

DESENVOLVIMENTO DE UM *SOFTWARE* LIVRE PARA ANÁLISE
DE IMAGENS COM ESTEREOLOGIA QUANTITATIVA

DIEGO DA SILVA SALES

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

AGOSTO – 2014

DESENVOLVIMENTO DE UM *SOFTWARE* LIVRE PARA ANÁLISE
DE IMAGENS COM ESTEREOLOGIA QUANTITATIVA

DIEGO DA SILVA SALES

Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção de título de Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Angelus Giuseppe Pereira da Silva

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ

AGOSTO – 2014

DESENVOLVIMENTO DE UM *SOFTWARE* LIVRE PARA ANÁLISE DE IMAGENS COM ESTEREOLOGIA QUANTITATIVA

DIEGO DA SILVA SALES

Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para obtenção de título de Doutor em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Aprovada em 05/08/2014.

Comissão Examinadora:

Prof. Henrique Rego Monteiro da Hora (Dr., Engenharia de Produção) – IFF

Prof. Mark Douglas de Azevedo Jacyntho (Dr., Informática) - IFF

Prof. Rogerio Atem de Carvalho (Dr., Ciências de Engenharia) - IFF

Prof. Eduardo Atem de Carvalho (Dr., Engenharia Mecânica) - UENF

Prof. Angelus Giuseppe Pereira da Silva (Dr., Ciências Técnicas) - UENF -
Orientador

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha avó Sirley (in memoriam) que desde o meu primeiro dia de vida lutou incondicionalmente pela minha felicidade e com certeza está bem próxima de Deus ajudando a guiar meus passos, ao meu filho Afrânio e a minha esposa Camila.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, força e sabedoria para enfrentar todos os obstáculos na minha vida e pelas pessoas iluminadas que coloca em meu caminho.

Ao meu filho Afrânio e minha esposa Camila, por todo amor, carinho, apoio e compreensão nesses anos.

Ao meu pai José Paulo e minha mãe Cláudia Márcia pelo amor, carinho, dedicação, educação e conselhos sempre que precisei.

Aos meus irmãos Douglas, Davi, José Paulo, Marcely e Natália pessoas que tenho o prazer de conviver e aprender lições de vida a cada dia, pela alegria constante, o orgulho e principalmente por toda união nos momentos mais difíceis de nossas vidas.

As minhas afilhadas Maria Júlia e Luíza pelo amor, carinho e alegria nos momentos certos.

Ao meu sogro Cláudio e minha sogra Silvanira por todo amor, carinho, compreensão e principalmente por tudo que abriram mão por mim, Afrânio e Camila.

Ao meu orientador professor Angelus Giuseppe, uma pessoa que desde o começo acreditou no meu potencial e me incentivou.

Aos meus alunos bolsistas Higo Oliveira e Alfredo Mattos do Instituto Federal Fluminense *campus* Bom Jesus, por toda ajuda neste trabalho, pelos conselhos, bate-papos e principalmente pelas boas risadas.

Aos amigos da Coordenação de Informática e da Diretoria de Tecnologia da Informação do Instituto Federal Fluminense *campus* Bom Jesus, em especial aos professores Henrique da Hora e Ianne Nogueira e ao técnico Gabriel Rocha.

Aos amigos da Coordenação de Informática do Instituto Federal Fluminense *campus* Campos – Centro, em especial aos professores Phillipe

Leal, Fernando Carvalho, Francisco Freitas, Rogério Avellar, Mark Douglas e Rogério Atem. Agradeço muito pelas oportunidades, pelos ensinamentos, pelos incentivos e principalmente pelo carinho que sempre dedicaram a mim.

A Universidade Estadual do Norte Fluminense / Laboratório de Materiais Avançados pela oportunidade de realizar mais um grande sonho.

A todos que ajudaram direta e indiretamente na conclusão deste trabalho.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Componentes básicos do MO (MOREIRA, 2012).	35
Figura 2.2 – Esquema de um MO (MAURER, 2005).....	37
Figura 2.3 – a) Preparação. b) Imagem da objetiva. c) Imagem da ocular (Adaptado de MOREIRA, 2012).	38
Figura 2.4 – a) Amostra tridimensional contendo elementos hipotéticos de volume, linhas e superfície. b) Plano de corte com as regiões interceptadas (Adaptado de RUSS; DEHOFF, 2000).	41
Figura 2.5 – Fluxograma de etapas de preparação e caracterização de imagens (DA SILVA, 2007).....	42
Figura 2.6 – Plano de corte da imagem de amostra.....	44
Figura 2.7 – Malha de pontos.....	45
Figura 2.8 – Malha de pontos realizada através da interseção de linhas horizontais com verticais.	46
Figura 2.9 – Malha de linhas horizontais.....	47
Figura 2.10 – Malha de linhas cruzadas.....	48
Figura 2.11 – Plano de corte com áreas das seções da fase α contornadas na cor preta.	50
Figura 2.12 – Áreas de seções parcialmente no plano de corte numeradas na cor azul.....	51
Figura 2.13 – Plano de corte com pontos que incidiram na fase α na cor vermelha e os pontos que incidiram na fase β na cor preta.	52
Figura 2.14 – Plano de corte com MLH na cor preta e segmentos de retas que interceptaram a fase α na cor vermelha.	54
Figura 2.15 – Plano de corte com intercepto linear parcialmente no plano numerado na cor azul.....	55

Figura 2.16 – Plano de corte com MLC na cor preta e os pontos que interceptaram a fase α na cor azul.	56
Figura 2.17 – Plano de corte com MLC na cor preta, com os pontos que interceptaram a fase α na cor azul e com os pontos que incidiram na fase α na cor vermelha.....	58
Figura 2.18 – Plano de corte com os pontos contornados na cor preta.	59
Figura 2.19 – Esquema de correlação das subáreas da CG (GOMES; VELHO, 2003).	61
Figura 2.20 – Representação de uma imagem digital monocromática bidimensional (QUEIROZ; GOMES, 2006).....	62
Figura 2.21 – Gradação com 256 níveis de intensidade (GOMES; VELHO, 2003).	63
Figura 2.22 – a) Imagem com canal vermelho (R). b) Imagem com canal verde (G). c) Imagem com canal azul (B). d) Imagem composta pela combinação dos três canais (RGB) (Adaptado de DIOGO, 2011).	64
Figura 2.23 – Cores primárias RGB (Adaptado de DIOGO, 2011).....	65
Figura 2.24 – Estrutura do processamento de imagens digitais (ALVES, 2006).	66
Figura 2.25 – a) Imagem original. b) Imagem com o brilho aumentado (Adaptado de MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).	69
Figura 2.26 – a) Imagem original. b) Imagem com o contraste aumentado (Adaptado de MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).	70
Figura 2.27 – a) Imagem original. b) Imagem segmentada (Adaptado de SANTOS; MADEIRA, 2013).	70
Figura 2.28 – Máscara para o operador de Sobel (MATIAS, 2007).	73
Figura 2.29 – a) Imagem original. b) Imagem com aplicação do operador de Sobel (GONZALEZ; WOODS, 2002).....	73
Figura 2.30 – Máscara para o operador Laplaciano (MATIAS, 2007).	74

Figura 2.31 – a) Imagem original. b) Imagem com aplicação do operador Laplaciano (MATIAS, 2007).	74
Figura 2.32 – a) Imagem original. b) Fundo da imagem. c) Objeto da imagem (Adaptado de MELLO, 2013b).....	75
Figura 2.33 – Algoritmo de limiarização com L igual a 127 (Adaptado de MELLO, 2013b).....	76
Figura 2.34 – a) Imagem original. b) Imagem com aplicação do algoritmo de limiarização com L igual a 127 (MELLO, 2013b).....	77
Figura 2.35 – Algoritmo de recorte (faixa de corte) para L entre 50 e 100 exclusive (Adaptado de MELLO, 2013b).....	77
Figura 2.36 – a) Imagem original. b) Imagem com aplicação do algoritmo de limiarização (faixa de corte) para L entre 50 e 100 exclusive (MELLO, 2013b).	78
Figura 2.37 – a) Conjunto A . b) Conjunto B . c) Conjunto resultante C (Adaptado de LIMA, 2009).....	80
Figura 2.38 – a) Imagem original. b) imagem após aplicação da dilatação binária (WANGENHEIM, 2002).	80
Figura 2.39 – a) Conjunto A . b) Conjunto B . c) Conjunto resultante C (Adaptado de LIMA, 2009).....	81
Figura 2.40 – a) Imagem original. b) imagem após aplicação da erosão binária (WANGENHEIM, 2002).....	82
Figura 2.41 – a) Matriz da imagem A . b) Matriz da imagem B . c) Matriz resultante da adição da matriz da imagem A com B (Adaptado de CÂMARA-CHÁVEZ, 2013).....	83
Figura 2.42 – a) Imagem A . b) Imagem B . c) Adição da imagem A com B . d) Subtração da imagem A com B (Adaptado de CÂMARA-CHÁVEZ, 2013).	84
Figura 2.43 – a) Imagem original. b) Imagem resultante com expansão de um <i>pixel</i> em quatro (zoom in de 2x) (Adaptado de MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).	85

Figura 2.44 – a) Imagem original. b) Imagem ampliada (<i>zoom in</i>) de duas vezes. c) Imagem reduzida (<i>zoom out</i>) de duas vezes (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).	86
Figura 2.45 – a) Imagem original. b) Imagem rotacionada em 90° na direção horária (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).....	87
Figura 2.46 – Exemplo de primitivas gráficas (Adaptado de CAVALCANTI, 2013).	88
Figura 2.47 – Pontos envolvidos na seleção do próximo <i>pixel</i> (Adaptado de SCHNEIDER, 2001).	90
Figura 2.48 – Pontos que formam uma polilinha (Adaptado de CAVALCANTI, 2013).	91
Figura 2.49 – Pontos que compõem um polígono (Adaptado de CAVALCANTI, 2013).	91
Figura 2.50 – Simetria dos pontos no círculo (SCHNEIDER, 2001).....	92
Figura 2.51 – Pontos usados na escolha do <i>pixel</i> (SCHNEIDER, 2001).....	93
Figura 3.1 – Fluxograma da desenvolvimento do <i>software</i>	94
Figura 3.2 – Modelo da câmera HD utilizada: Webcam Microsoft LifeCam Cinema (MICROSOFT, 2013).	97
Figura 3.3 – Metodologia de desenvolvimento do <i>software</i> (Adaptado de CUSUMANO; YOFFIE, 1999).	98
Figura 3.4 – Página para <i>download</i> do <i>software</i>	101
Figura 3.5 – Canal de comunicação entre usuários externos e o desenvolvedor do <i>software</i>	102
Figura 3.6 – Imagem de amostra utilizada para validação do Goitacá.	105
Figura 3.7 – Tela de definição do espaçamento no Goitacá.	106
Figura 3.8 – Amostra bifásica com fases ferrita (preta) e austenita (branca) (Adaptado de DE MÉLO; DOS SANTOS; MAGNABOSCO, 2008).	108
Figura 4.1 – Interface do <i>software</i> Goitacá.....	110
Figura 4.2 – Imagem com anotações gráficas incluídas pelo Goitacá.	114

Figura 4.3 – Tela de ajuste de brilho e contraste no Goitacá.	115
Figura 4.4 – Imagem com mais 70% de brilho e contraste ajustados pelo Goitacá.	115
Figura 4.5 – Tela de Limiarização no Goitacá.	116
Figura 4.6 – Imagem binarizada através dos limiares definidos pelo usuário no Goitacá.	117
Figura 4.7 – Imagem com filtro de erodir aplicado pelo Goitacá.	118
Figura 4.8 – Imagem com filtro de dilatar aplicado pelo Goitacá.	119
Figura 4.9 – Definição de escala no Goitacá.	120
Figura 4.10 – Imagem com escala definida pelo Goitacá.	121
Figura 4.11 – Imagem com medição de comprimento entre dois pontos exportada pelo Goitacá.	122
Figura 4.12 – Imagem com medição de áreas de região exportadas pelo Goitacá.	123
Figura 4.13 – Áreas de seções identificadas pelo Goitacá.	126
Figura 4.14 – A_A calculada no Goitacá.	127
Figura 4.15 – Pontos que incidem na fase de interesse identificados pelo Goitacá.	128
Figura 4.16 – P_P calculada no Goitacá.	129
Figura 4.17 – Interceptos lineares que incidem na fase de interesse identificados pelo Goitacá.	131
Figura 4.18 – L_L calculada no Goitacá.	132
Figura 4.19 – Fronteiras interceptadas pelas linhas horizontais e verticais no Goitacá.	133
Figura 4.20 – S_v calculada no Goitacá.	134
Figura 4.21 – Pontos que incidiram na fase de interesse e fronteiras que interceptaram a fase de interesse no Goitacá.	136
Figura 4.22 – S_{VP} calculada no Goitacá.	137

Figura 4.23 – Pontos identificados pelo Goitacá.	138
Figura 4.24 – L_V calculado no Goitacá.	139
Figura 4.25 – Identificação das áreas de seções da fase de austenita.	140
Figura 4.26 – Identificação dos pontos que incidem na fase de austenita.	141
Figura 4.27 – Identificação dos interceptos lineares que incidem na fase de austenita.....	142
Figura 4.28 – Identificação das fronteiras interceptadas pelas linhas horizontais e verticais.	143
Figura 4.29 – Identificação dos pontos que incidiram na fase de austenita e fronteiras que interceptaram a fase de austenita.	144
Figura 4.30 – Identificação dos pontos da fase de austenita.	145

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Comparação dos resultados dos cálculos de A_A	128
Tabela 4.2 – Comparação dos resultados dos cálculos da P_p	130
Tabela 4.3 – Comparação dos resultados dos cálculos da L_L	133
Tabela 4.4 – Comparação dos resultados dos cálculos de S_v	135
Tabela 4.5 – Comparação dos resultados dos cálculos de S_{VP}	137
Tabela 4.6 – Comparação dos resultados dos cálculos de L_v	139

LISTA DE QUADROS

Quadro 1.1 – Principais funcionalidades dos <i>softwares</i> de análise de imagem acoplados a microscópios.	28
Quadro 1.2 – Pesquisa de ineditismo na base de conhecimento <i>ProQuest - Engineered Materials Abstracts</i>	31
Quadro 1.3 – Pesquisa de ineditismo na base de conhecimento <i>Scopus</i>	31
Quadro 2.1 – Características dos tipos mais simples de microscopia (Adaptado PACIORNIK, 2009).	34
Quadro 2.2 – Componentes mecânicos do MO (LINS; ALÉCIO, 2014; MOREIRA, 2012).	36
Quadro 2.3 – Componentes óticos do MO (LINS; ALÉCIO, 2014; MOREIRA, 2012).	36
Quadro 2.4 – Etapas com destaque de preparação e caracterização de imagens.....	43
Quadro 2.5 – Principais parâmetros da EQ (Adaptado de PADILHA, 2007)...	44
Quadro 2.6 – Algumas áreas e subáreas de atuação da CG (Adaptado de CAVALCANTI, 2012).....	60
Quadro 2.7 – Sistema de cores primárias e secundárias (DIOGO, 2011).....	64
Quadro 2.8 – Operadores diferencias com suas respectivas descrições (Adaptado de NOGUEIRA, 2013).....	72
Quadro 3.1 – Características da câmera HD utilizada (Adaptado de MICROSOFT, 2013).....	97
Quadro 3.2 – Funcionalidades implementadas na primeira etapa do <i>software</i>	100
Quadro 3.3 – Funcionalidades implementadas na segunda etapa do <i>software</i>	103

Quadro 3.4 – Funcionalidades implementadas na terceira etapa do <i>software</i>	104
Quadro 3.5 – Parâmetros de definição da escala.	105
Quadro 4.1 – Composição da barra de menus do Goitacá.	110
Quadro 4.2 – Lista de câmeras digitais testadas pelo Goitacá.	112

LISTA DE SIGLAS

Sigla	Significado
Å	Angstrom
µm	Micrômetro
\bar{A}	Área de Seção Média
A_A	Fração de Área
BSD	<i>Berkeley Software Distribution</i>
CG	Computação Gráfica
EQ	Estereologia Quantitativa
HD	<i>High Definition</i>
ID	Imagem Digital
LGPL	<i>Lesser General Public License</i>
\bar{L}	Comprimento de Intercepto Linear Médio
L_L	Fração Linear
L_V	Comprimento de Intercepto Linear por Unidade de Volume-Teste
MET	Microscopia Eletrônica de Transmissão
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MLC	Malha de Linhas Cruzadas
MLH	Malha de Linhas Horizontais
MO	Microscópio Ótico
MOT	Microscopia Ótica
MP	Malha de Pontos
MPP	Microscopia de Ponta de Prova
N_A	Número de Objetos Interceptados por Unidade de Área-Teste

NM	Nanômetro
N_V	Número de Objetos por Unidade de Volume-Teste
OpenCV	<i>Open Source Computer Vision</i>
P_A	Número de Pontos por Unidade de Área-Teste
PG	Primitivas Gráficas
P_P	Fração de Ponto
PI	Processamento de Imagens
RGB	<i>Color System Red Green Blue</i>
S_V	Área Superficial por Unidade de Volume-Teste
S_{VP}	Área Superficial Específica
V_V	Fração Volumétrica

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	v
AGRADECIMENTOS	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE QUADROS	xv
LISTA DE SIGLAS	xvii
SUMÁRIO.....	xix
RESUMO.....	xxv
ABSTRACT	xxvi
1 INTRODUÇÃO.....	27
1.1 JUSTIFICATIVA	29
1.2 OBJETIVOS	29
1.2.1 Objetivo geral	29
1.2.2 Objetivos específicos.....	30
1.3 INEDITISMO	30
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	32
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	33
2.1 MICROSCOPIA.....	33
2.1.1 Microscópio ótico.....	35

2.1.1.1	Vídeo-microscopia	38
2.1.2	Microscopia quantitativa	39
2.2	ESTEREOLOGIA QUANTITATIVA	39
2.2.1	Malhas.....	44
2.2.1.1	Malha de pontos	45
2.2.1.2	Malha de linhas horizontais e cruzadas	46
2.2.2	Fração volumétrica.....	48
2.2.2.1	Fração de área.....	49
2.2.2.2	Fração de ponto.....	51
2.2.2.3	Fração linear	53
2.2.3	Área superficial por unidade de volume-teste	55
2.2.4	Área superficial específica.....	56
2.2.5	Comprimento de intercepto linear por unidade de volume- teste	58
2.3	COMPUTAÇÃO GRÁFICA.....	59
2.3.1	Imagem digital	62
2.3.2	Processamento de imagens	65
2.3.3	Técnicas de transformações de imagens	67
2.3.3.1	Brilho.....	68
2.3.3.2	Contraste	69
2.3.4	Segmentação	70
2.3.4.1	Segmentação por descontinuidade.....	71

2.3.4.2	Segmentação por similaridade	75
2.3.5	Morfologia matemática	78
2.3.5.1	Morfologia matemática binária	79
2.3.6	Transformações geométricas	82
2.3.6.1	Operações algébricas	82
2.3.6.2	Ampliação e redução	84
2.3.6.3	Rotação	86
2.3.6.4	Primitivas gráficas	88
3	METODOLOGIA	94
3.1	RECURSOS UTILIZADOS	95
3.1.1	Qt <i>software</i>	95
3.1.2	OpenCV	96
3.1.3	Câmera HD	96
3.2	ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DO <i>SOFTWARE</i>	98
3.2.1	Primeira etapa	99
3.2.1.1	Definição da interface	99
3.2.1.2	Definição de funcionalidades	99
3.2.1.3	Avaliação interna (versão alfa)	100
3.2.1.4	Distribuição (versão beta)	101
3.2.2	Segunda etapa	103
3.2.2.1	Definição de funcionalidades	103

3.2.3	Terceira etapa	103
3.2.3.1	Definição de funcionalidades	103
3.3	VALIDAÇÃO DO SOFTWARE	104
3.4	ESTUDO DE CASO	107
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	109
4.1	APRESENTAÇÃO DO SOFTWARE	109
4.1.1	Interface do <i>software</i>	109
4.1.2	Vídeo-microscopia.....	112
4.1.3	Anotações gráficas.....	113
4.1.4	Ajustes.....	114
4.1.5	Segmentações	116
4.1.6	Morfologia matemática	117
4.1.7	Escala.....	119
4.1.8	Medições	121
4.1.9	Estereologia quantitativa	123
4.2	VALIDAÇÃO DO SOFTWARE	125
4.2.1	Fração de área (A_A).....	125
4.2.2	Fração de pontos (P_P)	128
4.2.3	Fração linear (L_L).....	130
4.2.4	Área superficial por unidade de volume-teste (S_V).....	133
4.2.5	Área superficial específica (S_{VP}).....	135

4.2.6	Comprimento de interceptos lineares por unidade de volume- teste (L_V)	138
4.3	ESTUDO DE CASO	140
4.3.1	Fração de área (A_A).....	140
4.3.2	Fração de pontos (P_P)	141
4.3.3	Fração linear (L_L).....	141
4.3.4	Área superficial por unidade de volume-teste (S_V).....	142
4.3.5	Área superficial específica (S_{VP}).....	143
4.3.6	Comprimento de intercepto linear por unidade de volume- teste (L_V)	144
5	CONCLUSÃO	147
5.1	QUANTO AOS OBJETIVOS	147
5.2	QUANTO AO TRABALHO REALIZADO	147
5.3	QUANTO AOS TRABALHOS FUTUROS.....	148
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	149
	APÊNDICE A - ALGORITMO DE CONTAGEM DE TANGÊNCIA DE FRONTEIRAS INTERCEPTADAS USADO NAS MEDIÇÕES DE ÁREA SUPERFICIAL POR UNIDADE DE VOLUME-TESTE E ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA.....	159
	APÊNDICE B - ÁREA DE SEÇÕES OBTIDAS PELO <i>SOFTWARE</i> GOITACÁ	162
	APÊNDICE C - ÁREAS DE SEÇÕES OBTIDAS PELO MÉTODO MANUAL.	163
	APÊNDICE D - PONTOS QUE INCIDEM NA FASE DE INTERESSE OBTIDOS PELO <i>SOFTWARE</i> GOITACÁ	164

APÊNDICE E - PONTOS QUE INCIDEM NA FASE DE INTERESSE OBTIDOS PELO MÉTODO MANUAL	165
APÊNDICE F - INTERCEPTOS LINEARES OBTIDOS PELO <i>SOFTWARE</i> GOITACÁ	166
APÊNDICE G - INTERCEPTOS LINEARES OBTIDOS PELO MÉTODO MANUAL	167
APÊNDICE H - FRONTEIRAS INTERCEPTADAS PELAS LINHAS HORIZONTAIS OBTIDAS PELO <i>SOFTWARE</i> GOITACÁ	168
APÊNDICE I - FRONTEIRAS INTERCEPTADAS PELAS LINHAS VERTICAIS OBTIDAS PELO <i>SOFTWARE</i> GOITACÁ.....	169
APÊNDICE J - FRONTEIRAS INTERCEPTADAS PELAS LINHAS HORIZONTAIS OBTIDAS PELO MÉTODO MANUAL.....	170
APÊNDICE K - FRONTEIRAS INTERCEPTADAS PELAS LINHAS VERTICAIS OBTIDAS PELO MÉTODO MANUAL	171
APÊNDICE L - ÁREA DE SEÇÕES DA AMOSTRA DO ESTUDO DE CASO	172
APÊNDICE M - PONTOS QUE INCIDEM NA FASE DE INTERESSE DA AMOSTRA DO ESTUDO DE CASO	174
APÊNDICE N - INTERCEPTOS LINEARES DA AMOSTRA DO ESTUDO DE CASO	176
APÊNDICE O - FRONTEIRAS INTERCEPTADAS PELAS LINHAS HORIZONTAIS DA AMOSTRA DO ESTUDO DE CASO	179
APÊNDICE P - FRONTEIRAS INTERCEPTADAS PELAS LINHAS VERTICAIS DA AMOSTRA DO ESTUDO DE CASO	182

RESUMO

O uso das câmeras digitais acopladas a microscópios óticos impulsionou o uso de *softwares* para análises de imagens. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um *software* de análise de imagens, denominado Goitacá, que incorpora os principais recursos presentes em *softwares* para estes fins, de distribuição livre e proprietária. Além destes recursos considerados comuns, o *software* proposto conta ainda com o recurso de vídeo-microscopia e recursos de estereologia quantitativa: como fração de área, fração de ponto, fração linear, área superficial por unidade de volume-teste, área superficial específica e comprimento de intercepto linear por unidade de volume-teste. O Goitacá foi desenvolvido para plataforma MS-Windows, contudo, os recursos utilizados em seu desenvolvimento são multiplataforma, o que lhe permite maior flexibilidade para inclusão de novos recursos e adaptações para outras plataformas. Para validação do *software* proposto, os resultados das medições e cálculos de estereologia quantitativa, obtidos pelo Goitacá, foram comparados com os resultados obtidos pelo método manual. Após estas comparações, constatou-se que não houve desvios em ordem de grandeza relevante que comprometessem as análises. Cumpre-se o objetivo do trabalho, uma vez que se apresenta um produto completo com as características almejadas, em que a metodologia de validação foi corretamente conduzida, de modo a confirmar a eficácia da ferramenta.

Palavras chave: Estereologia quantitativa, Computação gráfica, Análise de imagens, *Software* livre.

ABSTRACT

The image of digital cameras coupled to optical microscopes boosted using *software* for image analysis. This study aimed to develop on image analysis *software*, called Goitacá, which incorporates the main features present in *software* for these purposes, with free distribution and proprietary. Besides these common features, the proposed *software* also has the capability and resources of video microscopy and quantitative stereology, with as: area fraction, fraction of a point, linear fraction, surface area per unit volume test, specific surface area and length of intercept Linear unit volume test. The Goitacá was developed for MS-Windows platform, however, the resources used in its development are cross platform, allowing you greater flexibility for adding new features and adaptations for other platforms. To validate the proposed *software*, the results of the quantitative stereology measurements and calculations obtained by Goitacá were compared with the results obtained by the manual method. After these comparisons it was found that there were no significant deviations in order of magnitude that compromised, the analyzes. It's fulfilled the purpose of the work, since it presents a complete product with the desired characteristics, where the validation methodology was successfully conducted in order to confirm the tool's effectiveness.

Keywords: Quantitative stereology, Computer graphics, Image analysis, Free *software*.

1 INTRODUÇÃO

O microscópio ótico é uma ferramenta largamente utilizada na pesquisa e desenvolvimento de materiais, seu uso tornou-se ainda mais intenso com o surgimento da vídeo-microscopia. O microscópio ótico permaneceu afastado da área computacional por um longo tempo. *A priori*, as imagens eram visualizadas pelos operadores diretamente nas lentes dos microscópios e registradas em filme de celulóide. Estes microscópios se modernizaram com a difusão das câmeras digitais, que substituíram as câmeras com filme de celulóide. A partir do uso das câmeras digitais, a transferência, assim como a análise quantitativa das imagens, através das técnicas de computação gráfica, foi facilitada e este fator impulsionou o uso de *softwares* para estes fins (FAZANO, 2005; FERNANDES *et al.*, 2012; MENDES, 2005; NOGUEIRA, 2013).

Portanto, a modernização do microscópio ótico, segue duas tendências: a automatização do equipamento e a análise quantitativa das imagens visualizadas por ele (FILHO; DE OLIVEIRA, 2008).

A automatização do equipamento, de maior relevância, ocorre com o microscópio ótico acoplado a uma câmera digital conectada a um microcomputador. Este processo é denominado vídeo-microscopia. Por meio dele as imagens estáticas (fotografias) e dinâmicas (vídeos) são capturadas e armazenadas em um microcomputador (FERNANDES *et al.*, 2012; LASEROPTICS, 2014).

A análise quantitativa consiste em obter informações numéricas da imagem. Para isso, é necessária uma ferramenta eficiente capaz de transformar em números, as características dos elementos que formam a imagem. Frequentemente, esta ferramenta está atrelada a um *software* de análise de imagens (DIAS, 2008).

Os *softwares* de análise de imagens são ferramentas que variam bastante suas características. Estes *softwares* têm ampla aplicabilidade em diversas áreas da ciência como metalurgia, biologia e medicina. Cada área possui sua própria especificidade, além das características comuns a todos os *softwares* de análise de imagens. Na *Internet*, é comum encontrar estes *softwares* com distribuições livres e proprietárias. Há ainda aqueles que são comercializados pelos fabricantes dos microscópios e de câmeras digitais para microscópios. Alguns dos recursos presentes nestes *softwares* são listados no Quadro 1.1 (AMSCOPE, 2014; FAZANO, 2005; LEICA MICROSYSTEMS, 2014; NIKON INSTRUMENTS, 2014).

Funcionalidades	Descrição
Vídeo-microscopia	Captura e armazena imagens das câmeras digitais de mesmo fabricante do microscópio ótico
Edição	Filtros e ajuste de brilho e contraste na imagem
Anotações gráficas	Inclui textos, linhas e figuras geométricas na imagem
Calibração de dimensão	Relação entre o tamanho real e o tamanho em <i>pixel</i> da imagem
Medição de elementos	Mede distância entre dois pontos e áreas de regiões da imagem

Quadro 1.1 – Principais funcionalidades dos *softwares* de análise de imagem acoplados a microscópios.

Em ciência e engenharia de materiais, área que estuda a estrutura e propriedades dos materiais, uma ferramenta capaz de realizar análise quantitativa de imagens é a estereologia quantitativa. Esta é uma ferramenta matemática, baseada em geometria e probabilidade utilizada para interpretar amostras de aspectos bidimensionais em aspectos tridimensionais (DA SILVA, 2007; ESTEVES, 2011).

Na estereologia quantitativa, as medições manuais necessitam de diversas validações, uma vez que estão sujeitas a erros de fatores humanos, e isso demanda amplo trabalho e tempo. Estas medições podem ser realizadas mais fácil e precisamente por meio de *softwares* (DE MÉLO; DOS SANTOS; MAGNABOSCO, 2008; DE MOURA, 2011; ESTEVES, 2011; FAZANO, 2005, 2007; NOGUEIRA, 2013).

1.1 JUSTIFICATIVA

As ferramentas computacionais dão suporte às pesquisas acadêmicas desde longa data. A estereologia quantitativa, aplicada juntamente a computação contribui com o dinamismo e precisão, automatizando medições e eliminando erros introduzidas pelo fator humano.

Entre estas influências destacam-se: i) Espessura das linhas; ii) Imprecisão na aferição da circunferência; iii) Incerteza se o ponto está ou não dentro da fase de interesse; iv) Incerteza se a fronteira está ou não tangente a fase de interesse; v) Imprecisão na medição dos interceptos lineares e vi) Erros de arredondamentos.

A pesquisa bibliográfica realizada na seção de ineditismo identificou um nicho acadêmico ainda não explorado na ciência e engenharia de materiais, que é uma ferramenta que congregue as principais análises da estereologia quantitativa, e ainda desfrute dos benefícios de ter sua distribuição livre.

Intenciona-se com esta pesquisa desenvolver para academia o ferramental necessário para realização de diversas medições estereológicas em um único *software*, sem custos para o pesquisador.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um *software* de análise de imagens na linha de automatização do microscópio ótico. O *software* proposto é denominado Goitacá e inclui os principais recursos dos *softwares* de análise de imagens como ajustes, filtros, segmentações, morfologias matemáticas e operações algébricas. Além destes recursos, o Goitacá possui recursos de vídeo-microscopia e diversos recursos de estereologia quantitativa.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são detalhados a seguir:

- Desenvolver um *software* do gênero completamente nacional;
- Distribuir o *software* sob licença livre para permitir o melhoramento contínuo e a inclusão de novos recursos por terceiros;
- Utilizar no desenvolvimento do *software* recursos multiplataforma (*framework* Qt e a biblioteca OpenCV), para garantir a portabilidade com outros sistemas operacionais;
- Implementar recursos de vídeo-microscopia (abrangente a diversos modelos de câmeras digitais, inclusive de alta definição);
- Implementar recursos de edição de imagens como ajustes, filtros, morfologia matemática, segmentações e operações algébricas;
- Implementar recursos de estereologia quantitativa como fração de área, fração de ponto, fração linear, área superficial por unidade de volume-teste, área superficial específica e comprimento de interceptos lineares por unidade de volume-teste;
- Implementar recursos de exportação das imagens e dos resultados das medições de estereologia quantitativa em extensões multiplataforma (PNG e TXT).

1.3 INEDITISMO

O *software* desenvolvido contém diversas características que conferem ao trabalho o ineditismo exigido para o doutoramento. Entre as características, destacam-se: a iniciativa nacional, a distribuição livre, os recursos de vídeo-microscopia e de estereologia quantitativa.

Para a verificação do ineditismo, foi realizada uma pesquisa na base de conhecimento *ProQuest - Engineered Materials Abstracts*, no dia 18 de Janeiro de 2014, por apresentar critério rigoroso de qualidade, o resultado desta pesquisa pode ser observado no Quadro 1.2 (PROQUEST LLC, 2014).

Expressão da pesquisa	Resultados encontrados
"software" AND "area fraction" AND "linear fraction" AND "point fraction" AND "surface area per unit volume test" AND "specific surface area" AND "Linear intercept length per unit volume test" AND "video microscopy"	0
"software" AND "area fraction" AND "linear fraction" AND "point fraction" AND "surface area per unit volume test" AND "specific surface area" AND "Linear intercept length per unit volume test"	0
"software" AND "area fraction" AND "linear fraction" AND "point fraction" AND "surface area per unit volume test" AND "specific surface area"	0
"software" AND "area fraction" AND "linear fraction" AND "point fraction" AND "surface area per unit volume test"	0
"software" AND "area fraction" AND "linear fraction" AND "point fraction"	0

Quadro 1.2 – Pesquisa de ineditismo na base de conhecimento *ProQuest - Engineered Materials Abstracts*.

Para uma pesquisa ainda mais abrangente, a base de conhecimento *Scopus* foi consultada na data citada anteriormente e os resultados desta pesquisa podem ser visualizados no Quadro 1.3 (ELSEVIER, 2014).

Expressão da pesquisa	Resultados encontrados
TITLE-ABS-KEY("software" AND "area fraction" AND "linear fraction" AND "point fraction" AND "surface area per unit volume test" AND "specific surface area" AND "Linear intercept length per unit volume test" AND "video microscopy")	0
TITLE-ABS-KEY("software" AND "area fraction" AND "linear fraction" AND "point fraction" AND "surface area per unit volume test" AND "specific surface area" AND "Linear intercept length per unit volume test")	0
TITLE-ABS-KEY("software" AND "area fraction" AND "linear fraction" AND "point fraction" AND "surface area per unit volume test" AND "specific surface area")	0
TITLE-ABS-KEY("software" AND "area fraction" AND "linear fraction" AND "point fraction" AND "surface area per unit volume test")	0
TITLE-ABS-KEY("software" AND "area fraction" AND "linear fraction" AND "point fraction")	0

Quadro 1.3 – Pesquisa de ineditismo na base de conhecimento *Scopus*.

As pesquisas realizadas nas duas bases de conhecimentos citadas anteriormente obtiveram resultados nulos. Além destas pesquisas, o desenvolvimento do *software* adota soluções próprias para diversos problemas.

Um exemplo disso é o algoritmo de contagem de tangência das fronteiras interceptadas, detalhado no APÊNDICE A.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente capítulo descreve a introdução deste trabalho, detalhando a justificativa do mesmo, assim como seus objetivos (geral e específico), seu ineditismo e esta organização.

A revisão bibliográfica é apresentada no capítulo 2, nela a fundamentação teórica para base deste trabalho é abordada, descrevendo as técnicas de microscopia, de estereologia quantitativa e de computação gráfica utilizadas para implementação do *software* proposto.

O capítulo 3 descreve a metodologia utilizada neste trabalho, os recursos utilizados no desenvolvimento do *software*, assim como as três etapas de seu desenvolvimento e sua validação são descritos minuciosamente neste capítulo.

Os resultados e discussão são abordados no capítulo 4. Uma apresentação dos principais recursos do *software* proposto é realizada, assim como uma validação do mesmo através de uma comparação dos resultados obtidos com o método manual. Ao final deste capítulo algumas considerações sobre estas comparações são descritas.

Por último, no capítulo 5, é apresentada a conclusão deste trabalho, detalhando as conclusões quanto aos objetivos, ao trabalho realizado e aos trabalhos futuros que evidenciam os caminhos para a continuação desta pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo detalha o embasamento teórico utilizado neste trabalho, apresentando as técnicas de microscopia, de estereologia quantitativa e de computação gráfica implementadas no *software* Goitacá.

2.1 MICROSCOPIA

A observação de microestruturas é de grande importância para a pesquisa e o desenvolvimento de materiais, uma vez que ajuda a estabelecer uma relação entre as estruturas e as propriedades destes materiais (DIAS, 2008).

Esta observação geralmente é realizada com o uso de microscópios. Estes equipamentos são usados há muito tempo e sua ampla utilização tem estendido a capacidade dos olhos humanos. O microscópio desempenhou papel fundamental na evolução das ciências naturais e biológicas (GOLDENSTEIN, 2005).

A análise destas microestruturas foi desde longa data observada por microscópios. Estes equipamentos passaram a fazer parte de uma ampliação da observação a olho nu, tendo os microscópios papel fundamental no surgimento e evolução das ciências da natureza e biológica (GOLDENSTEIN, 2005).

Nas ciências da natureza este equipamento é essencial em diversas áreas como: minas, petróleo e materiais. Já nas ciências médicas é crucial em áreas como: medicina, medicina veterinária e odontologia, além da área de biologia, nas ciências biológicas. Estes equipamentos, com suas modernizações, continuam indispensáveis no processo evolutivo contínuo das ciências da natureza e biológica (BANDEIRA, 2005; BERENICE; CARMEM, 2007; CARDILLI, 2008; DIAS, 2008; FAZANO, 2005; GOLDENSTEIN, 2005;

MAURER, 2005; MUSSEL, 2002; OGATA *et al.*, 2009; PACIORNIK *et al.*, 2009).

Existem diversos tipos de microscopia, entre os quais destacam-se: Microscopia Ótica (MOT), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET) e Microscopia de Ponta de Prova (MPP) (PACIORNIK, 2009). Dentre estes tipos de microscopias, os que possuem maior utilização na área de ciência e engenharia de materiais são MOT e MEV (DIAS, 2008; GOMES, 2001).

Frequentemente as estruturas são classificadas em macro e microscópicas em função da dimensão de seus constituintes. Estas últimas não podem ser observadas a olho nu. A MOT possui limite de resolução na região submicrométrica. Já a MET possui poder de resolução nas faixas de *Angstrom* (Å) e Nanômetro (nm) (GOLDENSTEIN, 2005).

As principais características destes tipos de microscopias são: interação, aumento, ordem de resolução, reflexão e transmissão (PACIORNIK, 2009; PADILHA, 2007). No Quadro 2.1 estas características são apresentadas em relação aos tipos de microscopias.

Características	MOT	MEV	MET	MPP
Interação	luz (fótons) ↔ matéria	elétron ↔ matéria	elétron ↔ matéria	matéria ↔ matéria
Aumentos	até $\approx 2 \times 10^3 X$	até $\approx 2 \times 10^5 X$	até $3 \times 10^6 X$ \approx	até $\approx 2 \times 10^6 X$
Ordem de Resolução	μm	nm	$10^{-1} nm$	$10^{-1} nm$
Reflexão	informação sobre a superfície	superfície mais profundidade atingida pelos elétrons	-	informação sobre a superfície
Transmissão	projeção da estrutura interna	-	projeção da estrutura interna	-

Quadro 2.1 – Características dos tipos mais simples de microscopia (Adaptado PACIORNIK, 2009).

Este trabalho utiliza recursos de microscopia ótica, mais especificamente o recurso de vídeo-microscopia. A seção 2.1.1 apresenta o microscópio ótico com mais detalhes e a seção 2.1.1.1 mostra o recurso de vídeo-microscopia.

2.1.1 Microscópio ótico

O microscópio ótico (MO) foi inventado por Zacharias Jansen no ano de 1595. Apesar desta invenção ter sido datada há mais de 400 anos, ainda nos dias de hoje, exerce ampla influência no desenvolvimento das microestruturas dos materiais em áreas como as ciências biológicas e dos materiais (MOREIRA, 2012; PADILHA, 2007; PELEGRINI, 2012).

A Figura 2.1 ilustra os componentes básicos do MO, sendo estes componentes caracterizados de acordo com a seguinte numeração: 1) lentes oculares; 2) revólver; 3) lentes objetivas; 4) parafuso macrométrico; 5) parafuso micrométrico; 6) platina; 7) foco luminoso (lâmpada ou espelho); 8) condensador e diafragma e 9) braço (MOREIRA, 2012).



Figura 2.1 – Componentes básicos do MO (MOREIRA, 2012).

O MO é composto de componentes mecânicos e óticos. Os componentes mecânicos são formados por: base ou pé, braço ou coluna, tubo ou canhão, revólver, mesa ou platina, *charriot*, parafuso macrométrico e

parafuso micrométrico. O Quadro 2.2 apresenta os componentes mecânicos do MO com suas respectivas descrições (LINS; ALÉCIO, 2014; MOREIRA, 2012).

Componentes	Descrições
Base ou pé	suporte dos componentes do microscópio
Braço ou coluna	componente fixado a base que auxilia o apoio das lentes e da platina
Tubo ou canhão	suporte das lentes, na parte superior da ocular e na inferior do revólver com objetivas
Revólver	suporte das lentes objetivas que permite por rotação mudar de objetiva
Mesa ou platina	componente base onde se coloca a amostra a ser observada e que possui um orifício no centro para permitir a passagem de luz do condensador
<i>Charriot</i>	componente ligado a platina que permite movimentar a amostra a ser observada
Parafuso macrométrico	componente que permite deslocção vertical da platina de grande amplitude
Parafuso micrométrico	componente que permite deslocção vertical da platina de pequena amplitude

Quadro 2.2 – Componentes mecânicos do MO (LINS; ALÉCIO, 2014; MOREIRA, 2012).

Já os óticos são constituídos por fonte de luz, condensador, diafragma, oculares e objetivas. O Quadro 2.3 mostra os componentes óticos do MO com suas descrições correspondentes (LINS; ALÉCIO, 2014; MOREIRA, 2012).

Componentes	Descrições
Fonte de luz	luz artificial transmitida por uma lâmpada do próprio microscópio
Condensador	conjunto de duas (ou mais) lentes convergentes que conduz e divide a luz emitida sobre área de visão do microscópio
Diafragma	regula a proporção da luz que reflete na área de visão do microscópio
Oculares	conjunto de duas (ou mais) lentes que concedem o aumento da imagem real providas da objetiva, criando uma imagem virtual situada mais perto dos olhos do observador
Objetivas	conjunto de lentes fixadas no revólver que permitem ampliar a imagem da objetiva em 10x, 40x, 50x, 90x ou 100x

Quadro 2.3 – Componentes óticos do MO (LINS; ALÉCIO, 2014; MOREIRA, 2012).

O MO usa raios de luz e um conjunto de lentes que aumentam a amostra. A Figura 2.2 ilustra um esquema de um MO. Neste esquema os raios de luz são emitidos na lâmpada e centralizados num feixe por dentro da lente do condensador. Este condensador foca o feixe no espécime. Depois este feixe atravessa uma lente da objetiva. Posteriormente estes raios dirigem-se à lente ocular, que aumenta a imagem e, por fim, alcançam o olho do observador (MAURER, 2005; MOREIRA, 2012).

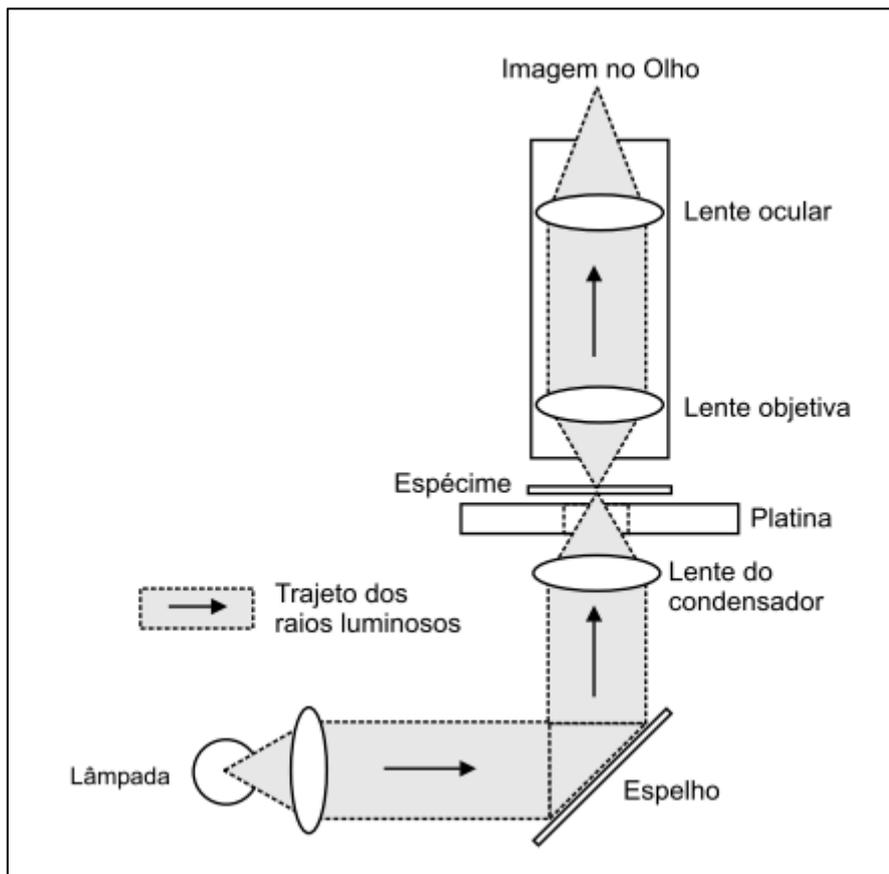


Figura 2.2 – Esquema de um MO (MAURER, 2005).

Frequentemente as amostras observadas nestes equipamentos são invertidas vertical e horizontalmente, ou seja, de cima para baixo e da esquerda para direita. Um exemplo de aplicação pode ser observado na Figura 2.3. Usando uma preparação com a letra “F”, conforme Figura 2.3 (a), as lentes objetivas formariam a imagem ilustrada na Figura 2.3 (b) e as lentes oculares produziram a imagem mostrada na Figura 2.3 (c) (MAURER, 2005; MOREIRA, 2012).

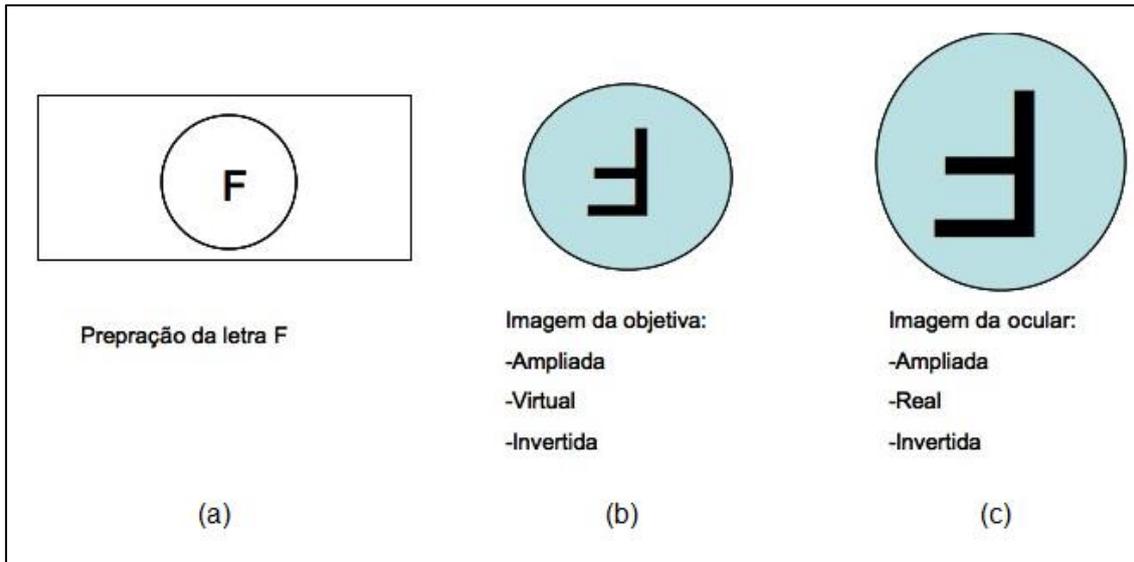


Figura 2.3 – a) Preparação. b) Imagem da objetiva. c) Imagem da ocular (Adaptado de MOREIRA, 2012).

2.1.1.1 Vídeo-microscopia

O crescimento e a popularização dos equipamentos de tecnologia da informação e comunicação impulsionaram o desenvolvimento de diversas áreas do conhecimento. Neste sentido, a câmera digital ao ser acoplada ao MO, foi o equipamento que promoveu fortemente sua evolução. O surgimento da vídeo-microscopia evidencia esta promoção (FAZANO, 2005).

