageJ* é um *software livre* de PADI desenvolvido na linguagem *Java*. Derivado do *software* NIH Image, criado pelo *National Institutes of Health* (NIH), o *ImageJ* hoje é produto de uma comunidade com mais de 1700 usuários e desenvolvedores. Disponível para ser executado nos sistemas operacionais *Windows*TM, *Mac*TM e *Linux*, o *ImageJ* foi projetado para ser estendido através de *plugins Java* (RUEDEN et al., 2017; SCHINDELIN et al., 2015; SCHINDELIN et al., 2012; SCHNEIDER; RASBAND; ELICEIRI, 2012; BURGER; BURGE, 2010; ABRÀMOFF; MAGALHÃES; RAM, 2004).

O *software* pode exibir, editar, analisar, processar, salvar e imprimir imagens de 8, 16 e 32 bits. Realiza manipulação de contraste, nitidez, detecta bordas e disponibiliza diferentes filtros para serem aplicados. Faz transformações geométricas como dimensionamento e rotação (FERREIRA; RASBAND, 2012; BURGER; BURGE, 2010).

O *ImageJ* suporta múltiplas imagens em uma mesma janela (*stacks*), bem como qualquer número de janelas simultaneamente, limitado apenas pela memória disponível no computador (FERREIRA; RASBAND, 2012; SCHNEIDER; RASBAND; ELICEIRI, 2012; BURGER; BURGE, 2010; ABRÀMOFF; MAGALHÃES; RAM, 2004).

Diferente da maioria dos *softwares* de *PADI*, o *ImageJ* não possui uma área de trabalho unificada. A janela principal do *ImageJ* é simples contendo apenas uma barra de menu, uma barra de ferramentas e uma barra de status. Um exemplo de interface do ambiente do *ImageJ* é apresentado na Figura 3.6.

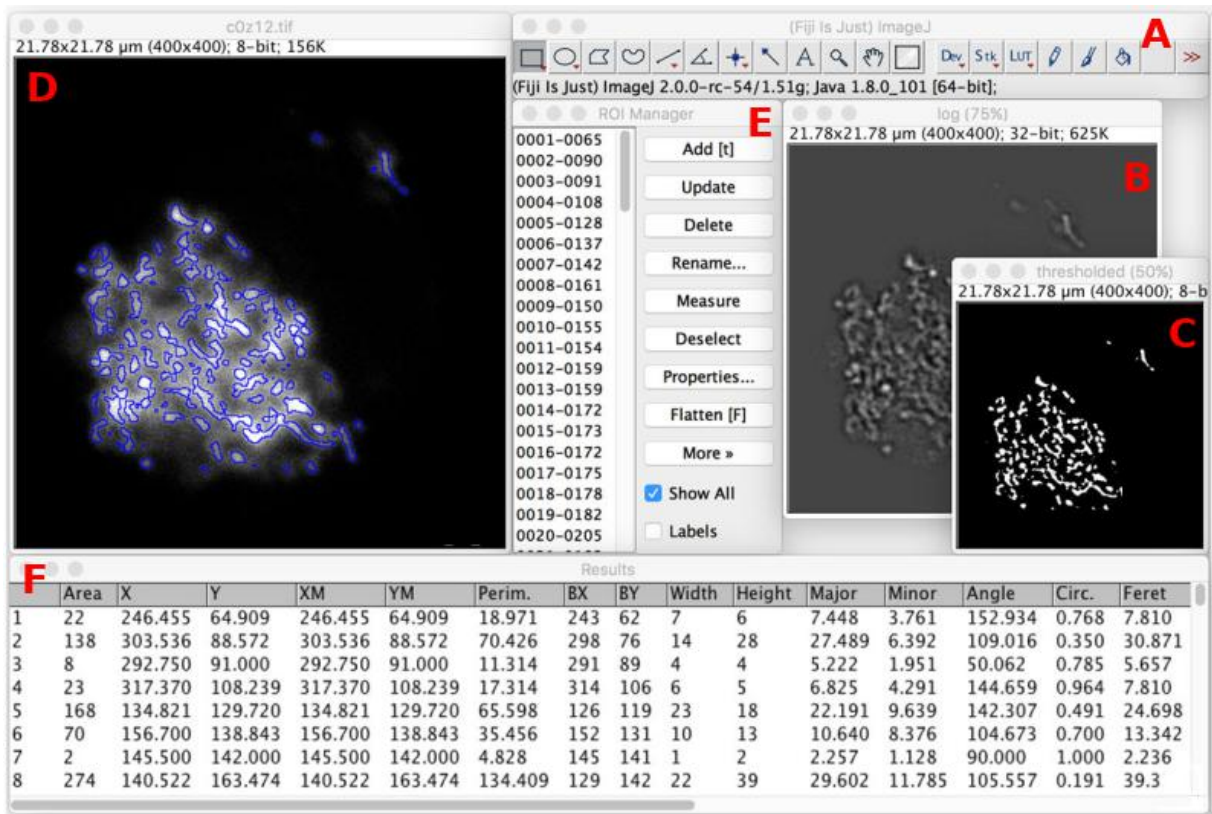


Figura 3.6 – Interface do programa ImageJ. Fonte: Adaptado de Rueden et al. (2017).

A Figura 3.6 apresenta a janela principal do *software* (A), uma janela contendo uma imagem obtida de microscopia confocal (B), uma janela contendo a mesma imagem segmentada (C), uma janela contendo a imagem já analisada com os seus objetos de interesse destacados em azul (D), uma janela para manipulação dos objetos de interesse (E) e uma janela com resultados da análise (F).

O *ImageJ* possibilita o uso de escala para fornecer medições reais em unidades como milímetros, micrometros, etc. O *software* pode medir objetos de interesse, calcular as suas áreas, dentre outras análises (FERREIRA; RASBAND, 2012; SCHNEIDER; RASBAND; ELICEIRI, 2012; BURGER; BURGE, 2010; ABRÀMOFF; MAGALHÃES; RAM, 2004).

O *ImageJ* é virtualmente ilimitado pois pode ser estendido com o desenvolvimento de

macros e *plugins* por parte de seus usuários. Macros são implementadas para tornar mais fácil a automatização de tarefas repetitivas e tediosas. O *ImageJ* suporta a criação de macros utilizando as linguagens *Java*, *JavaScript*, *Beanshell*, *Python*, além da própria linguagem de macroinstruções do *ImageJ*. Os *plugins* são programas externos, principalmente escritos na linguagem *Java* que adicionam funcionalidades ao *software*. Uma vez implementados e adicionados ao *ImageJ*, os *plugins* ficam perfeitamente integrados na interface do *software* (FERREIRA; RASBAND, 2012; SCHNEIDER; RASBAND; ELICEIRI, 2012; BURGER; BURGE, 2010; ABRÀMOFF; MAGALHÃES; RAM, 2004).

O desenvolvimento de *plugins* mudou o patamar do *ImageJ* de um programa de PADI, para um *framework* que pode ser utilizado pelos cientistas para desenvolver suas próprias soluções de PADI.

Devido a sua plataforma aberta, o *ImageJ* conta com diferentes derivações e *softwares* que interagem com o mesmo. A Figura 3.7 apresenta uma linha do tempo contendo um histórico de criação de algumas destas aplicações.

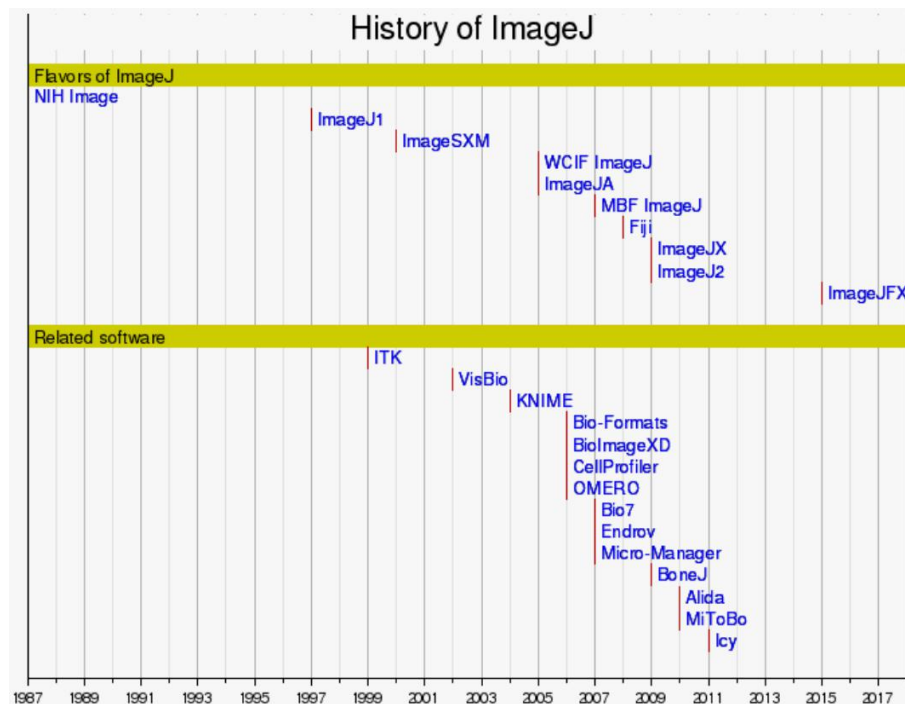


Figura 3.7 – Linha do tempo da criação do *ImageJ* e dos demais *softwares* relacionados. Fonte: Rueden (2017).

Apesar da existência de derivações do *ImageJ* para diferentes focos na área biomédica e para áreas como astronomia, estatística, e ecologia, não foram identificadas variações para a área de ciência e engenharia de materiais.

Na literatura são encontrados os mais diversos trabalhos aplicando técnicas de PADI na caracterização de micrografias de materiais. A seção 3.2 apresenta alguns destes trabalhos, inclusive com alguns fazendo uso do *ImageJ*.

3.2 Pesquisas relacionadas

Diferentes combinações de algoritmos são utilizadas na literatura visando o processamento de imagens micrográficas para futura análise. Na área de ciência dos materiais, a análise de imagens micrográficas viabiliza a análise da estrutura do material e a sua consequente caracterização.

Chilev et al. (2017) propuseram uma metodologia para a caracterização quantitativa de diferentes tipos de materiais sólidos. A técnica se baseia nos resultados da análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) de materiais porosos e seu processamento pelo *software ImageJ*. Diferentes amostras e tipos de carvão ativado foram investigadas. As micrografias das amostras obtidas por MEV foram processadas utilizando o *ImageJ* e caracterizadas quanto ao tamanho das partículas, tamanho médio de macroporos e distribuição dos tamanho dos poros. A Figura 3.8 apresenta uma micrografia de carvão ativado processada com o *software ImageJ*.



Figura 3.8 – Micrografia de amostra de carvão ativado obtida com o MEV e processada com o *ImageJ*. Fonte: Adaptado de Chilev et al. (2017).

Na Figura 3.8 (b) é apresentada a micrografia segmentada e em (c) as partículas delineadas e identificadas pelo *software ImageJ*.

Três funções de distribuição (Gamma, Weibull e Lognormal) foram selecionados para descrever os resultados experimentais. A distribuição Lognormal foi a que se ajustou com maior precisão aos dados experimentais. Os autores apontam a viabilidade de substituição de métodos qualitativos pelo método proposto.

Grove e Jerram (2011) desenvolveram uma estratégia para mensurar a porosidade em micrografia de seções finas de rocha. Para tanto, as amostras utilizadas foram impregnadas com resina azul, no sentido de destacar os poros existente. A imagem resultante, contendo duas fases, foi submetida à alteração da sua paleta de cor, a fim de facilitar o processo de segmentação da cor azul (Figura 3.9).

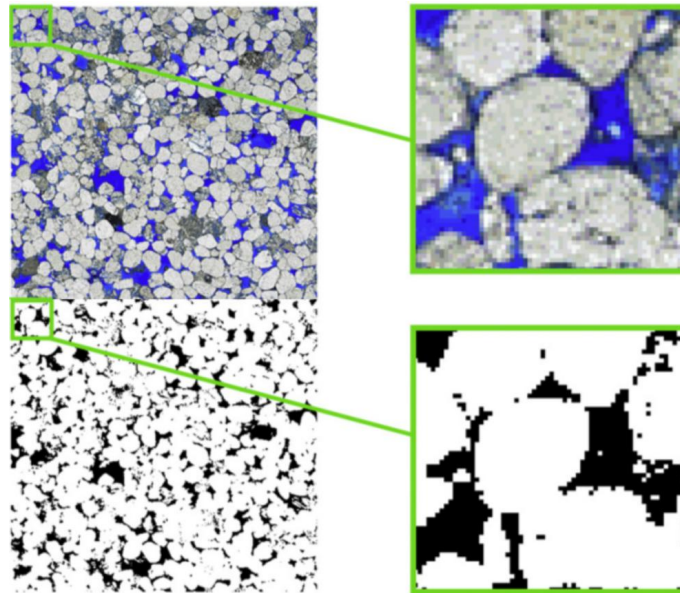


Figura 3.9 – Resultado da aplicação da técnica de threshold na seção fina de rocha. Fonte: [Grove e Jerram \(2011\)](#).

Uma macro foi desenvolvida com o *software ImageJ* com o objetivo de fazer a mensuração. Os resultados apontaram a otimização do processo em relação a medições manuais realizadas por dez pesquisadores.

[BARBOSA, SILVA e MENDES \(2014\)](#) utilizaram o *software ImageJ* como ferramenta para a automação dos processos de identificação do grau de liberação de grãos minerais. O método de Gaudin foi utilizado para avaliar a condição de liberdade entre os grãos dos minerais presentes nas amostras de rocha analisadas.

As amostras foram analisadas utilizando métodos automatizados para determinar a granulometria e esfericidade dos grãos. Antes da análise foram realizados na fase de pré-processamento ajustes de contraste e nitidez. O método de limiarização foi utilizado no processo de segmentação. No pós-processamento foi utilizada a estratégia *watershed* para a separação de grãos sobrepostos. A Figura 3.10 ilustra o processo.



Figura 3.10 – Aplicação da técnica de threshold e análise dos minerais contidos na amostra. Fonte: [BARBOSA, SILVA e MENDES \(2014\)](#).

Para a contagem dos parâmetros utilizados pelo método de Gaudin, partículas livres e partículas mistas, foi utilizado o método de contagem interativa utilizando o *plugin Cell Counter* do *ImageJ*.

Os autores apontaram que os resultados evidenciaram que quanto menor o tamanho dos grãos, maior o grau de liberação. Também foi relatado que a distribuição de tamanho dos grãos dentro de cada faixa granulométrica se comportou de forma aproximada da distribuição gaussiana.

Em [Latała e Wojnar \(2001\)](#) foram caracterizadas doze imagens micrográficas de amostras de aço austenítico com diferentes tamanhos de grãos. Para obter imagens passíveis de serem analisadas, os autores propuseram o uso de quatro diferentes combinações de algoritmos de processamento de imagens. Dentre as técnicas de processamento de imagens utilizadas nas referidas combinações de algoritmos destacam-se:

- Redução de ruído da imagem – Aplicação do Filtro de Média;
- Binarização – Utilização da técnica de *Threshold* com o Filtro *Black Top Hat*;
- Eliminação de pequenos objetos da imagem – Processamento morfológico erosão;
- Detecção de bordas – Utilização dos filtros *Sobel*, *Roberts* e *Prewitt* em conjunto com a operação lógica *AND* entre as imagens resultantes dos filtros aplicados;
- Redução das bordas dos objetos de interesse - Processamento morfológico esqueletização.

No trabalho de [Latała e Wojnar \(2001\)](#), o processo automatizado foi validado em relação ao modo clássico manual, cuja execução foi realizada por seis observadores independentes. Foram realizadas as medidas da média da seção transversal e do diâmetro médio dos grãos do material. A comparação dos resultados entre as quatro combinações de algoritmos e os resultados obtidos com os observadores humanos atestaram as vantagens para a utilização da técnica automatizada.

Os autores apontaram que o pré-processamento para a análise de imagens necessitou da configuração de um conjunto de parâmetros que consumiu um tempo relevante. Porém, todo o conjunto de imagens do experimento pôde ser submetido ao referido algoritmo implementado, tornando o processo cem vezes mais rápido do que o processo manual de análise.

A Figura 3.11 apresenta o resultado de uma das combinações de algoritmos utilizados por ([LATAŁA; WOJNAR, 2001](#)).

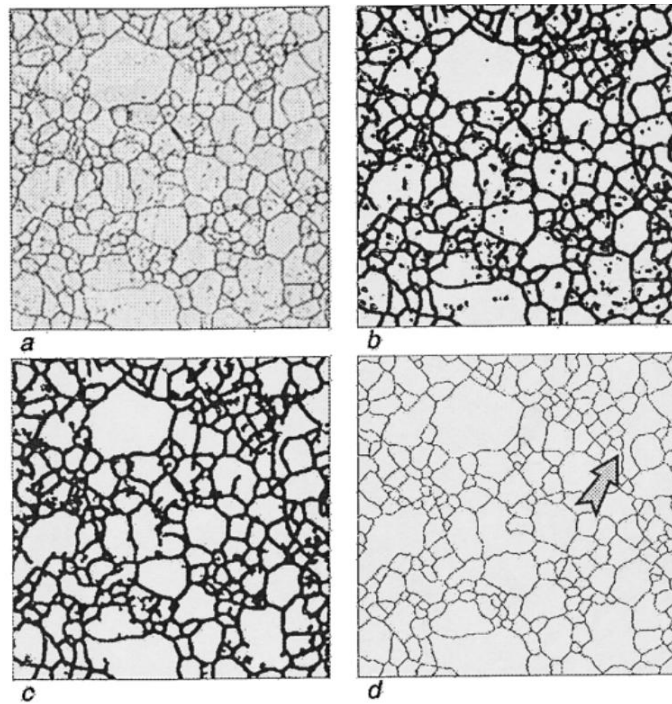


Figura 3.11 – Evolução do processo de melhoria da imagem, utilizando um dos conjuntos de algoritmos propostos por [Latała e Wojnar \(2001\)](#). (a) apresenta a imagem original, (b) a imagem binarizada, (c) o resultado da técnica de preenchimento de orifícios e (d) a imagem final.

A Figura 3.11 (a) apresenta a imagem como foi obtida pelo dispositivo de captura, a imagem após o processo de binarização é apresentada em (b), em (c) é apresentado o resultado da técnica de preenchimento de orifícios que retirou ruídos presentes no interior dos grãos e em (d) é apresentada a imagem final após a aplicação da técnica de esqueletização que reduziu as bordas dos grãos a espessura de um *pixel*.

[Albuquerque, Tavares e Cortez \(2011\)](#), propuseram uma abordagem computacional para classificação automática de microestruturas de ferro fundido branco hipoeutético usando morfologia matemática binária. O objetivo do projeto é a segmentação das microestruturas de cementita, perlita e ledeburita transformada presentes no material. Os autores justificam o projeto na medida que afirmam que *softwares* comerciais não conseguem realizar o processo, pois a ledeburita transformada é formada por glóbulos de perlita e cementita.

Os testes foram realizados considerando trinta amostras de ferro fundido branco hipoeutético utilizando operadores morfológicos básicos, erosão, dilatação, abertura e fechamento, aplicados em imagens binárias. A binarização foi baseada nos vales presentes nos histogramas das imagens. Os algoritmos foram implementados na linguagem de programação C++. Cabe ressaltar que os autores destacam a necessidade de utilização dos operadores morfológicos repetidas vezes até obter resultados satisfatórios para a análise, atestando o quanto este tipo de processamento pode ser empírico e demandar da experiência do usuário observador. A Figura 3.12 apresenta a segmentação da ledeburita em face da imagem original.

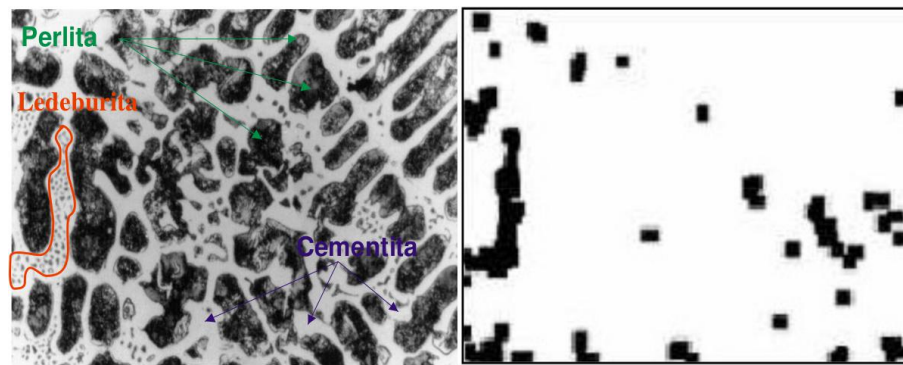


Figura 3.12 – Segmentação da ledeburita transformada utilizando técnicas de subtração e dilatação de imagens. Em (a) é apresentada a imagem original e em (b) a ledeburita segmentada. Fonte: [Albuquerque, Tavares e Cortez \(2011\)](#).

Na Figura 3.12 (a) é apresentada a imagem original onde são apontados os diferentes constituintes do material. Na imagem (b) é apresentado o resultado do processo de segmentação da ledeburita transformada.

Já o trabalho proposto por [Wejrzanowski et al. \(2008\)](#) demonstra a importância da área de caracterização de materiais, processamento de imagens e estereologia em uma aplicação industrial prática. No trabalho é feita a análise de partes de um reator de aço inoxidável utilizado na indústria petroquímica. O objetivo do trabalho foi avaliar a microestrutura do material do reator entre os anos de 2004 a 2007 (Figura 3.13), em busca de alterações relevantes de tamanho e formato de grão.

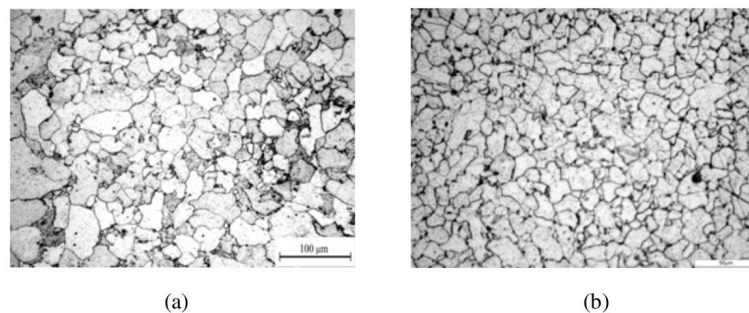


Figura 3.13 – Imagens da microestrutura do material de uma das regiões do reator analisadas nos anos de 2004 (a) e 2007 (b). Fonte: [Wejrzanowski et al. \(2008\)](#).

Diferentes pontos do reator foram esmerilhados, polidos e preparados quimicamente para análise. Um sistema móvel de microscopia foi utilizado para a obtenção das imagens. O *software* utilizado para a realização das análises das imagens foi o *MicroMeter* proposto por [Wejrzanowski et al. \(2008\)](#). As análises apresentaram alterações no tamanho de grão do material presente na parte inferior do reator. Contudo testes de dureza foram realizados, não revelando mudanças significativas no material. Ficou caracterizada a necessidade futura de reavaliação da parte inferior do reator para anos seguintes de uso do mesmo.

Os trabalhos aqui citados apresentaram o valor do uso do processamento de imagens para a caracterização de materiais. Contudo, pôde ser percebido que para atingir esta caracterização, experiências tanto na área de ciência dos materiais quanto na área de **PADI** são requeridas.

Foi mencionado ainda que, o processamento de imagens para futura análise por vezes se torna empírico e demanda de diferentes experimentos para se chegar a resultados ideais.

4 Materiais e métodos

O trabalho realizado envolveu etapas de investigação da literatura, desenvolvimento de software e aplicação das soluções desenvolvidas. O fluxograma da Figura 4.1 exibe os passos metodológicos que direcionaram a construção deste trabalho. O detalhamento de cada um desses passos será apresentado nas demais seções.

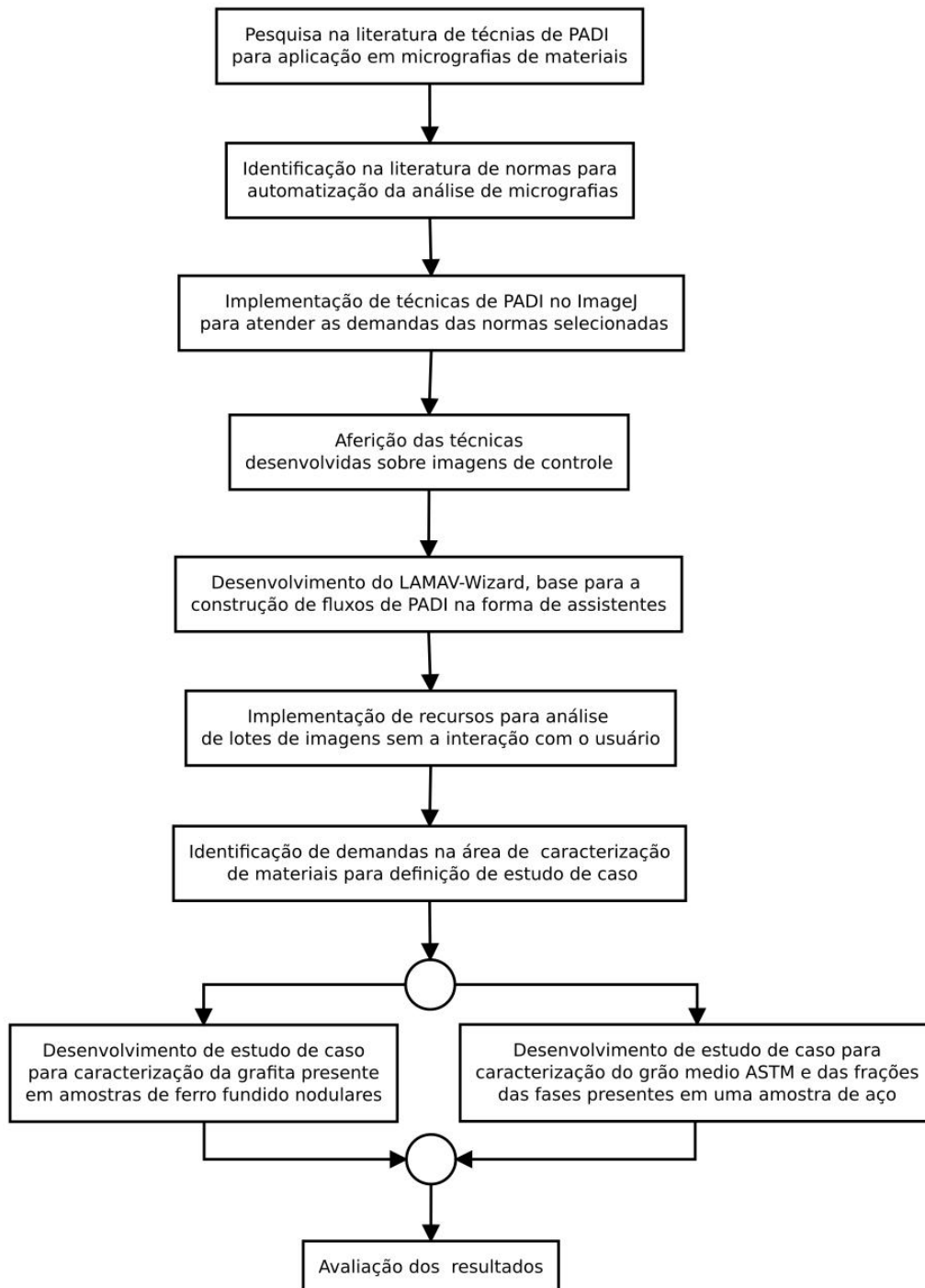


Figura 4.1 – Fluxograma da metodologia de construção deste trabalho. Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente foram realizadas pesquisas para levantamento e identificação na literatura das técnicas de **PADI** mais utilizadas em imagens micrográficas da área de ciência dos materiais. As técnicas selecionadas para fazerem parte deste trabalho foram descritas na [seção 2.2](#).

Em seguida foi constatado em diferentes trabalhos o uso de normas técnicas que norteiam a caracterização automática de materiais. Como este projeto pretende atender ao maior número possível de pesquisadores, foi definido que as primeiras estratégias de *Wizards* a serem disponibilizadas no *ImageJ* seriam baseadas em algumas destas normas.

Duas normas foram selecionadas para compor os primeiros *Wizards*: a [ASTM-E1382 \(2015\)](#) e a [ASTM-E2567 \(2016\)](#). A norma [ASTM-E1382 \(2015\)](#) orienta a caracterização automática de grãos de materiais policristalinos metálicos e não metálicos, abrangendo assim um grande número de materiais. Já a norma [ASTM-E2567 \(2016\)](#) é utilizada para determinar a porcentagem de nodularidade e a quantidade de nódulos de grafita por unidade de área, usando uma imagem microscópica de ferro fundido nodular. Enquanto a norma [ASTM-E1382 \(2015\)](#) foi selecionada pela sua abrangência, a norma [ASTM-E2567 \(2016\)](#) foi selecionada pela aplicação prática em projetos de destaque em andamento no LAMAV-UENF.

As mais diferentes estratégias de **PADI** já se encontravam presentes internamente no *ImageJ* ou disponibilizadas no formato de *plugins*. Dentre essas, a maioria das estratégias citadas nas normas [ASTM-E1382 \(2015\)](#) e [ASTM-E2567 \(2016\)](#).

Porém, para a implementação dos *Wizards* aqui propostos novas funcionalidades tiveram que ser desenvolvidas para que as referidas normas fossem atendidas no processo.

A norma [ASTM-E1382 \(2015\)](#) utiliza técnicas de análises estereológicas por fração linear e por fração de pontos. Estas técnicas não estavam implementadas no *software ImageJ* e os *plugins* existentes não contemplavam o processo na sua integralidade. Desta forma os *plugins Lineal Analyzer* e *Test Points Analyzer*, foram criados com o objetivo de preencher esta lacuna, contribuindo assim com a comunidade de usuários do *ImageJ* e viabilizando o desenvolvimento do *LAMAV-Wizard* em conformidade com essa norma.

Um outro aspecto abordado nas normas [ASTM-E1382 \(2015\)](#) e [ASTM-E2567 \(2016\)](#) é a existência de um relatório final contendo os dados obtidos com as análises. O *ImageJ*, já possuía um relevante ferramental para análise de partículas por área, porém os relatórios gerados a partir destas análises, apesar de poderem ser exportados para *softwares* de planilha do mercado, eram simples e não contemplavam as imagens geradas durante o processo. Além disto, para cada resultado analisado que se deseja exportar, fez-se necessário a criação de um novo arquivo de planilha, dificultando o processo quando existe a necessidade de analisar um grupo de imagens. Visando a criação de *Wizards* com recursos de geração de relatórios mais amigáveis, completos e integrados, foi desenvolvido o *plugin LAMAV-Report*. Esse foi desenvolvido para trabalhar tanto com o analisador de partículas do *ImageJ*, quanto com os analisadores *Lineal Analyzer*, *Test Points Analyzer* e *Graphite Analyzer*, e contemplou o resultado final de execução dos *Wizards*.

