

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA IDENTIFICAÇÃO E  
CARACTERIZAÇÃO DE PITES DE CORROSÃO EM CUPONS**

**IANNE LIMA NOGUEIRA**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ**

**SETEMBRO – 2013**



# DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE PITES DE CORROSÃO EM CUPONS

**IANNE LIMA NOGUEIRA**

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

Orientador: Prof. D.Sc. Angelus Giuseppe Pereira da Silva

CAMPOS DOS GOTACAZES – RJ

SETEMBRO – 2013

# DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE PITES DE CORROSÃO EM CUPONS

**IANNE LIMA NOGUEIRA**

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

Aprovada em 06 de setembro de 2013.

Comissão Examinadora:

---

Prof<sup>a</sup>. Ana Lúcia Diegues Skury (D.Sc., Engenharia e Ciência dos Materiais) – UENF

---

Prof. Fermín Alfredo Tang Montané (D.Sc, Engenharia de Produção) – UENF

---

Prof. Ítalo de Oliveira Matias (D.Sc., Sistemas Computacionais) – UCAM

---

Prof<sup>a</sup>. Elaine C. Pereira (D.Sc, Engenharia e Ciência dos Materiais) – REDENTOR

---

Prof. Angelus Giuseppe Pereira da Silva (D.Sc., Ciências Técnicas) – UENF

Orientador

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu,  
mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre  
aquilo que todo mundo vê.”  
Arthur Schopenhauer

# DEDICATÓRIA

A Deus e aos meus pais  
que sempre me apoiaram.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela saúde, sabedoria e por estar sempre ao meu lado.

Aos meus pais, pelo amor incondicional, paciência, educação e valores morais passados. Por dedicarem-me suas vidas, apoiando minhas decisões e dando-me forcas para concluir esta longa jornada.

Aos meus familiares pelo apoio e carinho.

Aos meus amigos, pelo apoio, amor e compreensão ao tolerarem minha ausência.

Ao meu orientador Angelus, pela orientação, dedicação, confiança e infinita paciência dispensada durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Ítalo pela coorientação, apoio, conhecimento e paciência dedicados a mim.

Ao meu amigo Chrystiano, por me aturar, orientar em momentos de desespero e pela companhia por infindáveis noites.

Ao meu amigo Roberto pelo apoio e ajuda, os quais tiveram uma importância ímpar para a conclusão deste projeto.

Aos amigos que fiz nesta instituição, em especial a Mariana e a Simone, os quais foram minha segunda família ao longo deste curso, pelo carinho, amizade, companhia e auxílio.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram de alguma forma para que esse trabalho fosse realizado. Em especial ao técnico Alcirley por ter realizado todos os testes pelo método tradicional, sem os quais não seria possível a conclusão deste projeto.

Resumo da dissertação apresentada ao CCT-UENF como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

## **DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE PITES DE CORROSÃO EM CUPONS**

**Ianne Lima Nogueira**

06 de Setembro de 2013

**Orientador: Prof. Angelus Giuseppe Pereira da Silva**

A corrosão é o principal mecanismo de degradação de materiais metálicos e de suas ligas. Ela pode ser definida como a destruição ou deterioração de um material devido a reações químicas ou eletroquímicas. Significantes perdas econômicas estão associadas à ocorrência e a seu combate e controle. Seus efeitos podem ser vistos praticamente em todos os lugares envolvendo os materiais, sejam estes metálicos ou não. A corrosão pode ser classificada (dividida) em diferentes tipos, porém este trabalho focará apenas a corrosão puntiforme ou por pite, uma das formas mais graves e de difícil detecção. Um programa baseado em processamento de imagens digitais foi desenvolvido para caracterizar a corrosão por pites em cupons de corrosão expostos a meio corrosivo. As imagens são capturadas por uma câmera digital e são visualizadas no programa, que pode editar a imagem para melhorar sua qualidade ao realçar elementos de interesse, identificar os pites presentes na imagem e fazer medições para caracterização dos pites, tais como: contagem, medição de área, distribuição de tamanho e densidade de pites.

Palavras chave: corrosão por pites, processamento de imagens digitais, software - desenvolvimento

Abstract of dissertation presented to CCT-UENF as part of the requirements for obtaining the Master Degree in Materials Engineering and Science.

## **SOFTWARE DEVELOPMENT FOR IDENTIFICATION AND CHARACTERIZATION OF PITTING CORROSION IN COUPONS**

**Ianne Lima Nogueira**

September 6<sup>th</sup>, 2013

**Advisor: Prof. Angelus Giuseppe Pereira da Silva**

Corrosion is the main mechanism of degradation of metallic materials and alloys. It can be defined as the destruction or deterioration of a material due to chemical or electrochemical reactions. Significant economic losses are associated with the occurrence and its combat and control. Its effects can be seen almost everywhere involving materials, whether metal or not. Corrosion can be classified into different types, but this work will focus only pitting corrosion or pitting, one of the most serious and difficult to detect. A program based on digital image processing was developed to characterize corrosion pitting corrosion on coupons exposed to the corrosive medium. Images are captured by a digital camera and are displayed in the program, you can edit the image to improve its quality by highlighting elements of interest, identify pitting present in the image and make measurements for characterization of pits, such as counting, measuring area, size distribution and density of pits.

Key words: pitting corrosion, digital image processing, software - development

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Corrosão uniforme em uma chapa metálica (Gentil, 2003 apud Arruda, 2009). .....	17
Figura 2.2 - Trecho de chapa com corrosão em placas (Gentil, 2003 apud Arruda, 2009). .....	17
Figura 2.3 - Corrosão alveolar (Gentil, 1996). .....	18
Figura 2.4 - a) Corrosão alveolar em tubo de aço carbono. b) Corrosão alveolar generalizada em tubo de aço carbono (Ferreira et al., 2002). .....	18
Figura 2.5 - Tubo de aço inoxidável AISI 304 com corrosão por pite (Gentil, 2003 apud Arruda, 2009). .....	19
Figura 2.6 - a) Corrosão intergranular (Gentil, 1996). b) Corrosão sob tensão fraturante em palheta de agitador de aço inoxidável (Ferreira et al., 2002). .....	19
Figura 2.7 - a) Corrosão intragranular (Gentil, 1996). b) Corrosão intragranular em aço inoxidável submetido à ação de cloreto e temperatura (Ferreira et al., 2002). ...	20
Figura 2.8 - Corrosão filiforme em superfície com película de tinta (Gentil, 2003 apud Arruda, 2009). .....	20
Figura 2.9 - Corrosão por esfoliação (Gentil, 1996). .....	21
Figura 2.10 - Esfoliação em liga de alumínio (Gentil, 2003 apud Arruda, 2009). .....	21
Figura 2.11 - Corrosão gráfrica em tubo de ferro fundido cinzento (Gentil, 2003 apud Arruda, 2009). .....	22
Figura 2.12 - Parte interna da válvula de latão apresentando corrosão por dezincificação (Gentil, 2003 apud Arruda, 2009). .....	22
Figura 2.13 - Placa com empolamento por hidrogênio (Gentil, 2003 apud Arruda, 2009). .....	23
Figura 2.14 - Corrosão em componentes tubulares nas proximidades de solda (Gentil, 2003 apud Arruda, 2009). .....	23
Figura 2.15 - Cupons de Corrosão – Diversos tipos (Ferreira et al., 2002). .....	26
Figura 2.16 - Esquema da inter-relação das subáreas da Computação Gráfica (Gomes & Velho, 2003). .....	27
Figura 2.17 - Representação usual de uma matriz na imagem digital. ....	29
Figura 2.18 - Os componentes iluminância (I) e reflectância (R) de uma imagem (Marques Filho & Vieira Neto, 1999). .....	29
Figura 2.19 - Gradação com os 256 tons de cinza (Gomes e Velho, 2003). .....	30

Figura 2.20 - Imagem RGB demonstrando os três canais e a composição (Gonçalves, 2012).	30
Figura 2.21 - Estrutura de procedimentos do processamento digital de imagens (Alves, 2006).	31
Figura 2.22 - Esquema demonstrando a filtragem de uma imagem.	33
Figura 2.23 - Uma vizinhança 3 x 3 ao redor de um ponto de coordenadas (x,y) em uma imagem (Gonzalez & Woods, 2002).	34
Figura 2.24 - Método da filtragem no domínio espacial. Esquema para uma máscara 3x3 (Gonzalez & Woods, 2002).	35
Figura 2.25 - Máscaras para operador de Roberts e Sobel (Gonzalez & Woods, 2002).	37
Figura 2.26 - aplicação do operador Sobel (Gonzalez & Woods, 2002).	38
Figura 2.27 - Máscara com os valores do Laplaciano (Gonzalez & Woods, 2002).	38
Figura 2.28 - a) Imagem original. b) Aplicação do operador Laplaciano (Matias, 2007).	39
Figura 2.29 - a) Imagem Original e seu respectivo histograma. b) Imagem com Limiar L1 igual a 100. c) Imagem com Limiar L2 igual a 60 (Matias, 2007).	40
Figura 2.30 - a) Imagem original com a semente. b) Início do algoritmo. c) Passo intermediário. d) Região encontrada (Gonzales e Woods, 2002 apud Matias, 2007).	42
Figura 2.31 - a) conjunto A. b) Translação de A por $(x_1, x_2)$ (Marques Filho & Vieira Neto, 1999).	43
Figura 2.32 - a) conjunto B. b) Reflexão de B em relação à origem (Marques Filho & Vieira Neto, 1999).	44
Figura 2.33 - a) Dilatação de A por um elemento estruturante (B) alongado na horizontal. b) Dilatação de A por B alongado na vertical (Marques Filho & Vieira Neto, 1999).	45
Figura 2.34 - a) Erosão de A por um elemento estruturante (B) alongado na horizontal. b) Erosão de A por B alongado na vertical (Marques Filho & Vieira Neto, 1999).	46
Figura 2.35 - Histograma de frequência de uma imagem (Gomes & Velho, 2003).	46
Figura 2.36 - a) Imagem de baixo contraste e seu histograma. b) Imagem de baixo contraste equalizada e seu histograma (Marques Filho & Vieira Neto, 1999).	47
Figura 3.1 - Fluxograma com as etapas de execução da metodologia.	51

Figura 4.1 - Tela principal do programa. ....	59
Figura 4.2 - Aplicação do filtro Blur com máscara 5x5. ....	60
Figura 4.3 - Aplicação do filtro Gaussiano com máscara 5x5.....	61
Figura 4.4 - Aplicação do filtro Média com máscara 5x5.....	61
Figura 4.5 - Resultado da aplicação do operador de borda. ....	62
Figura 4.6 - Operador de Laplace aplicado em máscara 3x3.....	62
Figura 4.7 - Operador Sobel aplicado a imagem com máscara 5x5.....	62
Figura 4.8 - Aplicação da dilatação. ....	63
Figura 4.9 - Aplicação da erosão.....	63
Figura 4.10 - Tela para preenchimento de informações da escala.....	64
Figura 4.11 - Imagem binarizada com um limiar de 70. ....	65
Figura 4.12 - Aplicação da detecção de contorno. ....	65
Figura 4.13 - Imagem após a aplicação da operação limiar.....	66
Figura 4.14 - Tela de ajuste de parâmetros da segmentação por cluster. ....	66
Figura 4.15 - Aplicação da segmentação por cluster. ....	67
Figura 4.16 - Sistema com a segmentação supervisionada ativada. ....	68
Figura 4.17 - Imagem da inclusão de pites. ....	69
Figura 4.18 - Imagem da exclusão de pites. ....	69
Figura 4.19 - Imagem com aplicação da dilatação e erosão em pites isolados. ....	70
Figura 4.20 - Imagem de uma binarização manual. ....	70
Figura 4.21 - Histograma da distribuição do tamanho dos pites.....	71
Figura 4.22 - Imagem após a aplicação do recurso de deletar lote de pites. ....	71
Figura 4.23 - Tela com a análise dos pites identificados.....	72
Figura 4.24 - Imagem original de alto contraste. ....	73
Figura 4.25 - Identificação de um pite com o Analysis 5 Olympus. ....	74
Figura 4.26 - Identificação do pite com o sistema. ....	75
Figura 4.27 - Sobreposição de contorno do pite segmentado na imagem original....	76
Figura 4.28 - Imagem original de médio contraste. ....	77
Figura 4.29 - Identificação de pites em imagem de médio contraste. ....	78
Figura 4.30 - Imagem de médio contraste, com pites identificados através do sistema.....	78
Figura 4.31 - Sobreposição de contorno de pite na imagem original de médio contraste.....	79
Figura 4.32 - Imagem original de baixo contraste. ....	80

Figura 4.33 - Identificação de pites em imagem de baixo contraste.....	81
Figura 4.34 - Imagem de baixo contraste, com pites identificados através do sistema. .....	81
Figura 4.35 - Sobreposição de contorno de pites na imagem de baixo contraste. ....	82

## SUMÁRIO

RESUMO.....	viii
ABSTRACT .....	ix
LISTA DE FIGURAS .....	x
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....	11
1.1 – Objetivo.....	12
1.2 - Justificativa .....	13
1.3 – Organização .....	13
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	15
2.1 – Corrosão .....	15
2.1.1 – Importância da Corrosão.....	15
2.1.2 – Tipos de Corrosão .....	16
2.1.2.1- Corrosão Uniforme .....	16
2.1.2.2- Corrosão em Placas .....	17
2.1.2.3- Corrosão Alveolar .....	17
2.1.2.4- Corrosão por Pite .....	18
2.1.2.5- Corrosão Intergranular .....	19
2.1.2.6- Corrosão Intragranular .....	19
2.1.2.7- Corrosão Filiforme .....	20
2.1.2.8- Corrosão por Esfoliação .....	20
2.1.2.9- Corrosão Grafítica .....	21
2.1.2.10- Dezincificação .....	22
2.1.2.11- Empolamento por Hidrogênio .....	22
2.1.2.12- Corrosão em Cordão de Solda .....	23
2.1.3 – Monitoração da Corrosão.....	23
2.1.3.1 – Métodos de Monitoração .....	24
2.1.4 – Cupom de Corrosão.....	25
2.2 – Computação Gráfica.....	27

2.2.1 – Imagem Digital .....	28
2.2.2 – Processamento de Imagem .....	31
2.2.3 – Filtros .....	33
2.2.3.1 – Filtragem no Domínio Espacial .....	33
2.2.4 – Segmentação .....	35
2.2.4.1 – Segmentação por Descontinuidades .....	36
2.2.4.1.1 – Detecção de Bordas .....	36
2.2.4.2 – Segmentação por Limiarização (Thresholding) .....	39
2.2.4.3 – Segmentação por Região .....	40
2.2.4.3.1 – Crescimento de Regiões (region-growing) .....	41
2.2.5 – Processamento Morfológico de Imagens .....	42
2.1.5.1 – Definições Básicas .....	43
2.1.5.2 – Dilatação .....	44
2.1.5.3 – Erosão .....	45
2.2.6 – Histograma .....	46
2.2.6.1 – Equalização de Histograma .....	47
2.3 – Trabalhos Correlatos .....	48
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA .....	51
3.1 – Recursos Utilizados .....	52
3.1.1 – Qt Software .....	52
3.1.2 – OpenCV .....	52
3.1.3 – Imagens de Pites de Corrosão em Cupons .....	53
3.2 – Definição de Recursos do Programa .....	53
3.2.1 – Interface Gráfica .....	53
3.2.2 – Filtros de Edição .....	53
3.2.3 – Calibração da Dimensão .....	54
3.2.4 – Segmentação de Pites .....	54
3.2.5 – Segmentação Supervisionada de Pites .....	54

3.2.6 – Medição da Área e Distribuição de Pites .....	54
3.2.7 – Contagem de Pites e Determinação da Densidade .....	55
3.2.8 – Determinação do Centro Geométrico de Pite e sua Coordenada	55
3.2.9 – Relatório de Caracterização.....	55
3.3 – Teste do Sistema.....	55
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	58
4.1 – Interface Gráfica .....	58
4.2 – Filtros de Edição .....	60
4.3 – Calibração da Dimensão .....	63
4.4 – Segmentação de Pites.....	65
4.5 – Segmentação Supervisionada de Pites .....	67
4.6 – Caracterização dos Pites.....	72
4.7 – Teste do Sistema.....	73
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO.....	85
CAPÍTULO 6 – TRABALHOS FUTUROS.....	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	87

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

A corrosão é um processo resultante da ação do meio sobre um material, causando sua deterioração. Apesar da estreita relação com os metais, esse fenômeno ocorre em outros materiais, como concreto e polímeros orgânicos, entre outros. Sem que se perceba, processos corrosivos estão presentes direta ou indiretamente no nosso cotidiano, pois podem ocorrer em grades, automóveis, eletrodomésticos e instalações industriais (Merçon et al., 2004).