A vídeo-microscopia é o processo que acopla um MO a uma câmera digital conectada a um microcomputador. Através deste processo, imagens estáticas e dinâmicas são facilmente carregadas e armazenadas em um microcomputador (FAZANO, 2005; FERNANDES *et al.*, 2012; LASEROPTICS, 2014; LUCARINI; DA SILVA; BIANCHI, 2004).

Contudo, a vídeo-microscopia necessita de um *software* de análise de imagens instalado no sistema operacional do microcomputador. Os *softwares* de análise de imagens capazes de carregar câmeras digitais, geralmente são comercializados com os microscópios óticos e fazem apenas o carregamento de câmeras digitais de mesmo fabricante (AMSCOPE, 2014; LEICA MICROSYSTEMS, 2014; NIKON INSTRUMENTS, 2014).

2.1.2 Microscopia quantitativa

Todas as áreas da ciência e tecnologia que utilizam a MOT elaboraram técnicas de medições quantitativas. Estas técnicas abrangem alguns recursos de probabilidade e estatística, com a finalidade de adquirir informações da microestrutura dos materiais (GOLDENSTEIN, 2005).

Estas medições quantitativas são realizadas geralmente em superfícies opacas sobre o plano de cortes da estrutura. A partir destas medidas são obtidos parâmetros que caracterizam tridimensionalmente as microestruturas dos materiais. Este segmento da microscopia é denominado microscopia quantitativa e é amplamente utilizado em áreas como: biologia, geologia e ciência dos materiais (GOLDENSTEIN, 2005; PADILHA, 2007).

A microscopia quantitativa, chamada anteriormente de materialografia quantitativa, em 1958, sofreu evolução em seu termo e passou a ser chamada de metalografia quantitativa. Contudo, a partir de 1961, esta terminologia passou por mais uma evolução, sendo chamada até os dias de hoje de estereologia quantitativa (GOLDENSTEIN, 2005; MANNHEIMER *et al.*, 2002; PADILHA, 2007). A seção 2.2 apresenta minuciosamente as técnicas de estereologia quantitativa implementadas no *software* proposto.

2.2 ESTEREOLOGIA QUANTITATIVA

Pode-se definir a estereologia quantitativa (EQ) como uma ferramenta fundamentada na geometria e probabilidade capaz de determinar aspectos tridimensionais baseados em aspectos bidimensionais (ESTEVES, 2011; FERREIRA FILHO, 2009; MANDARIM-DE-LACERDA, 2003).

Utilizando os princípios da EQ, é possível estimar certas quantidades em amostras bidimensionais, sem necessidade de amostras tridimensionais. Diversas áreas das ciências utilizam estes princípios, dentre elas pode-se citar: a medicina, medicina veterinária, biologia, geologia, metalurgia, engenharia civil, de petróleo, de materiais e de minas (DAMACENO-RODRIGUES, 2012; DAMSGAARD *et al.*, 1997; DE MOURA, 2011; DE OLIVEIRA *et al.*, 2008; DE

SIQUEIRA *et al.*, 2007; ESTEVES, 2011; GONDIM, 2012; MANDARIM-DE-LACERDA, 2003; MUSSEL, 2002; PADILHA, 2007).

A EQ é capaz de medir diversas características de amostras bidimensionais, como: volume, áreas superficiais planas ou não, comprimentos de elementos lineares, nível de vizinhança (contiguidade), livre caminho médio da fase matriz e tamanho de elementos volumétricos. Pontos e retas são utilizados como ferramentas estereológicas para obter estas características (ESTEVES, 2011; FERREIRA FILHO, 2009).

As propriedades dos materiais são influenciadas geralmente por sua estrutura. Comumente estas estruturas são tridimensionais, opacas ou semitransparentes e microscópicas, evidenciando uma ampla complexidade em sua observação (DE MOURA, 2011; PADILHA, 2007).

Para caracterizar estruturas tridimensionais na EQ os planos de cortes são utilizados como fonte de informação. Assim que uma estrutura tridimensional é seccionada, os elementos volumosos aparecem como uma área bidimensional. Já os elementos lineares surgem como pontos e os elementos superficiais aparecem como linhas nos planos de cortes (FERREIRA FILHO, 2009).

Na Figura 2.4 (a) pode ser observada uma amostra tridimensional contendo elementos hipotéticos de volume, linhas e superfície. A Figura 2.4 (b) ilustra um plano de corte com a interseção do volume de um elemento (vermelho), a interseção de três pontos de outro elemento (verde) e a interseção da superfície de duas linhas de mais um elemento (azul) (RUSS; DEHOFF, 2000).

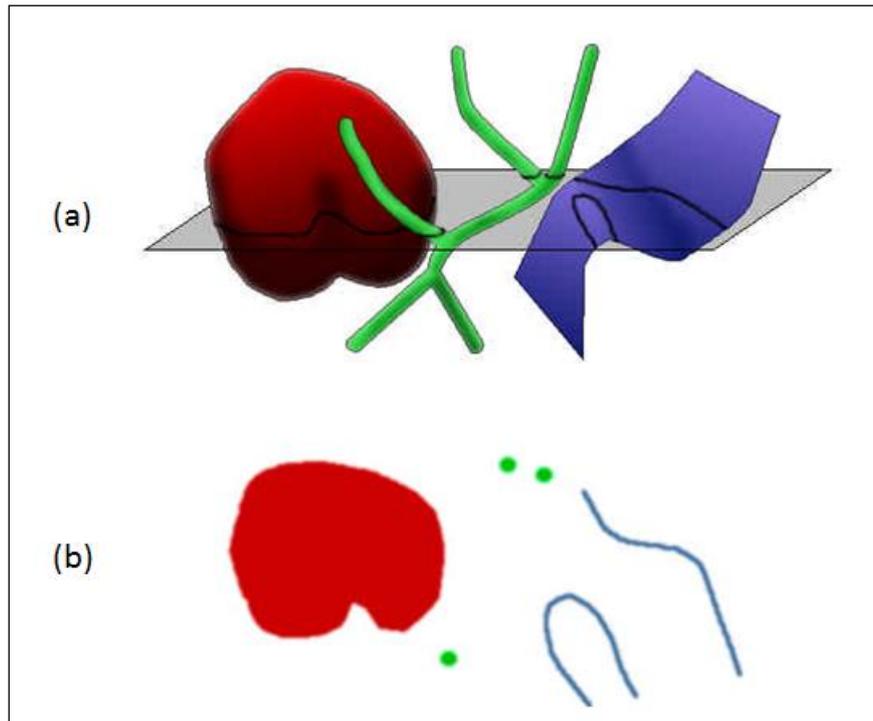


Figura 2.4 – a) Amostra tridimensional contendo elementos hipotéticos de volume, linhas e superfície. b) Plano de corte com as regiões interceptadas (Adaptado de RUSS; DEHOFF, 2000).

A EQ ainda apresenta vantagens sobre os estudos qualitativos, uma vez que os resultados são numéricos, sendo, portanto, reproduzíveis em qualquer laboratório. Além disso, a EQ possui seu método probabilístico bem estabelecido, o que garante um respaldo a esta ferramenta (MANDARIM-DE-LACERDA, 2003).

Alguns procedimentos que antecedem as medições de EQ devem ser respeitados para uma melhor precisão dos resultados, a Figura 2.5 ilustra o fluxograma das etapas de preparação e caracterização das imagens (DA SILVA, 2007).

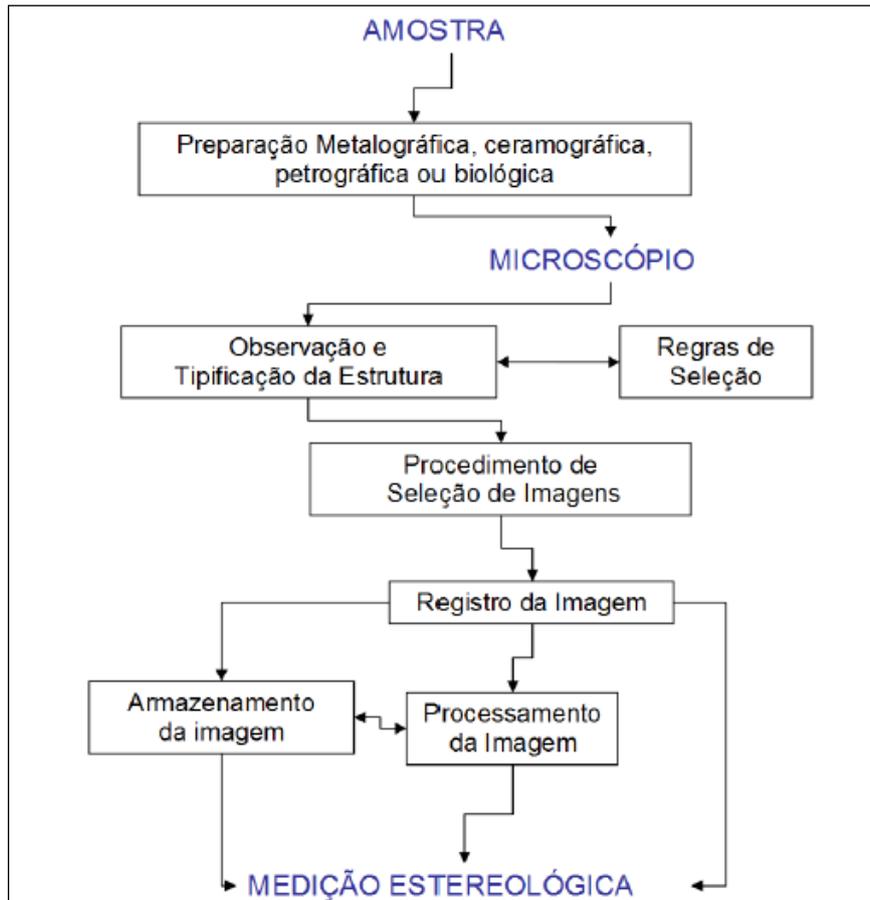


Figura 2.5 – Fluxograma de etapas de preparação e caracterização de imagens (DA SILVA, 2007).

Dentre estas etapas, pode-se destacar a Preparação da amostra, Observação e tipificação da estrutura, Regras de seleção e Procedimento de seleção de imagem. No Quadro 2.4 podem ser observadas estas etapas assim como suas sucintas descrições (BORGES, 2014; DA SILVA, 2007; LUZ *et al.*, 2004).

Fase	Etapas	Descrição
Amostra	Preparação da amostra	realiza-se o lixamento seguido de polimento do plano de corte da estrutura para obter uma superfície plana e polida
Microscópio	Observação e tipificação da estrutura	pode-se caracterizar uma estrutura em relação a sua quantidade de fase, sendo monofásica e multifásica e em relação ao seu tipo, sendo homogênea e heterogênea
	Regras de seleção	deve-se selecionar aleatoriamente um plano de corte com representatividade da estrutura e após selecionar, também aleatoriamente, uma parte deste plano de corte

	Procedimento de seleção de imagem	verifica-se o tipo da estrutura, se for homogênea não é necessária atenção especial, pois os planos de cortes são equivalentes, contudo, se for heterogênea, é preciso saber quais parâmetros serão medidos e estes parâmetros definirão a quantidade de imagens utilizadas na medição
--	-----------------------------------	--

Quadro 2.4 – Etapas com destaque de preparação e caracterização de imagens.

Os parâmetros da EQ são geralmente descritos por símbolos compostos por duas letras, onde uma destas letras é um subíndice. Estes símbolos são constantemente representados por uma fração no qual o numerador é uma quantidade microestrutural e o denominador é uma quantidade de teste. A S_V , por exemplo, é semelhante a S sobre V, no qual S é a área superficial composta num volume-teste V. Neste exemplo, a quantidade microestrutural é área superficial (S) enquanto que o volume-teste (V) é a quantidade de teste. O Quadro 2.5 introduz os parâmetros da EQ que são abordados neste trabalho (MANNHEIMER *et al.*, 2002; PADILHA, 2007; UNDERWOOD, 1970).

Símbolo	Denominação	Unidade	Definição
\bar{A}	-	cm ²	área de seção média
A_A	Fração de área	-	área dos objetos interceptados por unidade de área-teste
\bar{L}	-	cm	comprimento de intercepto linear médio
L_L	Fração linear	-	comprimento dos interceptos lineares por unidade de comprimento de linha-teste
L_V	-	cm ⁻²	comprimento dos interceptos lineares por unidade de volume-teste
N_A	-	cm ⁻²	número de objetos interceptados por unidade de área-teste
N_L	-	cm ⁻¹	número de objetos interceptados por unidade de comprimento de linha-teste
P_A	-	cm ⁻²	número de pontos por unidade de área-teste.
P_L	-	cm ⁻¹	número de interseções por unidade de linha-teste
P_P	Fração de pontos	-	número de pontos incidentes na fase de interesse pelo número total de pontos da grade
S_V	-	cm ⁻¹	área superficial por unidade de volume-teste

S_{VP}	-	cm^{-1}	área superficial por unidade de volume-teste sobre volume dos objetos por unidade de volume-teste
V_V	Fração volumétrica	-	volume dos objetos por unidade de volume-teste

Quadro 2.5 – Principais parâmetros da EQ (Adaptado de PADILHA, 2007).

Para fins de ilustração dos procedimentos detalhados nas seções 2.2.1.1, 2.2.1.2, 2.2.2.1, 2.2.2.2, 2.2.2.3, 2.2.3, 2.2.4 e 2.2.5, a seguir a Figura 2.6 foi utilizada. Esta figura representa um plano de corte de uma amostra bifásica, contendo fase α (amarela) e fase β (verde), sendo α a fase de interesse.

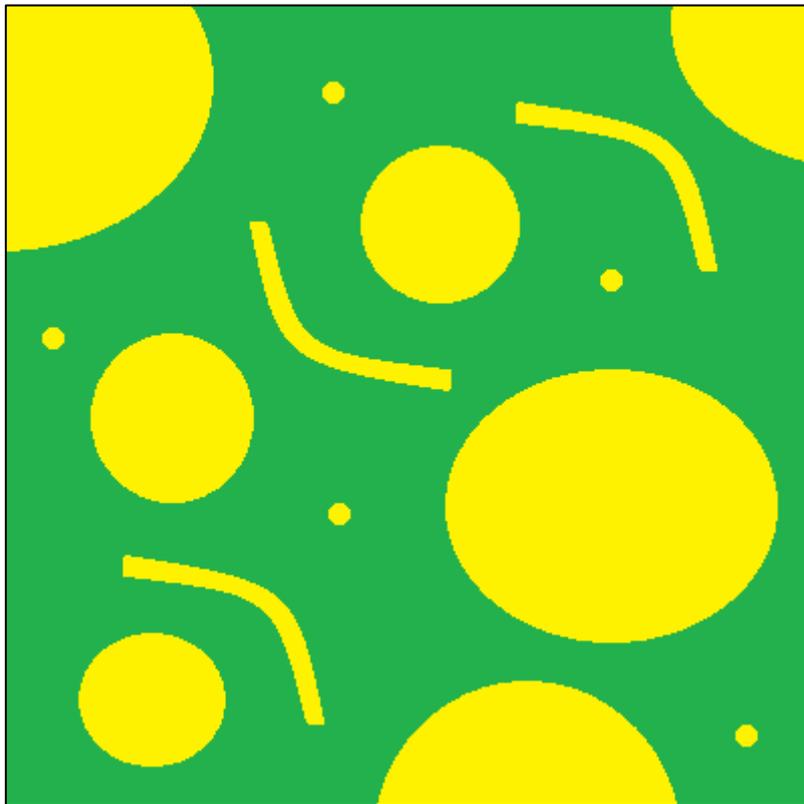


Figura 2.6 – Plano de corte da imagem de amostra.

2.2.1 Malhas

Geralmente as medições de EQ necessitam da inserção de malhas nos planos de cortes antes da realização de suas medições e cálculos, sendo estas malhas de pontos, de linhas horizontais e de linhas cruzadas (linhas horizontais e verticais). As seções 2.2.1.1 e 2.2.1.2 detalham alguns modos de realizar

estes procedimentos (DA SILVA, 2007; PADILHA, 2007; PINHEIRO, 2008; UNDERWOOD, 1970).

2.2.1.1 Malha de pontos

Consiste em sobrepor uma malha de pontos (MP), também conhecida como grade de pontos, no plano de corte. Este procedimento pode ser realizado de diversas formas. Uma delas é através da impressão da MP na lente objetiva ou ocular do microscópio. Outra é por meio da impressão desta malha em uma película, colocando-a sobre o plano de corte, a Figura 2.7 ilustra a MP sobre o plano de corte (DA SILVA, 2007; PADILHA, 2007; PINHEIRO, 2008; UNDERWOOD, 1970).

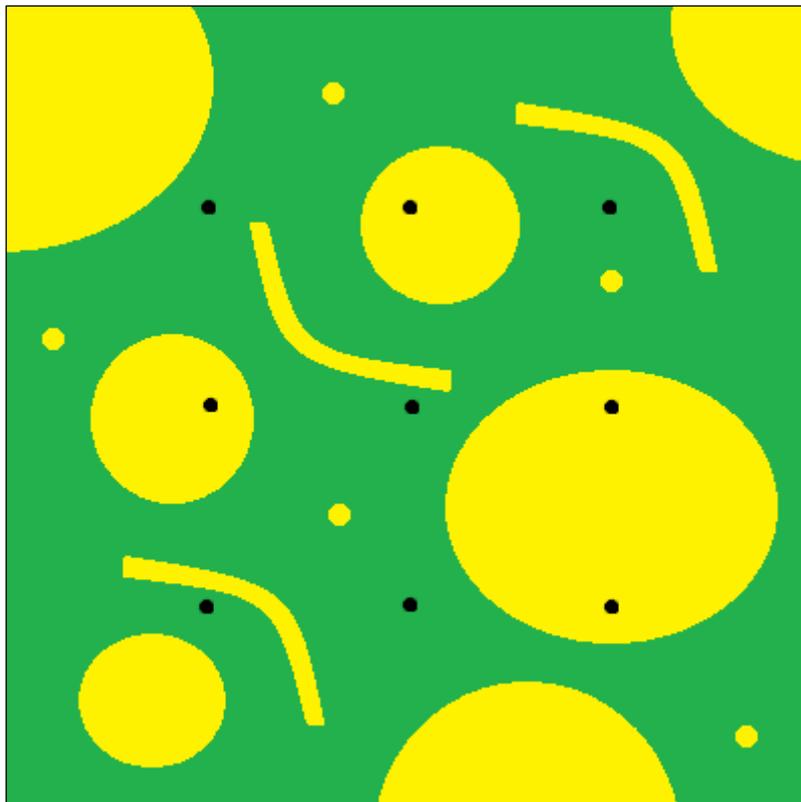


Figura 2.7 – Malha de pontos.

Também é possível formar a MP utilizando a interseção das linhas horizontais com as verticais, na Figura 2.8 pode ser observado o plano de corte com a MP constituída por esta interseção (DA SILVA, 2007; PADILHA, 2007; PINHEIRO, 2008; UNDERWOOD, 1970).

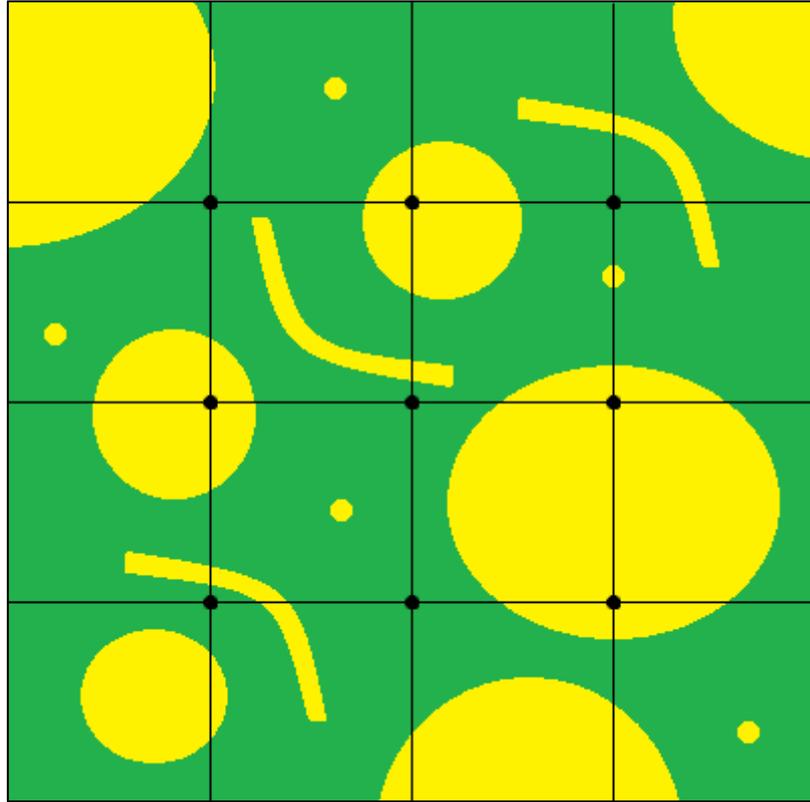


Figura 2.8 – Malha de pontos realizada através da interseção de linhas horizontais com verticais.

2.2.1.2 Malha de linhas horizontais e cruzadas

Constitui em sobrepor uma malha de linhas horizontais (MLH) ou uma malha de linhas cruzadas (MLC), malhas estas também chamadas de grades de linhas, em um plano de corte. Para a MLH pode-se realizar este procedimento de diversas maneiras, entre elas por meio de impressão da MLH diretamente na ocular ou objetiva do microscópio. Outra é através da impressão da MLH em uma película e posicionar esta película em cima do plano de corte, a Figura 2.9 mostra o plano de corte com MLH superpondo-a (DA SILVA, 2007; PADILHA, 2007; PINHEIRO, 2008; UNDERWOOD, 1970).

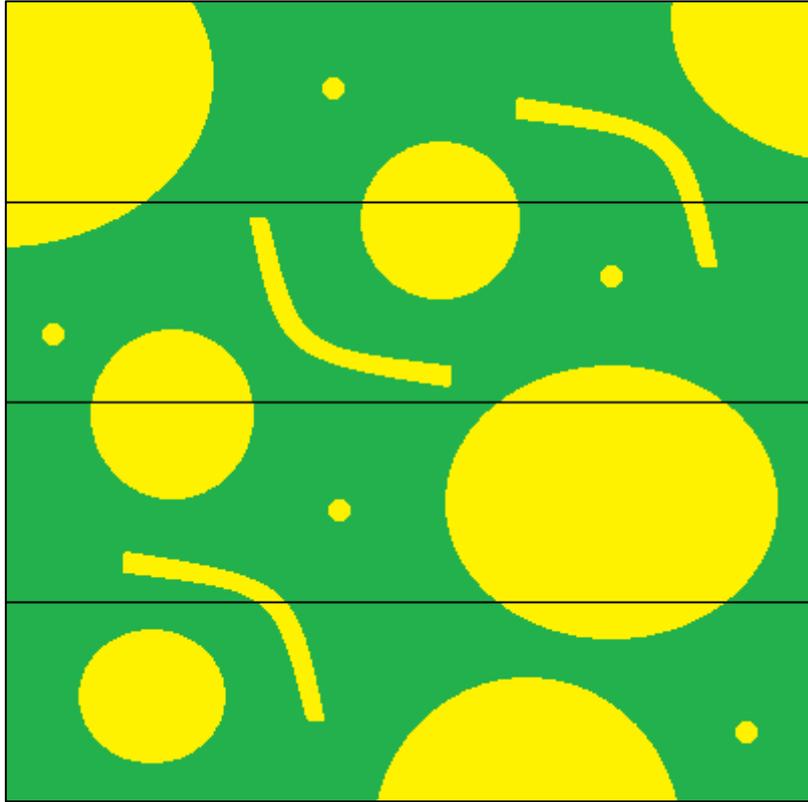


Figura 2.9 – Malha de linhas horizontais.

Para a MLC os procedimentos são semelhantes aos adotados na MLH, a única diferença entre as malhas é que a MLC possui linhas verticais, na Figura 2.10 pode ser observado a MLC sobre o plano de corte (DA SILVA, 2007; PADILHA, 2007; PINHEIRO, 2008; UNDERWOOD, 1970).

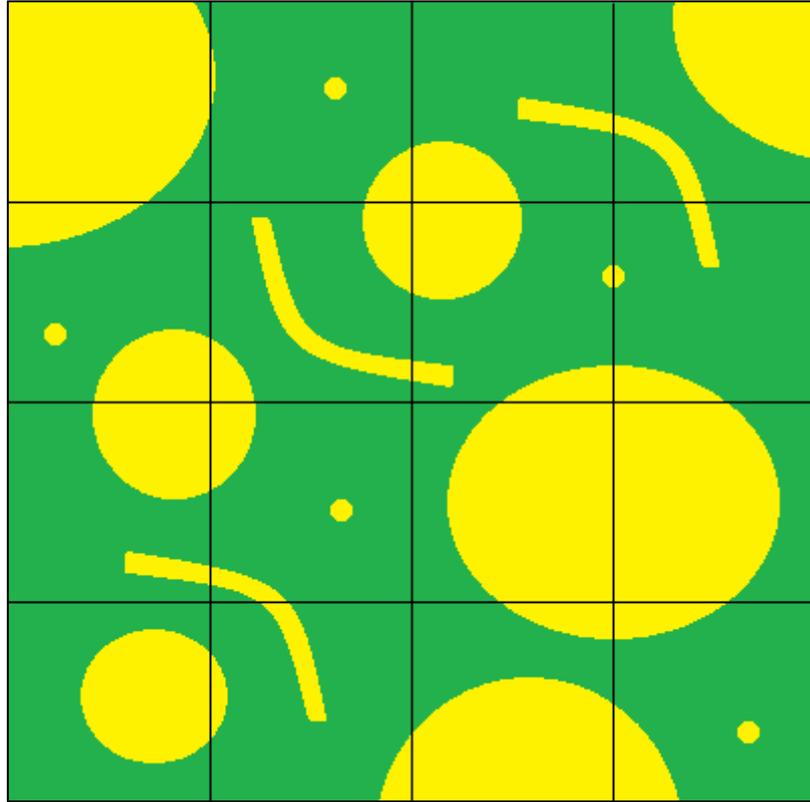


Figura 2.10 – Malha de linhas cruzadas.

2.2.2 Fração volumétrica

Na EQ a medição da fração volumétrica (V_V) é considerada a mais conhecida e simples de ser realizada. Esta medição pode ser determinada através de três métodos, sendo eles fração de área (A_A), fração de pontos (P_P) e fração linear (L_L) (DA SILVA, 2007; DE MOURA, 2011; MANNHEIMER *et al.*, 2002; PINHEIRO, 2008; RUSS; DEHOFF, 2000; UNDERWOOD, 1970).

Para estimar o valor da V_V de uma determinada fase, em um plano de corte, pode-se contar as áreas das seções, pontos ou ainda comprimento de interceptos lineares (DE MOURA, 2011; RUSS; DEHOFF, 2000; UNDERWOOD, 1970).

Fundamenta-se por intermédio da teoria da EQ que os três métodos, A_A , P_P e L_L , são equivalentes e os valores determinados por estes métodos representam a V_V da fase de interesse. As relações destes métodos podem ser observadas nas expressões (2.1), (2.2) e (2.3) (DE MOURA, 2011; MANNHEIMER *et al.*, 2002; RUSS; DEHOFF, 2000; UNDERWOOD, 1970).

$$V_V = A_A \quad (2.1)$$

$$V_V = P_P \quad (2.2)$$

$$V_V = L_L \quad (2.3)$$

2.2.2.1 Fração de área

A determinação da V_V utilizando a fração de área (A_A) é realizada usando a expressão (2.4) (DA SILVA, 2007; MANNHEIMER *et al.*, 2002; PADILHA, 2007; UNDERWOOD, 1970).

$$(V_V)_\alpha = (A_A)_\alpha \quad (2.4)$$

A determinação da A_A é dada pela razão do somatório das áreas de seções da fase α com área total do plano de corte. Esta determinação é efetuada através da expressão (2.5) (MANNHEIMER *et al.*, 2002; RUSS; DEHOFF, 2000; UNDERWOOD, 1970).

$$A_A = \frac{\sum \text{AreasSecoes}}{\text{AreaTotal}} \quad (2.5)$$

Na Figura 2.11 pode ser observado o procedimento descrito anteriormente. Nesta figura observa-se um plano de corte com todas as áreas de seções da fase α contornadas na cor preta para melhor identificação.

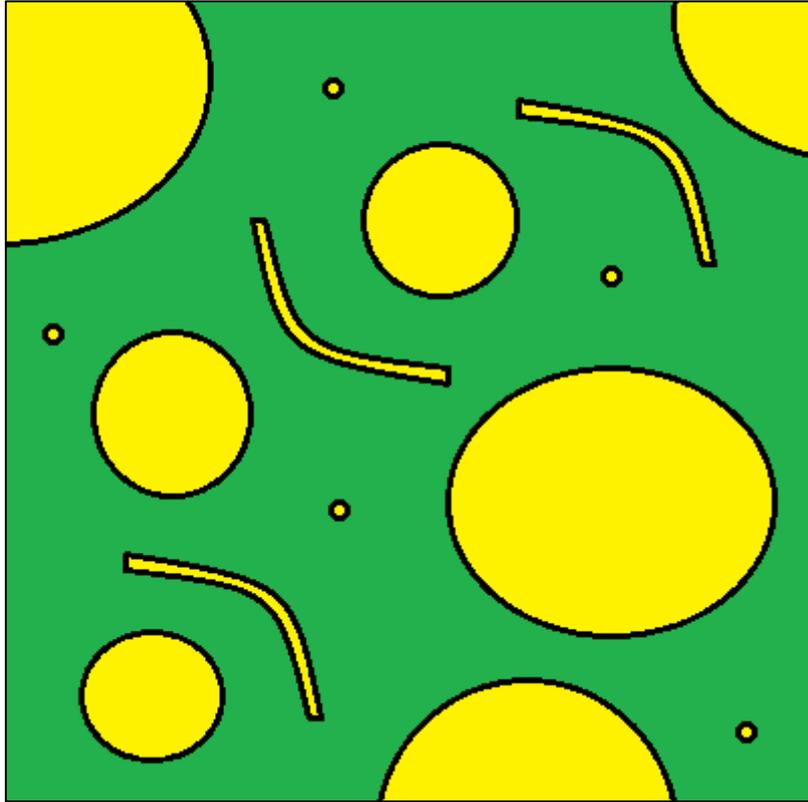


Figura 2.11 – Plano de corte com áreas das seções da fase α contornadas na cor preta.

A área de seção média (\bar{A}) é calculada através da razão da A_A pela quantidade de áreas de seções (N_A), a expressão (2.6) demonstra este cálculo. Contudo, as áreas de seções recebem peso para o cálculo da \bar{A} . As áreas que estão totalmente dentro do plano de corte recebem peso 1,0, enquanto que as áreas que estão parcialmente no plano de corte recebem peso 0,5 (DA SILVA, 2007; MANNHEIMER *et al.*, 2002; PADILHA, 2007).

$$\bar{A} = \frac{A_A}{N_A} \quad (2.6)$$

A Figura 2.12 ilustra o método previamente descrito. Nesta figura, um plano de corte é ilustrado com as áreas de seções contornadas na cor preta, sendo que as áreas que não estão totalmente dentro do plano são numeradas na cor azul.

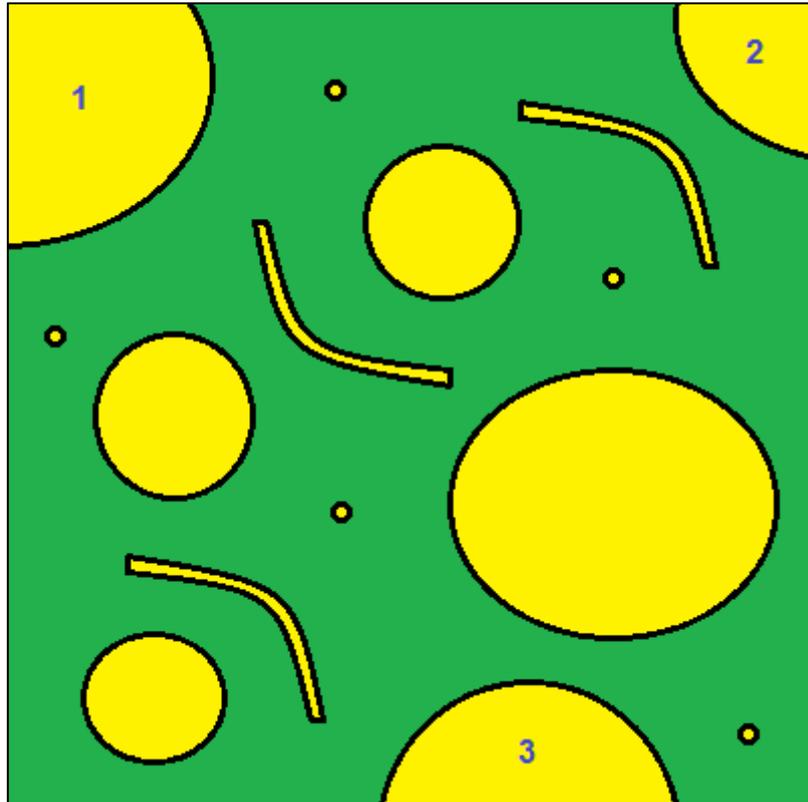


Figura 2.12 – Áreas de seções parcialmente no plano de corte numeradas na cor azul.

2.2.2.2 Fração de ponto

O cálculo da V_V usando a fração de pontos (P_P) é determinado utilizando a expressão (2.7) (DA SILVA, 2007; MANNHEIMER *et al.*, 2002; PADILHA, 2007; UNDERWOOD, 1970).

$$(V_V)_\alpha = (P_P)_\alpha \quad (2.7)$$

Para determinar a P_P , inicialmente é necessário realizar o procedimento descrito na seção 2.2.1.1. Após este procedimento, devem ser computados quantos destes pontos incidiram na fase α e dividir este valor pelo total de pontos da grade. Entretanto, em alguns casos os pontos incidem no contorno da fase α , tocando também a fase β , para estes casos, o ponto recebe peso 0,5, enquanto que para os demais casos os pontos recebem peso 1,0. A

determinação da P_P é obtida através da expressão (2.8) (PADILHA; FILHO, 2004; PADILHA, 2007; RUSS; DEHOFF, 2000; UNDERWOOD, 1970).

$$P_P = \frac{\sum \text{PontosIncidentes}}{\text{TotalPontos}} \quad (2.8)$$

O procedimento explicado anteriormente é demonstrado na Figura 2.13. Nesta figura os pontos que incidiram na fase α estão na cor vermelha e os demais pontos da grade estão na cor preta. É importante salientar que a Figura 2.13 não possui pontos com peso 0,5, pois nenhum dos pontos da grade incidiu na fase α e β ao mesmo tempo.

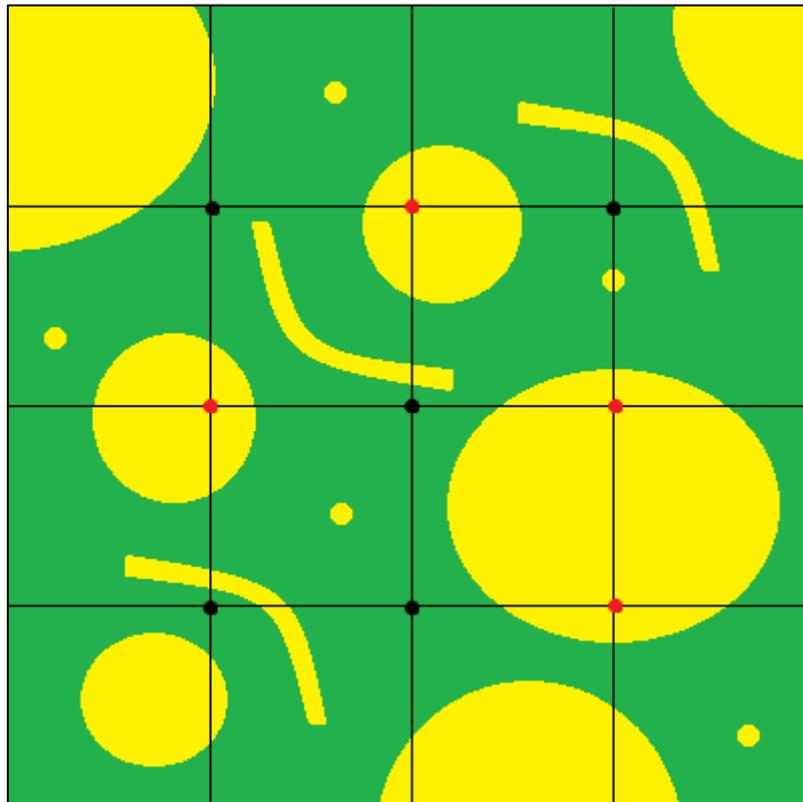


Figura 2.13 – Plano de corte com pontos que incidiram na fase α na cor vermelha e os pontos que incidiram na fase β na cor preta.

2.2.2.3 Fração linear

A estimativa da V_V empregando a fração linear (L_L) é calculada aplicando a expressão (2.9) (DA SILVA, 2007; MANNHEIMER *et al.*, 2002; PADILHA, 2007; UNDERWOOD, 1970).

$$(V_V)_\alpha = (L_L)_\alpha \quad (2.9)$$

Para determinar a L_L , *a priori* é preciso efetuar o procedimento especificado na seção 2.2.1.2. *A posteriori* é necessário somar os comprimentos dos segmentos de retas que interceptaram a fase α , segmentos estes que também são conhecidos como interceptos lineares. Após esta soma, deve-se dividir este valor pela soma do comprimento de todas as linhas-testes que constituem a MLH ou MLC, sendo a expressão (2.10) utilizada para obter a L_L (PADILHA, 2007; RUSS; DEHOFF, 2000; UNDERWOOD, 1970).

$$L_L = \frac{\sum \text{InterceptosLineares}}{\text{ComprimentoTotalLinhas}} \quad (2.10)$$

O procedimento descrito anteriormente pode ser observado na Figura 2.14, nesta figura observa-se um plano de corte com a MLH na cor preta e os interceptos lineares da fase α na cor vermelha.

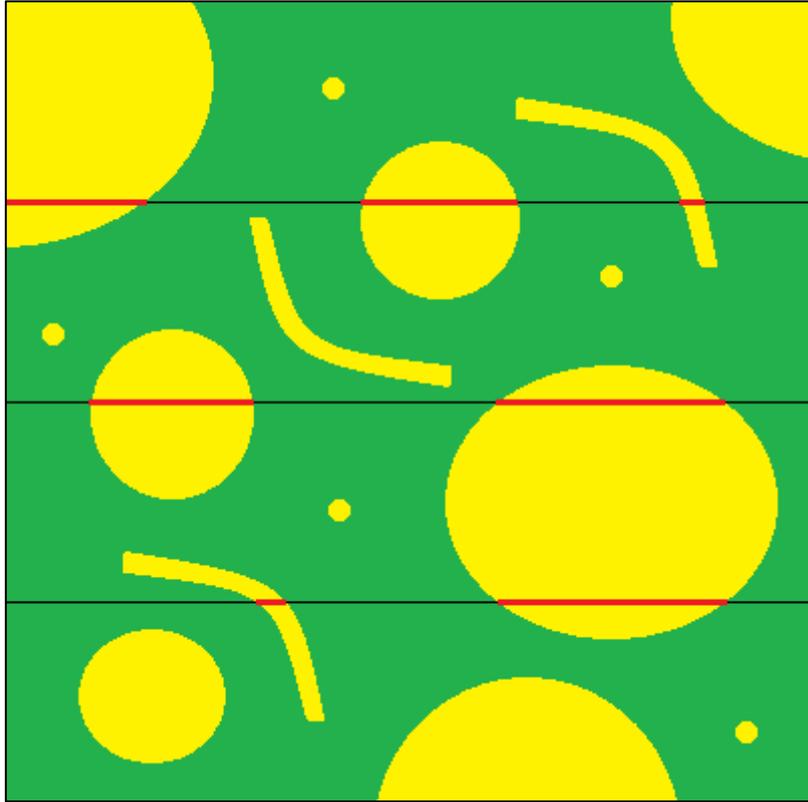


Figura 2.14 – Plano de corte com MLH na cor preta e segmentos de retas que interceptaram a fase α na cor vermelha.

O intercepto linear médio (\bar{L}) é calculado através da divisão da L_L pela quantidade de interceptos lineares (N_L), conforme segue na expressão (2.11). Entretanto, os interceptos lineares possuem peso para realizar o cálculo da \bar{L} . Os interceptos lineares que estão totalmente no plano de corte possuem peso 1,0. Já os interceptos que não estão completamente no plano de corte possuem peso 0,5 (DA SILVA, 2007; MANNHEIMER *et al.*, 2002; PADILHA, 2007).

$$\bar{L} = \frac{L_L}{N_L} \quad (2.11)$$

A Figura 2.15 ilustra o método previamente explicado, nesta figura é ilustrado um plano de corte com os interceptos lineares na cor vermelha, sendo o intercepto linear que não está completamente no plano numerado na cor azul.

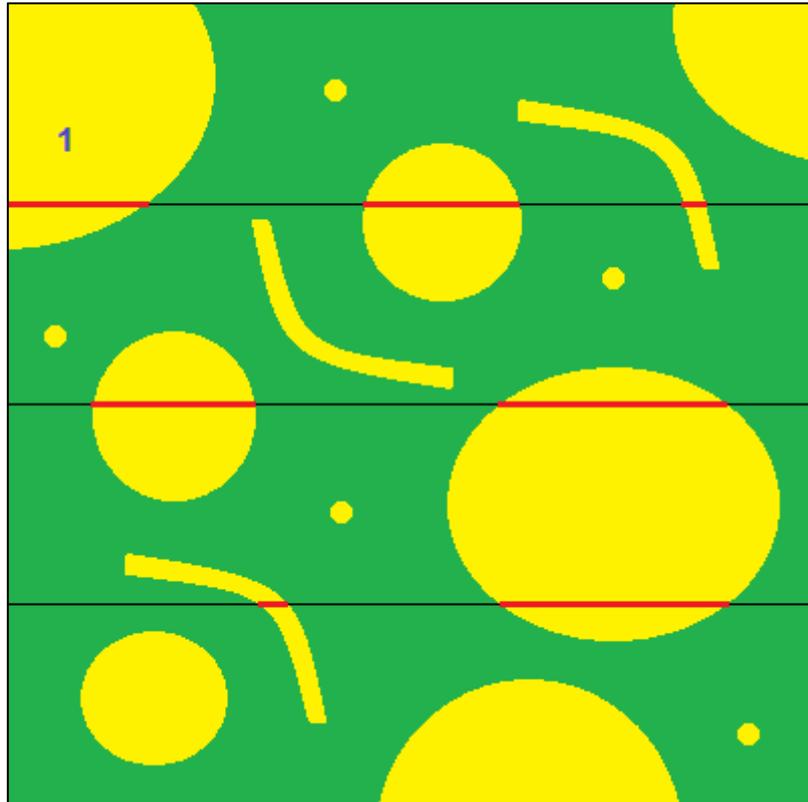


Figura 2.15 – Plano de corte com intercepto linear parcialmente no plano numerado na cor azul.

2.2.3 Área superficial por unidade de volume-teste

O cálculo da área superficial por unidade de volume-teste (S_V) pelo método de Saltykov é dado pela expressão (2.12), sendo P_L a quantidade de interseções por unidade de linha-teste (DA SILVA, 2007; MANNHEIMER *et al.*, 2002; MURPHY, 2004; PADILHA, 2007; UNDERWOOD, 1970).

$$S_V = 2P_L \quad (2.12)$$

Para calcular a S_V , inicialmente é necessário inserir uma MLH ou MLC seguindo o procedimento descrito na seção 2.2.1.2. Posteriormente, deve-se determinar a P_L , computando quantas vezes os contornos da fase α foram interceptados pelas linhas-teste da MLH ou MLC. Cabe ressaltar, que esta computação varia seu peso em 1,0 e 0,5. Recebem peso 1,0 as linhas-teste que interceptam diretamente o contorno da fase α , enquanto que as linhas-teste que tangenciam o contorno da fase α recebem peso 0,5. A razão entre o somatório destes valores e a soma do comprimento total das linhas-teste é a

P_L . Após estes cálculos deve-se multiplicar a P_L por dois, para finalmente chegar ao valor da S_V (DA SILVA, 2007; MURPHY, 2004; PADILHA, 2007; UNDERWOOD, 1970).

A Figura 2.16 ilustra o procedimento explicado anteriormente, nesta figura foi inserida uma MLC na cor preta e para fins de ilustração foram colocados pontos azuis onde as linhas-teste interceptaram a fase α . Deve-se salientar que nesta ilustração não ocorreram linhas-teste tangenciando a fase α .

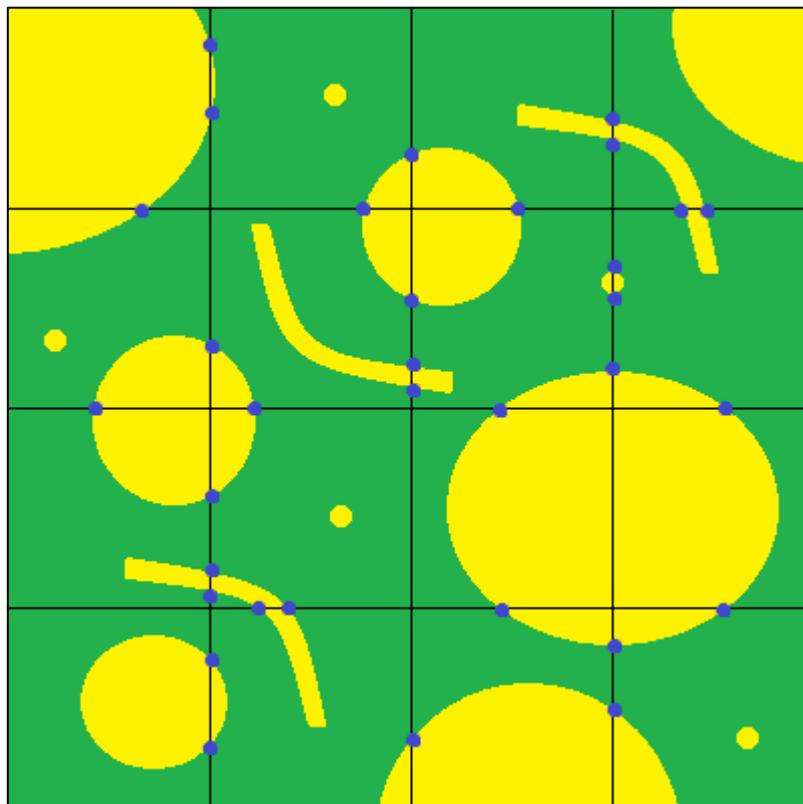


Figura 2.16 – Plano de corte com MLC na cor preta e os pontos que interceptaram a fase α na cor azul.

2.2.4 Área superficial específica

O cálculo da área superficial específica (S_{VP}) utilizando o método de Saltykov é realizada através da expressão (2.13), sendo S_V a área superficial por unidade de volume-teste e V_V a fração volumétrica (DA SILVA, 2007; MANNHEIMER *et al.*, 2002; PADILHA, 2007; UNDERWOOD, 1970).

$$S_{VP} = \frac{S_V}{V_V} \quad (2.13)$$

Para calcular a S_{VP} , primeiramente é preciso sobrepor uma MP e uma MLH ou MLC no plano de corte. Este procedimento pode ser realizado utilizando técnicas explicadas nas seções 2.2.1.1 e 2.2.1.2. Após deve-se calcular a S_V e a V_V . Para calcular a S_V é necessário realizar os métodos descritos na seção 2.2.3. Já para calcular a V_V pode-se efetuar o procedimento explicado na seção 2.2.2.2. Depois de determinar a S_V e a V_V , deve-se dividir a S_V pela V_V para enfim chegar a S_{VP} (DA SILVA, 2007; PADILHA, 2007; UNDERWOOD, 1970).

A Figura 2.17 demonstra o procedimento descrito previamente, nesta figura uma MLC na cor preta foi sobreposta no plano de corte, sendo que esta grade também formou uma MP. As intercepções das linhas-teste na fase α são ilustradas pelos pontos azuis enquanto que os pontos incidentes nesta mesma fase são ilustrados na cor vermelha.