A norma [ASTM-E2567 \(2016\)](#) recomenda, além do método de análise por área, um conjunto de restrições que devem ser seguidas para a realização da caracterização da grafita. Para atender aos critérios da norma, gerar uma melhor visualização do resultado e compatibilizar a saída da análise com o *LAMAV-Report*, foi criado o *plugin Graphite Analyzer*. Este é derivado do *Analyze Particles* do *ImageJ* e substituiu o mesmo quando da análise do ferro fundido nodular.

Uma vez desenvolvidos os *plugins* essenciais para a elaboração do projeto, foi dado início ao desenvolvimento do *LAMAV-Wizard*. Este foi proposto como um *software* base para a implementação de fluxos de [PADI](#) no formato de assistentes de interface. Também foi disponibilizado no *LAMAV-Wizard* recursos para gravação de macroinstruções. Isto viabiliza que um fluxo de processamento previamente utilizado seja aplicado a um lote de imagens sem a intervenção de um usuário, facilitando e otimizando o processo.

De posse do ferramental base, foi dado início ao desenvolvimento dos *plugins* que implementam os assistentes de interface (*Wizards*). Foram construídos dois *Wizards*, um para norma [ASTM-E1382 \(2015\)](#) (*Grain Analysis Wizard*) e outro para a norma [ASTM-E2567 \(2016\)](#) (*Graphite Analysis Wizard*).

Dois estudos de caso foram criados para validar os *Wizards*, apresentar os seus benefícios e exemplificar os seus usos. Os estudos de caso possuíram finalidades distintas e cada um teve como foco um dos *Wizards* desenvolvidos. O estudo de caso criado para o *Graphite Analysis Wizard* teve como objetivo analisar micrografias de ferros fundidos nodulares oriundas de um trabalho científico acompanhado ([VIDAL; MATLAKHOVA, 2017](#)) e comparar os resultados obtidos com aqueles disponibilizados pelos autores. Já o estudo de caso do *Grain Analysis Wizard* teve por objetivo validar o ferramental proposto comparando os dados da caracterização de micrografia da literatura ([DUVAL et al., 2014](#)) com os resultados das análises realizadas por três diferentes métodos presentes no *Wizard*.

A interface do ferramental foi desenvolvida utilizando a língua inglesa a fim de preservar a compatibilidade com o *ImageJ*, já que o mesmo somente se encontra disponível neste padrão.

As metodologias específicas poderão ser encontradas nos respectivos estudos de caso.

As próximas seções detalham a metodologia de construção do ferramental desenvolvido e os próximos capítulos os seus estudos de caso e resultados.

4.1 LAMAV-Wizard

O *LAMAV-Wizard* foi construído para ser um *software* base para a construção de fluxos de [PADI](#), visando a caracterização de materiais. Este tem como função disponibilizar uma interface do tipo assistente, com recursos de avançar e retroceder, para ser aplicado a um conjunto predeterminado de técnicas de [PADI](#). O *software* foi construído na linguagem de programação Java, e arquitetado como um *plugin* a ser integrado no *software* livre *ImageJ*.

A interface do *software* é composta basicamente de uma janela dividida em três painéis (Figura 4.2). Um painel esquerdo, que apresenta as fases que constituem um determinado *Wizard*. Um painel inferior, onde se situam os botões que permitem o deslocamento por cada etapa do processo. E, por fim, um painel direito que abriga a técnica de processamento e análise de imagem a ser utilizada em uma determinada etapa.

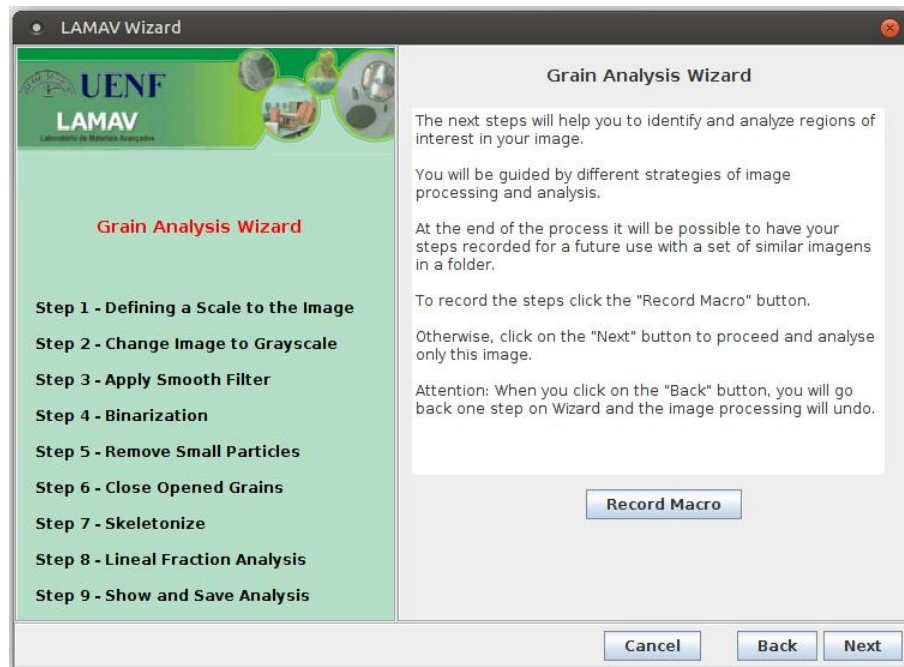


Figura 4.2 – Exemplo de interface gerada com o *LAMAV-Wizard*. Fonte: Elaborado pelo autor.

O painel esquerdo possui, além do título do *Wizard*, o título de cada painel de **PADI** a ser utilizado. Quando o usuário se desloca pelas fases do *Wizard*, o título da fase corrente é destacado em cor diferenciada para a devida orientação do usuário.

O painel inferior possui dois botões para navegação e um para cancelar a execução do *Wizard*. Enquanto o botão *Next* avança para a fase seguinte de processamento da imagem, o botão *Back* retrocede no processo e desfaz processamentos anteriormente realizados. Para cancelar a execução do *Wizard* deve ser utilizado o botão *Cancel*. Uma vez utilizado este botão, a interface do *Wizard* será encerrada, porém a imagem permanecerá com o processamento realizado até a última fase executada. Quando atingida a última fase do *Wizard*, o botão *Next* dará lugar ao botão *Finish* para que o *Wizard* seja encerrado.

Cabe ressaltar que, nenhuma das fases disponibilizadas no *Wizard* são de execução obrigatória, estando o usuário livre para ignorar qualquer etapa do processo. Porém, algumas etapas podem ser de extrema relevância, não devendo ser ignoradas. Caberá ao usuário estar ciente das instruções contidas nas caixas de texto de cada etapa para a sua tomada de decisão.

Enquanto os painéis esquerdo e inferior não possuem as suas estruturas modificadas durante a utilização do *Wizard*, o painel da direita é mais dinâmico e dependerá da técnica de processamento utilizada na fase corrente. Para cada nova fase, o painel da direita terá o seu

conteúdo substituído para conter novas técnicas de **PADI**. Esses painéis foram organizados de forma padronizada, contendo um título, uma caixa de texto com instruções e botões para executar as referidas técnicas. Acessando esses botões podem ser abertas as mais distintas interfaces para manipulação de parâmetros que direcionam a execução dessas técnicas.

O *LAMAV-Wizard* foi construído utilizando um sistema de janelas que não impede o acesso às opções disponíveis nos menus do *ImageJ*. Desta forma um usuário mais experiente poderá mesclar o uso do assistente com técnicas disponibilizadas somente na estrutura padrão de menu do *software*.

Foi disponibilizado no *LAMAV-Wizard* um recurso para, uma vez realizado um fluxo de **PADI**, armazenar um conjunto de macroinstruções (macro) contendo o código com a sequência de passos utilizados para o processamento da imagem. Esta macro possibilita a reutilização automática do fluxo sobre um conjunto de imagens pertencentes a uma mesma amostra de material, viabilizando assim a realização automatizada do processamento, sem a intervenção do pesquisador.

A primeira tela de execução do *Wizard* (Figura 4.2) apresenta o recurso de gravação de macro e permite que o mesmo seja ativado. Uma vez ativado o recurso, ao final da execução do fluxo a macro será disponibilizada para que seja utilizada.

Quando encerrada a execução de um *Wizard* o código fonte gerado para a macro é otimizado automaticamente. O objetivo desta funcionalidade é fornecer à macro a capacidade de submeter os seus comandos a um conjunto de imagens sem a necessidade de intervenção de um usuário.

Uma vez gerada a macro, esta poderá ser gravada para uso futuro ou executada. Quando executada fornecerá uma interface simples para que seja informado o diretório no qual se encontram as imagens a serem processadas (Figura 4.3).



Figura 4.3 – Interface para entrada do local de origem das imagens a serem processadas pela macro. Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma vez selecionado o diretório, todas as imagens pertencentes a este serão carregadas

uma a uma, processadas, analisadas e os seus resultados serão armazenados. Cabe ressaltar que, para se obter um benefício completo da utilização da macro, o *plugin LAMAV-Report* deve ser utilizado no fluxo de processamento.

4.2 LAMAV-Report

Após a execução de fluxos de *PADI* faz-se necessário obtenção de relatórios contendo os atributos e resultados das análises para investigação.

Com o objetivo de criar relatórios mais completos e flexíveis para os resultados das análises, foi desenvolvido o *plugin LAMAV-Report*. Este viabilizou a construção automatizada de relatórios, em formato de planilha eletrônica, contendo os valores gerados na janela *Results*, os valores gerados na janela *Summary* e diferentes configurações de imagens das micrografias analisadas.

Cabe ressaltar que o *LAMAV-Report* foi criado visando a compatibilidade total com os resultados apresentados pelo *plugin Analyze Particles*, e com os resultados dos *plugins Graphite Analyzer* e *LAMAV-Stereology*, desenvolvidos neste projeto.

A Figura 4.4 apresenta um exemplo de relatório de uma análise de ferro fundido nodular gerado pelo *plugin LAMAV-Report* e carregado em um *software* de planilha eletrônica.

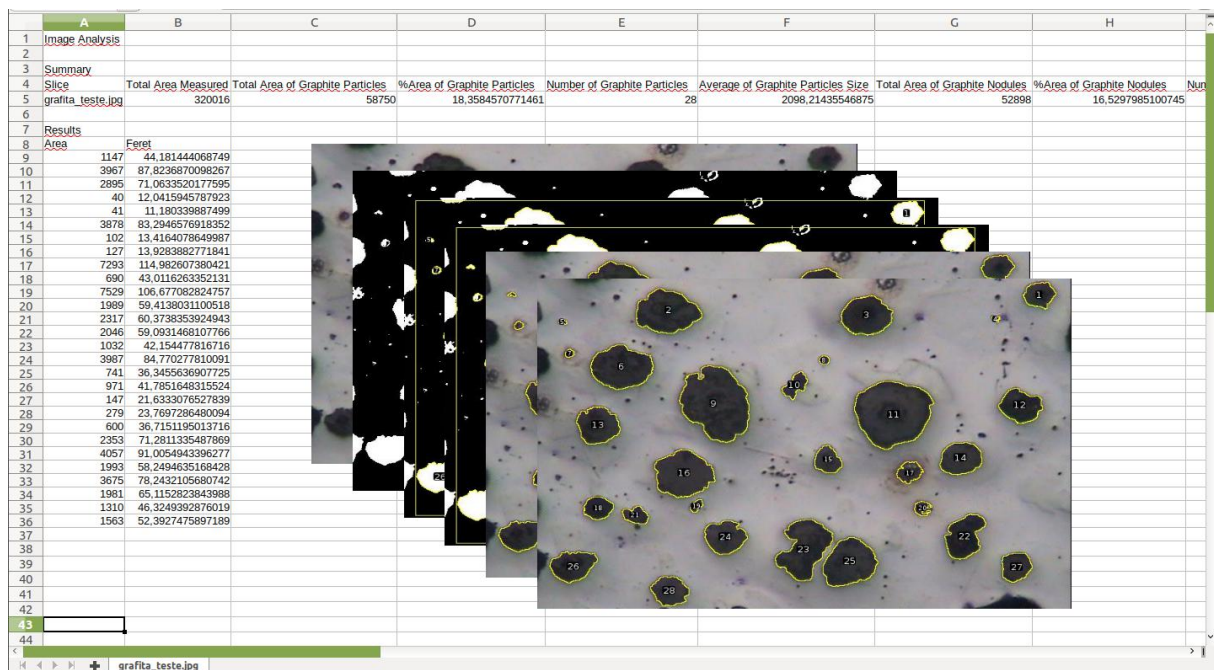


Figura 4.4 – Exemplo de relatório gerado pelo *plugin LAMAV-Report*, e carregado em um *software* de planilha eletrônica. Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado na Figura 4.4, na linha 5 da planilha foi alocado o conteúdo da janela *Summary* com os resultados das análises. Este conteúdo se estende por diversas colunas

da tabela, o quanto for necessário. Este posicionamento de linha é padrão e tem como objetivo viabilizar a inclusão de novos cálculos na planilha com os resultados gerados. A partir da linha 9 e coluna 1 é apresentado o conteúdo da janela *Results* com os atributos de cada partícula analisada. Este também se estende por diversas linhas e colunas da tabela, o quanto for necessário. O número de atributos e partículas analisadas podem variar de análise para análise, porém, para facilitar o acesso futuro aos dados, o posicionamento inicial desses será sempre na mesma posição da planilha. Por fim, visando uma avaliação qualitativa do processo, é apresentada a micrografia utilizada nas suas mais diferentes configurações. As imagens são apresentadas no formato cascata de organização, o que poderá ser alterado futuramente pelo usuário.

O *plugin LAMAV-Report* disponibiliza na sua interface principal a possibilidade de configuração do relatório (Figura 4.5) com dois conjuntos de opções, um para selecionar as tabelas e outro para selecionar as imagens que farão parte do mesmo.

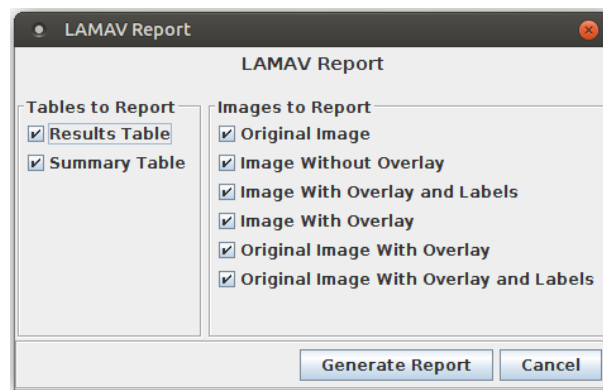


Figura 4.5 – Interface do *plugin LAMAV-Report* com todas as suas alternativas de conteúdos marcadas. Fonte: Elaborado pelo autor.

Todos os componentes do relatório são opcionais e podem ser incluídos ou excluídos através do acesso às caixas de seleção presentes na interface.

Como comentado anteriormente, a micrografia analisada pode fazer parte do relatório com diferentes configurações. A seguir são discriminadas as diferentes opções disponíveis:

- *Original Image*: imagem como foi aberta pelo *software ImageJ*;
- *Binary Image Without Overlay*: imagem binarizada;
- *Binary Image With Overlay and Labels*: imagem binarizada, adicionada dos contornos das partículas analisadas e dos números de identificação de cada uma;
- *Binary Image With Overlay*: imagem binarizada adicionada apenas dos contornos das partículas analisadas;
- *Original Image With Overlay*: imagem original adicionada apenas dos contornos das partículas analisadas;
- *Original Image With Overlay and Labels*: imagem original, adicionada dos contornos das partículas analisadas e dos números de identificação de cada uma;

Foi disponibilizado na interface do *plugin* o botão *Generate Report* (Figura 4.5). O acesso a esse botão dá continuidade ao processo, apresentando uma caixa de diálogo para que seja escolhido um local e um nome de arquivo com os quais será gravado o relatório. O arquivo é gravado com a extensão *xls*, compatível com diferentes *softwares* de planilha do mercado.

É importante ressaltar que quando inserido um nome de arquivo preexistente, os dados da imagem analisada são gravados em uma nova aba da planilha. Esta característica viabiliza concentrar em um único arquivo todas as informações de diferentes campos de uma mesma amostra de material analisada.

O *plugin LAMAV-Report* também foi desenvolvido para ser utilizado sem interação com o usuário, sobre um conjunto de imagens, através da implementação de macroinstruções. Este tema será melhor descrito na seção 4.1.

4.3 Graphite Analyzer

A norma [ASTM-E2567 \(2016\)](#) orienta que as partículas de grafita presentes no ferro fundido sejam dimensionadas em função da área das mesmas. Contudo, a norma dita uma série de recomendações que inviabilizam o uso da funcionalidade *Analyze Particles* do *ImageJ*, no seu formato original, para este tipo de análise.

Visando simplificar o processo de análise da grafita e atender a norma [ASTM-E2567 \(2016\)](#) foi criado o *plugin Graphite Analyzer*. Este *plugin* faz uso do *Analyze Particles* e implementa uma série de recomendações da norma como por exemplo: especificar tamanho mínimo para as partículas a serem analisadas, desprezar partículas que estejam tocando a borda, redefinir a área total a ser computada e caracterizar partículas de grafita quanto à nodularidade.

A primeira operação do *Graphite Analyzer* quando em execução é configurar o *Analyze Particles* para desprezar as partículas contidas na imagem que estejam tocando a borda. Apesar do sucesso desta configuração, o *Analyze Particles* mantém o valor da área total da imagem como referência para a quantificação da análise. Neste sentido, foi necessário que a dimensão total da área analisada fosse atualizada de forma que as áreas próximas às bordas da imagem, onde não existam partículas de interesse, também fossem desprezadas. Foi implementado então um quadro de guarda que redimensiona a região analisada na imagem. A Figura 4.6 apresenta uma imagem de teste submetida ao *Graphite Analyzer* com o quadro de guarda em destaque na cor vermelha.

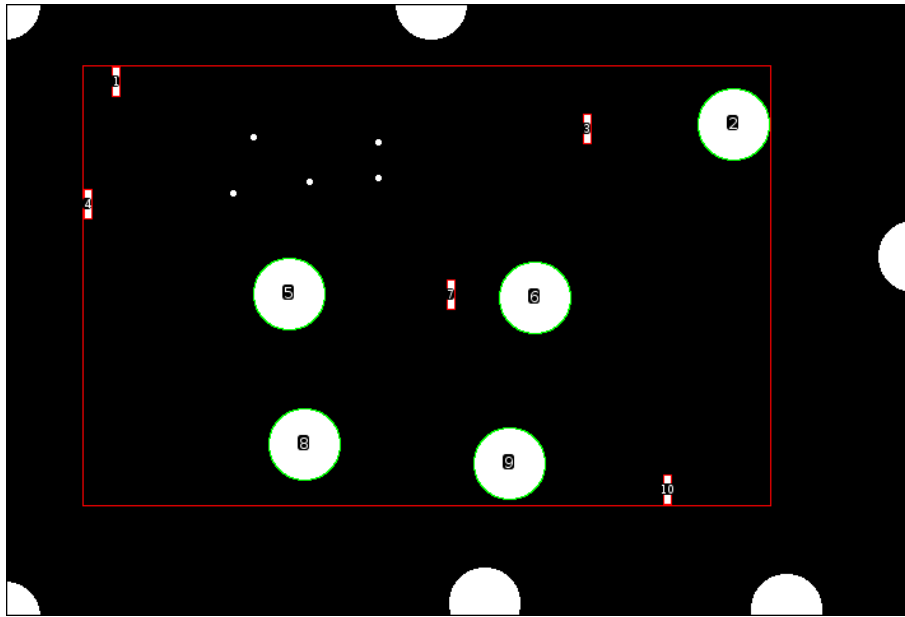


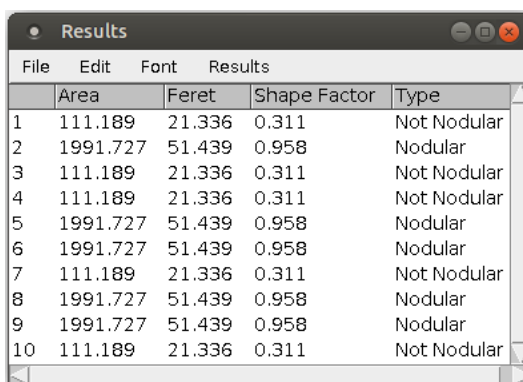
Figura 4.6 – Imagem de teste submetida ao *Graphite Analyzer* com os marcadores resultantes em destaque. Fonte: Elaborado pelo autor.

Após desprezar as partículas que tocam a borda, fez-se necessário desprezar as partículas diminutas, isto é, aquelas com **DMFs** menores do que $10 \mu m$. Apesar do *Analyze Particles* disponibilizar o recurso de exclusão de partículas menores do que uma determinada dimensão, este trabalha utilizando somente a área da partícula como valor de referência. Desta forma foi necessária a implementação integral deste recurso para manter o *plugin* em conformidade com a norma. Na Figura 4.6 são apresentadas partículas analisadas e partículas desprezadas. Enquanto as partículas analisadas apresentam uma marcação de contorno e são numeradas, as partículas desprezadas não possuem qualquer tipo de marcação.

As partículas de grafita foram caracterizadas graficamente para permitir a análise qualitativa pelo pesquisador. Enquanto as partículas nodulares foram contornadas na cor verde, as não nodulares foram contornadas na cor vermelha. A imagem de teste apresentada na Figura 4.6 contém círculos contornados na cor verde e retângulos contornados na cor vermelha simulando as duas classes da grafita.

Uma vez selecionadas as partículas de interesse, fez-se necessária a obtenção dos seus atributos. Para atender a norma [ASTM-E2567 \(2016\)](#) foi necessário disponibilizar o **DMF**, a área, o fator de forma e a classe de cada uma das partículas. Enquanto o **DMF** e a área foram obtidos do *Analyze Particles* o fator de forma e o tipo da partícula foram gerados pelo *Graphite Analyzer*.

Uma janela de texto denominada *Results* foi gerada pelo *plugin* com os valores desses atributos (Figura 4.7). É importante ressaltar que somente fazem parte da tabela de resultados as partículas de grafita com **DMFs** maiores do que $10 \mu m$ que não estiverem tocando a borda.

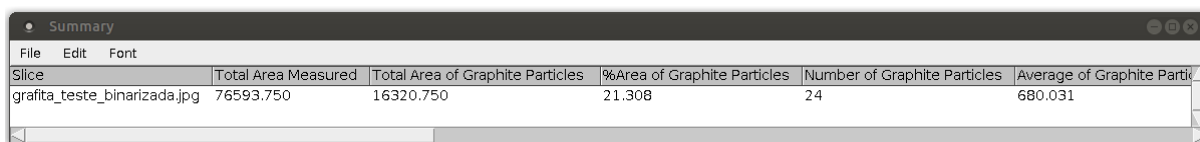


	Area	Feret	Shape Factor	Type
1	111.189	21.336	0.311	Not Nodular
2	1991.727	51.439	0.958	Nodular
3	111.189	21.336	0.311	Not Nodular
4	111.189	21.336	0.311	Not Nodular
5	1991.727	51.439	0.958	Nodular
6	1991.727	51.439	0.958	Nodular
7	111.189	21.336	0.311	Not Nodular
8	1991.727	51.439	0.958	Nodular
9	1991.727	51.439	0.958	Nodular
10	111.189	21.336	0.311	Not Nodular

Figura 4.7 – Exemplo de janela com os atributos gerados para a análise dos nódulos de grafita. Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode ser notado na Figura 4.7 a existência de uma barra de menu presente no topo da janela. Uma das opções disponíveis neste menu é a gravação dos dados da tabela. Contudo, quando o *plugin Graphite Analyzer* estiver sendo utilizado em conjunto com o *plugin LAMAV-Report*, esta opção de gravação será dispensável dada a inclusão neste último de um recurso mais completo para a geração dos relatórios.

De posse dos atributos das partículas de grafita foi implementada a análise da amostra. Nesta análise foram avaliadas oito propriedades recomendadas pela norma [ASTM-E2567 \(2016\)](#). Para apresentar os resultados da análise, uma janela de texto, denominada *Summary*, foi gerada com os rótulos das propriedades da amostra e os seus valores (Figura 4.8).



Slice	Total Area Measured	Total Area of Graphite Particles	%Area of Graphite Particles	Number of Graphite Particles	Average of Graphite Particles
grafita_teste_binarizada.jpg	76593.750	16320.750	21.308	24	680.031

Figura 4.8 – Janela com um exemplo de visão parcial dos resultados das análises dos nódulos de grafita de uma amostra de ferro fundido dúctil. Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir são apresentadas as propriedades analisadas pelo *plugin Graphite Analyzer* conforme a norma [ASTM-E2567 \(2016\)](#):

- Área total analisada: área em micrômetros do menor retângulo que engloba as partículas de grafita que não estejam sendo interceptadas pelos limites da imagem e que possuam valores maiores do que $10 \mu m$ para o atributo **DMF**;
- Número de partículas analisadas: total de partículas de grafita analisadas incluindo aquelas com diâmetros menores do que $10 \mu m$ para o **DMF** e aquelas que estejam tocando a borda da imagem;
- Número de nódulos analisados: total de partículas de grafita analisadas com fator de forma indicando circularidade maior ou igual a 0,6;

- Nodularidade por área: é a área total das partículas de grafita analisadas como nódulos dividida pela área total de todas as partículas de grafita analisadas;
- Quantidade de nódulos por mm^2 : estimativa do número de nódulos de grafita contidos em $1 mm^2$;
- Menor tamanho de nódulo: menor valor encontrado para o atributo **DMF** nas partículas analisadas;
- Maior tamanho de nódulo: maior valor encontrado para o **DMF** nas partículas analisadas;
- Média dos tamanhos dos nódulos: média dos valores encontrados para o **DMF** nas partículas analisadas;
- Desvio padrão dos tamanhos dos nódulos: desvio padrão dos valores encontrados para o **DMF** nas partículas analisadas;
- Média do fator de forma dos nódulos: média dos fatores de forma dos nódulos analisados que indicam um grau de circularidade no intervalo entre 0 a 1;

O *plugin Graphite Analyzer* foi disponibilizado no submenu *LAMAV* do menu *Plugins* do *ImageJ*. Uma vez acessado o *plugin*, todo o processo de análise ocorre sem a intervenção do usuário.

Além das propriedades analisadas pelo *plugin Graphite Analyzer*, outros itens são elencados na norma [ASTM-E2567 \(2016\)](#) para fazerem parte do relatório final da análise, como por exemplo o número de campos analisados e as micrografias das amostras. Estes itens foram contemplados no resultado da análise da grafita através do *plugin* gerador de relatório *LAMAV-Report*, descrito em detalhes na seção [4.2](#).

4.4 Lineal Analyzer

Apesar do método de medição por intercepto linear ser amplamente utilizado para obter proporções de fases e tamanhos de grãos na caracterização de materiais, este não está disponível originalmente no *software ImageJ*. Além disso, os *plugins* desenvolvidos por terceiros que objetivam esta funcionalidade, ou não atendem aos seus requisitos ou restringem a flexibilidade e a usabilidade do método.

Visando atender a esta demanda foi desenvolvido o *plugin Lineal Analyzer*. Este foi criado para ser uma nova opção de ferramental no *ImageJ* para análise de imagens de materiais, atendendo a normas como a [ASTM-E1382 \(2015\)](#), [ASTM-E112 \(2013\)](#) e [ASTM-E1245 \(2016\)](#).

O *Lineal Analyzer* foi construído visando disponibilizar uma interface simples e flexível para o usuário. A Figura [4.9](#) apresenta a proposta de interface do *plugin*.

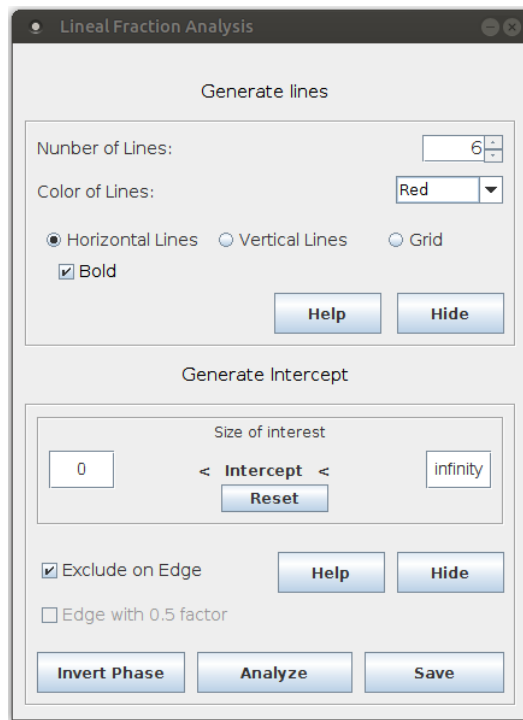


Figura 4.9 – Interface principal do *plugin Lineal Analyzer*. Fonte: Elaborada pelo autor.

A interface do *plugin* foi dividida em dois conjuntos de funcionalidades. O primeiro, denominado *Generate Lines*, agrupa funcionalidades referentes à criação das linhas de teste utilizadas como base para o método de medição por intercepto. Já o segundo conjunto, denominado *Generate Intercept*, abriga as funcionalidades referentes à geração automática dos interceptos sobre essas linhas base.

As funcionalidades desenvolvidas no *Generate Lines* são listadas a seguir:

- *Number of Lines*: define o número de linhas base a serem criadas na horizontal e/ou na vertical;
- *Color*: permite definir a cor das linhas geradas;
- *Horizontal Lines*: define que somente são utilizadas linhas de teste na horizontal;
- *Vertical Lines*: define que somente são utilizadas linhas de teste na vertical;
- *Grid*: define que são utilizadas linhas de teste na horizontal e na vertical;
- *Bold*: aumenta a espessura da linha visando uma melhor representação da mesma na imagem micrográfica. (Obs. A referência da linha para aspectos quantitativos é fixada em um *pixel* de largura);
- *Hide*: esconde as linhas de teste para uma melhor visualização da imagem micrográfica;

As opções do *Generate Lines* foram criadas para funcionar de forma interativa e dinâmica, isto é, qualquer alteração nos parâmetros das opções automaticamente alteram a representação das linhas de teste existentes sobre a imagem. Desta forma, o processo de criação dessas linhas fica simplificado pois pode-se visualizar o resultado das mudanças no momento em que as mesmas são realizadas. Um exemplo de aplicação de 6 linhas horizontais de teste é

apresentado na Figura 4.10.