Do ponto de vista econômico, os prejuízos causados atingem valores extremamente altos, resultando em uma notável evasão de recursos. O aumento dos custos decorre, não só da necessidade de substituir peças danificadas, mas também dos danos causados por contaminação, paradas desnecessárias e perda de rendimento. Além disso, existem os fatores psicológicos decorrentes da suspeita de insegurança em equipamentos, que minam a produtividade do pessoal (Revista Química e Derivados, 1996). Segundo (Passaglia, 1979), uma estimativa feita pelo Departamento do Comércio dos EUA, revelou que quanto mais avançado tecnologicamente for um país, mais elevado é o seu gasto com corrosão.

Ao longo dos últimos anos, tem se desenvolvido e discutido cada vez mais técnicas de prevenção de corrosão, visto que esta é a maneira mais econômica de se elevar a vida útil da estrutura, com os menores custos ao longo do tempo. Em um de seus trabalhos, (Rugolo, *et al.*, 2006), afirmam que conhecendo a forma de corrosão é possível desenvolver técnicas para se predizer, por quanto tempo e sob quais condições, as ligas metálicas irão resistir ao meio corrosivo e principalmente conhecer como a corrosão age em tais ligas.

Entretanto, a prevenção e monitoração da corrosão são processos, muitas vezes, cansativos e tediosos, por demandarem um longo tempo de execução da análise, quando realizados pelo método convencional. Diante disso, tem-se empregado cada vez mais técnicas de Computação Gráfica, como o processamento e análise de imagens, visando otimizar os métodos de análise de corrosão.

O Processamento de Imagens Digitais é uma técnica de manipulação de imagens digitais que consiste na utilização de operações matemáticas, visando melho-

rar o aspecto visual, como aumentar o contraste e reduzir ruídos, e destacar características importantes da mesma. A Análise de Imagens consiste na extração e tratamento de dados quantitativos de imagens digitais. Através da análise pode-se realizar medições mais rápidas, precisas e acuradas, possibilitando ainda a realização de medidas impossíveis de se executar manualmente (Gomes, 2001).

A segmentação é a primeira etapa de processamento da imagem para retirada da informação nela presente (Albuquerque & Albuquerque, 2000). Segmentar consiste em verificar cada ponto da imagem para dividi-la em regiões que correspondem a objetos ou partes de objetos. Essas regiões são formadas por pixels que contém características comuns, como cor, por exemplo, indicando que formam um mesmo objeto ou parte. O objetivo da segmentação de imagens é extrair informações da imagem de entrada para formar uma imagem de saída que contenha menos informações, mas que essas informações sejam mais relevantes do que todo o conteúdo descartado (Ataide & Pimentel, 2011).

Este trabalho visa à aplicação de técnicas de Processamento de Imagens Digitais, como a segmentação, em imagens de pites<sup>1</sup> de corrosão em cupons<sup>2</sup>, no intuito de realizar medições, contagens entre outras estimativas a partir dos pites identificados. No método tradicional, todos os cálculos são realizados de forma manual, o que gera um gasto excessivo de tempo, custos com mão de obra especializada e produz resultados diretamente influenciados pelo homem.

## 1.1 – Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de um programa analisador de imagem que empregue recursos de processamento digital de imagens para a identificação e caracterização de pites de corrosão em cupons. Os objetivos específicos são:

- Implementar recursos de edição de imagens para melhorar contraste da imagem;
- Implementar filtros nas imagens coloridas dos pites;
- Implementar recursos de reconhecimento (identificação) de elementos pites;

---

<sup>1</sup> Tipo de corrosão onde há um desgaste de forma muito localizada e de alta intensidade.

<sup>2</sup> Pequenas chapas em metal.

- Implementar recursos de edição de pites contendo eliminação ou inclusão de novos pites à lista de pites segmentados
- Implementar contagem de elementos pites, assim como, medidas de comprimento, área e densidade;
- Determinar o centro geométrico e a localização dos pites na imagem.
- Emissão de relatório de caracterização de pites.

## **1.2 - Justificativa**

Segundo (Fernandes, 2010), um quinto da produção mundial de aço é destinado a repor perdas causadas pela corrosão. Os gastos mundiais decorrentes da corrosão são imensos e causados principalmente por redução da vida útil de peças, custos de manutenção e processos de proteção. O avanço tecnológico tem levado os pesquisadores a desenvolver materiais metálicos com propriedades físicas e químicas que satisfaçam às exigências mais sofisticadas. Apesar do avanço tecnológico no desenvolvimento desses materiais e seu uso generalizado, quase todas as ligas metálicas se deterioram, como consequência do ataque pelo meio onde são usadas (Riella, 2009). Os motivos apresentados acima, demonstram o interesse no estudo da corrosão e na criação de um software que seja capaz de identificá-la a partir de operações efetuadas nas imagens digitais de pites em cupons.

## **1.3 – Organização**

Além desta Introdução, esse trabalho se divide nos seguintes capítulos:

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: Esse capítulo descreve o embasamento teórico dos assuntos principais deste trabalho que é a computação gráfica juntamente com a corrosão.

Capítulo 3 – Metodologia: Esse capítulo apresenta as ferramentas e tecnologias utilizadas no desenvolvimento deste projeto.

Capítulo 4 – Resultados e Discussão: Nesse capítulo, o programa desenvolvido é descrito em detalhes (interface e funcionalidades). Também são apresentados alguns resultados da caracterização e análise de imagens de pites de corrosão em cupons. Estes resultados são comparados aos resultados da caracterização convencional das mesmas imagens.

Capítulo 5 – Conclusão e Trabalhos Futuros: Este capítulo apresenta a conclusão do projeto e propostas para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este Capítulo apresenta o referencial teórico que embasa o trabalho de dissertação.

#### 2.1 – Corrosão

A corrosão pode ser definida como a destruição ou deterioração de um material devido a reações químicas ou eletroquímicas com o meio onde se encontra, aliada ou não a tensões, ou ainda como um processo natural resultante da inerente tendência dos metais se reverterem para sua forma mais estável (Gentil, 1996).

##### 2.1.1 – Importância da Corrosão

A corrosão é um problema que ocorre em diversos materiais, em especial com os metais e suas ligas. Ela é o principal mecanismo de degradação de materiais. Significantes perdas econômicas estão associadas à ocorrência e a seu combate e controle. As perdas são causadas pela substituição das partes e peças atingidas; pelas paradas de produção para substituição e inspeções; por danos ambientais e materiais (vazamento de químicos de tubulações metálicas), e pelas medidas de monitoramento e prevenção da corrosão.

Em determinadas áreas, como na indústria de extração de petróleo, a corrosão assume uma dimensão ainda maior por uma série de fatores: os custos operacionais extremamente elevados que exigem o mínimo de paradas de produção; o uso intensivo de metais, que são os materiais mais suscetíveis à corrosão; o ambiente agressivo de trabalho, formado pelo ambiente marinho e pelos fluidos de trabalho; e os riscos ambientais inerentes a esta atividade industrial. Isto torna o monitoramento da corrosão uma atividade crucial nesta indústria. Tecnologias de inspeção e de mitigação dos processos corrosivos encontram amplo espaço de aplicação.

## 2.1.2 – Tipos de Corrosão

Segundo (Gentil, 1996), os processos de corrosão são considerados reações químicas heterogêneas ou reações eletroquímicas que se passam geralmente na superfície de separação entre o metal e o meio corrosivo.

O conhecimento das diferentes formas sob as quais a corrosão ocorre é importante no estudo do processo corrosivo. O processo de corrosão pode ser dividido em tipos de acordo com a aparência ou forma de ataque, e ainda as diferentes causas da corrosão e seus mecanismos. Assim, os tipos de corrosão podem ser classificados segundo:

- a morfologia: uniforme, por placas, alveolar, puntiforme ou por pite, intergranular (ou intercrystalina), intragranular (ou transgular ou transcristalina), filiforme, por esfoliação, grafítica, dezincificação, em torno do cordão de solda e empolamento pelo hidrogênio;
- as causas ou mecanismos: por aeração diferencial, eletrolítica ou por correntes de fuga, galvânica, associada a solicitações mecânicas (corrosão sob tensão fraturante), em torno de cordão de solda, seletiva (grafítica e desincificação), empolamento ou fragilização pelo hidrogênio;
- os fatores mecânicos: sob tensão, sob fadiga, por atrito, associada à erosão;
- o meio corrosivo: atmosférica, pelo solo, induzida por microrganismos, pela água do mar, por sais fundidos, etc.;

A seguir são apresentadas as características fundamentais das diferentes formas de corrosão, visto que as peculiaridades da forma de corrosão auxiliam bastante o esclarecimento do mecanismo e na aplicação de medidas adequadas de proteção.

### 2.1.2.1- Corrosão Uniforme

A corrosão uniforme se processa em toda a extensão da superfície (Figura 2.1), de modo a ocorrer perda uniforme de espessura. É chamada, por alguns, de corrosão generalizada, mas esta terminologia não deve ser usada só para corrosão uniforme, pois é possível ter, também, corrosão por pite ou alveolar generalizadas,

isto é, em toda a extensão da superfície corroída (Gentil, 1996). É a forma de corrosão mais simples de medir, além de ser possível evitar falhas repentinas através de uma inspeção regular (Ferreira et al., 2002).

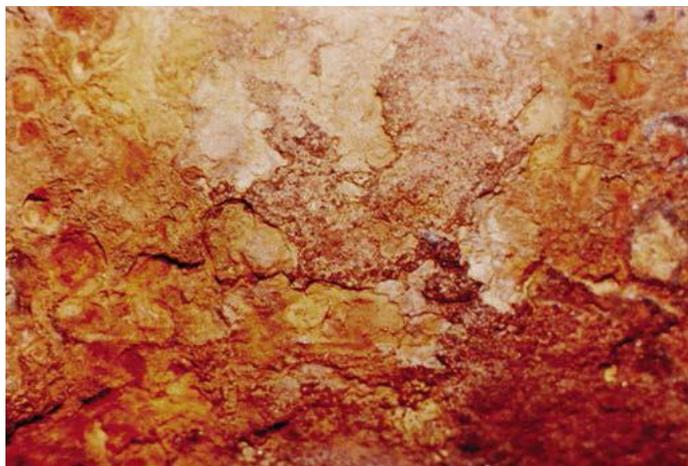


Figura 2.1 - Corrosão uniforme em uma chapa metálica (Gentil, 2003 apud Arruda, 2009).

#### 2.1.2.2- Corrosão em Placas

A corrosão em placas se localiza em regiões da superfície e não em toda sua extensão, formando placas com escavações (Figura 2.2).



Figura 2.2 - Trecho de chapa com corrosão em placas (Gentil, 2003 apud Arruda, 2009).

#### 2.1.2.3- Corrosão Alveolar

A corrosão alveolar ocorre na superfície metálica, produzindo sulcos ou escavações – semelhantes a alvéolos – que apresentam fundo arredondado e profundidade, em geral, menor que o seu diâmetro (Figura 2.3 e Figura 2.4).

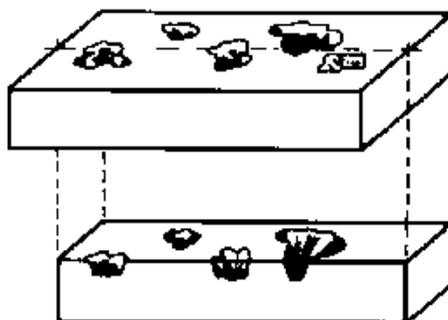
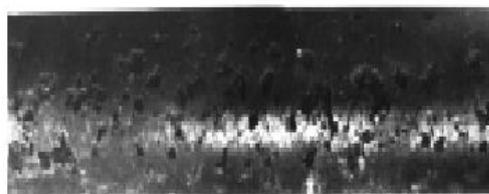


Figura 2.3 - Corrosão alveolar (Gentil, 1996).



a)



b)

Figura 2.4 - a)Corrosão alveolar em tubo de aço carbono. b)Corrosão alveolar generalizada em tubo de aço carbono (Ferreira et al., 2002).

#### 2.1.2.4- Corrosão por Pite

A corrosão puntiforme ou por pites é uma forma de corrosão localizada que consiste na formação de cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade, geralmente, maior do que o seu diâmetro (Figura 2.5). Ocorre em determinados pontos da superfície enquanto que o restante pode permanecer praticamente sem ataque.

A corrosão por pites pode ser iniciada por um pequeno defeito de superfície, como um arranhão ou uma alteração local na composição, ou um dano à camada protetora. Superfícies polidas mostram maior resistência a esta corrosão. Para um material livre de defeitos, "perfeito", a corrosão por pite é causada predominantemente pela química do ambiente em que este se encontra, o qual podem conter espécies químicas agressivas como o íon cloreto (Quiumento, 2011).

O pite é uma das formas mais destrutivas e insidiosas de corrosão. Causa a perfuração de equipamentos, com apenas uma pequena perda percentual de peso de toda a estrutura. É, geralmente, difícil de detectar pelas suas pequenas dimen-

sões e porque os pites são, frequentemente, escondidos pelos resíduos da corrosão (Ferreira et al., 2002).



Figura 2.5 - Tubo de aço inoxidável AISI 304 com corrosão por pite (Gentil, 2003 apud Arruda, 2009).

#### 2.1.2.5- Corrosão Intergranular

A corrosão intergranular se processa entre os grãos da rede cristalina do material metálico (Figura 2.6-a), o qual perde suas propriedades mecânicas e pode fraturar quando solicitado por esforços mecânicos, tendo-se então a corrosão sob tensão fraturante (CTF) (Stress Corrosion Cracking – SCC ) (Figura 2.6-b) (Ferreira *et al.*, 2002).

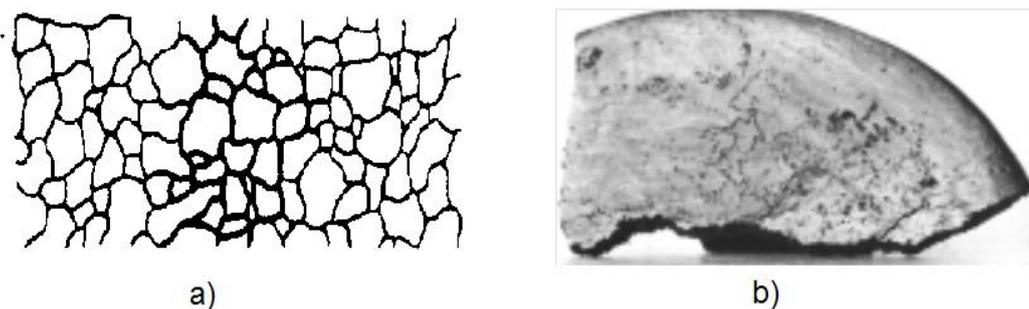


Figura 2.6 - a) Corrosão intergranular (Gentil, 1996). b) Corrosão sob tensão fraturante em palheta de agitador de aço inoxidável (Ferreira et al., 2002).

#### 2.1.2.6- Corrosão Intragranular

A corrosão intragranular se processa nos grãos da rede cristalina do material metálico (Figura 2.7), o qual, perdendo suas propriedades mecânicas, poderá fratu-

rar à menor solitação mecânica, tendo-se também corrosão sob tensão fraturante (Figura 2.6-b) (Ferreira *et al.*, 2002).