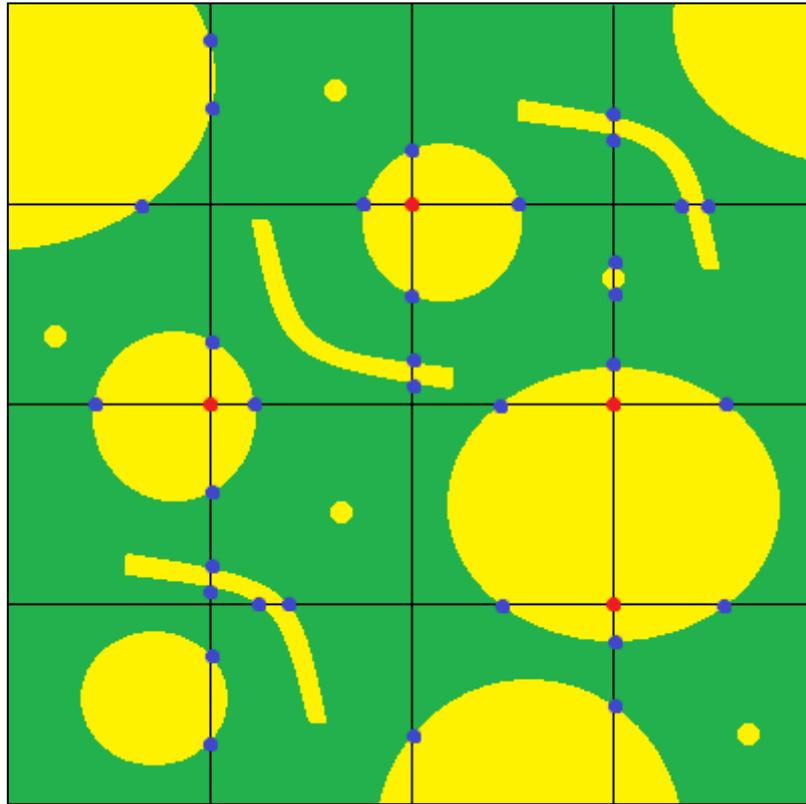


Figura 2.17 – Plano de corte com MLC na cor preta, com os pontos que interceptaram a fase α na cor azul e com os pontos que incidiram na fase α na cor vermelha.

2.2.5 Comprimento de intercepto linear por unidade de volume-teste

O cálculo do comprimento de intercepto linear por unidade de volume-teste (L_V) é realizado através da expressão (2.14), sendo P_A a quantidade de pontos por unidade de área-teste (DA SILVA, 2007; MANNHEIMER *et al.*, 2002; PADILHA, 2007; UNDERWOOD, 1970).

$$L_V = 2P_A \quad (2.14)$$

Nos planos de cortes, os elementos estruturais lineares aparecem como pontos, não importando que estes elementos sejam retos ou curvos, contínuos ou descontínuos. Para calcular o L_V deve-se inicialmente determinar a P_A . Para isto, computa-se a quantidade de pontos encontrada no plano de corte e divide este valor pela área do plano de corte. Após, deve-se multiplicar a P_A por dois para finalmente chegar ao L_V (DA SILVA, 2007; PADILHA, 2007; UNDERWOOD, 1970).

A Figura 2.18 ilustra o procedimento citado anteriormente. Nesta figura é ilustrado um plano de corte com os pontos contornados na cor preta, sendo estes pontos os interceptos lineares.

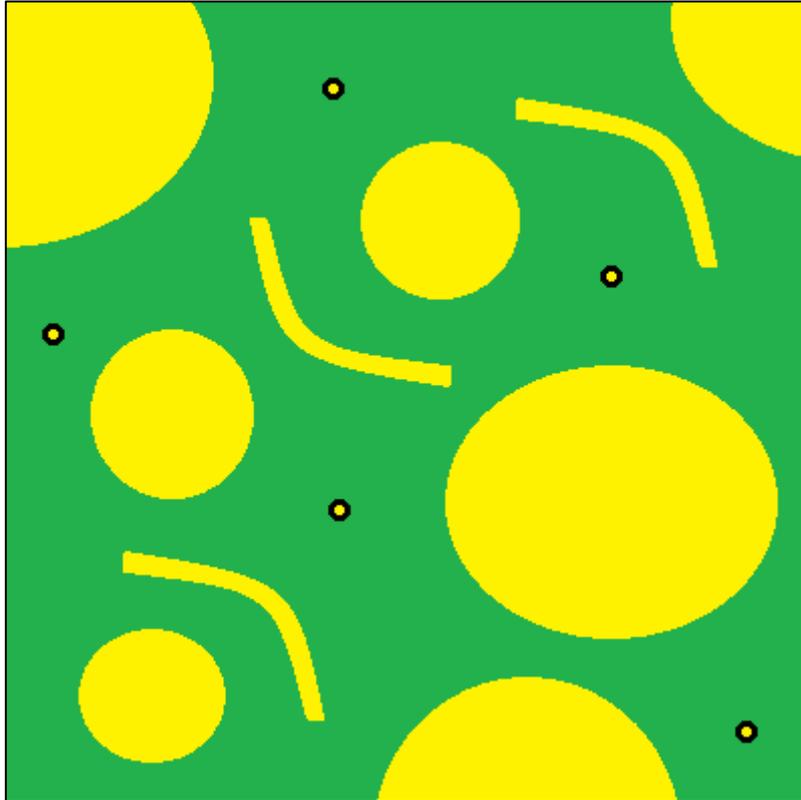


Figura 2.18 – Plano de corte com os pontos contornados na cor preta.

2.3 COMPUTAÇÃO GRÁFICA

A computação gráfica (CG) é definida como área da computação responsável por investigar a geração, manipulação e análise de imagens, tendo como finalidade utilizar técnicas para converter dados em imagens (GOMES; VELHO, 2003).

Diversas áreas utilizam a CG, entre as quais, engenharia automotiva e entretenimento. Nesta primeira, a CG pode ser usada em projetos de novos carros e a na segunda em jogos eletrônicos (MANSSOUR; COHEN, 2006). O Quadro 2.6 ilustra uma série de áreas que utilizam a CG e suas correspondentes subáreas de atuação (CAVALCANTI, 2012; SANTOS, 2013).

Área	Subárea de atuação
Medicina	Exames, diagnósticos, estudos, planejamento de procedimentos
Arquitetura	Perspectivas, projetos de interiores e paisagismo
Engenharia	Em todas as suas áreas (materiais, mecânica, petróleo, civil, aeronáutica, automotiva etc)
Geografia	Cartografia, georreferenciamento, previsão de colheitas
Meteorologia	Previsão do tempo, reconhecimento de poluição
Astronomia	Tratamentos de imagens, modelagens de superfícies
<i>Markentig</i>	Efeitos especiais, tratamentos de imagens, projetos de criação
Segurança pública	Definição de estratégia, treinamento e reconhecimento
Indústria	Treinamento, controle de qualidade, projetos
Entretenimento	Jogos eletrônicos, efeitos em filmes, desenhos animados, propagandas
Processamento de dados	Interface e projeto de sistemas
Educação	Aprendizado, desenvolvimento motor, reabilitação

Quadro 2.6 – Algumas áreas e subáreas de atuação da CG (Adaptado de CAVALCANTI, 2012).

Em ciências e engenharia de materiais, a CG foi utilizada em numerosos segmentos, entre eles, caracterização microestrutural de materiais, identificação e caracterização de pites de corrosão em cupons, interpretação de fotomicrografias de alta resolução de argilominerais, análise gráfica de estruturas porosas, determinação de tamanho de grãos em ligas de cobre-zinco (BARONI *et al.*, 2006; DE MOURA, 2011; FAZANO, 2005, 2007; FERNANDES *et al.*, 2012; GOMES, 2001; NOGUEIRA, 2013).

A CG divide-se em quatro subáreas que correlacionam imagens e dados. Estas subáreas estão próximas e diversas vezes interligadas, sendo confundidas em determinados momentos. As subáreas da CG são i) Modelagem geométrica; ii) Síntese de imagem; iii) Processamento de imagem e iv) Análise de imagens. As subáreas da CG citadas anteriormente são ilustradas pelo programa de fluxo de dados na Figura 2.19. A correlação destas subáreas com as dados e imagens também fazem parte desta ilustração (CAVALCANTI, 2012; GOMES; VELHO, 2003; SBEGHEN, 2007; TRAINA; DE OLIVEIRA, 2006).

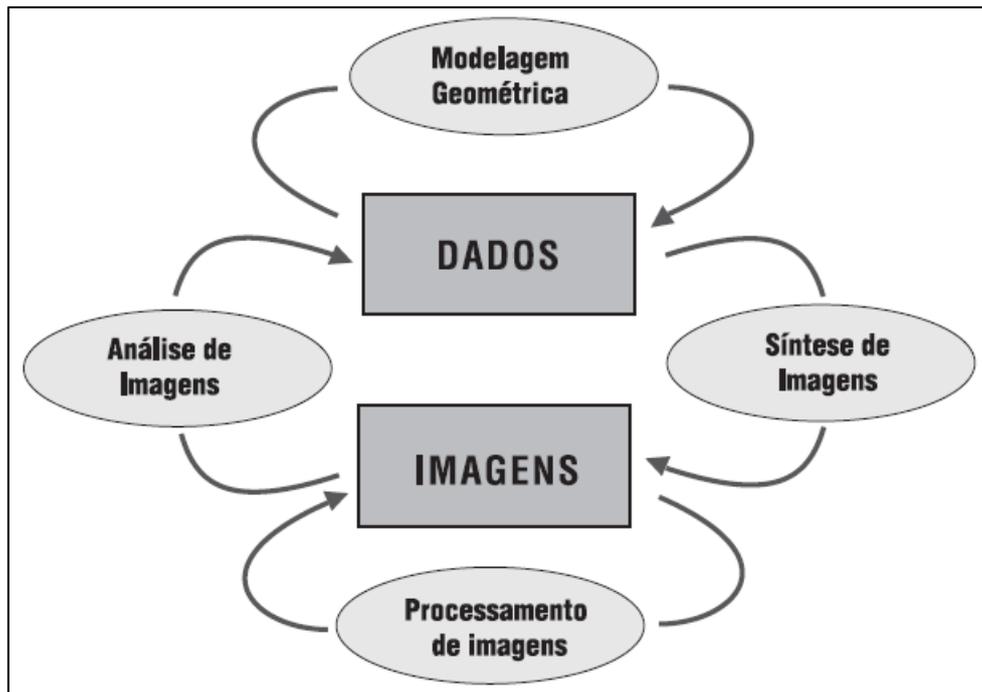


Figura 2.19 – Esquema de correlação das subáreas da CG (GOMES; VELHO, 2003).

Estas subáreas são descritas com mais detalhes nos tópicos a seguir (CAVALCANTI, 2012; GOMES; VELHO, 2003; SBEGHEN, 2007; TRAINA; DE OLIVEIRA, 2006):

- i) Modelagem geométrica é a subárea que se baseia em um grupo de procedimentos para descrever e estruturar dados de uma imagem no microcomputador;
- ii) Síntese de imagens é a subárea também chamada de Visualização. Esta subárea que tem por finalidade processar os dados criados na modelagem geométrica e reproduzi-los em forma de imagem que pode ser visualizada mediante utilização de dispositivo de saída;
- iii) Processamento de imagem é a subárea responsável por obter uma imagem de entrada, processá-la e criar uma imagem de saída. Nesta subárea as técnicas empregadas geralmente são para melhorar a qualidade da imagem de entrada;

- iv) Análise de imagens é a subárea chamada também de Visão computacional. Esta subárea tem por objetivo obter informações geométricas, físicas ou topológicas de uma ou mais imagens de entrada.

2.3.1 Imagem digital

Pode-se representar uma imagem digital monocromática através da função bidimensional $f(x,y)$, sendo x e y as coordenadas espaciais do ponto e $f(x,y)$ a intensidade luminosa do ponto nestas coordenadas (GONZALEZ; WOODS, 2002; MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; NOGUEIRA, 2013; QUEIROZ; GOMES, 2006).

Semelhantemente, pode-se definir a imagem digital através de uma matriz $M \times N$, em que cada elemento desta matriz é chamado de *pixel* (*picture element*) e todo *pixel* contém informações de luminosidade e cor. A Figura 2.20 ilustra uma matriz bidimensional $M \times N$ de uma imagem digital monocromática (GONZALEZ; WOODS, 2002; MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; NOGUEIRA, 2013; QUEIROZ; GOMES, 2006).

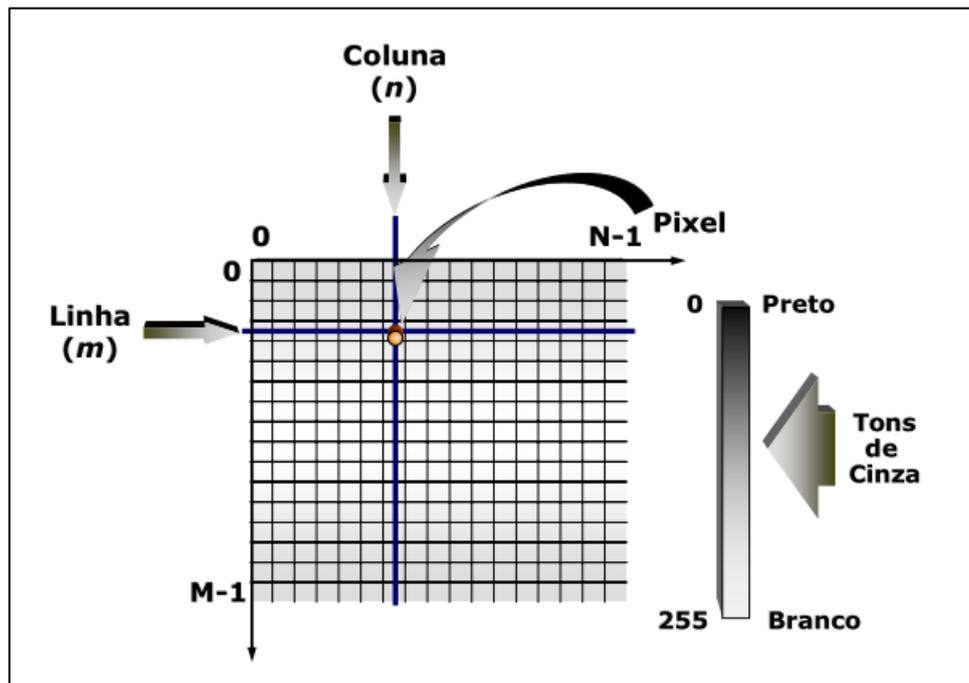


Figura 2.20 – Representação de uma imagem digital monocromática bidimensional (QUEIROZ; GOMES, 2006).

Em imagens digitais monocromáticas a intensidade de iluminância de f no ponto (x, y) é chamado de tom de cinza ou ainda nível de cinza (L) do *pixel*. Estas imagens digitais contêm somente um canal e a expressão (2.15) apresenta o intervalo de variação dos valores deste canal (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; NOGUEIRA, 2013).

$$L_{min} \leq L \leq L_{max} \quad (2.15)$$

Em que L_{min} e L_{max} são valores finitos e positivos. O intervalo citado anteriormente é chamado de escala de cinza da imagem digital e possui variação de tons do preto ao branco, conforme ilustra a Figura 2.21 (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; NOGUEIRA, 2013).



Figura 2.21 – Gradação com 256 níveis de intensidade (GOMES; VELHO, 2003).

No sistema RGB¹, pode-se entender um *pixel* de uma imagem digital cromática como um vetor de três elementos, sendo os elementos deste vetor representados pelas intensidades de vermelho, verde e azul. A combinação de três imagens digitais monocromáticas pode representar uma imagem digital cromática e esta combinação é apresentada na expressão (2.16) (QUEIROZ; GOMES, 2006).

$$f(x, y) = (f_R(x, y) + f_G(x, y) + f_B(x, y)) \quad (2.16)$$

No qual $f_R(x, y)$, $f_G(x, y)$ e $f_B(x, y)$ demonstram, correspondentemente, as intensidades luminosas de vermelho, verde e azul da imagem digital no ponto (x, y) . A Figura 2.22 (a) mostra a imagem digital somente com o canal vermelho, a (b) ilustra a imagem digital apenas com o canal verde, enquanto

¹ RGB – abreviatura do sistema de cores primárias vermelha (*red*), verde (*green*) e azul (*blue*).

que a (c) apresenta unicamente o canal azul. Já na Figura 2.22 (d) pode ser observado o resultado da combinação das três imagens digitais citadas anteriormente, formando assim, uma imagem digital cromática com os canais vermelho, verde e azul (DIOGO, 2011; QUEIROZ; GOMES, 2006).

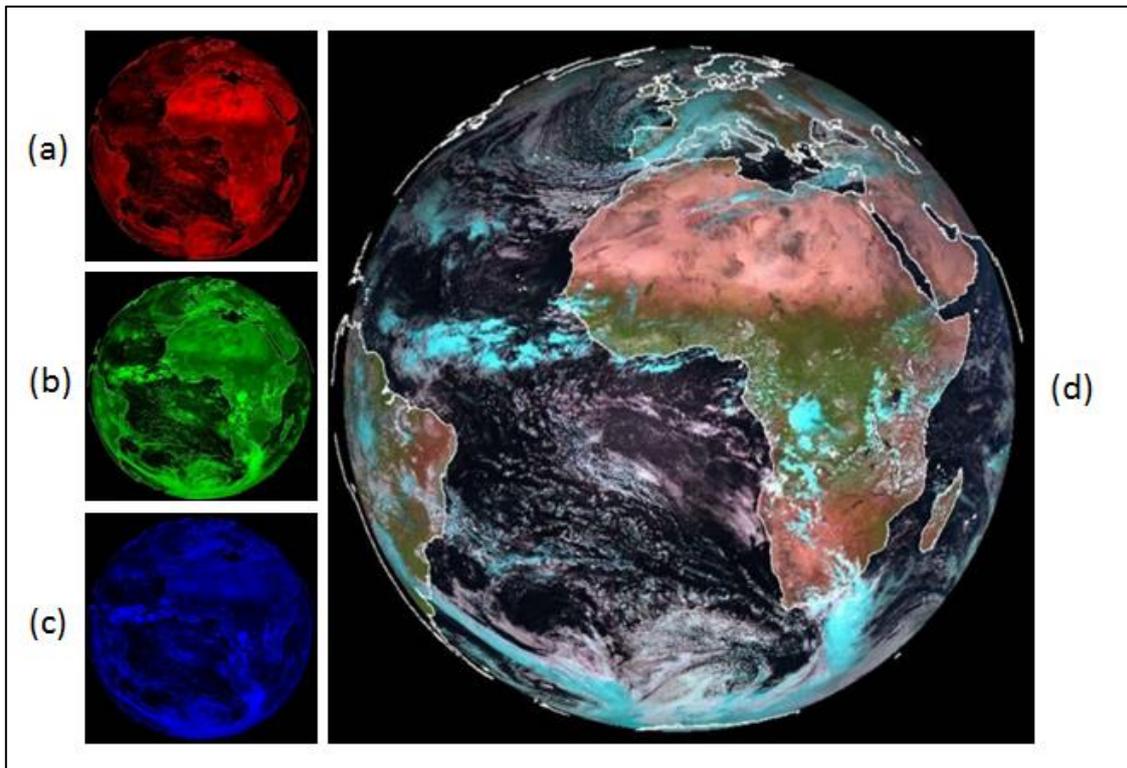


Figura 2.22 – a) Imagem com canal vermelho (R). b) Imagem com canal verde (G). c) Imagem com canal azul (B). d) Imagem composta pela combinação dos três canais (RGB) (Adaptado de DIOGO, 2011).

O sistema RGB, utiliza três cores primárias, apresentadas no Quadro 2.7, que quando combinadas de formas distintas podem gerar uma grande diversidade de cores, que varia desde cores secundárias conforme Quadro 2.7 até tons de cinzas, preto e branco (DIOGO, 2011).

Primárias (RGB)	Secundárias (CMY)
Vermelho (R)	Ciano (C)
Verde (G)	Magenta (M)
Azul (B)	Amarelo (Y)

Quadro 2.7 – Sistema de cores primárias e secundárias (DIOGO, 2011).

Através das cores do sistema primário, ilustrada na Figura 2.23, e do sistema secundário, chega-se a uma ampla variedade de cores, como

informado anteriormente. A cor branca é obtida por meio da mistura das três cores primárias. Já a cor preta através da ausência destas cores. Desde que não seja o sistema de cores primário, ao combinar três cores em quantidades semelhantes chega-se aos diversos tons de cinza (DIOGO, 2011).

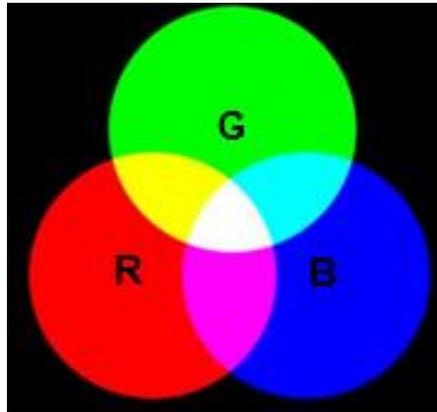


Figura 2.23 – Cores primárias RGB (Adaptado de DIOGO, 2011).

2.3.2 Processamento de imagens

O processamento de imagens (PI) é definido como um conjunto de métodos para analisar dados, através de algoritmos especializados, que usam imagens para conseguir informações que levem à tomada de decisão. O item principal do PI é a imagem ou um grupo delas, capturadas por meio de diversos dispositivos, entre os quais câmeras e *scanners* (MENESES; DE ALMEIDA, 2012; SBEGHEN, 2007).

Este processamento tem duas finalidades principais: melhorar o conhecimento visual para compreensão humana e processar dados das cenas para automatizar a interpretação por meio de microcomputadores (GONZALEZ; WOODS, 2002; MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; NOGUEIRA, 2013).

Estrutura-se o processamento de imagens em etapas, como pode ser observado na Figura 2.24. Esta estruturação tem por objetivo organizar os procedimentos que constituem o PI, o que permite flexibilidade organizacional e através desta flexibilidade pode-se ignorar ou eliminar etapas (GONZALEZ; WOODS, 2002; NOGUEIRA, 2013).

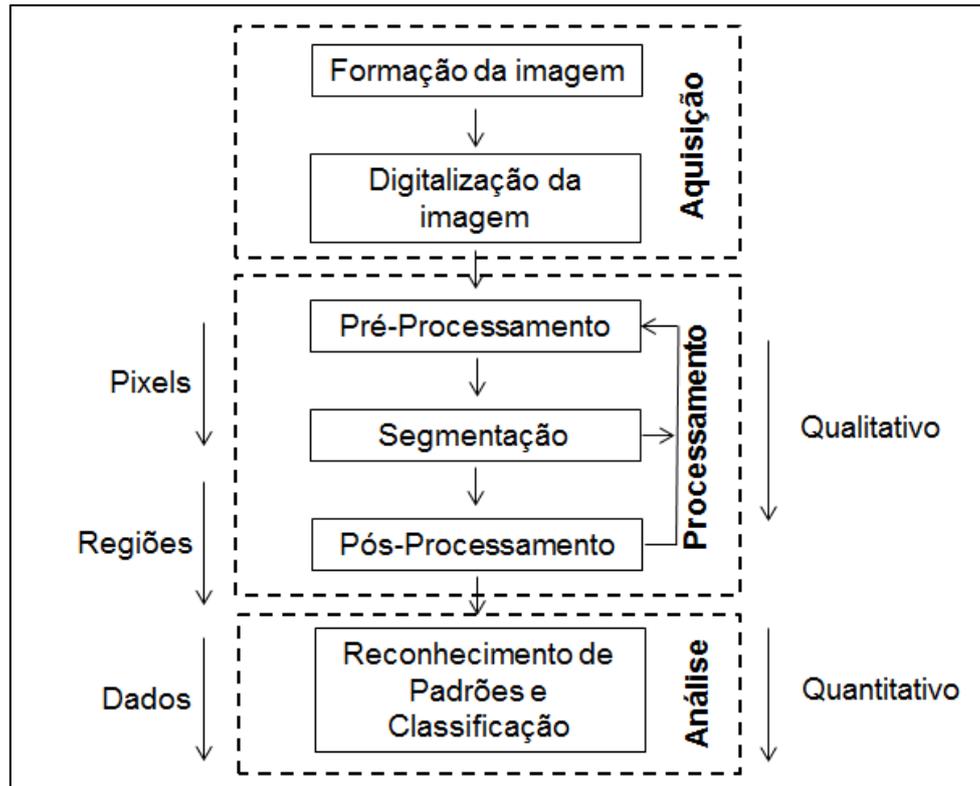


Figura 2.24 – Estrutura do processamento de imagens digitais (ALVES, 2006).

Na Figura 2.24, pode-se observar os procedimentos divididos em três etapas, sendo: aquisição, processamento e análise. A primeira etapa é constituída por formação da imagem e digitalização da imagem, enquanto que a segunda por pré-processamento, segmentação e pós-processamento, já a terceira por reconhecimento de padrões e classificação. *A priori* ocorre a qualificação da imagem, usando essencialmente os *pixels* e regiões e *a posteriori* acontece à quantificação desta imagem (ALVES, 2006; NOGUEIRA, 2013).

Aquisição é a etapa incumbida de formar e digitalizar imagem. A transformação de uma cena real em três dimensões, obtida por meio de uma câmera, em sinal analógico é denominado de fase de formação da imagem. Para que um microcomputador interprete este sinal é necessário digitaliza-lo. Já a fase de digitalização da imagem é constituída pela amostragem e quantização. A amostragem é a discretização espacial enquanto que a quantização é a discretização em amplitude da imagem (ALVES, 2006; NOGUEIRA, 2013).

Processamento é a etapa responsável por preparar a imagem para ser analisada de forma digital. A primeira fase do processamento é denominada de pré-processamento, esta fase é incumbida de melhorar a qualidade da imagem para as próximas fases. Já a segunda, chamada de segmentação, é responsável por dividir uma imagem em partes significativas para resolver um determinado problema com intuito de encontrar objetos de interesses na imagem. Enquanto que na terceira, nomeada de pós-processamento, um esquema de representação é definido, em que os dados tornam-se apropriados para o microcomputador (ALVES, 2006; NOGUEIRA, 2013).

Análise é a etapa que tem por objetivo descobrir, identificar e entender padrões pertinentes a uma determinada tarefa com base em imagens. Esta etapa possui métodos de reconhecimento por decisão, de estrutura e de interpretação de imagens (ALVES, 2006; GONZALEZ; WOODS, 2002; NOGUEIRA, 2013).

2.3.3 Técnicas de transformações de imagens

As técnicas de transformações de imagens têm por propósito corrigir e melhorar certas características de uma imagem. Na correção, realiza-se a extração de características desagradáveis. Já na melhoria evidenciam-se certas características (BROOKSHEAR, 2003; GOMES, 2001; MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; SCALCO, 2003; THOMÉ, 2004; TRAINA; DE OLIVEIRA, 2006).

Diversas características de uma imagem podem ser compreendidas de forma intuitiva. Todas são usadas para corrigir ou melhorar uma imagem para uma determinada aplicação. Entre estas características estão brilho e contraste descritas respectivamente nas seções 2.3.3.1 e 2.3.3.2 (BROOKSHEAR, 2003; GOMES, 2001; MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; SCALCO, 2003; THOMÉ, 2004; TRAINA; DE OLIVEIRA, 2006).

2.3.3.1 Brilho

Brilho, do inglês *brightness*, é utilizado para representar a intensidade compreendida de um objeto que transmite luz. Uma imagem constituída principalmente por *pixels* com baixas tonalidades de cinza, é considerada escura, isto é, com brilho reduzido. Enquanto que uma imagem composta principalmente por *pixels* com altas tonalidades de cinza, é conceituada como clara, ou seja, com muito brilho (GOMES, 2001; HENRIQUES; CRUZ, 2014; MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; SCALCO, 2003; TRAINA; DE OLIVEIRA, 2006).

Define-se o brilho de uma imagem por meio da média das tonalidades de cinza dos *pixels* desta imagem em sua totalidade. Uma imagem pode ser representada por $f(x, y)$, sua dimensão por $X * Y$ e sua quantidade total de *pixel* por $n = X * Y$. Matematicamente, o brilho da imagem pode ser descrito através da expressão (2.17) (GOMES, 2001; HENRIQUES; CRUZ, 2014; MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; TRAINA; DE OLIVEIRA, 2006).

$$B = \frac{1}{n} \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} f(x, y) \quad (2.17)$$

Um exemplo de modificação de brilho em uma imagem pode ser observado na Figura 2.25. A imagem original é ilustrada na Figura 2.25 (a). Enquanto que a imagem com brilho ampliado é exibida na Figura 2.25 (b) (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

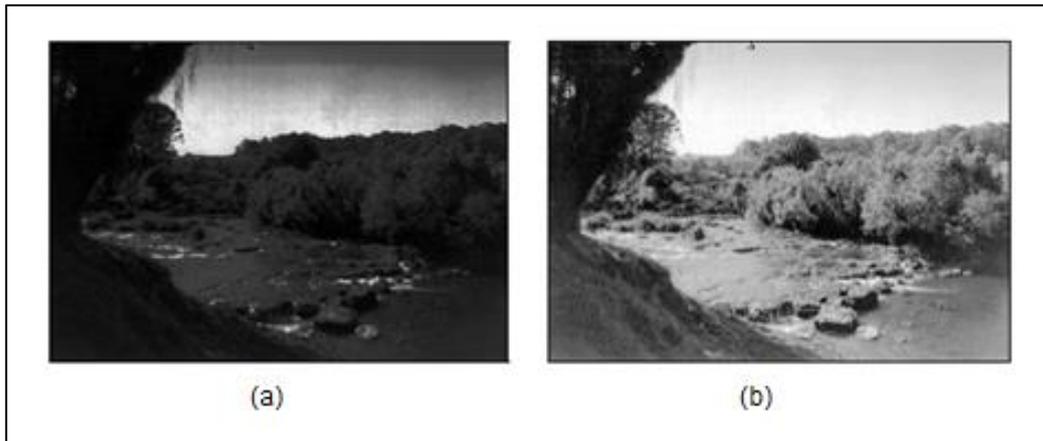


Figura 2.25 – a) Imagem original. b) Imagem com o brilho aumentado (Adaptado de MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

2.3.3.2 Contraste

Uma imagem é considerada com pouco contraste quando contém *pixels* com pequena diversidade de tonalidades de cinza. Em contrapartida, é conceituada com muito contraste quando possui grande variedade de tonalidades de cinza (GOMES, 2001; HENRIQUES; CRUZ, 2014; MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; SCALCO, 2003; TRAINA; DE OLIVEIRA, 2006).

Define-se o contraste de uma imagem através do desvio padrão das tonalidades de cinza dos *pixels* desta imagem em sua íntegra. A descrição da imagem citada na seção 2.3.3.1 foi usada nesta seção. O contraste da imagem, matematicamente pode ser definido por meio da expressão (2.18) (GOMES, 2001; HENRIQUES; CRUZ, 2014; MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

$$C = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{y=0}^{Y-1} \sum_{x=0}^{X-1} [f(x, y) - B]^2} \quad (2.18)$$

A Figura 2.26 apresenta um exemplo de modificação de contraste em uma imagem. A Figura 2.26 (a) exibe a imagem original. Já a Figura 2.26 (b) ilustra a imagem com o contraste ampliado (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

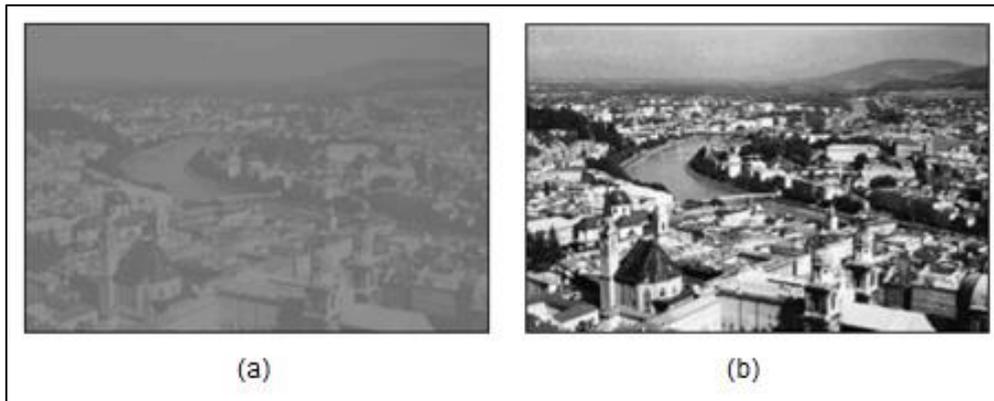


Figura 2.26 – a) Imagem original. b) Imagem com o contraste aumentado (Adaptado de MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

2.3.4 Segmentação

O processo fundamental da segmentação consiste em separar uma imagem em regiões significativas para o problema a ser resolvido, isto é, detectar os objetos de interesse de uma imagem. Este processo, ainda que fácil de descrever, é de árdua implementação (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; MELLO, 2013a; NOGUEIRA, 2013; PEDRINI, 2013a; SANTOS; MADEIRA, 2013).

A Figura 2.27 (a) ilustra uma imagem original com um conjunto de objetos numerados de um a nove, enquanto que a Figura 2.27 (b) apresenta esta mesma imagem já segmentada com os objetos de interesse da imagem detectados (SANTOS; MADEIRA, 2013).

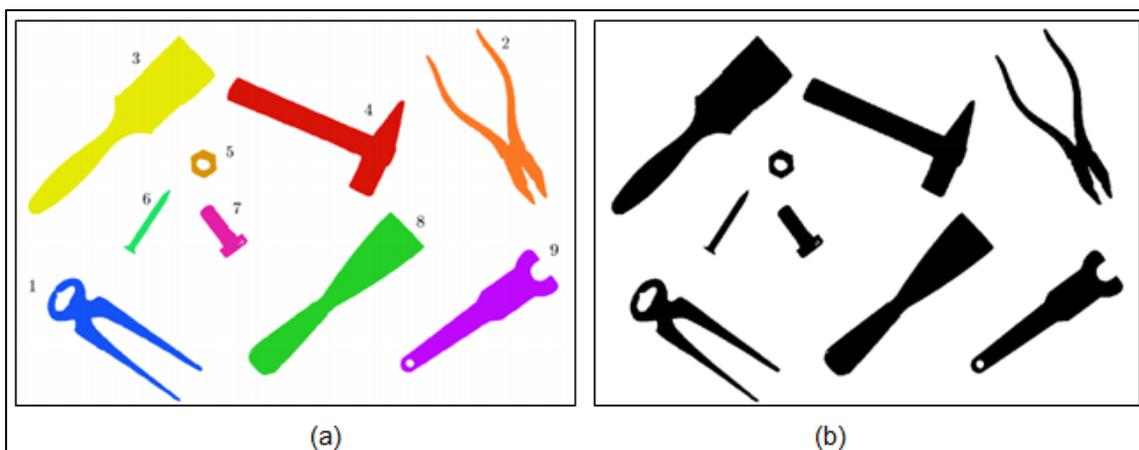


Figura 2.27 – a) Imagem original. b) Imagem segmentada (Adaptado de SANTOS; MADEIRA, 2013).

Em geral, os algoritmos de segmentação são fundamentados em descontinuidade e similaridade, que são as propriedades elementares dos valores de intensidade do brilho (GONZAGA, 2013; GONZALEZ; WOODS, 2002; MELLO, 2013a; NOGUEIRA, 2013; PEDRINI, 2013a; QUEIROZ; GOMES, 2006). As seções 2.3.4.1 e 2.3.4.2 abordam estes assuntos com mais detalhes.

2.3.4.1 Segmentação por descontinuidade

Os algoritmos de descontinuidade segmentam a imagem baseados em alterações bruscas de valores de intensidade de nível de cinza. Estes algoritmos identificam descontinuidades como linhas, pontos e bordas da imagem (GONZALEZ; WOODS, 2002; MELLO, 2013a; NOGUEIRA, 2013; PEDRINI, 2013a; QUEIROZ; GOMES, 2006; SOBRAL, 2005).

Os algoritmos de detecção de linhas e pontos baseiam-se em varrer a imagem através de máscaras. Já o de detecção de bordas (*Edge detection*) fundamenta-se em aplicar derivadas de primeira e segunda ordem nas intensidades de brilho dos *pixels*, sendo este abordado com detalhes na seção 2.3.4.1.1 (GONZALEZ; WOODS, 2002; MELLO, 2013a; NOGUEIRA, 2013; PEDRINI, 2013a; QUEIROZ; GOMES, 2006; SOBRAL, 2005).

2.3.4.1.1 Detecção de bordas

A borda de uma imagem monocromática é o limite entre duas regiões com diferenças abruptas de níveis de cinza relativamente similares, ou seja, são regiões da imagem com ocorrência de alteração brusca de intensidade de brilho. Diversos fatores são responsáveis por causar as bordas na imagem, entre os quais descontinuidade na superfície, profundidade, cor e iluminação (GONZAGA, 2013; MATIAS, 2007; MELLO, 2013a; NOGUEIRA, 2013; WANGENHEIM, 2013a).

É necessário calcular a derivada espacial bidimensional para se detectar as bordas de uma imagem. Este cálculo é executado por meio de filtros lineares que usam máscaras para varrer a imagem. Comumente operadores

diferenciais são utilizados para varrer a imagem e detectar as bordas, estes operadores são divididos em duas classes, como apresentado no Quadro 2.8 (GONZAGA, 2013; MATIAS, 2007; MELLO, 2013a; NOGUEIRA, 2013; WANGENHEIM, 2013a).

Operadores diferenciais	Descrição
Diferenciador de primeira ordem	A aresta ² é realçada através do gradiente elevado
Diferenciador de segunda ordem	A aresta é salientada por meio do cruzamento em zero

Quadro 2.8 – Operadores diferenciais com suas respectivas descrições (Adaptado de NOGUEIRA, 2013).

O diferenciador de primeira ordem baseia-se na comparação do valor do gradiente, *pixel a pixel*, por meio de um limiar em níveis de cinza. As bordas são evidenciadas somente quando o valor do gradiente da função nas coordenadas (x, y) for maior que o valor do limiar. Pode-se representar matematicamente o gradiente de uma imagem $f(x, y)$ na posição (x, y) através da expressão (2.21) (GONZAGA, 2013; GONZALEZ; WOODS, 2002; MATIAS, 2007; NOGUEIRA, 2013).

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Um dos operadores gradientes mais utilizados para detecção de bordas, linhas horizontais e linhas verticais é o de Sobel. Este operador é representado pela matriz de ordem 3x3 e sua máscara é ilustrada na Figura 2.28 (GONZAGA, 2013; GONZALEZ; WOODS, 2002; MATIAS, 2007; MELLO, 2013a; NOGUEIRA, 2013).

²Aresta – encontro das fronteiras dos segmentos.

-1	-2	-1	-1	0	1
0	0	0	-2	0	2
1	2	1	-1	0	1

Figura 2.28 – Máscara para o operador de Sobel (MATIAS, 2007).

Um exemplo de aplicação do operador de Sobel é apresentado na Figura 2.29. Na Figura 2.29 (a) uma imagem original é ilustrada, enquanto que na Figura 2.29 (b) pode ser observado uma imagem após a aplicação do operador de Sobel (GONZALEZ; WOODS, 2002).

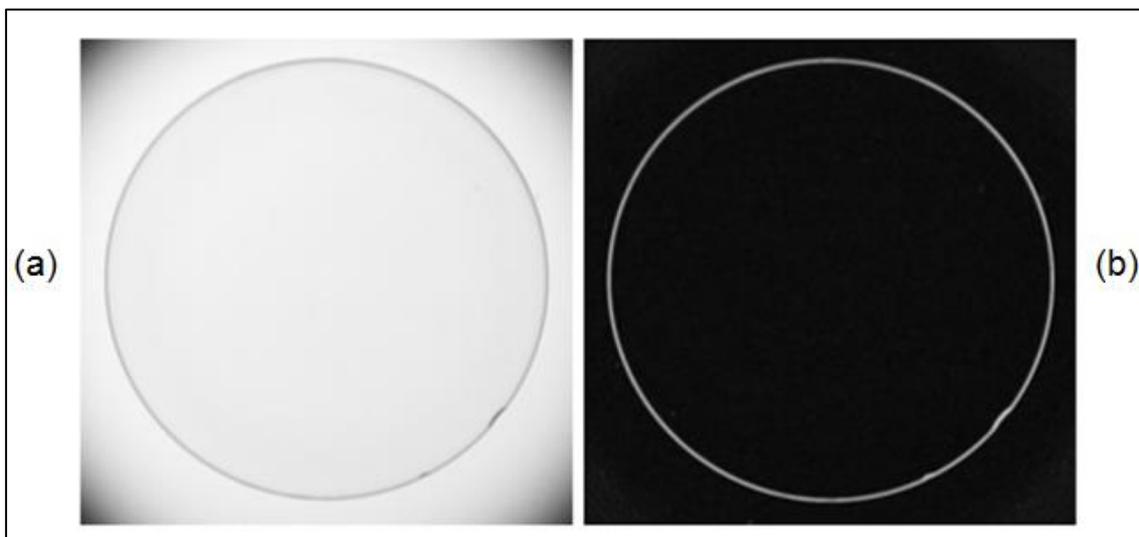


Figura 2.29 – a) Imagem original. b) Imagem com aplicação do operador de Sobel (GONZALEZ; WOODS, 2002).

Os diferenciadores de segunda ordem usam alterações abruptas na derivada espacial de segunda ordem para destacar as bordas. O operador Laplaciano é um dos diferenciadores de segunda ordem mais usados na área de visão computacional. Este operador usa a propriedade do cruzamento em zero para detecção de bordas. Matematicamente, o Laplaciano de uma função $f(x,y)$ pode ser representado por meio da expressão (2.21) (MATIAS, 2007; MELLO, 2013a; NOGUEIRA, 2013).

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (2.20)$$

O Laplaciano da função $f(x,y)$ é comumente representado pela matriz de ordem 3x3, uma demonstração da sua máscara pode ser observada na Figura 2.30 (GONZAGA, 2013; GONZALEZ; WOODS, 2002; MATIAS, 2007; MELLO, 2013a; NOGUEIRA, 2013).

0	1	0
1	-4	1
0	1	0

Figura 2.30 – Máscara para o operador Laplaciano (MATIAS, 2007).

A Figura 2.31 ilustra um exemplo de aplicação do operador Laplaciano. A Figura 2.31 (a) apresenta a imagem original, já a Figura 2.31 (b) mostra a imagem depois da aplicação do operador Laplaciano (MATIAS, 2007).



Figura 2.31 – a) Imagem original. b) Imagem com aplicação do operador Laplaciano (MATIAS, 2007).

2.3.4.2 Segmentação por similaridade

Os algoritmos de similaridade separam a imagem em regiões homogêneas conforme a similaridade de um grupo de regras pré-definidas. Entre os algoritmos que constituem este tipo de segmentação está o de limiarização (*thresholding*) detalhado na seção 2.3.4.2.1 (GONZALEZ; WOODS, 2002; NOGUEIRA, 2013; QUEIROZ; GOMES, 2006; SOBRAL, 2005).

2.3.4.2.1 Limiarização

O princípio da limiarização fundamenta-se em dividir regiões de uma imagem quando esta dispõe de apenas duas classes, sendo fundo e objeto. Após aplicação da limiarização a imagem de saída é binária, e por este motivo diversas vezes esse processo é chamado de binarização. Na Figura 2.32 (a) pode ser observado uma imagem original, já a Figura 2.32 (b) ilustra o fundo da imagem enquanto que a Figura 2.32 (c) mostra o objeto da imagem (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; MELLO, 2013a, 2013b).

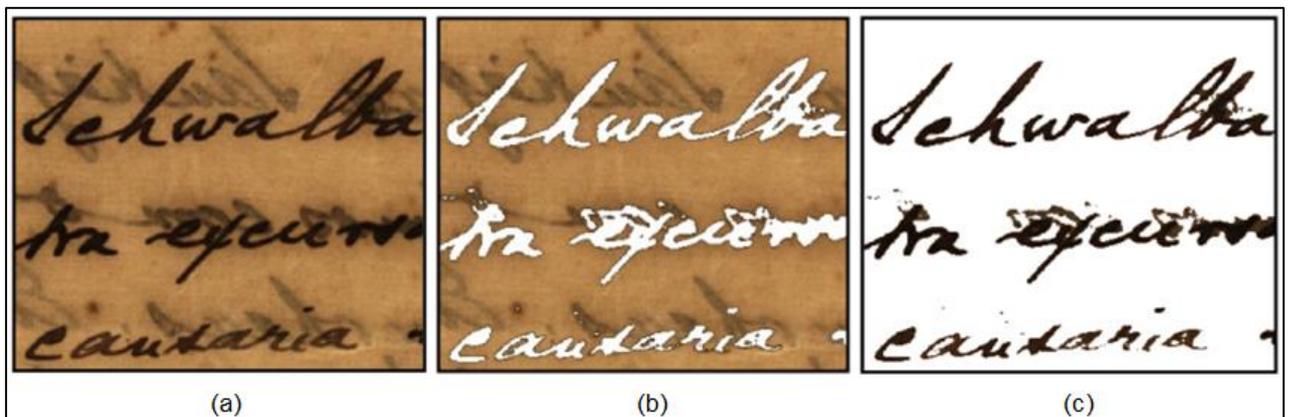


Figura 2.32 – a) Imagem original. b) Fundo da imagem. c) Objeto da imagem (Adaptado de MELLO, 2013b).

O modo mais descomplicado de realizar a técnica de limiarização é através da conversão de cada *pixel* no qual os tons de cinza que são maiores ou iguais que um determinado limiar (L) passe a ser branco enquanto que os menores que este limiar passe a ser preto. (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; MELLO, 2013b; NOGUEIRA, 2013; VASCONCELOS, 2011).

Esta técnica baseia-se na entrada de uma imagem $f(x,y)$ com diversos tons de cinza para fornecer uma imagem $g(x,y)$, denominada de imagem limiarizada. Matematicamente, pode-se representar a limiarização através da expressão (2.21) (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; NOGUEIRA, 2013; VASCONCELOS, 2011).

$$g(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{se } f(x,y) \geq L \\ 0, & \text{se } f(x,y) < L \end{cases} \quad (2.21)$$

Seguindo estes princípios pode-se definir objeto e fundo da imagem. Em que objeto é o elemento que possuir valor do *pixel* maior ou igual a um determinado limiar (L) e fundo o que possuir valor do *pixel* menor a este limiar. Um exemplo de algoritmo de limiarização pode ser observado na Figura 2.33, em que o parâmetro de recorte L é igual a 127 (MELLO, 2013b; VASCONCELOS, 2011).

```

Se  $L < 127$  então
     $L = 0$ ;
Senão
     $L = 255$ ;
Fimse;

```

Figura 2.33 – Algoritmo de limiarização com L igual a 127 (Adaptado de MELLO, 2013b).

No algoritmo descrito anteriormente, o parâmetro de recorte L é de 127, em que os *pixels* com valor maior ou igual a L foram alterados para 255 (branco) e os demais alterados para zero (preto). A Figura 2.35 (a) ilustra uma imagem original enquanto que a Figura 2.35 (b) apresenta esta mesma imagem após a aplicação do algoritmo de limiarização da Figura 2.33 (MELLO, 2013b).



Figura 2.34 – a) Imagem original. b) Imagem com aplicação do algoritmo de limiarização com L igual a 127 (MELLO, 2013b).

Ainda é possível realizar o processo de limiarização através de uma faixa de corte adaptando o algoritmo de recorte citado na Figura 2.33. Esta faixa constitui-se de um intervalo de valores, no exemplo apresentado na Figura 2.35 o intervalo de L está entre 50 e 100 exclusive (MELLO, 2013b; SOBRAL, 2005).

```

Se ( $L > 50$ ) e ( $L < 100$ ) então
     $L = 255$ ;
Senão
     $L = 0$ ;
Fimse;

```

Figura 2.35 – Algoritmo de recorte (faixa de corte) para L entre 50 e 100 exclusive (Adaptado de MELLO, 2013b).

No algoritmo supracitado na Figura 2.35, qualquer valor do *pixel* pertencente ao intervalo L , entre 50 e 100 exclusive, é alterado para 255 (branco) e os valores menores ou iguais a 50 e maiores ou iguais a 100 alterados para zero (preto). A Figura 2.36 (a) mostra uma imagem original, já a Figura 2.36 (b) ilustra esta mesma imagem após a aplicação do algoritmo de limiarização (faixa de corte) para L entre 50 e 100 exclusive (MELLO, 2013b; SOBRAL, 2005).

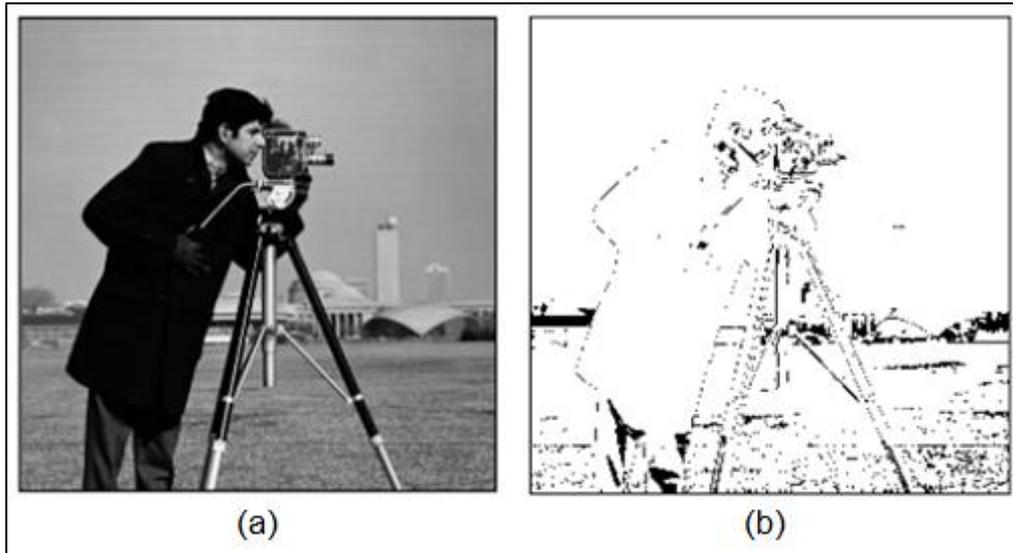


Figura 2.36 – a) Imagem original. b) Imagem com aplicação do algoritmo de limiarização (faixa de corte) para L entre 50 e 100 exclusiva (MELLO, 2013b).