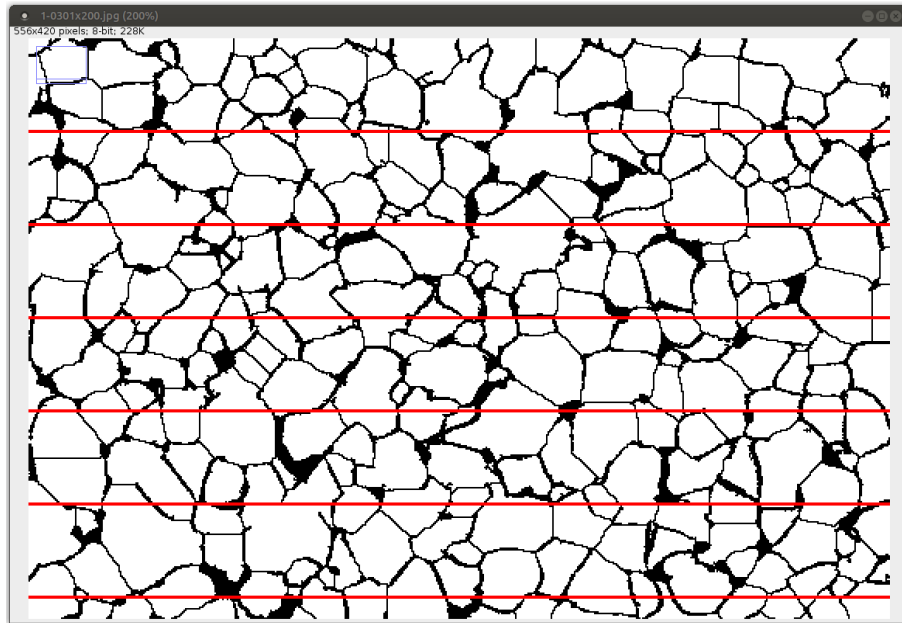


Figura 4.10 – Exemplo de disposição de linhas de teste horizontais sobre uma imagem binarizada de uma amostra de aço. Fonte: Adaptado de Lober (2018).

Neste exemplo estão sendo utilizadas linhas horizontais na cor vermelha com formato **Bold**.

Uma vez incluída as linhas de teste, fica disponibilizada a funcionalidade de geração dos interceptos. O conjunto *Generate Intercept* foi desenvolvido com as seguintes funcionalidades:

- *Size of interest*: define limites de tamanho mínimo e/ou tamanho máximo para os interceptos a serem gerados;
- *Exclude on Edge*: durante a criação dos interceptos as partículas do material que tocam a borda da imagem são desprezadas;
- *Edge with 0.5 factor*: quando esta opção é habilitada os interceptos das partículas que tocam a borda da imagem são contabilizados com peso 0.5.
- *Invert Phase*: troca o posicionamento dos interceptos da fase identificada pelos *pixels* brancos para a identificada pelos *pixels* pretos ou vice-versa;
- *Analyze*: cria os interceptos e gera as tabelas com os resultados;
- *Save*: salva as tabelas com os resultados da análise;
- *Hide*: esconde os interceptos para uma melhor visualização da imagem;

Uma vez acessado o botão *Analyze* os interceptos são criados sobre as linhas teste obedecendo às configurações definidas pelo usuário. A Figura 4.11 apresenta um exemplo de disposição de interceptos sobre grãos de ferrita em uma imagem binarizada de uma amostra de aço.

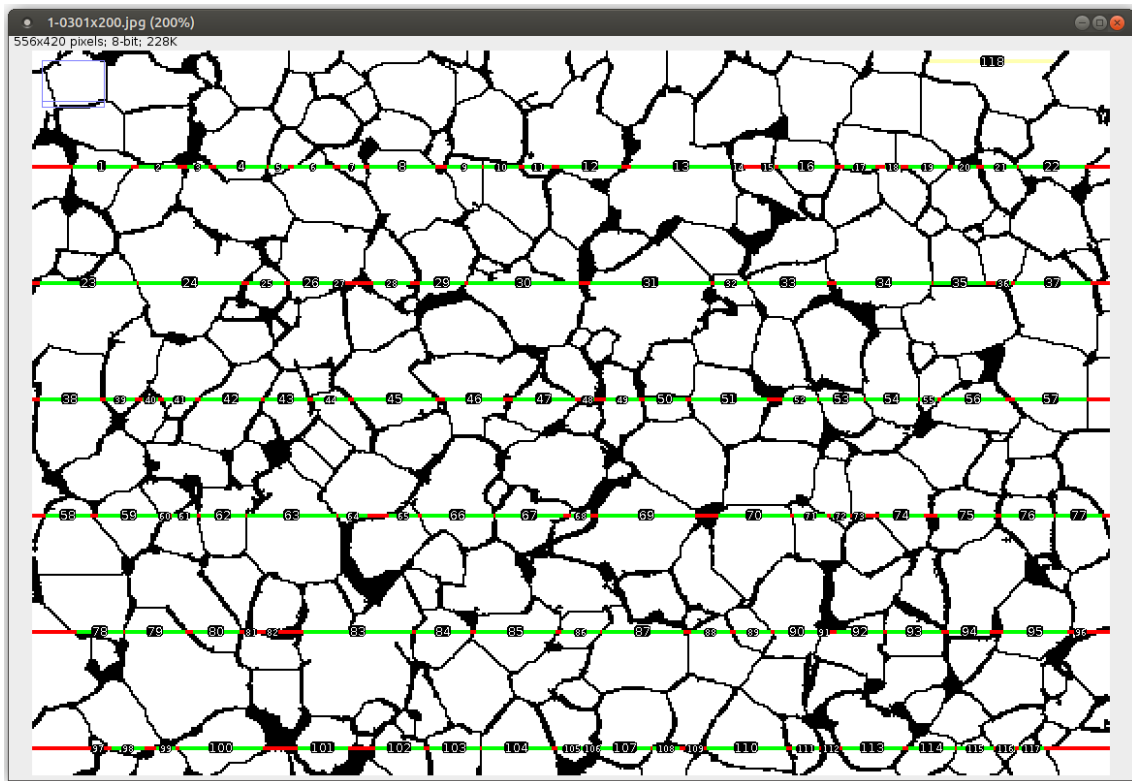


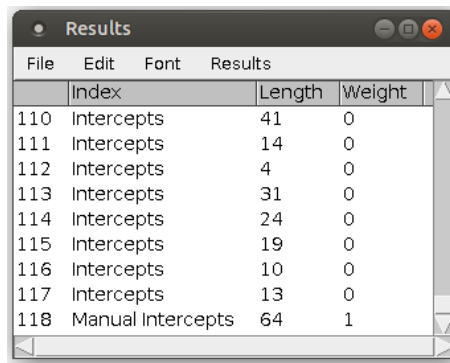
Figura 4.11 – Exemplo de disposição de interceptos sobre grãos de ferrita em uma imagem binarizada de uma amostra de aço. Fonte: Adaptado de [Lober \(2018\)](#).

Neste exemplo a opção *Exclude on Edge* do *plugin* está selecionada fazendo com que as partículas de ferrita que tocam a borda da imagem estejam sem a marcação de interceptos. Isto pode ser percebido pela cor vermelha, original da linha de teste, sobre estas partículas. Cada intercepto está na cor verde e possui uma identificação nos padrões do *ImageJ*. Porém, para este tipo de análise, o correto é que os interceptos tocantes a borda da imagem tenham as suas medidas consideradas e sejam contabilizados como 0,5, o que pode ser alterado de forma simplificada na interface do *plugin*.

Visando flexibilizar o processo, também está disponível a criação livre de interceptos. Para tanto, a ferramenta de linha do *ImageJ* poderá ser utilizada em qualquer parte da imagem. Na parte superior direita da Figura 4.11 é apresentado um intercepto amarelo identificado com o número 118. Este intercepto foi inserido de forma manual, fora de contexto, unicamente para exemplificar a versatilidade do ferramenta.

Após a criação dos interceptos automaticamente são geradas as tabelas *Results* e *Summary*. Enquanto a tabela *Results* apresenta os valores dos atributos dos interceptos, a tabela *Summary* apresenta o resultado da análise baseada nesses atributos.

A Figura 4.12 apresenta um exemplo da janela *Results* gerada pelo *plugin Lineal Analyzer* contendo os atributos dos interceptos.



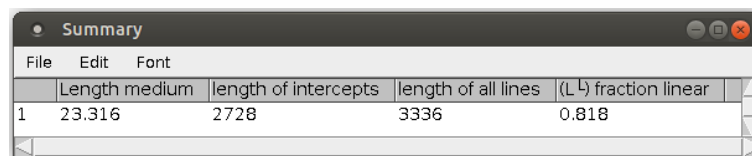
	Index	Length	Weight
110	Intercepts	41	0
111	Intercepts	14	0
112	Intercepts	4	0
113	Intercepts	31	0
114	Intercepts	24	0
115	Intercepts	19	0
116	Intercepts	10	0
117	Intercepts	13	0
118	Manual Intercepts	64	1

Figura 4.12 – Exemplo da janela *Results* gerada pelo *plugin Lineal Analyzer*. Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir são descritos os atributos propostos para a tabela *Results*:

- *Label*: número inteiro que identifica cada um dos interceptos;
- *Method*: identificação quanto ao modo como o intercepto foi gerado, podendo ter os valores *automatic* ou *manual*;
- *Length*: comprimento dos interceptos;
- *Weight*: peso do intercepto. Pode ter os valores 0.5 ou 1, dependendo da estratégia de análise utilizada;

A Figura 4.12 apresenta um exemplo da janela *Summary* gerada pelo *plugin Lineal Analyzer* contendo os resultados das análises.



	Length medium	length of intercepts	length of all lines	(L) fraction linear
1	23.316	2728	3336	0.818

Figura 4.13 – Exemplo da janela *Summary* gerada pelo *plugin Lineal Analyzer*. Fonte: Elaborado pelo autor.

A seguir são descritos os atributos propostos para a tabela *Summary*:

- *Number of Intercepts (N)*: número de interceptos gerados ou partículas medidas;
- *Mean Intercept (\bar{L})*: valor do intercepto médio;
- *Sum of Intercepts*: soma dos comprimentos dos interceptos;
- *Sum of Test Lines (L)*: soma dos comprimentos de todas as linhas teste;
- *Intercepts by Lines Length (N_L)*: número de interceptos por unidade de comprimento das linhas de teste;
- *Lineal Fraction (L_L)*: fração média do comprimento da linha de teste que encontra-se sobre as partículas de interesse;
- *Intersections by Test Line (P_L)*: número de contornos de grãos interceptados por unidade de comprimento das linhas de teste;

- *ASTM Grain Size (G)*: tamanho médio de grão de acordo com a norma [ASTM-E1382 \(2015\)](#) ($G = (-6.643856 \text{ Log } \bar{l}) - 3.288$);

4.5 Test Points Analyzer

Apesar da Fração de Pontos (P_P) ser uma técnica amplamente utilizada na caracterização de materiais, a sua implementação no software *ImageJ* se dá através de um *plugin* que apresenta limitações na interface e na apresentação dos resultados. O *plugin Test Points Analyzer* tem por objetivo quantificar as fases de interesse de uma amostra de material, disponibilizando uma interface intuitiva para a realização do cálculo da Fração de Pontos (P_P).

A Figura 4.14 apresenta a interface principal do *plugin Test Points Analyzer*. Esta interface foi dividida em dois conjuntos de funcionalidades. O primeiro, denominado *Generate Grid of Points*, agrupa funcionalidades referentes à criação dos pontos de teste utilizados como base para o método de medição por contagem de pontos. Já o segundo conjunto, denominado *Analyze Points*, abriga as funcionalidades referentes a análise dos pontos e a gravação dos resultados.

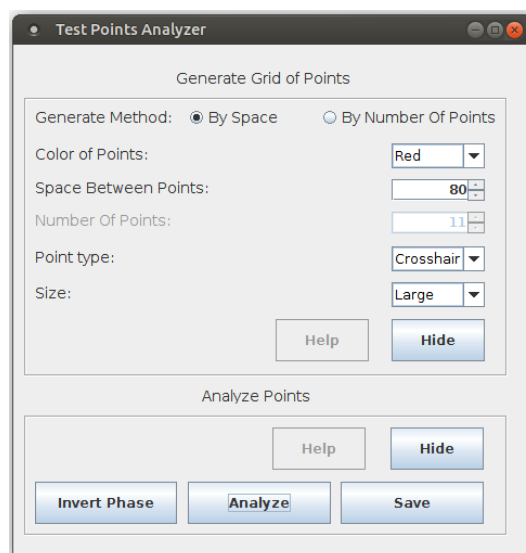


Figura 4.14 – Interface principal do *plugin Test Points Analyzer*. Fonte: Elaborada pelo autor.

As funcionalidades disponibilizadas no *Generate Grid of Points* são listadas a seguir:

- *Generate Method*: define o método de geração dos pontos de teste sobre a micrografia, podendo ser pela quantidade total de pontos ou pelo espaçamento entre os pontos:
 - *By Space*: define o número de *pixels* que separa os pontos posicionados sobre a micrografia;
 - *By Number of Points*: define o número de pontos de teste posicionados sobre a micrografia.
- *Color*: define a cor dos pontos de teste;
- *Point Type*: permite escolher o formato gráfico dos pontos de teste a serem posicionados sobre a micrografia (*Hybrid/Crosshair*);

- *Size*: permite alterar o tamanho dos pontos de teste a serem posicionados sobre a micrografia (*Medium/Large*);
- *Hide*: permite esconder os pontos de teste para possibilitar uma possível conferência;

As opções disponíveis no grupo *Generate Method* também foram desenvolvidas para funcionar de forma interativa e dinâmica, isto é, qualquer alteração nos parâmetros das opções automaticamente alteram a representação dos pontos de teste existentes sobre a micrografia. Um exemplo de aplicação de pontos de teste é apresentado na Figura 4.15.

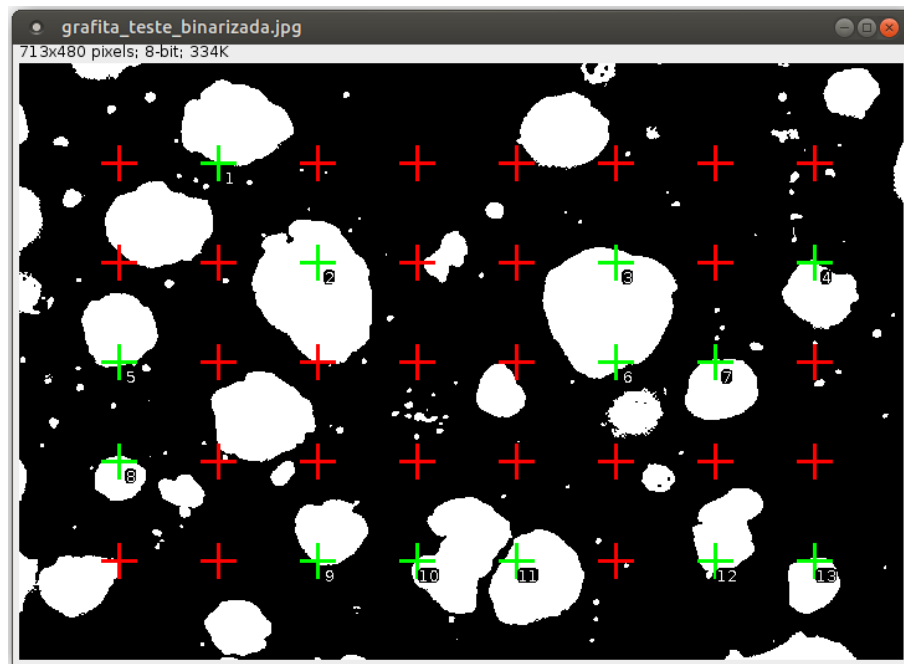


Figura 4.15 – Exemplo de disposição de uma malha de pontos de teste sobre uma imagem binarizada de ferro fundido. Fonte: Adaptado de Vidal e Matlakhova (2017).

No exemplo estão dispostos quarenta pontos de teste, utilizando o formato gráfico *Crosshair* no tamanho *Large*. A fase de interesse está identificada pela cruz na cor verde.

Uma vez incluídos os pontos de teste, ficam disponibilizadas as funcionalidade referentes à análise dos pontos. O conjunto *Analyze Points* foi desenvolvido com as seguintes funcionalidades:

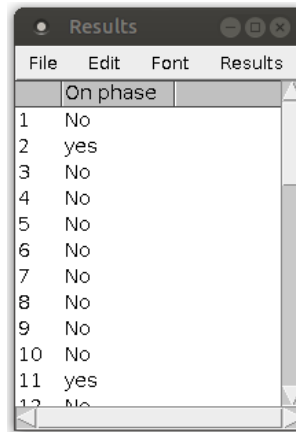
- *Hide*: altera a cor dos pontos sobre a fase de interesse para a cor padrão da malha de pontos, ou vice-versa;
- *Invert Phase*: troca a fase analisada, isto é, se a fase de interesse for a constituída pelos *pixels* brancos esta passará a ser constituída pelos *pixels* pretos, ou vice-versa;
- *Analyze Points*: realiza a contagem dos pontos e gera as tabelas com os resultados da análise;
- *Save*: salva as tabelas com os resultados da análise;

Tanto o *plugin Test Points Analyzer* quanto o *Lineal Analyzer* foram desenvolvidos baseados na metodologia de apresentação de resultados do *plugin Particle Analyzer*, onde na rea-

lização das análises automaticamente são geradas as tabelas *Results* e *Summary*.

No *Test Points Analyzer*, enquanto a tabela *Results* apresenta os valores dos atributos dos pontos, a tabela *Summary* apresenta os resultados das análises baseada nesses atributos.

A Figura 4.16 apresenta um exemplo da janela *Results* gerada pelo *Lineal Analyzer* contendo os atributos dos interceptos.

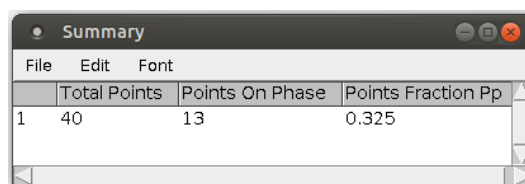


	On phase
1	No
2	yes
3	No
4	No
5	No
6	No
7	No
8	No
9	No
10	No
11	yes
12	No

Figura 4.16 – Exemplo da janela *Results* gerada pelo *plugin Test Points Analyzer*. Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores da tabela são divididos em duas colunas. A primeira, contém um número inteiro que identifica cada um dos pontos da malha, enquanto a segunda identifica se o ponto está sobre a fase de interesse.

A janela *Summary* é formada por quatro colunas com resultados da análise (Figura 4.17).



	Total Points	Points On Phase	Points Fraction Pp
1	40	13	0.325

Figura 4.17 – Exemplo da janela *Summary* gerada pelo *plugin Test Points Analyzer*. Fonte: Elaborado pelo autor.

Na segunda coluna é apresentado o total de pontos gerados no teste, na terceira o total de pontos que incidem sobre a fase de interesse e na quarta a Fração de Pontos (P_P).

Cabe ressaltar que, como os resultados foram dispostos nas janelas *Results* e *Summary* e os pontos de teste foram gerados sobre a micrografia utilizando a técnica de *Overlay*, isto tornou o *plugin* totalmente compatível com a ferramenta para a geração de relatórios *LAMAV-Report*.

5 Estudo de Caso I

5.1 Introdução

Durante o desenvolvimento do *LAMAV-Wizard* foi percebida a necessidade de aplicação prática do ferramental implementado. Neste sentido foi criada uma parceria com o núcleo de pesquisa da professora Lioudmila Matlakhova. Localizado nas dependências do Laboratório de Materiais Avançados da UENF (LAMAV-UENF), este núcleo possui como uma das linhas de investigação a formação da grafita em ferro fundido nodular. Diferentes projetos têm sido desenvolvidos pelo grupo, gerando artigos, dissertações de mestrado e teses de doutorado (VIDAL; MATLAKHOVA, 2017; MATLAKHOVA; PESSANHA; CARVALHO, 2016; PESSANHA; MATLAKHOVA, 2016).

Vidal e Matlakhova (2017) avaliam as alterações estruturais e as propriedades mecânicas de ferros fundidos nodulares com teor de Mg variável em função do tempo e da temperatura de vazamento. Para tanto foram analisadas amostras de ferro fundido produzidas pela empresa PAM Saint-Gobain Canalização, em sua fundição localizada na cidade de Barra Mansa – RJ. No processo de produção das ligas foram realizados tratamentos de inoculação, visando a disponibilização de substratos favoráveis à criação de nódulos de grafita, bem como, tratamentos de nodulização para facilitar a formação dos referidos nódulos.

Enquanto a literatura afirma que o vazamento do ferro fundido nodular deve ser feito em até 10 ou 15 min após a nodulização, em temperaturas próximas a 1350 °C, o trabalho de Vidal e Matlakhova (2017) investigou tempos de vazamento variando de 10 a 45 minutos com temperaturas variando de 1362 °C a 1232 °C.

As amostras obtidas foram caracterizadas por análise química, técnicas de microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura, análise por difração de raios X, e ensaios mecânicos de tração e dureza.

As micrografias obtidas das amostras de ferro fundido foram analisadas de acordo com a norma ISO-945 (2008) utilizando um processo manual de identificação e caracterização dos nódulos de grafita. As partículas foram classificadas visualmente como nodulares ou não nodulares de acordo com imagens base existentes na referida norma.

Vidal e Matlakhova (2017) também utilizaram uma metodologia própria de análise visando investigar de forma mais minuciosa o processo de formação dos nódulos de grafita. Inicialmente foram traçados círculos sobre cada partícula de grafita com o auxílio do *software Microsoft PowerPoint™*, posteriormente as áreas dos círculos foram calculadas para se obter a área aproximada das partículas. As partículas foram categorizadas em face das suas dimensões e histogramas foram criados com o objetivo de simplificar a análise. O processo demandou horas de trabalho para cada imagem, se tornando moroso, repetitivo e vulnerável a fadiga e

subjetividade do avaliador.

Apesar do sucesso do trabalho, pôde-se notar um potencial de otimização no que diz respeito aos processos utilizados para a realização das análises metalográficas.

A hipótese deste estudo de caso é de que a proposta de uma metodologia automatizada para a análise da grafita se aproxime em termos de resultados da metodologia manual e traga benefícios como: simplicidade no processamento das imagens, redução do tempo de análise, precisão na reprodutibilidade de experimentos e minimização do custo do processo.

O objetivo deste estudo de caso é desenvolver um fluxo de **PADI** para automatizar e otimizar o processo de caracterização das partículas de grafita existentes em micrografias de ferros fundidos nodulares.

Além do objetivo geral alguns objetivos específicos são destacados a seguir:

- Aplicar o *software LAMAV-Wizard*, proposto nesta tese, a um caso real de demanda por estratégias de processamento e análise de imagens de materiais.
- Validar o fluxo de **PADI** desenvolvido através da realização de comparações estatísticas com um caso real de caracterização da grafita que tenha utilizado processos manuais.
- Disponibilizar para profissionais da área o ferramental desenvolvido como um *plugin* para o *software livre ImageJ*.

5.2 Metodologia

Uma vez percebida a demanda por este trabalho, foi investigada a literatura da área visando a identificação de processos formalizados que definissem as melhores estratégias automatizadas para a análise de imagens de ferros fundidos nodulares. Diferentes trabalhos apontaram para a norma **ASTM-E2567 (2016)** que contempla este tipo de caracterização. A referida norma foi utilizada como referência para a construção do *plugin Graphite Analyzer* e consequentemente para a construção do fluxo de **PADI** aqui proposto e denominado *Graphite Analysis Wizard*.

Este estudo de caso utilizou como insumo imagens micrográficas de ferro fundido disponibilizadas por **Vidal e Matlakhova (2017)**. Também foram fornecidos pelos autores os dados obtidos da caracterização manual e os resultados estatísticos das análises realizadas.

Foram disponibilizadas por **Vidal e Matlakhova (2017)** ao todo quarenta imagens de oito amostras de ferro fundido. Cada amostra foi obtida em diferentes tempos de vazamento da liga para os moldes de areia. Por consequência, maiores tempos de vazamento resultaram em menores temperaturas da liga. A **Tabela 5.1** apresenta os diferentes tempos e temperaturas analisadas. Para facilitar a identificação e apresentação dos resultados as amostras foram rotuladas de T1 a T8 (**VIDAL; MATLAKHOVA, 2017**).

Tabela 5.1 – Tempos de vazamento e temperatura das ligas de ferro fundido analisadas.

Identificação da Amostra	Tempo (minutos)	Temperatura (°C)
T1	10	1362
T2	15	1326
T3	20	1303
T4	25	1285
T5	30	1268
T6	35	1254
T7	40	1244
T8	45	1232

Fonte: Vidal e Matlakhova (2017)

Dentre os diferentes objetivos do trabalho de Vidal e Matlakhova (2017) estão incluídos a análise da forma, do tamanho e da distribuição da grafita existente nas micrografias de ferro fundido. As micrografias foram obtidas das amostras em estado químico não atacado, sendo este também um critério apontado pela norma ASTM-E2567 (2016).

No final deste estudo de caso pretende-se comparar de forma estatística os resultados alcançados por Vidal e Matlakhova (2017) com os resultados alcançados pela utilização do *Graphite Analysis Wizard*.

Como já mencionado, a caracterização da grafita realizada por Vidal e Matlakhova (2017) utilizou como referência a norma ISO-945 (2008). Contudo a norma ASTM-E2567 (2016), por ser focada na automatização do processo, difere de forma profunda da ISO-945 (2008), limitando a comparação dos resultados da análise.

No sentido de viabilizar a comparação dos resultados e validar o ferramental desenvolvido foi criada uma variação do plugin *Graphite Analyzer* para aproximar o processo automatizado do processo manual realizado com norma ISO-945 (2008).

Duas características foram alteradas no *plugin Graphite Analyzer*. A primeira foi a retirada do tamanho mínimo das partículas a serem analisadas. A norma ASTM-E2567 (2016) define que partículas abaixo de 10 μm devem ser desconsideradas da análise, enquanto a ISO-945 (2008) as considera. A decisão desta alteração veio através da realização de testes iniciais que revelaram que as micrografias oriundas das amostras possuíam uma quantidade substancial de partículas abaixo de 10 μm , o que comprometeria a tentativa de comparação dos métodos.

A segunda característica alterada no *Graphite Analyzer* foi a retirada da funcionalidade de redimensionamento automático da área a ser considerada para análise. Como a norma ASTM-E2567 (2016) despreza da análise os nódulos de grafita que estiverem cortados pelas bordas das imagens, é sugerido que estes limites sejam redimensionados para abrigar de forma mais otimizada estes nódulos, aumentando assim a precisão do processo. Contudo esta redução da área também compromete a comparação dos resultados das análises dos diferentes métodos.

Após as modificações, ficaram disponibilizadas duas versões do *plugin Graphite Analy-*

zer. Uma primeira, desenvolvida para atender integralmente aos requisitos da norma [ASTM-E2567 \(2016\)](#) e, uma segunda criada unicamente para este estudo de caso, visando uma aproximação do processo manual utilizado pela norma [ISO-945 \(2008\)](#). Cabe ressaltar que as modificações realizadas no *Graphite Analyzer* não pretendem atender na íntegra a norma [ISO-945 \(2008\)](#) já que diferentes aspectos desta norma utilizam da percepção humana para realizar a caracterização do material.

Os objetivos deste estudo de caso motivaram a construção do primeiro fluxo de [PADI](#) baseado no *LAMAV-Wizard*, denominado *Graphite Analysis Wizard*, que visa segmentar nódulos de grafita existentes em ferros fundidos dúcteis e disponibilizar os seus dados para serem caracterizados.

Além das duas versões do *plugin Graphite Analyzer* utilizadas para analisar as partículas de grafita, o fluxo de [PADI](#) proposto neste estudo de caso envolve um conjunto de estratégias dividido em oito etapas que podem ser observadas no fluxograma da Figura 5.1.

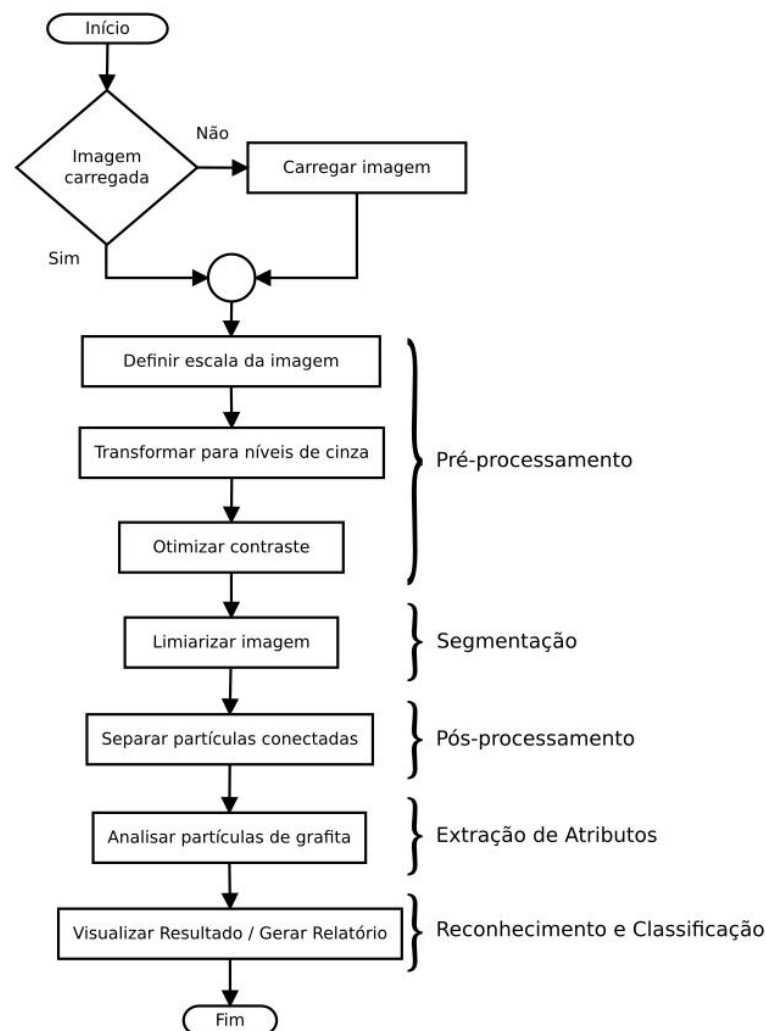


Figura 5.1 – Fluxograma das etapas de [PADI](#) utilizadas na construção do *plugin Graphite Analysis Wizard*. Fonte: Elaborado pelo autor.

O fluxo é iniciado com a verificação da existência de uma imagem carregada para aná-

lise. Caso não exista, é disponibilizada uma interface para que o usuário escolha a imagem de sua preferência. Em seguida vem a fase de pré-processamento composta pelas etapas de definição da escala da imagem, transformação para níveis de cinza e melhoria do seu contraste. Após o pré-processamento é realizada a segmentação utilizando o processo de limiarização. Uma vez segmentada, a imagem poderá ter partículas de grafita conectadas que precisarão ser separadas, o que ocorre na fase de pós-processamento. Em seguida a análise propriamente dita é realizada pelo *plugin Graphite Analyzer* para que os atributos de interesse sejam obtidos e classificados. Por fim são gerados relatórios com os resultados das análises.