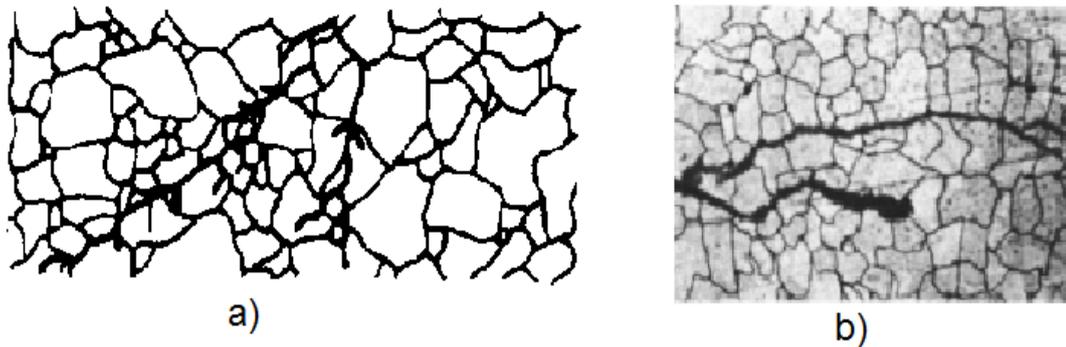


Figura 2.7 - a) Corrosão intragranular (Gentil, 1996). b) Corrosão intragranular em aço inoxidável submetido à ação de cloreto e temperatura (Ferreira *et al.*, 2002).

#### 2.1.2.7- Corrosão Filiforme

A corrosão filiforme se processa sob a forma de finos filamentos, mas não profundos, que se propagam em diferentes direções e que não se cruzam (Figura 2.8), pois se admite que o produto de corrosão, em estado coloidal, apresenta carga positiva, daí a repulsão. Ocorre, geralmente, em superfícies metálicas revestidas com tintas ou com metais e ocasiona o deslocamento do revestimento (Gentil, 1996).



Figura 2.8 - Corrosão filiforme em superfície com película de tinta (Gentil, 2003 apud Arruda, 2009).

#### 2.1.2.8- Corrosão por Esfoliação

A corrosão por esfoliação se processa de forma paralela à superfície metálica (Figura 2.9), ocorrendo, assim, a desintegração do material em forma de placas paralelas. Na Figura 2.10 é apresentada a corrosão por esfoliação em uma liga de alumínio.

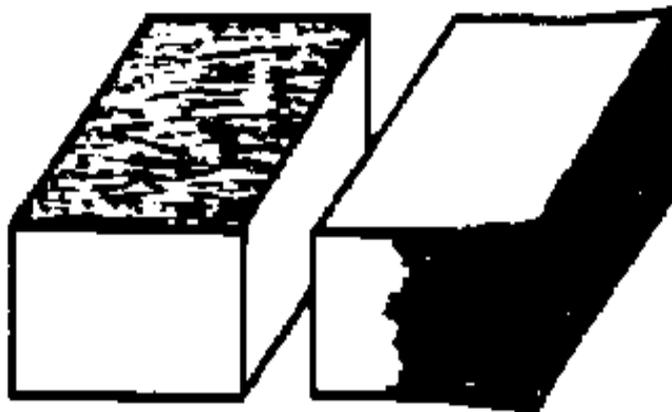


Figura 2.9 - Corrosão por esfoliação (Gentil, 1996).

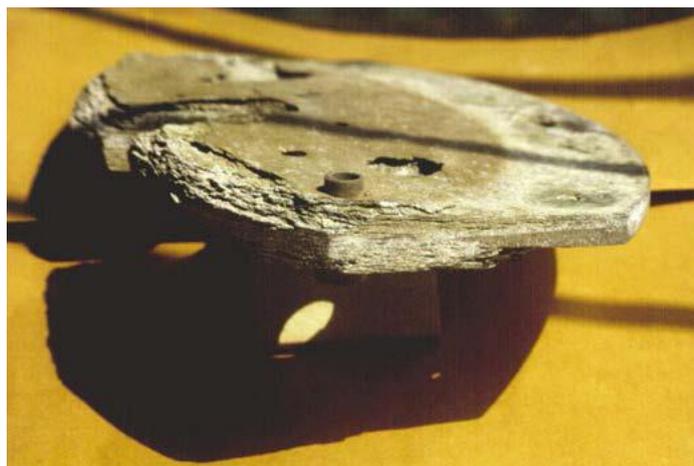


Figura 2.10 - Esfoliação em liga de alumínio (Gentil, 2003 apud Arruda, 2009).

#### 2.1.2.9- Corrosão Grafítica

A corrosão grafítica processa-se no ferro fundido cinzento em temperatura ambiente (Figura 2.11). O ferro metálico é convertido em produtos de corrosão, enquanto a grafite permanece intacta. Observa-se que a área corroída fica com aspecto escuro, característico da grafite, e esta pode ser facilmente retirada com espátula. Quando a grafite é colocada sobre papel branco e atritando-a, observa-se a formação de risco preto característico (Ferreira, *et al.*, 2002).



Figura 2.11 - Corrosão gráfitica em tubo de ferro fundido cinzento (Gentil, 2003 apud Arruda, 2009).

### 2.1.2.10- Dezincificação

A corrosão por dezincificação ocorre em ligas de cobre-zinco (latões), observando-se o aparecimento de regiões com coloração avermelhada contrastando com a cor característica amarela dos latões. Admite-se que ocorre uma corrosão preferencial do zinco, e o cobre restante destaca-se com sua característica cor avermelhada. Na Figura 2.12 é apresentado esse tipo de corrosão em um trecho de tubo de latão (70 % de cobre e 30 % de zinco) com dezincificação: as áreas mais escuras são as dezincificadas (Ferreira, *et al.*, 2002).

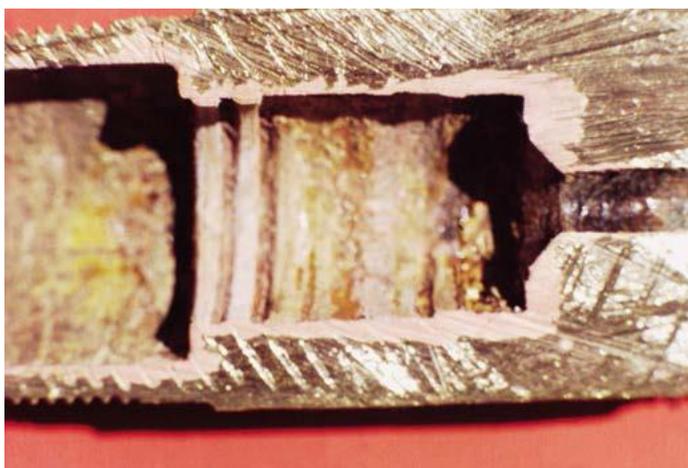


Figura 2.12 - Parte interna da válvula de latão apresentando corrosão por dezincificação (Gentil, 2003 apud Arruda, 2009).

### 2.1.2.11- Empolamento por Hidrogênio

A corrosão por empolamento por hidrogênio ocorre quando se dá a penetração do hidrogênio atômico no material metálico. Como tem pequeno volume atômico, difunde-se rapidamente e, em regiões com descontinuidades, como inclusões e vazios, transforma-se em hidrogênio molecular,  $H_2$ . A molécula formada exerce pressão e origina bolhas, daí o nome de empolamento (Figura 2.13).

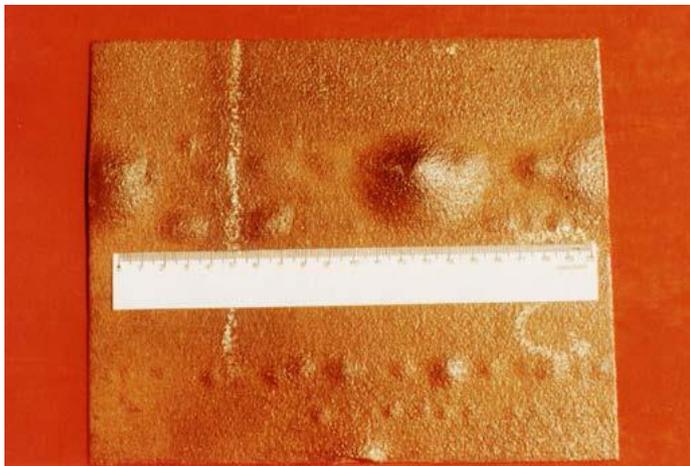


Figura 2.13 - Placa com empolamento por hidrogênio (Gentil, 2003 apud Arruda, 2009).

#### 2.1.2.12- Corrosão em Cordão de Solda

A corrosão em torno do cordão de solda é caracterizada como mostra a Figura 2.14. Ocorre em aços inoxidáveis não estabilizados ou com teores de carbono maiores que 0,03%, e a corrosão se processa intergranularmente.



Figura 2.14 - Corrosão em componentes tubulares nas proximidades de solda (Gentil, 2003 apud Arruda, 2009).

#### 2.1.3 – Monitoração da Corrosão

A monitoração da corrosão é uma forma sistemática de medição da corrosão ou da degradação de um determinado componente de um equipamento, com o objetivo de auxiliar a compreensão do processo corrosivo e/ou obter informações úteis para o controle da corrosão e das suas consequências (Gentil, 1996).

O monitoramento é uma ferramenta fundamental do plano de controle de corrosão, visto que é capaz de fornecer informações relevantes sobre a evolução do processo corrosivo, bem como identificar e monitorar, regularmente, os parâmetros operacionais (composição química da carga ou do meio corrosivo, temperatura do processo, teor de contaminantes, etc.) responsáveis pela elevação significativa da atividade corrosiva.

Os motivos pelos quais se deve adotar um plano de monitoramento da corrosão são diversos, dentre os quais se destacam:

- caracterização da natureza do ataque corrosivo;
- determinação da taxa de corrosão;
- avaliação dos procedimentos de prevenção e controle da corrosão e, eventualmente, adotados, como, por exemplo, a seleção de tratamentos químicos mais adequados, a caracterização da eficiência e da dosagem ótima de inibidores;
- análise de falhas decorrentes de problemas de corrosão e diagnóstico on line sobre o “estado” da superfície em contato com o meio corrosivo;
- auxílio no desenvolvimento de novas formas de controle da corrosão e de pesquisa de natureza tecnológica na área de corrosão e proteção;
- execução de testes e ensaios de avaliação do comportamento de materiais, inibidores, revestimentos, etc., tanto em campo como em bancada de laboratório.

### **2.1.3.1 – Métodos de Monitoração**

Segundo (Gentil, 1996), os métodos de monitoração podem ser classificados em:

- não-destrutivos - ultra-som, correntes parasitas (Eddy currents), emissão acústica, radiografia, partícula magnética, líquido penetrante, exame visual, termografia, etc.; São indispensáveis para indicar a presença de ataque,

fissuras, trincas, reduções de espessura de parede, defeitos internos, vazamentos, porosidades e outras formas de dano.

- analíticos – análise química, medidas de pH, do teor de oxigênio e da atividade microbológica; São complementares aos de engenharia de corrosão, contudo não menos importantes.
- métodos de engenharia de corrosão – abrangem os não-eletroquímicos, que são os cupons de corrosão, a resistência elétrica e os provadores de hidrogênio, bem como os eletroquímicos, ou seja, a resistência à polarização ou polarização linear, potencial de corrosão, amperimetria de resistência nula, impedância eletroquímica e ruído eletroquímico; Podem ser aplicados tanto em meios aquosos como em ambientes gasosos.

#### **2.1.4 – Cupom de Corrosão**

O método da massa de referência é a mais simples técnica de monitoração, visto que um cupom, (pequenas chapas em aço carbono) (Figura 2.15), de peso conhecido é exposto, a um ambiente de processo, durante um determinado período de tempo, seguida da remoção deste para análise. Então, é realizada uma análise visual no cupom para verificar, no caso de ataque, se o mesmo foi uniforme ou localizado com formação de pites.

A técnica não requer equipamentos ou procedimentos complexos, somente um cupom de forma apropriada (Figura 2.15), um suporte para este cupom e um produto para remoção da corrosão que não ataque o substrato. Os cupons podem ser fabricados de qualquer liga comercial, no formato desejado. O processo normal de exposição varia de 3 a 6 meses, isto porque é necessário um longo tempo de exposição do cupom para que a alta taxa de corrosão do cupom novo não influencie na precisão da medida.

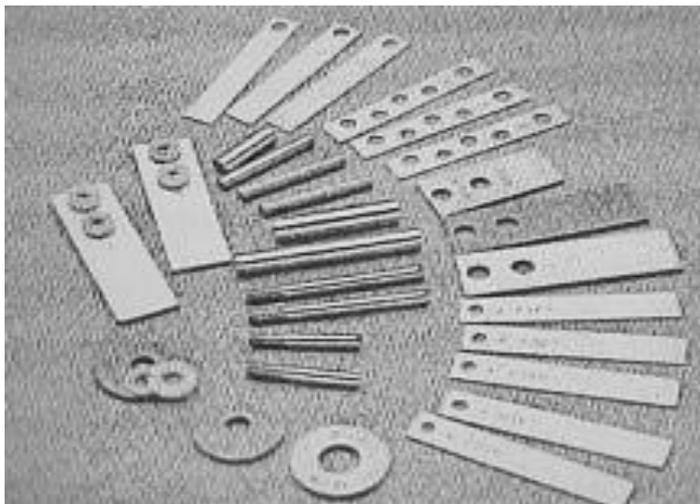


Figura 2.15 - Cupons de Corrosão – Diversos tipos (Ferreira et al., 2002).

A NACE Standard RP0775-2005 recomenda expressar a taxa máxima de corrosão por pites em  $mp/y$ , isto é, milésimo de polegada por ano, ou  $mm/y$ , milímetro por ano (NACE International, 2005), como mostram as equações abaixo:

$$mp/y = \frac{\text{profundidade máxima de pite (polegadas)} \times 365}{\text{tempo de exposição (dias)}} \quad (2.1)$$

$$mm/y = \frac{\text{profundidade máxima de pite (mm)} \times 365}{\text{tempo de exposição (dias)}} \quad (2.2)$$

Para estimar a profundidade dos pites são utilizados métodos manuais de medição, tais como metalográfico, de usinagem, do micrômetro de profundidade e o microscópico.

Conhecendo-se a taxa de corrosão de um material em determinado meio, pode-se estimar o tempo de vida de um equipamento.

O uso de cupons no processo de corrosão tem diversas vantagens, dentre as quais se destacam:

- a técnica é aplicada para todos os ambientes: líquidos, gases, fluxos c/partículas/sólidas.
- pode-se usar inspeção visual.
- os depósitos de corrosão podem ser observados e analisados.
- a localização da corrosão pode ser identificada e medida.
- é possível avaliar a performance do inibidor de corrosão usado.

## 2.2 – Computação Gráfica

A Computação Gráfica é a área da Ciência da Computação que estuda a geração, manipulação e análise de imagens, desenvolvendo técnicas e algoritmos com essas finalidades. Atualmente, a Computação Gráfica está presente em quase todas as áreas do conhecimento humano, desde o projeto de um novo modelo de automóvel até o desenvolvimento de ferramentas de entretenimento, entre as quais os jogos eletrônicos (Manssour & Cohen, 2006).

Segundo (Gomes & Velho, 2003) a computação gráfica pode ser dividida em quatro subáreas que relacionam dados e imagens. Essas subáreas são tão próximas que estão muitas vezes interligadas, em determinados momentos são até confundidas. Estas subáreas são: Modelagem Geométrica, Síntese de Imagem, Processamento de Imagem e Análise de Imagens. A Figura 2.16 mostra estas quatro subáreas da computação gráfica e como se relacionam com os dados e a imagem.