2.3.5 Morfologia matemática

A morfologia matemática, também conhecida como processamento de imagem morfológica, é a área do processamento de imagens utilizada para extrair características da imagem, concentrando-se especificamente na estrutura geométrica dos objetos da imagem. Muitas áreas do processamento de imagens utilizam a morfologia matemática, entre as quais filtragem, realce e segmentação (DE MENEZES, 2009; FALCÃO, 2005; LIMA, 2009; MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; NOGUEIRA, 2013; PEDRINI, 2013b; REN, 2010; WANGENHEIM, 2013b).

A morfologia matemática, foi desenvolvida na década de 1960, por George Matheron e Jean Serra, utilizando a teoria dos conjuntos em imagens binárias. Depois, a morfologia também foi aplicada em imagens com tons de cinza, utilizando a teoria de reticulados (DE MENEZES, 2009; FALCÃO, 2005; LIMA, 2009; PEDRINI, 2013b; SILVA, 1998).

Fundamentalmente, a transformação morfológica é constituída pelo confronto da estrutura geométrica de uma imagem com uma menor. Esta transformação é um dos pilares da morfologia e é denominada de elemento estruturante (DE MENEZES, 2009; FACON, 2011; FALCÃO, 2005; LIMA, 2009; MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; PEDRINI, 2013b).

Outros dois pilares da morfologia são a erosão e dilatação, que são operações básicas utilizadas em tarefas de transformações geométricas de imagens. Estes pilares possibilitam a implementação de diversos algoritmos com simplicidade, inclusive, por composição, permite gerar outros operadores poderosos (DE MENEZES, 2009; FALCÃO, 2005; LIMA, 2009; NOGUEIRA, 2013; PEDRINI, 2013b; SILVA, 1998).

2.3.5.1 Morfologia matemática binária

A morfologia matemática binária é a área da morfologia matemática que utiliza apenas imagens binárias, as operações básicas deste tipo de morfologia são dilatação binária e erosão binária, detalhados respectivamente nas seções 2.3.5.1.1 e 2.3.5.1.2 (MATTA, 1998; NOGUEIRA, 2013; WANGENHEIM, 2013b).

2.3.5.1.1 Dilatação binária

A dilatação binária, também conhecida como dilatação binária, pode ser definida como uma das principais operações básicas da morfologia matemática binária, responsável essencialmente por expandir áreas claras em uma imagem binária. Esta operação morfológica é correspondente à adição de dois conjuntos, e pode ser representada pelo símbolo \oplus (DE MENEZES, 2009; LIMA, 2009; MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; NOGUEIRA, 2013; PEDRINI, 2013b; WANGENHEIM, 2002).

A dilatação binária do conjunto A , que é a imagem original, com o elemento estruturante B , denotado pelo símbolo $A \oplus B$, pode ser representada matematicamente através da expressão (2.22) (DE MENEZES, 2009; LIMA, 2009; MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; NOGUEIRA, 2013; PEDRINI, 2013b; WANGENHEIM, 2002).

$$A \oplus B = \{c | c = a + b, a \in A, b \in B\} \quad (2.22)$$

A Figura 2.37 ilustra três conjuntos, sendo respectivamente a imagem original, o elemento estruturante e a imagem resultante. A Figura 2.37 (a) apresenta a imagem original denotada pelo conjunto A . Já a Figura 2.37 (b) mostra o elemento estruturante representado pelo conjunto B . Enquanto que a Figura 2.37 (c) exibe a imagem dilatada demonstrada pelo conjunto resultante C (LIMA, 2009; WANGENHEIM, 2002).

$$\begin{array}{ccc}
 A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{(7,7)} & B = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}_{(3,3)} & C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}_{(7,7)} \\
 (a) & (b) & (c)
 \end{array}$$

Figura 2.37 – a) Conjunto A . b) Conjunto B . c) Conjunto resultante C (Adaptado de LIMA, 2009).

Na Figura 2.38 é apresentado um exemplo de aplicação da operação morfológica de dilatação binária. Na Figura 2.38 (a) é ilustrado a imagem original. Já na Figura 2.38 (b) pode ser observado a imagem depois da aplicação da dilatação binária (WANGENHEIM, 2002).

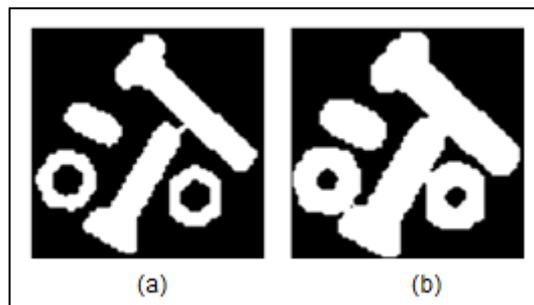


Figura 2.38 – a) Imagem original. b) imagem após aplicação da dilatação binária (WANGENHEIM, 2002).

Após a aplicação do operador de dilatação, é visível que as áreas claras da imagem crescem enquanto que as áreas escuras inferiores ao elemento estruturante são suprimidas, conforme pode ser visualizado na Figura 2.38 (b) (DE MENEZES, 2009; LIMA, 2009; MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; NOGUEIRA, 2013; PEDRINI, 2013b; WANGENHEIM, 2002).

2.3.5.1.2 Erosão binária

Outro importante operador de morfologia matemática binária é a erosão binária. Este operador tem como propósito reduzir áreas claras de uma imagem binarizada. Geralmente a erosão binária é denotada pelo símbolo \ominus (DE MENEZES, 2009; LIMA, 2009; MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; NOGUEIRA, 2013; PEDRINI, 2013b; WANGENHEIM, 2002).

Pode-se demonstrar matematicamente, a erosão binária, de uma imagem original representada pelo conjunto A , com o elemento estruturante denotado pelo conjunto B e a uma imagem resultante simbolizada por $A \ominus B$, através da expressão (2.23) (LIMA, 2009; WANGENHEIM, 2002).

$$A \ominus B = \{x | x + b \in A \text{ para todo } b \in B\} \quad (2.23)$$

A imagem original, o elemento estruturante e a imagem resultante são mostrados na Figura 2.39. A imagem original é representada pelo conjunto A na Figura 2.39 (a). Enquanto que o elemento estruturante é demonstrado pelo conjunto B na Figura 2.39 (b). Já a imagem erodida é denotada pelo conjunto resultante C na Figura 2.39 (c) (LIMA, 2009; WANGENHEIM, 2002).

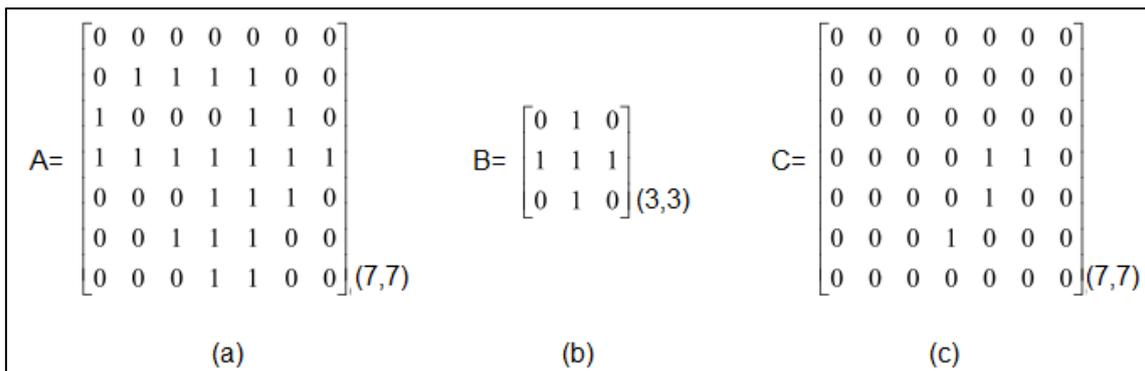


Figura 2.39 – a) Conjunto A . b) Conjunto B . c) Conjunto resultante C (Adaptado de LIMA, 2009).

Um exemplo de aplicação da operação morfológica de erosão binária pode ser visualizado na Figura 2.40. A Figura 2.40 (a) apresenta a imagem original, enquanto a Figura 2.40 (b) mostra a imagem após a aplicação da erosão binária (WANGENHEIM, 2002).

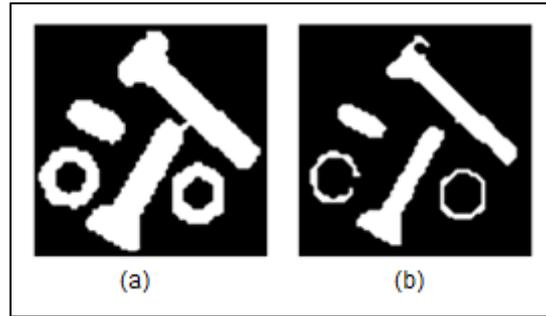


Figura 2.40 – a) Imagem original. b) imagem após aplicação da erosão binária (WANGENHEIM, 2002).

Nota-se que depois da aplicação do operador de erosão binária, nitidamente as áreas claras da imagem suprimem enquanto as escuras crescem, procedendo contrariamente ao operador de dilatação binária, como pode ser observado na Figura 2.40 (b) (DE MENEZES, 2009; LIMA, 2009; MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; NOGUEIRA, 2013; PEDRINI, 2013b; WANGENHEIM, 2002).

2.3.6 Transformações geométricas

No processamento de imagem, as transformações geométricas, são descritas como operações para redefinir a relação da posição espacial dos *pixels* que constituem a imagem (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

As vantagens destas transformações vão desde a reparação de distorções até a criação de efeitos artísticos nas imagens. Diversas operações fazem parte das transformações geométricas, entre as quais, as operações algébricas, de ampliação, de redução, de rotação e primitivas gráficas (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

2.3.6.1 Operações algébricas

Podem-se conceituar operações algébricas como aquelas que fornecem a divisão, multiplicação, subtração ou adição *pixel a pixel* de duas ou mais imagens. Entre as operações usadas com mais frequência estão as de adição e subtração. Matematicamente, estas operações podem ser representadas por

meio das expressões (2.24) e (2.25) (CÁMARA-CHÁVEZ, 2013; GÓMEZ, 2010; TRAINA; DE OLIVEIRA, 2006).

$$C(x, y) = A(x, y) + B(x, y) \quad (2.24)$$

$$C(x, y) = A(x, y) - B(x, y) \quad (2.25)$$

Em que, as imagens de entrada são $A(x, y)$ e $B(x, y)$ e a imagem resultante é $C(x, y)$.

A Figura 2.41 apresenta um esboço de três matrizes. Na Figura 2.41 (a) é ilustrado a matriz bidimensional da imagem A . Na Figura 2.41 (b) é mostrado a matriz da imagem B . Enquanto que a Figura 2.41 (c) exibe a matriz bidimensional resultante da adição da matriz da imagem A com a matriz da imagem B (CÁMARA-CHÁVEZ, 2013).

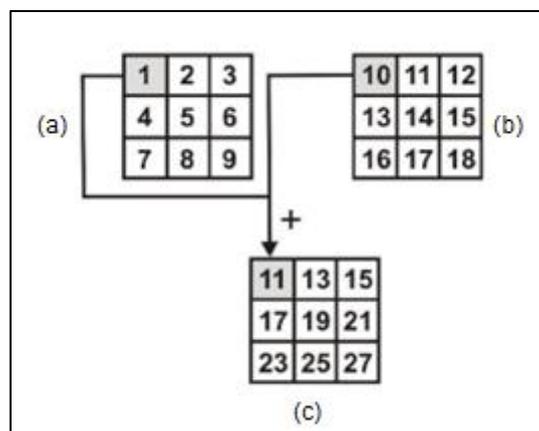


Figura 2.41 – a) Matriz da imagem A . b) Matriz da imagem B . c) Matriz resultante da adição da matriz da imagem A com B (Adaptado de CÁMARA-CHÁVEZ, 2013).

A operação algébrica de adição é utilizada para adquirir de uma mesma cena a média de várias imagens. Esta operação também é usada para diminuir os efeitos de ruídos aleatórios da imagem. Além de ser empregada para sobrepor o conteúdo de uma imagem com outra (CÁMARA-CHÁVEZ, 2013; GÓMEZ, 2010; TRAINA; DE OLIVEIRA, 2006).

Já a operação de subtração é empregada para extrair alguns padrões indesejáveis da imagem. Da mesma forma, esta operação é usada para detectar alterações da mesma cena entre duas imagens. O cálculo do gradiente, para a segmentação de detecção de bordas explicado na seção 2.3.4.1.1, também pode utilizar a operação de subtração (CÁMARA-CHÁVEZ, 2013; GÓMEZ, 2010; TRAINA; DE OLIVEIRA, 2006).

A Figura 2.42 exemplifica duas operações algébricas, sendo adição e subtração. A Figura 2.42 (a) ilustra a imagem *A*. A Figura 2.42 (b) apresenta a imagem *B*. Na Figura 2.42 (c) é mostrado a adição da imagem *A* com a imagem *B*. Já na Figura 2.42 (d) é apresentado a subtração da imagem *A* com a imagem *B* (CÁMARA-CHÁVEZ, 2013).

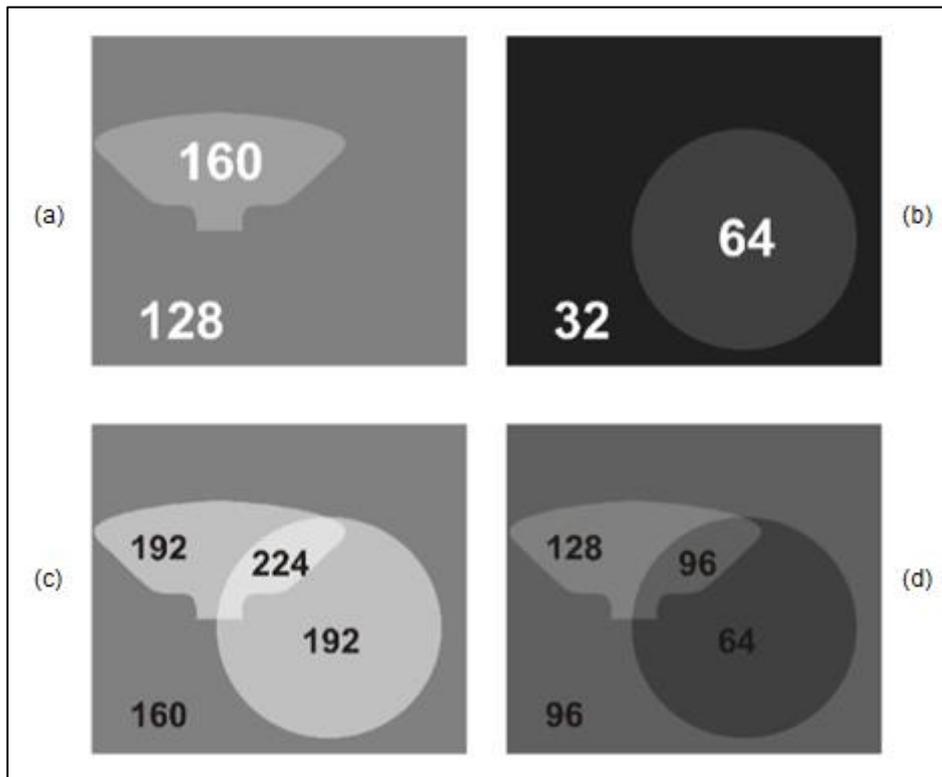


Figura 2.42 – a) Imagem *A*. b) Imagem *B*. c) Adição da imagem *A* com *B*. d) Subtração da imagem *A* com *B* (Adaptado de CÁMARA-CHÁVEZ, 2013).

2.3.6.2 Ampliação e redução

Na transformação geométrica, a operação de ampliação, do inglês *zoom in*, é conceituada como o processo no qual são aumentadas as dimensões de

uma imagem para fins de observação. Já a operação de redução, do inglês *zoom out*, é conceituada exatamente de forma oposta a operação citada anteriormente, ou seja, é o processo em que são diminuídas as dimensões da imagem (DA SILVA, 2014; GONZALEZ; WOODS, 2002; MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

O modo mais fácil de expandir uma imagem é através da duplicação dos valores dos *pixels* na direção horizontal ou vertical ou ainda em ambas. Comumente, o fator de expansão é idêntico nas duas direções. Contudo, há casos em que este fator não é o mesmo, nestes, o aspecto da imagem é modificado (DA SILVA, 2014; GONZALEZ; WOODS, 2002; MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

A Figura 2.43 (a) apresenta uma imagem original enquanto que a Figura 2.43 (b) ilustra uma imagem resultante após a aplicação da expansão por fator dois (*zoom in* de 2x), sendo todo *pixel* da imagem resultante reproduzido quatro vezes. Cabe ressaltar, que a imagem resultante não tem sua resolução modificada, a alteração é dada apenas para fins de observação (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

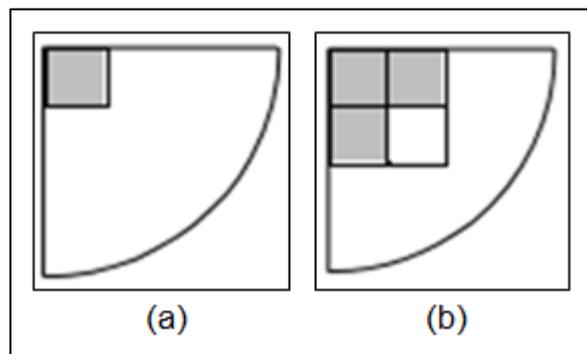


Figura 2.43 – a) Imagem original. b) Imagem resultante com expansão de um *pixel* em quatro (*zoom in* de 2x) (Adaptado de MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

Já no processo de redução de dimensões de uma imagem por fator dois, é preciso utilizar o processo oposto ao citado anteriormente, no qual cada grupo de quatro *pixels* deve ser convertido em apenas um *pixel*. Comumente, nos casos de redução de dimensão, podem ocorrer danos de informação, em que os *pixels* apresentam valores distintos de cinza. Com intuito de reduzir esta

problemática, geralmente utiliza-se a técnica de substituir o valor do *pixel* na imagem resultante pela média dos quatro *pixels* semelhantes na imagem original (GONZALEZ; WOODS, 2002; MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

A Figura 2.44 ilustra exemplos de ampliação e redução de imagem monocromática. Na Figura 2.44 (a) pode ser observada a imagem original, enquanto que a Figura 2.44 (b) mostra a imagem ampliada (*zoom in*) de duas vezes, já a Figura 2.44 (c) apresenta a imagem reduzida (*zoom out*) de duas vezes (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).



Figura 2.44 – a) Imagem original. b) Imagem ampliada (*zoom in*) de duas vezes. c) Imagem reduzida (*zoom out*) de duas vezes (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

2.3.6.3 Rotação

Pode-se rotacionar uma imagem em direção horária ou anti-horária em relação a um ângulo arbitrário. A implementação da rotação é mais fácil, quando o ângulo é múltiplo de 90° , uma vez que é necessário apenas

reproduzir os *pixels* que estão estruturados em linhas para colunas no sentido em que se pretende rotacionar a imagem (GOMES, 2011; MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

A Figura 2.45 ilustra um exemplo de rotação. Na Figura 2.45 (a) é apresentada a imagem original com tracejado destacando a primeira linha enquanto que na Figura 2.45 (b) pode ser observado também através do tracejado destacado, que as linhas são reordenadas em colunas no sentido horário de 90° (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

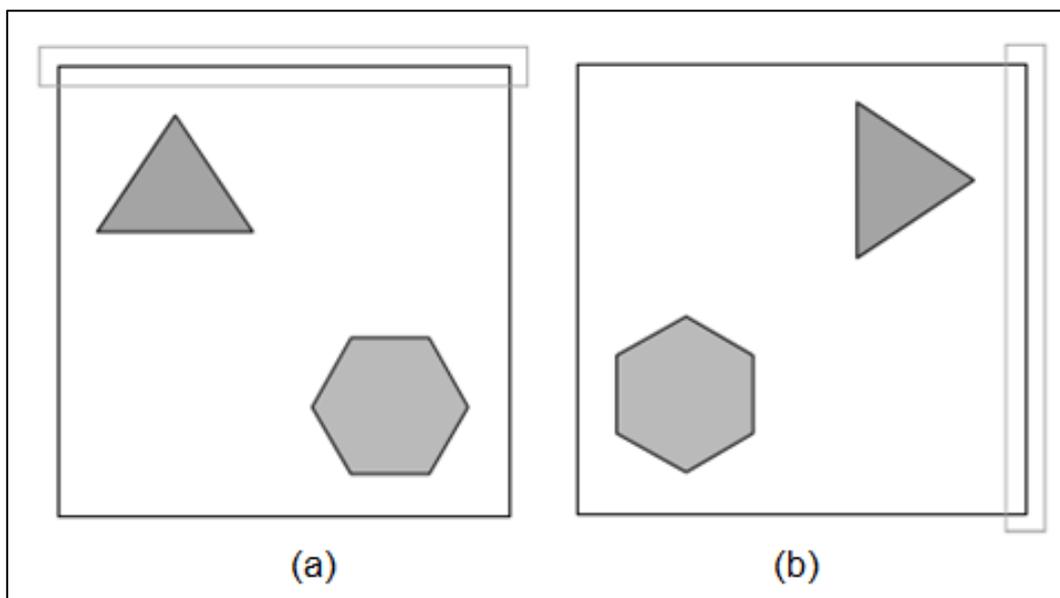


Figura 2.45 – a) Imagem original. b) Imagem rotacionada em 90° na direção horária (MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999).

Contudo, realizar a rotação de uma imagem por ângulos que não sejam múltiplos de 90° é uma tarefa mais difícil. Pode-se implementar esta tarefa utilizando técnicas de *warping*³. Matematicamente, rotaciona-se todo ponto (X, Y) da imagem em relação a um ângulo arbitrário θ , que mapeia este determinado ponto nas coordenadas (X', Y') , em que X' é determinado através da expressão (2.26) e Y' da (2.27) (GOMES, 2011, 2012; MARQUES FILHO; VIEIRA NETO, 1999; VIANNA, 2001).

³*Warping* – processo de modificação de uma imagem, em que a relação espacial das características e objetos são alterados de acordo com outra imagem.

$$X' = X \cos(\theta) + Y \sin(\theta) \quad (2.26)$$

$$Y' = Y \cos(\theta) - X \sin(\theta) \quad (2.27)$$

2.3.6.4 Primitivas gráficas

As primitivas gráficas (PG), também conhecidas como anotações gráficas, são denominadas como partes básicas que constituem um desenho, entre as quais: segmentos de reta, pontos, círculos e textos (CAVALCANTI, 2013; FAZANO, 2005; SANTOS, 2009).

Estas primitivas podem originar novas primitivas, por exemplo, a polilinha é a concatenação de diversos segmentos, já o polígono é a adaptação de polilinhas de forma fechada, enquanto que a circunferência é um caso específico de arco de elipse. A Figura 2.46 ilustra alguns exemplos de PG, sendo uma polilinha na cor preta, uma circunferência na cor vermelha, um polígono na cor verde, um segmento de reta na cor azul e um ponto na cor laranja (CAVALCANTI, 2013).

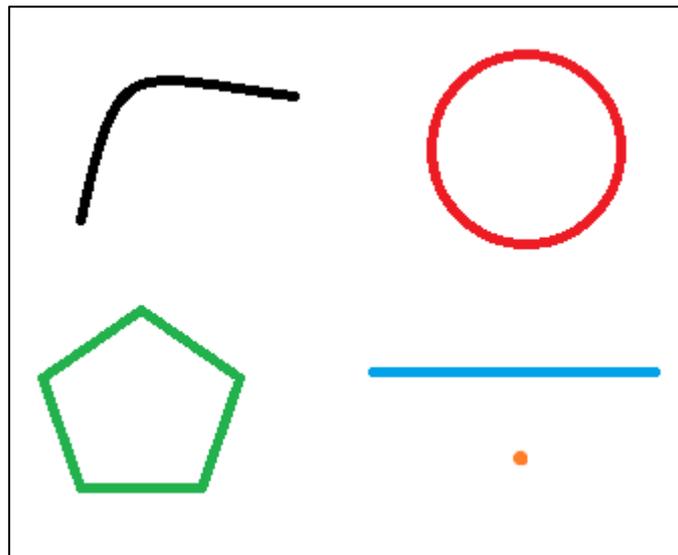


Figura 2.46 – Exemplo de primitivas gráficas (Adaptado de CAVALCANTI, 2013).

As propriedades das PG são chamadas de atributos. Estes atributos são responsáveis por customizar as primitivas. Por exemplo, nas figuras geométricas, customiza-se a cor, espessura, padrão de preenchimento e traço. Nos pontos somente as cores. Já nos textos o tipo da fonte, estilo da fonte e cor da fonte. Além destas propriedades, também é possível alterar as transformações geométricas, através da modificação do tamanho, posição e orientação do objeto (CAVALCANTI, 2013; SANTOS, 2009; SCHNEIDER, 2001).

2.3.6.4.1 Segmento de reta

Em geral, os algoritmos de segmentos de reta são usados para desenhar retas a partir de dois pontos em um plano bidimensional, entre os quais está o algoritmo de Bresenham, conhecido também por algoritmo de ponto médio, proposto em 1962 por Jack Bresenham (BITTENCOURT, 2006; CAVALCANTI, 2013; ESPERANÇA; CAVALCANTI, 2013; MANSSOUR; COHEN, 2006; SANTOS, 2009; TRAINA; DE OLIVEIRA, 2006).

Este algoritmo é incremental e utiliza apenas variáveis inteiras. Apesar de ter sido proposto há mais de 50 anos, destaca-se entre os demais por sua eficiência e ainda é amplamente utilizado, inclusive com algumas adaptações em outras áreas da tecnologia da informação e comunicação, como é o caso da inteligência artificial para formar um caminho entre os pontos P_1 e P_2 (BITTENCOURT, 2006; CAVALCANTI, 2013; ESPERANÇA; CAVALCANTI, 2013; MANSSOUR; COHEN, 2006; SANTOS, 2009; TRAINA; DE OLIVEIRA, 2006).

O algoritmo de ponto médio tem por objetivo determinar quais *pixels* devem ser desenhados, dentre as possibilidades, para plotar um segmento de reta próximo da reta ideal, com eficiência computacional. Para isso, deve-se pintar o ponto inicial P nas coordenadas (x_i, y_i) do plano bidimensional. Após é necessário escolher o ponto ao lado P_E nas coordenadas (x_{i+1}, y_i) ou ponto diagonal P_{NE} nas coordenadas (x_{i+1}, y_{i+1}) . Esta escolha é realizada após calcular qual ponto está mais perto da reta ideal. Este procedimento é ilustrado na Figura 2.47 (BITTENCOURT, 2006; CAVALCANTI, 2013; ESPERANÇA;

CAVALCANTI, 2013; SANTOS, 2009; SCHNEIDER, 2001; TRAINA; DE OLIVEIRA, 2006).

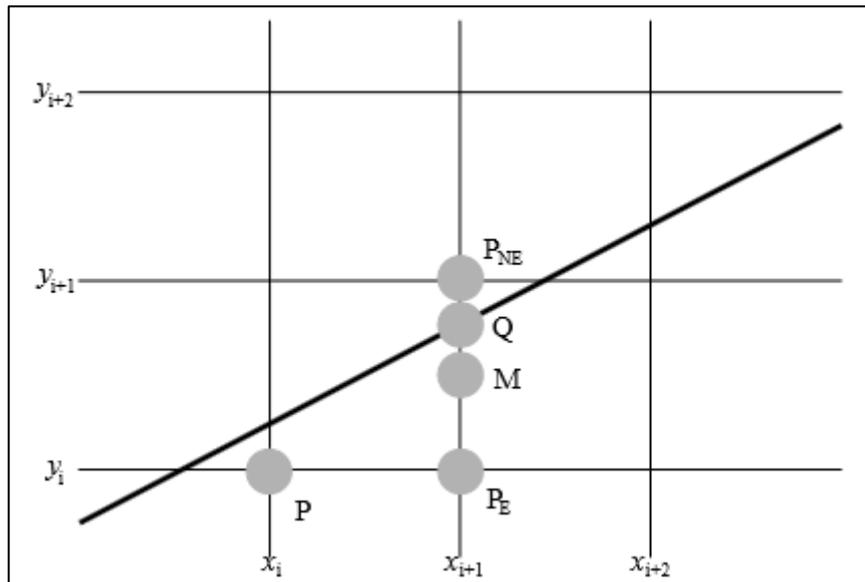


Figura 2.47 – Pontos envolvidos na seleção do próximo *pixel* (Adaptado de SCHNEIDER, 2001).

2.3.6.4.2 Polilinhas e polígonos

Os segmentos de retas compõem uma larga variedade de figuras. Pode-se desenhar grande parte destas figuras através de algoritmos elementares que invocam algoritmos de desenhar segmentos de retas, como por exemplo, o descrito na seção 2.3.6.4.1. Estas séries de segmentos de retas são denominadas de polilinha (CAVALCANTI, 2013).

Os algoritmos de desenho de polilinhas têm como objetivo unir segmentos de retas. Estes algoritmos unem o primeiro ponto ao segundo, o segundo ao terceiro e assim sucessivamente, finalizando no penúltimo ponto ao último. Basicamente os algoritmos de desenho de polilinhas são compostos de n segmentos de reta, sendo n maior que um, ou seja, é necessário ter pelo menos dois segmentos de retas para formar a polilinha (CAVALCANTI, 2013).

A Figura 2.48 ilustra um desenho de uma polilinha. Esta figura liga o ponto P_1 ao P_2 , o P_2 ao P_3 e o P_3 ao P_4 . Cabe salientar que o ponto inicial não é ligado ao ponto final (CAVALCANTI, 2013).

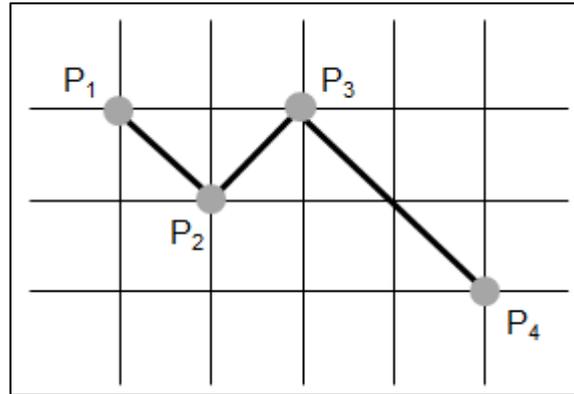


Figura 2.48 – Pontos que formam uma polilinha (Adaptado de CAVALCANTI, 2013).

Os algoritmos de desenhar polígonos são similares aos algoritmos de desenhar polilinhas, com exceção do encontro do ponto inicial com o ponto final. O algoritmo de desenhar polígonos junta o primeiro ponto com segundo, o segundo com o terceiro, o penúltimo com o último e o último com o primeiro, ou seja, o ponto de saída é o mesmo de chegada (CAVALCANTI, 2013; ESPERANÇA; CAVALCANTI, 2013; SANTOS, 2009).

Na Figura 2.49 podem ser observados os pontos que compõem um polígono. Conforme descrito anteriormente, o processo de criação de polígonos é muito similar ao de polilinhas. Nesta figura é apresentada a união de diversos pontos, sendo o ponto P₁ com o P₂, o P₂ com o P₃, o P₃ com o P₄ e por fim o P₄ com P₁, esta última união que caracteriza o polígono, pois fecha as polilinhas, unindo o ponto final ao inicial (CAVALCANTI, 2013; ESPERANÇA; CAVALCANTI, 2013; SANTOS, 2009).

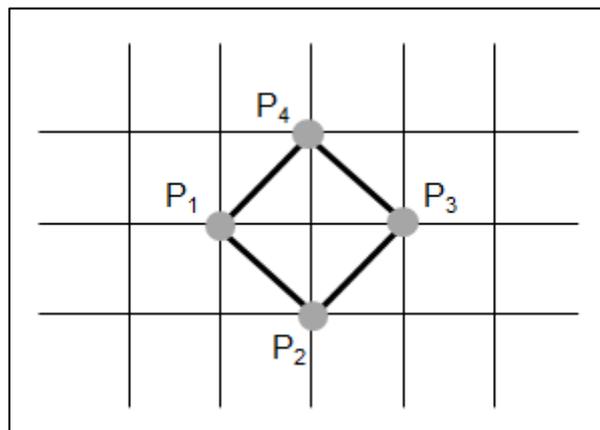


Figura 2.49 – Pontos que compõem um polígono (Adaptado de CAVALCANTI, 2013).

2.3.6.4.3 Círculos

A princípio, o algoritmo de ponto médio foi desenvolvido para desenhar segmentos de retas, contudo, o mesmo foi adaptado para desenhar círculos e esta adaptação foi denominada de algoritmo de ponto médio de círculos, sendo considerado um dos principais algoritmos para desenhar círculos. Este algoritmo emprega apenas variáveis inteiras e utiliza teste de ponto médio para verificar qual *pixel* está mais próximo do círculo ideal e desenhá-lo em um plano bidimensional (CAVALCANTI, 2013; ESPERANÇA; CAVALCANTI, 2013; SANTOS, 2009; SCHNEIDER, 2001; TRAINA; DE OLIVEIRA, 2006).

Comumente, os algoritmos de desenhar círculos utilizam a simetria do círculo para diminuir o tempo de processamento computacional. Pode-se ligeiramente localizar as coordenadas de todo círculo, através de apenas um octante do círculo, como pode ser observado na Figura 2.50 (ESPERANÇA; CAVALCANTI, 2013; SANTOS, 2009; SCHNEIDER, 2001; TRAINA; DE OLIVEIRA, 2006).

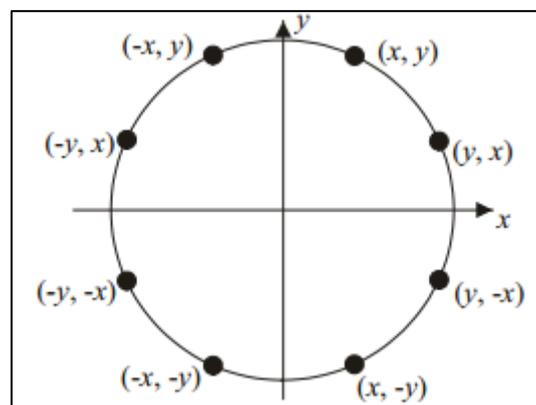


Figura 2.50 – Simetria dos pontos no círculo (SCHNEIDER, 2001).

O objetivo do algoritmo de ponto médio de círculo é verificar qual o melhor ponto, dentre as possibilidades, deve ser desenhado para alcançar o círculo ideal. É necessário desenhar o ponto inicial P nas coordenadas (x_i, y_i) . Após verifica-se um ponto médio M . Se este ponto estiver abaixo da circunferência, o próximo *pixel* a ser desenhado será o *pixel* acima do ponto médio P_E nas coordenadas (x_{i+1}, y_i) , caso contrário, será desenhado o *pixel* abaixo P_{SE} nas coordenadas (x_{i+1}, y_{i-1}) . Este procedimento é repetido até que todos os octantes do círculo sejam contemplados. A Figura 2.51 ilustra o

procedimento de escolha dos *pixels* a serem utilizados para realizar o desenho do círculo (ESPERANÇA; CAVALCANTI, 2013; SANTOS, 2009; SCHNEIDER, 2001; TRAINA; DE OLIVEIRA, 2006).

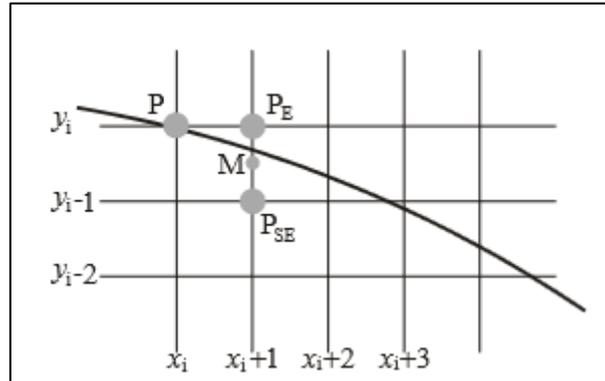


Figura 2.51 – Pontos usados na escolha do *pixel* (SCHNEIDER, 2001).

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve a metodologia utilizada na execução deste trabalho. Esta metodologia seguiu o fluxograma ilustrado na Figura 3.1. Os recursos utilizados, as três etapas do desenvolvimento do *software* e a validação do *software* são detalhados no decorrer deste capítulo.

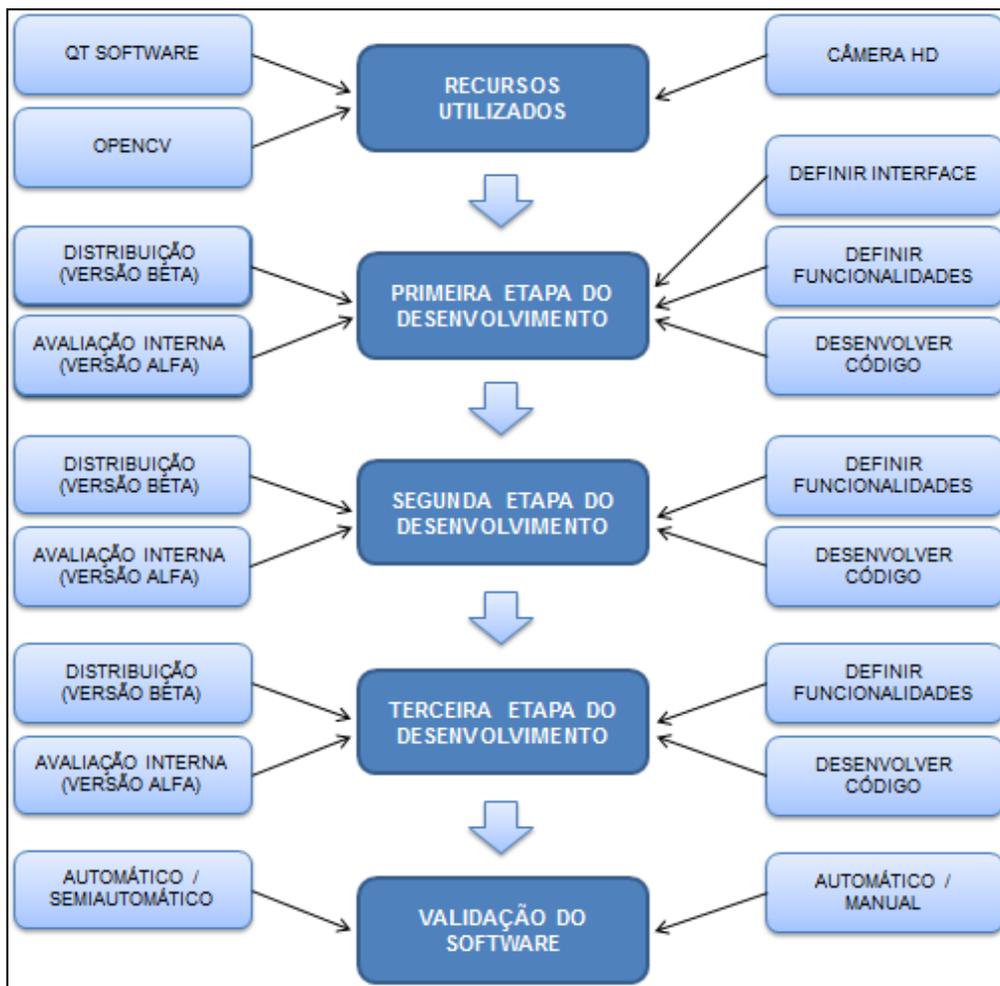


Figura 3.1 – Fluxograma da desenvolvimento do *software*.

O *software* desenvolvido neste trabalho foi denominado Goitacá – *Software* Livre para Análise de Imagens com Estereologia Quantitativa, tendo como objetivo integrar os principais recursos dos *softwares* de análise de imagens livres e proprietários, além de incluir recursos de vídeo-microscopia e estereologia quantitativa.

O Goitacá foi desenvolvido para plataforma MS-Windows, entretanto, os recursos utilizados em seu desenvolvimento, o *framework* Qt e a biblioteca OpenCV, são multiplataforma, o que flexibiliza a inclusão de novos recursos e adaptações para outras plataformas.

3.1 RECURSOS UTILIZADOS

3.1.1 Qt software

O Qt *software*⁴ é um *framework* multiplataforma para desenvolvimento de *software* nas linguagens de programação C e C++, com interface gráfica de usuário, pertencente à empresa finlandesa de *software* Digia Oyj. Os *softwares* desenvolvidos neste *framework* podem ser compilados em diferentes sistemas operacionais como MS-Windows, MacOS e Linux. O mesmo utiliza a abordagem “codifique uma vez, compile em qualquer lugar” (BLANCHETTE, 2006; DIGIA OYJ, 2013; NOGUEIRA, 2013; OZELA, 2013).

Este *framework* é distribuído por meio das licenças *Lesser General Public License* (LGPL) e comercial. A LGPL é uma licença de *software* livre e o desenvolvimento de *softwares* é permitido desde que sejam distribuídos com a mesma licença. A licença comercial possui custos e os *softwares* possuem seus desenvolvimentos autorizados com restrições de licenças (VASCONCELOS, 2010).

Diversos *softwares* livres e proprietários de ampla utilização foram desenvolvidos com o Qt entre eles KDE⁵, VLC Media Player⁶, Skype⁷ e Virtual Box⁸. Entre seus usuários de maior expressão estão Google – maior portal de busca da internet, Canon – fabricante de câmeras e sistemas de imagem, AMD – fabricante de processadores e Samsung – operante em diversos ramos da área de tecnologia da informação (AMD, 2014; CANON, 2013; GOOGLE, 2014; SAMSUNG, 2014; VASCONCELOS, 2010).

⁴ Qt *software* – <http://qt.digia.com>.

⁵ KDE – <http://www.kde.org>.

⁶ VLC Media Player – <http://www.videolan.org/vlc>.

⁷ Skype – <http://www.skype.com/pt-br>.

⁸ Virtual Box – <https://www.virtualbox.org>.

O Qt contém uma ampla biblioteca de classes, com diversas finalidades como comunicação, renderização de imagens e multimídia. Para desenvolver um *software* utilizando o Qt é necessário um conhecimento prévio da linguagem de programação C++ e de técnicas de programação orientada a objetos (NOGUEIRA, 2013; VASCONCELOS, 2010).

3.1.2 OpenCV

A *Open Source Computer Vision* (OpenCV⁹) é uma biblioteca desenvolvida pela INTEL, com o foco no desenvolvimento de *softwares* de visão computacional (NOGUEIRA, 2013; OPENCV, 2014; OST, 2008).

Esta biblioteca foi escrita nas linguagens de programação C e C++, é multiplataforma e está distribuída por meio da licença *Berkeley Software Distribution* (BSD). Por ser multiplataforma, a OpenCV funciona nos sistemas operacionais MS-Windows, Linux, MacOS, iOS e Android. Entre as linguagens de programação que podem importar a OpenCV estão C++, Java, Python, Visual Basic, Matlab, Ruby (CHAVES; SILVA; DE AQUINO, 2012; NOGUEIRA, 2013; OPENCV, 2014).

A OpenCV contém mais de 500 métodos que englobam diversas áreas da visão computacional incluindo inspeção do equipamento de fábrica, imagens médicas, segurança e robótica. Entre estes métodos estão exibição de imagem, captura em câmera digital e operações em imagens (BRADSKI; KAEHLER, 2008; OST, 2008).

3.1.3 Câmera HD

High Definition (HD) vem do termo em inglês que significa “alta definição”. Câmeras HD possuem tecnologias que permitem filmar com qualidade superior às câmeras tradicionais. Diversas características diferenciam uma imagem HD de uma imagem comum, entre as quais proporção de tela, número de linhas por quadro, suporte do registro e forma de codificação (MICROSOFT, 2013).

⁹ OpenCV – <http://opencv.org>.

Uma câmera que filma em alta definição proporciona imagens mais nítidas, com melhor textura, cor, contraste e profundidade. A Figura 3.2 ilustra o modelo da câmera utilizada neste trabalho.



Figura 3.2 – Modelo da câmera HD utilizada: Webcam Microsoft LifeCam Cinema (MICROSOFT, 2013).

A câmera HD utilizada neste trabalho apresenta diversas características relevantes que são listadas no Quadro 3.1 (MICROSOFT, 2013).

Funcionalidades	Descrição
Captura de vídeo	formato <i>widescreen</i> 16:9 ¹⁰ e alta definição 720p ¹¹
Foco automático	imagens nítidas e detalhadas mesmo em <i>close-ups</i>
Tecnologia <i>TrueColor</i>	ajusta automaticamente exposição de vídeos mais definidos e brilhantes
Lente com elemento de vidro	aproveita a lente de vidro de alta precisão, para deixar o vídeo mais nítido
Tecnologia <i>ClearFram</i>	melhora a imagem, mesmo em condições de pouca luz

Quadro 3.1 – Características da câmera HD utilizada (Adaptado de MICROSOFT, 2013).

¹⁰*Widescreen* 16:9 – formato de tela em que para cada 1 cm de altura a imagem possui 1,77 cm de largura.

¹¹Alta definição 720p – 720 linhas de resolução de tela vertical com varredura progressiva.

3.2 ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

O *software* foi desenvolvido em três etapas consecutivas e cumulativas. Em cada etapa, uma nova versão foi distribuída com novas funcionalidades, como pode ser observado na Figura 3.3.

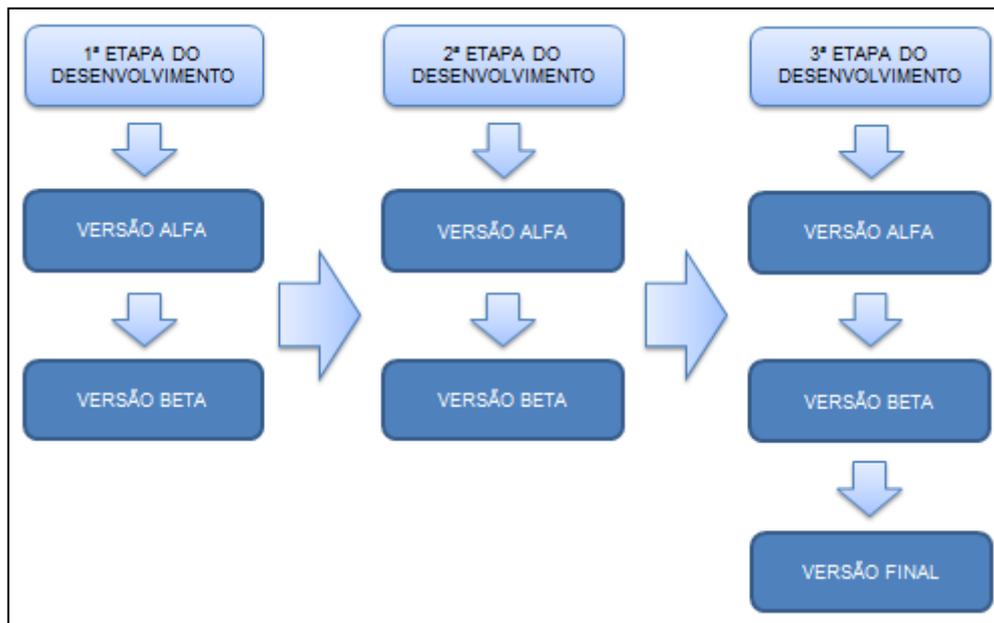


Figura 3.3 – Metodologia de desenvolvimento do *software* (Adaptado de CUSUMANO; YOFFIE, 1999).

Esta estratégia possui algumas vantagens sobre aquela de lançar o *software* completo no final do período, entre elas (CUSUMANO; YOFFIE, 1999):

- O *software* é testado continuamente. O retorno dos usuários permite correções de problemas e a aceitação de sugestões para implementações em versões futuras;
- Divulgação do *software* realizada por um período mais longo, permitindo que um número maior de usuários utilize-o durante a execução do trabalho;
- Resultados são produzidos durante a execução do trabalho, e não em seu final.

O trabalho proveu o lançamento de três versões do *software*, uma ao final de cada etapa.

3.2.1 Primeira etapa

3.2.1.1 Definição da interface

A interface do *software* foi definida e permaneceu nas versões seguintes, ocorrendo apenas acréscimo de funcionalidades. Esta interface seguiu duas diretrizes: simplicidade da tela de trabalho, mantendo o menor número de funcionalidades visíveis, e intuitividade, para que o usuário, sem esforço, possa encontrar o que precisa.

Para a definição desta interface, *softwares* livres e proprietários do gênero foram avaliados. Considerou-se a similaridade da interface destes *softwares*, a fim de facilitar a assimilação de novos usuários (AMSCOPE, 2014; IMAGEJ, 2014; LEICA MICROSYSTEMS, 2014; NOGUEIRA, 2013).