A estratégia de construção do *plugin Graphite Analysis Wizard* será detalhadamente descrita na [subseção 5.2.1](#). Vale ressaltar que, como a estratégia de análise baseada na norma [ISO-945 \(2008\)](#) foi criada unicamente para a realização de testes, esta não fará parte da descrição contida na referida seção.

5.2.1 Graphite Analysis Wizard

O *Graphite Analysis Wizard* é composto de um painel de apresentação e sete etapas de processamento e análise de imagem. O painel de apresentação orienta o usuário quanto ao uso do *Wizard* e disponibiliza a possibilidade de gravação de macro.

Na etapa 1 deve ser definida uma escala para a imagem. A [Figura 5.2](#) apresenta a janela do *Wizard* com o painel de definição da escala e a janela em destaque.

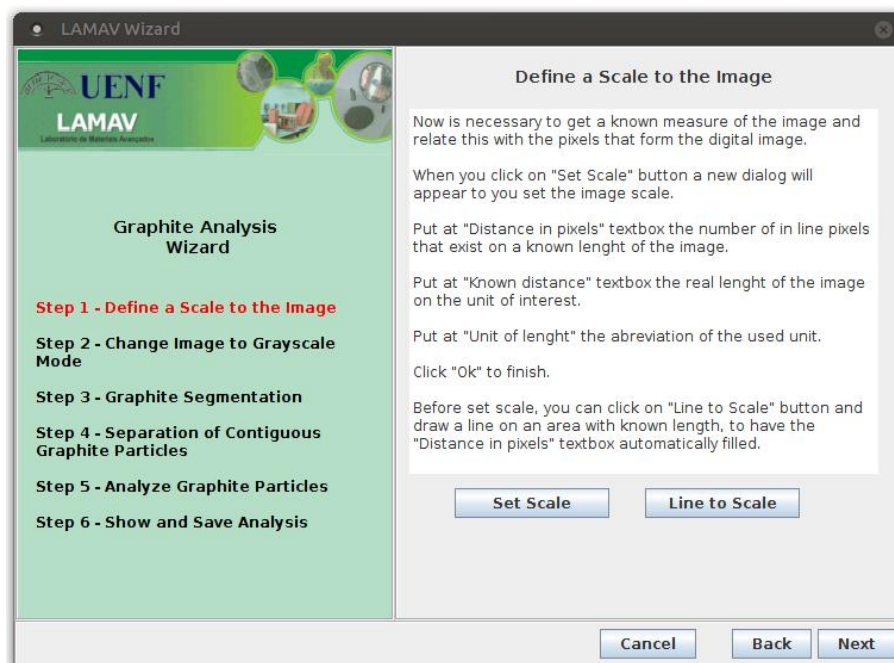


Figura 5.2 – Painel do *Wizard* para definição da escala da imagem. Fonte: Elaborado pelo autor.

O painel é composto pelos botões *Set Scale*, para a definição da escala, e pelo botão *Line to Scale*, que viabiliza uma possível captura semiautomática de uma medida da imagem.

Ao clicar no botão *Set Scale* a janela do *ImageJ* de definição de escala é carregada para que os parâmetros sejam inseridos (Figura 5.3).

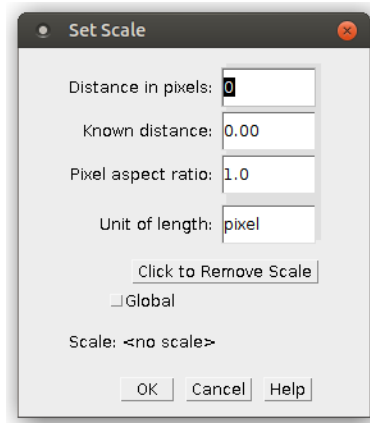


Figura 5.3 – Janela de definição de escala da imagem nativa do *ImageJ*. Fonte: Elaborado pelo autor.

Comumente, quando da aquisição da imagem do ferro fundido no microscópio óptico, um micrômetro é utilizado para compor a imagem capturada visando orientar o processo de medição dos elementos de interesse. Caso a imagem possua uma escala anexada, o usuário poderá obter a sua medida em *pixels* fazendo sobre esta uma marcação de linha. Este processo deverá ser realizado antes de acessar a janela *Set Scale*. Para tanto, deve-se acessar o botão *Line to Scale* e desenhar a linha sobre a escala da imagem.

Na etapa 2 é realizada a conversão da imagem para escala de cinza. Esta é uma etapa obrigatória no *Wizard*, pois a maioria das técnicas de processamento de imagens para análise utilizam este padrão. Vale ressaltar que, uma imagem pode ter na sua aparência somente tons de cinza mas ainda assim estar em um formato de cor como o RGB. Mesmo para este tipo de imagem deverá ocorrer a conversão para escala de cinza, pois apesar de tonalidades semelhantes, estas imagens possuem características diferentes quanto ao número de canais e quantidades de bits que as formam. Para converter a imagem para escala de cinza basta clicar no botão *Grayscale* (Figura 5.4).

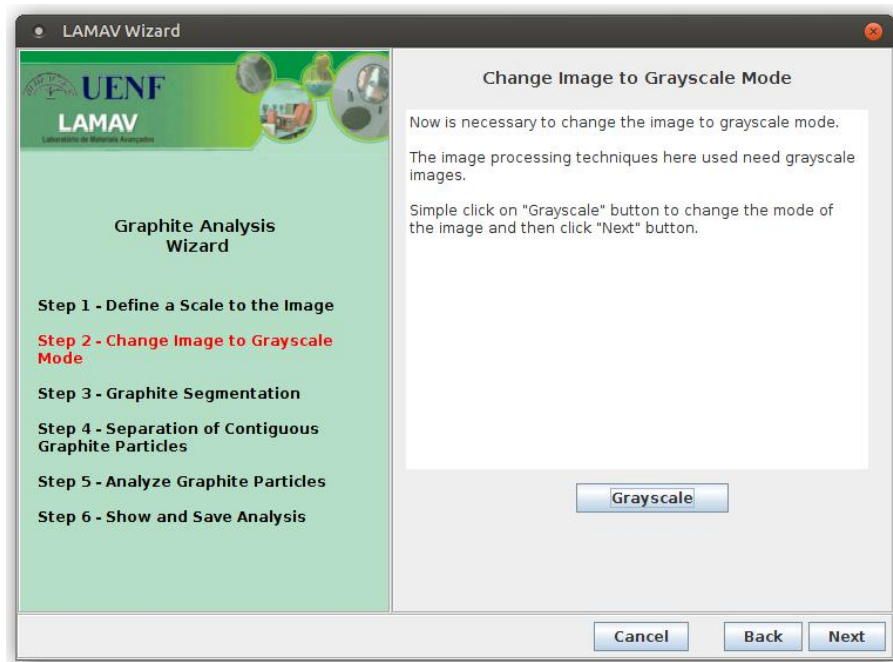


Figura 5.4 – Janela do *Wizard* para alteração da imagem para o modo escala de cinza. Fonte: Elaborado pelo autor.

Cabe ressaltar que, apesar de algumas etapas dos *Wizards* serem obrigatórias e não demandarem parâmetros, como é o caso da conversão para escala de cinza, definiu-se não executá-las automaticamente. Esta estratégia foi escolhida para que o usuário tenha ciência do funcionamento de todo o processo.

Na etapa 3 os nódulos de grafita deverão ser destacados dos demais componentes existentes no ferro fundido. Esta ação é realizada no *Wizard* utilizando-se a técnica de segmentação denominada limiarização. Nesta etapa o objetivo é transformar a imagem de tons de cinza para uma imagem binária, onde os grãos de grafita devem ser transformados para a cor branca e os demais componentes do material para a cor preta. Para iniciar o processo de segmentação o botão *Binarization* deverá ser acionado (Figura 5.5).

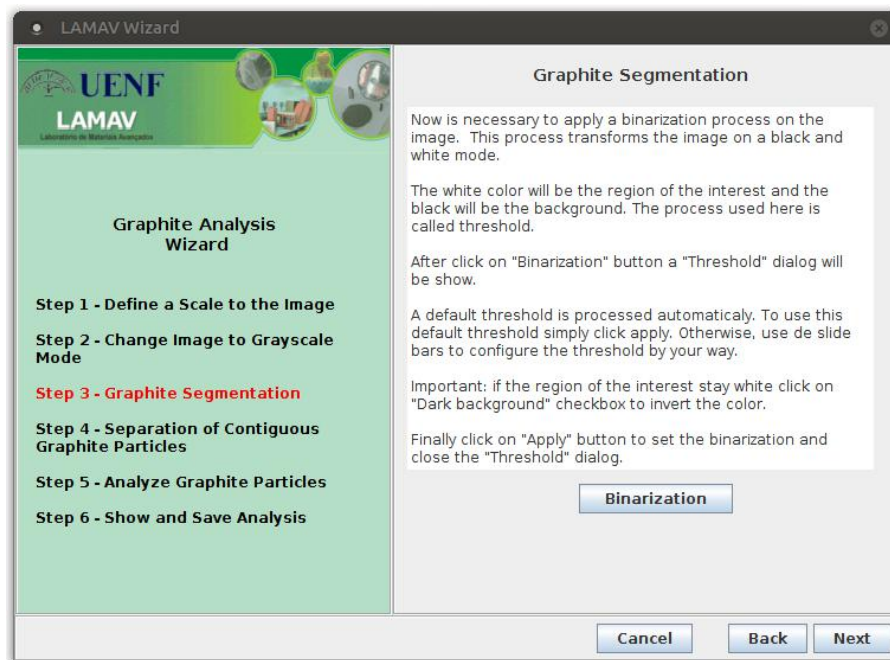


Figura 5.5 – Janela do *Wizard* que direciona para o processo de segmentação da grafita. Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma vez acionado o botão de binarização é carregada a janela da funcionalidade *Threshold* do *ImageJ* (Figura 5.6). Essa janela possui duas barras de rolagem que devem ser ajustadas de forma que, a marca em vermelho existente na representação do histograma, envolva somente os tons que formam os nódulos de grafita na imagem. Após o ajuste, o botão *Apply* deverá ser acionado para efetivar a binarização da imagem.

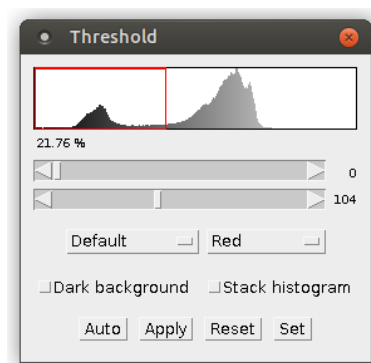


Figura 5.6 – Interface da funcionalidade threshold do *ImageJ*. Fonte: Elaborado pelo autor.

Por vezes os nódulos de grafita se encontram colados uns aos outros, o que acaba gerando interferência no processo de análise automática do ferro fundido. Para resolver este problema, na etapa 4 foram disponibilizados recursos de separação automática e manual dos nódulos de grafita. A estratégia de separação automática aqui utilizada faz uso da técnica de processamento de imagens denominada *Watershed*, detalhada na seção [subseção 2.2.4.1](#). Já a estratégia manual faz uso da ferramenta *Brush* do *ImageJ*, para que seja possível desenhar sobre

a imagem linhas divisórias entre os grãos. Como a separação manual de grãos é uma tarefa específica para cada imagem, esta não será armazenada como macroinstrução para ser executada futuramente sobre lotes de imagens.

Na Figura 5.7 é apresentada a janela do *Wizard* referente à separação dos nódulos de grafita. Enquanto o acionamento do botão *Automatic Separation* executa a separação automática dos nódulos através da técnica watershed, o botão *Manual Separation* abre a janela *Brush Options* do *ImageJ* para viabilizar operações de desenho a mão livre sobre a imagem.

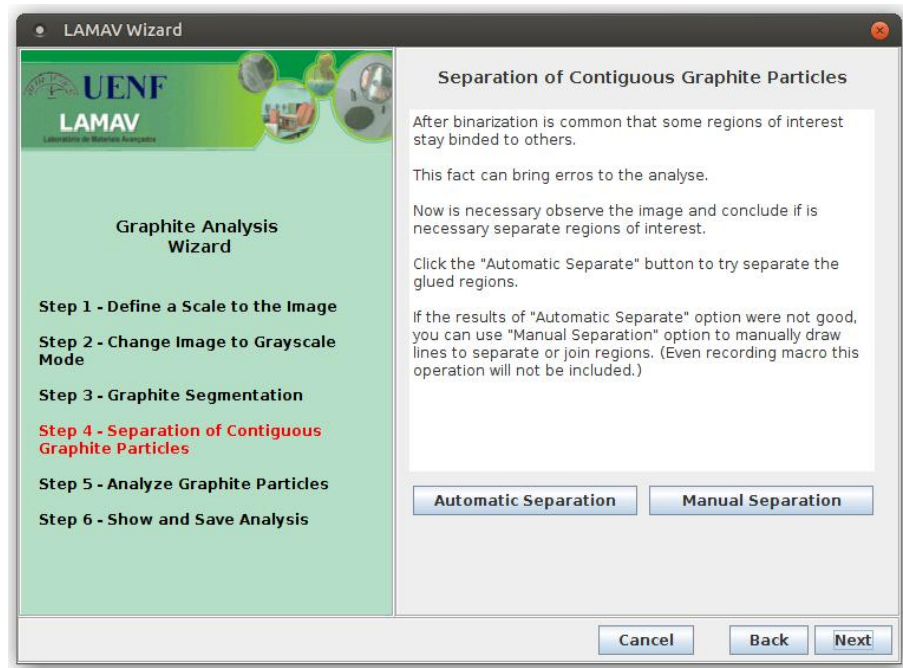


Figura 5.7 – Janela do *Wizard* que realiza a separação automática e/ou manual dos nódulos de grafita. Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5.8 apresenta uma imagem de ferro fundido nodular como obtida do microscópio (a) e após os processos de binarização e separação automática dos nódulos de grafita (b).

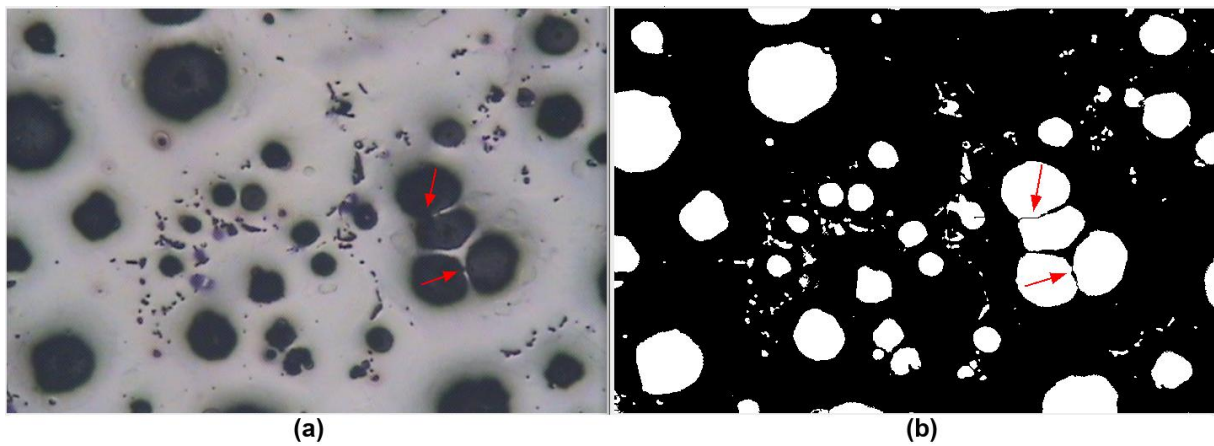


Figura 5.8 – Exemplificação do resultado dos processos de segmentação e separação automática dos nódulos de grafita. (a) Imagem como obtida do microscópio. (b) Imagem segmentada com nódulos de grafita desmembrados. Fonte: Adaptado de Vidal e Matlakhova (2017).

As setas existentes em dois dos nódulos das imagens apontam para locais que foram automaticamente separados utilizando a técnica *watershed*.

Na etapa 5 é realizada a análise da imagem. Esta análise compreende a obtenção dos atributos das áreas da imagem referentes aos nódulos de grafita. Na Figura 5.9 é apresentada a janela do *Wizard* referente a esta etapa. Acionando-se o botão *Analyze by ASTM-E2567* é acionado o *plugin Graphite Analyzer*, que está descrito de forma detalhada na seção 4.3.

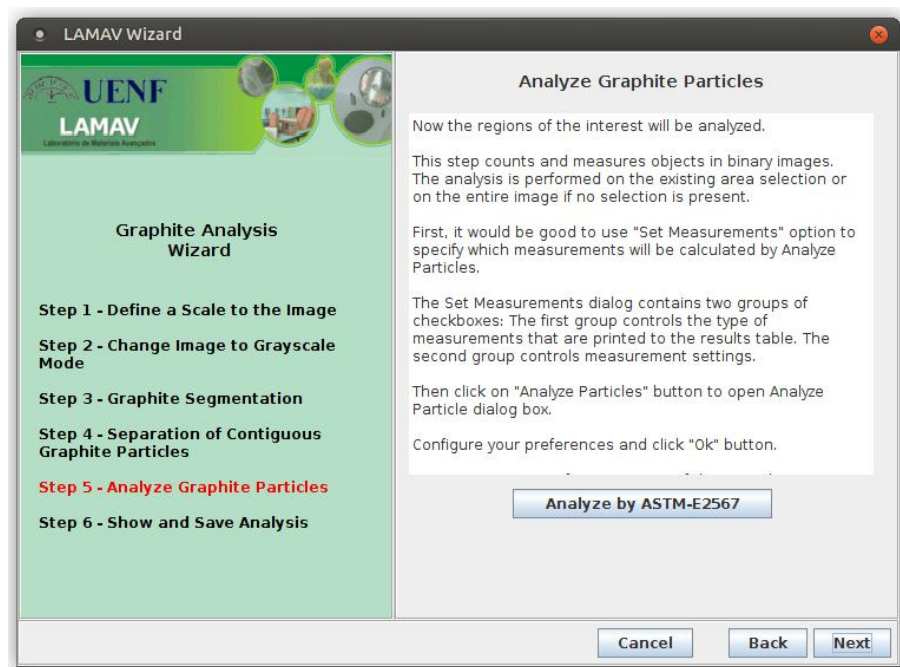


Figura 5.9 – Janela do *Wizard* que realiza o processo de análise dos nódulos de grafita. Fonte: Elaborado pelo autor.

A última etapa deste *Wizard* foi desenvolvida com o objetivo de disponibilizar um fer-

ramental para conferência qualitativa dos nódulos de grafita detectados, além da possibilidade de geração de um relatório completo com os atributos necessários para análise. A Figura 5.10 apresenta a janela do *Wizard* referente a esta etapa.

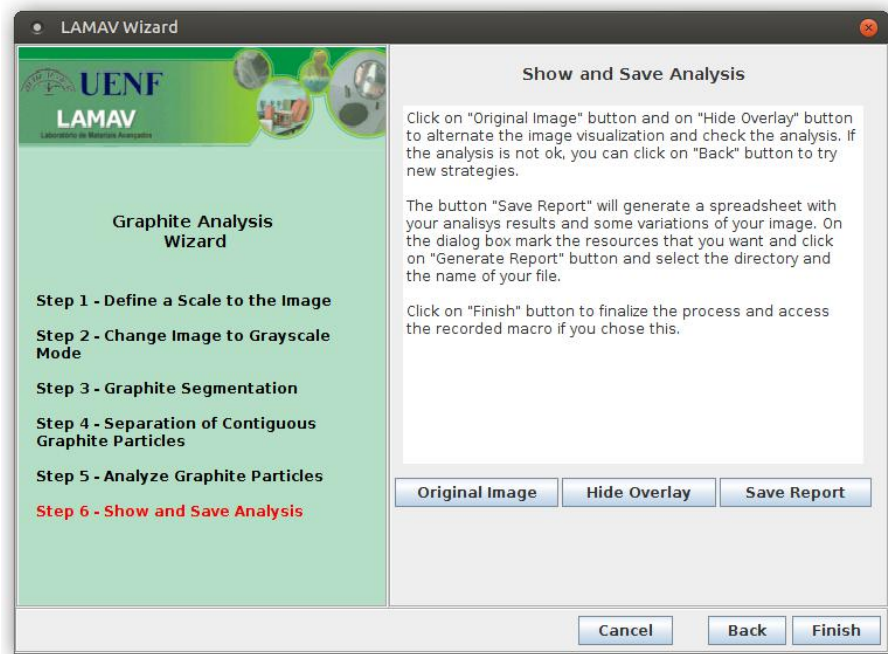


Figura 5.10 – Janela do *Wizard* que viabiliza a conferência do resultado da análise e a geração de um relatório final do processo. Fonte: Elaborado pelo autor.

Quando uma análise é realizada, os nódulos de grafita são detectados e identificados com uma camada de seleção ao redor dos mesmos. Contudo esta marcação é realizada nos nódulos da imagem binarizada. No entanto, para facilitar a visualização do usuário, o ideal é que estas identificações sejam sobrepostas à imagem original, permitindo uma melhor conferência do resultado do processo. Para disponibilizar a imagem original em conjunto com as marcações da análise, basta acessar o botão *Original Image*. Uma vez acessado, este botão terá a sua funcionalidade invertida para que em um próximo acesso a imagem retorne ao padrão binarizado.

A Figura 5.11 apresenta uma imagem original de ferro fundido nodular com a marcação dos nódulos de grafita analisados.

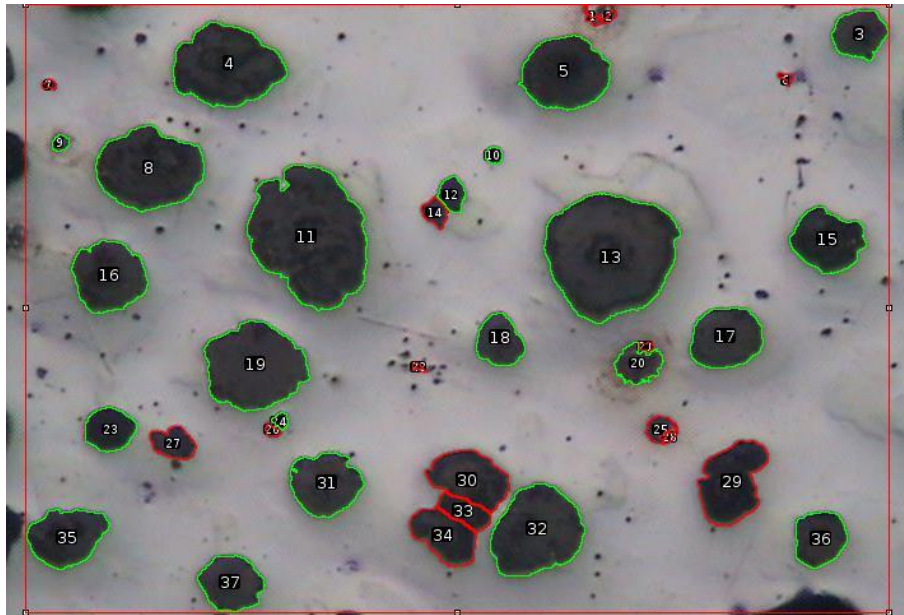


Figura 5.11 – Imagem original de uma amostra de ferro fundido nodular com a camada de marcação identificando os nódulos de grafita analisados. Fonte: Adaptado de [Vidal e Matlakhova \(2017\)](#).

Ainda com o objetivo de conferência e melhor visualização dos resultados alcançados, é disponibilizado o botão *Hide Overlay*. Acessando este botão, a camada de marcação dos nódulos analisados é suprimida para uma melhor visualização da imagem binarizada ou da imagem original. Este botão também tem a sua funcionalidade invertida após cada acesso, permitindo que a camada volte a seu estado anterior de visibilidade.

Uma vez realizada a conferência qualitativa dos resultados, o usuário poderá gerar um relatório em formato de planilha com os dados identificados para análise. Para tanto deverá ser acionado o botão *Save Report* que carregará o *plugin* de relatório desenvolvido neste projeto e descrito em detalhes na seção 4.2.

5.3 Resultados e discussões

Testes iniciais foram realizados com as cinco micrografias de cada uma das oito amostras de ferro fundido disponibilizadas por [Vidal e Matlakhova \(2017\)](#), porém de forma preliminar o processo de análise apresentou inconsistência para duas das amostras.

Esta inconsistência ocorreu em função do objetivo de [Vidal e Matlakhova \(2017\)](#) na obtenção das micrografias, que era a realização de análises manuais para a caracterização da grafita. Se existisse a intenção de realizar análises automatizadas, a preparação das amostras e a obtenção das imagens deveriam ser realizadas de forma idêntica, evitando qualquer variação no processo. O exposto fez com que as micrografias das amostras T5 e T8 estivessem discrepantes das demais no que diz respeito a atributos de luminosidade. A Figura 5.12 (a) apresenta um exemplar de micrografia da amostra T3, mais apta para análise automatizada, enquanto a Figura

5.12 (b) apresenta um exemplar da amostra T8, inapta para este tipo de análise.

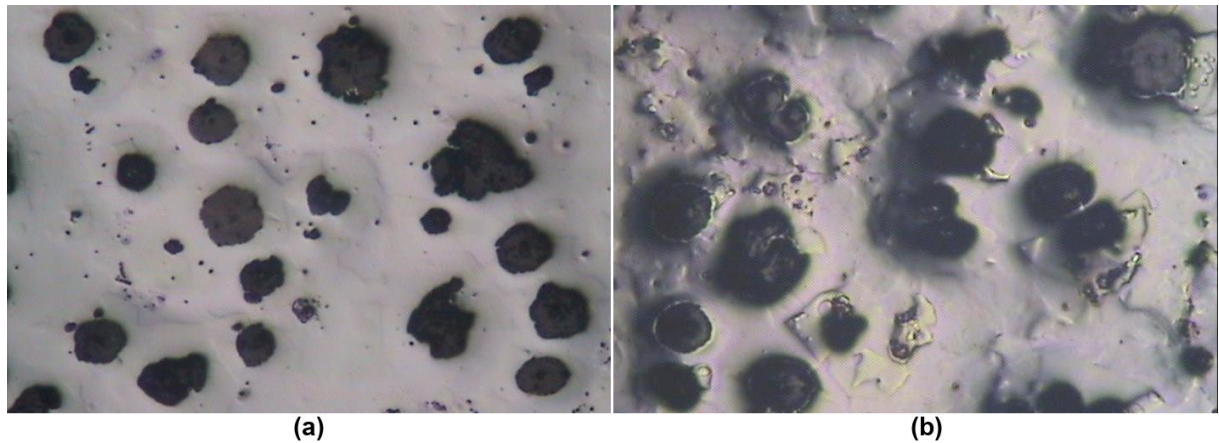


Figura 5.12 – Micrografias das amostra T3 (a) e T8 (b). Fonte: Adaptado de [Vidal e Matlakhova \(2017\)](#).

Na micrografia da amostra T3 pode ser percebido um fundo mais homogêneo com menos incidências de sombras e partículas de grafita com tonalidades mais uniformes. Já a amostra T8, apresenta um fundo com incidência de sombras e partículas de grafita com variações de tonalidades.

Os problemas encontrados nas micrografias da amostra T8 possuem características bastante similares aos da amostra T5. Os atributos do fundo das imagens se fundem com os atributos das partículas, inviabilizando uma precisa identificação e segmentação destas por parte do algoritmo de limiarização. Diferentes limiares foram utilizados na tentativa de segmentar a grafita, porém todos os resultados foram insatisfatórios com a estratégia adotada. A Figura 5.13 apresenta uma micrografia da amostra T8, segmentada pelo *Graphite Analysis Wizard* e com os destaques de classificação de partículas na cor vermelha e de classificação de nódulos na cor verde.

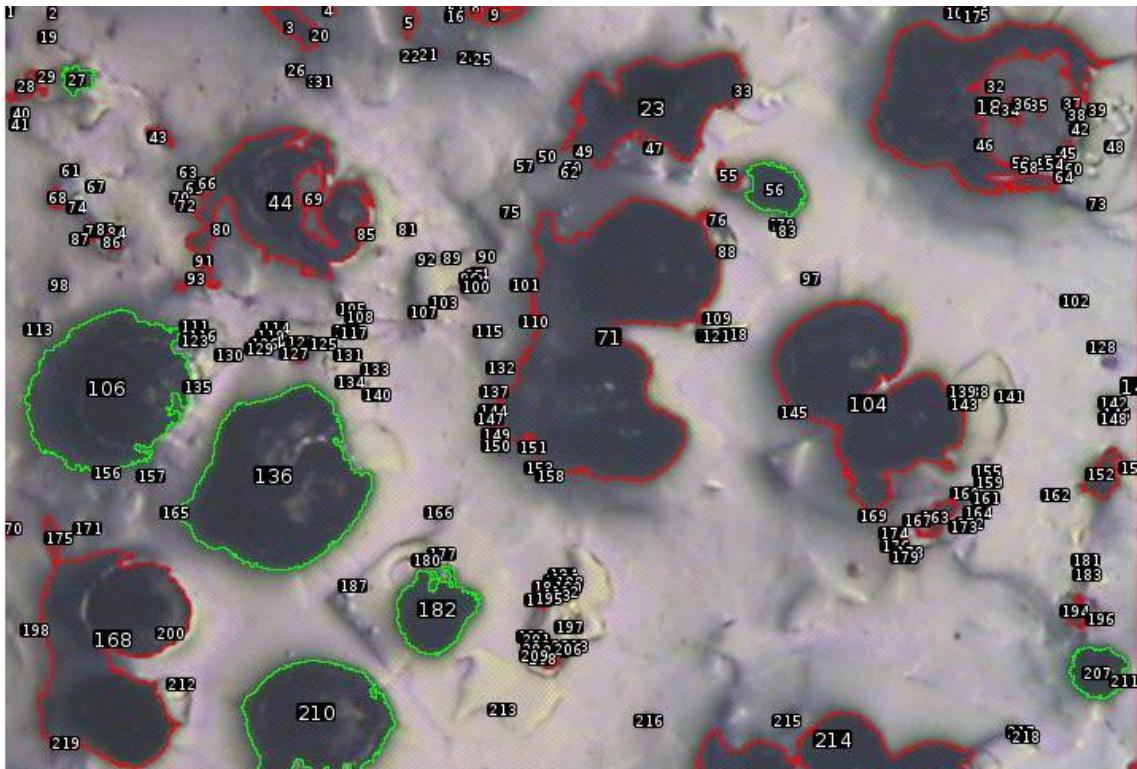


Figura 5.13 – Micrografia segmentada da amostra T8. Fonte: Adaptado de Vidal e Matlakhova (2017).

Um exemplo da ineficiência do processo de segmentação pode ser observado na partícula 71, presente próxima ao centro da micrografia (Figura 5.13). O que deveria ser identificado como duas partículas distintas, foi identificado como uma única, composta inclusive de uma relevante região de sombra pertencente ao fundo da imagem.