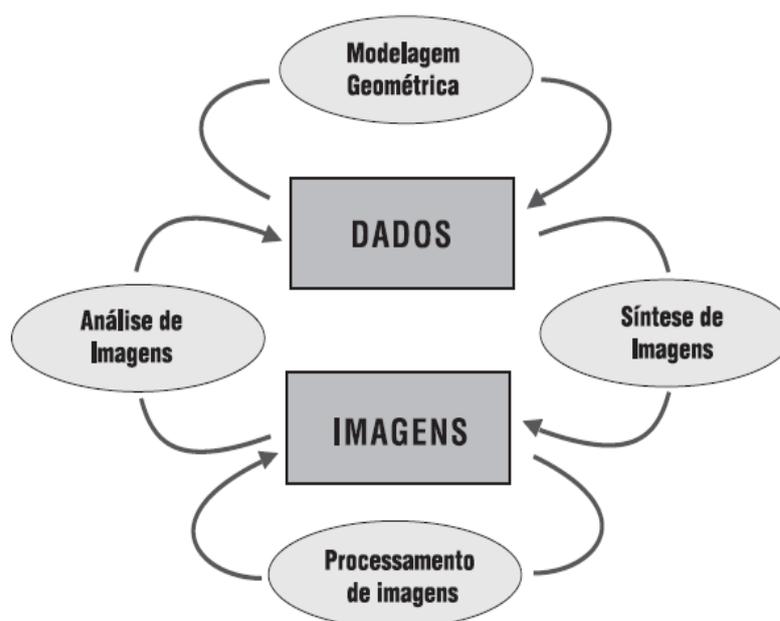


Figura 2.16 - Esquema da inter-relação das subáreas da Computação Gráfica (Gomes & Velho, 2003).

A Modelagem Geométrica consiste de um conjunto de métodos que visam descrever e estruturar dados geométricos no computador, ou seja, encontrar um modelo matemático capaz de representar o objeto desejado. Através desse modelo fica mais fácil e prático analisá-lo e testá-lo. Um exemplo de Modelagem geométrica é a obtenção de uma função que se aproxime de outra desconhecida através de um método de interpolação de alguns pontos de amostragem já conhecidos.

A Síntese de imagens, ou Visualização, processa os dados gerados pelo sistema na modelagem geométrica e produz uma imagem que pode ser vista em um dispositivo de saída gráfica.

O Processamento de Imagens assume como informação de entrada uma imagem, processa-a e produz outra imagem como informação de saída. As técnicas desta área podem ser utilizadas, por exemplo, para melhorar a qualidade de uma imagem antiga ou danificada, produzindo outra imagem com menos ruídos.

O processo de Análise de Imagem, ou Visão Computacional, tem por finalidade obter informações físicas, geométricas e/ou topológicas sobre os dados do objeto apresentado na imagem de entrada. Um bom exemplo desta área aparece nas transmissões de futebol, quando é necessário observar com segurança e certeza se um jogador está em posição de impedimento, ou seja, uma situação onde é necessário determinar a sua posição no campo em relação à posição dos jogadores adversários.

### **2.2.1 – Imagem Digital**

Uma imagem digital pode ser descrita matematicamente como uma função bidimensional  $f(x, y)$ , onde  $x$  e  $y$  são coordenadas espaciais e o valor de  $f(x, y)$  é a intensidade (brilho) do ponto, sendo  $x$ ,  $y$  e  $f$  valores finitos e discretos. Equivalentemente, uma imagem digital pode ser definida como uma matriz  $M \times N$ , na qual cada elemento é denominado pixel (*picture element*) e este possui informações referentes à luminosidade e a cor.

A Figura 2.17 apresenta uma convenção matricial usual para uma imagem digital.



Figura 2.17 - Representação usual de uma matriz na imagem digital.

Segundo (Gonzalez & Woods, 2002), a função  $f(x, y)$ , que representa a intensidade luminosa, pode ser caracterizada por dois componentes (Figura 2.18):

- 1 – a quantidade de luz incidente na cena que está sendo visualizada;
- 2 – e a quantidade de luz refletida pelos objetos da cena.

Apropriadamente eles são denominados componentes de iluminância e refletância e podem ser representados pelas funções  $i(x, y)$  e  $r(x, y)$ , respectivamente. O produto dessas funções é o valor da função  $f(x, y)$ .

$$f(x, y) = i(x, y) * r(x, y) , \quad (2.3)$$

onde  $0 < i(x, y) < \infty$  e  $0 < r(x, y) < 1$ .

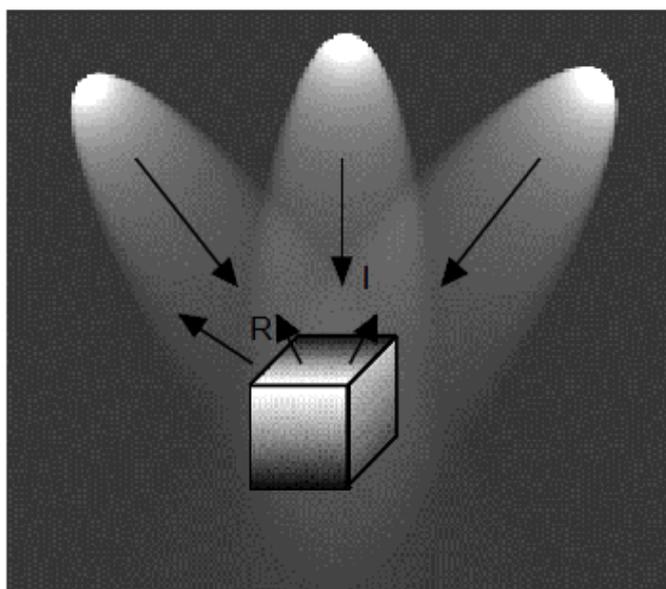


Figura 2.18 - Os componentes iluminância (I) e refletância (R) de uma imagem (Marques Filho & Vieira Neto, 1999).

A intensidade de  $f$  no ponto  $(x, y)$  nas imagens monocromáticas é denominada nível de cinza (ou tom de cinza) ( $L$ ) do pixel. Essas imagens possuem apenas um canal, com valores pertencentes ao intervalo:

$$L_{min} \leq L \leq L_{max} , \quad (2.4)$$

sendo  $L_{min}$  e  $L_{max}$  valores positivos e finitos. Este intervalo é denominado escala de cinza da imagem, com variações de tons do preto ao branco (Figura 2.19).



Figura 2.19 - Gradação com os 256 tons de cinza (Gomes e Velho, 2003).

Em uma imagem digital colorida no sistema RGB, um pixel pode ser visto como um vetor de três posições (canais), cujas componentes representam as intensidades de vermelho, verde e azul. A imagem colorida pode ser vista como a composição de três imagens monocromáticas (Queiroz & Gomes, 2001).

$$f(x, y) = (f_R(x, y), f_G(x, y), f_B(x, y)) , \quad (2.5)$$

na qual  $f_R(x, y)$ ,  $f_G(x, y)$ ,  $f_B(x, y)$  representam, respectivamente, as intensidades luminosas das componentes vermelha, verde e azul da imagem, no ponto  $(x, y)$ .

Na Figura 2.20, são apresentados os canais de uma imagem RGB e o resultado da composição dos três canais.



Figura 2.20 - Imagem RGB demonstrando os três canais e a composição (Gonçalves, 2012).

O objeto de estudo e de trabalho do processamento de imagens é a imagem digital.

## 2.2.2 – Processamento de Imagem

O processamento de imagens digitais consiste na execução de operações matemáticas nos dados, através de algoritmos especializados, visando as suas transformações em imagens de melhores qualidades espectrais e espaciais e que sejam mais apropriadas para uma determinada aplicação.

Segundo (Gonzalez & Woods, 2002), o processamento de imagens está estruturado em etapas (Figura 2.21). A estrutura visa organizar os procedimentos, o que permite uma organização flexível, passível de mudanças. Sendo assim, uma etapa pode ser ignorada ou mesmo eliminada.

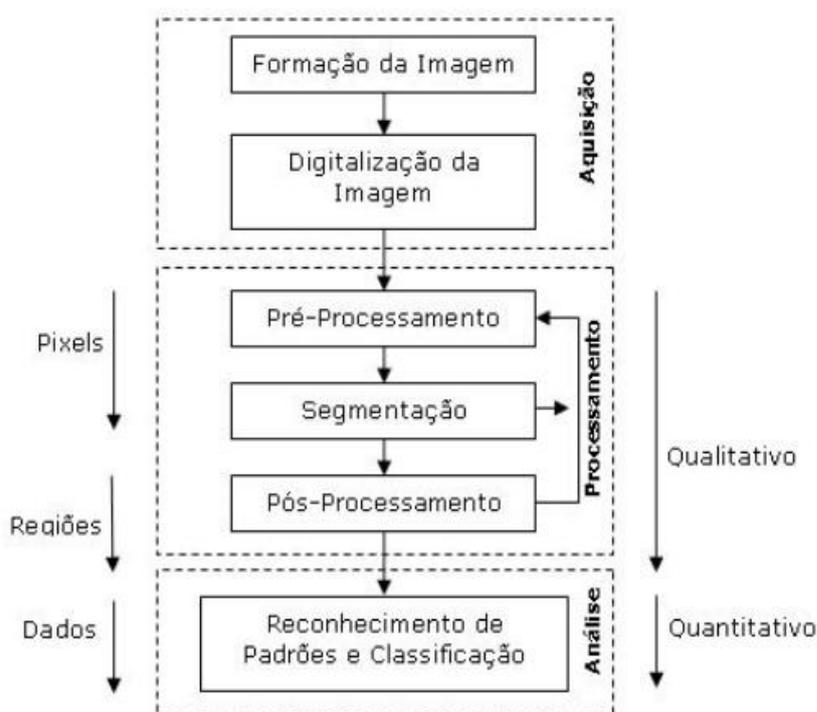


Figura 2.21 - Estrutura de procedimentos do processamento digital de imagens (Alves, 2006).

Como pode ser observado na Figura 2.21, os procedimentos podem ser divididos em três grupos: Aquisição (formação e digitalização), Processamento de imagem (pré-processamento, segmentação e pós-processamento) e Análise digital de imagens (reconhecimento de padrões e classificação). As setas ao lado da estrutura indicam como os procedimentos operam sobre a imagem. Em um primeiro momento tem-se a qualificação da amostra, utilizando basicamente os pixels e regiões e posteriormente os trabalhos quantitativos, que se dá sobre os dados da amostra.

A etapa de aquisição é responsável pela formação e digitalização de imagens. A fase de formação consiste na conversão de uma cena real tridimensional, a qual é capturada através de uma câmera CCD (*Charge Coupled Device*), em uma imagem

analógica (sinal analógico). Este sinal analógico deve ser digitalizado para que o computador possa interpretá-lo. A fase de digitalização consiste na discretização espacial da imagem, conhecido como amostragem e na discretização em amplitude, conhecido como quantização. Os instrumentos responsáveis pela aquisição de imagens podem gerar apenas o sinal analógico ou, também, realizar a digitalização da imagem gerada. Os instrumentos que contêm apenas a etapa de formação de imagens, como é o caso das câmeras, necessitam atuar como instrumentos digitalizadores, a exemplo da *frame grabber*<sup>3</sup> (Alves, 2006). As câmeras fotográficas digitais são um exemplo de categoria de instrumentos que realizam a formação e digitalização de imagens.

A etapa de processamento visa preparar a imagem para a análise digital. A fase de pré-processamento tem como função aprimorar a qualidade da imagem para as fases subsequentes. Para (Marques Filho & Vieira Neto, 1999), as operações efetuadas nesta fase são ditas de baixo nível porque trabalham diretamente com os valores de intensidade dos pixels.

A fase de segmentação subdivide uma imagem em suas partes ou objetos constituintes, o objetivo é isolar os objetos de interesse na aplicação.

O objetivo da fase de pós-processamento é definir um esquema de representação e, então, descrever os dados tornando-os adequados para o computador. A representação pode ser externa (fronteiras de uma região) ou interna (os pixels que compõem a região). Estes descritores devem ser representados por uma estrutura de dados adequada ao algoritmo de reconhecimento. Nesta fase a entrada ainda é uma imagem, mas a saída é um conjunto de dados correspondentes àquela imagem.

A análise de imagens é um processo de descobrimento, de identificação e de entendimento de padrões que sejam relevantes ao desempenho de uma tarefa baseada em imagens (Gonzalez & Woods, 2002). Basicamente, neste grupo, têm-se os métodos de reconhecimento por decisão teórica, métodos estruturais e métodos para a interpretação de imagem. Além disso, há os sistemas computacionais que tomam como inspiração o funcionamento do cérebro humano, denominados redes neurais artificiais, que tem sido largamente empregado em atividades de análise de imagens (Haykin, 2001).

---

<sup>3</sup> Frame grabber: É um dispositivo que permite a captação de imagens para o monitor a partir de uma câmera.

O processamento de imagem, como definido anteriormente, consiste em, a partir de uma imagem, obter outra imagem com determinados aspectos realçados. Ou seja, processar uma imagem consiste em realizar sucessivas transformações para obter determinadas informações contidas nesta com mais facilidade.

### 2.2.3 – Filtros

Os filtros são operações que, aplicadas a uma determinada imagem, resultam em uma imagem mais adequada que a imagem original para uma aplicação específica (Figura 2.22).

Os métodos de filtragem de imagens são normalmente classificados em duas categorias: as técnicas de filtragem espacial e as técnicas de filtragem no domínio da frequência. Os métodos que trabalham no domínio espacial operam diretamente sobre a matriz de pixels que é a imagem digitalizada, normalmente utilizando operações de convolução com máscaras, esta será a técnica abordada neste trabalho. Os métodos que atuam no domínio da frequência se baseiam na modificação da transformada de Fourier da imagem. Existem técnicas de filtragem que combinam ambas as abordagens.

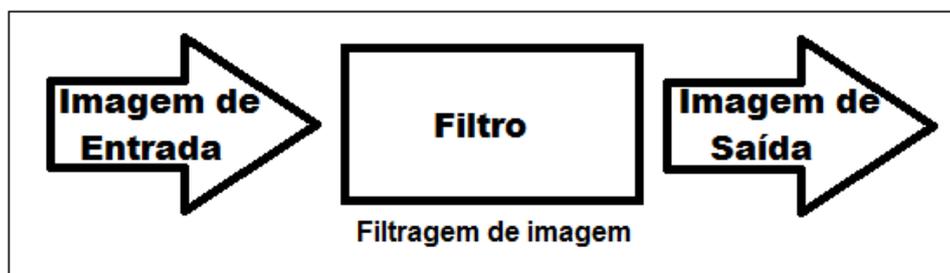


Figura 2.22 - Esquema demonstrando a filtragem de uma imagem.

#### 2.2.3.1 – Filtragem no Domínio Espacial

O termo domínio espacial refere-se a uma composição de pixels, que formam uma matriz quadrada (subimagem ou máscara), a qual é a vizinhança do ponto  $(x,y)$  (Figura 2.23). As técnicas de filtragem espacial são executadas diretamente sobre a matriz de pixels da imagem digitalizada.

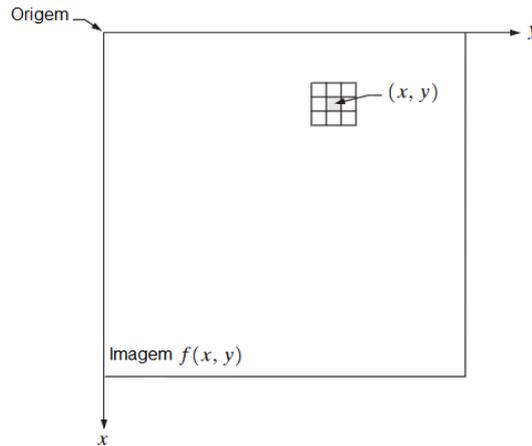


Figura 2.23 - Uma vizinhança 3 x 3 ao redor de um ponto de coordenadas  $(x, y)$  em uma imagem (Gonzalez & Woods, 2002).

De um modo geral, a filtragem no domínio espacial de uma imagem  $f$  de tamanho  $M \times N$  com uma máscara  $w$  de tamanho  $m \times n$  pode ser expressa de acordo com a seguinte equação.

$$g(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} w(m, n) f(x - m, y - n), \quad (2.6)$$

onde  $x$  e  $y$  são variados tal que cada pixel em  $w$  visite todos os pixel em  $f$ . Esse processo é chamado de convolução, e a máscara  $w$  utilizada é a máscara de convolução.

A vizinhança em torno de um ponto  $(x, y)$  é uma subimagem retangular com ponto central  $(x, y)$ , como mostra a Figura 2.23. O centro da subimagem, ou máscara, é movido pixel a pixel, iniciando no canto superior esquerdo da figura e aplicando a máscara de convolução a cada localidade para calcular o valor de  $g$  naquele ponto. O valor  $g$  de cada ponto da imagem é obtido através da soma dos produtos do coeficiente da máscara com o pixel correspondente sob a máscara (Figura 2.24).

$$g(x, y) = w_1 f_1 + w_2 f_2 + \dots + w_j f_j$$

$$g(x, y) = \sum_{i=1}^j w_i f_i \quad (2.7)$$

onde os  $w$ 's são os coeficientes da máscara, os  $f$ 's são os coeficientes da imagem e  $j$  é o total de coeficientes da máscara. Para a filtragem completa de uma imagem, esta equação deve ser aplicada para  $x = 0, 1, 2, \dots, M - 1$  e  $y = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ .

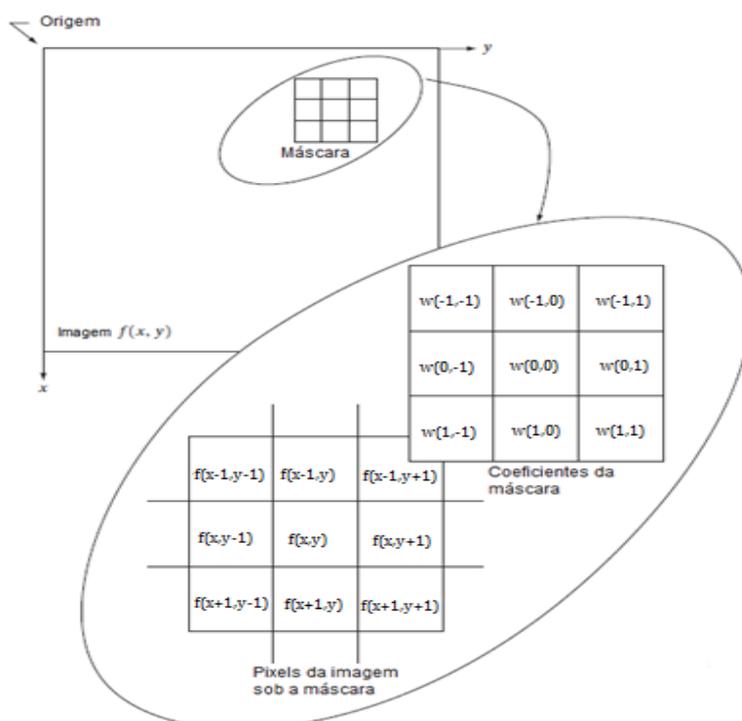


Figura 2.24 - Método da filtragem no domínio espacial. Esquema para uma máscara 3x3 (Gonzalez & Woods, 2002).

A Figura 2.24 demonstra a aplicação do método da filtragem no domínio espacial. Deve-se observar que o coeficiente da máscara  $w(0,0)$  coincide com o valor de  $f(x,y)$  da imagem, esse fato indica que a máscara está centralizada no ponto  $(x,y)$ .

A forma mais simples de uma máscara de convolução é quando a vizinhança possui um tamanho de 1x1, ou seja, somente um coeficiente. Neste caso,  $g$  depende somente do valor de  $f$  em  $(x,y)$  e a máscara se torna uma função de transformação do nível de cinza, chamada de intensidade.

$$s = T(r), \quad (2.8)$$

onde,  $r$  e  $s$  são variáveis representando, respectivamente, o nível de cinza de  $f(x,y)$  e  $g(x,y)$  em um certo ponto  $(x,y)$  e  $T$  é a função de transformação. As técnicas de processamento de imagem pertencentes a este caso são frequentemente denominadas técnicas ponto a ponto (Gonzalez & Woods, 2002).

## 2.2.4 – Segmentação

A segmentação consiste em subdividir uma imagem em regiões ou objetos. O nível dessa subdivisão dependerá do problema a ser resolvido. E a divisão deve pa-

rar quando os objetos de interesse na aplicação estiverem isolados, ou seja, forem detectados.

(Gonzalez & Woods, 2002) citam que os algoritmos de segmentação geralmente são baseados em uma das duas propriedades básicas dos valores de intensidade (brilho) do pixel: descontinuidade e similaridade. O primeiro consiste em particionar a imagem baseado em mudanças bruscas dos valores de intensidade, como as bordas de uma imagem. O segundo visa dividir a imagem em regiões de acordo com a similaridade do conjunto de critérios pré-definidos, ou seja, particionar em regiões homogêneas. Thresholding, crescimento de regiões e divisão e fusão são exemplos de métodos dessa categoria.

#### **2.2.4.1 – Segmentação por Descontinuidades**

A segmentação por descontinuidades identifica objetos na imagem com base em variações abruptas na intensidade dos pixels. Este método se aplica basicamente a imagens em escala de cinza e visa detectar três tipos básicos de descontinuidades: pontos, linhas e bordas. Enquanto a detecção de pontos e linhas se baseia na varredura da imagem por máscaras de convolução, a detecção de bordas leva em consideração as derivadas de primeira e segunda ordem aplicadas sobre a intensidade dos pixels (Gonzalez & Woods, 2002).

##### **2.2.4.1.1 – Detecção de Bordas**

As bordas de uma imagem são detectadas calculando-se a derivada espacial em duas dimensões. Nas chamadas “arestas”, onde se encontram as fronteiras dos segmentos, os operadores diferenciais costumam ter valores extremos (muito positivo ou muito negativo).

O cálculo das derivadas é realizado através do uso de filtros lineares, que utilizam máscaras para realizar a varredura da imagem. Existem duas grandes classes de operadores diferenciais:

- Diferenciador de Primeira Ordem – Magnitude do gradiente elevada é evidência de aresta.
- Diferenciador de Segunda Ordem – Cruzamento em zero é evidência de aresta.

O Diferenciador de Primeira Ordem, gradiente, consiste em comparar o valor do gradiente em cada pixel com um limiar (threshold) em tons de cinza. As bordas ficam evidenciadas se o gradiente da função no pixel de coordenadas  $(x, y)$  for superior ao valor do limiar. Os operadores gradientes mais usados para a detecção de contornos, linhas verticais e linhas horizontais, são os operadores (máscaras) de Roberts e Sobel, os quais podem ser observados na Figura 2.25.

O gradiente de uma imagem  $f(x, y)$  na localização  $(x, y)$  é o vetor:

$$\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

0	-1	-1	0
1	0	0	1

Roberts

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

Sobel

Figura 2.25 - Máscaras para operador de Roberts e Sobel (Gonzalez & Woods, 2002).

Na Figura 2.26 são apresentados exemplos da aplicação da máscara Sobel. A primeira imagem é a original. A segunda é a aplicação do operador na horizontal. A terceira é aplicação na vertical e a última é a junção das duas direções.



Figura 2.26 - aplicação do operador Sobel (Gonzalez & Woods, 2002).

Os Diferenciadores de Segunda Ordem utilizam as mudanças bruscas na derivada espacial de segunda ordem para realçar as bordas. Um dos diferenciadores de segunda ordem mais utilizados na área de visão computacional é o Laplaciano.

Para detectar a borda o Laplaciano utiliza a propriedade do cruzamento em zero. O laplaciano de uma função bidimensional  $f(x, y)$  é uma derivada de segunda ordem definida como:

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}. \quad (2.10)$$

Na literatura (Gonzales & Woods, 2002), o laplaciano da função  $f(x, y)$  é frequentemente descrito pela matriz de ordem 3x3 representado na Figura 2.27. Um exemplo da aplicação deste operador pode ser observado na Figura 2.28.

0	1	0
1	-4	1
0	1	0

Figura 2.27 - Máscara com os valores do Laplaciano (Gonzalez & Woods, 2002).



Figura 2.28 - a) Imagem original. b) Aplicação do operador Laplaciano (Matias, 2007).

#### 2.2.4.2 – Segmentação por Limiarização (Thresholding)

A limiarização é um dos métodos de segmentação mais simples, sendo empregada em um vasto conjunto de aplicações, como por exemplo: identificação de digitais, reconhecimento de íris, inspeção de materiais, dentre outras.

O princípio da limiarização consiste em separar as regiões de uma imagem quando esta apresenta duas classes (o fundo e o objeto), sendo esse processo também denominado binarização, visto que, como resultado, produz uma imagem binária. A forma mais simples de limiarização consiste na partição do histograma, convertendo os pixels cujo tom de cinza é maior ou igual a um certo valor de limiar  $L$  em brancos e os demais em pretos.

A técnica de limiarização consiste em, a partir de uma imagem de entrada  $f(x, y)$  de  $n$  níveis de cinza produzir uma imagem  $g(x, y)$ , chamada de imagem limiarizada ou binarizada, sendo:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{se } f(x, y) \geq L \\ 0, & \text{se } f(x, y) < L \end{cases} \quad (2.11)$$

onde  $L$  é um valor de tom de cinza denominado limiar. A qualidade de uma imagem limiarizada depende do valor de  $L$  (Figura 2.29). Assim, é importante definir um valor ótimo para  $L$  de forma que a imagem não sofra limiarização inadequada.

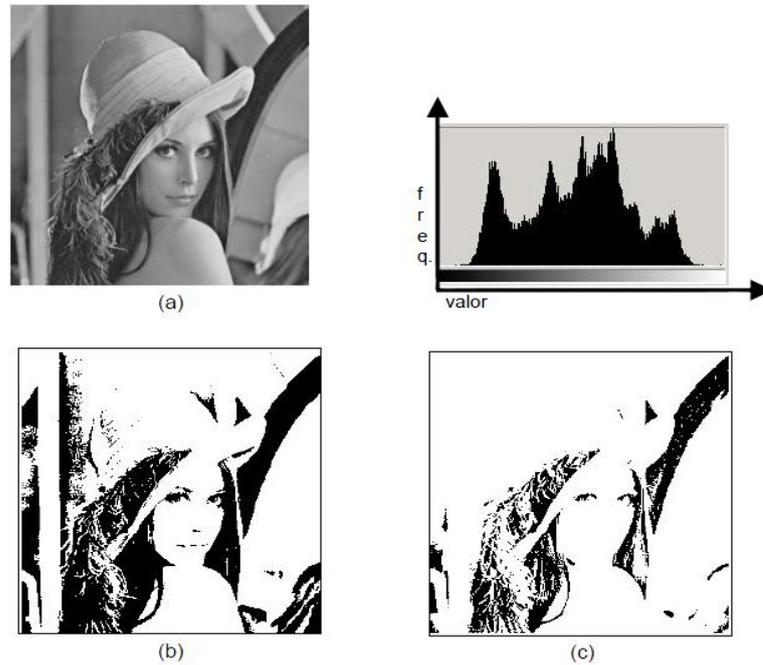


Figura 2.29 - a) Imagem Original e seu respectivo histograma. b) Imagem com Limiar L1 igual a 100. c) Imagem com Limiar L2 igual a 60 (Matias, 2007).

### 2.2.4.3 – Segmentação por Região

A segmentação por região consiste em formar grupos de pixels adjacentes, segundo um critério de similaridade, no intuito de obter regiões homogêneas ao final do processo. O objetivo dessa técnica, baseada nas características de cor, textura ou forma, é extrair uma determinada região ou dividir (particionar) a imagem num conjunto de regiões disjuntas, cuja união representa a imagem por inteiro.

Seja  $R$  a representação da extensão total de uma imagem, a segmentação é um processo que divide a imagem em  $n$  sub-regiões,  $R_1, R_2, \dots, R_n$ , de forma que:

- (a)  $\cup_{i=1}^n R_i = R$ .
- (b)  $R_i$  é uma região conectada,  $i = 1, 2, \dots, n$ .
- (c)  $R_i \cap R_j = \emptyset$  para todo  $i$  e  $j, i \neq j$ .
- (d)  $P(R_i) = VERDADEIRO$  para  $i = 1, 2, \dots, n$
- (e)  $P(R_i \cup R_j) = FALSO$  para  $i \neq j$ .

O termo  $P(R_i)$  representa um predicado lógico que corresponde a algum critério de homogeneidade. A condição (a) indica que a imagem é a soma de todas as sub-regiões, ou seja, cada pixel deve pertencer a uma região. A condição (b) estabelece que os pixels que pertencem a uma região devem ser contíguos. A condição (c) indi-

ca que as regiões precisam ser disjuntas. A condição (d) determina que todas as regiões devem atender ao critério de homogeneidade. Por fim, a condição (e) estabelece que a união de regiões não deve atender ao predicado .

#### **2.2.4.3.1 – Crescimento de Regiões (region-growing)**

Segundo (Gonzalez & Woods, 2002), o crescimento de regiões é um procedimento que agrupa pixels ou sub-regiões em regiões maiores baseado em um critério de similaridade. A técnica consiste na determinação de um conjunto de pixels, denominado semente, e a partir da semente as regiões crescem agregando pixels ou regiões que atendam ao critério definido.

A seleção das sementes pode ser feita com base em algum conhecimento a priori sobre a imagem a ser segmentada ou sobre as classes de objeto de interesse. Se este conhecimento não existir, uma possibilidade é definir todos os pixels da imagem como sementes.

A escolha do critério de similaridade está intimamente relacionada com o problema a ser solucionado, com o tipo de imagem analisada e com a classe de objetos alvo que se deseja encontrar.

A escolha dos pontos sementes pode ser feita tanto de forma manual como automática. Quando ela é feita manualmente, o usuário que está manuseando a imagem, geralmente coloca os pontos sementes nas regiões em que se deseja obter uma segmentação de um determinado objeto. Quando a escolha dos pontos sementes é feita de modo automático pode-se usar técnicas baseadas no gradiente e na análise de histograma (Gonzalez & Woods, 2002). A Figura 2.30 exibe um exemplo prático da técnica de crescimento de regiões.

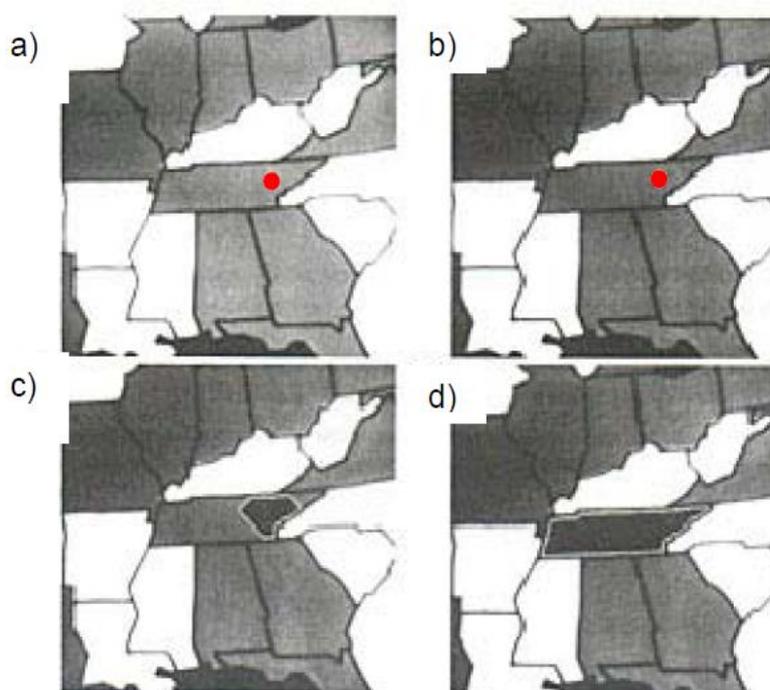


Figura 2.30 - a) Imagem original com a semente. b) Início do algoritmo. c) Passo intermediário. d) Região encontrada (Gonzales e Woods, 2002 apud Matias, 2007).

### 2.2.5 – Processamento Morfológico de Imagens

A Morfologia Matemática, ou Processamento Morfológico de Imagens, concentra seus esforços no estudo da estrutura geométrica dos elementos presentes em uma imagem. É uma ferramenta para extração de informações da imagem, a qual é aplicada em diversas áreas de processamento e análise de imagens, com objetivos distintos como realce, filtragem, segmentação, detecção de bordas, esqueletização, afinamento, dentre outras.