3.2.1.2 Definição de funcionalidades

Na primeira etapa do *software* desenvolvido foram implementadas as funcionalidades descritas no Quadro 3.2.

Funcionalidades	Descrição
Abrir imagem	abre imagem nas extensões "png", "jpg", "jpeg", "bmp" e "gtc"
Abrir vídeo	abre vídeo na extensão "avi", com recursos de voltar, avançar e pausar para permitir maior precisão na captura da imagem
Salvar	salva imagem com diversas camadas na extensão "gtc" para permitir editar, excluir e ocultar anotações gráficas na imagem
Salvar como	salva uma nova imagem com as características citadas na funcionalidade "Salvar"
Exportar para	exporta imagens nas extensões "png", "jpg", "jpeg" e "bmp"
Carregar câmera	carrega câmera para captura de tela e gravação de vídeo

Iniciar/Finalizar gravação na câmera	inicia e finaliza a gravação de vídeos da câmera
Capturar tela	captura tela atual da câmera ou do vídeo carregado
Zoom	amplia / reduz a imagem
Transformação	gira 90° para direita, 90° para esquerda, inverte verticalmente e horizontalmente
Cortar	corta e cria nova imagem
Inverter	inverte imagem binarizada
Refazer e Desfazer	refaz e desfaz as alterações na imagem
Incluir anotações gráficas	inclui anotações gráficas na imagem como círculos, triângulos, quadrados, losangos, pentágonos, hexágonos, linhas retas, linhas livre, setas e textos
Formatar anotações gráficas	formata cor, largura, tipo de fonte, cor de fonte e estilo de fonte das anotações gráficas na imagem
Posição X e Y	exibe as coordenadas X e Y da imagem
Dimensão	exibe as dimensões em <i>pixel</i> da imagem
Tamanho	exibe o tamanho da imagem
Miniaturas na barra de <i>snapshot</i>	abre as miniaturas de imagem da barra de <i>snapshot</i> para visualizar diversas imagens ao mesmo tempo

Quadro 3.2 – Funcionalidades implementadas na primeira etapa do *software*.

3.2.1.3 Avaliação interna (versão alfa)

Consistiu em testar a versão do *software* em busca de erros de desenvolvimento, também conhecidos nos testes de *softwares* como *bugs*¹². Esta etapa contou com o auxílio de cinco usuários internos, sendo eles: três técnicos em informática, um usuário de conhecimento básico e um de conhecimento avançado de *softwares* de análise de imagens. Esta avaliação se encarregou de corrigir os *bugs* encontrados pelos cinco usuários internos (KOSCIANSKI; SOARES, 2007).

Esta avaliação é realizada em todas as três etapas do desenvolvimento, seguindo este mesmo procedimento.

¹²*Bug* – falha em *software* ou *hardware*.

3.2.1.4 Distribuição (versão beta)

A versão beta é aquela aprovada na avaliação interna (versão alfa) e posteriormente distribuída aos usuários externos para testes de maior envergadura. Esta versão foi disponibilizada para *download* (<http://www.goitaca.diegosales.info/download.php>), na página do desenvolvedor conforme ilustra a Figura 3.4.

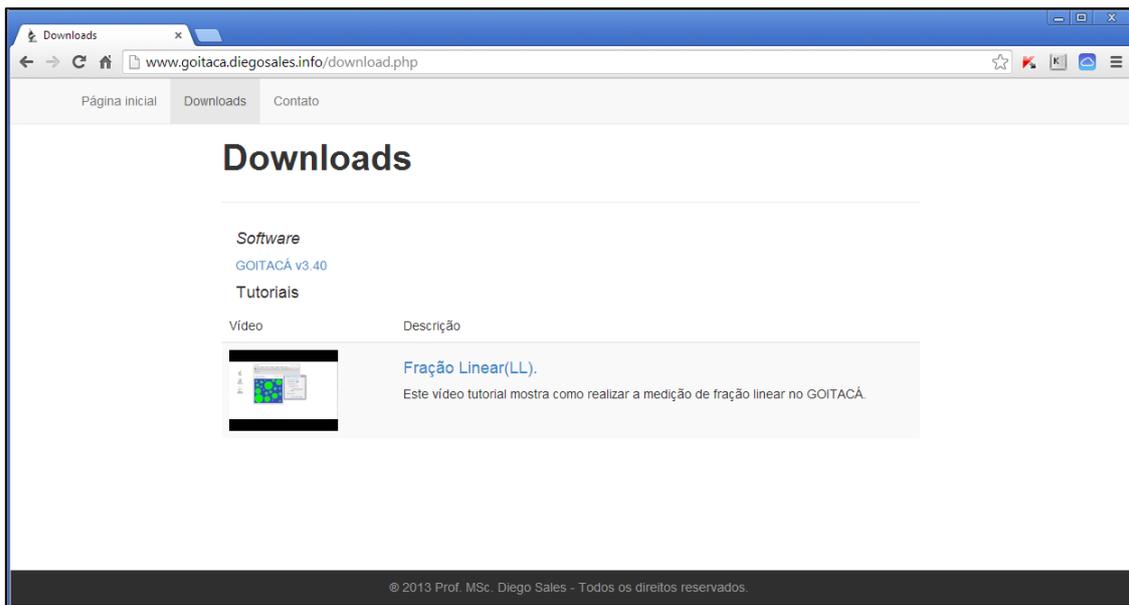


Figura 3.4 – Página para *download* do *software*.

Nesta página também há disponível um canal de comunicação (<http://www.goitaca.diegosales.info/contato.php>) entre os usuários externos e o desenvolvedor do *software*, para que informações sobre eventuais falhas e sugestões de melhoria fossem submetidas ao desenvolvedor. Este canal é apresentado através da Figura 3.5.

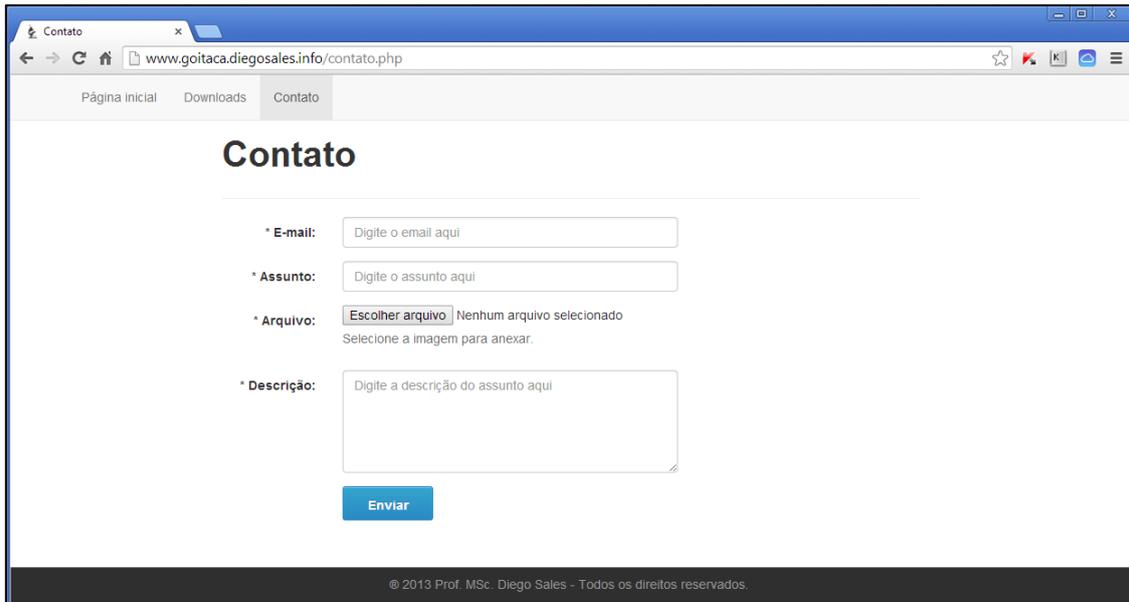


Figura 3.5 – Canal de comunicação entre usuários externos e o desenvolvedor do *software*.

Com intuito de realizar uma divulgação mais ampla do *software* proposto, foi criada uma conta administrativa, no repositório de *software* livre chamado *Source Forge*. Este repositório fornece uma série de opções para os *softwares* nele disponibilizados, entre as quais endereço para *download*, descrição, imagens de telas (*screenshots*), lista de discussão, informações pertinentes ao desenvolvimento e ao tipo de licença.

O Goitacá foi disponibilizado para *download* (<http://sourceforge.net/projects/goitacaeg/>) no repositório *Source Forge*. Além desta opção, todas as demais citadas anteriormente foram preenchidas para uma melhor exteriorização do *software* proposto.

Tal qual a avaliação da distribuição interna, para realização do teste alfa, estes procedimentos são também executados em todas as etapas do desenvolvimento.

3.2.2 Segunda etapa

3.2.2.1 Definição de funcionalidades

As funcionalidades que foram acrescentadas na segunda etapa do *software* são basicamente de edição de imagens, estas funcionalidades são apresentadas no Quadro 3.3.

Funcionalidades	Descrição
Ajustes	ajusta brilho e contraste
Filtros	aplica filtros para aguçar, suavizar e escala de cinza
Morfologia matemática	aplica erosão e dilatação binária
Segmentações	aplica a segmentação de binarização, limiarização, Laplace e Sobel
Medições	mede ângulos entre retas, área de região e comprimento entre dois pontos
Operações algébricas	soma e subtrai imagens, inclusive de tamanhos e tipos diferentes

Quadro 3.3 – Funcionalidades implementadas na segunda etapa do *software*.

As etapas de teste alfa e beta foram executadas conforme procedimentos descritos nas seções 3.2.1.3 e 3.2.1.4 respectivamente.

3.2.3 Terceira etapa

3.2.3.1 Definição de funcionalidades

As funcionalidades acrescidas a esta versão foram aquelas de estereologia quantitativa. Estas funcionalidades podem ser observadas no Quadro 3.4.

Funcionalidades	Descrição
Malhas	desenha malhas de pontos, de linhas horizontais e de linhas cruzadas sobre a imagem
Fração de área, área de cada seção e área de seção média	mede fração de área e área de seção média no modo automático

Fração linear, intercepto linear e intercepto linear médio	mede fração linear e intercepto linear médio de modo automático
Fração de ponto	mede fração de ponto de modo automático e semiautomático
Área superficial por unidade de volume-teste	mede área superficial por unidade de volume-teste de modo automático e semiautomático
Área superficial específica	mede área superficial específica de modo automático e semiautomático
Comprimento de interceptos lineares por unidade de volume-teste	mede comprimento de interceptos lineares por unidade de volume-teste de modo automático e semiautomático

Quadro 3.4 – Funcionalidades implementadas na terceira etapa do *software*.

As etapas de teste alfa e beta foram executadas conforme procedimentos descritos nas seções 3.2.1.3 e 3.2.1.4 respectivamente.

3.3 VALIDAÇÃO DO SOFTWARE

Para validação do *software*, foi realizada uma comparação dos resultados das medições de EQ obtidos pelo Goitacá e pelo método manual de diversos parâmetros da mesma imagem, desenvolvidos com procedimentos de medições similares. Com isso, almejou-se demonstrar o quão próximos ficaram estes resultados.

Nesta validação foram testadas todas as medições de EQ implementadas no Goitacá, sendo elas: i) fração de área (A_A); ii) fração de ponto (P_P); iii) fração linear (L_L); iv) área superficial por unidade de volume-teste (S_V) e v) área superficial específica (S_{VP}) e vi) comprimento de interceptos lineares por unidade de volume-teste (L_V).

Os parâmetros de entrada, imagem e escala, utilizados em todas as medições realizadas pelo Goitacá e pelo método manual, são idênticos. A Figura 3.6 ilustra a imagem de amostra bifásica utilizada como base desta validação, com fase α (amarela) e fase β (verde). Esta imagem simula um plano de corte de um objeto tridimensional e possui dimensão de 500x500 *pixels*, com 48 esferas de cinco tamanhos diferentes.

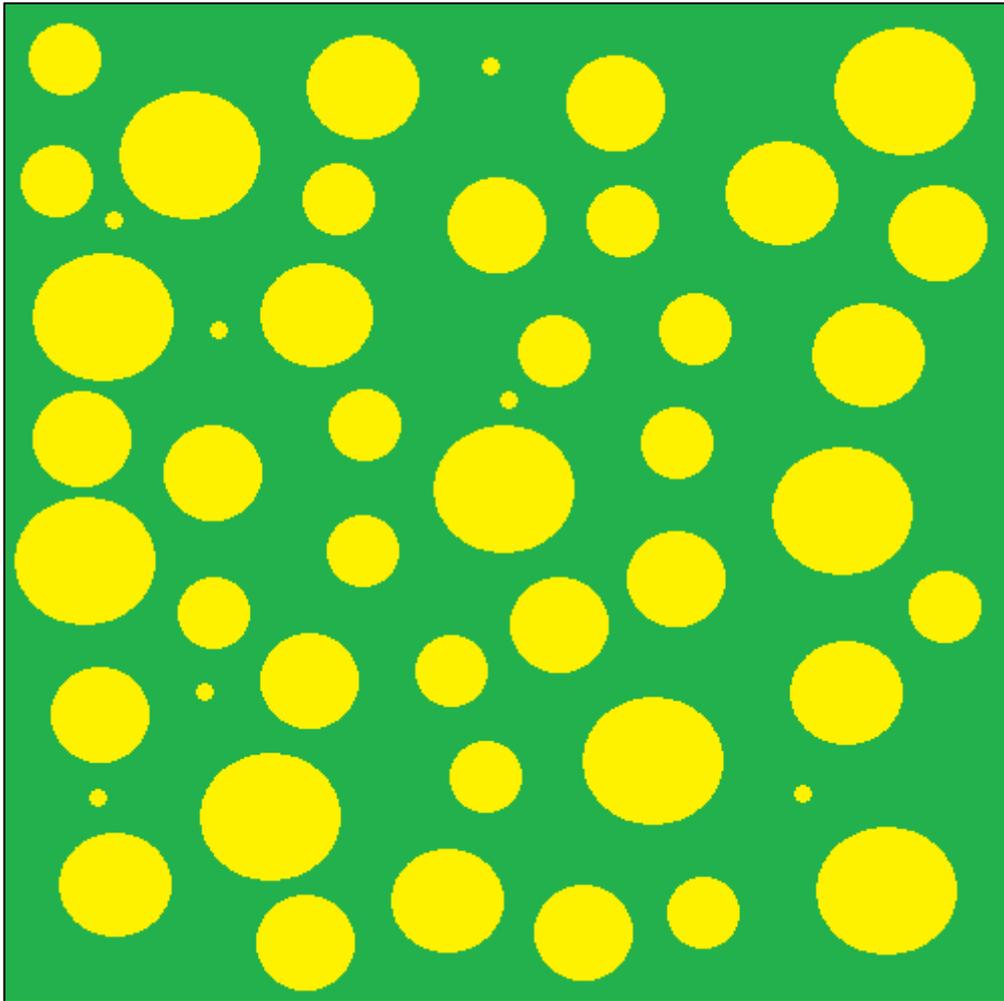


Figura 3.6 – Imagem de amostra utilizada para validação do Goitacá.

Os parâmetros para definição da escala foram distância em *pixel*, distância conhecida e unidade de medida. No Quadro 3.5 são apresentados os parâmetros citados anteriormente com seus respectivos valores.

Parâmetros	Valores
Distância em <i>pixel</i>	500
Distância conhecida	13,23
Unidade de medida	cm

Quadro 3.5 – Parâmetros de definição da escala.

Para calcular a P_p , L_L , S_v e S_{vp} foram necessários a entrada de novos parâmetros no Goitacá, são eles: o espaçamento e o tipo de malha. O espaçamento definido foi de 50 *pixels* para todas as malhas, a Figura 3.7 ilustra a tela de definição de espaçamento da malha no Goitacá.

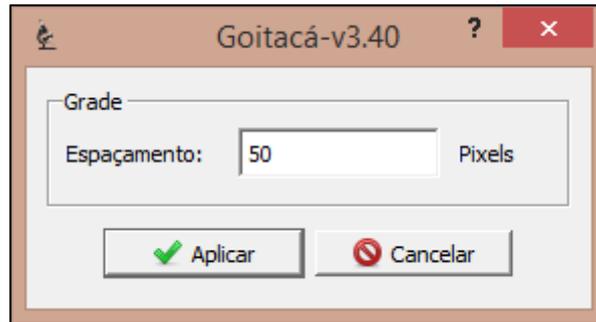


Figura 3.7 – Tela de definição do espaçamento no Goitacá.

O tipo de malha utilizado variou de acordo com a funcionalidade calculada. Na P_P foi selecionada a malha de pontos que inseriu 100 pontos sobre a imagem. Na L_L foi selecionada a malha de linhas horizontais que colocou 10 linhas horizontais em cima da imagem. Na S_V e S_{VP} foram inseridas as malhas de linhas cruzadas, com 10 linhas horizontais e 10 linhas verticais, sobre a imagem.

Para a malha de pontos, a cada 50 *pixels* horizontais ou verticais, um ponto foi inserido. Para a malha de linhas horizontais, a cada 50 *pixels* verticais, foi inserida uma linha horizontal e para a malha de linhas verticais a cada 50 *pixels* horizontais foi inserida uma linha vertical.

Para o cálculo do L_V um novo parâmetro foi utilizado. Este parâmetro representa o comprimento de um elemento estrutural linear, curvo ou não, contínuo ou não, distribuído pela estrutura tridimensional. Tais elementos estruturais aparecem nos planos de corte como pequenas seções transversais, cuja área depende do tipo específico de elemento existente na estrutura. Para viabilizar a contagem deste tipo de seção transversal no plano de corte de maneira automática, o Goitacá solicita que o usuário selecione a área da maior seção transversal deste elemento estrutural. Deste modo, o *software* considera que qualquer elemento que possuir seção transversal igual ou inferior aquela será considerado na contagem. O resultado da contagem será empregado para o cálculo de L_V .

Já nos procedimentos manuais foi adotado o espaçamento de 1,3 cm, correspondente a 50 *pixels*. Todos os demais parâmetros utilizados no método manual foram idênticos aos utilizados no Goitacá. Para a malha de pontos, a

cada 1,3 cm horizontais ou verticais foi inserido um ponto sobre imagem, para a malha de linhas horizontais a cada 1,3 cm verticais foi inserido uma linha horizontal e para a malha de linhas verticais a cada 1,3 cm horizontal foi inserido uma linha vertical.

No cálculo de L_V os pontos são as esferas com área de $0,12 \text{ cm}^2$. Na imagem de amostra, ilustrada na Figura 3.6, estas esferas são as sete menores encontradas. Todos os cálculos do método manual foram realizados com auxílio de um editor de planilha eletrônica.

3.4 ESTUDO DE CASO

Além da validação, uma amostra de aço foi caracterizada para demonstrar o desempenho do Goitacá em uma estrutura real. A imagem escolhida foi publicada por outros autores. Trata-se de um aço inoxidável duplex submetido à solubilização em 1175°C por 30 minutos em atmosfera de nitrogênio e resfriada em água (DE MÉLO; DOS SANTOS; MAGNABOSCO, 2008).

A amostra foi preparada metalograficamente de modo a estabelecer contraste entre as fases ferrita e austenita. A Figura 3.8 apresenta esta amostra bifásica com fases de ferrita (preta) e austenita (branca), sendo austenita a fase de interesse (DE MÉLO; DOS SANTOS; MAGNABOSCO, 2008).

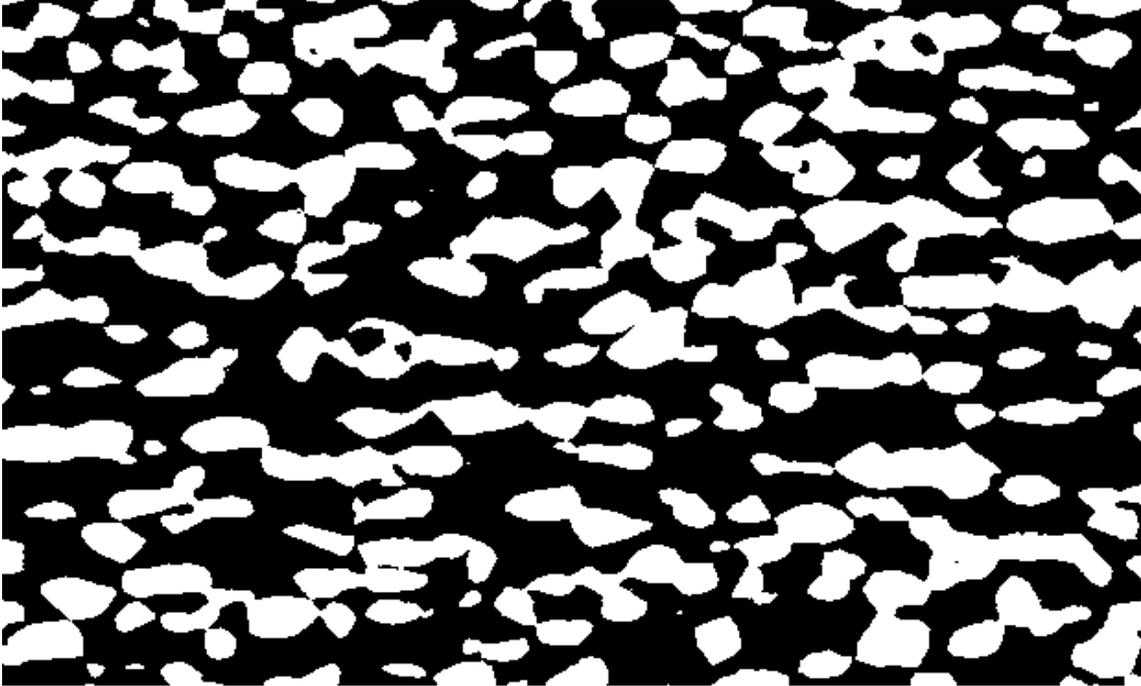


Figura 3.8 – Amostra bifásica com fases ferrita (preta) e austenita (branca) (Adaptado de DE MÉLO; DOS SANTOS; MAGNABOSCO, 2008).

Estes autores determinaram a fração volumétrica da fase de austenita por estereologia quantitativa e por técnica magnética, com um ferritoscópio. As medições estereológicas foram realizadas através do *software* Metallurgy, que é parte integrante do microscópio LEICA. A técnica estereológica usada para determinar a fração volumétrica da fase de austenita não foi revelada pelos autores (DE MÉLO; DOS SANTOS; MAGNABOSCO, 2008).

A imagem da estrutura do aço publicada por estes autores foi usada sem necessidade de qualquer tratamento. A escala usada foi a da imagem original. O espaçamento entre pontos e linhas das malhas adotado no Goitacá foi de 25 *pixels* (DE MÉLO; DOS SANTOS; MAGNABOSCO, 2008).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo tem por finalidade apresentar os principais recursos implementados no Goitacá. Nele também é apresentado o resultado da validação do *software* proposto frente aos cálculos de EQ realizadas pelo método manual. Ao final deste capítulo, algumas considerações sobre estas comparações foram discutidas.

4.1 APRESENTAÇÃO DO SOFTWARE

Nesta apresentação, além da interface, foram evidenciados os recursos de vídeo-microscopia, anotações gráficas, ajustes, morfologia matemática, segmentações, escala, medições e EQ. A imagem de amostra exibida na Figura 3.6 da seção 3.3 também foi utilizada na apresentação destes recursos. Cabe ressaltar que os recursos comumente encontrados nos *softwares* de análise de imagens não foram abordados neste capítulo.

4.1.1 Interface do *software*

A interface do Goitacá foi desenvolvida com base em duas tendências: simplicidade e intuitividade. Com a simplicidade, manteve-se na área de trabalho o menor número de funcionalidades visíveis. Já com a intuitividade, buscou-se localizar com o mínimo de esforço, por parte do usuário, os recursos almejados.

Esta interface é composta de barra de menu, barra de ferramentas, barra de status, painel lateral esquerdo, painel de *snapshot* e área de trabalho, sendo ilustrada na Figura 4.1. Este padrão é utilizado por diversos *softwares* do gênero (AMSCOPE, 2014; FAZANO, 2007; IMAGEJ, 2014; LEICA MICROSYSTEMS, 2014; NOGUEIRA, 2013).

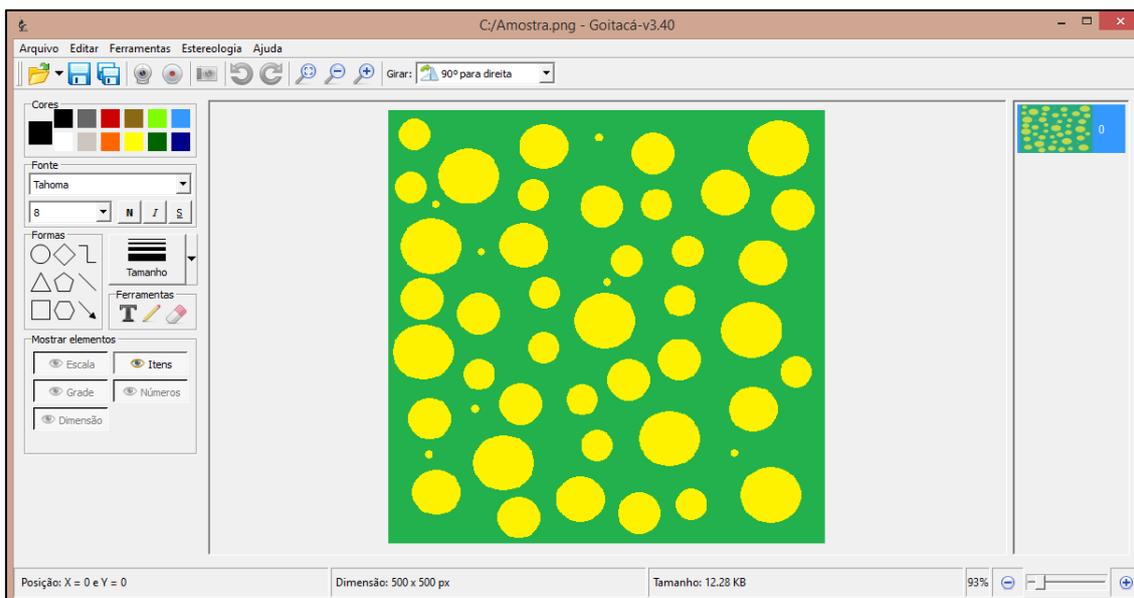


Figura 4.1 – Interface do software Goitacá.

A barra de menus foi dividida em cinco menus principais, sendo eles Arquivo, Editar, Ferramentas, Estereologia e Ajuda. Cada menu principal agrupa submenus relacionados. O Quadro 4.1 apresenta os menus principais e seus respectivos submenus.

Menu Principal	Submenu
Arquivo	Abrir (Imagem e Vídeo), Salvar, Salvar como, Exportar para, Câmera (Carregar, Iniciar/Finalizar gravação e Resolução), Capturar tela e Sair
Editar	Transformação (90° para direita, 90° para esquerda, Inverter horizontalmente e Inverter verticalmente), Zoom (Normal, Reduzir e Ampliar), Cortar, Inverter, Refazer e Desfazer
Ferramentas	Ajustes (Brilho e Contraste), Filtros (Aguçar, Suavizar e Escala de cinza), Morfologia matemática (Binária [Erosão e Dilatação]), Segmentação (Similaridade [Binarização e Limiarização] e Descontinuidade [Laplace e Sobel]), Escala, Medições (Ângulo, Área de região e Comprimento entre dois pontos) e Operações algébricas (Soma e Subtração)
Estereologia	Malhas (Linhas horizontais, Linhas cruzadas e Pontos), Fração volumétrica (Fração de área, Fração linear e Fração de pontos [Automático e Semiautomático]), Área superficial por unidade de volume-teste (Automático e Semiautomático), Área superficial específica (Automático e Semiautomático), Comprimento de intercepto linear por unidade de volume-teste (Automático e Semiautomático)
Ajuda	Exibir ajuda, Sobre

Quadro 4.1 – Composição da barra de menus do Goitacá.

A barra de ferramentas é composta por diversos botões de acesso rápido. O propósito desta barra é facilitar o uso de recursos essenciais. Contudo, todas as funcionalidades contidas nesta barra podem ser encontradas na barra de menu. Cabe destacar que o Goitacá inclui um grande número de combinações de teclas de atalhos para facilitar ainda mais sua utilização, como exemplo pode-se citar a combinação das teclas [Ctrl + S], utilizada para salvar um arquivo.

O painel lateral esquerdo agrupa vários recursos, sendo grupos de cores, fontes, formas, tamanhos, ferramentas e mostrar/ocultar elementos. Além destes recursos, há o *player* de vídeo que por padrão fica oculto e é exibido quando um arquivo de vídeo é aberto.

A área de trabalho é aquela em que a imagem estática ou dinâmica é exibida. Nesta área podem-se inserir diversas anotações gráficas contidas no painel lateral esquerdo, como formas e textos.

No painel de *snapshot* são exibidas miniaturas de imagens. Cada ação realizada no Goitacá gera um novo *snapshot* com uma nova miniatura neste painel. Ao clicar em uma destas miniaturas, a ação realizada é desfeita ou refeita. Há ainda a opção do duplo clique na miniatura, que é utilizada para abrir diversas imagens ao mesmo tempo, para fins de comparação de imagens.

A barra de status contém informações significativas, sendo elas posição do *pixel* (x e y), dimensão da imagem (em *pixel* e de acordo com a escala definida), tamanho do arquivo e barra de ajuste de *zoom*.

Para utilizar o Goitacá primeiramente é necessário carregar uma imagem estática. Com o *software* proposto é possível abrir imagens estáticas nas extensões “png”, “jpg”, “jpeg”, “bmp” e “gic” e imagens dinâmicas no formato “avi”. No caso da imagem estática, deve-se acessar o menu Arquivo, submenu Abrir e submenu Imagem. Já no caso da imagem dinâmica, deve-se escolher o menu Arquivo, submenu Abrir e submenu Vídeo. Após abrir o vídeo, o usuário possui um *player* de vídeo localizado no painel lateral esquerdo com os botões de avançar, voltar, volume e barra ajustável de tempo. Com o vídeo

(imagem dinâmica) em execução, o usuário deve selecionar um determinado *frame*¹³ para usá-lo como imagem estática, para isso deve-se acessar o menu Arquivo, submenu Câmera e submenu Capturar tela.

4.1.2 Vídeo-microscopia

O recurso de vídeo-microscopia é encontrado geralmente em *softwares* de análise de imagens comercializados pelos fabricantes de microscópios. É comum que estes *softwares* carreguem apenas câmeras digitais de mesma marca (AMSCOPE, 2014; LEICA MICROSYSTEMS, 2014; NIKON INSTRUMENTS, 2014).

Para a implementação deste recurso, foram utilizados algoritmos genéricos, amplamente encontrados na literatura, com intuito de abranger um grande número de modelos de câmeras digitais (BRADSKI; KAEHLER, 2008; INTEL CORPORATION, 2001; OPENCV, 2014).

Foram testados, com sucesso, cinco modelos de câmeras digitais, sendo dois destes modelos de alta definição e os outros três de câmeras convencionais. Os modelos testados pelo Goitacá são apresentados no Quadro 4.2. Os dois primeiros modelos são de alta definição e os demais são de câmeras tradicionais. Cabe ressaltar que os testes foram intensificados para câmera utilizada neste trabalho, detalhada na seção 3.1.3.

Marca	Modelo
Microsoft	Webcam Microsoft LifeCam Cinema
HP	HP HD Webcam
HP	HP Webcam-101
Lenovo	Lenovo EasyCamera
Asus	UVC 2M Webcam

Quadro 4.2 – Lista de câmeras digitais testadas pelo Goitacá.

Para utilizar este recurso, o usuário deve escolher o menu Arquivo, submenu Câmera e submenu Carregar. Após o carregamento da câmera, é possível capturar um determinado *frame* para trabalhar como imagem base.

¹³ *Frame* – Quadro da imagem.

Para isso, o usuário deve acessar o menu Arquivo, submenu Câmera e submenu Capturar tela. Ainda é permitido realizar a gravação de um vídeo, para posteriormente carregar e capturar um determinado *frame* pelo mesmo procedimento citado anteriormente.

4.1.3 Anotações gráficas

As anotações gráficas englobam um grupo de elementos que podem ser inseridos sobre a imagem na área de trabalho, gerando uma nova camada que permite alterar, mover e excluir estes elementos, quando a imagem é salva no formato “gvc”. Neste grupo, constam formas geométricas como: círculos, quadrados, triângulos, losangos e hexágonos, além de setas, linhas, linhas livres e textos. Todas estas funções podem ser formatadas em relação aos seus tamanhos, cores, fontes e estilos.

Para utilizar os recursos de anotações gráficas no Goitacá, o usuário deve utilizar os botões contidos no painel lateral esquerdo. Neste painel constam os agrupamentos de cores, fontes, formas, tamanhos e ferramentas. Para realizar esta ação, o usuário deve escolher um dos botões deste painel e posteriormente clicar no ponto da imagem onde deseja incluir a anotação gráfica almejada.

A Figura 4.2 ilustra a imagem de amostra com anotações gráficas incluídas pelo Goitacá. Nesta figura são incluídos um círculo com uma seta e um texto na cor vermelha, uma figura plana formada por linha livre com uma seta e texto formatado em negrito e itálico, na cor preta e, por fim, um quadrado com uma seta e um texto na cor branca.

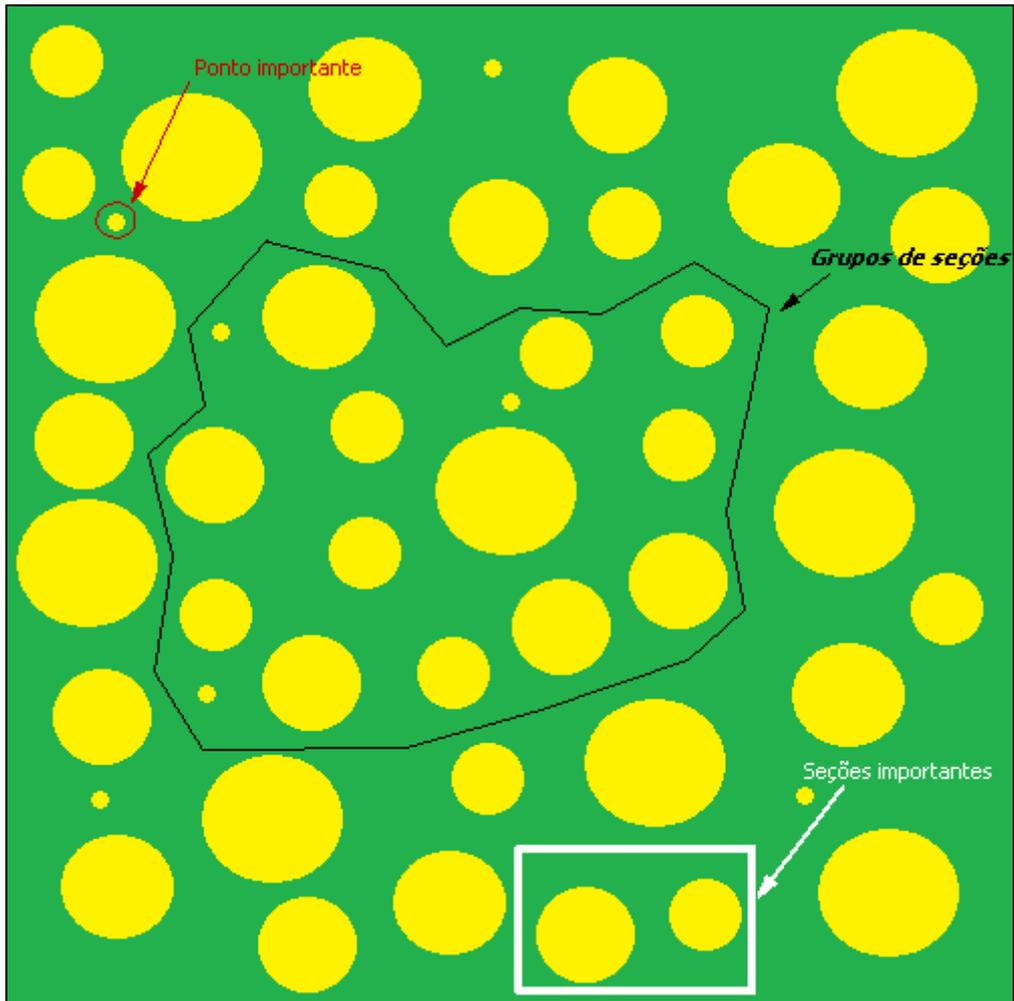


Figura 4.2 – Imagem com anotações gráficas incluídas pelo Goitacá.

4.1.4 Ajustes

Para ajustar o brilho e contraste de uma imagem no Goitacá, deve-se acessar o menu Ferramentas, submenu Ajustes e submenu Brilho e Contraste. Posteriormente o usuário adequa os dois recursos citados anteriormente através das barras ajustáveis ou das caixas com setas superiores para aumentar os números e setas inferiores para reduzir os números. A tela de ajuste de brilho e contraste é ilustrada na Figura 4.3.

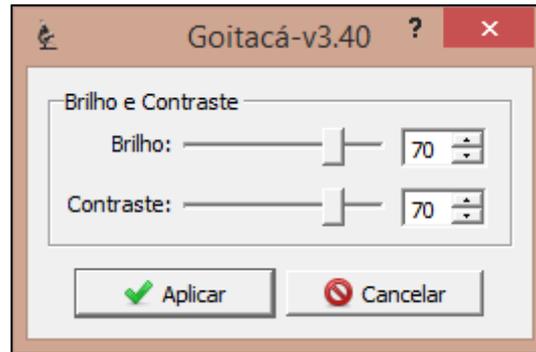


Figura 4.3 – Tela de ajuste de brilho e contraste no Goitacá.

Estes ajustes compõem na computação gráfica a etapa chamada de pré-processamento, utilizada para melhorar a qualidade da imagem. A Figura 4.4 ilustra a imagem de amostra acrescida de 70% de brilho e contraste exportada pelo Goitacá.

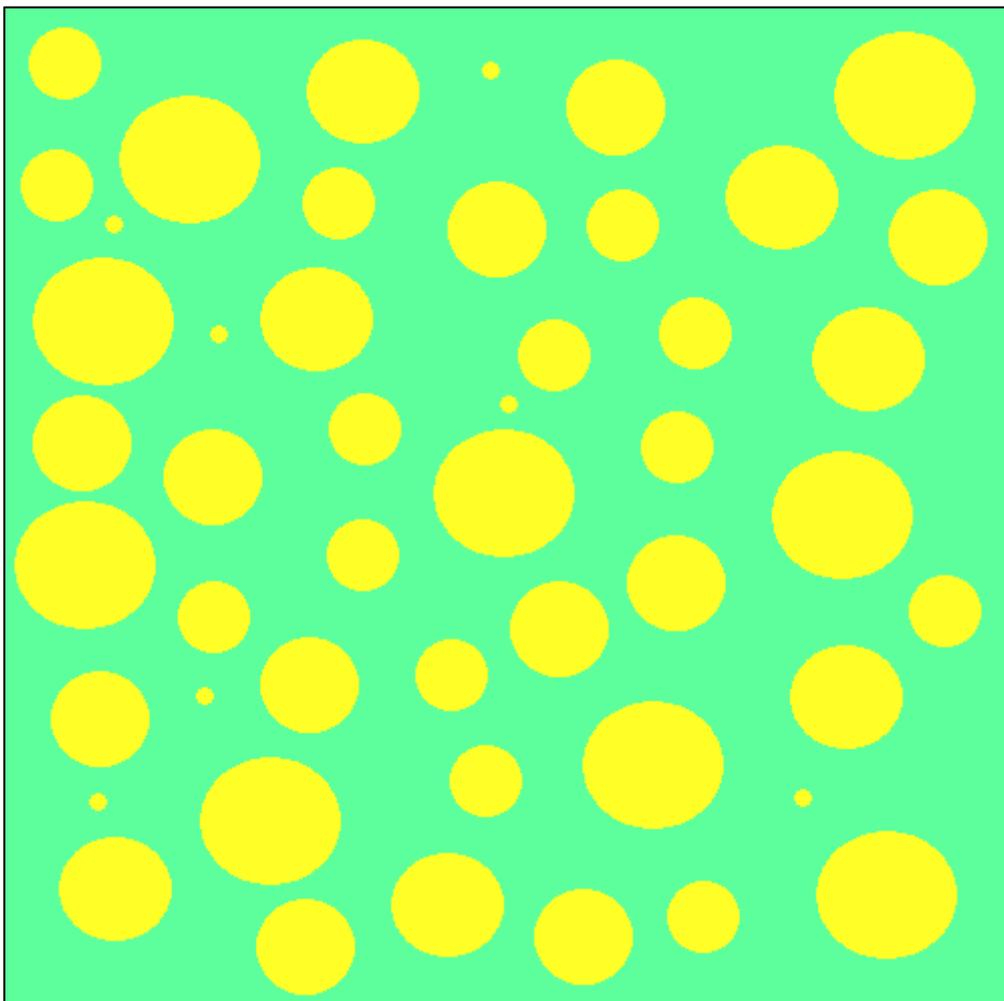


Figura 4.4 – Imagem com mais 70% de brilho e contraste ajustados pelo Goitacá.

4.1.5 Segmentações

As segmentações implementadas no Goitacá são divididas em dois grupos, sendo descontinuidade e similaridade. O primeiro grupo é constituído por Laplace e Sobel. Já o segundo por binarização e limiarização. Esta última é muito incomum inclusive em *softwares* proprietários, na qual o usuário tem a opção de ajustar um limiar manualmente através das caixas com setas superiores e inferiores ou da barra duplamente ajustável. Este recurso é acessado pelo menu Ferramentas, submenu Segmentação, submenu Similaridade e submenu Limiarização. Ao executar este procedimento a tela de Limiarização é exibida como pode ser observado na Figura 4.5.

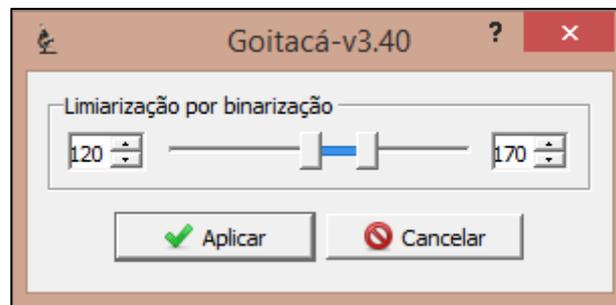


Figura 4.5 – Tela de Limiarização no Goitacá.

A Figura 4.6 exibe a imagem de amostra após a aplicação da binarização através de um limiar especificado pelo usuário. Esta segmentação foi aplicada utilizando os parâmetros citados na Figura 4.5.

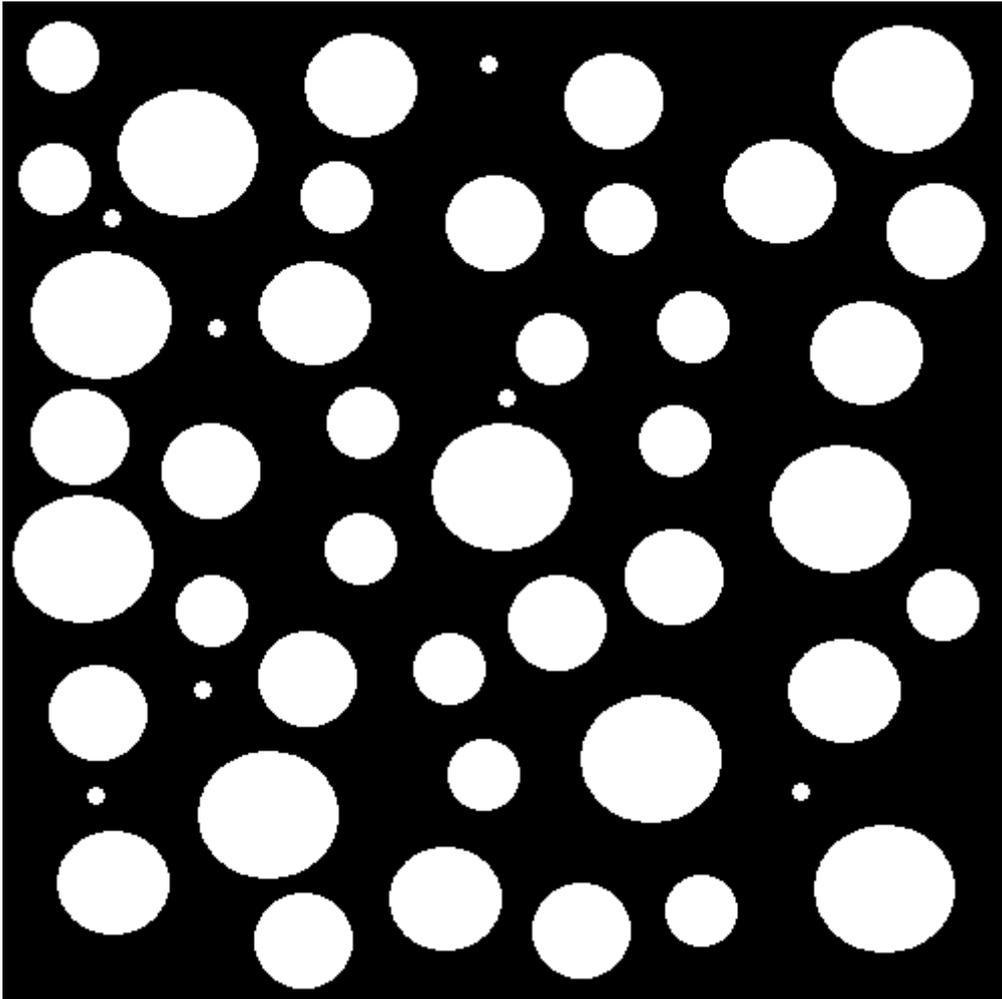


Figura 4.6 – Imagem binarizada através dos limiares definidos pelo usuário no Goitacá.

4.1.6 Morfologia matemática

A opção de morfologia matemática no Goitacá é composta por erosão binária e dilatação binária. A erosão binária visa diminuir uma determinada fase na imagem. Para sua utilização é fundamental primeiramente binarizar a imagem, através, por exemplo, do procedimento detalhado na seção 4.1.5. Em seguida a esta binarização, a imagem com fase α (branca) e fase β (preta) tende a reduzir a fase α e aumentar a fase β . Para aplicar esta morfologia no Goitacá é necessário que o usuário acesse o menu Ferramentas, submenu Morfologia matemática, submenu Binária e submenu Erosão. A Figura 4.7 apresenta a imagem de amostra binarizada com a aplicação da erosão binária através do *software* proposto.

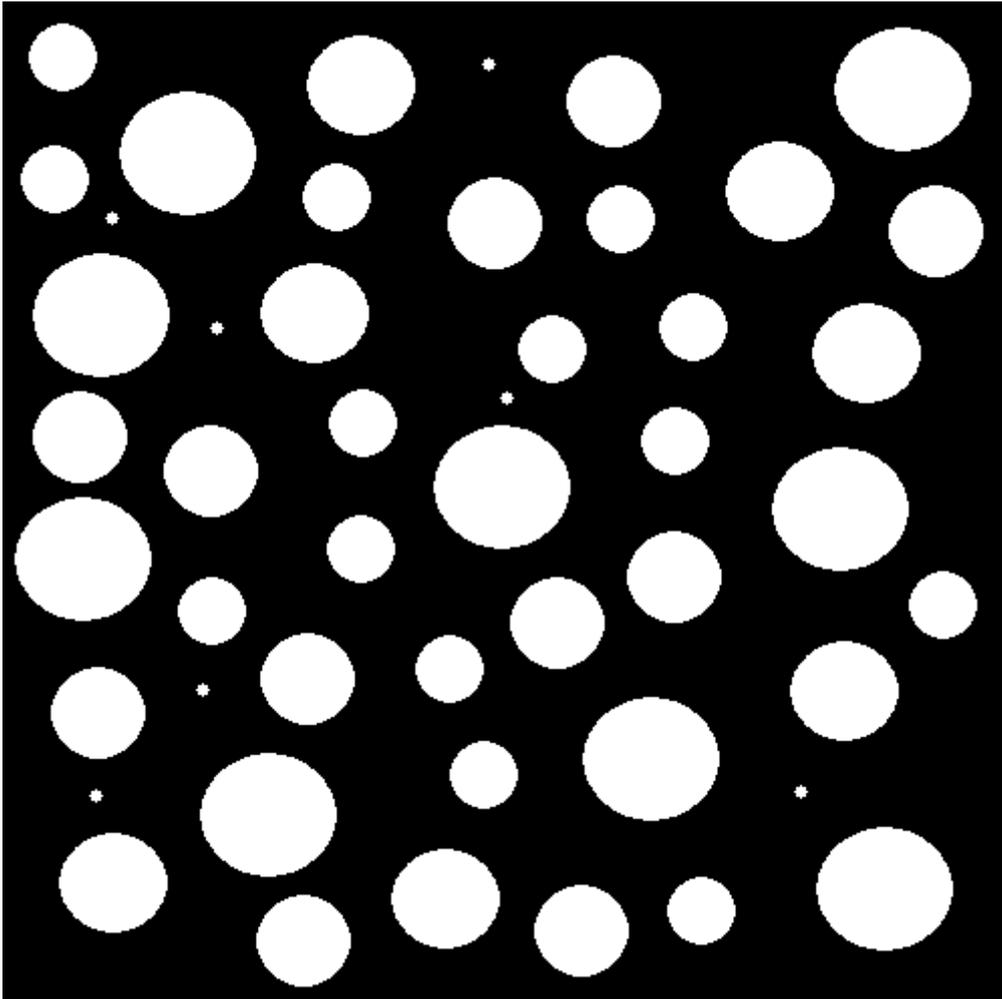


Figura 4.7 – Imagem com filtro de erodir aplicado pelo Goitacá.