Mesmo após identificar de forma qualitativa a ineficiência do processo para as amostras T5 e T8, os resultados obtidos com as análises foram comparados com os das demais amostras para uma avaliação quantitativa.

Como já mencionado, cinco micrografias foram processadas para cada amostra. Destas foram obtidas as médias e os desvios-padrão para cada um dos atributos analisados. Um dos atributos mais representativos, a quantidade de nódulos por mm^2 , foi comparado e apresentado no gráfico da Figura 5.14. Além da quantidade de nódulos por mm^2 , também foram disponibilizados no gráfico uma linha vermelha horizontal identificando a média dos resultados das amostras e barras de erro representando os valores do desvio-padrão.

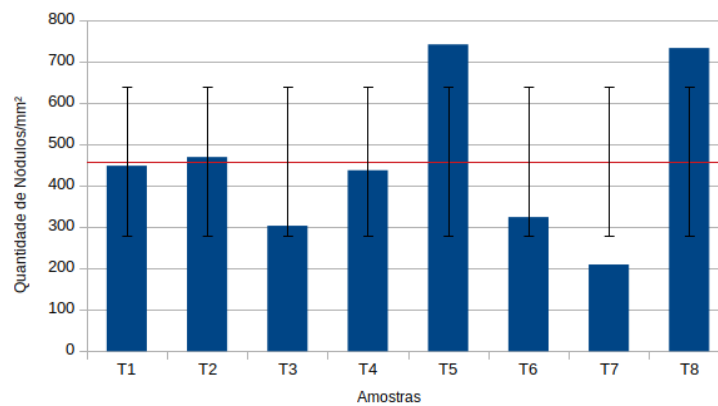


Figura 5.14 – Gráfico apresentando valores atípicos para a quantidade de nódulos por mm^2 das amostras T5 e T8. Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando o gráfico da Figura 5.14 pode ser percebido que a quantidade de nódulos por mm^2 passa de setecentos para ambas as amostras T5 e T8, extrapolando a barra de erro representativa do desvio-padrão.

Ocorre que, no trabalho de Vidal e Matlakhova (2017) existe uma tendência decrescente na quantidade de nódulos de T1 a T8. Esta tendência acontece em função do aumento do tempo e consequente redução da temperatura de vazamento das amostras (VIDAL; MATLAKHOVA, 2017).

Assim, as amostras T5 e T8 deveriam possuir valores de densidades de nódulos menores do que as amostras obtidas nos dois primeiros tempos de vazamento, e não excessivamente maiores. Desta forma, dadas as avaliações qualitativas e quantitativas, as micrografias de T5 e T8 foram retiradas das análises pois foi concluído que a permanência destas amostras implicariam em prejuízos à interpretação dos testes estatísticos a serem aplicados nas comparações.

Uma vez excluídas as amostras T5 e T8, foram realizados testes finos para identificação dos melhores limiares a serem utilizados no processo de segmentação das micrografias, visando uma aproximação com os resultados obtidos por Vidal e Matlakhova (2017).

A metodologia utilizada por Vidal e Matlakhova (2017), se baseia na avaliação da micrografia por parte da percepção do pesquisador, já o processo automatizado é baseado em lógica e aritmética. Neste sentido, pôde-se perceber que mesmo tentando uma aproximação, limitações fizeram parte do processo de comparação dos métodos.

Como mencionado anteriormente, foi utilizado no trabalho de Vidal e Matlakhova (2017) o *software Microsoft PowerPoint™* para auxiliar na caracterização da grafita. A Figura 5.15 apresenta uma micrografia da amostra T3 analisada por Vidal e Matlakhova (2017).

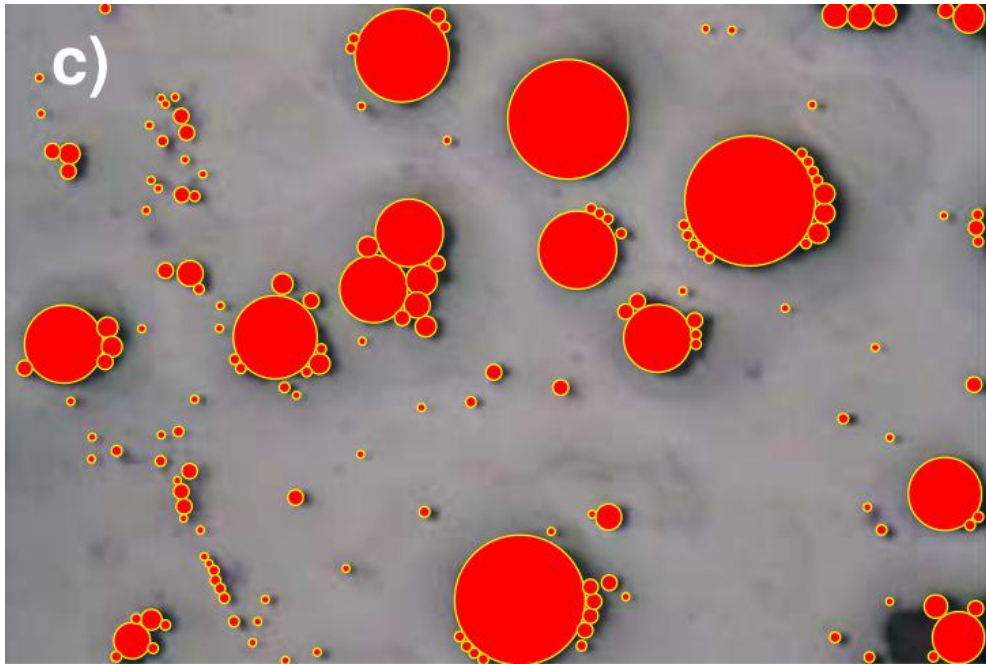


Figura 5.15 – Micrografia da amostra T3 com a marcação da grafita realizada com o método manual. Fonte: [Vidal e Matlakhova \(2017\)](#).

Pode ser percebido que a marcação utilizando círculos realizada por [Vidal e Matlakhova \(2017\)](#) é uma ação trabalhosa, que demanda tempo e atenção do pesquisador. A quantidade de pequenos nódulos e o gradiente de cores da imagem dificultam a precisão do processo. Enquanto algumas partículas de grafita são cobertas de forma integral pelas circunferências, outras o são de forma aproximada. Da mesma forma, enquanto algumas partículas pequenas são marcadas com círculos, outras são desprezadas.

O processo automatizado também está sujeito a variações na identificação da grafita, principalmente no que diz respeito a partículas de tamanho pequeno. A Figura 5.16 apresenta a micrografia da amostra T3 analisada pelo *Graphite Analysis Wizard*.

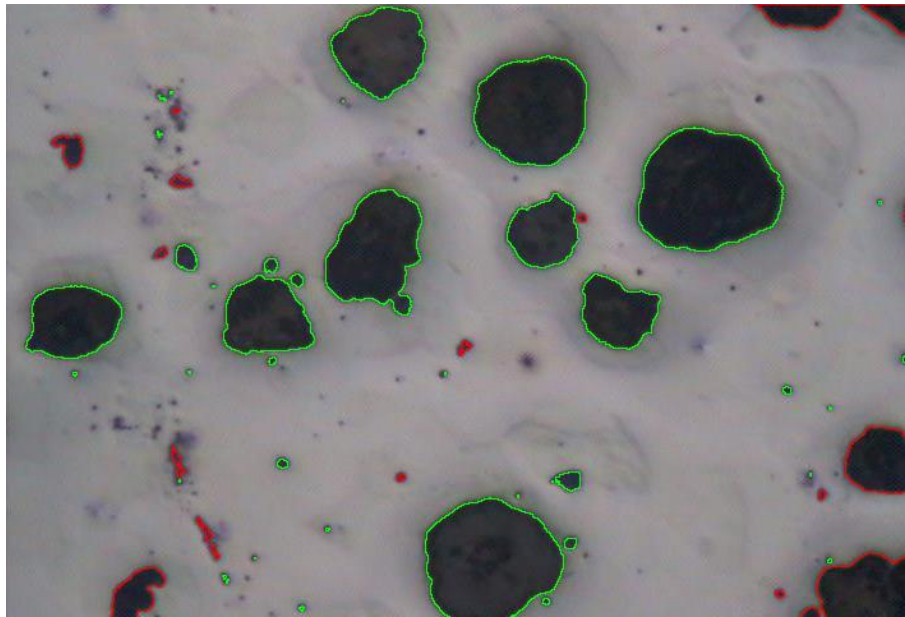


Figura 5.16 – Micrografia da amostra T3 com a marcação da grafita realizada com o método automatizado. Fonte: Adaptado de Vidal e Matlakhova (2017).

Pode ser percebido na Figura 5.16 que enquanto algumas partículas menores de grafita são identificadas outras são desprezadas. Esta variação ocorre em função dos parâmetros utilizados na etapa de segmentação do *Graphite Analysis Wizard*.

A etapa de segmentação é realizada utilizando a técnica de limiarização. Nesta os valores para os limiares são definidos pelo usuário de forma interativa ou automática. Estes valores definem os pontos de corte, em termos das tonalidades existentes na imagem, que integrarão as partículas de grafita ou os demais constituintes da amostra. Como as tonalidades da grafita e do fundo da imagem não são homogêneas, um processo ótimo de limiarização foi descartado, fazendo com que os pontos de corte precisassem ser definidos de forma equilibrada para não superestimar nenhuma das fases do material.

Na Figura 5.16 pode ser percebido que as tonalidades dos *pixels* das partículas menores se aproximam das tonalidades dos *pixels* que circundam as partículas maiores. Desta forma, a não identificação de parte da grafita de tamanho reduzido foi consequência de um processo de limiarização para evitar superdimensionar as partículas maiores. As intensidades de tons de cinza utilizadas como limiares para a segmentação da grafita nas micrografias são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Limiares utilizados para a realização da segmentação da grafita existente nas amostras de ferro fundido.

Amostras	Limiar (Tonalidade de Cinza)
T2 e T3	100
T7	110
T1 e T6	115
T4	120

A definição dos limiares foi realizada de forma empírica. Inicialmente foram utilizados métodos automatizados disponibilizados na etapa de segmentação. No entanto, avaliações qualitativas descartaram os métodos automatizados em busca de melhores resultados. Foram testados diferentes valores de limiares para cada amostra analisada. Uma vez estabelecido o valor do limiar para uma amostra específica, este foi mantido para cada uma das cinco imagens representativas da referida amostra.

Outro aspecto relevante a ser considerado na identificação da grafita é a contiguidade entre partículas. Os gradientes de tonalidades presentes na imagem podem fazer com que um conjunto de diferentes partículas seja avaliado como uma única, ou vice versa. Apesar desse aspecto não ter sido explicitado por [Vidal e Matlakhova \(2017\)](#), naturalmente fez parte do processo decisório na avaliação manual, uma vez que interfere diretamente no resultado quantitativo da análise.

O *Graphite Analysis Wizard* disponibiliza, após a etapa de limiarização, a etapa de separação de possíveis partículas de grafita conectadas. Aproveitando da simplicidade de execução do *Wizard*, foram realizados testes com e sem a utilização do recurso automático de separação de partículas. Os resultados das análises foram avaliados de forma qualitativa para cada amostra. Cada imagem disponibilizada pelo *Graphite Analysis Wizard* foi brevemente avaliada no sentido de classificar as separações como adequadas ou inadequadas. Cabe ressaltar que não foi especificado um critério formal para essa classificação, mas sim utilizada uma percepção visual subjetiva em relação ao processo, visando uma aproximação com a metodologia manual adotada por [Vidal e Matlakhova \(2017\)](#). A Figura 5.17 apresenta uma aglomeração de grafita da amostra T4, em um momento considerada como um único nódulo (b), em outro considerada como nódulos distintos (c) pelo *Graphite Analysis Wizard*.

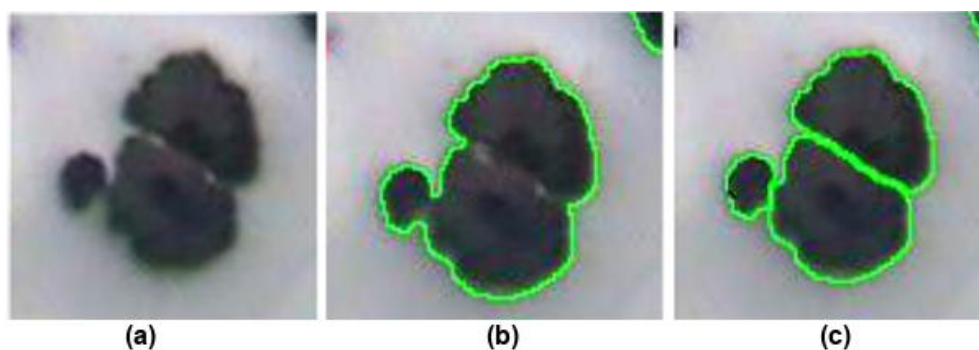


Figura 5.17 – Exemplo de resultado da aplicação da funcionalidade de separação de partículas em parte da amostra T4. Imagem original (a), partículas detectadas como um único nódulo (b) e partículas detectadas como nódulos distintos (c). Fonte: Adaptado de [Vidal e Matlakhova \(2017\)](#).

Dentre as amostras testadas, apenas para a T3 não foi adotada a separação automática de partículas. Nesta, as partículas de grafita estavam mais distribuídas fazendo com que, após a aplicação da funcionalidade de separação, o número de cisões de partículas realizadas de forma inadequada se encontrassem acima do número de cisões realizadas de forma adequada.

Na realização dos testes foi percebida a existência de uma relação entre os valores dos limiares utilizados na segmentação da imagem e a necessidade de utilização da separação de partículas. Limiares que tendem a subestimar o tamanho das partículas possuem uma menor tendência de conectá-las, e vice-versa. Caberá ao usuário, utilizando dos relatórios gerados pelo *Graphite Analysis Wizard*, definir as estratégias e os resultados a serem adotados.

Foi relatado por [Vidal e Matlakhova \(2017\)](#) que a análise manual demandou horas de trabalho para cada micrografia, tendo este tempo variado em função das características das imagens e em função do aspecto cognitivo do pesquisador.

Para as análises automatizadas o tempo foi contabilizado em função do uso do *Graphite Analysis Wizard* e em função do processamento das macros geradas por este. Inicialmente foi analisada uma única micrografia da amostra T1 utilizando o *Wizard*, um processo que levou em torno de cinco minutos. Em seguida a macro gerada pelo *Wizard* foi submetida às demais imagens da referida amostra, consumindo um tempo de processamento de aproximadamente trinta segundos em um computador com um processador *Intel Core I3™*.

Vale ressaltar que não se buscou a otimização do tempo computacional da aplicação, pelo contrário, as macros executam a análise em primeiro plano para que o usuário acompanhe todo o processo visualmente, o que demanda mais tempo de processamento. Apesar disto, utilizando o ferramental proposto, o tempo de análise de um lote com cinco imagens de ferro fundido deixou de ser de dias e passou a ser de minutos.

Após a definição das técnicas e dos parâmetros a serem adotados no processamento das imagens pelo *Graphite Analysis Wizard*, duas estratégias de análise foram avaliadas. A primeira utilizando o *plugin Graphite Analyzer* modificado para a norma [ISO-945 \(2008\)](#) e a segunda utilizando *Graphite Analyzer* em sintonia com a norma [ASTM-E2567 \(2016\)](#). As próximas seções detalham os processos comparativos dos métodos e apontam os seus resultados.

5.3.1 Comparativo entre o método manual ISO-945 e o método automatizado ISO-945 (Aproximado)

As primeiras propriedades da grafita a terem os seus valores comparados entre os métodos manual e automatizado foram os tamanhos e quantidades de nódulos presentes nas amostras. No trabalho de [Vidal e Matlakhova \(2017\)](#) foram construídos histogramas, com intervalos variando de N1 (0 a 8,2 μm) a N15 (114,8 a 123 μm). Já as partículas de grafita não nodulares foram agrupadas em uma mesma classe final rotulada de N16 ([VIDAL; MATLAKHOVA, 2017](#)).

Foram comparados os histogramas de três das amostras analisadas: da amostra T1 (Figura 5.18), por ser a de menor tempo de vazamento e maior temperatura, da amostra T7 (Figura 5.20), por ser a de maior tempo de vazamento e menor temperatura, e da amostra T4 (Figura 5.19), por possuir tempo de vazamento e temperatura intermediários.

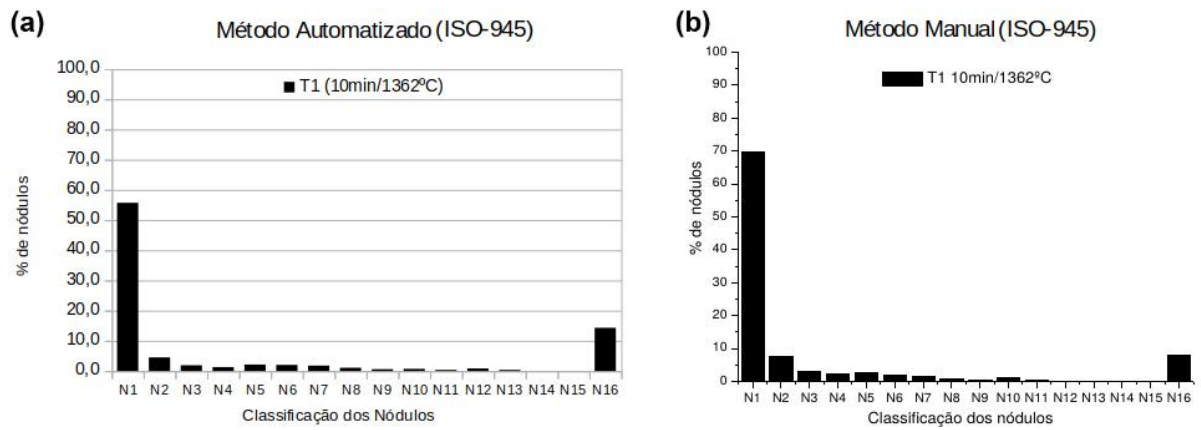


Figura 5.18 – Histograma da grafita da amostra T1 obtido via método automatizado (a) e via método manual (b). Fonte: (a) Elaborado pelo autor, (b) Vidal e Matlakhova (2017).

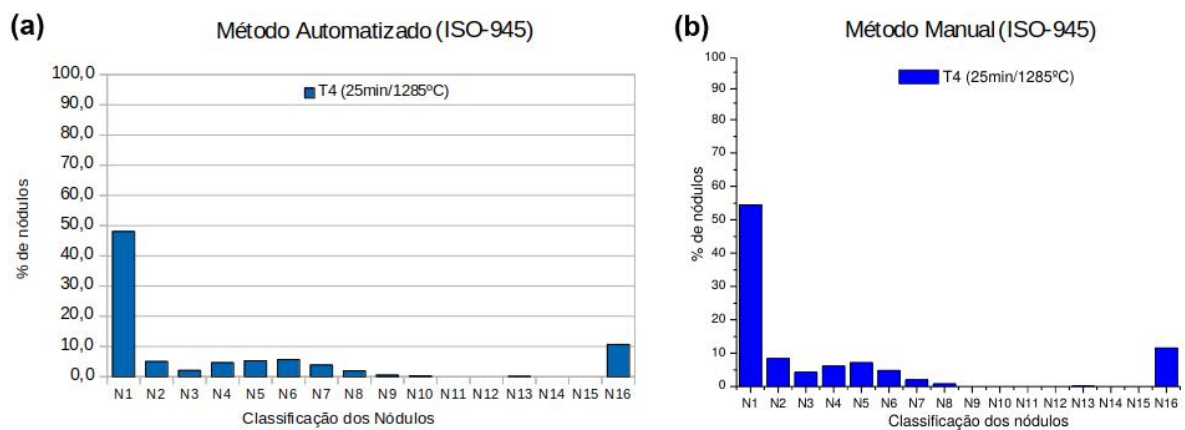


Figura 5.19 – Histograma da grafita da amostra T4 obtido via método automatizado (a) e via método manual (b). Fonte: (a) Elaborado pelo autor, (b) Vidal e Matlakhova (2017).

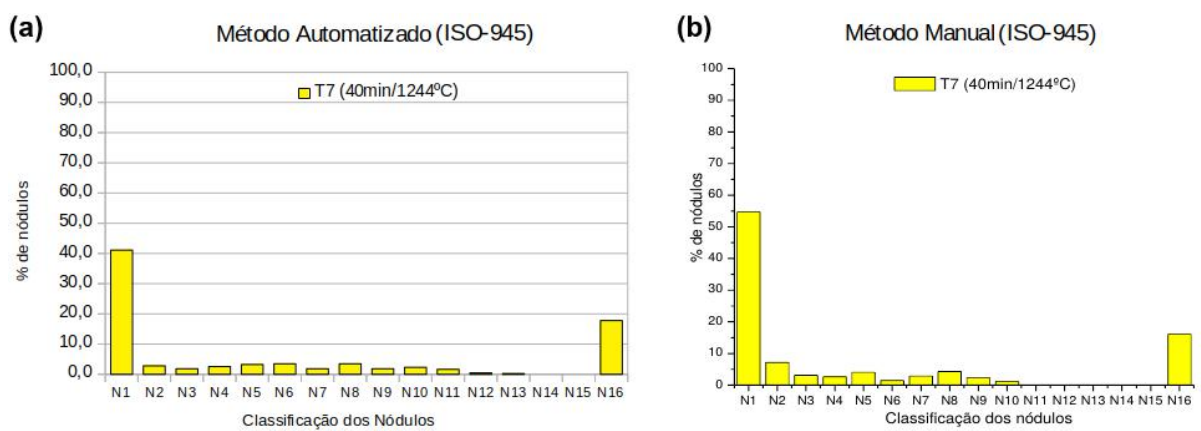


Figura 5.20 – Histograma da grafita da amostra T7 obtido via método automatizado (a) e via método manual (b). Fonte: (a) Elaborado pelo autor, (b) Vidal e Matlakhova (2017).

Observando os gráficos comparativos, a primeira característica que se destaca é a relevante diferença entre a porcentagem de nódulos do tipo N1 existentes entre os métodos manuais e os automatizados. A primeira justificativa para esta ocorrência é que diminutas partículas se perderam durante a etapa de segmentação da imagem. Estas partículas se destacaram de forma insuficiente para serem separadas do fundo durante o processo. Porém, como pôde ser percebido no gráfico, para a análise manual diversas destas partículas foram consideradas nódulos por [Vidal e Matlakhova \(2017\)](#).

Outra característica que, além de justificar a diferença das proporções dos nódulos N1, também justifica a diferença na quantidade de partículas de grafita não nodulares, N16, é a forma como estas são avaliadas pelo método manual em face do automatizado. Para um pesquisador utilizando o método manual e observando uma micrografia composta de *pixels* de diferentes tonalidades, pequenas partículas se aproximam do formato de pontos e, conseqüentemente, acabam percebidas como nódulos. Já para um sistema computacional, a avaliação quanto ao fator de forma da partícula analisada é realizada sobre a imagem binarizada, contendo apenas as tonalidades preta e branca separadas pelo limiar de corte do processo de segmentação. A Figura 5.21 apresenta um exemplo de uma imagem ampliada de parte da amostra T1 em seu formato original (a), binarizado (b) e classificado (c) pelo *Wizard*.

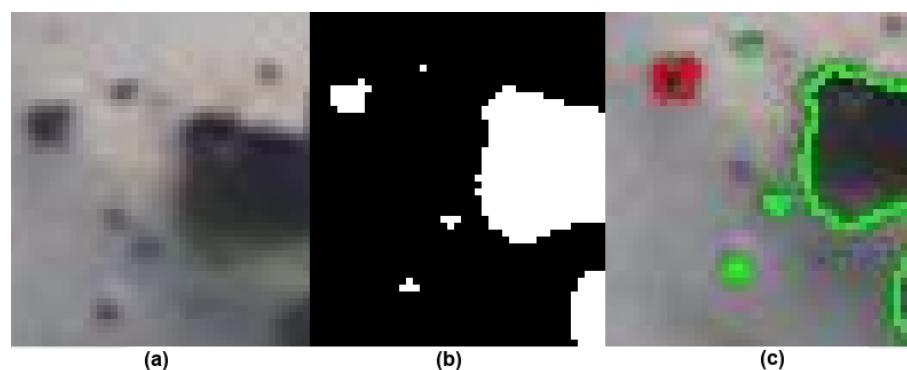


Figura 5.21 – Exemplo de uma imagem ampliada de parte da amostra T1 em seu formato original (a), binarizado (b) e classificado (c). Fonte: Adaptado de [Vidal e Matlakhova \(2017\)](#).

No exemplo da Figura 5.21 (a), a partícula classificada em vermelho como não nodular pelo método automatizado pode ser percebida como nodular por um avaliador humano. Isto se deve ao fato de que o método automatizado necessita da imagem binarizada para a realização do cálculo do fator de forma da partícula e, como pode ser percebido, o formato da referida partícula binarizada é visualmente diferente do existente na imagem original.

Testes iniciais realizados com o método automatizado apresentaram resultados ainda mais discrepantes do que o apresentado. Contudo, visando minimizar esta diferença e baseado nos conceitos apresentados nos parágrafos anteriores, foi definido para o método automatizado que todas as partículas de grafita com DMFs abaixo de $5 \mu m$ seriam consideradas partículas nodulares. O valor de $5 \mu m$ foi definido de forma empírica, avaliando qualitativamente os nódulos

destas dimensões tanto nas imagens originais quanto nas imagens binarizadas.

As variações existentes nos comparativos das demais classes de nódulos podem ser explicadas pela impossibilidade de classificação de partículas de grafita que estejam sendo interceptadas pelas bordas das imagens e que deveriam ser classificadas como nodulares. Enquanto um avaliador humano pode concluir que uma partícula é nodular levando em consideração apenas a parte visível desta, isto não acontece no processo automatizado. Como consequência, a maior parte das partículas de grafita cortadas pela borda foram consideradas como não nodulares pelo processo automatizado.

Apesar das variações, os comparativos entre os gráficos presentes nas Figuras 5.18, 5.19 e 5.20, possuem comportamentos semelhantes. Os gráficos da Figura 5.19 em especial, apresentam além do mesmo comportamento, valores muito próximos para cada classe. A Figura 5.22 apresenta uma micrografia da amostra T4 como obtida no microscópio (a) e após a realização da análise.

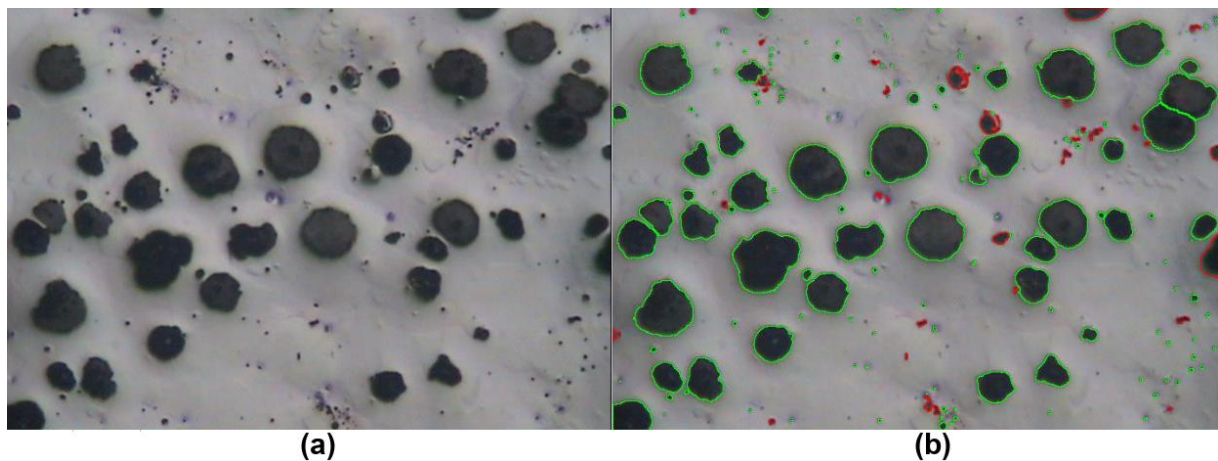


Figura 5.22 – Imagem micrográfica da amostra T4. (a) Antes da efetivação da análise. (b) Depois da efetivação da análise. Fonte: Adaptado de Vidal e Matlakhova (2017).

Na Figura 5.22(a) pode ser percebido que a micrografia da amostra T4 apresenta características que favorecem a análise automatizada. Dentre essas pode-se destacar:

- Bom contraste na imagem, viabilizando inclusive a identificação das diminutas partículas;
- Distribuição das partículas de grafita de forma mais uniforme com baixo índice de aglomerações;
- Pouca incidência de partículas relevantes interceptadas pelas bordas da imagem;

Além das características apresentadas, pode-se destacar ainda a forma mais nodular das partículas de grafita, o que facilita o processo de análise manual.

As características presentes na micrografia da Figura 5.22 favorecem tanto a análise manual quanto a automatizada, potencializando a convergência dos resultados obtidos e justificando a maior semelhança entre os gráficos de histograma da amostra T4.

Além da medição e classificação dos nódulos por tamanho, o trabalho de [Vidal e Matlakhova \(2017\)](#) se preocupou em avaliar as propriedades mecânicas do material em função dos parâmetros estruturais como o grau de nodularidade e quantidade de nódulos por área.

Visando uma comparação estatística com o método manual, os parâmetros relacionados foram calculados utilizando o método automatizado do *Graphite Analysis Wizard*. O gráfico presente na Figura 5.23 exibe o grau de nodularidade de cada uma das amostras, confrontando os resultados do método automatizado com os resultados obtidos por [Vidal e Matlakhova \(2017\)](#) no uso do método manual.

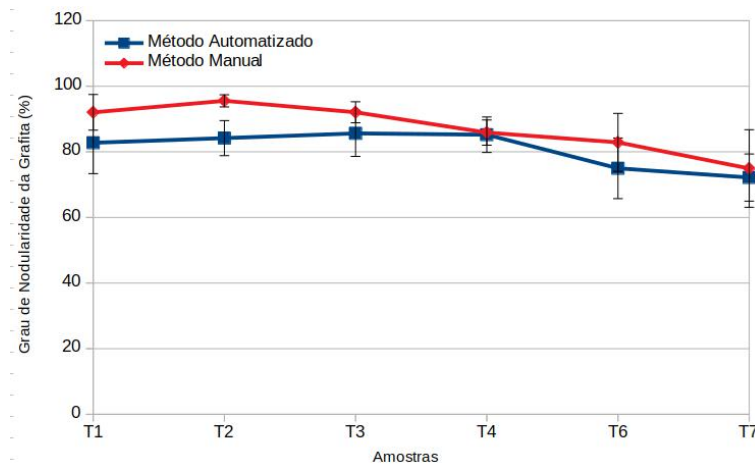


Figura 5.23 – Grau de nodularidade da grafita para cada amostra, calculado através do método manual e do método automatizado. Fonte: Elaborado pelo autor, dados do autor e de [Vidal e Matlakhova \(2017\)](#).