A teoria dos conjuntos é à base da morfologia matemática. Um conjunto na morfologia matemática representa objetos em uma imagem. Por exemplo, o conjunto de todos os pixels pretos em uma imagem binária descreve completamente a morfologia dessa imagem, visto que os demais pixels só podem ser brancos. Em imagens binárias, o conjunto em questão são membros do espaço inteiro bidimensional  $Z^2$ , onde cada elemento do conjunto é um vetor 2D cujas coordenadas são coordenadas  $(x,y)$  do pixel preto (ou branco, depende da convenção) na imagem. Imagens com mais níveis de cinza podem ser representadas por conjuntos cujos elementos estão no espaço  $Z^3$ . Neste caso, os vetores possuem três elementos, sendo os dois primeiros as coordenadas do pixel e o terceiro o valor do nível de cinza. Conjuntos com

grandes dimensões espaciais podem conter outros atributos da imagem, como componentes de cor e deterioração do tempo (Gonzalez & Woods, 2002).

A base das transformações morfológicas são as operações de dilatação e de erosão. A operação de dilatação expande a imagem, enquanto a de erosão a reduz. Um grande número de algoritmos morfológicos tem sido desenvolvido com base nessas duas operações primitivas. Essa seção discutirá tais operações, utilizando a teoria de conjuntos.

### 2.1.5.1 – Definições Básicas

As definições de translação e reflexão de conjuntos são largamente utilizadas na morfologia, mas geralmente não são conceitos encontrados em textos básicos da teoria de conjuntos (Marques Filho & Vieira Neto, 1999).

Sejam  $A$  e  $B$  conjuntos em  $\mathbb{Z}^2$ , cujos componentes são  $a = (a_1, a_2)$  e  $b = (b_1, b_2)$ , respectivamente.

A translação de  $A$  por  $x = (x_1, x_2)$ , denotada  $(A)_x$  (Figura 2.31), é definida como:

$$(A)_x = \{c | c = a + x, \text{ para } a \in A\}. \quad (2.12)$$

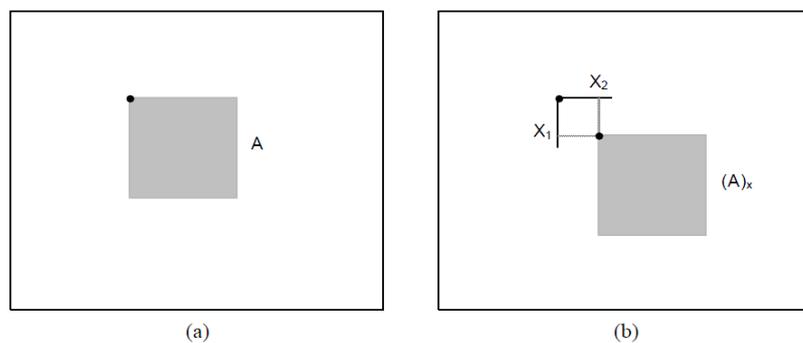


Figura 2.31 - a) conjunto  $A$ . b) Translação de  $A$  por  $(x_1, x_2)$  (Marques Filho & Vieira Neto, 1999).

A reflexão de  $B$  (Figura 2.32), denotada  $\hat{B}$ , é definida como:

$$\hat{B} = \{x | x = -b, \text{ para } b \in B\}. \quad (2.13)$$

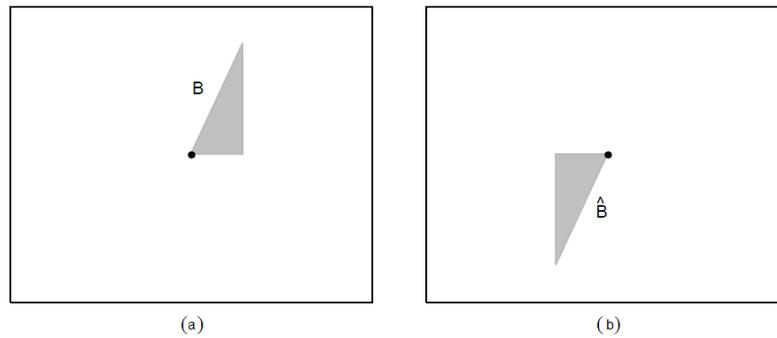


Figura 2.32 - a) conjunto B. b) Reflexão de B em relação à origem (Marques Filho & Vieira Neto, 1999).

### 2.1.5.2 – Dilatação

Sejam  $A$  e  $B$  conjuntos no espaço  $\mathbb{Z}^2$  e seja  $\emptyset$  o conjunto vazio. A dilatação de  $A$  por  $B$ , denotada  $A \oplus B$ , é definida como:

$$A \oplus B = \{x \mid (\hat{B})_x \cap A \neq \emptyset\}. \quad (2.14)$$

Portanto, o processo de dilatação consiste em obter a reflexão de  $B$  sobre sua imagem e depois deslocar esta reflexão de  $x$ . A dilatação de  $A$  por  $B$  é, então, o conjunto de todos os  $x$  deslocamentos para os quais a interseção de  $(\hat{B})_x$  e  $A$  inclui pelo menos um elemento diferente de zero. Com base nesta interpretação, a equação anterior pode ser escrita como:

$$A \oplus B = \{x \mid [(\hat{B})_x \cap A] \subseteq A\}. \quad (2.15)$$

O conjunto  $B$  é denominado normalmente como elemento estruturante.

Os efeitos da dilatação de um conjunto  $A$  usando dois elementos estruturantes ( $B$ ) distintos podem ser observados na Figura 2.33. Neste caso o elemento estruturante e a reflexão são iguais, porque  $B$  é simétrico com relação à origem. A linha pontilhada mostra o conjunto  $A$  original e a parte em cor cinza representa a dilatação de  $A$  por  $B$ . É importante observar que as operações morfológicas são sempre referenciadas a um elemento do conjunto estruturante (neste caso, o elemento central).

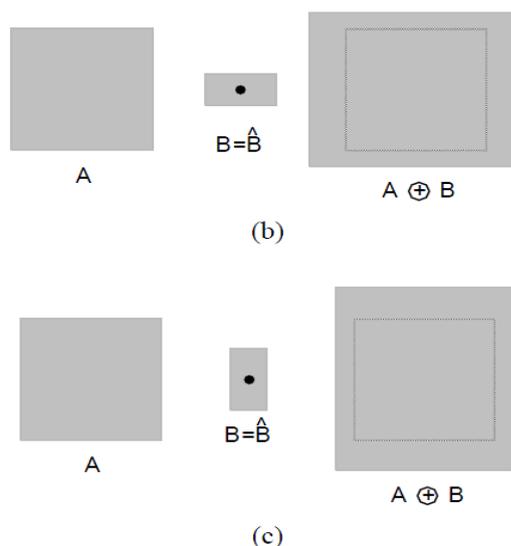


Figura 2.33 - a) Dilatação de A por um elemento estruturante (B) alongado na horizontal. b) Dilatação de A por B alongado na vertical (Marques Filho & Vieira Neto, 1999).

A aplicação dessa técnica em uma imagem resulta na dilatação (expansão) dos objetos presentes na mesma. O tamanho da imagem (altura e largura) permanece inalterado, mas os objetos que a mesma contém sofrem uma expansão de área, baseado no elemento estruturante.

### 2.1.5.3 – Erosão

Sejam  $A$  e  $B$  conjuntos no espaço  $\mathbb{Z}^2$ . A erosão de  $A$  por  $B$ , denotada  $A \ominus B$ , é definida como:

$$A \ominus B = \{x | (B)_x \subseteq A\}, \quad (2.16)$$

em outras palavras, esta equação significa dizer que a erosão de  $A$  por  $B$  resulta no conjunto de pontos  $x$  tais que  $B$ , transladado de  $x$ , está contido em  $A$ .

A Figura 2.34 mostra os efeitos da erosão de um conjunto  $A$  usando dois elementos estruturantes ( $B$ ) distintos. A linha pontilhada mostra o conjunto  $A$  original e a parte em cor cinza representa a erosão de  $A$  por  $B$ . Como pode ser visto toda a imagem erodida está completamente contida no conjunto  $A$ .

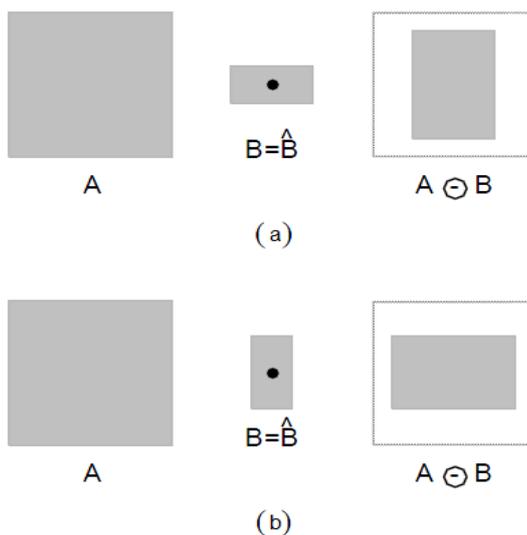


Figura 2.34 - a) Erosão de A por um elemento estruturante (B) alongado na horizontal. b) Erosão de A por B alongado na vertical (Marques Filho & Vieira Neto, 1999).

Essa técnica reduz a área dos objetos contidos em uma imagem, com base no elemento estruturante. Assim como na dilatação, o tamanho da imagem (altura e largura) permanece inalterado.

## 2.2.6 – Histograma

O histograma é uma das formas mais comuns de se representar a distribuição de valores de pixel de uma imagem. Ao observá-lo (Figura 2.35), tem-se uma noção instantânea sobre as características de uma imagem, visto que por sua forma é possível inferir informações relevantes, tais como intensidade média e distribuição dos valores de pixel. Quanto maior a distribuição ao longo do eixo dos valores de pixel maior o contraste da imagem (Neta, *et al.*, 2008).

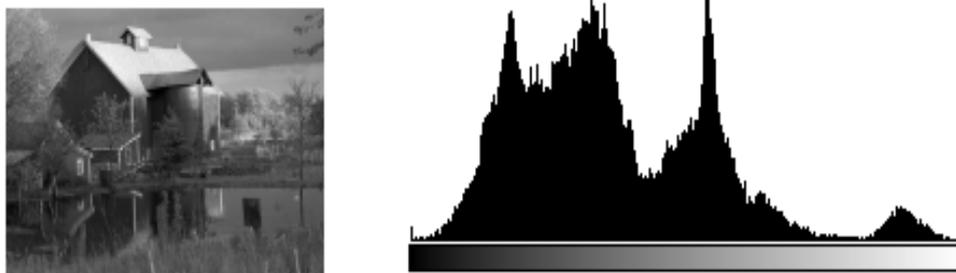


Figura 2.35 - Histograma de frequência de uma imagem (Gomes & Velho, 2003).

Segundo (Gonzalez & Woods, 2002), o histograma é uma função discreta que pode ser representado por:

$$p_k(r_k) = \frac{n_k}{n}, \quad (2.17)$$

Onde:

$r_k$  =  $k$ -ésimo nível de cinza

$n_k$  = número de pixels na imagem cujo nível de cinza corresponde a  $r_k$

$n$  = número total de pixels na imagem

$k = 0, 1, 2, \dots, L - 1$ , onde  $L$  é o número de valores de pixel da imagem digitalizada.

$p_k$  = resultado da função discreta representada por  $r_k$ .

### 2.2.6.1 – Equalização de Histograma

A equalização de histograma é uma técnica utilizada com o intuito de redistribuir os valores de tons de cinza dos pixels de uma imagem, de modo a obter um histograma uniforme, onde o número de pixels de qualquer nível de cinza seja praticamente o mesmo. O resultado dessa uniformidade é o aumento do contraste. A Figura 2.36 ilustra a aplicação da equalização a imagens com baixo contraste.

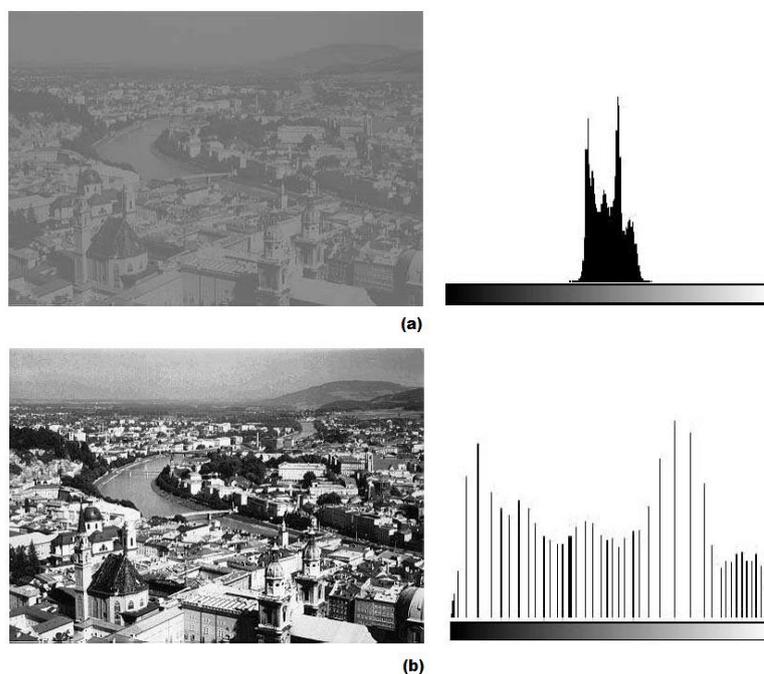


Figura 2.36 - a) Imagem de baixo contraste e seu histograma. b) Imagem de baixo contraste equalizada e seu histograma (Marques Filho & Vieira Neto, 1999).

De acordo com (Lopes, 2003), a equalização é obtida mapeando-se cada nível de intensidade presente na imagem original em um outro nível. Esse mapeamento é resultante da aplicação da função de distribuição acumulada na

frequência de ocorrência de um determinado nível. A função de distribuição acumulada é obtida acumulando-se as frequências de ocorrência dos níveis de intensidade menores que um determinado nível  $i$  e dividindo-se este total acumulado pelo número total de pixels na imagem. A equalização de uma imagem pode ser obtida com a seguinte equação:

$$C e_k = \sum_{i=0}^k \frac{f(i)}{N}, \quad (2.18)$$

Sendo:

$C e_k$ , representa a intensidade  $k$  equalizada pela função de distribuição acumulada.

$f(i)$ , representa o número de ocorrências da intensidade  $i$  na imagem original.

$N$ , representa o número de pixels da imagem.

### 2.3 – Trabalhos Correlatos

O microscópio óptico sempre teve grande importância na pesquisa e desenvolvimento de materiais (Fazano, 2005). Entretanto, esta importância ganhou um impulso com o acoplamento do microscópio a dispositivos de captura, exibição, tratamento e processamento para quantificação de imagens, visto que, os métodos tradicionais, apesar de serem efetivos, são demorados e tediosos, por exigirem medições contínuas para a validade dos resultados obtidos.

Segundo (Felisberto et al., 2004), muitos esforços são realizados com o objetivo de desenvolver uma ferramenta computacional automática ou semi-automática que utilize técnicas da Computação Gráfica, com o intuito de gerar algum tipo de análise de corrosão, de forma rápida e precisa, a partir de imagens digitais, visando à monitoração e/ou a prevenção da corrosão.

Um dos primeiros trabalhos nessa área, envolvendo processamento e análise de imagens para análise de corrosão é o de (Itzhak, et al., 1981). O objetivo do trabalho era analisar o grau de corrosão em uma placa em aço inoxidável AISI 304L. Para tal análise foram calculadas a probabilidade de surgimento de pites e a distribuição da área de pites. Utilizando um scanner a imagem era digitalizada e em seguida limiarizada para destacar os seus elementos. Então as regiões da imagem correspondentes aos pites eram preenchidas com um "X". A área do pite era medida contando-se o número de "X"s presentes na região pertencente ao mesmo. Diante

dos testes concluíram que o processamento de imagem aplicado à avaliação de corrosão por pites permitia um melhor entendimento do processo, bem como uma melhor estimativa dos seus danos.

(Choi & Kim, 2005) empregaram o processamento de imagens a fim de identificar o tipo de corrosão que ocorria em metais dentre os seguintes tipos: corrosão uniforme, corrosão por fenda, corrosão por pites, corrosão por atrito, corrosão intergranular. Para a caracterização, as imagens digitais foram caracterizadas com base na cor, textura e morfologia. Quanto à cor adotou-se como base o modelo de representação de cor HSI (*hue, saturation, intensity*), visto que o mesmo utiliza descrições de cor que são mais intuitivas do que as combinações de um conjunto de cores primárias (Azevedo & Conci, 2003). Em relação à textura, foi utilizado o método que implica na distribuição espacial dos tons de cinza na superfície da imagem. No tocante à morfologia, foi empregado o conjunto de atributos de (Hall, 1979), que compreende área, comprimento, perímetro entre outros. Os testes do sistema foram realizados em 100 imagens e obteve um taxa de acerto de aproximadamente 85%.