Já a dilatação binária tende a aumentar uma determinada fase da imagem. Antes de utilizá-la é imprescindível realizar a binarização da imagem. Esta binarização pode ser efetuada através do procedimento descrito na seção 4.1.5. Usando como exemplo, o caso citado anteriormente, a tendência é aumentar a fase α e reduzir a fase β , fazendo exatamente o oposto da erosão binária. Para aplicação da dilatação binária no *software* proposto, o usuário deve acessar o menu Ferramentas, submenu Morfologia matemática, submenu Binária e submenu Dilatação. A Figura 4.8 ilustra a imagem de amostra binarizada após a aplicação da dilatação binária pelo Goitacá.

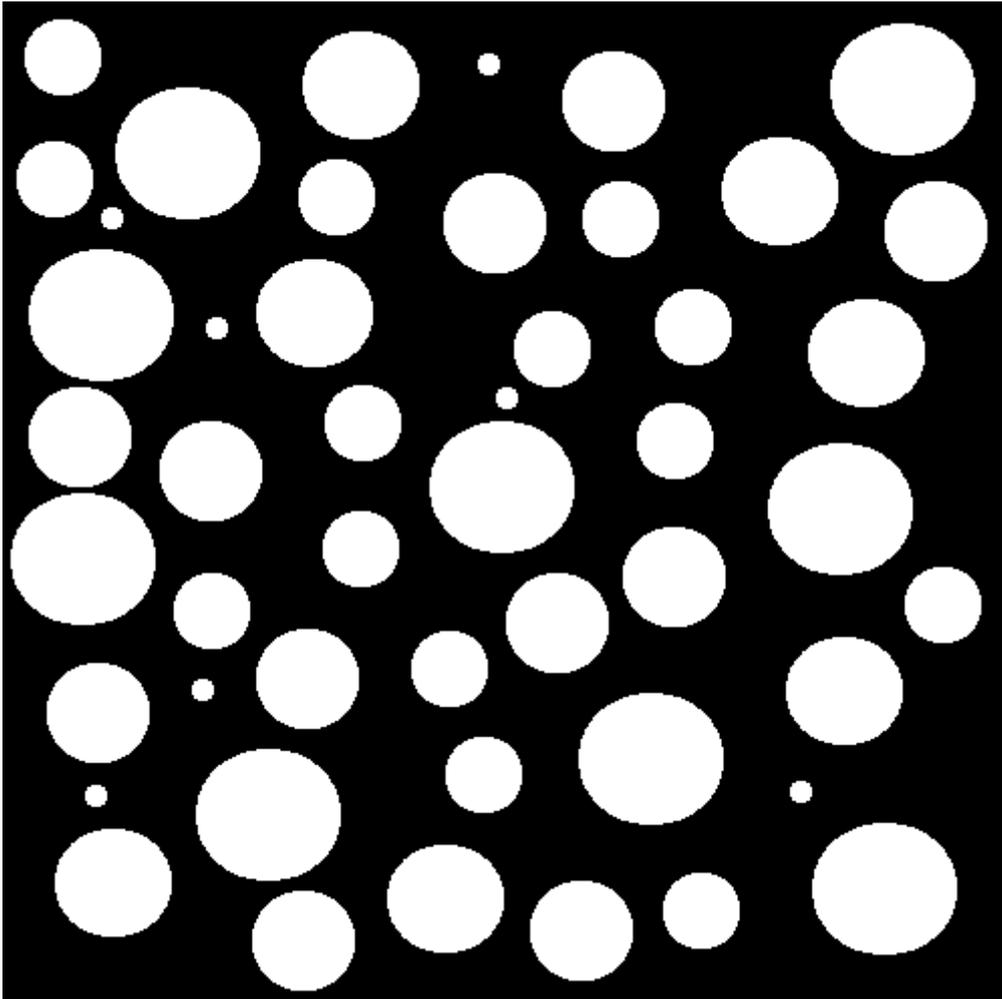


Figura 4.8 – Imagem com filtro de dilatar aplicado pelo Goitacá.

4.1.7 Escala

Para utilizar os recursos de medições de área de região, comprimento entre dois pontos e todos os cálculos de EQ é necessário primeiramente definir a escala no Goitacá. Para isso, o usuário deve clicar no botão de linha no painel lateral esquerdo e selecionar na imagem uma determinada distância em *pixel*. Após esta seleção o usuário deve acessar o menu Ferramentas e o submenu Escala. Posteriormente, é necessário preencher a distância conhecida e selecionar a unidade de medida. A tela de definição de escala no Goitacá é ilustrada na Figura 4.9.

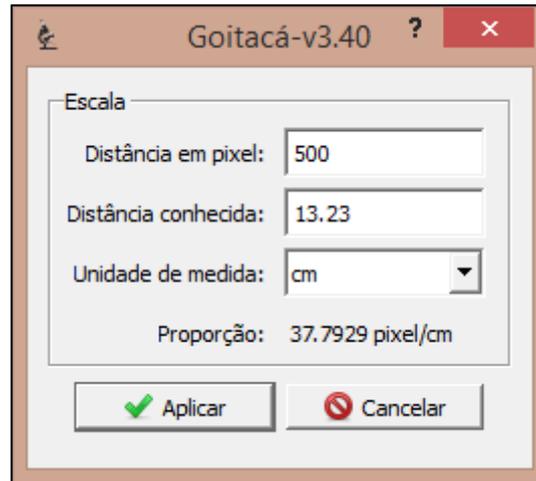


Figura 4.9 – Definição de escala no Goitacá.

Assim que a escala é definida, são inseridas sobre a imagem duas caixas na cor verde, com textos na cor amarelo. A primeira delas na parte superior direita e a segunda na parte inferior esquerda.

A caixa superior direita possui dois valores. O primeiro é a largura real e o segundo é a altura real da imagem. Estes valores são referentes aos tamanhos das linhas horizontais e verticais exibidas na inserção das malhas de linhas horizontais e cruzadas, uma vez que as linhas horizontais tem o tamanho da largura e as linhas verticais tem o tamanho da altura.

A caixa inferior esquerda contém uma linha com 10% da largura da imagem e abaixo o valor desta largura na escala real. É importante salientar que essas duas caixas são para auxiliar a percepção de escala real na imagem. Em alguns casos, não é necessário que estas informações sejam visualizadas. Para isso, tem-se no painel lateral esquerdo um agrupamento chamado Mostra elementos. Neste agrupamento, é possível clicar uma vez no botão Escala para que a caixa inferior esquerda seja exibida ou simplesmente clicar mais uma vez para que esta caixa seja ocultada. Esta ação também é válida para caixa superior direita, clicando uma ou duas vezes no botão Dimensão para exibir e ocultar respectivamente.

A Figura 4.10 apresenta a imagem de amostra binarizada com as caixas de dimensão (superior direita) e de escala (inferior esquerda) exportada pelo Goitacá.

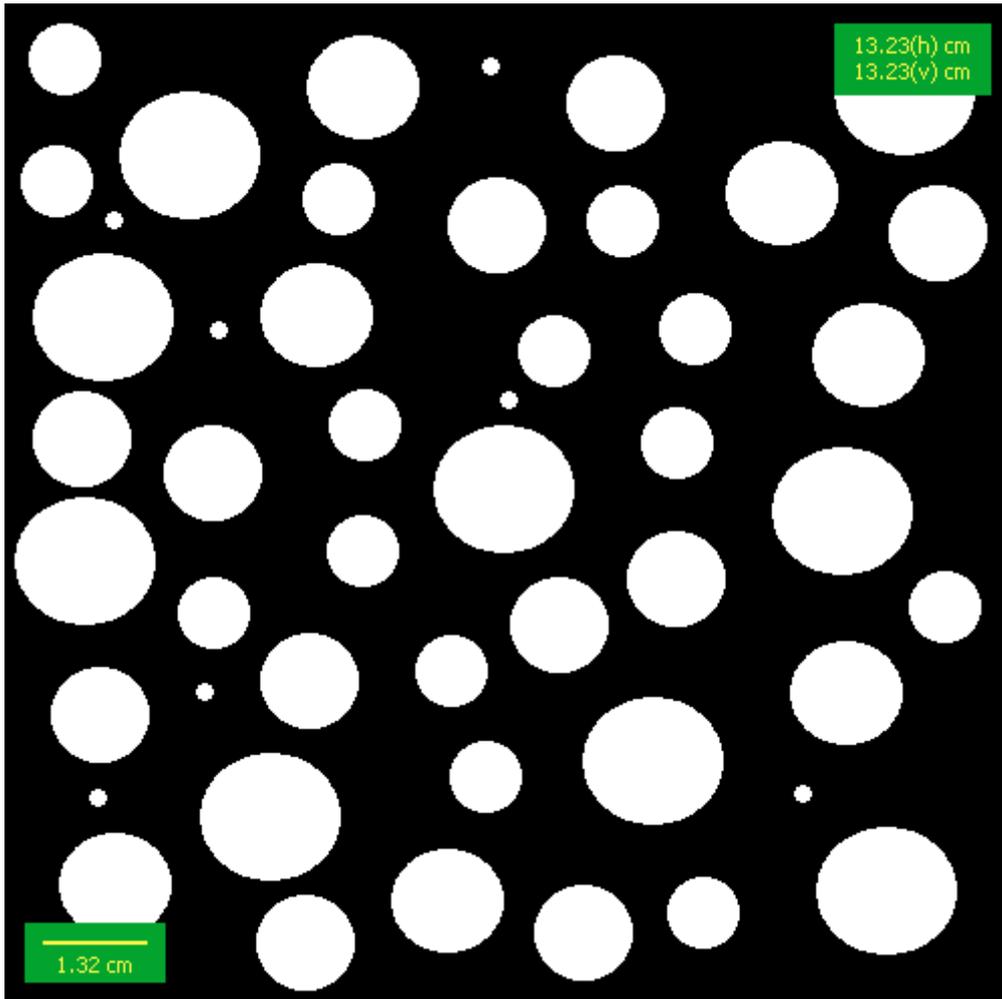


Figura 4.10 – Imagem com escala definida pelo Goitacá.

4.1.8 Medições

O Goitacá possui recursos de medições de ângulos, comprimento de entre dois pontos e área de região. Para a utilização destes recursos é necessário inicialmente definir a escala no Goitacá. Este procedimento foi detalhado na seção 4.1.7.

O recurso de comprimento entre dois pontos é utilizado para calcular a distância na escala real entre um ponto inicial e um final. Para utilizar este recurso, o usuário precisa primeiramente clicar no botão de linha que fica localizado no painel lateral esquerdo. Depois clicar sobre a imagem num ponto inicial e arrastar até um ponto final. Ao realizar esta ação, o *software* fornece a distância proporcional à escala definida pelo usuário. Na Figura 4.11, é

ilustrada a imagem de amostra binarizada com uma medição de comprimento entre dois pontos realizados pelo Goitacá.

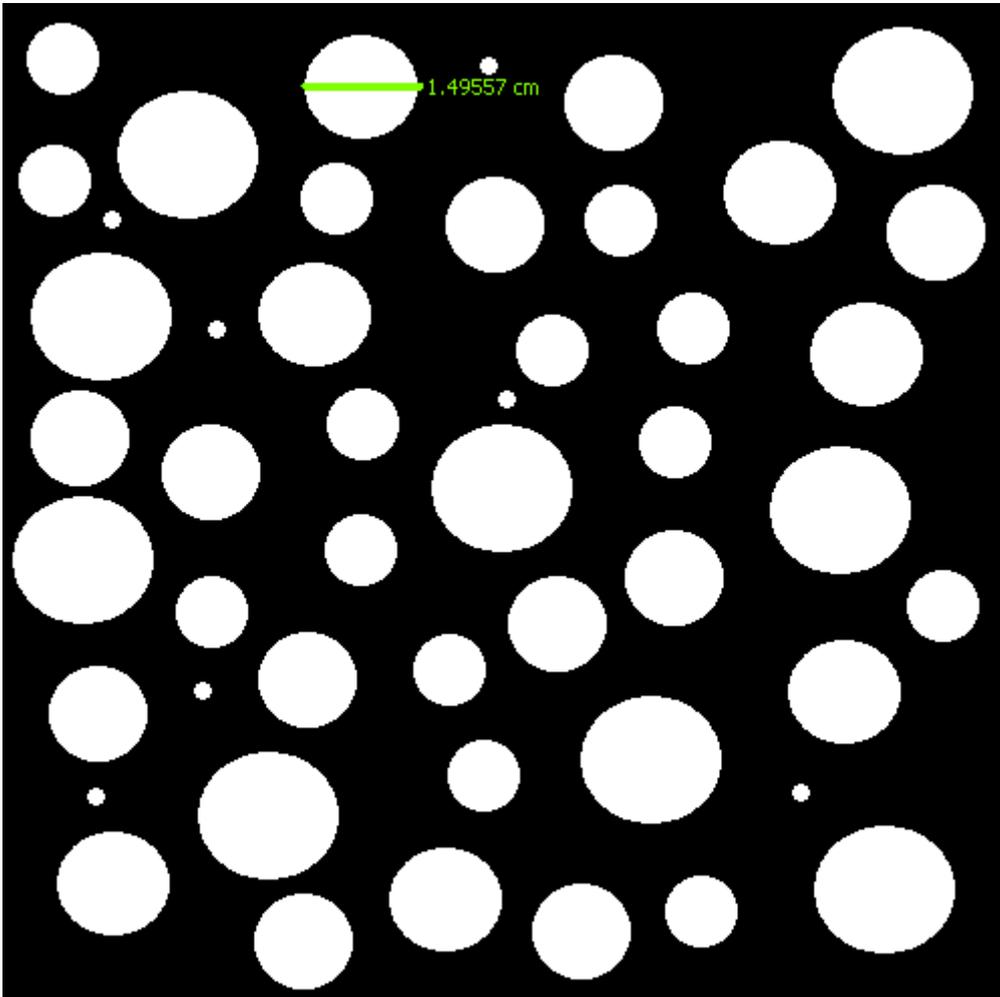


Figura 4.11 – Imagem com medição de comprimento entre dois pontos exportada pelo Goitacá.

O Goitacá realiza a medição de diversos tipos de áreas de região, sendo área de círculo, triângulo, quadrado, losango, pentágono, hexágono e linha livre. Esta última necessita que o usuário inicie e finalize no mesmo ponto a linha livre para criar uma forma plana. Para este procedimento é necessário inicialmente que o usuário clique no botão da forma geométrica almejada, depois selecione a devida área na imagem e por fim acesse o menu Ferramentas, submenu Medições e submenu Área de região.

A Figura 4.12 demonstra a medição de três áreas de regiões exportadas pelo Goitacá. A primeira delas é um círculo na cor laranja com área de

0,851452 cm², a segunda é um quadrado na cor azul com área de 4,15878 cm² e por último um hexágono na cor vermelha com área de 4,10599 cm².

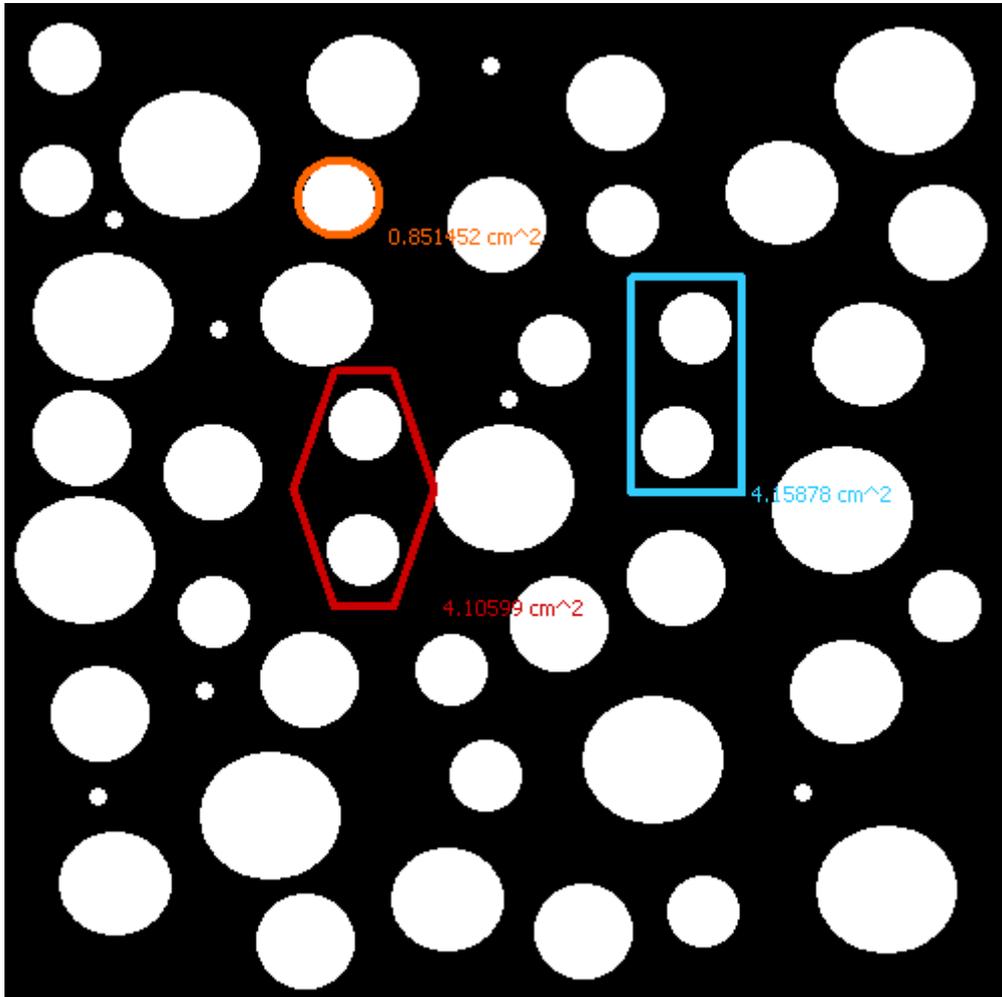


Figura 4.12 – Imagem com medição de áreas de região exportadas pelo Goitacá.

4.1.9 Estereologia quantitativa

Foram implementados no *software* proposto seis tipos de medições de EQ, sendo fração de área (A_A), fração linear (L_L), fração de ponto (P_P), área superficial por unidade de volume-teste (S_V), área superficial específica (S_{VP}) e comprimento de intercepto linear por unidade de volume-teste (L_V). Para realizar as medições citadas anteriormente, é preciso binarizar a imagem de amostra e definir a escala no Goitacá. Para binarizar a imagem, pode-se utilizar o procedimento descrito na seção 4.1.5 e, para definir a escala, deve-se repetir o procedimento detalhado na seção 4.1.7.

Para medir a A_A , o usuário deve acessar o menu Estereologia, submenu Fração volumétrica e submenu Fração de área. Na seção 4.2.1 podem ser observados com detalhes os resultados desta medição.

Para calcular a P_P , inicialmente o usuário deve definir o tipo de malha para pontos. Para isso deve-se acessar o menu Estereologia, submenu Malhas e submenu Pontos. Após este procedimento, o usuário deve retornar ao menu Estereologia, submenu Fração volumétrica e submenu Fração de pontos. O resultado do cálculo da P_P é exibido na seção 4.2.2.

Para a determinação da L_L , o usuário necessita inicialmente definir a malha de linhas horizontais. Esta definição é realizada através do menu Estereologia, submenu Malhas e submenu Linhas horizontais. Após, o usuário deve clicar no menu Estereologia, submenu Fração volumétrica e submenu Fração linear. A seção 4.2.3 exibe detalhes dos resultados obtidos através da medição da L_L .

O cálculo da S_V requer a definição da malha de linhas cruzadas. Para isso, o usuário deve acessar o menu Estereologia, submenu Malhas e submenu Linhas cruzadas. Posteriormente, o usuário precisa retornar ao menu Estereologia, submenu Área superficial por unidade de volume-teste e submenu Automático. Os resultados obtidos pelos cálculos da S_V podem ser examinados na seção 4.2.4.

Para realizar a medição da S_{VP} , a princípio o usuário precisa definir a malha de linhas cruzadas. Esta malha pode ser acessada através menu Estereologia, submenu Malhas e submenu Linhas cruzadas. Posteriormente o usuário necessita regressar ao menu Estereologia, submenu Área superficial específica e submenu Automático. Na seção 4.2.5, podem ser observados os resultados da medição de S_{VP} .

A determinação do L_V requer previamente a seleção de um determinado ponto através da área de um círculo. Para este procedimento, o usuário deve clicar no botão de círculo localizado no painel lateral esquerdo e depois selecionar na imagem a área do ponto no qual deseja saber seu comprimento

tridimensional. Após é necessário acessar o menu Estereologia, submenu Comprimento de intercepto linear por unidade de volume-teste e submenu Automático. Os resultados com a estimativa destes comprimentos são detalhados na seção 4.2.6.

4.2 VALIDAÇÃO DO SOFTWARE

No Goitacá foram implementadas as três técnicas para calcular a fração volumétrica, sendo A_A , P_P e L_L . Além destes cálculos de EQ foram implementados S_V , S_{VP} e L_V . Todos estes cálculos tiveram seus resultados apresentados e confrontados com resultados obtidos pelo método manual nas seções 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3, 4.2.4, 4.2.5 e 4.2.6 respectivamente.

4.2.1 Fração de área (A_A)

O cálculo da A_A foi realizado no *software* proposto após a entrada de todos os parâmetros já mencionados na seção 3.3. Na Figura 4.13, pode ser observada a imagem exportada do Goitacá com a identificação das áreas de seções contornadas na cor vermelha assim como seus respectivos índices.

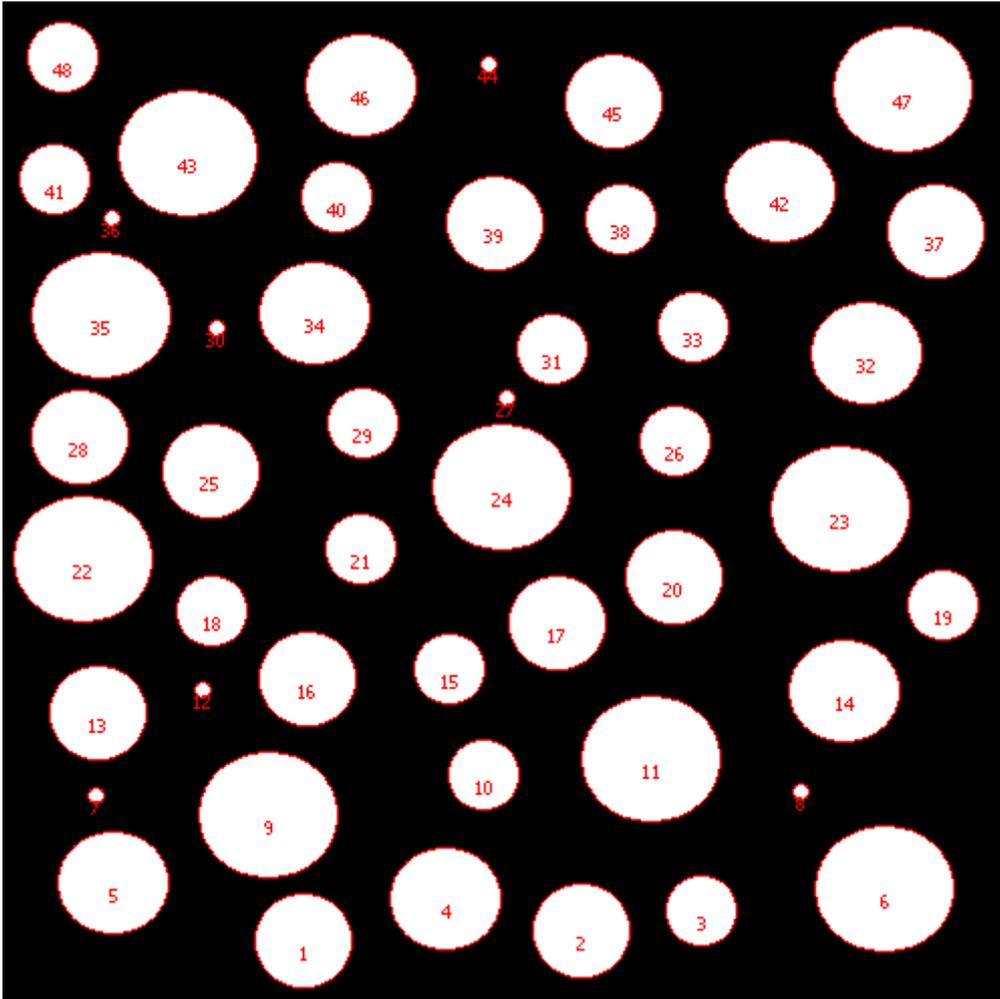


Figura 4.13 – Áreas de seções identificadas pelo Goitacá.

Na tela de A_A , ilustrada na Figura 4.14, há diversas informações relevantes. *A priori*, é exibida uma grade com todas as áreas de seções da imagem contendo índices, pesos e áreas. Além dessas informações, pode-se observar somatório de todas as áreas de seções, área de seção média (\bar{A}), área da imagem e A_A .

As áreas de seções podem assumir peso 1,0 ou 0,5. A área assume peso 1,0 se estiver inteiramente contida na imagem de amostra. Contudo, é comum existirem seções parcialmente contidas na imagem de amostra. Nestes casos, as áreas recebem peso 0,5. Os pesos das áreas são utilizados para calcular a área de seção média (\bar{A}).

The screenshot shows the 'Goitacá-v3.40' application window. It features a table titled 'Áreas das seções' with three columns: 'Índices', 'Pesos', and 'Áreas (cm²)'. Below the table, there is a section for 'Fração de área (A_A) / Automático' containing summary statistics. At the bottom, there are two buttons: 'Exportar' and 'Fechar'.

Índices	Pesos	Áreas (cm ²)
1	1	1.24
2	1	1.24
3	1	0.68
4	1	1.54
5	1	1.54
6	1	2.39
7	1	0.03
8	1	0.03
9	1	2.39
10	1	0.68
11	1	2.39
12	1	0.03
13	1	1.24
14	1	1.54
15	1	0.68
16	1	1.24
17	1	1.24
18	1	0.68
19	1	0.68
20	1	1.24

Fração de área (A_A) / Automático

Somatório das áreas das seções: 55.67 cm²
 Área de seção média (\bar{A}): 1.16 cm²
 Área de imagem: 175.03 cm²
 A_A: 3.18e-01

Exportar Fechar

Figura 4.14 – A_A calculada no Goitacá.

O Goitacá identificou 48 áreas de seções na imagem de amostra, o valor de cada área de seção, assim como seus índices e pesos estão disponíveis no APÊNDICE B. A A_A da fase α (branca) calculada através do Goitacá foi de 31,80%.

No método manual, 48 áreas de seções foram identificadas na imagem de amostra, seus respectivos índices e pesos foram disponibilizados no APÊNDICE C. Posteriormente chegou-se ao valor da A_A da fase α (branca) de 33,90%. Na Tabela 4.1 pode-se observar a comparação dos resultados dos cálculos da A_A obtidos pelo Goitacá e pelo método manual.

Tabela 4.1 – Comparação dos resultados dos cálculos de A_A .

Método	A_A
Goitacá (Automatizado)	31,80%
Manual	33,90%

4.2.2 Fração de pontos (P_P)

Após a definição dos parâmetros de entrada no Goitacá, descritos na seção 3.3, foi calculada a P_P . Uma malha de pontos, na cor verde, foi inserida sobre a imagem e os pontos que incidiram na fase de interesse, na cor vermelha, foram contabilizados como ilustra a Figura 4.15.

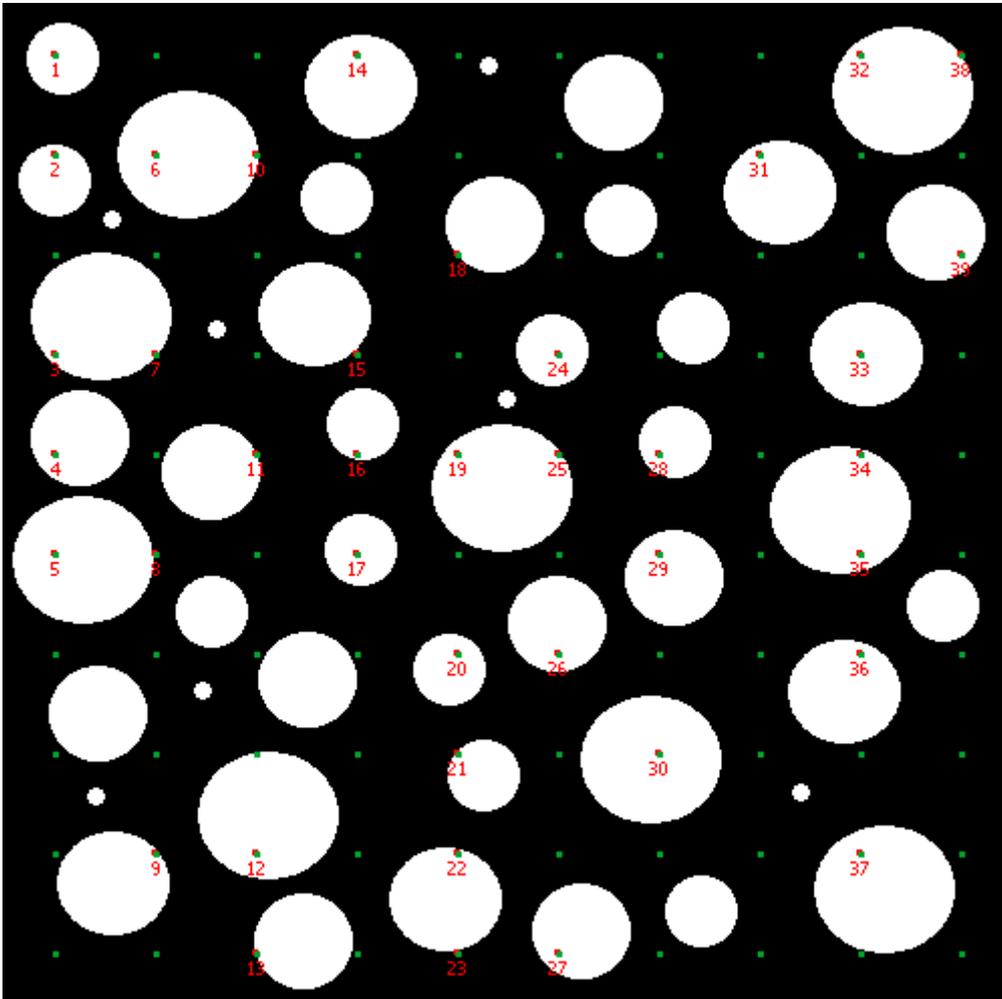


Figura 4.15 – Pontos que incidem na fase de interesse identificados pelo Goitacá.

Na Figura 4.16 é ilustrada a tela de P_P no Goitacá. Nesta tela é exibida uma grade dos pontos que incidem na fase com seus índices e pesos, adiante,

são exibidos os pontos que incidem na fase de interesse, total de pontos e a P_p .

Os pontos podem possuir peso 1,0 ou 0,5. No Goitacá cada ponto é um quadrado de 3 por 3 *pixels*. O ponto possui peso 1,0 se estiver totalmente dentro da fase de interesse, neste caso, a fase α (branca). Entretanto, frequentemente alguns destes pontos tocam tanto a fase α (branca), quanto à fase β (preta) ao mesmo tempo. Nestas situações, os pontos assumem peso 0,5. O somatório destes pesos constitui o total de pontos que incidem na fase de interesse.

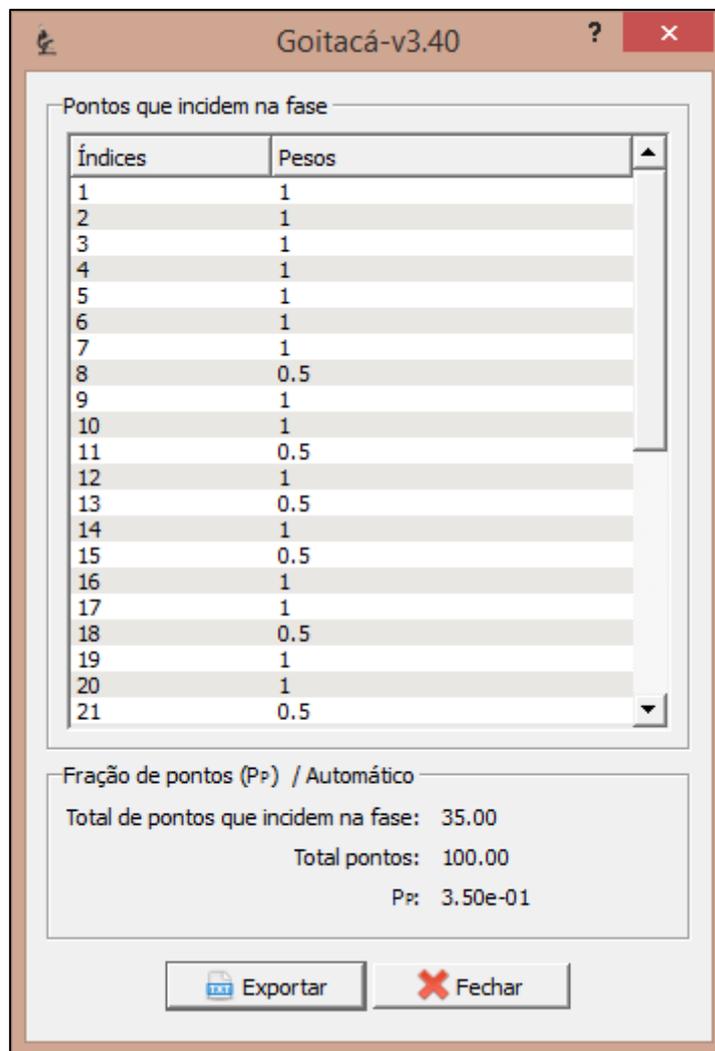


Figura 4.16 – P_p calculada no Goitacá.

O Goitacá identificou 35 pontos que incidiram na fase de interesse, os índices e os pesos destes pontos podem ser visualizados no APÊNDICE D. A P_P da fase α (branca) calculada no Goitacá foi de 35,00%.

Utilizando o método manual identificou-se 35,50 pontos que incidiram na fase de interesse. Os índices e os pesos referentes a estes pontos estão disponibilizados no APÊNDICE E. Após, calculou-se o valor da P_P da fase α (branca) que foi de 35,50%. A Tabela 4.2 realiza uma comparação dos resultados dos cálculos de P_P obtidos pelo Goitacá e pelo método manual.

Tabela 4.2 – Comparação dos resultados dos cálculos da P_P .

Método	P_P
Goitacá (Automático)	35,00%
Manual	35,50%

4.2.3 Fração linear (L_L)

A L_L foi calculada após a definição dos parâmetros de entrada no Goitacá descritos na seção 3.3. A malha de linhas horizontais, na cor verde, foi inserida em cima da imagem e os comprimentos dos interceptos lineares que incidiram na fase de interesse, na cor vermelha, foram medidos como pode ser observado na Figura 4.17.

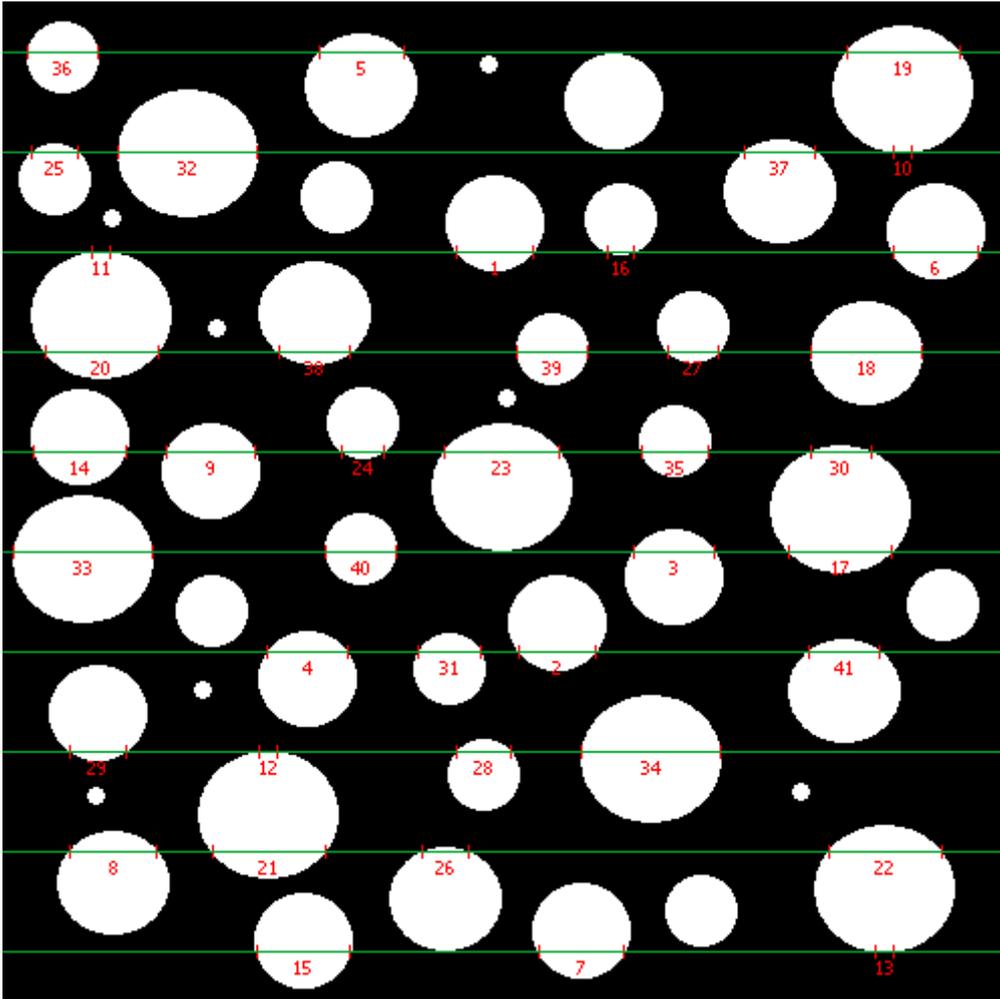


Figura 4.17 – Interceptos lineares que incidem na fase de interesse identificados pelo Goitacá.

A Figura 4.18 apresenta a tela de L_L do Goitacá. Nesta tela, encontra-se a grade de interceptos lineares com índices, pesos e interceptos, em seguida o somatório de interceptos lineares, intercepto linear médio (\bar{L}), somatório das linhas e L_L .

Os interceptos lineares podem apresentar peso 1,0 ou 0,5. O intercepto recebe peso 1,0 se estiver totalmente dentro da imagem de amostra. No entanto, é comum haver interceptos que não estão inteiramente contidos na imagem de amostra. Nestes casos, os interceptos recebem peso 0,5. Os pesos dos interceptos são usados para determinar o intercepto linear médio (\bar{L}).

The screenshot shows the 'Goitacá-v3.40' application window. It features a table titled 'Interceptos lineares' with three columns: 'Índices', 'Pesos', and 'Interceptos (cm)'. Below the table, there is a section for 'Fração linear (L_L) / Automático' which displays summary statistics. At the bottom, there are two buttons: 'Exportar' and 'Fechar'.

Índices	Pesos	Interceptos (cm)
1	1	1.03
2	1	1.03
3	1	1.08
4	1	1.08
5	1	1.14
6	1	1.14
7	1	1.14
8	1	1.16
9	1	1.19
10	1	0.26
11	1	0.26
12	1	0.26
13	1	0.26
14	1	1.24
15	1	1.24
16	1	0.37
17	1	1.38
18	1	1.48
19	1	1.51
20	1	1.51

Fração linear (L_L) / Automático

Somatório dos interceptos lineares: 42.23 cm
 Intercepto linear médio (\bar{L}): 1.03 cm
 Somatório das linhas: 132.30 cm
 L_L: 3.19e-01

Exportar Fechar

Figura 4.18 – L_L calculada no Goitacá.

O *software* proposto identificou 41 segmentos de retas que incidiram na fase de interesse. Os índices, pesos e seus interceptos lineares correspondentes podem ser visualizados no APÊNDICE F. A L_L da fase α (branca) calculada no Goitacá foi de 31,90%.

Através do método manual foram detectados 43 segmentados de retas na fase de interesse. Os índices, pesos e seus respectivos interceptos lineares estão disponíveis no APÊNDICE G. *A posteriori*, chegou-se ao valor de 34,00% da L_L da fase α (branca). A Tabela 4.3 apresenta uma comparação dos resultados dos cálculos de L_L obtidos pelo Goitacá e pelo método manual.

Tabela 4.3 – Comparação dos resultados dos cálculos da L_L .

Método	L_L
Goitacá (Automatizado)	31,90%
Manual	34,00%

4.2.4 Área superficial por unidade de volume-teste (S_V)

Depois da definição dos parâmetros de entrada, especificados na seção 3.3, o cálculo da S_V foi realizado no Goitacá. Foi acrescentada uma malha de linhas cruzadas (horizontais e verticais), na cor verde, sobre a imagem e as fronteiras interceptadas sobre as linhas horizontais, na cor vermelha, e sobre as linhas verticais, na cor azul, foram contabilizadas como pode ser observado na Figura 4.19.

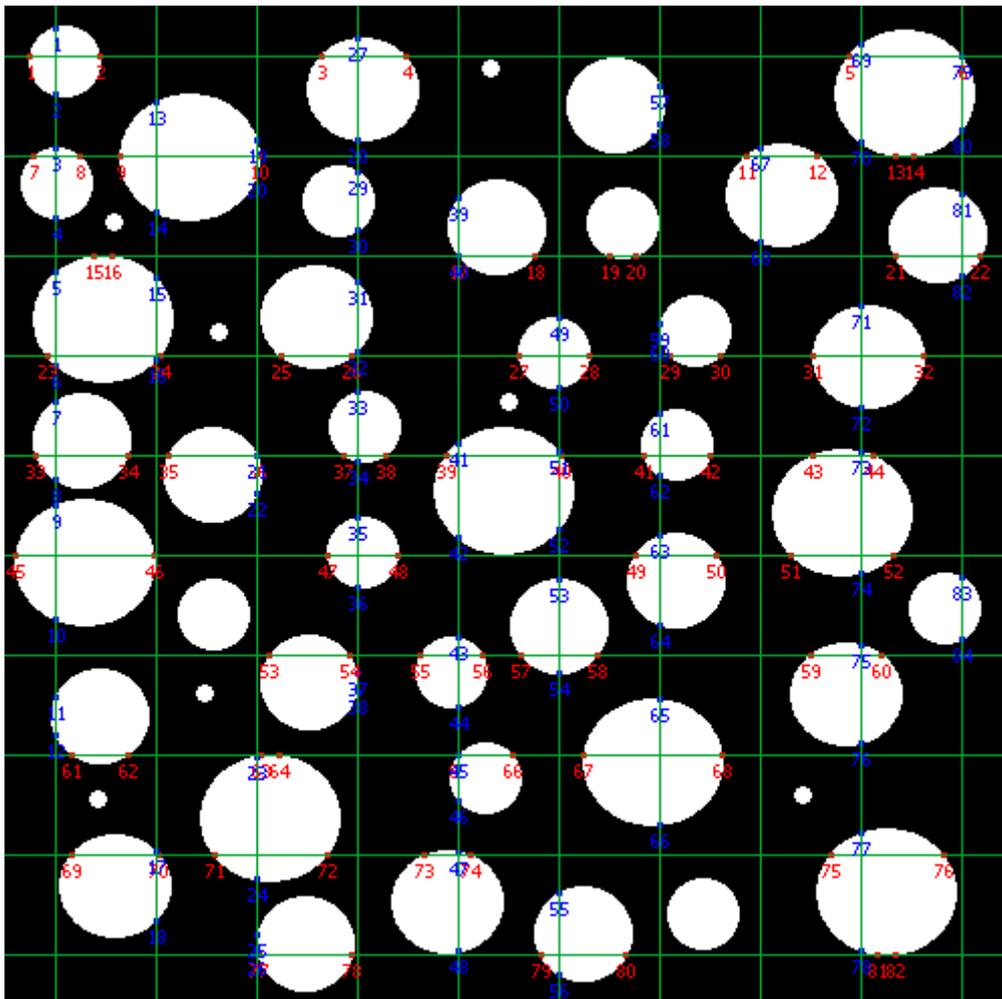


Figura 4.19 – Fronteiras interceptadas pelas linhas horizontais e verticais no Goitacá.

Na Figura 4.20 é ilustrada a tela de S_v do Goitacá. Duas grades são apresentadas: a primeira contém os índices e pesos das fronteiras interceptadas nas linhas horizontais e a segunda os índices e pesos das fronteiras interceptadas nas linhas verticais. Outras informações relevantes são exibidas nesta tela, sendo total das fronteiras interceptadas pelas linhas, somatório das linhas e S_v .

As fronteiras interceptadas podem assumir peso 1,0 ou 0,5. A fronteira assume peso 1,0 quando a linha toca diretamente a fase de interesse da imagem de amostra. Entretanto, geralmente algumas linhas ficam tangentes à fase de interesse. Nestes casos, as fronteiras assumem peso 0,5. O somatório destes pesos constitui o total de fronteiras interceptadas pelas linhas.

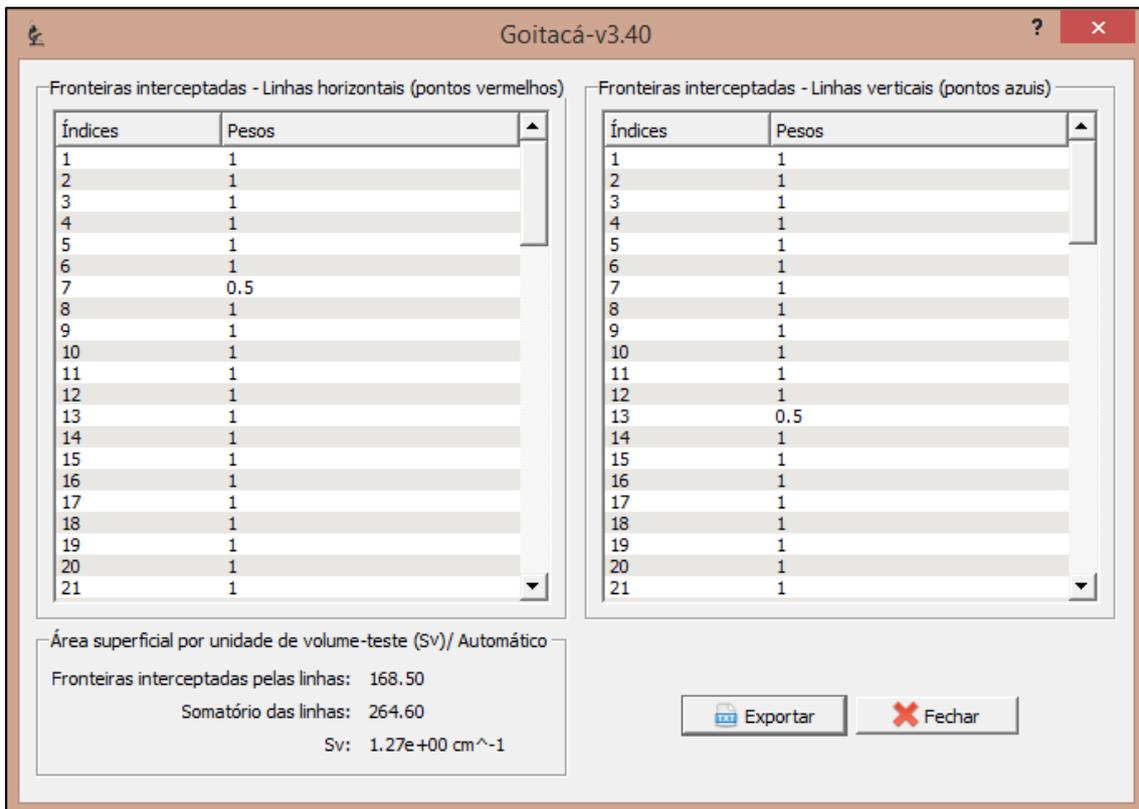


Figura 4.20 – S_v calculada no Goitacá.