O grau de nodularidade foi calculado, para ambos os métodos, utilizando a relação entre a área das partículas nodulares de grafita e a área total da grafita existente no material, como explicitado na [Equação 2.14](#) da [subseção 2.3.2](#).

Inicialmente foram calculados os graus de nodularidade das cinco micrografias de cada amostra para os dois métodos de análise. Em seguida foram geradas as médias e os desvios-padrão que classificaram as amostras. O gráfico da Figura 5.23 apresenta barras de erros representativas do desvio padrão para cada uma das amostras em ambos os métodos. Pode ser observado que as barras de erro se sobrepõem para cinco das amostras e para duas os valores das médias são praticamente os mesmos, evidenciando a proximidade entre os métodos em face dos resultados do fenômeno analisado.

Apesar da proximidade, a curva que descreve o fenômeno não apresenta o mesmo comportamento para os métodos manual e automatizado. Isto se deve principalmente ao fato de que enquanto no método manual um avaliador classifica as partículas de grafita cortadas pela borda observando o seu formato, no método automatizado são utilizadas fórmulas aritméticas que na maioria das vezes classificam estas partículas como não nodulares. Devido ao exposto, uma certa quantidade de partículas nodulares deixa de ser detectada fazendo com que o grau de nodularidade obtido com o método automatizado tenha valores inferiores aos obtidos com o

método manual.

O gráfico presente na Figura 5.24 também confronta os resultados do método automatizado com o método manual, porém agora para o atributo quantidade de nódulos de grafita por mm^2 .

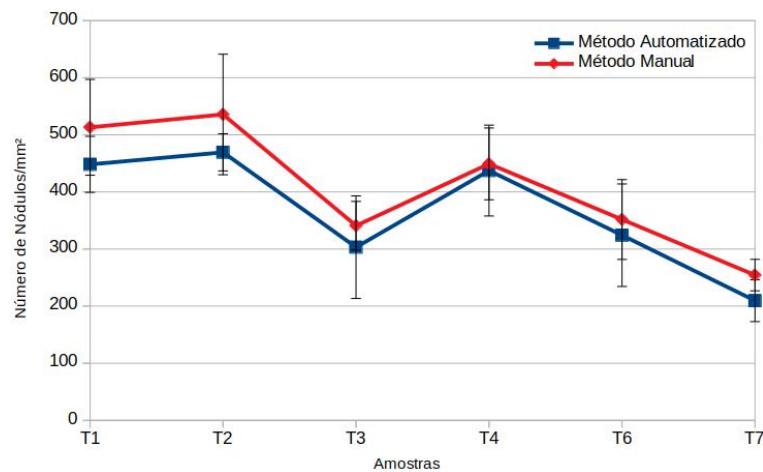


Figura 5.24 – Quantidade de nódulos de grafita por mm^2 , calculada através do método manual e do método automatizado. Fonte: Elaborado pelo autor, dados do autor e de Vidal e Matlakhova (2017).

No gráfico pode ser observado que para todas as amostras os desvios-padrão se sobrepõem para ambos os métodos de análise. Além disso a curva que descreve o fenômeno analisado obedece a mesma tendência de comportamento, mais uma vez evidenciando a proximidade dos resultados mensurados por ambos os métodos.

Vale lembrar que a quantidade de nódulos obtidos com o método automatizado se mantêm inferior aos obtidos com método manual devido às limitações do primeiro na identificação dos nódulos diminutos e na identificação das partículas nodulares interceptadas pela borda da imagem.

5.3.2 Comparativo entre o método manual ISO-945 e o método automatizado ASTM-2567

A presente análise comparativa é similar à realizada na subseção 5.3.1, porém o método agora empregado na automatização da análise da grafita utiliza como referência a norma ASTM-E2567 (2016), específica para este fim.

As estratégias e os atributos definidos para o processamento das imagens foram os mesmos do comparativo anterior. Foram desprezadas das análises as amostras T5 e T7, utilizados os mesmos valores de limiares (Tabela 5.2) para o processo de segmentação e utilizada a mesma estratégia para a separação de partículas de grafita contíguas.

Os passos da análise comparativa também foram os mesmos da subseção 5.3.1.

As primeiras comparações realizadas foram referentes aos histogramas de tamanhos e quantidades de nódulos de grafita presentes nas amostras. No trabalho de [Vidal e Matlakhova \(2017\)](#) foram construídos histogramas, com intervalos variando de N1 (0 a 8,2 μm) a N15 (114,8 a 123 μm). Porém de acordo com a norma [ASTM-E2567 \(2016\)](#) as partículas com DMFs menores do que 10 μm deveriam ser desprezadas. Neste sentido, a classe N1 foi subtraída dos histogramas representativos das amostras T1 (Figura 5.25), T4 (Figura 5.26) e T7 (Figura 5.27), no que se refere à metodologia automatizada. Cabe destacar ainda que os histogramas da metodologia automatizada tiveram o percentual da classe N2 também reduzido, pois faziam parte desta os nódulos com DMFs entre 8,3 μm e 9,9 μm , desprezados no processo.

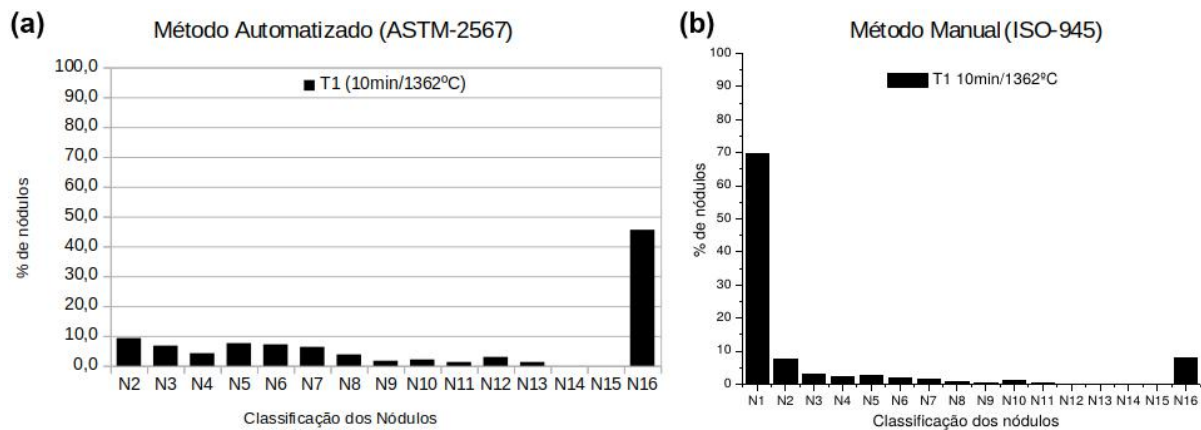


Figura 5.25 – Histograma da grafita da amostra T1 obtido via método automatizado (a) e via método manual (b). Fonte: (a) Elaborado pelo autor, (b) [Vidal e Matlakhova \(2017\)](#).

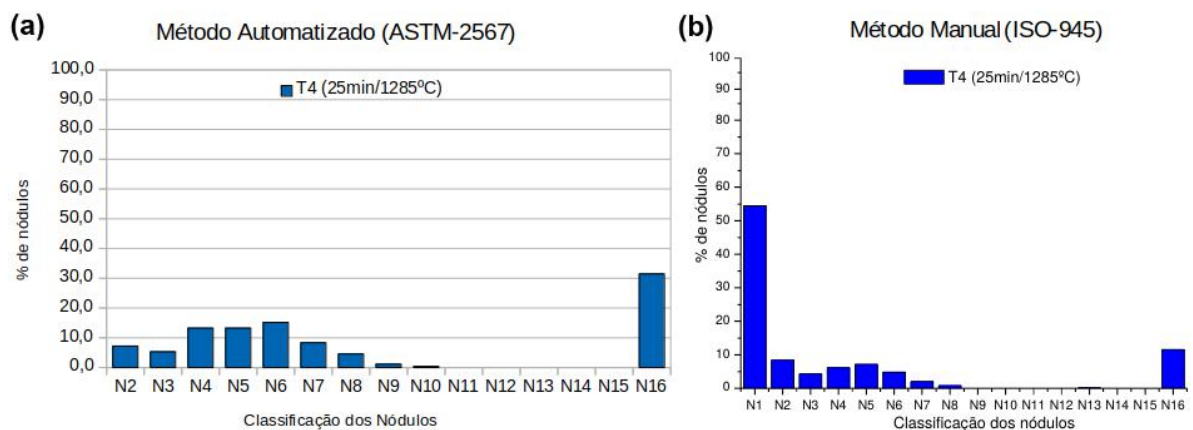


Figura 5.26 – Histograma da grafita da amostra T4 obtido via método automatizado (a) e via método manual (b). Fonte: (a) Elaborado pelo autor, (b) [Vidal e Matlakhova \(2017\)](#).

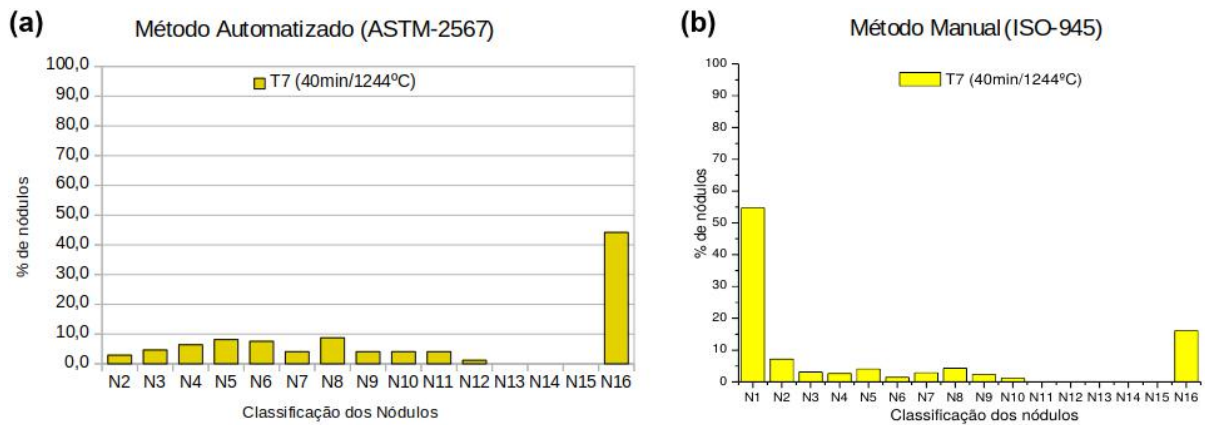


Figura 5.27 – Histograma da grafita da amostra T7 obtido via método automatizado (a) e via método manual (b). Fonte: (a) Elaborado pelo autor, (b) Vidal e Matlakhova (2017).

Observando os histogramas baseados na norma ISO-945 (2008) pode-se perceber que a quantidade de nódulos da classe N1 ultrapassa 50% para todas as amostras. Como a classe N1 foi retirada da análise baseada na norma ASTM-E2567 (2016), a proporção que existia para N1 foi naturalmente distribuída para as demais classes, fazendo com as maiores quantidades de nódulos estivessem, aproximadamente, nas classes de N2 a N8, aumentando assim o tamanho médio dos nódulos.

Um outro fator de destaque foi o aumento da classe N16, correspondente ao número de partículas de grafita não nodulares. Além do aumento de sua proporção devido à retirada dos nódulos de grafita das classes N1 e N2, esta também aumentou devido à norma ASTM-E2567 (2016) desconsiderar como nódulo todas as partículas de grafita que estivessem tocando a borda da imagem.

Como nódulos de grafita tocantes a borda da imagem foram desprezados, as proporções de algumas das classes centrais dos histogramas baseados na norma ASTM-E2567 (2016) foram reduzidas em face das demais. Contudo as partes centrais destes gráficos ainda mantiveram comportamentos aproximados com os gráficos baseados na norma ISO-945 (2008).

Após os comparativos referentes à classificação dos nódulos por tamanho, foram comparados os graus de nodularidade da grafita presentes nas amostras. A Figura 5.28 apresenta o gráfico com os graus de nodularidade analisados com as metodologias automatizada e manual.

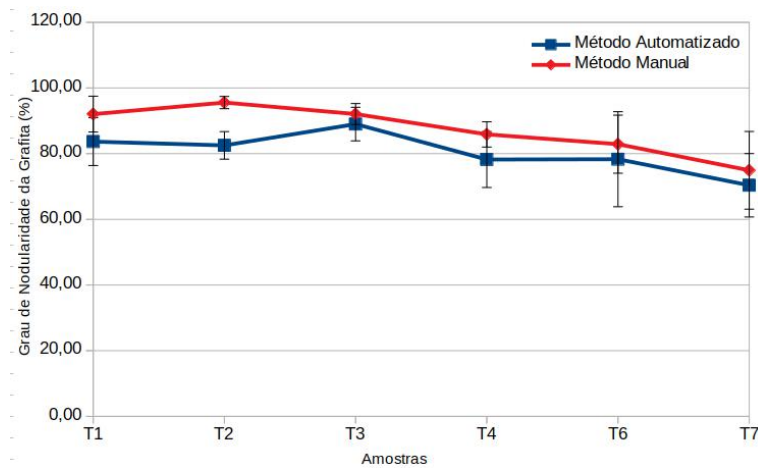


Figura 5.28 – Grau de nodularidade da grafita para cada amostra, calculado através do método manual e do método automatizado (ASTM-E2567 (2016)). Fonte: Elaborado pelo autor, dados do autor e de Vidal e Matlakhova (2017).

Apesar das semelhanças entre os gráficos das Figuras 5.28 e 5.23 (subseção 5.3.1), pode-se constatar que as curvas representativas das análises automatizadas se aproximam da curva da análise manual de forma diferenciada. Por exemplo, enquanto na Figura 5.28 as curvas se tocam nos pontos referentes a amostra T3, na Figura 5.23 as curvas se tocam nos pontos referentes a amostra T4. A Figura 5.29 apresenta uma micrografia da amostra T3 a qual será utilizada para explicar o fenômeno relatado.

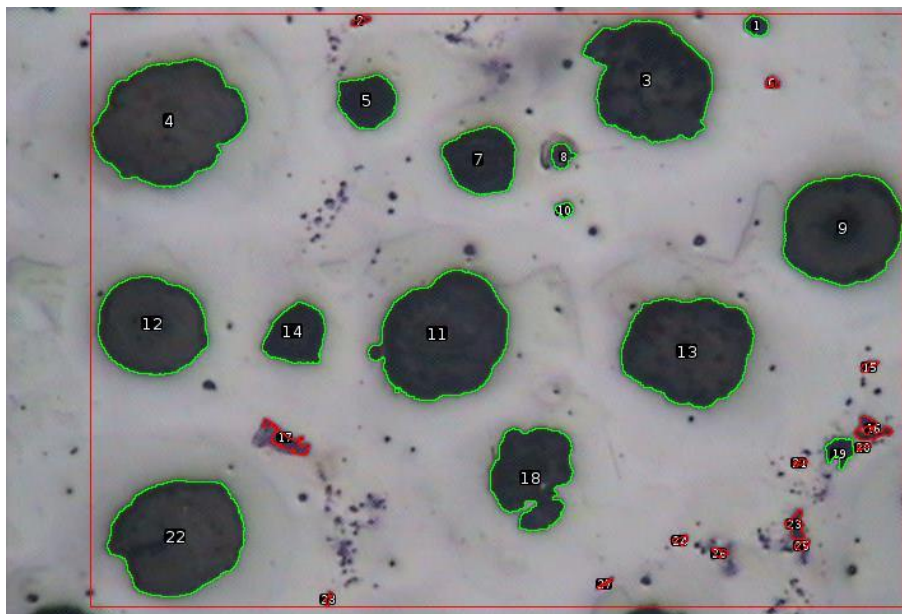


Figura 5.29 – Micrografia da amostra T3 com a marcação da grafita realizada com o método automatizado baseado na norma ASTM-E2567 (2016). Fonte: Adaptado de Vidal e Matlakhova (2017).

A micrografia presente na Figura 5.29 foi analisada utilizando como referência a norma ASTM-E2567 (2016). Cabe lembrar que, de acordo com a implementação do *Graphite Analyzer*, as partículas nodulares são contornadas pela cor verde, as partículas não nodulares são

contornadas pela cor vermelha e as partículas que não possuem contornos são as desprezadas da análise. Durante a análise um quadro na cor vermelha foi criado para delimitar a área da micrografia analisada.

A delimitação da área analisada é o primeiro fator a gerar variação no cálculo da nodularidade. Pode ser observado no exemplo da Figura 5.29 que partículas de grafita que tocaram a borda inferior da imagem foram desprezadas da análise. Se estas partículas fossem analisadas seriam consideradas não nodulares em função dos seus formatos. Ao se desprezar partículas não nodulares naturalmente se estará reduzindo a fração total da grafita e, conseqüentemente aumentando a proporção das partículas nodulares em relação ao total. O contrário também pode ocorrer se as partículas de grafita que estiverem tocando a borda forem nodulares, um exemplo disso é apresentado na Figura 5.30.

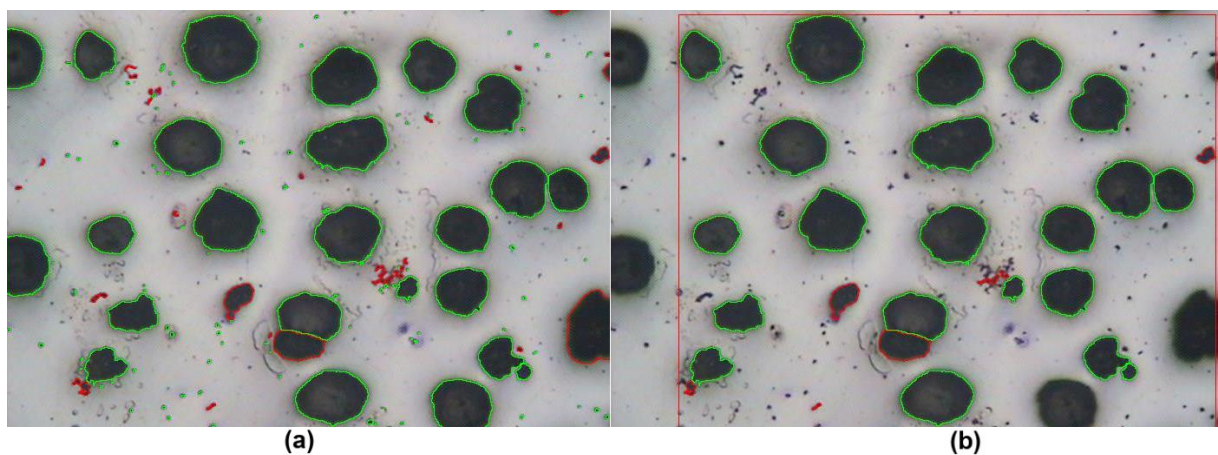


Figura 5.30 – Micrografia da amostra T2 com a marcação da grafita realizada com o método automatizado ISO-945 (2008) (a) e com o método automatizado baseado na norma ASTM-E2567 (2016) (b). Fonte: Adaptado de Vidal e Matlakhova (2017).

A Figura 5.30 (a) apresenta o resultado da análise de umas das micrografias da amostra T2 realizada com o método automatizado ISO-945 (2008), enquanto a a Figura 5.30 (b) apresenta o resultado da mesma análise utilizando como referência a norma ASTM-E2567 (2016). Pode ser percebido que as partículas que tocam a borda esquerda e inferior da imagem são nodulares, enquanto somente a que toca a borda direita é não nodular. Logo, quando a norma ASTM-E2567 (2016) descarta estas partículas conseqüentemente está reduzindo o grau de nodularidade da amostra.

Um outro fator que também contribui para oscilações dos resultados dos graus de nodularidade, calculados pelas metodologias automatizadas, é o fato da norma ASTM-E2567 (2016) desprezar os nódulos com DMFs menores do que $10 \mu m$. Apesar de serem nódulos pouco representativos nas suas dimensões, em grandes quantidades podem reduzir o grau de nodularidade quando desprezados.

Diferenças também foram encontradas na análise do atributo quantidade de nódulos por

mm^2 . Como já explicitado, as amostras analisadas possuíam na sua grande maioria nódulos com DMFs menores do que $10 \mu m$. Quando estes nódulos foram desprezados pela análise baseada na norma [ASTM-E2567 \(2016\)](#) resultaram em um aumento da discrepância entre as metodologias manual e automatizada. O gráfico da Figura 5.31 apresenta os resultados do métodos de análises manual e automatizada no que diz respeito ao atributo quantidade de nódulos por mm^2 .

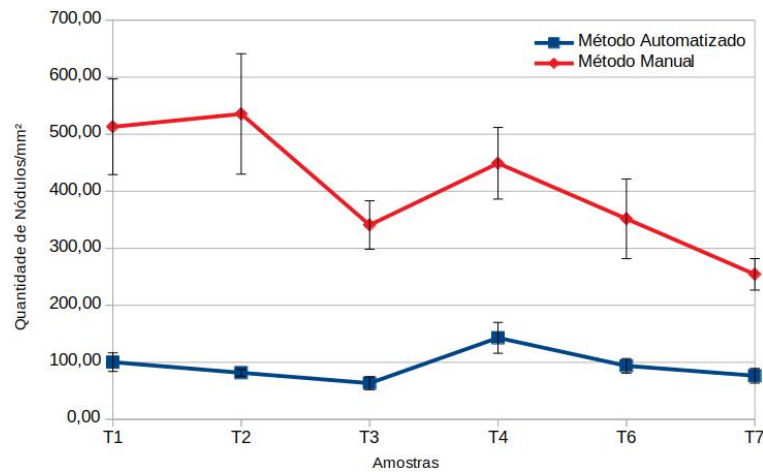


Figura 5.31 – Quantidade de nódulos de grafita por mm^2 , calculada através do método manual e do método automatizado. Fonte: Elaborado pelo autor, dados do autor e de [Vidal e Matlakhova \(2017\)](#).

5.4 Conclusão do estudo de caso I

O presente estudo de caso aplicou o ferramental desenvolvido a um problema real de caracterização da grafita existente no ferro fundido nodular. Os resultados obtidos com as metodologias automatizadas se aproximaram de forma satisfatória da metodologia manual.

A norma [ASTM-E2567 \(2016\)](#), específica para a automatização da análise da grafita, serviu como base de conhecimento formal para a implementação do ferramental. Contudo, por ser uma metodologia diferente daquela proposta pela norma [ISO-945 \(2008\)](#), obteve resultados díspares da metodologia manual no que tange à densidade de nódulos por mm^2 .

Com o uso do ferramental proposto, o tempo demandado para o pesquisador analisar um lote de cinco imagens deixou de ser de dias e passou a ser de minutos, viabilizando o redirecionamento de esforços de uma atividade repetitiva e tediosa para atividades mais nobres da pesquisa.

O ferramental desenvolvido permitirá ainda a reprodutibilidade precisa dos experimentos, facilitando a continuidade das pesquisas por diferentes profissionais sem que existam preocupações com subjetividades nos processos de análise.

Está se disponibilizando assim um ferramental de uso facilitado que otimiza diferentes aspectos do processo de caracterização da grafita presente no ferro fundido nodular.

6 Estudo de Caso II

6.1 Introdução

A importância da caracterização dos tamanhos de grãos dos materiais tem motivado o surgimento de diferentes normas para a padronização desta análise tanto de forma manual quanto de forma automática. Um exemplo é a norma [ASTM-E112 \(2013\)](#), que sugere o uso de diferentes estratégias manuais para a formalização desta análise. Contudo a análise manual é um processo moroso e que está sujeito à tendenciosidade inerente de cada pesquisador.

A hipótese deste estudo de caso é de que a proposta de uma metodologia automatizada para a caracterização de grãos se aproxime em termos de resultados da metodologia manual e traga benefícios como: simplicidade no processamento das imagens, redução do tempo de análise, precisão na reprodutibilidade de experimentos e minimização do custo do processo.

Apesar dos benefícios provenientes das metodologias de análises automatizadas, os desafios que envolvem o processo são grandes. Viabilizar uma precisa segmentação integral dos grãos do material por vezes se torna impraticável.

O objetivo deste estudo de caso é desenvolver um fluxo de [PADI](#), em consonância com a norma [ASTM-E1382 \(2015\)](#), para automatizar e otimizar o processo de caracterização de materiais polifásicos.

Além do objetivo geral alguns objetivos específicos são destacados a seguir:

- Aplicar o *software LAMAV-Wizard*, proposto nesta tese, a um caso real de demanda por estratégias de processamento e análise de imagens de materiais;
- Validar de forma qualitativa e quantitativa os *plugins Test Points Analyzer e Lineal Analyzer*, desenvolvidos para a realização de análise estereológica no *ImageJ*;
- Viabilizar a caracterização automática de grãos em materiais policristalinos;
- Viabilizar a caracterização automática das frações das fases constituintes de materiais policristalinos;
- Confrontar os resultados obtidos com um exemplar da literatura;
- Disponibilizar para profissionais da área o ferramental desenvolvido como *plugins* para o *software livre ImageJ*.

6.2 Metodologia

Foi investigada a literatura da área visando a identificação de processos formalizados que definissem as melhores estratégias automatizadas para a caracterização de grãos em materiais policristalinos. Diferentes trabalhos apontaram para a norma [ASTM-E1382 \(2015\)](#), que contempla este tipo de caracterização. A referida norma foi utilizada como referência para a

construção do *plugin Lineal Analyzer* e para a construção do fluxo de PADI aqui proposto e denominado *Grain Analysis Wizard*.

Este estudo de caso utilizou como insumo uma micrografia do aço número 1.5408 (EN-10263-4, 2017) obtida de Lober (2018). Foram disponibilizados pelo autor os valores das frações das fases e dos tamanhos dos grãos do material, que foram utilizados para aferir os resultados obtidos com a tecnologia desenvolvida neste trabalho.

A micrografia foi submetida ao *Grain Analysis Wizard* em três circunstâncias. As duas primeiras foram em conjunto com o *plugin Lineal Analyzer* para a obtenção dos tamanhos dos grãos e da proporção de cada uma das fases do material. A terceira foi realizada com o objetivo de testar o *plugin Test Points Analyzer* e confrontar os resultados do mesmo com os obtidos pelo *plugin Lineal Analyzer*.

O fluxo de PADI proposto neste estudo de caso envolve um conjunto de estratégias dividido em sete etapas que podem ser observadas no fluxograma da Figura 6.1.

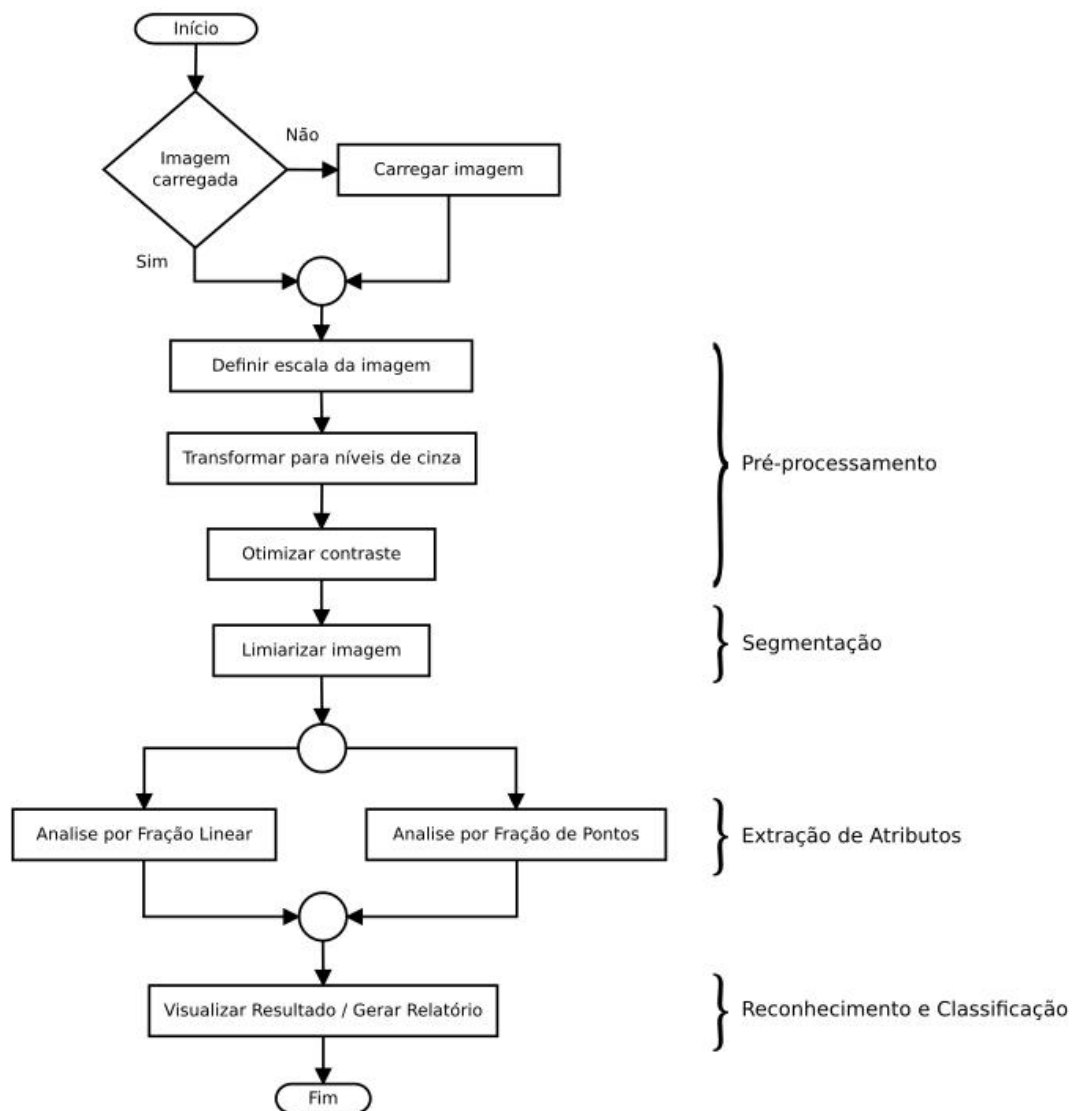


Figura 6.1 – Fluxograma das etapas de PADI utilizadas na construção do *plugin Grain Analysis Wizard*. Fonte: Elaborado pelo autor.

Este fluxo apresenta similaridade com o desenvolvido para a análise da grafita (seção 5.2), porém eles se diferem de forma substancial no que se refere à fase de extração de atributos, isto é, na fase da análise propriamente dita. Enquanto no primeiro estudo de caso foi utilizado o *plugin Graphite Analyzer* com foco na norma ASTM-E2567 (2016), neste foram utilizados os *plugins Test Points Analyzer* e *Lineal Analyzer*, baseados na norma ASTM-E1382 (2015).

O fluxo é iniciado com a verificação da existência de uma imagem carregada para análise. Caso não exista, é disponibilizada uma interface para que o usuário escolha a imagem de sua preferência. Em seguida vem a fase de pré-processamento composta pelas etapas de definição da escala da imagem, transformação para níveis de cinza e melhoria do seu contraste. Após o pré-processamento é realizada a segmentação utilizando o processo de limiarização. Em seguida a análise propriamente dita poderá ser realizada pelo *plugin Test Points Analyzer* ou pelo *Lineal Analyzer*. Por fim são gerados relatórios com os resultados das análises.