O método de proposto por (Kapsalas, *et al.*, 2007) para a análise de corrosão tem por base o processamento de imagem para a avaliação quantitativa e qualitativa dos efeitos da degradação em superfícies rochosas. A estrutura utilizada para análise foi a do mármore. Com o processo de corrosão, ocorre a formação de uma crosta sobre a superfície da rocha e a formação de gesso e a recristalização do carbonato de cálcio. A superfície da rocha foi limpa com pulsos de LASER para remoção da crosta deixada pela corrosão. Foram utilizadas diferentes técnicas para fotografar a superfície da estrutura. As imagens foram então segmentadas, de modo que as partículas pretas representassem a parte da crosta que não foi limpa e as partículas brancas representam o gesso e o carbonato. Com base na segmentação, fez-se a medição da área das regiões da imagem. Os testes foram executados em 33 imagens e com isso pode-se observar que os efeitos da deterioração que não podem ser removidos pelo processo de limpeza é reduzida em sua extensão.

Outra ferramenta proposta para a análise de corrosão, a partir de imagens digitais, é a de (Bento, *et al.*, 2009), o qual apresenta um método de avaliação não destrutiva para inspeção de corrosão em superfícies metálicas. A caracterização das amostras se baseia na textura, distribuição espacial dos tons de cinza na superfície da imagem, e em um algoritmo de clustering, cuja técnica é baseada no

agrupamento automático de dados segundo seu grau de semelhança. A identificação da corrosão ocorre comparando-se as áreas corroídas com as não corroídas da amostra. Os experimentos foram feitos em 20 imagens distintas e 93% delas tiveram suas áreas corroídas corretamente identificadas.

O método proposto por (Zaidan, *et al.*, 2010), para a detecção de corrosão em materiais metálicos, definiu a análise de textura como a principal base para o procedimento. Contudo, a ferramenta ainda dispõe de funções para detecção de aresta e dilatação de imagem para auxiliar na análise por textura, a fim de obter um melhor resultado. Tal solução identifica a textura áspera como área corroída e a textura simples como área não corroída. Os testes mostraram um bom resultado em termos de detecção de corrosão visíveis.

Em seu trabalho, (Fernandes, *et al.*, 2012) utilizam as técnicas de análise e processamento de imagem, visando, especificamente, a análise de pites de corrosão em ligas de alumínio 1050 e 6061. Quanto ao processamento de imagens, o sistema é constituído por um filtro de média, o método de segmentação por limiarização de Otsu (Otsu, 1979), o qual determina automaticamente o limiar “ótimo”, com base no histograma da imagem e pelas operações morfológicas abertura e fechamento, as quais são uma composição de erosão e dilatação. No que tange à análise de imagens, o software apenas dispõe da contagem e medição do diâmetro dos pites, exibindo o resultado em uma planilha do Excel. Os testes do software foram realizados em 50 imagens de alto contraste e obteve uma taxa de acertos de 66%.

Ainda existem poucos trabalhos desenvolvidos na área de análise de imagens para detecção de corrosão em microestruturas de materiais. As ferramentas desenvolvidas possuem um caráter mais classificatório e de identificação, como pode ser observado através dos trabalhos aqui apresentados. Entretanto os procedimentos propostos por (Itzhak, *et al.*, 1981) e (Fernandes, *et al.*, 2012), assim como esta dissertação, tem um foco específico na monitoração da corrosão por pites, área esta ainda pouco explorada pelas pesquisas.

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGIA

Esse capítulo apresenta as ferramentas e tecnologias utilizadas no desenvolvimento deste projeto.

A execução deste trabalho seguiu as etapas ilustradas no fluxograma exibido na Figura 3.1. A metodologia proposta será detalhada no decorrer deste capítulo.

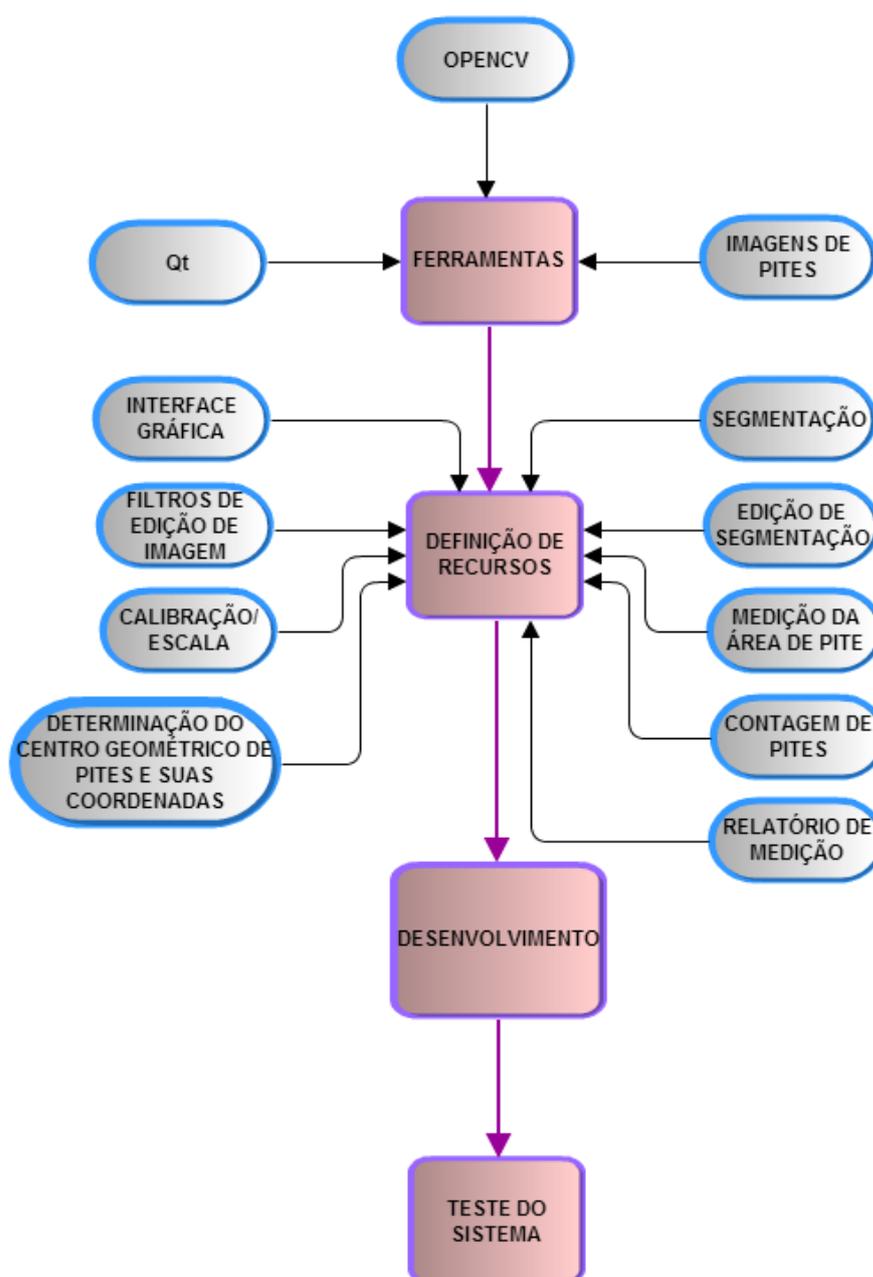


Figura 3.1 - Fluxograma com as etapas de execução da metodologia.

## 3.1 – Recursos Utilizados

### 3.1.1 – Qt Software

A primeira versão deste framework foi disponibilizada em maio de 1995. Inicialmente a empresa mantenedora era a Trolltech. Em 2012, a Digia adquiriu essa empresa, visando ampliar seus horizontes no desenvolvimento de aplicações independentes de plataformas.

Qt é um framework de desenvolvimento em C++ consistente e abrangente. Esse framework permite criar aplicações multiplataforma. A ideia utilizada na abordagem desse framework é a "write once, compile anywhere" (" programe uma vez, compile em qualquer lugar") (Blanchette, 2008).

O Qt oferece uma grande flexibilidade por ser multiplataforma, contudo essa não é a única vantagem do mesmo. Esse framework permite a utilização de uma API rica e útil e oferece um ambiente de programação em C++ mais amigável, permitindo a criação de interfaces gráficas elegantes.

O uso deste framework exige do usuário um conhecimento um pouco mais avançado em C++, bem como da técnica de programação orientada a objetos.

### 3.1.2 – OpenCV

O OpenCV (*Open Source Computer Vision*) é uma biblioteca open source e multiplataforma de visão computacional, desenvolvida pela INTEL, com o objetivo de facilitar o desenvolvimento de aplicações sofisticadas de visão computacional em tempo real (OpenCV, 2012).

A biblioteca foi desenvolvida utilizando as linguagens de programação C e C++ e engloba um conjunto de algoritmos otimizados que podem ser utilizadas em diversas áreas, tais como: segmentação, reconhecimento de faces, filtragem de imagens, aprendizado de máquinas, calibração de câmeras, identificação de objetos, dentre outras.

### **3.1.3 – Imagens de Pites de Corrosão em Cupons**

São utilizadas imagens digitais em tom de cinza de pites em cupons de corrosão expostos a meio corrosivo. Estas imagens são feitas no âmbito de outro projeto.

## **3.2 – Definição de Recursos do Programa**

O programa possui os seguintes recursos: interface gráfica, filtros de edição das imagens, calibração/escala das imagens, emissão de relatório de resultados, segmentação das imagens, supervisão da segmentação, medição de área de pite, contagem de pites e determinação de centro geométrico de pite e suas coordenadas.

### **3.2.1 – Interface Gráfica**

A interface do sistema possui uma área de exibição/edição de imagens, uma barra de títulos, uma barra de menus e barras de rolagem. Essa interface se assemelha àquelas presentes em programas editores de imagem. Isto permite que o usuário não enfrente dificuldade ao iniciar seu uso, aproveitando sua vivência com outros programas. Esta estrutura de interface caracteriza-se pela simplicidade, intuitividade, facilitando a operabilidade do mesmo.

### **3.2.2 – Filtros de Edição**

Quanto maior a qualidade da imagem, melhor será o resultado de sua análise pelo programa. Em algumas ocasiões, a imagem deve ser editada para aumentar contraste, destacar detalhes etc. O sistema contém alguns recursos de edição mais usuais para que o usuário não necessite utilizar outro programa de edição de imagens previamente, poupando-lhe tempo. Os seguintes filtros estão incluídos: suavização (Blur, Gaussiano e Média), detecção de borda (borda, Sobel e Laplace) e os morfológicos (erosão e dilatação).

### **3.2.3 – Calibração da Dimensão**

As imagens da superfície dos cupons de corrosão são produzidas por câmera conectada a um microscópio. As dimensões dos aspectos da estrutura retratados na imagem devem ser informadas ao programa para que este possa determinar na unidade correta os valores das medições. Para isso, o recurso de calibração da dimensão das imagens deve ser utilizado. A função deste recurso é a de determinar a quantos pixels da imagem corresponde uma unidade de comprimento em uso para medir dimensões na estrutura. Por exemplo, quantos pixels da imagem correspondem a 1  $\mu\text{m}$  na estrutura. Com esta relação, qualquer medição em pixels feita pelo programa na imagem, pode ser convertida para uma unidade de comprimento, área ou volume.

### **3.2.4 – Segmentação de Pites**

O processo de identificação dos pites na imagem é realizada por uma rotina de segmentação que consiste em dividi-la em regiões distintas, com base na diferença de tonalidade. Após a segmentação pode-se fazer o uso de operações morfológicas, visando eliminar pixels internos não reconhecidos e aumentar a área dos pites identificados.

### **3.2.5 – Segmentação Supervisionada de Pites**

A aplicação deste recurso é realizada manualmente e é um complemento à rotina de segmentação de pites. Por meio dele é possível eliminar, erodir e dilatar pites detectados, porém considerados indesejáveis. Também é possível incluir pites que não foram identificados na segmentação.

### **3.2.6 – Medição da Área e Distribuição de Pites**

Esta rotina calcula o número de pixels em cada pite identificado na imagem e utiliza a escala de conversão introduzida no item 3.2.3 para determinar a área do pite. Tendo-se a área de cada pite, pode-se calcular a soma das áreas e a área mé-

dia. Pode-se ainda determinar a distribuição de área de pite que permita produzir um histograma da área de pites.

### **3.2.7 – Contagem de Pites e Determinação da Densidade**

Com base na imagem segmentada, isto é, os pites devidamente identificados, torna-se possível realizar a contagem dos mesmos. A partir desse dado pode-se calcular a densidade de pites na imagem, onde esta é o quociente do número de pites pela área total da imagem. A densidade de pites será determinada pelo software.

### **3.2.8 – Determinação do Centro Geométrico de Pites e sua Coordenada**

A profundidade do pite é uma informação de suma importância para a área de corrosão. Para o cálculo da mesma é necessário conhecer as coordenadas  $(x, y)$  do centro geométrico do pite. Este recurso determina o centro geométrico de cada pite identificado e as coordenadas do mesmo. Com as coordenadas, a profundidade do pite pode ser medida. Esta medição será realizada no âmbito de outro projeto.

### **3.2.9 – Relatório de Caracterização**

Ao término da análise da imagem, o sistema gera um relatório com informações referentes à mesma. O relatório contém as seguintes informações: o número total de pites, a densidade de pites, a escala que foi utilizada para os cálculos, as áreas de cada pite, a área média, a área total, a distribuição de tamanho de pites e a coordenada de seu centro geométrico.

## **3.3 – Teste do Sistema**

Os testes de validação do software foram realizados mediante a comparação dos resultados de análise de imagens analisadas computacionalmente com os resultados obtidos pelo método tradicional, este realizado por um técnico do laboratório

de corrosão da UENF. Os resultados serão plotados em gráficos, objetivando facilitar as devidas comparações.

As medições convencionais foram feitas no âmbito de outro projeto, porém é importante que o procedimento seja descrito aqui para também ser objeto de comparação com o procedimento de medição com o programa.

Foram escolhidas três imagens de superfícies de cupons submetidos ao ensaio de corrosão. As imagens possuem níveis distintos de dificuldade de caracterização. A dificuldade de medição diz respeito à pobreza de contraste da imagem, entre os pites e a região rugosa corroída, mas sem pites. Isto torna difícil para o operador da medição, seja pelo método tradicional ou pelo método aqui apresentado, a identificar os pites, sua extensão e seus limites.

Na medição tradicional, o operador usou o software Analysis 5 Olympus. O operador abre a imagem no software e aplica a operação de equalização na amostra para aumentar seu contraste. Em seguida, aplica o “zoom” que achar suficiente para identificar pites individuais. Ao identificar um pite, o operador usa uma ferramenta para medição de área. Para tanto, a região de interesse é circundada seja por uma figura geométrica regular, seja por uma poli linha e a área da região interior ao contorno é determinada e guardada em um arquivo. Este procedimento é repetido para todos os pites que o operador identificar. Ao final, os resultados são exportados para uma planilha excel, com a área e o perímetro de cada pite contornado, além dos valores médios de área e perímetro. O tempo gasto para completar a medição em cada imagem foi registrado.

O procedimento proposto neste trabalho consiste em melhorar a qualidade da imagem, caso necessário, para que se possa fazer a identificação dos pites e, por conseguinte, as devidas medições. O operador abre a imagem no software e aplica os recursos de edição, que julgar necessário. Ao obter uma imagem que considere de alto contraste o mesmo pode segmentar a imagem, no intuito de identificar os pites. De acordo com o processo de segmentação escolhido, o operador deverá clicar sobre os pites desejados ou, simplesmente, ajustar o parâmetro da segmentação para que o maior número de pites seja identificado. A partir da imagem segmentada se pode então realizar a análise dos pites. Para tanto é preciso definir uma escala. A calibração da dimensão pode ser feita a qualquer momento durante o processo. O resultado da análise é exibido em uma tela, contendo as informações descritas na

seção 3.2.9 – Relatório de Caracterização, e pode ser salvo em um arquivo de formato txt.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo, o programa desenvolvido é descrito em detalhes (interface e funcionalidades). Também são apresentados alguns resultados da caracterização e análise de imagens de pites de corrosão em cupons. Estes resultados são comparados aos resultados da caracterização convencional das mesmas imagens.