O Goitacá colocou uma malha de linhas cruzadas (horizontais e verticais) sobre a imagem e 85 fronteiras foram interceptadas nas linhas horizontais. Os índices e os pesos destas fronteiras estão disponíveis no APÊNDICE H. As linhas verticais tiveram 86 fronteiras interceptadas. Os índices e os pesos correspondentes a estas fronteiras podem ser visualizados

no APÊNDICE I. A S_V da fase α (branca) calculada através do Goitacá foi de $1,27 \text{ cm}^{-1}$.

Nos cálculos realizados pelo método manual, as linhas horizontais tiveram 85 fronteiras interceptadas. Os índices e os pesos referentes a estas fronteiras estão disponíveis no APÊNDICE J. Nas linhas verticais, 86 fronteiras foram interceptadas. Seus respectivos índices e pesos estão disponibilizados no APÊNDICE K. O valor da S_V da fase α (branca) encontrado também foi de $1,27 \text{ cm}^{-1}$. Na Tabela 4.4 pode ser observada uma comparação dos resultados da S_V calculados pelo Goitacá e pelo método manual.

Tabela 4.4 – Comparação dos resultados dos cálculos de S_V .

Método	S_V
Goitacá (Automatizado)	$1,27 \text{ cm}^{-1}$
Manual	$1,27 \text{ cm}^{-1}$

4.2.5 Área superficial específica (S_{VP})

Após a determinação dos parâmetros de entrada, explicados na seção 3.3, a S_{VP} foi calculada. A malha de linhas cruzadas foi inserida sobre a imagem e 171 fronteiras interceptaram a fase de interesse. A malha de pontos foi definida pelo encontro das linhas horizontais com as linhas verticais da malha de linhas cruzadas, onde 35 pontos incidiram na fase de interesse. A Figura 4.21 ilustra a imagem de amostra, com a malha de linhas cruzadas e a malha de pontos, na cor verde. As fronteiras que interceptaram a fase de interesse, na cor vermelha, e os pontos que incidiram na fase de interesse na cor azul.

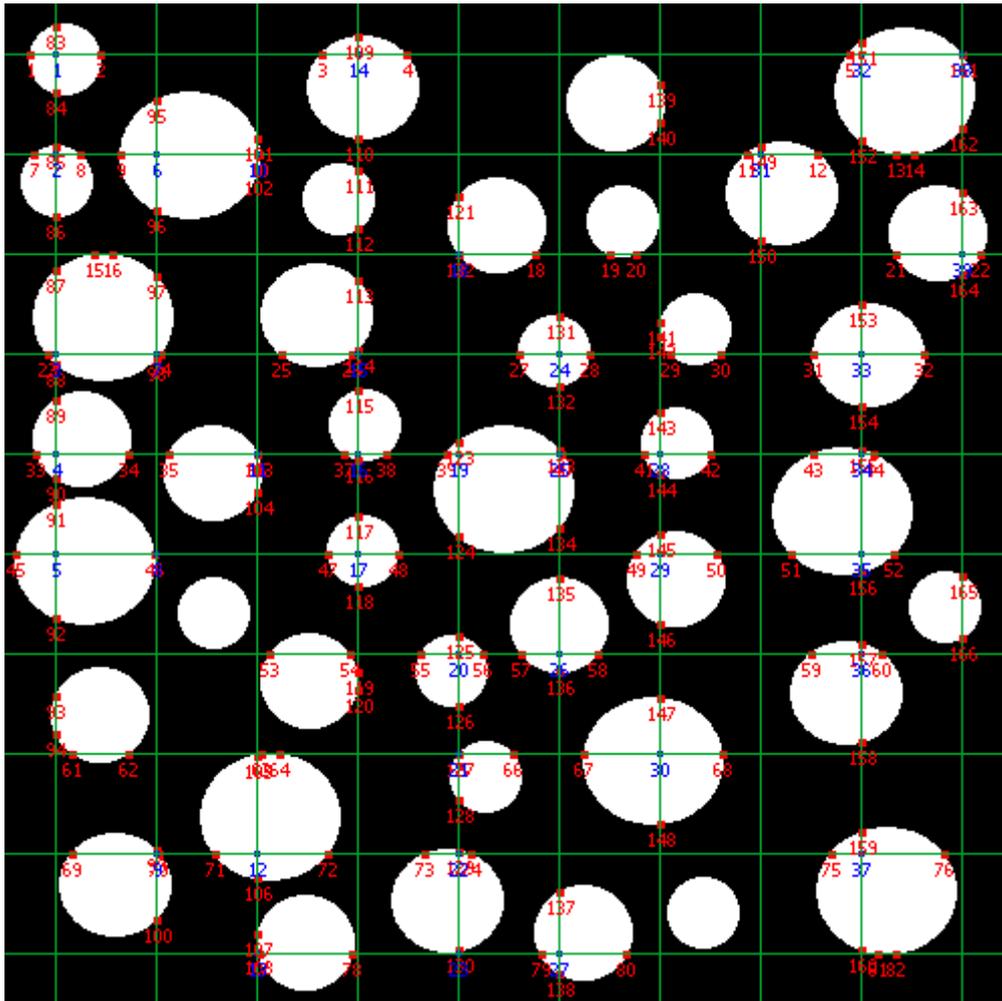


Figura 4.21 – Pontos que incidiram na fase de interesse e fronteiras que interceptaram a fase de interesse no Goitacá.

Os pesos das fronteiras interceptadas e dos pontos que incidem a fase de interesse são os mesmos relatados na seção 4.2.4 e 4.2.2 respectivamente.

A Figura 4.22 mostra a tela de S_{VP} no Goitacá. Nesta tela, duas grades são exibidas. A primeira grade contém as fronteiras interceptadas, com seus índices e pesos, descritos com mais detalhes nos APÊNDICE H e APÊNDICE I. A segunda grade possui os pontos que incidem na fase de interesse, com seus respectivos índices e pesos, disponíveis no APÊNDICE D. Além dessas informações, são exibidas nesta tela as fronteiras interceptadas pelas linhas, somatório das linhas, S_v , pontos que incidem na fase de interesse, total de pontos, P_p e, por fim, a S_{VP} . No Goitacá o valor calculado da S_{VP} foi de $3,64 \text{ cm}^{-1}$.

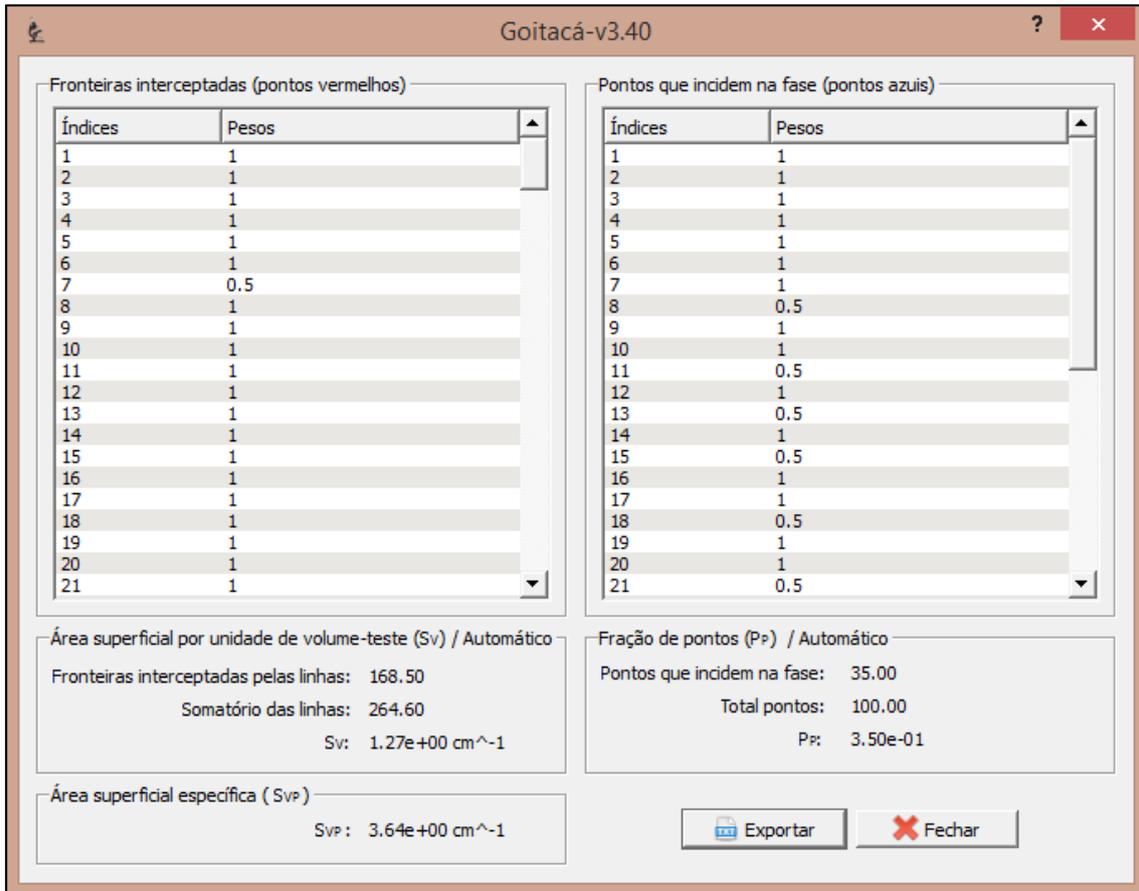


Figura 4.22 – S_{VP} calculada no Goitacá.

Os cálculos do método manual foram baseados nas seções 4.2.2 e 4.2.4, tendo em vista que o valor da S_{VP} é a divisão do valor da S_v pelo valor da P_p . Os índices e pesos das fronteiras interceptadas nas linhas horizontais e verticais podem ser visualizados, respectivamente, nos APÊNDICE J e APÊNDICE K. Os índices e pesos dos pontos que incidiram na fase de interesse estão disponíveis no APÊNDICE E. Chegou-se ao valor da S_{VP} que foi de $3,59 \text{ cm}^{-1}$. Uma comparação dos resultados da S_{VP} calculados através do Goitacá e do método manual é demonstrado na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Comparação dos resultados dos cálculos de S_{VP} .

Método	S_{VP}
Goitacá (Automatizado)	$3,64 \text{ cm}^{-1}$
Manual	$3,59 \text{ cm}^{-1}$

4.2.6 Comprimento de interceptos lineares por unidade de volume-teste (L_V)

Em seguida, usando a definição dos parâmetros de entrada, descritos na seção 3.3, foi calculado o L_V . O *software* Goitacá identificou sete pontos na imagem de amostra. Na Figura 4.23, podem ser observados os pontos identificados, com seus índices correspondentes na cor vermelha.

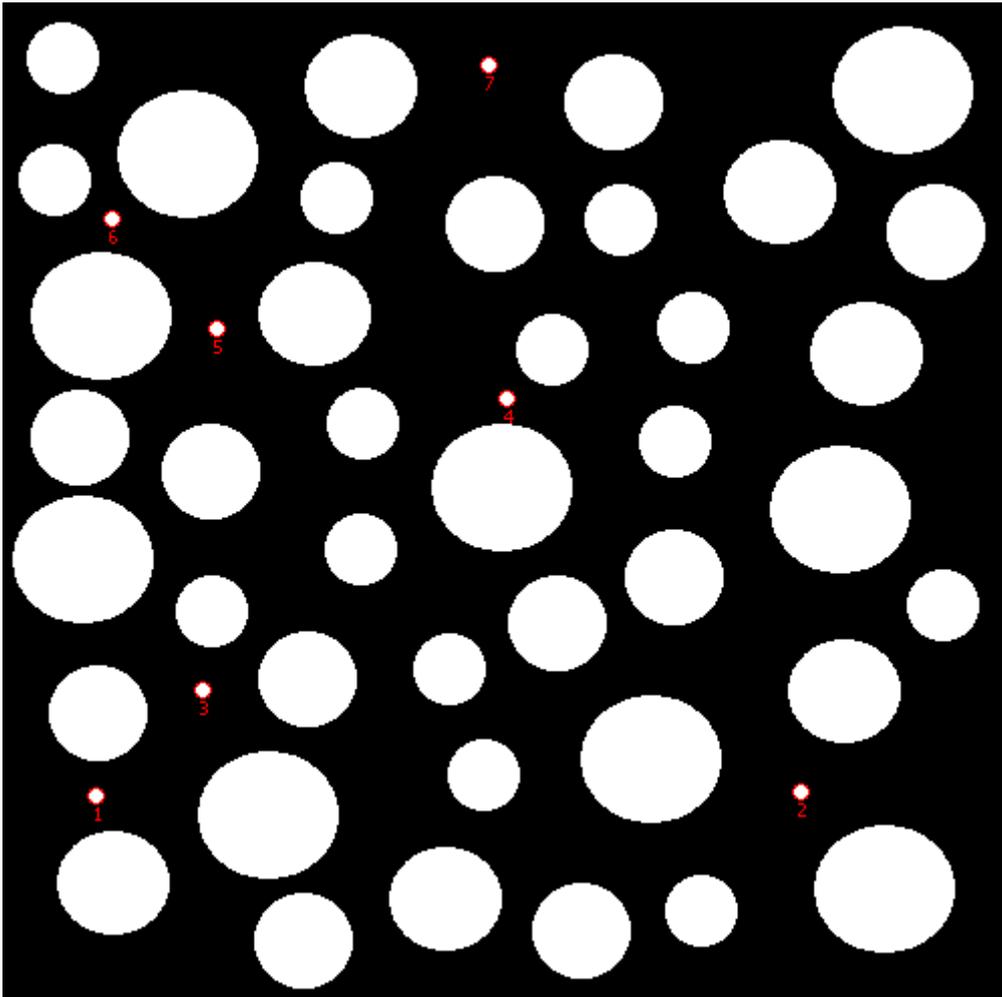


Figura 4.23 – Pontos identificados pelo Goitacá.

Na tela de L_V , ilustrada na Figura 4.24, pode-se observar o total de pontos encontrados, área da imagem, P_A e L_V . O valor do L_V calculado pelo Goitacá foi de $0,08 \text{ cm}^{-2}$.

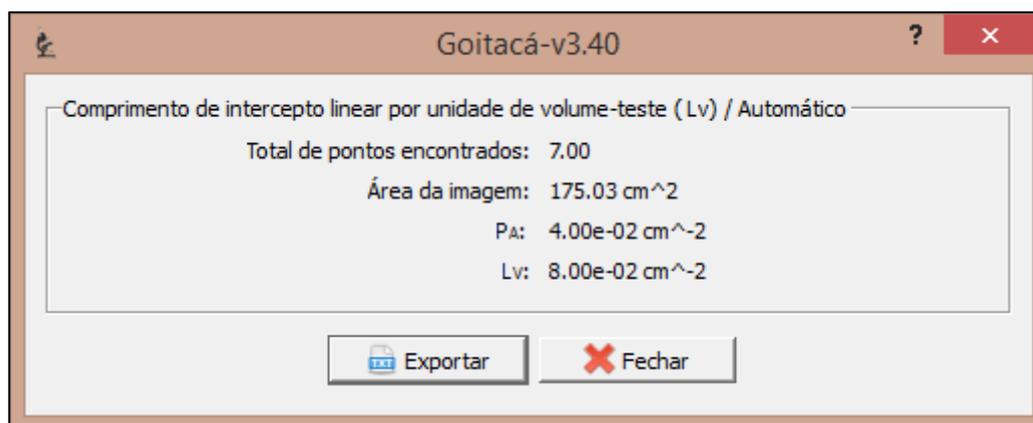


Figura 4.24 – L_V calculado no Goitacá.

No método manual foram identificados sete pontos com área de $0,12 \text{ cm}^2$ e, após os cálculos do L_V , também se chegou ao valor de $0,08 \text{ cm}^{-2}$. A Tabela 4.6 ilustra a comparação dos resultados dos cálculos do L_V através do Goitacá e do método manual.

Tabela 4.6 – Comparação dos resultados dos cálculos de L_V .

Método	L_V
Goitacá (Automatizado)	$0,08 \text{ cm}^{-2}$
Manual	$0,08 \text{ cm}^{-2}$

Ao final das comparações entre os resultados obtidos pelo método manual e os resultados obtidos pela análise automática do *software* Goitacá, chega-se à constatação que não houve desvios em ordem de grandeza relevante que comprometessem as análises.

Nas Tabela 4.1, Tabela 4.2 e Tabela 4.3 as diferenças entre os cálculos realizados pelo Goitacá e o método manual, respectivamente, foram de 2,10%, 0,50% e 2,10% para as A_A , P_P e L_L . No cálculo de S_V não houve diferença no resultado. Já no cálculo de S_{VP} , registrou-se uma diferença nas casas centesimais de $0,05 \text{ cm}^{-1}$. Por último, o cálculo de L_V também não apresentou diferença na precisão medida.

4.3 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso consiste em realizar as medições estereológicas implementadas no Goitacá com uma amostra real bifásica. Esta amostra é composta de fases de ferrita (preta) e austenita (branca), sendo austenita a fase de interesse (DE MÉLO; DOS SANTOS; MAGNABOSCO, 2008). Os parâmetros utilizados nas medições foram detalhados na seção 3.4.

4.3.1 Fração de área (A_A)

Após a entrada dos parâmetros descritos na seção 3.4, o cálculo da A_A foi realizado. Na Figura 4.25 pode ser observada a imagem de amostra com áreas de seções de austenita e seus respectivos índices identificados na cor vermelha.

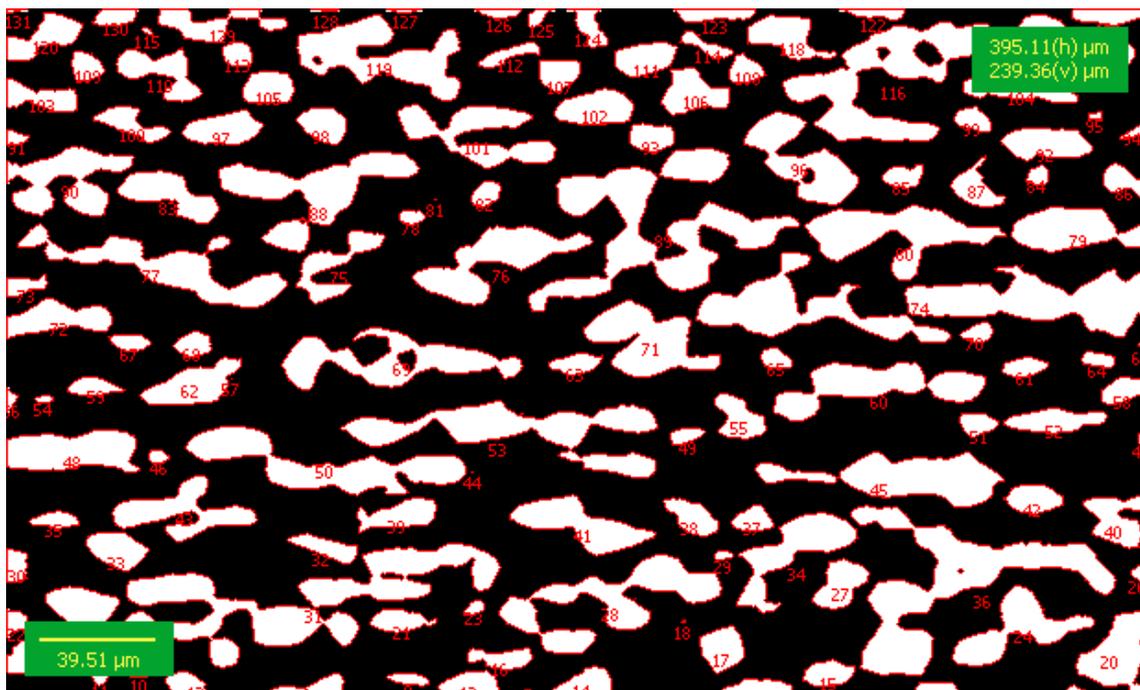


Figura 4.25 – Identificação das áreas de seções da fase de austenita.

O Goitacá identificou 131 áreas de seções de austenita na imagem de amostra. Os índices, pesos e áreas destas seções estão disponíveis no APÊNDICE L. A fração de área da fase de austenita (branca) calculada pelo *software* proposto foi de 35,90%.

4.3.2 Fração de pontos (P_P)

A P_P foi calculada após a definição dos parâmetros de entrada explicados seção 3.4. A Figura 4.26 apresenta a imagem de amostra com uma malha de pontos na cor verde e os pontos que incidiram na fase de austenita na cor vermelha.

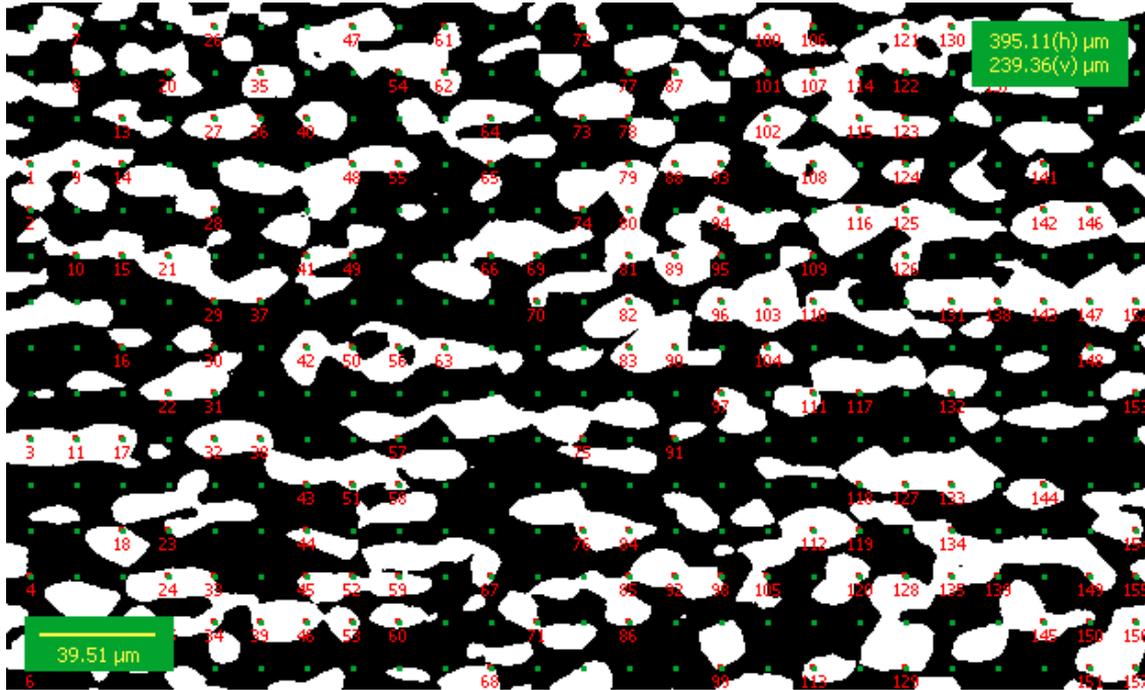


Figura 4.26 – Identificação dos pontos que incidem na fase de austenita.

O *software* proposto identificou 157 pontos que incidiram na fase de austenita. Seus índices e pesos podem ser observados no APÊNDICE M. A fração de pontos da fase de austenita (branca) calculada pelo Goitacá foi de 36,40%.

4.3.3 Fração linear (L_L)

Em seguida a entrada dos parâmetros descritos na seção 3.4 foi calculada a L_L . A Figura 4.27 exibe a imagem de amostra com uma malha de linhas horizontais na cor verde e os comprimentos dos interceptos lineares que incidiram na fase de austenita na cor vermelha.

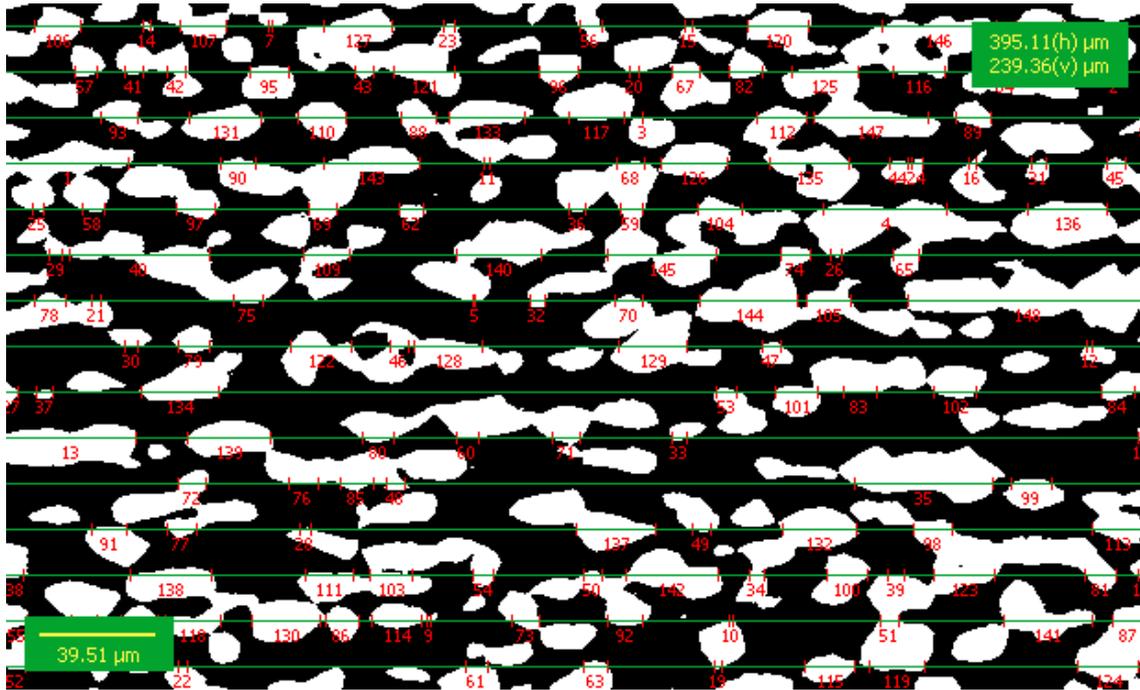


Figura 4.27 – Identificação dos interceptos lineares que incidem na fase de austenita.

O Goitacá identificou 148 interceptos lineares que incidiram na fase de austenita. Os índices, pesos e os comprimentos destes interceptos lineares podem ser visualizados no APÊNDICE N. A fração linear da fase de austenita (branca) calculada no *software* proposto foi de 36,60%.

4.3.4 Área superficial por unidade de volume-teste (S_V)

A S_V foi calculada após a entrada dos parâmetros especificados na seção 3.4. A Figura 4.28 apresenta a imagem de amostra com uma malha de linhas horizontais e verticais, na cor verde, as fronteiras interceptadas na fase de austenita pelas linhas horizontais, na cor vermelha, e pelas linhas verticais na cor azul.

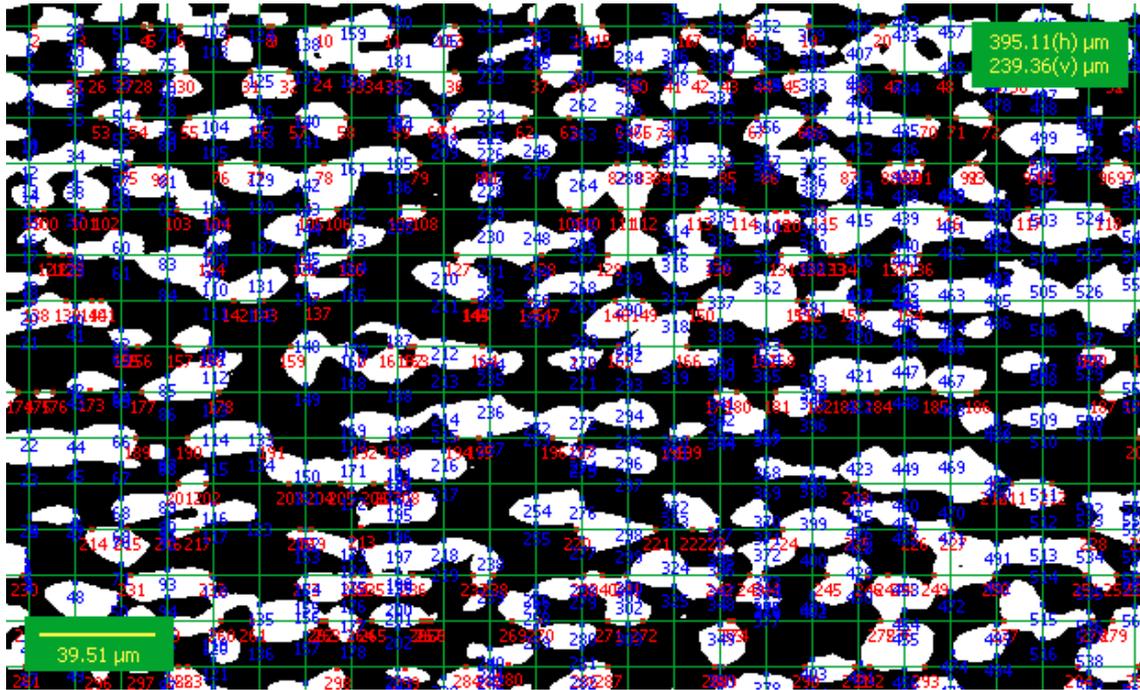


Figura 4.28 – Identificação das fronteiras interceptadas pelas linhas horizontais e verticais.

O *software* proposto identificou 299 fronteiras interceptadas na fase de austenita pelas linhas horizontais e 562 pelas linhas verticais. Os índices e pesos destas fronteiras respectivamente podem ser visualizados no APÊNDICE O e APÊNDICE P. A área superficial por unidade de volume-teste da fase de austenita (branca) calculada pelo Goitacá foi de $1,41 \mu\text{m}^{-1}$.

4.3.5 Área superficial específica (S_{VP})

A S_{VP} foi calculada após a entrada dos parâmetros descritos na seção 3.4. A Figura 4.29 exhibe a imagem de amostra com uma malha de linhas horizontais e verticais, na cor verde, as fronteiras interceptadas na fase de austenita, na cor vermelha, e os pontos que incidem na fase de austenita na cor azul.

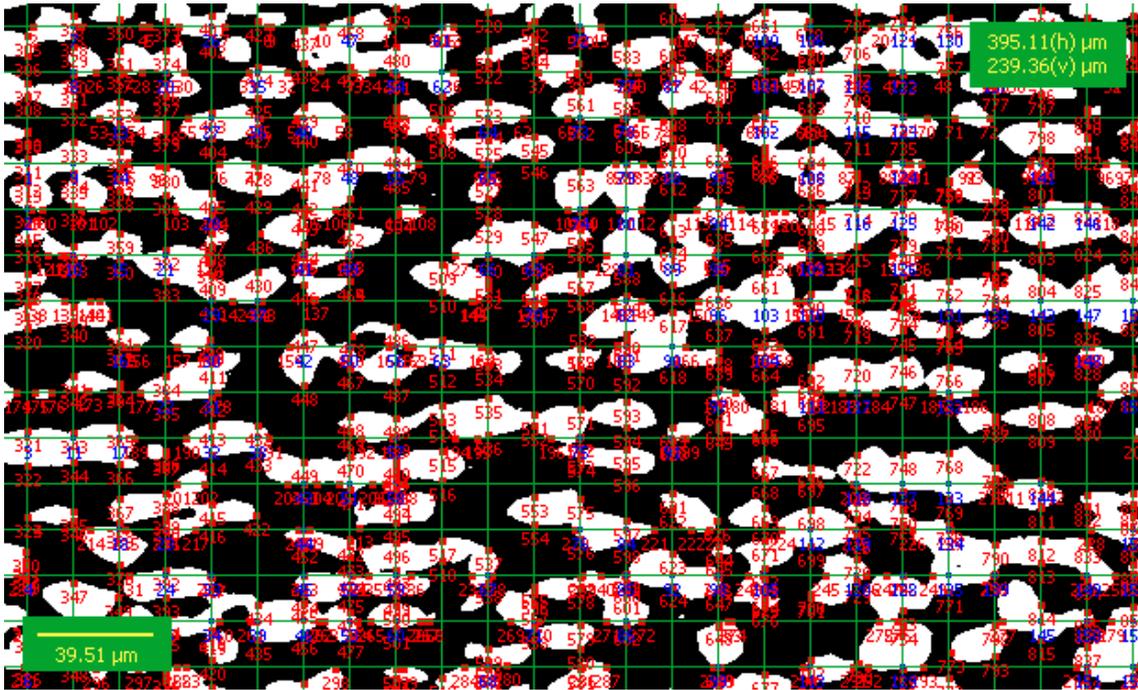


Figura 4.29 – Identificação dos pontos que incidiram na fase de austenita e fronteiras que interceptaram a fase de austenita.

O *software* proposto identificou 861 fronteiras interceptadas na fase de austenita, sendo 299 pelas linhas horizontais e 562 pelas verticais. Seus índices e pesos podem ser observados respectivamente no APÊNDICE O e APÊNDICE P. O Goitacá também identificou 157 pontos que incidiram na fase de austenita. Os índices e pesos destes pontos podem ser visualizados no APÊNDICE M. A área superficial específica da fase de austenita (branca) calculada pela proposição foi de $3,88 \mu\text{m}^{-1}$.

4.3.6 Comprimento de intercepto linear por unidade de volume-teste (L_V)

Materiais como austenita não possuem elementos lineares. Contudo, para fins de simulação desta funcionalidade, seções pequenas da amostra foram consideradas elementos lineares.

O cálculo do L_V foi realizado após a entrada dos parâmetros especificados na seção 3.4. Na Figura 4.30 podem ser visualizados a imagem de amostra com os pontos da fase de austenita identificados na cor vermelha.

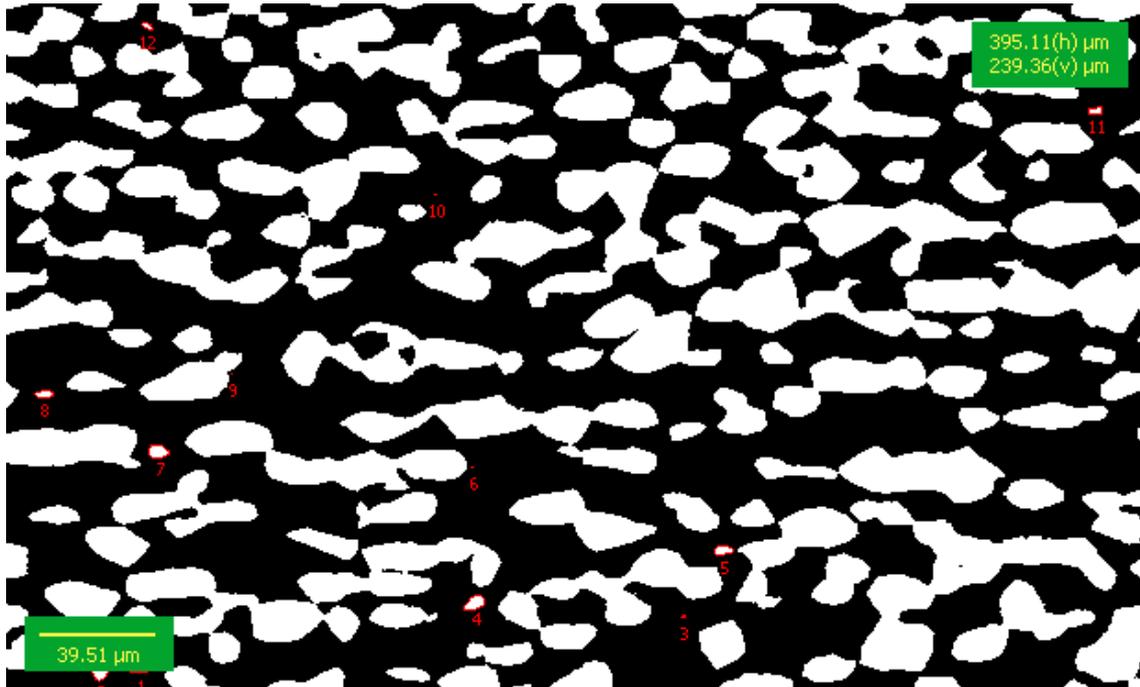


Figura 4.30 – Identificação dos pontos da fase de austenita.

O *software* proposto identificou 12 pontos na fase de austenita. O comprimento de intercepto linear por unidade de volume-teste calculado pelo Goitacá foi de $2,54 \mu\text{m}^{-2}$.

Cabe ressaltar que as amostras reais tendem a ter um grande número de seções, que não favorecem a exportação da imagem, uma vez que a imagem exportada fica poluída visualmente. Contudo, a imagem pode ser melhor visualizada no Goitacá, ocultando a escala, as dimensões, a malha e os números através dos botões do agrupamento mostrar/ocultar elementos contido no painel lateral esquerdo do *software*.

A fração volumétrica da fase de austenita do aço duplex determinado pelos autores com uso de estereologia quantitativa foi em torno de 36%. Este é apenas um valor de referência, visto que os autores fizeram medições de três diferentes orientações da estrutura, usando 20 imagens em cada orientação. Este trabalho usou apenas uma das imagens. Entretanto, os valores encontrados na fração de pontos, fração linear e fração de área foram próximos entre si e daquele apontado pelos autores (DE MÉLO; DOS SANTOS; MAGNABOSCO, 2008).

Devido ao amplo grau de complexidade demonstrado nas medições da amostra real e aos resultados satisfatórios obtidos pelo Goitacá, constatou-se a eficiência e eficácia do *software*, atestando que a proposição está apta para utilização em amostras reais.

5 CONCLUSÃO

Este capítulo apresenta a conclusão geral do trabalho. Detalha as conclusões em respeito aos objetivos, ao trabalho realizado e aos trabalhos futuros. Os resultados satisfatórios do *software* proposto são evidenciados ao final deste capítulo.

5.1 QUANTO AOS OBJETIVOS

Este trabalho se ocupou do desenvolvimento de um *software* de análise de imagens com estereologia quantitativa, que abrangesse recursos encontrados em *softwares* proprietários e livres.

Ao final deste trabalho, pode-se concluir que o objetivo foi alcançado, ao passo que se apresenta um produto completo com as características almeçadas, e a metodologia de validação foi corretamente conduzida, de modo a confirmar a eficácia da ferramenta.

5.2 QUANTO AO TRABALHO REALIZADO

A pesquisa apontou um nicho acadêmico quando constata que não há o ferramental necessário livremente à disposição do pesquisador para suas investigações científicas, e propõe uma solução integrada de modo a atender pesquisadores e centros de pesquisas que não dispõem de recursos para aquisições de *softwares* proprietários necessários para algumas medições automatizadas.

O Goitacá, *software* livre para análise de imagens com estereologia quantitativa, ao contrário dos pacotes proprietários, se beneficia da comunidade de desenvolvedores livres, e por meio de futuros projetos de pesquisa, pode ser complementado com novas funcionalidades ou adaptações

e portabilidade para outros sistemas operacionais, por ter seu código-fonte livre e por isto, é candidato a um ciclo de desenvolvimento mais ágil.

Enfim, a ciência e engenharia dos materiais agora incorpora ao arcabouço de recursos para condução de suas pesquisas um *software* portátil, livre, gratuito e válido para as análises estereológicas de fração de área, fração de ponto, fração linear, área superficial por unidade de volume, área superficial específica e comprimento de interceptos lineares por unidade de volume-teste.

5.3 QUANTO AOS TRABALHOS FUTUROS

Dentre os diversos caminhos possíveis para continuação desta pesquisa, destaca-se a confrontação exaustiva e estatística dos resultados medidos pelo Goitacá e de outros *softwares* que implementem pelo menos um dos métodos acima descritos. Assim, apesar de já validado, poderia ser constatado a eficácia da proposição frente a outros já utilizados por pesquisadores da área.

O *software* hoje está plenamente adequado para utilização do usuário com domínio na língua portuguesa. Contudo, para plena aceitação da comunidade científica e maior abrangência de novos adeptos, faz-se necessário a tradução de seu idioma para a língua inglesa.

Sabe-se que o recurso de vídeo-microscopia é incomum em *softwares* de análise de imagens de distribuições livres. O algoritmo implementado para o carregamento e captura de imagens de câmeras digitais no Goitacá foi testado em cinco modelos de câmeras digitais distintos. Para dar maior envergadura ao *software* proposto, é interessante validar este recurso em uma maior diversidade de modelos de câmeras digitais.

Compreende-se que quanto maior a qualidade da imagem, melhor será a qualidade dos resultados das análises realizadas sobre elas. Desta forma, é interessante estudar uma gama maior de técnicas de pré-processamento e segmentações de imagens para implementar em versões futuras do Goitacá.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALVES, G. M. **Método fundamentado em Processamento Digital de Imagens para Contagem Automática de Unidades Formadoras de Colônias**. Dissertação de Mestrado em Ciência da Computação—São Carlos – SP: Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR, 2006.

AMD. **Informações da empresa**. Disponível em: <<http://www.amd.com/br/aboutamd/corporate-information/Pages/corporate-info.aspx>>. Acesso em: 14 jan. 2014.

AMSCOPE. **Digital Microscopes**. Disponível em: <<http://www.amscope.com>>. Acesso em: 7 jan. 2014.

BANDEIRA, M. V. **Localização de imagens ao microscópio utilizando processamento digital de imagem**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica—Porto Alegre - RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul -UFRGS, 2005.

BARONI, M. P. M. A. et al. Aplicação de programa de análise de imagens na interpretação de fotomicrografias de alta resolução de argilominerais. **Revista Cerâmica**, v. 52, p. 179–184, 2006.

BERENICE, A. D. M.; CARMEM, I. G. G. **Microscopia eletrônica de varredura : aplicações e preparação de amostras : materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. Porto Alegre - RS: EDIPUCRS, 2007.

BITTENCOURT, J. R. **Primitivas Gráficas**. Departamento de Computação - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2006. Disponível em: <http://professor.unisinos.br/ltonietto/jed/pgr/007b_Primitivas.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2014

BLANCHETTE, J. **C++ GUI programming with Qt 4**. Upper Saddle River, NJ: Pearson Hall in association with Trolltech Press, 2006.

BORGES, J. N. **Preparação de Amostras para Análise Microestrutural**. Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal De Santa Catarina, 2014. Disponível em: <http://www.materiais.ufsc.br/lcm/web-carac-l/Preparacao%20de%20Amostras%20para%20Analise%20Microestrutural_1.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2014

BRADSKI, G. R.; KAEHLER, A. **Learning OpenCV: computer vision with the OpenCV library**. Farnham: O'Reilly, 2008.

BROOKSHEAR, J. G. **Computer science: an overview**. 7th. ed. Boston: Addison Wesley, 2003.

CÂMARA-CHÁVEZ, G. **Operações Algébricas e Lógicas**. Departamento de Computação - Universidade Federal de Ouro Preto, 2013. Disponível em:

<<http://www.decom.ufop.br/guillermo/BCC326/slides/Processamento-de-Imagens-Operacoes-Algebraica.pdf>>. Acesso em: 21 maio. 2014

CANON. **Our Business**. Disponível em: <<http://www.canon.com/business/>>. Acesso em: 15 jan. 2014.

CARDILLI, D. J. **Análise quantitativa da imagem ultra-sonográfica de testículos de bovinos jovens da raça Nelore**. Dissertação de Mestrado em Cirurgia Veterinária—Jaboticabal - SP: Universidade Estadual Paulista - UNESP, 2008.

CAVALCANTI, J. **Computação Gráfica**. Departamento de Engenharia de Computação - Universidade Federal do Vale do São Francisco, 2012. Disponível em: <http://www.univasf.edu.br/~jorge.cavalcanti/comput_graf01_int_percep.pdf>. Acesso em: 22 mar. 2014

CAVALCANTI, J. **Computação Gráfica: Primitivas Gráficas**. Departamento de Engenharia de Computação - Universidade Federal do Vale do São Francisco, 2013. Disponível em: <http://www.univasf.edu.br/~jorge.cavalcanti/comput_graf04_prim_graficas2.pdf>. Acesso em: 7 jan. 2014

CHAVES, A. P. DE A.; SILVA, M. A. M.; DE AQUINO, F. J. A. **Desenvolvimento de uma ferramenta educativa para ensino de processamento de imagens com base na biblioteca OpenCV**. 7º CONNEPI. **Anais...** In: CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO. Palmas - TO: 2012

CUSUMANO, M. A.; YOFFIE, D. B. Software development on Internet time. **Computer**, v. 32, n. 10, p. 60–69, out. 1999.

DA SILVA, A. G. P. **Introdução à estereologia**. Laboratório de Materiais Avançados - Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2007. Disponível em: <<http://aulas.e-agps.info/estereologia/estereologia.pdf>>. Acesso em: 6 jan. 2014

DA SILVA, J. D. S. **Transformações Geométricas sobre Imagens**. Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2014. Disponível em: <<http://www.lac.inpe.br/~demisio/univ/pdi/cjslides41.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2014

DAMACENO-RODRIGUES, N. R. **Estudo estereológico do efeito da exposição gestacional à poluição ambiental de São Paulo sobre o desenvolvimento renal em camundongos**. Doutorado em Ciências—São Paulo - SP: Universidade de São Paulo - USP, 2012.

DAMSGAARD, T. E. et al. Mast cells and atopic dermatitis. Stereological quantification of mast cells in atopic dermatitis and normal human skin. **Archives of dermatological research**, v. 289, n. 5, p. 256–260, 1997.

DE MÉLO, E. B.; DOS SANTOS, D. C.; MAGNABOSCO, R. **Estudo Comparativo dos métodos de quantificação de porcentagem volumétrica de ferrita em aço inoxidável dúplex UNS S31803 (SAF 2205)**. 9º Nucleinox. **Anais...** In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DO AÇO INOXIDÁVEL. São Paulo - SP: 2008Disponível

em: <http://www.nucleoinox.org.br/upfiles/arquivos/downloads/inox08/pg_96-100.pdf>. Acesso em: 7 jan. 2014

DE MENEZES, G. G. S. **Reconhecimento de faces usando análise de componentes principais e morfologia matemática**. Monografia de Graduação em Engenharia de Computação—Recife - PE: Escola Politécnica de Pernambuco - POLI, 2009.

DE MOURA, E. M. **Análise gráfica de estruturas porosas sobre a ótica da estereologia**. Tese de Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais—Natal - RN: Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, 2011.

DE OLIVEIRA, A. M. et al. Análise histopatológica e estereológica do coração de camundongos na fase aguda da infecção experimental por trypanosoma cruzi. **Revista Acta Scientiae Medica Online**, v. 1, n. 1, p. 10–18, 2008.

DE SIQUEIRA, R. P. et al. Metalurgia Física. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 60, n. 1, p. 117–122, 2007.

DIAS, F. DA C. **Uso do software imagej para análise quantitativa de imagens de microestruturas de materiais**. Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores—São José dos Campos - SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2008.

DIGIA OYJ. **QT for Desktop Development**. Disponível em: <<http://qt.digia.com/Product/Qt-for-Desktop-Development/>>. Acesso em: 15 jan. 2014.

DIOGO, R. **Introdução às imagens RGB**. Departamento de Física - Universidade de Aveiro, 2011. Disponível em: <http://torre.fis.ua.pt/RemoteDetection/Alpes/RGB_Fogo%20Poeiras/Introdu%C3%A7%C3%A3o%20-%20Imagens%20RGB.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2014

ELSEVIER, B. V. **Scopus**. Disponível em: <<http://www-scopus-com.ez24.periodicos.capes.gov.br/>>. Acesso em: 18 jan. 2014.

ESPERANÇA, C.; CAVALCANTI, P. R. **Introdução à Computação Gráfica: Rasterização**. Laboratório de Computação Gráfica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<http://www.lcg.ufrj.br/Cursos/COS-751/rasterizacao-pdf>>. Acesso em: 21 maio. 2014

ESTEVES, E. M. **Simulação computacional de medidas estereológicas em estruturas de metal duro (WC-Co)**. Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais—Natal - RN: Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, 2011.

FACON, J. **A Morfologia Matemática e suas Aplicações em Processamento de Imagens**. 7ª WVC. **Anais...** In: WORKSHOP DE VISÃO COMPUTACIONAL. Curitiba - PR: Universidade Federal do Paraná - UFPR, 2011. Disponível em: <<http://www.ppgia.pucpr.br/~facon/Books/2011WVCMinicurso2Morfo.pdf>>. Acesso em: 4 jan. 2014

FALCÃO, A. X. **Introdução ao Processamento de Imagem Digital**. Instituto de Computação - Universidade Estadual de Campinas, 2005. Disponível em: <<http://www.ic.unicamp.br/~afalcao/mo443/aula14.pdf>>. Acesso em: 17 maio. 2014

FAZANO, C. A. A aplicação da análise de imagem na quantificação das características microestruturais de materiais. **Revista Analytica**, n. 19, p. 46–60, 2005.

FAZANO, C. A. Determinando-se o tamanho de grãos em ligas de cobre-zinco através da análise de imagem. **Revista Analytica**, n. 27, p. 50–58, 2007.

FERNANDES, S. M. DE C. et al. Desenvolvimento de um software de análise de imagens para caracterização microestrutural de materiais. **Revista Exacta**, v. 10, n. 3, p. 325–332, 2012.

FERREIRA FILHO, A. E. **Implementação da rotina de unfolding para determinação de distribuição de tamanho de grãos esféricos via distribuição de interceptos lineares e de área de seção**. Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais—Natal - RN: Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, 2009.