Uma das vantagens apresentadas pela ferramenta *LAMAV-Wizard* é a possibilidade de reutilização de parte de fluxos pré-existentes na construção de um novo fluxo. Dada a versatilidade da ferramenta, os esforços necessários para a construção do *plugin Grain Analysis Wizard* foram direcionados para a etapa de análise.

Em face do exposto, serão especificados nesta seção somente os aspectos não levantados na subseção 5.2.1.

A etapa de análise construída para este *Wizard* foi denominada *Grain and Phase Analysis* e sua interface pode ser visualizada na Figura 6.2.

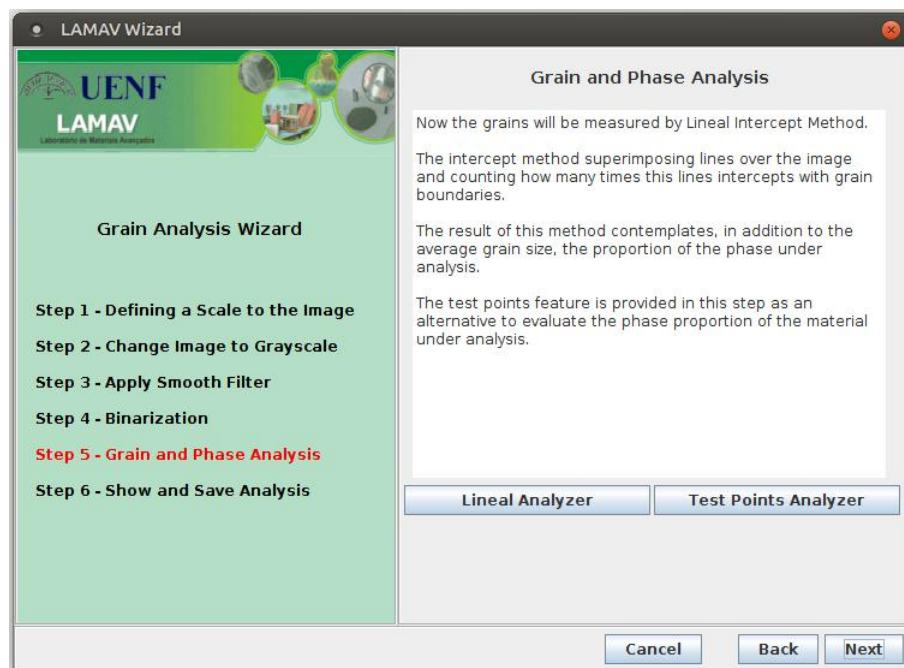


Figura 6.2 – Interface do *plugin Grain Analysis Wizard* com a etapa de análise em destaque. Fonte: Elaborado pelo autor.

O primeiro botão presente na interface, denominado *Lineal Analyzer*, fornece acesso ao *plugin* de análise estereológica por interceptos desenvolvido neste trabalho e descrito em detalhes na [seção 4.4](#). O segundo botão, denominado *Test Points Analyzer*, fornece acesso ao *plugin* de análise estereológica por pontos de teste, também desenvolvido neste trabalho e descrito em detalhes na [seção 4.5](#).

A funcionalidade *Lineal Analyzer* fornece tanto a análise do tamanho médio de grão quanto a fração da fase de interesse, já a funcionalidade *Test Points Analyzer* fornece unicamente a fração da fase de interesse.

6.3 Resultados e discussões

A Figura 6.3 apresenta a micrografia obtida de [Lober \(2018\)](#). O autor caracterizou a fase branca composta de ferrita e a fase escura composta de perlita e sorbita. Foi identificado que cada uma das fases compõe 50% do material. Quanto ao tamanho médio de grão G , foi obtida uma classificação próxima do valor 9 da norma [ASTM-E1382 \(2015\)](#).

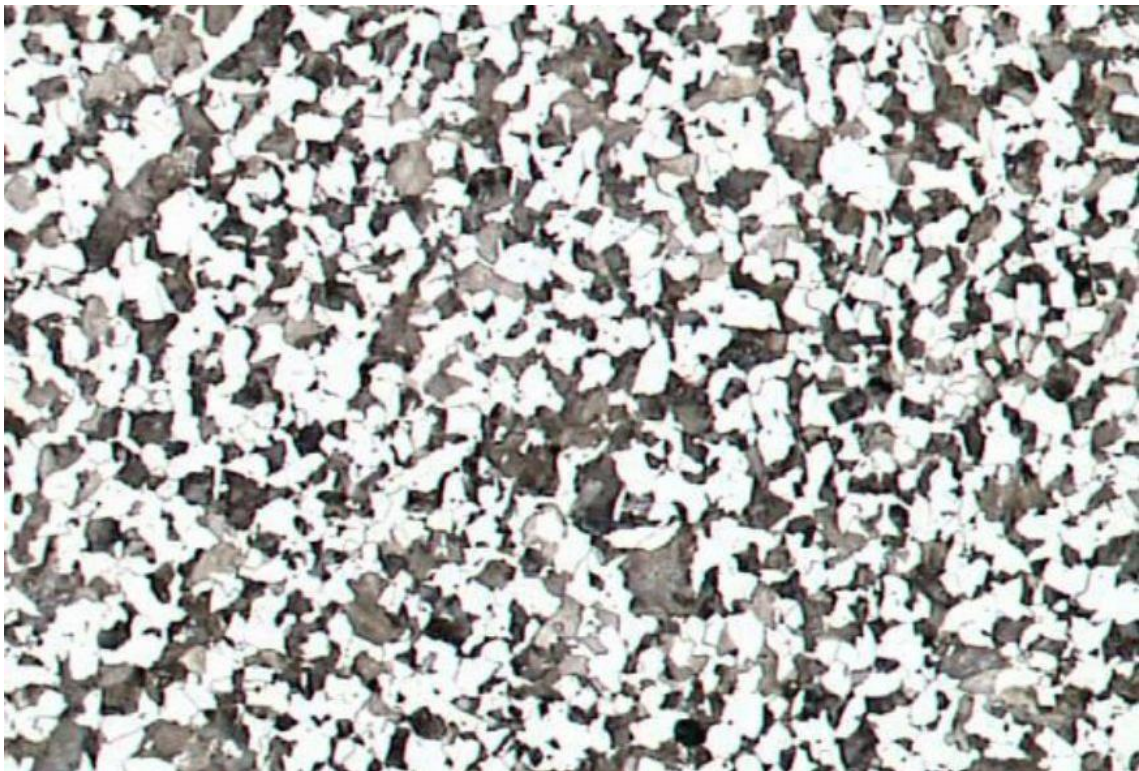


Figura 6.3 – Micrografia da amostra de aço. Fonte: [Lober \(2018\)](#).

Os primeiros testes foram realizados utilizando a ferramenta *Lineal Analyzer* na etapa de análise do *Wizard*. Os resultados foram avaliados de forma qualitativa e quantitativa. A análise qualitativa foi realizada através de inspeção visual. A micrografia com as suas fases segmentadas (Figura 6.4) foi submetida à análise e os resultados avaliados. O processo de segmentação utilizado foi a limiarização com valor 212 para o limiar de tom de cinza.

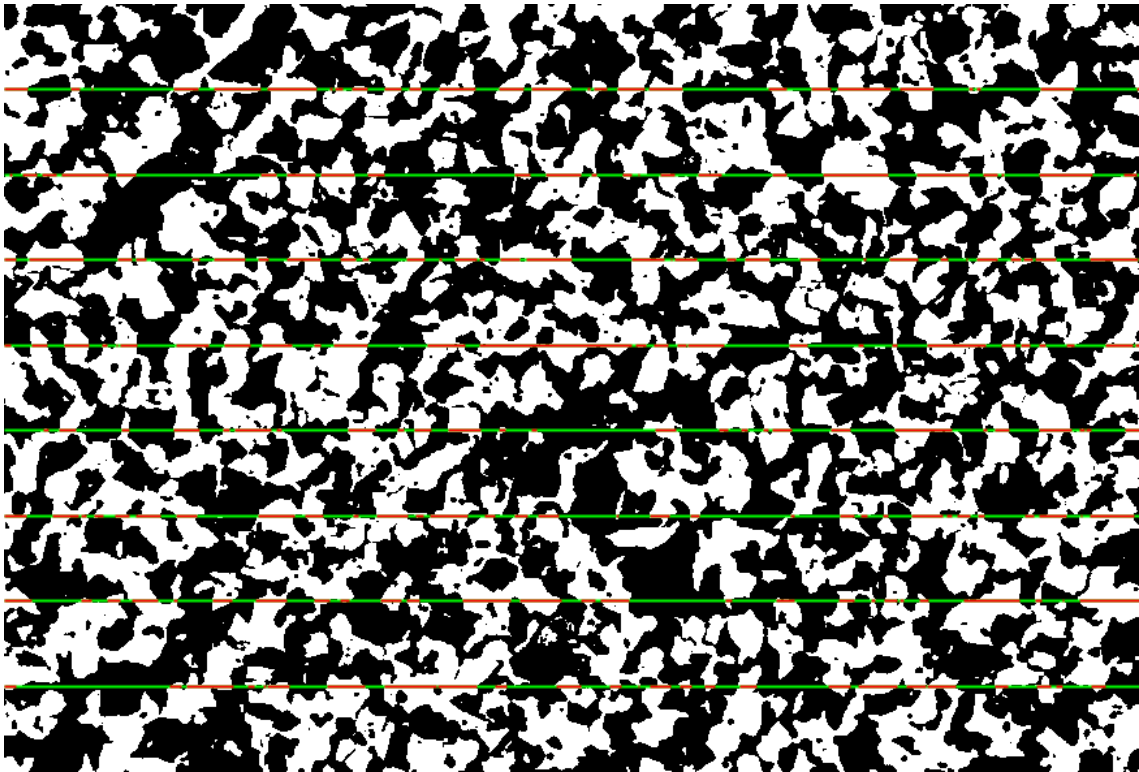


Figura 6.4 – Micrografia segmentada da amostra aço analisada pelo *Lineal Analyzer*. Fonte: Adaptado de Lober (2018).

Foi percebido que enquanto todos os grãos existentes na fase branca foram corretamente sobrepostos por interceptos na cor vermelha, os grãos na fase preta permaneceram sobrepostos com as linhas guia na cor verde. Desta forma o processo de análise por intercepto foi qualitativamente certificado.

No entanto, é comum que as técnicas de pré-processamento utilizadas no fluxo de PADI provoquem alguma perda no processo. Essas perdas devem ser minimizadas para que as análises sejam realizadas de forma coerente. Visando identificar a precisão do *Grain Analysis Wizard* para a micrografia analisada, foi realizada uma inspeção visual na precisão dos interceptos sobre a imagem original (Figura 6.5). Esta nova análise qualitativa apontou resultados satisfatórios, com perdas apenas de alguns contornos de grãos mais claros pertencentes à ferrita. Um exemplo de contorno não detectado é apontado pela seta amarela presente na Figura 6.5.

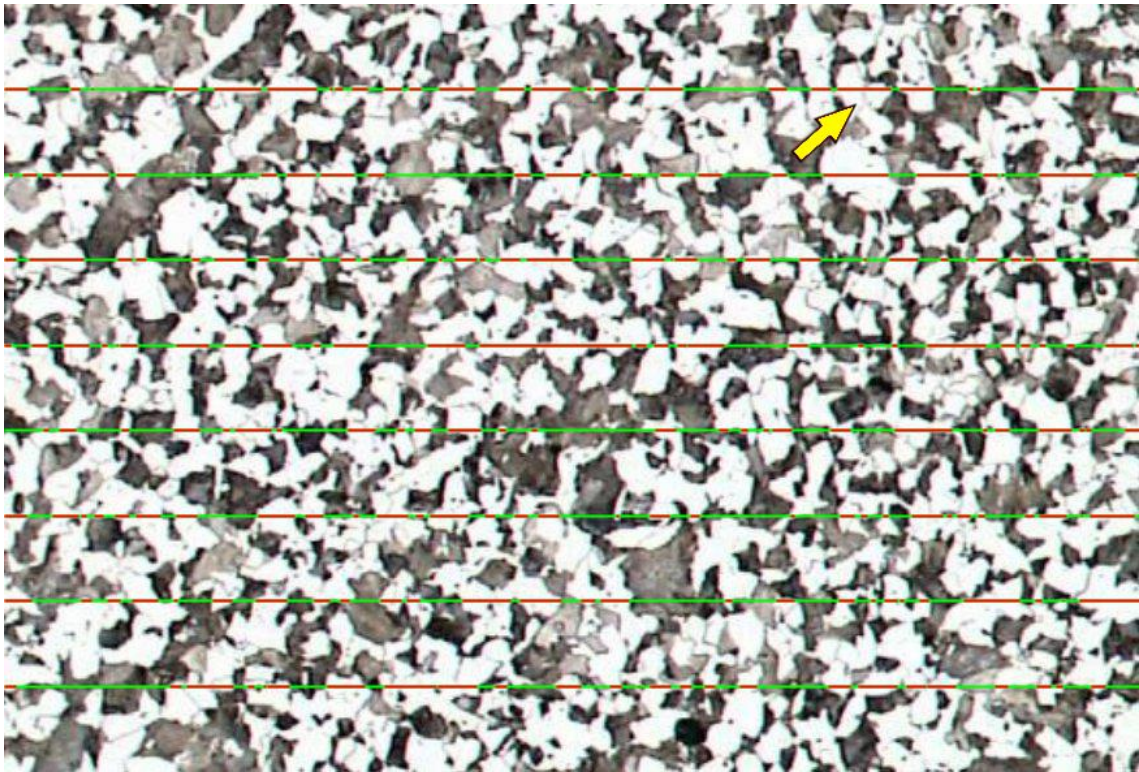


Figura 6.5 – Micrografia original da amostra de aço com a camada de análise sobreposta para conferência. Fonte: Adaptado de Lober (2018).

Após as avaliações qualitativas foram realizadas avaliações quantitativas. Os resultados das análises obtidos com o *Wizard* foram comparados com os resultados disponibilizados por Lober (2018). O percentual de ferrita encontrado pela metodologia proposta foi de 49.4% e o de perlita em conjunto com a sorbita de 50.6%, uma diferença de menos de 1% em relação às percentagens obtidas por Lober (2018). Quanto ao tamanho de grão, foram encontrados os valores de $9,6 \mu m$ para a ferrita e de $9,3 \mu m$ para o conjunto formado pela perlita e pela sorbita. Uma diferença considerada pequena para a medição realizada por Lober (2018), já que o autor coloca o valor como aproximado. A convergência dos resultados quantitativos apontaram para um fluxo realizado de forma coerente validando o *Wizard* e o *plugin Lineal Analyzer*.

A medição das áreas das regiões de interesse de uma micrografia é uma outra técnica que pode ser utilizada para calcular o tamanho de grão e o percentual das fases existentes em uma amostra de material. Esta funcionalidade está presente de forma nativa no *ImageJ* e foi utilizada para enriquecer o comparativo dos testes realizados.

A técnica de análise por área foi realizada submetendo-se a imagem já segmentada a ferramenta *Analyze Particles* do *ImageJ*. A Figura 6.6 apresenta as demarcações das áreas relacionadas as fases da perlita e da sorbita resultantes da análise realizada.

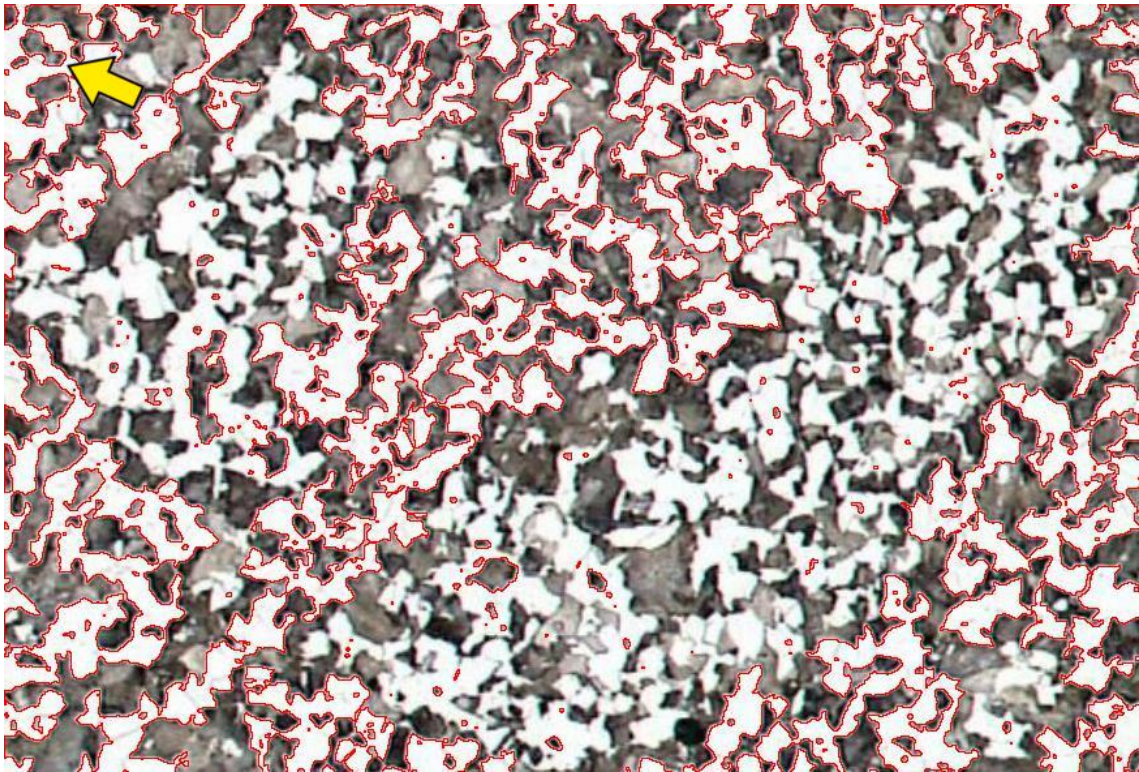


Figura 6.6 – Micrografia original da amostra de aço sobreposta pela camada de análise gerada pelo *Analyze Particles*. Fonte: Adaptado de [Lober \(2018\)](#).

A demarcação realizada na fase escura dificilmente pode ser precisada. Isto se deve ao fato de que o *Analyze Particles* contorna graficamente apenas a parte externa da área a ser medida. A seta amarela presente na Figura 6.6 aponta para uma região onde demarcações da fase escura podem ser identificadas.

A identificação equivocada de grãos extremamente grandes na imagem fizeram com que áreas inteiras permanecessem sem demarcações perceptíveis. Na Figura 6.7 é destacada uma área com dois tons de cinza na imagem. A tonalidade cinza escura compõe a identificação de um único grão formado pelo conjunto perlita e sorbita. A tonalidade cinza clara compõe a ferrita que, apesar de estar interna a demarcação do referido grão, não foi computada pelo *Analyze Particles*.

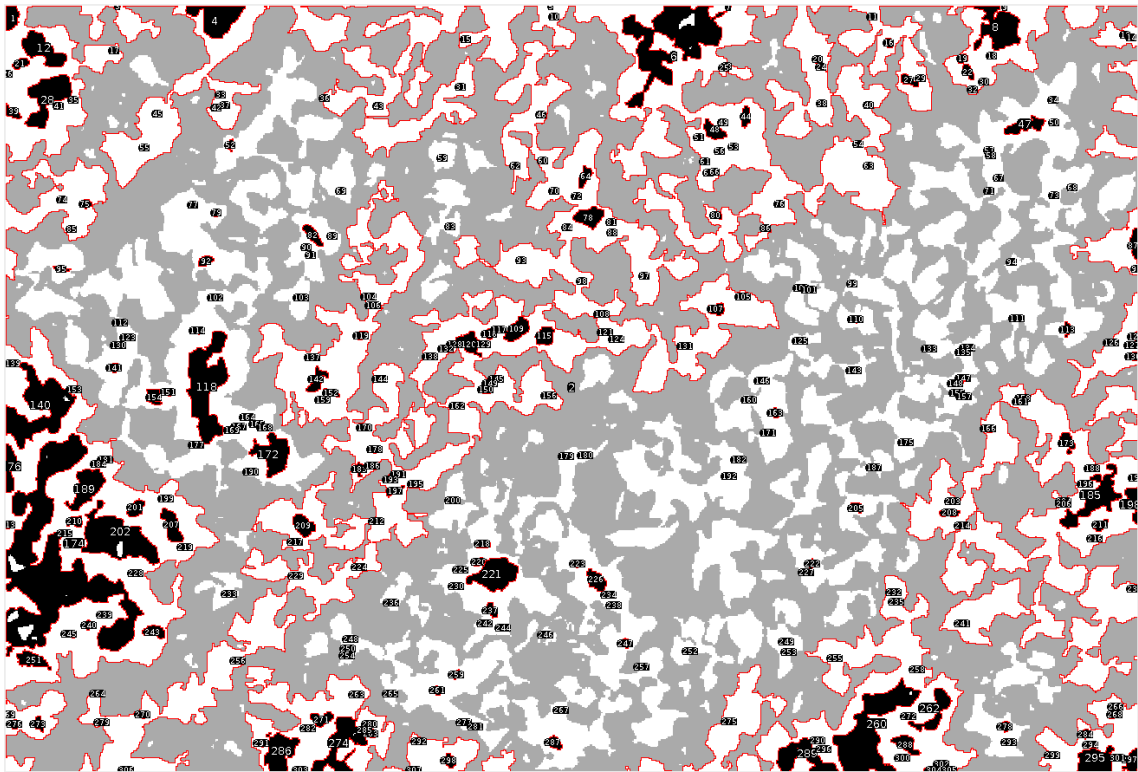


Figura 6.7 – Micrografia analisada pelo *Analyze Particles* com grão erroneamente detectado em destaque. Fonte: Adaptado de Lober (2018).

Os rótulos presentes na Figura 6.7 indentificam os grãos da fase escura demarcados na imagem. Cabe ressaltar que diminutas partículas podem estar integralmente sobrepostas por esses rótulos.

Características da imagem como a baixa qualidade e contornos de grãos pouco destacados fizeram com que grãos distintos se juntassem em grandes formações equivocadas. Este fato inviabilizou a obtenção coerente do tamanho médio de grão *ASTM* via o cálculo das áreas. O gráfico da Figura 6.8 apresenta o coeficiente de variação dos tamanhos dos grãos calculados para as estratégias *Lineal Analyzer* e *Analyze Particles*.

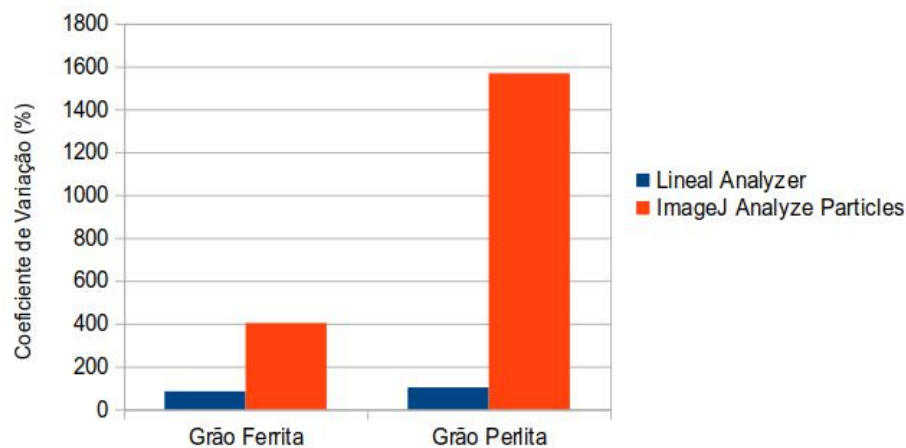


Figura 6.8 – Coeficiente de variação dos tamanhos dos grãos obtidos pelas ferramentas *Lineal Analyzer* e *Analyze Particles*. Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico destaca valores discrepantes para os coeficientes de variação. Enquanto os grãos de perlita/sorbita tiveram os seus grãos variando em torno de 100% para a estratégia *Lineal Analyzer*, para a estratégia do *Analyze Particles* a variação foi de quase 1600%, atestando quantitativamente a inviabilidade do cálculo do tamanho de grão utilizando desta última.

Desta forma pode ser notado que a estratégia baseada em interceptos do *Lineal Analyzer* é menos vulnerável às condições adversas existentes na imagem para a obtenção dos tamanhos de grãos.

Apesar da inviabilidade do cálculo do tamanho médio de grão, o cálculo da fração de área das fases foi realizado com sucesso pelo *Analyze Particles*. O percentual de ferrita encontrado pela ferramenta foi de 44.9% e o de perlita em conjunto com a sorbita de 55.1%, uma diferença próxima de 5% em relação as percentagens obtidas por Lober (2018).

O percentual das fases do material também foi calculado utilizando o *plugin Test Points Analyzer*. As estratégias e parâmetros utilizados na etapa pré-processamento foram os mesmos dos testes anteriores, bem como a tonalidade de cinza do limiar da segmentação.

Foi gerada uma malha com 60 pontos sobre a imagem segmentada. O resultado foi avaliado de forma qualitativa observando se os pontos sobre a fase de interesse se encontravam na cor vermelha, enquanto os pontos de controle se encontravam na cor verde. A Figura 6.9 apresenta o resultado da aplicação da malha de pontos sobre a imagem segmentada.

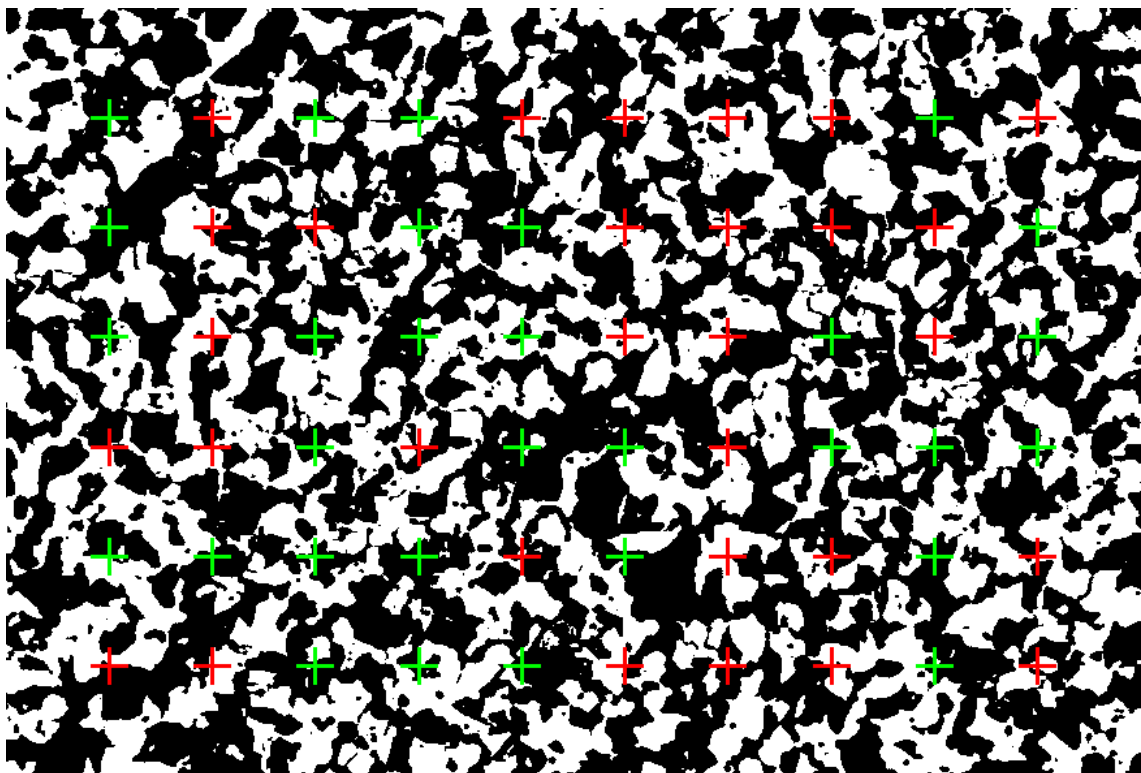


Figura 6.9 – Micrografia segmentada sobreposta pela camada de análise gerada pelo *plugin Test Points Analyzer*. Fonte: Adaptado de Lober (2018).

Nesta estratégia o resultado pode ser percebido de forma simples pela contagem dos

pontos presentes sobre as fases de interesse. Na Figura 6.9, dos 60 pontos, 30 se encontravam sobre a fase da ferrita, totalizando 50% do constituinte do material. Conseqüentemente, os outros 50% do material são constituídos de perlita e sorbita.

Com o objetivo de avaliar qualitativamente o resultado obtido pelo *Wizard* foi disponibilizada a micrografia original em conjunto com a camada de análise na Figura 6.10.

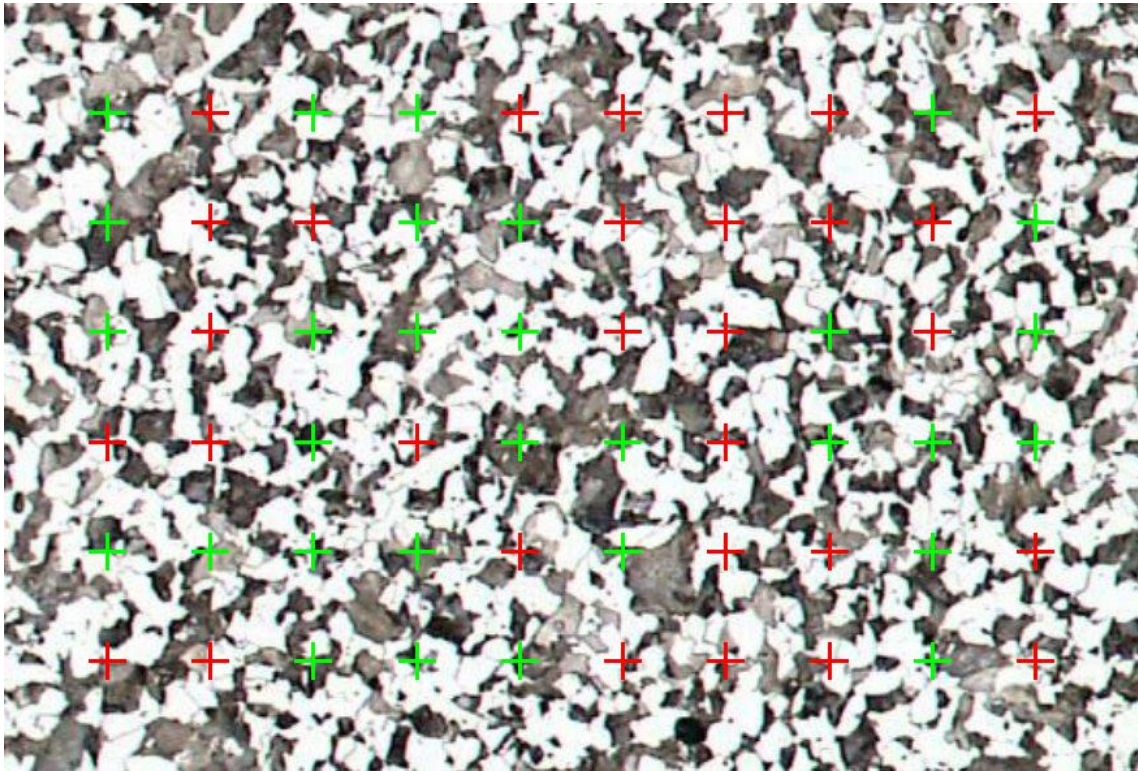


Figura 6.10 – Micrografia original sobreposta pela camada de análise gerada pelo *plugin Test Points Analyzer*. Fonte: Adaptado de [Lober \(2018\)](#).