FILHO, V. S. R.; DE OLIVEIRA, H. J. Q. **Dispositivo eletromecânico para ajuste fino de posição e de foco para imagens em microscópio óptico**. XIV CICUMC. **Anais...** In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE DE MOGI DAS CRUZES. Mogi das Cruzes - SP: 2008 Disponível em: <http://www.umc.br/_img/_diversos/pesquisa/pibic_pvic/XIV_congresso/Arquivos/Valter%20Santiago%20Rosa%20Filho.pdf>. Acesso em: 9 ago. 2014

GOLDENSTEIN, H. **Microscopia Óptica**. Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais - Universidade de São Paulo, 2005. Disponível em: <http://www.angelfire.com/crazy3/qfl2308/1_multipart_xF8FF_6_Microscopia_otica.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2014

GOMES, A. J. P. **Computação Gráfica**. Departamento de Informática - Universidade da Beira Interior, 2011. Disponível em: <<http://www.di.ubi.pt/~agomes/cg/teoricas/02-transformacoes.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2014

GOMES, A. J. P. **Transformações Geométricas**. Departamento of Informática - Universidade da Beira Interior, 2012. Disponível em: <<http://www.di.ubi.pt/~agomes/cg/teoricas/03-transformacoes.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2014

GOMES, J.; VELHO, L. **Fundamentos da Computação Gráfica**. Rio de Janeiro - RJ: IMPA, 2003.

GOMES, O. DA F. M. **Processamento e Análise de Imagens Aplicados à Caracterização Automática de Materiais**. Dissertação de Mestrado em Ciências da Engenharia Metalúrgica—Rio de Janeiro - RJ: Departamento de Ciência de Materiais e Metalurgia - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2001.

GÓMEZ, L. A. **Processamento de Imagens**. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações - Universidade Federal de Santa Catarina, 2010. Disponível em:

<<http://labeee.ufsc.br/~luis/ecv5360/apostilas/Infoproc1.pdf>>. Acesso em: 21 maio. 2014

GONDIM, R. M. F. **Avaliação da cicatrização cutânea: fluorescência e estereologia**. Tese de Doutorado em Ciências—São Paulo - SP: Universidade de São Paulo - USP, 2012.

GONZAGA, A. **Segmentação de Imagens**. Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade de São Paulo, 2013. Disponível em: <http://iris.sel.eesc.usp.br/sel886/Aula_5.pdf>

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital image processing**. 2nd. ed. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2002.

GOOGLE. **Sobre o Google**. Disponível em: <<http://www.google.com.br/intl/pt-BR/about/>>. Acesso em: 14 jan. 2014.

HENRIQUES, J.; CRUZ, P. **Processamento de Imagem**. Departamento de Engenharia Informática - Universidade de Coimbra, 2014. Disponível em: <<https://woc.uc.pt/dei/getFile.do?tipo=2&id=11418>>. Acesso em: 24 maio. 2014

IMAGEJ. **Image Processing and Analysis in Java**. Disponível em: <<http://rsb.info.nih.gov/ij/>>. Acesso em: 15 jan. 2014.

INTEL CORPORATION. **Open Source Computer Vision Library: Reference Manual**. Disponível em: <<http://itee.uq.edu.au/~iris/CVsource/OpenCVreferencemanual.pdf>>. Acesso em: 6 jan. 2014.

KOSCIANSKI, A.; SOARES, M. DOS S. **Qualidade de software aprenda as metodologias e técnicas mais modernas para o desenvolvimento de software**. São Paulo: Novatec, 2007.

LASEROPTICS. **VideoMicroscopia**. Disponível em: <<http://www.laseroptics.com.ar/videomicroscopia.htm>>. Acesso em: 7 jan. 2014.

LEICA MICROSYSTEMS. **Leica LAS Interactive Measurement**. Disponível em: <<http://www.leica-microsystems.com/products/microscope-software/materials-sciences/details/product/leica-las-interactive-measurement/>>. Acesso em: 9 jan. 2014.

LIMA, H. N. **Um sistema de CBIR para triagem virtual de imagens de patologia**. Monografia de Graduação em Engenharia de Computação—Recife - PE: Escola Politécnica de Pernambuco - POLI, 2009.

LINS, D.; ALÉCIO, E. **Microscopia Óptica**. DACI - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, 2014. Disponível em: <http://recife.ifpe.edu.br/recife/microscopio_otico.pdf>. Acesso em: 7 jan. 2014

LUCARINI, A. C.; DA SILVA, L. A.; BIANCHI, R. A. C. Um sistema para a contagem semi-automática de microorganismos. **Pesquisa & Tecnologia FEI**, n. 26, p. 36–40, 2004.

- LUZ, A. B. DA et al. **Tratamento de minérios**. Rio de Janeiro: CETEM, 2004.
- MANDARIM-DE-LACERDA, C. A. Stereological tools in biomedical research. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 75, n. 4, p. 469–486, dez. 2003.
- MANNHEIMER, W. A. et al. **Microscopia dos materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: E-Papers, 2002.
- MANSSOUR, I. H.; COHEN, M. Introdução à Computação Gráfica. **RITA**, v. 13, n. 2, p. 43–68, 2006.
- MARQUES FILHO, O.; VIEIRA NETO, H. **Processamento digital de imagens**. Rio de Janeiro -RJ: BRASPORT, 1999.
- MATIAS, Í. DE O. **O uso do algoritmo genético em segmentação de imagens digitais**. Doutorado em Ciência de Engenharia Civil—Rio de Janeiro - RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 2007.
- MATTA, W. N. **Metodologia para Detecção de Máculas em Micrografias Utilizando Morfologia Matemática**. Mestrado em Ciência da Computação—Belo Horizonte - MG: Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, 1998.
- MAURER, M. R. **Reconstrução tridimensional de imagens de microscopia de luz**. Dissertação de Mestrado em Informática—Curitiba - PR: Universidade Federal do Paraná - UFPR, 2005.
- MELLO, C. A. **Segmentação – Detecção de Bordas**. Centro de Informática - Universidade Federal do Pernambuco, 2013a. Disponível em: <http://www.cin.ufpe.br/~cabm/visao/Aula05_EdgeDetection.pdf>. Acesso em: 16 maio. 2014
- MELLO, C. A. **Limiarização**. Centro de Informática - Universidade Federal do Pernambuco, 2013b. Disponível em: <http://www.cin.ufpe.br/~cabm/visao/Aula04_Limiarizacao.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2014
- MENDES, S. C. C. M. **Eléctrodos de filme fino de mercúrio para análise de metais vestigiais – estudos de otimização, caracterização e modificação química com poli(4-estirenosulfonado de sódio)**. Tese de Doutorado em Química—Aveiro - PT: Universidade de Aveiro - UA, 2005.
- MENESES, P. R.; DE ALMEIDA, T. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 2012. Disponível em: <<http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>>. Acesso em: 28 abr. 2014
- MICROSOFT. **LifeCam Cinema**. Disponível em: <<http://www.microsoft.com/hardware/pt-br/p/lifecam-cinema>>. Acesso em: 15 jan. 2014.

MOREIRA, C. N. **Microscópio ótico**. Disponível em: <http://wikiciencias.casadasciencias.org/wiki/index.php/Microsc%C3%B3pio_%C3%93ptico>.

MURPHY, T. F. Quantifying the degree of sinter in ferrous P/M materials. **Euro PM**, p. 219, 2004.

MUSSEL, R. L. DE O. **Estereologia, imuno-histoquímica e microscopia eletrônica de varredura na análise da reação tecidual a implantes de discos de adesivo dentinário fotoativado, hidróxido de cálcio e cimento de ionômero de vidro: estudo experimental em ratos**. Tese de Doutorado em Odontologia—Rio de Janeiro - RJ: Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ, 2002.

NIKON INSTRUMENTS. **Sistemas de Microscópio**. Disponível em: <http://www.nikoninstruments.com/pr_BR/Produtos/Sistemas-de-Microscopio/>. Acesso em: 7 jan. 2014.

NOGUEIRA, I. L. **Desenvolvimento de software para identificação e caracterização de pites de corrosão em cupons**. Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais—Campos dos Goytacazes – RJ: Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, 2013.

OGATA, P. H. et al. **Caracterização microestrutural ao longo da espessura de chapa grossa de aço microligado para tubos api 5l-x651**. 64^o ABM. **Anais...** In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA, MATERIAIS E MINERAÇÃO. Belo Horizonte - MG: 2009 Disponível em: <http://www.gorni.eng.br/Ogata_CongABM_2009.pdf>. Acesso em: 5 jan. 2014

OPENCV. **Open Source Computer Vision**. Disponível em: <<http://opencv.org/>>. Acesso em: 15 jan. 2014.

OST, F. N. **Visão Computacional e Arte Digital**. Instituto de Matemática e Estatística - Universidade de São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://vision.ime.usp.br/~fost/monografia-flavia.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2014

OZELA, F. F. **Desenvolvimento de um sistema de análise de imagens aplicado à prática forense**. Monografia de Bacharelado em Engenharia da Computação—Belém - PA: Universidade Federal do Pará - UFPA, 2013.

PACIORNIK, S. et al. Caracterização de pelotas de minério de ferro por microscopia digital e análise de imagens. **Revista Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 5, n. 4, p. 215–218, 2009.

PACIORNIK, S. **Microscopia Quantitativa**. Departamento de Engenharia dos Materiais - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <<http://www.dcm.puc-rio.br/cursos/micquant/micquant.pdf>>. Acesso em: 18 fev. 2014

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia: microestruturas e propriedades**. São Paulo - SP: Hemus, 2007.

PADILHA, A. F.; FILHO, F. A. **Técnicas de Análise Microestrutural**. São Paulo - SP: Hemus, 2004.

PEDRINI, H. **Segmentação**. Instituto de Computação - Universidade Estadual de Campinas, 2013a. Disponível em: <http://www.ic.unicamp.br/~helio/disciplinas/MC940/aula_segmentacao.pdf>. Acesso em: 5 maio. 2014

PEDRINI, H. **Morfologia Matemática**. Instituto de Computação - Universidade Estadual de Campinas, 2013b. Disponível em: <http://www.ic.unicamp.br/~helio/disciplinas/MC940/aula_segmentacao.pdf>. Acesso em: 5 maio. 2014

PELEGRINI, M. Os vazios de sentidos na cultura midiática. **Revista F@ro**, n. 15, 2012.

PINHEIRO, C. J. G. **Desenvolvimento de um Algoritmo para Quantificação de Microestruturas em Tomografias 3d de Objetos Complexos Obtidas com Radiação Síncrotron**. Tese de Doutorado em Engenharia Nuclear—Rio de Janeiro - RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 2008.

PROQUEST LLC. **ProQuest: Engineered Materials Abstracts**. Disponível em: <<http://search.proquest.ez24.periodicos.capes.gov.br/engineeringmaterialsabstracts/>>. Acesso em: 18 jan. 2014.

QUEIROZ, J. E. R. DE; GOMES, H. M. Introdução ao Processamento Digital de Imagens. **Revista de Informática Teórica e Aplicada**, v. 13, n. 2, p. 11–42, 2006.

REN, T. I. **Processamento de Imagem Morfológica: Morfologia Matemática**. Centro de Informática - Universidade Federal de Pernambuco, 2010. Disponível em: <<http://www.cin.ufpe.br/~tir/ComputacaoCientifica/7.Morfologia%20Matematica.pdf>>. Acesso em: 17 maio. 2014

RUSS, J. C.; DEHOFF, R. T. **Practical stereology**. 2nd. ed. New York: Kluwer Academic/Plenum, 2000.

SAMSUNG. **Sobre a Samsung**. Disponível em: <<http://www.samsung.com/br/aboutsamsung/index.html>>. Acesso em: 14 jan. 2014.

SANTOS, M. B. A. DE S. **Primitivas Gráficas**. Departamento de Eletrônica, Telecomunicações e Informática - Universidade de Aveiro, 2009. Disponível em: <www.ieeta.pt/~bss/aulas/primitivas-12-09.pdf>. Acesso em: 26 out. 2011

SANTOS, M. B. A. DE S. **Introdução a Computação Gráfica**. Departamento de Eletrônica, Telecomunicações e Informática - Universidade de Aveiro, 2013. Disponível em: <http://sweet.ua.pt/jmadeira/CV/CV_01_Introdu%C3%A7%C3%A3o_%C3%A0_CG_BSS.pdf>. Acesso em: 8 abr. 2014

SANTOS, M. B. A. DE S.; MADEIRA, J. **Processamento de Imagem**. Departamento de Eletrônica, Telecomunicações e Informática - Universidade de Aveiro, 2013. Disponível em:

<http://sweet.ua.pt/jmadeira/CV/CV_12_PI_Arestas_Segmenta%C3%A7%C3%A3o_Morfologia_BSS_JM.pdf>. Acesso em: 8 abr. 2014

SBEHGHEN, R. C. **Processamento Digital de Imagem**. Monografia de Graduação em Ciência da Computação—Jaguariúna - SP: Faculdade de Jaguariúna, 2007.

SCALCO, R. **Introdução à Computação Gráfica**. São Caetano do Sul - SP: Instituto Mauá de Tecnologia, 2003.

SCHNEIDER, B. DE O. **Apostila de Computação Gráfica**. Departamento de Ciência da Computação - Universidade Federal de Lavras, 2001. Disponível em: <<http://algot.dcc.ufla.br/~bruno/aulas/cg/apostila/apostila-cg.pdf>>. Acesso em: 19 maio. 2014

SILVA, F. DE A. T. F. **Rede morfológica não-supervisionada-RMNS**. Doutorado em Computação Aplicada—São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 1998.

SOBRAL, J. L. **Segmentação de Imagem**. Departamento de Informática - Universidade do Minho, 2005. Disponível em: <<http://gec.di.uminho.pt/lesi/vpc0405/Aula07Segmenta%C3%A7%C3%A3o.pdf>>. Acesso em: 5 maio. 2014

THOMÉ, A. G. **Processamento de Imagens: Tratamento de Imagens - Filtros**. Núcleo de Computação Eletrônica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <http://equipe.nce.ufrj.br/thome/p_grad/nn_img/transp/c4_filtros.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2014

TRAINA, A. J. M.; DE OLIVEIRA, M. C. F. **Apostila de Computação Gráfica**. Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação - Universidade de São Paulo, 2006. Disponível em: <<http://www.inf.ufes.br/~thomas/graphics/www/apostilas/GBdl2006.pdf>>. Acesso em: 7 jan. 2014

UNDERWOOD, E. E. **Quantitative stereology**. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1970.

VASCONCELOS, A. L. DE O. Aplicações híbridas: Desktop/Web. **Revista QT**, p. 1–2, 2010.

VASCONCELOS, C. N. **Tópicos em Processamento de Imagens e Visão Computacional**. Instituto de Computação - Universidade Federal Fluminense, 2011. Disponível em: <http://www2.ic.uff.br/~crisnv/disciplinas/TCC4052_Proclmgs-aula_2.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2014

VIANNA, A. C. **Computação Gráfica**. TECGRAF - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <http://www.tecgraf.puc-rio.br/ftp_pub/lfm/CIV2801AcvCompGraf.pdf>. Acesso em: 7 jan. 2014

WANGENHEIM, A. VON. **Morfologia matemática - Imagens binárias**. Departamento de Informática e Estatística - Universidade Federal de Santa Catarina,

2002. Disponível em: <www.inf.ufsc.br/~awangenh/RP/CAP5/Morfo.ppt.gz>. Acesso em: 16 maio. 2014

WANGENHEIM, A. VON. **Encontrando a Linha Divisória: Detecção de Borda**. Departamento de Informática e Estatística - Universidade Federal de Santa Catarina, 2013a. Disponível em: <<http://www.inf.ufsc.br/~visao/bordas.pdf>>. Acesso em: 16 maio. 2014

WANGENHEIM, A. VON. **Morfologia Matemática**. Departamento de Informática e Estatística - Universidade Federal de Santa Catarina, 2013b. Disponível em: <<http://www.inf.ufsc.br/~visao/morfologia.pdf>>. Acesso em: 16 maio. 2014

APÊNDICE A - ALGORITMO DE CONTAGEM DE TANGÊNCIA DE FRONTEIRAS INTERCEPTADAS USADO NAS MEDIÇÕES DE ÁREA SUPERFICIAL POR UNIDADE DE VOLUME-TESTE E ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA

Início algoritmo

Declara SV(i) //Vetor que reproduzirá a linha S

Declara IV(i) //Vetor que reproduzirá a linha I

Declara ContaT //Variável inteira que contará o número de tangências

Declara ContaP //Variável inteira que contará as penetrações

Leia (S(i)) //Lê os valores dos pixels da linha de cima

Leia (R(i)) //Lê os valores dos pixels da reta

Leia (I(i)) //Lê os valores dos pixels da linha inferior

ContaT ← 0 //Inicia o contador de tangências

ContaP ← 0 //Inicia o contador de penetrações

//Este trecho marca os pixels das linhas S e R da esquerda para a direita com continuidade de partículas ou com continuidade no início e fim da linha

Se S(1)=0 então //Esta condicional classifica o primeiro pixel da linha S.
Se for poro, recebe zero

SV(1) ← 0

Senão //Se for partícula, recebe dois (porque no pixel inicial da linha não se conta a tangência)

SV(1) ← 2

Fimse

Se I(1)=0 então //Esta condicional classifica o primeiro pixel da linha I
Se for poro, recebe zero

IV(1) ← 0

Senão //Se for partícula, recebe dois (porque no pixel inicial da linha não se conta a tangência)

IV(1) ← 2

Fimse

Para i de 2 a Coluna passo 1 faça //Este loop vai colocar valores nos elementos dos vetores SV(i) e IV(i)

SV(i) ← 0

IV(i) ← 0

Se $SV(i-1)=2$ e $S(i)=1$ então //Coloca o valor 2 se o anterior for 2 para marcar a continuidade

$SV(i) \leftarrow 2$

Senão

Se $R(i)=1$ e $S(i)=1$ então

$SV(i) \leftarrow 2$ //Coloca 2 para marcar que este pixel é ligado com uma partícula na reta

Senão

Se $R(i)=0$ e $S(i)=1$ então

$SV(i) \leftarrow 1$ //Coloca 1 para marcar que este pixel não é ligado com uma partícula na reta

Fimse

Fimse

Fimse //Se nenhuma destas condições ocorrerem, o pixel continuará zero para indicar poro

//Repete o procedimento acima para a linha l

Se $IV(i-1)=2$ e $l(i)=1$ então //Coloca o valor 2 se o anterior for 2 para marcar a continuidade

$IV(i) \leftarrow 2$

Senão

Se $R(i)=1$ e $l(i)=1$ então

$IV(i) \leftarrow 2$ //Coloca 2 para marcar que este pixel é ligado com uma partícula na reta

Senão

Se $R(i)=0$ e $l(i)=1$ então

$IV(i) \leftarrow 1$ //Coloca 1 para marcar que este pixel não é ligado com uma partícula na reta

Fimse

Fimse

Fimse //Se nenhuma destas condições ocorrerem, o pixel continuará zero para indicar poro

Fimpara

//Este trecho varre da esquerda para a direita mudando os valores necessários

Se $SV(\text{Coluna})=1$ então

$SV(\text{Coluna}) \leftarrow 2$ //Reconhece a existência um bloco parcial final na linha S

Fimse

```

Se IV(Coluna)=1 então
    IV(Coluna) ←-2 //Reconhece a existência um bloco parcial final
na linha I
Fimse
Para i de 12 a 1 passo -1 faça //Este loop é para dar valor a pixels
contínuos não tangenciais
    Se SV(i)=1 e SV(i-1)=2 então //Condicional que faz na linha S
        Sv(I) ←-2
    Fimse
    Se IV(i)=1 e IV(i-1)=2 então //Condicional que faz na linha I
        Iv(I) ←-2
    Fimse
Fimpara
Para i de 2 a Coluna passo 1 faça //Este trecho é para contar as
penetrações na linha R e imprimir o número
    Se R(i)≠R(I-1) então
        ContaP←ContaP+1
        Escreva (ContaP sobre o pixel R(1))
    Fimse
Fimpara
Para i de 2 a Coluna passo 1 faça //Este trecho é para contar as
tangências nas linhas S e I e imprimir o número
    Se SV(i)=1 e SV(i-1)≠1 então
        ContaT←ContaT+1
        Escreva (ContaT sobre o pixel SV(i)) //Conta tangências
(números de blocos de valor 1) na linha S
    Fimse
    Se IV(i)=1 e IV(i-1)≠1 então
        ContaT←ContaT+1
        Escreva(ContaT sobre o pixel IV(i)) //Conta tangências
(números de blocos de valor 1) na linha I
    Fimse
Fimpara
Fim algoritmo

```

APÊNDICE B - ÁREA DE SEÇÕES OBTIDAS PELO SOFTWARE GOITACÁ

Índices	Pesos	Áreas (cm ²)	Índices	Pesos	Áreas (cm ²)
1	1	1,24	30	1	0,03
2	1	1,24	31	1	0,68
3	1	0,68	32	1	1,54
4	1	1,54	33	1	0,68
5	1	1,54	34	1	1,54
6	1	2,39	35	1	2,39
7	1	0,03	36	1	0,03
8	1	0,03	37	1	1,24
9	1	2,39	38	1	0,68
10	1	0,68	39	1	1,24
11	1	2,39	40	1	0,68
12	1	0,03	41	1	0,68
13	1	1,24	42	1	1,54
14	1	1,54	43	1	2,39
15	1	0,68	44	1	0,03
16	1	1,24	45	1	1,24
17	1	1,24	46	1	1,54
18	1	0,68	47	1	2,39
19	1	0,68	48	1	0,68
20	1	1,24			
21	1	0,68			
22	1	2,39			
23	1	2,39			
24	1	2,39			
25	1	1,24			
26	1	0,68			
27	1	0,03			
28	1	1,24			
29	1	0,68			
(cont.)					

APÊNDICE C - ÁREAS DE SEÇÕES OBTIDAS PELO MÉTODO MANUAL

Índices	Pesos	Áreas (cm ²)	Índices	Pesos	Áreas (cm ²)
1	1	0,78	30	1	0,78
2	1	1,76	31	1	0,12
3	1	1,13	32	1	1,13
4	1	2,54	33	1	0,78
5	1	0,78	34	1	1,13
6	1	2,54	35	1	1,13
7	1	0,78	36	1	0,78
8	1	1,13	37	1	1,76
9	1	0,12	38	1	2,54
10	1	0,78	39	1	0,78
11	1	1,76	40	1	2,54
12	1	1,13	41	1	0,12
13	1	0,12	42	1	1,76
14	1	2,54	43	1	1,13
15	1	1,76	44	1	0,12
16	1	0,78	45	1	1,76
17	1	0,78	46	1	1,13
18	1	1,76	47	1	0,78
19	1	1,13	48	1	2,54
20	1	1,13			
21	1	0,78			
22	1	2,54			
23	1	0,12			
24	1	0,78			
25	1	2,54			
26	1	2,54			
27	1	0,12			
28	1	0,78			
29	1	1,13			

(cont.)

**APÊNDICE D - PONTOS QUE INCIDEM NA FASE DE INTERESSE
OBTIDOS PELO SOFTWARE GOITACÁ**

Índices	Pesos	Índices	Pesos
1	1	30	1
2	1	31	1
3	1	32	1
4	1	33	1
5	1	34	1
6	1	35	1
7	1	36	1
8	0,5	37	1
9	1	38	0,5
10	1	39	1
11	0,5		
12	1		
13	0,5		
14	1		
15	0,5		
16	1		
17	1		
18	0,5		
19	1		
20	1		
21	0,5		
22	1		
23	0,5		
24	1		
25	1		
26	1		
27	1		
28	1		
29	1		
(cont.)			

**APÊNDICE E - PONTOS QUE INCIDEM NA FASE DE INTERESSE
OBTIDOS PELO MÉTODO MANUAL**

<u>Índice</u>	<u>Pesos</u>	<u>Índice</u>	<u>Pesos</u>
1	1	30	1
2	1	31	0,5
3	1	32	0,5
4	0,5	33	1
5	1	34	1
6	1	35	1
7	0,5	36	1
8	1	37	1
9	0,5	38	0,5
10	1	39	0,5
11	1	40	0,5
12	1	41	1
13	0,5	42	0,5
14	1		
15	1		
16	1		
17	0,5		
18	1		
19	1		
20	1		
21	1		
22	0,5		
23	1		
24	0,5		
25	1		
26	1		
27	1		
28	1		
29	1		
(cont.)			

**APÊNDICE F - INTERCEPTOS LINEARES OBTIDOS PELO
SOFTWARE GOITACÁ**

Índices	Pesos	Interceptos (cm)	Índices	Pesos	Interceptos (cm)
1	1	1,03	30	1	0,82
2	1	1,03	31	1	0,85
3	1	1,08	32	1	1,85
4	1	1,08	33	1	1,85
5	1	1,14	34	1	1,85
6	1	1,14	35	1	0,9
7	1	1,14	36	1	0,95
8	1	1,16	37	1	0,95
9	1	1,19	38	1	0,95
10	1	0,26	39	1	0,95
11	1	0,26	40	1	0,95
12	1	0,26	41	1	0,95
13	1	0,26			
14	1	1,24			
15	1	1,24			
16	1	0,37			
17	1	1,38			
18	1	1,48			
19	1	1,51			
20	1	1,51			
21	1	1,51			
22	1	1,51			
23	1	1,53			
24	1	0,58			
25	1	0,64			
26	1	0,64			
27	1	0,69			
28	1	0,74			
29	1	0,77			
(cont.)					

APÊNDICE G - INTERCEPTOS LINEARES OBTIDOS PELO MÉTODO MANUAL

Índices	Pesos	Interceptos (cm)	Índices	Pesos	Interceptos (cm)
1	1	1,00	30	1	0,90
2	1	1,20	31	1	1,00
3	1	0,30	32	1	1,00
4	1	1,60	33	1	0,70
5	1	0,50	34	1	0,50
6	1	0,70	35	1	0,80
7	1	1,90	36	1	1,90
8	1	1,00	37	1	1,20
9	1	0,50	38	1	1,50
10	1	1,00	39	1	0,70
11	1	0,40	40	1	1,60
12	1	1,20	41	1	1,20
13	1	1,50	42	1	0,20
14	1	1,00	43	1	1,10
15	1	1,00			
16	1	0,70			
17	1	1,50			
18	1	1,20			
19	1	1,20			
20	1	0,60			
21	1	1,60			
22	1	0,90			
23	1	0,90			
24	1	1,90			
25	1	1,00			
26	1	0,30			
27	1	1,20			
28	1	1,40			
29	1	1,20			
(cont.)					

**APÊNDICE H - FRONTEIRAS INTERCEPTADAS PELAS LINHAS
HORIZONTAIS OBTIDAS PELO SOFTWARE GOITACÁ**

Índices	Pesos	Índices	Pesos	Índices	Pesos
1	1	31	1	61	1
2	1	32	1	62	1
3	1	33	1	63	1
4	1	34	1	64	1
5	1	35	1	65	1
6	1	36	1	66	1
7	0,5	37	1	67	1
8	1	38	1	68	1
9	1	39	1	69	1
10	1	40	1	70	1
11	1	41	1	71	1
12	1	42	1	72	1
13	1	43	1	73	1
14	1	44	1	74	1
15	1	45	1	75	1
16	1	46	0,5	76	1
17	1	47	1	77	1
18	1	48	1	78	1
19	1	49	1	79	0,5
20	1	50	1	80	1
21	1	51	1	81	1
22	1	52	1	82	1
23	1	53	1	83	1
24	1	54	1	84	1
25	1	55	1	85	1
26	1	56	1		
27	1	57	1		
28	1	58	1		
29	1	59	1		
30	1	60	1		
(cont.)		(cont.)			

**APÊNDICE I - FRONTEIRAS INTERCEPTADAS PELAS LINHAS
VERTICAIS OBTIDAS PELO SOFTWARE GOITACÁ**

Índices	Pesos	Índices	Pesos	Índices	Pesos
1	1	31	1	61	1
2	1	32	1	62	1
3	1	33	1	63	1
4	1	34	1	64	1
5	1	35	1	65	1
6	1	36	1	66	1
7	1	37	1	67	1
8	1	38	1	68	1
9	1	39	1	69	1
10	1	40	1	70	1
11	1	41	1	71	1
12	1	42	1	72	1
13	0,5	43	1	73	1
14	1	44	1	74	1
15	1	45	1	75	1
16	1	46	1	76	1
17	1	47	1	77	1
18	1	48	1	78	1
19	1	49	1	79	1
20	1	50	1	80	1
21	1	51	1	81	1
22	1	52	1	82	1
23	1	53	1	83	1
24	1	54	1	84	1
25	1	55	1	85	1
26	1	56	1	86	1
27	1	57	1		
28	1	58	0,5		
29	1	59	1		
30	1	60	1		
(cont.)		(cont.)			

**APÊNDICE J - FRONTEIRAS INTERCEPTADAS PELAS LINHAS
HORIZONTAIS OBTIDAS PELO MÉTODO MANUAL**

Índices	Pesos	Índices	Pesos	Índices	Pesos
1	1	31	1	61	1
2	1	32	1	62	1
3	1	33	1	63	1
4	1	34	1	64	1
5	1	35	1	65	0,5
6	1	36	1	66	1
7	1	37	1	67	1
8	1	38	1	68	1
9	1	39	1	69	1
10	1	40	1	70	1
11	1	41	1	71	1
12	0,5	42	1	72	1
13	1	43	1	73	1
14	1	44	1	74	1
15	1	45	1	75	1
16	1	46	1	76	1
17	1	47	1	77	1
18	1	48	1	78	1
19	1	49	1	79	1
20	1	50	0,5	80	1
21	1	51	1	81	1
22	1	52	1	82	1
23	1	53	1	83	1
24	1	54	1	84	1
25	1	55	1	85	1
26	1	56	1		
27	1	57	1		
28	1	58	1		
29	1	59	1		
30	1	60	1		
(cont.)		(cont.)			

**APÊNDICE K - FRONTEIRAS INTERCEPTADAS PELAS LINHAS
VERTICAIS OBTIDAS PELO MÉTODO MANUAL**

Índices	Pesos	Índices	Pesos	Índices	Pesos
1	1	31	1	61	1
2	1	32	1	62	1
3	1	33	1	63	0,5
4	1	34	1	64	1
5	1	35	1	65	1
6	1	36	1	66	1
7	1	37	1	67	1
8	1	38	1	68	1
9	1	39	1	69	1
10	1	40	1	70	1
11	1	41	1	71	1
12	1	42	1	72	1
13	1	43	1	73	1
14	1	44	1	74	1
15	1	45	1	75	1
16	1	46	1	76	1
17	1	47	1	77	1
18	0,5	48	1	78	1
19	1	49	1	79	1
20	1	50	1	80	1
21	1	51	1	81	1
22	1	52	1	82	1
23	1	53	1	83	1
24	1	54	1	84	1
25	1	55	1	85	1
26	1	56	1	86	1
28	1	58	1		
29	1	59	1		
30	1	60	1		
(cont.)		(cont.)			

APÊNDICE L - ÁREA DE SEÇÕES DA AMOSTRA DO ESTUDO DE CASO

Índices	Pesos	Áreas (μm^2)	Índices	Pesos	Áreas (μm^2)
1	0,5	0	32	1	123,04
2	0,5	0	33	1	194,55
3	0,5	0	34	1	514,78
4	0,5	5,3	35	1	69,47
5	0,5	14,46	36	1	1534,16
6	0,5	52,97	37	1	90,45
7	0,5	98,19	38	1	148,3
8	1	44,41	39	1	199,43
9	0,5	92,69	40	0,5	245,68
10	1	5,7	41	1	462,22
11	1	16,5	42	1	151,36
12	0,5	86,37	43	1	452,44
13	0,5	130,78	44	1	0
14	0,5	132,21	45	1	809,55
15	1	119,99	46	1	24,85
16	1	113,06	47	0,5	12,43
17	1	177,23	48	0,5	523,74
18	1	0,61	49	1	48,69
19	1	86,37	50	1	896,94
20	0,5	423,31	51	1	79,04
21	1	121,82	52	1	205,75
22	0,5	46,85	53	1	1046,47
23	1	25,26	54	1	12,63
24	1	498,89	55	1	176,41
25	0,5	560	56	0,5	16,7
26	0,5	24,65	57	1	0
27	1	205,75	58	0,5	104,3
28	1	893,48	59	1	84,34
29	1	16,09	60	1	686,51
30	0,5	71,1	61	1	78,84
31	1	1645,59	62	1	320,44
(cont.)			(cont.)		

Índices	Pesos	Áreas (μm^2)	Índices	Pesos	Áreas (μm^2)
63	1	92,69	98	1	158,69
64	1	47,87	99	1	76,8
65	1	57,85	100	1	148,51
66	0,5	6,32	101	1	553,28
67	1	62,54	102	1	257,7
68	1	83,73	103	0,5	167,66
69	1	799,37	104	1	231,01
70	1	54,19	105	1	166,64
71	1	667,16	106	1	241,6
72	0,5	296,4	107	1	122,23
73	0,5	66,61	108	1	85,56
74	0,5	1976,21	109	1	85,36
75	1	259,12	110	1	264,62
76	1	659,21	111	1	192,3
77	1	774,72	112	1	79,45
78	1	35,45	113	1	71,71
79	0,5	486,26	114	1	65,6
80	1	774,92	115	1	5,7
81	1	0	116	1	1295,61
82	1	65,8	117	1	335,92
83	1	322,88	118	1	256,68
84	1	39,93	119	1	810,37
85	1	82,91	120	0,5	220,01
86	0,5	105,52	121	0,5	114,08
87	1	148,71	122	0,5	54,39
88	1	850,29	123	0,5	96,76
89	1	1643,14	124	0,5	91,26
90	0,5	561,84	125	0,5	30,56
91	0,5	27,7	126	0,5	36,87
92	1	266,05	127	0,5	8,96
93	1	122,43	128	0,5	3,67
94	0,5	25,26	129	0,5	239,57
95	1	9,57	130	0,5	71,5
96	1	574,67	131	0,5	4,48
97	1	229,99			

(cont.)

APÊNDICE M - PONTOS QUE INCIDEM NA FASE DE INTERESSE DA AMOSTRA DO ESTUDO DE CASO

Índices	Pesos	Índices	Pesos	Índices	Pesos	Índices	Pesos
1	1	30	0,5	59	1	88	1
2	0,5	31	1	60	1	89	1
3	1	32	1	61	0,5	90	1
4	0,5	33	0,5	62	1	91	1
5	0,5	34	1	63	1	92	1
6	0,5	35	1	64	1	93	1
7	1	36	0,5	65	1	94	1
8	0,5	37	1	66	1	95	0,5
9	1	38	1	67	1	96	1
10	1	39	1	68	0,5	97	1
11	1	40	1	69	1	98	0,5
12	1	41	0,5	70	1	99	1
13	1	42	1	71	1	100	1
14	1	43	1	72	1	101	0,5
15	1	44	0,5	73	1	102	1
16	0,5	45	0,5	74	1	103	1
17	1	46	1	75	0,5	104	1
18	1	47	1	76	1	105	0,5
19	0,5	48	1	77	0,5	106	0,5
20	0,5	49	0,5	78	0,5	107	1
21	1	50	0,5	79	0,5	108	1
22	1	51	1	80	1	109	0,5
23	0,5	52	1	81	1	110	1
24	1	53	1	82	1	111	1
25	0,5	54	1	83	1	112	1
26	1	55	1	84	1	113	1
27	1	56	1	85	0,5	114	0,5
28	1	57	0,5	86	1	115	1
29	0,5	58	1	87	1	116	1
(cont.)		(cont.)		(cont.)		(cont.)	

Índices	Pesos	Índices	Pesos
117	1	146	1
118	1	147	1
119	0,5	148	0,5
120	1	149	1
121	1	150	1
122	1	151	1
123	1	152	1
124	1	153	1
125	1	154	1
126	1	155	0,5
127	1	156	1
128	0,5	157	1
129	1	146	1
130	1	147	1
131	1	148	0,5
132	1	149	1
133	1	150	1
134	1	151	1
135	1		
136	0,5		
137	0,5		
138	1		
139	0,5		
140	1		
141	1		
142	1		
143	1		
144	1		
145	1		
(cont.)			

APÊNDICE N - INTERCEPTOS LINEARES DA AMOSTRA DO ESTUDO DE CASO

Índices	Pesos	Interceptos (μm)	Índices	Pesos	Interceptos (μm)
1	0,5	42,77	32	1	5,74
2	1	0,64	33	1	5,74
3	1	0,64	34	1	5,74
4	1	43,4	35	1	48,51
5	1	1,28	36	1	6,38
6	0,5	1,28	37	1	6,38
7	1	1,91	38	0,5	6,38
8	0,5	1,91	39	1	6,38
9	1	1,91	40	1	49,15
10	1	1,91	41	1	7,02
11	1	2,55	42	1	7,02
12	1	2,55	43	1	7,02
13	0,5	45,32	44	1	7,02
14	1	3,19	45	1	7,02
15	1	3,19	46	1	7,02
16	1	3,19	47	1	7,02
17	0,5	3,19	48	1	7,02
18	0,5	3,19	49	1	7,02
19	1	3,19	50	1	7,02
20	1	3,83	51	1	7,02
21	1	3,83	52	0,5	7,02
22	1	3,83	53	1	7,66
23	1	4,47	54	1	7,66
24	1	4,47	55	0,5	7,66
25	1	4,47	56	1	8,3
26	1	4,47	57	1	8,3
27	0,5	4,47	58	1	8,3
28	1	4,47	59	1	8,3
29	1	5,11	60	1	8,3
30	1	5,11	61	1	8,3
31	1	5,74	62	1	8,94
(cont.)			(cont.)		

Índices	Pesos	Interceptos (μm)	Índices	Pesos	Interceptos (μm)
63	1	8,94	97	1	14,04
64	1	9,57	98	1	14,04
65	1	9,57	99	1	14,68
66	1	9,57	100	1	14,68
67	1	10,21	101	1	15,32
68	1	10,21	102	1	15,32
69	1	10,21	103	1	15,32
70	1	10,21	104	1	15,96
71	1	10,21	105	1	15,96
72	1	10,21	106	1	16,6
73	1	10,21	107	1	16,6
74	1	10,85	108	1	16,6
75	1	10,85	109	1	16,6
76	1	10,85	110	1	17,23
77	1	10,85	111	1	17,23
78	1	11,49	112	1	17,87
79	1	11,49	113	1	17,87
80	1	11,49	114	1	17,87
81	1	11,49	115	1	17,87
82	1	12,13	116	1	18,51
83	1	12,13	117	1	19,79
84	1	12,13	118	1	19,79
85	1	12,13	119	1	19,79
86	1	12,13	120	1	21,7
87	0,5	12,13	121	1	21,7
88	1	12,77	122	1	21,7
89	1	12,77	123	1	21,7
90	1	12,77	124	1	21,7
91	1	12,77	125	1	23,62
92	1	12,77	126	1	23,62
93	1	13,4	127	1	24,26
94	1	13,4	128	1	24,26
95	1	14,04	129	1	24,26
96	1	14,04	130	1	24,26
(cont.)			(cont.)		

Índices	Pesos	Interceptos (μm)
131	1	25,53
132	1	26,17
133	1	26,81
134	1	27,45
135	1	28,09
136	1	28,09
137	1	28,09
138	1	28,72
139	1	29,36
140	1	30
141	1	31,28
142	1	32,55
143	1	33,83
144	1	34,47
145	1	38,3
146	1	40,21
147	1	40,21
148	0,5	82,98

**APÊNDICE O - FRONTEIRAS INTERCEPTADAS PELAS LINHAS
HORIZONTAIS DA AMOSTRA DO ESTUDO DE CASO**

Índices	Pesos	Índices	Pesos	Índices	Pesos
1	0,5	31	1	61	1
2	1	32	1	62	1
3	1	33	1	63	1
4	1	34	1	64	1
5	1	35	1	65	1
6	1	36	1	66	1
7	1	37	1	67	1
8	1	38	1	68	1
9	1	39	1	69	1
10	1	40	1	70	1
11	1	41	1	71	1
12	1	42	1	72	1
13	1	43	1	73	1
14	1	44	1	74	0,5
15	1	45	1	75	1
16	1	46	1	76	1
17	1	47	1	77	1
18	1	48	1	78	1
19	1	49	1	79	1
20	1	50	1	80	1
21	1	51	1	81	1
22	1	52	1	82	1
23	1	53	1	83	1
24	0,5	54	1	84	1
25	1	55	1	85	1
26	1	56	1	86	1
27	1	57	1	87	1
28	1	58	1	88	1
29	1	59	1	89	1
30	1	60	1	90	1
(cont.)		(cont.)		(cont.)	

Índices	Pesos	Índices	Pesos	Índices	Pesos
91	1	126	1	161	1
92	1	127	1	162	1
93	1	128	1	163	1
94	1	129	1	164	1
95	1	130	1	165	1
96	1	131	1	166	1
97	1	132	1	167	1
98	0,5	133	1	168	1
99	1	134	1	169	1
100	1	135	1	170	1
101	1	136	1	171	1
102	1	137	0,5	172	0,5
103	1	138	1	173	0,5
104	1	139	1	174	1
105	1	140	1	175	1
106	1	141	1	176	1
107	1	142	1	177	1
108	1	143	1	178	1
109	1	144	1	179	1
110	1	145	1	180	1
111	1	146	1	181	1
112	1	147	1	182	1
113	1	148	1	183	1
114	1	149	1	184	1
115	1	150	1	185	1
116	1	151	1	186	1
117	1	152	1	187	1
118	1	153	1	188	1
119	0,5	154	1	189	1
120	0,5	155	1	190	1
121	1	156	1	191	1
122	1	157	1	192	1
123	1	158	1	193	1
124	1	159	1	194	1
125	1	160	1	195	1
(cont.)		(cont.)		(cont.)	

Índices	Pesos	Índices	Pesos	Índices	Pesos
196	1	231	1	266	1
197	1	232	1	267	1
198	1	233	1	268	1
199	1	234	1	269	1
200	1	235	1	270	1
201	1	236	1	271	1
202	1	237	1	272	1
203	1	238	1	273	1
204	1	239	1	274	1
205	1	240	1	275	1
206	1	241	1	276	1
207	1	242	1	277	1
208	1	243	1	278	1
209	1	244	1	279	1
210	1	245	1	280	0,5
211	1	246	1	281	1
212	1	247	1	282	1
213	0,5	248	1	283	1
214	1	249	1	284	1
215	1	250	1	285	1
216	1	251	1	286	1
217	1	252	1	287	1
218	1	253	1	288	1
219	1	254	1	289	1
220	1	255	1	290	1
221	1	256	1	291	1
222	1	257	1	292	1
223	1	258	1	293	1
224	1	259	1	294	1
225	1	260	1	295	1
226	1	261	1	296	0,5
227	1	262	1	297	0,5
228	1	263	1	298	0,5
229	1	264	1	299	0,5
230	1	265	1		
(cont.)		(cont.)			

**APÊNDICE P - FRONTEIRAS INTERCEPTADAS PELAS LINHAS
VERTICAIS DA AMOSTRA DO ESTUDO DE CASO**

Índices	Pesos	Índices	Pesos	Índices	Pesos
1	0,5	31	1	61	1
2	0,5	32	1	62	1
3	0,5	33	1	63	1
4	0,5	34	1	64	1
5	0,5	35	1	65	1
6	1	36	1	66	1
7	1	37	1	67	1
8	1	38	1	68	1
9	1	39	1	69	1
10	1	40	1	70	1
11	1	41	1	71	1
12	1	42	1	72	1
13	1	43	1	73	1
14	1	44	1	74	1
15	1	45	1	75	1
16	1	46	1	76	1
17	1	47	1	77	1
18	1	48	1	78	1
19	1	49	1	79	1
20	1	50	0,5	80	1
21	1	51	1	81	1
22	1	52	1	82	1
23	1	53	1	83	1
24	1	54	1	84	1
25	1	55	1	85	1
26	1	56	1	86	1
27	1	57	1	87	1
28	1	58	1	88	1
29	1	59	1	89	1
30	1	60	1	90	1
(cont.)		(cont.)		(cont.)	

Índices	Pesos	Índices	Pesos	Índices	Pesos
91	1	126	1	161	1
92	1	127	1	162	1
93	1	128	1	163	1
94	1	129	1	164	1
95	1	130	1	165	1
96	1	131	1	166	1
97	1	132	1	167	1
98	1	133	1	168	1
99	0,5	134	1	169	1
100	0,5	135	1	170	1
101	0,5	136	1	171	1
102	1	137	0,5	172	1
103	1	138	1	173	1
104	1	139	1	174	1
105	1	140	1	175	1
106	1	141	1	176	1
107	1	142	1	177	1
108	1	143	1	178	1
109	1	144	1	179	0,5
110	1	145	1	180	1
111	1	146	1	181	1
112	1	147	1	182	1
113	1	148	1	183	1
114	1	149	1	184	1
115	1	150	1	185	1
116	1	151	1	186	1
117	1	152	1	187	1
118	1	153	1	188	1
119	1	154	1	189	1
120	1	155	1	190	1
121	1	156	1	191	1
122	1	157	1	192	1
123	0,5	158	1	193	1
124	1	159	1	194	1
125	1	160	1	195	1
(cont.)		(cont.)		(cont.)	

Índices	Pesos	Índices	Pesos	Índices	Pesos
196	1	231	1	266	1
197	1	232	1	267	1
198	1	233	1	268	1
199	1	234	1	269	1
200	1	235	1	270	1
201	1	236	1	271	1
202	1	237	1	272	1
203	1	238	1	273	1
204	1	239	1	274	1
205	0,5	240	1	275	1
206	1	241	1	276	1
207	1	242	1	277	1
208	1	243	1	278	1
209	1	244	1	279	1
210	1	245	1	280	1
211	1	246	1	281	1
212	1	247	1	282	1
213	1	248	1	283	0,5
214	1	249	1	284	1
215	1	250	1	285	1
216	1	251	1	286	1
217	1	252	1	287	1
218	1	253	1	288	1
219	1	254	1	289	1
220	1	255	1	290	1
221	1	256	1	291	1
222	1	257	1	292	1
223	1	258	1	293	1
224	1	259	1	294	1
225	1	260	0,5	295	1
226	1	261	1	296	1
227	1	262	1	297	1
228	1	263	1	298	1
229	1	264	1	299	1
230	1	265	1	300	1
(cont.)		(cont.)		(cont.)	

Índices	Pesos	Índices	Pesos	Índices	Pesos
301	1	336	1	371	1
302	1	337	1	372	1
303	1	338	1	373	1
304	0,5	339	1	374	1
305	1	340	1	375	1
306	1	341	1	376	1
307	1	342	1	377	1
308	1	343	1	378	1
309	1	344	1	379	0,5
310	1	345	1	380	0,5
311	1	346	1	381	1
312	1	347	1	382	1
313	1	348	1	383	1
314	1	349	1	384	1
315	1	350	1	385	1
316	1	351	1	386	1
317	1	352	1	387	1
318	1	353	1	388	1
319	1	354	1	389	1
320	1	355	1	390	1
321	1	356	1	391	1
322	1	357	1	392	1
323	1	358	1	393	1
324	1	359	1	394	1
325	1	360	1	395	1
326	0,5	361	1	396	1
327	0,5	362	1	397	1
328	1	363	1	398	1
329	1	364	1	399	1
330	1	365	1	400	1
331	1	366	1	401	1
332	1	367	1	402	1
333	1	368	1	403	1
334	1	369	1	404	1
335	1	370	1	405	0,5
(cont.)		(cont.)		(cont.)	

Índices	Pesos	Índices	Pesos	Índices	Pesos
406	1	441	1	476	1
407	1	442	1	477	1
408	1	443	1	478	1
409	1	444	1	479	1
410	1	445	1	480	1
411	1	446	1	481	1
412	1	447	1	482	1
413	1	448	1	483	1
414	1	449	1	484	1
415	1	450	1	485	1
416	1	451	1	486	1
417	1	452	1	487	1
418	1	453	1	488	1
419	1	454	1	489	1
420	1	455	1	490	1
421	1	456	1	491	1
422	1	457	1	492	1
423	1	458	1	493	1
424	1	459	1	494	1
425	1	460	1	495	1
426	1	461	1	496	1
427	1	462	1	497	1
428	1	463	1	498	1
429	1	464	1	499	1
430	1	465	1	500	1
431	0,5	466	1	501	1
432	1	467	1	502	1
433	1	468	1	503	1
434	1	469	1	504	1
435	1	470	1	505	1
436	1	471	1	506	1
437	1	472	1	507	1
438	1	473	1	508	1
439	1	474	0,5	509	1
440	1	475	1	510	1
(cont.)		(cont.)		(cont.)	

Índices	Pesos	Índices	Pesos
511	1	545	1
512	1	546	1
513	1	547	1
514	1	548	1
515	1	549	1
516	1	550	1
517	1	551	1
518	1	552	1
519	1	553	1
520	1	554	1
521	1	555	1
522	1	556	1
523	1	557	1
524	1	558	1
525	1	559	1
526	1	560	1
527	1	561	1
528	1	562	1
529	1		
530	1		
531	1		
532	1		
533	1		
534	1		
535	1		
536	1		
537	1		
538	1		
539	1		
540	1		
541	1		
542	1		
543	1		
544	1		
(cont.)			