Pode ser percebido que os pontos de teste estão demarcando as fases de forma positiva, validando a análise de forma qualitativa.

A Figura 6.11 apresenta um gráfico comparativo dos resultados obtidos pelas diferentes estratégias utilizadas na identificação das frações das fases do material.

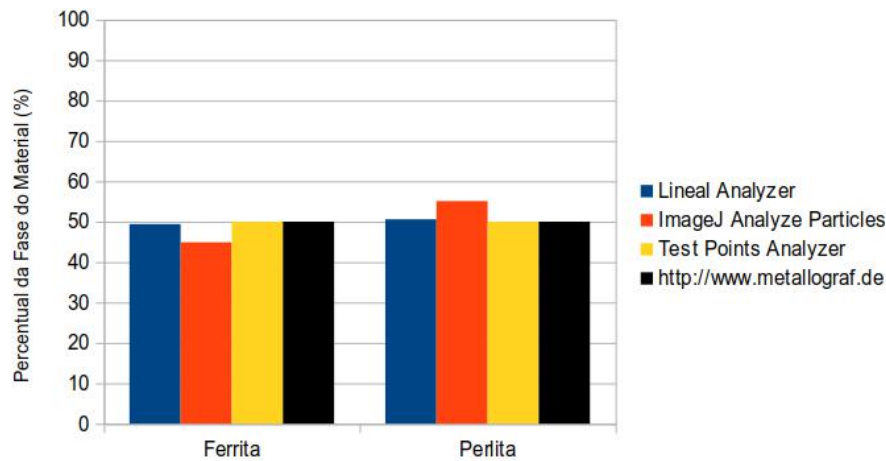


Figura 6.11 – Gráfico comparativo dos percentuais das fases obtidos pelas diferentes estratégias de análise do material. Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode ser observado no gráfico que os valores obtidos pelo *Wizard* utilizando o *plugin Test Points Analyzer* foi exatamente o mesmo do obtido por [Lober \(2018\)](#), validando quantitativamente o ferramental.

Os resultados obtidos pela ferramenta *Analyze Particles* se diferenciaram de forma sutil dos demais. Isto ocorreu devido ao método de análise por fração de área avaliar as regiões de interesse da imagem na sua integralidade, enquanto os demais métodos trabalham por amostragem. Contudo, a metodologia utilizada por [Lober \(2018\)](#) não foi informada, o que inviabiliza comparações mais precisas com os resultados obtidos pelo autor.

6.4 Conclusão do estudo de caso II

O *plugin Grain Analysis Wizard* foi aplicado com sucesso, a um caso real na área de caracterização de materiais, viabilizando o cálculo do tamanho médio de grão [ASTM](#) e das frações das fases de uma amostra de aço 1.5408 ([EN-10263-4, 2017](#)).

Os *plugins Test Points Analyzer* e *Lineal Analyzer* foram validados de forma qualitativa e quantitativa. A avaliação qualitativa foi realizada sobre as marcações das análises tanto na imagem segmentada quanto na imagem original. Na imagem segmentada o resultado do processo foi considerado preciso. No entanto, na imagem original foram identificadas algumas imprecisões relacionadas às dificuldades inerentes das fases de pré-processamento e segmentação. Em relação às análises quantitativas, as diferenças encontradas entre os resultados dos testes e o valor da literatura ficaram em torno de 1% no pior caso, o que foi considerado satisfatório.

A ferramenta *Analyze Particles*, nativa do software *ImageJ*, também foi testada utilizando os mesmos parâmetros do *Grain Analysis Wizard*. Para as proporções das fases o resultado obtido foi positivo, porém, para os tamanhos de grãos a estratégia se mostrou vulnerável aos resultados obtidos nas fases de pré-processamento e segmentação. Este fato demonstra a necessidade da existência de diferentes estratégias de análise.

Os resultados apontam para um ferramental versátil que está sendo disponibilizado para dotar o *software livre ImageJ* da capacidade de analisar tamanho médio de grãos e frações de fases de materiais em consonância com normativas da área.

7 Conclusão

A automatização da análise de micrografias de materiais foi apontada como tendência por diferentes trabalhos da literatura. Normas da área consolidam esta tendência e servem como norteadoras do processo. Dentre essas, as normas [ASTM-E2567 \(2016\)](#) e [ASTM-E1382 \(2015\)](#) serviram como referência para a criação do ferramental desenvolvido.

O *LAMAV-Wizard* viabilizou a criação de fluxos de PADI baseados em uma interface gráfica do tipo assistente, focada na solução do problema. Este ferramental simplificou a aplicação de técnicas de PADI na medida que cadenciou o processo e focou nos resultados das técnicas, deixando implícito os seus funcionamentos. Foram ainda disponibilizados recursos para processamento de lotes de imagens sem interação com o usuário, o que resultou em relatórios padronizados, redução do tempo e do esforço na realização das análises.

O *plugin* gerador de relatório *LAMAV-Report* propiciou que os resultados das análises fossem concentrados em um mesmo arquivo do tipo planilha eletrônica, facilitando a revisão e manipulação destes dados pelo pesquisador. A aplicação desse *plugin* em conjunto com o uso de macroinstruções permitiu a realização de testes repetitivos sobre lotes de micrografias o que proporcionou a obtenção de resultados mais apurados no processo de análise.

Nos estudos de caso foram colocadas em prática recomendações de duas normas com foco na automatização da análise de micrografias de materiais: a norma [ASTM-E2567 \(2016\)](#) e a norma [ASTM-E1382 \(2015\)](#). A norma [ASTM-E2567 \(2016\)](#) possui recomendações que seguem passos bem definidos com um conjunto reduzido de alternativas, sendo assim, foi contemplada pelo ferramental praticamente na sua totalidade. Já a norma [ASTM-E1382 \(2015\)](#), por conter um conjunto maior de alternativas, foi implementada de forma suficiente para disponibilizar resultados baseados na análise por interceptos lineares.

Para viabilizar a construção do primeiro estudo de caso foi desenvolvido o *plugin Graphite Analysis Wizard*. Este *plugin*, além de implementar as recomendações da norma [ASTM-E2567 \(2016\)](#), destacou visualmente as partículas de grafita classificando-as como nodulares ou não nodulares.

No primeiro estudo de caso foram utilizadas as micrografias da pesquisa de [Vidal e Matlakhova \(2017\)](#), que investiga o ferro fundido nodular. Nessa pesquisa, a grafita presente nas amostras do material foi caracterizada utilizando a metodologia manual. Os dados e os resultados estatísticos obtidos na caracterização manual por [Vidal e Matlakhova \(2017\)](#) foram confrontados com duas metodologias automatizadas implementadas com o *LAMAV-Wizard*. Versões preliminares do *Wizard* já foram utilizadas de forma relevante nos trabalhos de [Fernandes e Matlakhova \(2018\)](#) e [Souza et al. \(2017\)](#). Os resultados obtidos com as metodologias automatizadas se aproximaram dos resultados originais e otimizaram o processo reduzindo o tempo de análise, eliminando o trabalho repetitivo, permitindo a reprodução sistemática dos experimentos

e minimizando a subjetividade do processo.

Para viabilizar a construção do segundo estudo de caso foram desenvolvidos os *plugins Lineal Analyzer* e *Test Points Analyzer*. O *Lineal Analyzer* gerou resultados da análise estereológica utilizando a metodologia de interceptos lineares e calculou o tamanho médio de grão ASTM com sucesso. O *Test Points Analyzer* forneceu com precisão o percentual das fases analisadas utilizando a metodologia de fração de pontos.

O segundo estudo de caso foi elaborado para validar qualitativamente e quantitativamente os *plugins* de análise estereológica desenvolvidos. Os resultados das análises foram comparados com os disponibilizados na literatura validando o ferramental e atingindo os resultados de forma sistemática e otimizada.

A construção do fluxo de PADI utilizado no segundo estudo de caso reaproveitou etapas do primeiro estudo de caso, poupando tempo e esforço de desenvolvimento. Este fato aponta que na medida que novos *Wizards* forem desenvolvidos maior a probabilidade de reaproveitamento das etapas disponíveis e consequentemente maior facilidade de desenvolvimento.

Por fim, o *ImageJ*, um *software* utilizado mundialmente por pesquisadores das mais diferentes áreas, passa a contar com recursos que o personalizam para a área de ciência e engenharia de materiais, fazendo com que o mesmo atenda a padrões desta área de forma flexível e simplificada.

7.1 Trabalhos futuros

O ferramental desenvolvido tem a vocação natural de ser base para a construção das mais diversas soluções de PADI para a área de ciência dos materiais. Desta forma, as inúmeras normas da literatura referentes à automatização da análise de micrografias são potenciais trabalhos futuros.

Será necessário adequar e refinar o ferramental desenvolvido a fim de disponibilizá-lo no site oficial dos *plugins* do *ImageJ* (NIH, 2018).

Visando a melhoria da usabilidade do *LAMAV-Wizard*, poderá ser implementado o deslocamento não sequencial pelo fluxo de PADI, permitindo que o usuário selecione a etapa de interesse no painel de títulos.

Foi constatado que o reaproveitamento de etapas de fluxos de PADI previamente criados é um potencial do *LAMAV-Wizard*. Criar um sistema para gerenciar estas etapas e organizá-las automaticamente em um novo fluxo é uma alternativa que poderá facilitar o trabalho do pesquisador.

O *plugin Graphite Analyzer* criado para a análise da grafita atende a norma ASTM-E2567 (2016), contudo duas estratégias são sugeridas a seguir para serem investigadas e inseridas no processo de análise. A primeira é a realização da classificação das partículas de grafita em função das suas esfericidade. Desta forma as partículas deixariam de ser classificadas so-

mente em nodulares e não nodulares para contemplar as demais classes referenciadas na norma [ISO-945 \(2008\)](#). Um outro aspecto a ser melhor investigado é o fato das partículas que tocam a borda da micrografia serem ignoradas da análise. [Friel \(2000\)](#) apresenta um conceito de quadros de guarda onde os elementos de interesse que tocam a lateral esquerda e superior do quadro são descartados enquanto os que tocam a lateral direita e inferior são analisados na sua integralidade. Esta estratégia merece ser testada visando obter uma melhor precisão da análise.

O *plugin Lineal Analyzer* atende à norma [ASTM-E1382 \(2015\)](#) uma vez que obtém as medidas dos grãos equiaxiais e gera como resultado o grão médio ASTM baseado na análise linear. Contudo a norma apresenta outras estratégias de análises baseadas em interceptos, incluindo o método de intercepto proposto por [Abrams \(1971\)](#), que se apresenta como uma alternativa interessante para grãos não equiaxiais. A expansão do *plugin Lineal Analyzer* para atender às diferentes alternativas da norma [ASTM-E1382 \(2015\)](#) é um potencial trabalho futuro.

Pode ser melhorada a usabilidade do *plugin Lineal Analyzer* disponibilizando uma caixa de opções para permitir que o usuário selecione apenas os resultados de seu interesse para compor o relatório final.

Aprofundar os testes do *Grain Analysis Wizard* realizando comparativos com resultados de pesquisas previamente desenvolvidas, que tenham utilizado uma maior quantidade de imagens e metodologias manuais de análises.

Realizar testes comparativos entre o ferramental desenvolvido análises realizadas com os *Wizards* e análises realizadas com outros softwares disponíveis no mercado....

O fluxo de PADI criado para o *Grain Analysis Wizard* objetivou a análise de micrografias de materiais polifásicos. Contudo, faz-se necessária a criação de uma variação desse fluxo para a análise do tamanhos de grãos de micrografias compostas de uma única fase. Para a realização da análise deste tipo de micrografia, contornos de grãos perdidos na fase de segmentação deverão ser recuperados na fase de pós-processamento, a qual deverá conter operadores morfológicos de erosão, dilatação e esqueletização. Esta variação do *Grain Analysis Wizard* foi desenvolvida neste trabalho, porém precisa ser formalmente testada e avaliada.

Identificar com os pesquisadores dos demais setores do Laboratório de Materiais Avançados da UENF as necessidades e possibilidades de aplicação do ferramental desenvolvido associado a microscopia confocal e microscopia óptica.

Como última recomendação, efetuar uma pesquisa exploratória mais profunda em organizações de padronizações internacionais (como American Society for Testing and Materials, Japanese Industrial Standard, European Standard (EN), etc) em busca de normas para a automatização da análise de imagens de materiais. Em seguida, criar testes comparativos entre normas afins visando o aperfeiçoamento e a proposição de novos fluxos de PADI para serem desenvolvidos com o *LAMAV-Wizard*.

Referências

- ABRÀMOFF, M. D.; MAGALHÃES, P. J.; RAM, S. J. Image processing with imagej. *Biophotonics international*, Laurin Publishing, v. 11, n. 7, p. 36–42, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 42, 43 e 44.
- ABRAMS, H. Grain size measurement by the intercept method. *Metallography*, v. 4, n. 1, p. 59 – 78, 1971. ISSN 0026-0800. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/002608007190005X>>. Citado na página 112.
- ALBUQUERQUE, V. H. C. de; TAVARES, J. M. R.; CORTEZ, P. C. Uma abordagem computacional para segmentação das microestruturas do ferro fundido branco hipoeutético baseado em morfologia matemática. In: *Actas do 10º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica (CIBEM 10)*. [S.l.: s.n.], 2011. Citado 3 vezes nas páginas ix, 48 e 49.
- ASTM-A247. *Standard Test Method for Evaluating the Microstructure of Graphite in Iron Castings*. [S.l.], 2010. Citado na página 38.
- ASTM-A536. *Standard Specification for Ductile Iron Castings*. [S.l.], 2014. Disponível em: <www.astm.org>. Citado na página 34.
- ASTM-E112. *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. [S.l.], 2013. Disponível em: <www.astm.org>. Citado 9 vezes nas páginas xiii, 12, 13, 14, 16, 33, 38, 61 e 98.
- ASTM-E1245. *Standard Practice for Determining the Inclusion or Second Phase Constituent Content of Metals by Automatic Image Analysis*. [S.l.], 2016. Disponível em: <www.astm.org>. Citado na página 61.
- ASTM-E1382. *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size Using Semiautomatic and Automatic Image Analysis*. [S.l.], 2015. Disponível em: <www.astm.org>. Citado 15 vezes nas páginas v, xviii, 11, 32, 33, 38, 52, 53, 61, 66, 98, 100, 101, 110 e 112.
- ASTM-E2567. *Standard Test Method for Determining Nodularity And Nodule Count In Ductile Iron Using Image Analysis*. [S.l.], 2016. Disponível em: <www.astm.org>. Citado 24 vezes nas páginas v, xi, xviii, 34, 38, 52, 53, 58, 59, 60, 61, 70, 71, 72, 87, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 100, 110 e 111.
- BADDELEY, A.; JENSEN, E. *Stereology for Statisticians*. CRC Press, 2004. (Chapman & Hall/CRC Monographs on Statistics & Applied Probability). ISBN 9780203496817. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=il0fXb_GSowC>. Citado 8 vezes nas páginas vii, 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11.
- BARBOSA, D. H. B. M.; SILVA, A. C.; MENDES, M. V. A. Caracterização granulométrica e automação do método de gaudin através do imagej. *Enciclopédia Biosfera*, v. 10, p. 166–176, 2014. Citado 2 vezes nas páginas viii e 46.
- BENJAMIN, J. M. *Grain Size Measurement According to ASTM Standards*. 2014. Access date: 23 julho 2018. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/JabinMathewBenjamin/grain-size-measurement-according-to-astm-standards>>. Citado 2 vezes nas páginas vii e 14.

- BRANDON, D.; KAPLAN, W. D. *Microstructural characterization of materials*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013. Citado na página 12.
- BURGER, W.; BURGE, M. J. *Principles of digital image processing: fundamental techniques*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 42, 43 e 44.
- CALLISTER, W. *Ciência E Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 8ª. ed. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2012. ISBN 9788521621249. Citado na página 5.
- CAVALCANTE, T. d. S. et al. Aplicação de técnicas de processamento e análise de imagem na análise automática da quantidade e do tamanho do grão em imagens metalográficas. In: *Congresso de Métodos Numéricos em Ingeniería 2009 (MetNum2009)*. [S.l.: s.n.], 2009. Citado na página 1.
- CHAUMONT, F. D. et al. Icy: an open bioimage informatics platform for extended reproducible research. *Nature methods*, Nature Publishing Group, v. 9, n. 7, p. 690, 2012. Citado na página 38.
- CHILEV, C. et al. A new procedure for porous material characterization. *International Journal of Science, Technology and Society*, Science Publishing Group, v. 5, n. 4, p. 131, 2017. Citado 2 vezes nas páginas viii e 45.
- CHÁVEZ, G. M. et al. Optical granulometric analysis of sedimentary deposits by color segmentation-based software: Optgran-cs. *Computers and Geosciences*, v. 85, p. 248 – 257, 2015. ISSN 0098-3004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300415300480>>. Citado 3 vezes nas páginas viii, 39 e 40.
- DELESSE, M. Procédé mécanique pour déterminer la composition des roches. *CR Acad. Sci. Paris*, v. 25, p. 544–545, 1847. Citado na página 8.
- DUVAL, L. et al. Image processing for materials characterization: Issues, challenges and opportunities. In: IEEE. *Image Processing (ICIP), 2014 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2014. p. 4862–4866. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 53.
- EISENBEISSER. *Metallografie Ausbildung Berufsausbildung und Fachabitur am Lette-Verein in Berlin*. 2015. Access date: 26 junho 2015. Disponível em: <www.metallografie-ausbildung.de>. Citado 5 vezes nas páginas vii, 20, 21, 23 e 24.
- EN-10263-4. *Steel rod, bars and wire for cold heading and cold extrusion - Part 4: Technical delivery conditions for steels for quenching and tempering*. [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://www.en-standard.eu>>. Citado 2 vezes nas páginas 99 e 108.
- FERNANDES, M. D.; MATLAKHOVA, L. A. *Análise de estrutura e propriedades mecânicas do ferro fundido nodular com 0,058% de sílica em função da temperatura e tempo no processo de fundição*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 2018. Citado na página 110.
- FERREIRA, T.; RASBAND, W. ImageJ user guide. *ImageJ/Fiji*, v. 1, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 42, 43 e 44.
- FILHO, O. M.; NETO, H. V. *Processamento digital de imagens*. [S.l.]: Brasport, 1999. Citado 8 vezes nas páginas 19, 20, 21, 22, 23, 24, 27 e 28.
- FOWLER, M. *Patterns of enterprise application architecture*. [S.l.]: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2002. Citado na página 37.

- FRIEL, J. *Practical Guide to Image Analysis*. ASM International, 2000. ISBN 9781615032372. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=8yPBH36M2BQC>>. Citado 11 vezes nas páginas 5, 8, 9, 11, 12, 13, 18, 19, 29, 30 e 112.
- GOKHALE, A. M. Quantitative characterization and representation of global microstructural geometry. ASM International, 2013. Citado na página 12.
- GOMES, O. D. F. M.; PACIORNIK, S.; BROCCHI, E. D. A. *Microscopia co-localizada: novas possibilidades na caracterização de minérios*. Tese (Doutorado) — Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2007. Citado 3 vezes nas páginas vii, 18 e 19.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. C. *Processamento digital de imagens*. [S.l.]: Pearson Educación, 2009. Citado 14 vezes nas páginas vii, viii, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 e 28.
- GOOGLE. *Google*. 2018. Access date: 23 julho 2018. Disponível em: <<https://www.google.com.br/>>. Citado na página 38.
- GOOGLE. *Google Acadêmico*. 2018. Access date: 23 julho 2018. Disponível em: <<https://scholar.google.com.br/>>. Citado na página 38.
- GRANDE, J. C. Principles of image analysis. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, Springer, v. 1, n. 5, p. 227, out. 2012. ISSN 2192-9270. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s13632-012-0037-5>>. Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 28.
- GROVE, C.; JERRAM, D. A. jpor: An imagej macro to quantify total optical porosity from blue-stained thin sections. *Computers and Geosciences*, Elsevier, v. 37, n. 11, p. 1850–1859, 2011. Citado 3 vezes nas páginas viii, 45 e 46.
- GUIMARÃES, E. R. S.; SILVA, A. G. P. da. Quanto, um software para auxiliar a caracterização de imagens. 2016. Citado 3 vezes nas páginas viii, 40 e 41.
- HEILBRONNER, R.; BARRETT, S. *Image analysis in earth sciences: microstructures and textures of earth materials*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013. Citado 10 vezes nas páginas viii, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 27, 28 e 29.
- ISO-945. *Microstructure of cast irons. Part 1: Graphite classifications by visual analysis*. [S.l.], 2008. Citado 10 vezes nas páginas xi, 69, 71, 72, 73, 87, 94, 96, 97 e 112.
- LAMPRECHT, M. R.; SABATINI, D. M.; CARPENTER, A. E. Cellprofiler™: free, versatile software for automated biological image analysis. *Biotechniques*, Future Science, v. 42, n. 1, p. 71–75, 2007. Citado 3 vezes nas páginas viii, 38 e 40.
- LATAŁA, Z.; WOJNAR, L. Computer-aided versus manual grain size assessment in a single phase material. *Materials characterization*, Elsevier, v. 46, n. 2-3, p. 227–233, 2001. Citado 6 vezes nas páginas viii, 1, 29, 30, 47 e 48.
- LOBER, D. *Mikroskopische world of iron and steel*. 2018. Access date: 19 jun. 2018. Disponível em: <<http://www.metallograf.de/images/Jpg-K/5408/5408-010.jpg>>. Citado 13 vezes nas páginas ix, xii, 63, 64, 99, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107 e 108.
- MANNHEIMER, W. *Microscopia dos Materiais: Uma Introdução*. E-Papers, 2002. ISBN 9788587922540. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=xoncyIiUeeYC>>. Citado 3 vezes nas páginas 5, 6 e 11.

MATLAKHOVA, L. A.; PESSANHA, E. M. R.; CARVALHO, E. A. de. Mechanical behavior and structural analysis of a tini alloy annealed in the 300 to 500 c range and air cooled. In: TRANS TECH PUBL. *Materials Science Forum*. [S.l.], 2016. v. 869, p. 497–502. Citado na página 69.

MEC. *Portal de Periódicos Capes*. 2018. Access date: 23 julho 2018. Disponível em: <<http://www-periodicos-capes-gov-br.ez135.periodicos.capes.gov.br/>>. Citado na página 38.

MIYAMOTO, K. *Particle Number and Sizes Estimated from Sections*. [S.l.]: KTK Scientific Publishers, 1994. ISBN 4-87677-108-1. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 11.

NIH. *ImageJ Plugins*. 2018. Access date: 19 jun. 2018. Disponível em: <<https://imagej.nih.gov/ij/plugins/>>. Citado na página 111.

O'FLAHERTY, S.; EDWARDS, J. Digital imaging: A powerful quality tool for materials analysis-digital imaging analysis can derive enhanced information from a material's microstructure compared with traditional microscopy. *Advanced Materials and Processes*, v. 169, n. 2, p. 19, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

PABST, W.; GREGOROVA, E.; UHLIROVA, T. Microstructure characterization via stereological relations — a shortcut for beginners. *Materials Characterization*, v. 105, p. 1 – 12, 2015. ISSN 1044-5803. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1044580315001291>>. Citado 3 vezes nas páginas 8, 9 e 11.

PEDRINI, H.; SCHWARTZ, W. R. *Análise de imagens digitais: princípios, algoritmos e aplicações*. [S.l.]: Thomson Learning, 2008. Citado 6 vezes nas páginas 17, 19, 20, 21, 22 e 26.

PESSANHA, E. M. R.; MATLAKHOVA, L. A. *Influência do tempo de vazamento até 45 min e dos teores de silício, fósforo e titânio na estrutura e propriedades mecânicas do ferro fundido nodular*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro(UENF), 2016. Disponível em: <<http://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Tese-de-Doutorado-Parcial-Engenharia-e-Ci%C3%A4ncia-dos-Materiais-Everton-Maic-Rangel-Pessanha-2016.pdf>>. Citado na página 69.

PRAKASAN, N. *Quantitative metallography*. 2013. Access date: 23 julho 2018. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/N.Prakasan/quantitative-metallography>>. Citado 2 vezes nas páginas vii e 15.

ROSIWAL, A. Über geometrische gesteinsanalysen. ein einfacher weg zur ziffer-mässigen feststellung des quantitativsverhältnisses der mineralbestandtheile gemengter gesteine. *Verhandl. der KK Geol.(Reichsanstalt, 1898)*, 1898. Citado na página 8.

RUEDEN, C. *ImageJ*. 2017. Access date: 30 julho 2018. Disponível em: <<https://imagej.net/ImageJ/History>>. Citado 2 vezes nas páginas viii e 44.

RUEDEN, C. T. et al. Imagej2: Imagej for the next generation of scientific image data. *BMC bioinformatics*, v. 18, p. 529, nov. 2017. ISSN 1471-2105. Citado 3 vezes nas páginas viii, 42 e 43.

RUSS, J. *Practical Stereology*. Springer, 1986. ISBN 9780306424601. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=B5WdhhIvJHAC>>. Citado 5 vezes nas páginas vii, 5, 6, 8 e 11.

- SALES, D. d. S.; SILVA, A. G. P. da. *Desenvolvimento de um software livre para análise de imagens com estereologia quantitativa*. Tese (Doutorado), 2014. Citado 2 vezes nas páginas [viii](#) e [39](#).
- SCHINDELIN, J. et al. Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nature methods*, v. 9, p. 676–682, jun. 2012. ISSN 1548-7105. Citado 2 vezes nas páginas [38](#) e [42](#).
- SCHINDELIN, J. et al. The imagej ecosystem: An open platform for biomedical image analysis. *Molecular reproduction and development*, v. 82, p. 518–529, 2015. ISSN 1098-2795. Citado na página [42](#).
- SCHNEIDER, C. A.; RASBAND, W. S.; ELICEIRI, K. W. Nih image to imagej: 25 years of image analysis. *Nature methods*, v. 9, p. 671–675, jul. 2012. ISSN 1548-7105. Citado 4 vezes nas páginas [38](#), [42](#), [43](#) e [44](#).
- SILVA, A. G. P. da. *Introdução à estereologia*. 2007. Access date: 22 julho 2018. Disponível em: <<http://aulas.e-agps.info/estereologia/estereologia.pdf>>. Citado 3 vezes nas páginas [vii](#), [11](#) e [12](#).
- SILVA, F. d. A.; NAZAR, A. M. M. Aplicação das técnicas de processamento digital de imagens na caracterização quantitativa de materiais compósitos. *Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas*, 2000. Citado na página [1](#).
- SOMMER, C. et al. Ilastik: Interactive learning and segmentation toolkit. In: *ISBI*. [S.l.: s.n.], 2011. v. 2, n. 5, p. 8. Citado 4 vezes nas páginas [viii](#), [38](#), [41](#) e [42](#).
- SOUZA, L. d. S. et al. Estudo de macro- e microestrutura e propriedades mecânicas de um ferro fundido nodular solidificado em dois tempos após o tratamento de nodulização. In: *IX Congresso Fluminense de Iniciação Científica e Tecnológica*. [S.l.: s.n.], 2017. Citado na página [110](#).
- STALLMAN, R. M. *Free Software Foundation*. 2004. Access date: 23 julho 2018. Disponível em: <<https://www.fsf.org/about/what-is-free-software>>. Citado na página [38](#).
- THOMPSON, E. Quantitative microscopic analysis. *J. Geology*, p. 193–222, 1930. Citado na página [9](#).
- THORNTON, K. et al. Computational materials science and engineering education: A survey of trends and needs. *JOM*, Springer, v. 61, n. 10, p. 12, 2009. Citado na página [1](#).
- TIDWELL, J. *Designing interfaces: Patterns for effective interaction design*. [S.l.]: "O'Reilly Media, Inc.", 2010. Citado na página [37](#).
- UNDERWOOD, E. E. *Quantitative stereology I*. [S.l.]: Addison-Wesley Educational Publishers Inc., 1970. ISBN 978-020107650-9. Citado 2 vezes nas páginas [5](#) e [11](#).
- VIDAL, D. F.; MATLAKHOVA, L. A. *Alterações Estruturais e Propriedades Mecânicas de Ferros Fundidos Nodulares com Teor de Mg Variável, em Função do Tempo e da Temperatura de Vazamento*. Tese (Doutorado), 2017. Disponível em: <<http://uenf.br/posgraduacao-engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Tese-completa-Douglas-Vidal-comprimida.pdf>>. Citado 30 vezes nas páginas [viii](#), [ix](#), [x](#), [xi](#), [26](#), [53](#), [67](#), [69](#), [70](#), [71](#), [78](#), [80](#), [81](#), [82](#), [83](#), [84](#), [85](#), [86](#), [87](#), [88](#), [89](#), [90](#), [91](#), [92](#), [93](#), [94](#), [95](#), [96](#), [97](#) e [110](#).
- WANG, N. et al. Effect of grain size on mechanical properties of nanocrystalline materials. *Acta Metallurgica et Materialia*, Elsevier, v. 43, n. 2, p. 519–528, 1995. Citado na página [1](#).

WEJRZANOWSKI, T. et al. Image based analysis of complex microstructures of engineering materials. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, Versita, v. 18, n. 1, p. 33–39, 2008. Citado 5 vezes nas páginas [viii](#), [ix](#), [27](#), [28](#) e [49](#).

WEST, M. J. *Basic stereology for biologists and neuroscientists*. [S.l.]: Cold Spring Harbor Laboratory Press New York:, 2012. Citado 4 vezes nas páginas [vii](#), [8](#), [10](#) e [11](#).

WOJNAR, L. *Image analysis: applications in materials engineering*. [S.l.]: Crc Press, 1998. Citado 9 vezes nas páginas [1](#), [17](#), [18](#), [19](#), [20](#), [21](#), [22](#), [28](#) e [29](#).

WOJNAR, L. et al. Application of astm standards in quantitative microstructure evaluation. *Czasopismo Techniczne*, Portal Czasopism Naukowych Ejournal. eu, v. 2016, n. Mechanika Zeszyt 4-M 2016, p. 41–46, 2016. Citado 2 vezes nas páginas [xiii](#) e [31](#).