O software proposto neste trabalho foi desenvolvido utilizando a linguagem C++, o framework Qt para construção da interface e a biblioteca de processamento de imagens e visão computacional OpenCV. Todas estas ferramentas foram compiladas em ambiente Windows. Entretanto, cabe ressaltar que são ferramentas multi-plataforma, permitindo facilmente que se altere o ambiente de execução. As ferramentas auxiliam enormemente o desenvolvimento do código, sendo importante para o contínuo e planejado aprimoramento do programa, com a adição de novos recursos.

O programa permite ao usuário tratar uma imagem previamente, no intuito de destacar determinados objetos ou regiões, propiciando a caracterização e a análise com medições mais acuradas. No decorrer deste capítulo os recursos do sistema serão descritos.

#### 4.1 – Interface Gráfica

A interface do sistema foi definida com base na simplicidade, visando facilitar o uso do mesmo. Ao ser executado, o sistema exibe a tela principal (Figura 4.1). Ela é composta por uma barra de menus em que constam diferentes opções, operações de processamento de imagens, até a caracterização e análise de pites de corrosão. Cada uma das opções existentes na barra de menu principal exibe mais opções relacionadas, em um menu suspenso, quando o usuário clica com o mouse sobre elas. As opções do menu estão classificadas segundo sua função, para facilitar sua localização pelo usuário. Esse é o método adotado pela maioria dos programas.

A barra de menus é composta por 8 menus principais, que são:

- *Arquivo*, este menu é constituído pelos sub-menus Abrir, Salvar e Sair;
- *Imagem*, composto por Zoom (Zoom In, Zoom Out e Tamanho Normal), Desfazer, Refazer e Transformar (Espelhar verticalmente, Espelhar horizontalmente, Rotacionar 90° horário e Rotacionar 90° anti-horário);
- *Operações*, constituído de Monocromática, Negativo, Soma e Subtração;
- *Filtros*, constituído pelos sub-menus Suavização (Blur, Gaussiano e Média), Detectores de Borda (Borda, Laplace e Sobel) e os Morfológicos (Erosão e Dilatação);
- *Segmentação*, composto por Binária, Detecção de Contorno, Limiar e Cluster;
- *Ferramentas*, composto por Escala e Informação (Histograma e Equalização de Histograma);
- *Estereologia* composto por Continuidade e Intercepto Linear; e
- *Caracterização* composto por Análise de Pites e Deletar Lote de Pites.

A interface do sistema contém ainda uma barra de ferramentas, que possui algumas funções idênticas àquelas encontradas na barra de menus, e outras específicas, dentre as quais merecem destaque a Segmentação Supervisionada; barras de rolagem, vertical e horizontal; uma barra de status, onde são exibidas informações como, a posição  $(x, y)$  do pixel; e uma área de exibição.

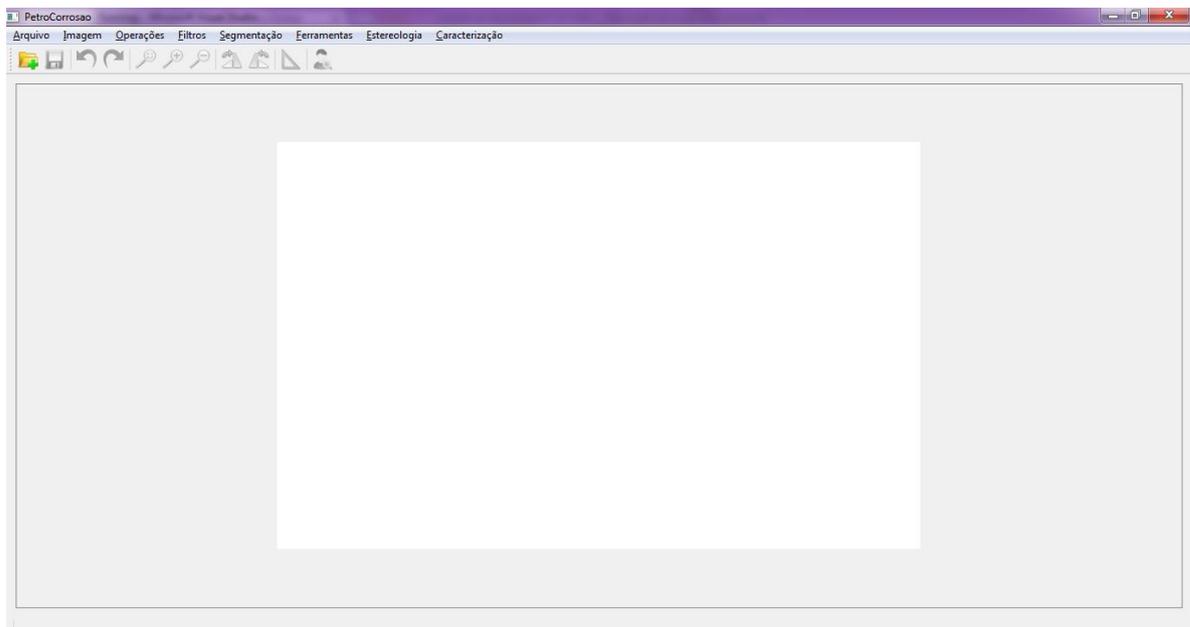


Figura 4.1 - Tela principal do programa.

A utilização do programa requer inicialmente que uma imagem seja carregada no programa. O programa oferece suporte aos seguintes formatos de imagens: bmp,

dib, jpeg, jpg, jpe, pgm, pbm, ppm, png, tif e tiff. Para carregar a imagem, o usuário deve escolher a opção “Arquivo” no menu principal e então “Abrir”. Nessa opção, o usuário pode ainda salvar uma imagem processada ou sair do programa.

## 4.2 – Filtros de Edição

Os recursos de edição presentes no programa foram definidos com base na aplicabilidade dos mesmos diante do problema exposto. Na opção “Filtros” do menu principal existem diversas opções. A primeira opção é “Suavização”. A segunda é Detector de Borda e a terceira são Filtros Morfológicos. Os filtros são aplicados em máscaras sobre a imagem de 3x3 até 9x9 pixels.

As Figuras 4.2, 4.3 e 4.4 ilustram a aplicação dos filtros de suavização em uma imagem de pites de corrosão em cupons. A esquerda é exibida a imagem original de trabalho e a direita a mesma imagem após a aplicação do filtro. Apesar da aparência de uma imagem borrada no resultado, este filtro é de extrema importância, porque ele auxilia na redução de ruídos da imagem.

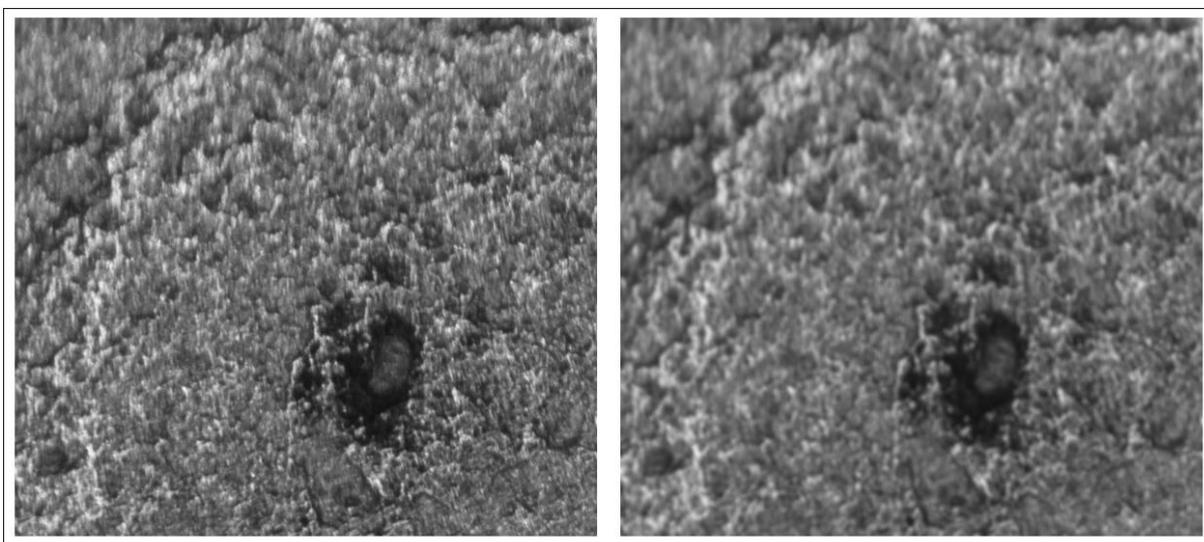


Figura 4.2 - Aplicação do filtro Blur com máscara 5x5.

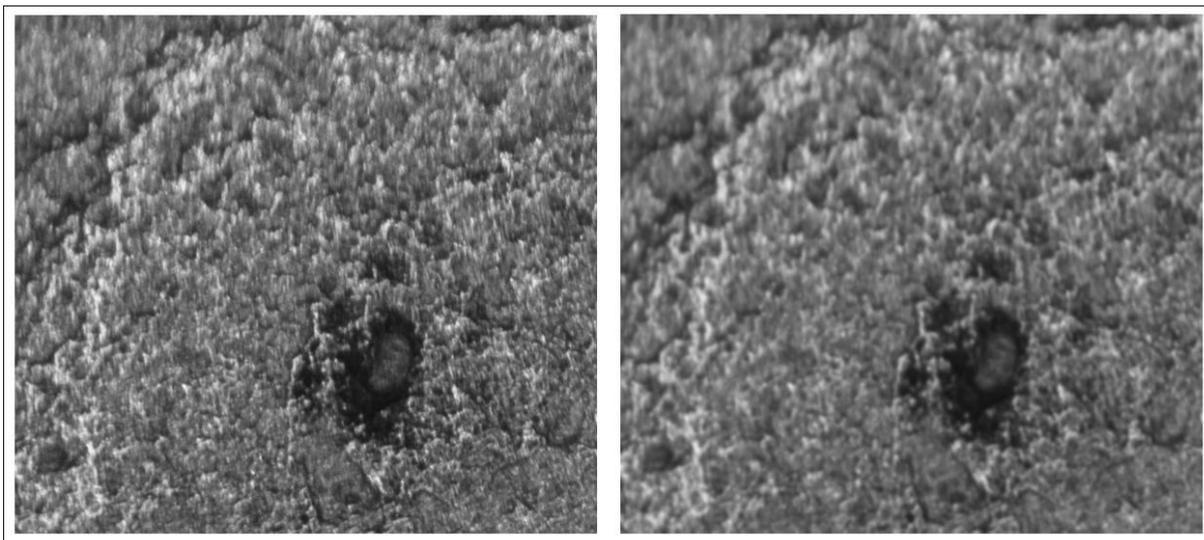


Figura 4.3 - Aplicação do filtro Gaussiano com máscara 5x5.

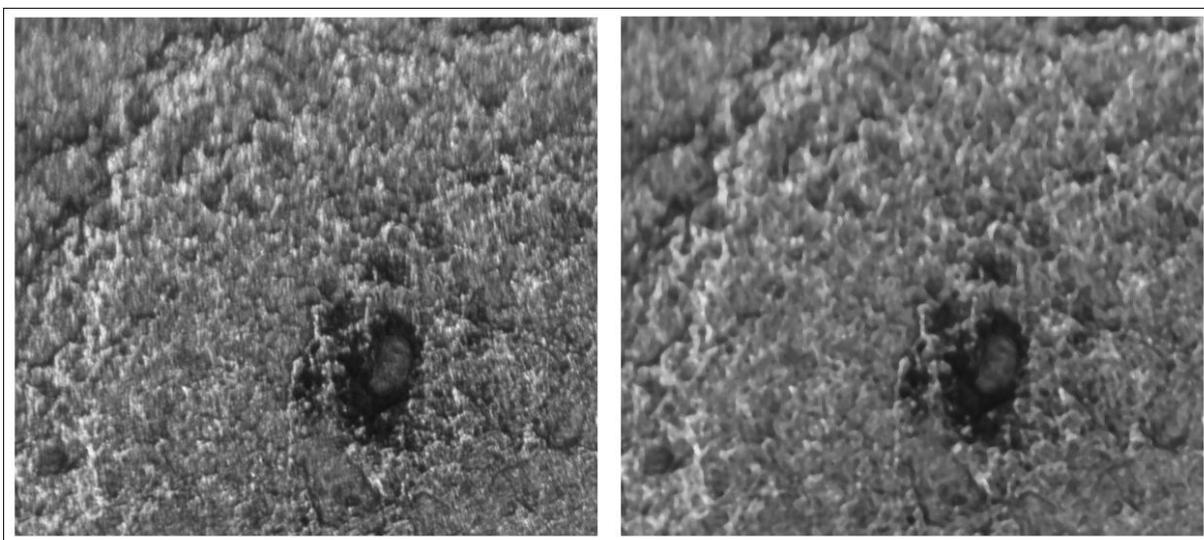


Figura 4.4 - Aplicação do filtro Média com máscara 5x5.

Os detectores de borda são oferecidos em três variações: Borda, Laplaciano e o Sobel. O Laplaciano e o Sobel contêm máscaras de convolução que variam desde 3x3 até 9x9. A Figura 4.5 ilustra a imagem de trabalho após ser submetida ao operador de borda. Note que as bordas dos círculos foram realçadas.

A Figura 4.6 mostra o resultado do detector de borda de Laplace aplicados em máscaras de 3x3. A Figura 4.7 mostra o resultado da aplicação do detector de borda de Sobel. O resultado é diferente daqueles mostrados anteriormente. Cada método produz resultados específicos que podem ser o desejado, dependendo do objetivo.

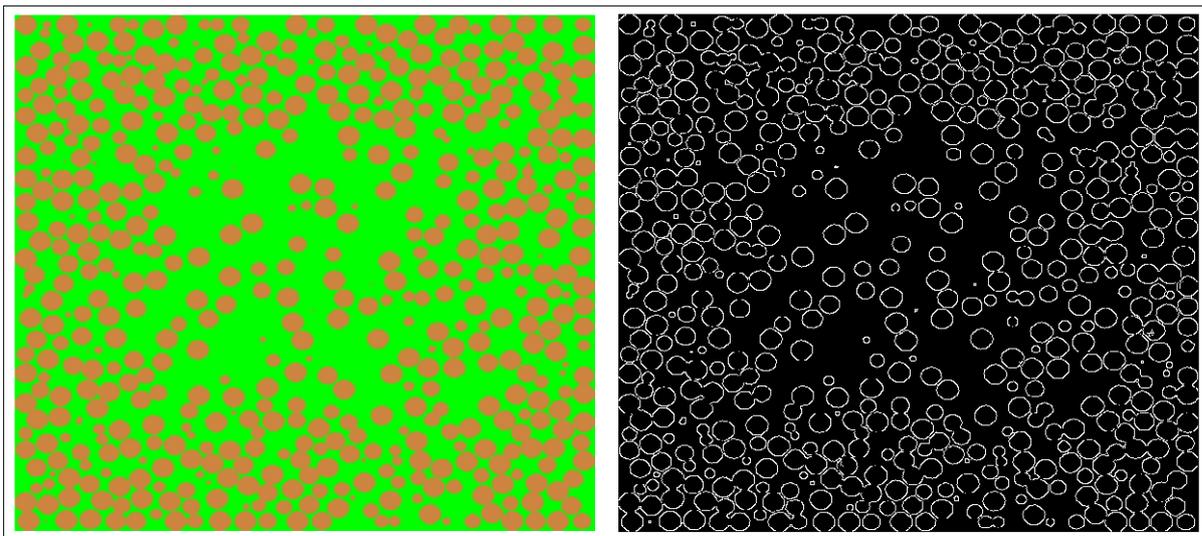


Figura 4.5 - Resultado da aplicação do operador de borda.

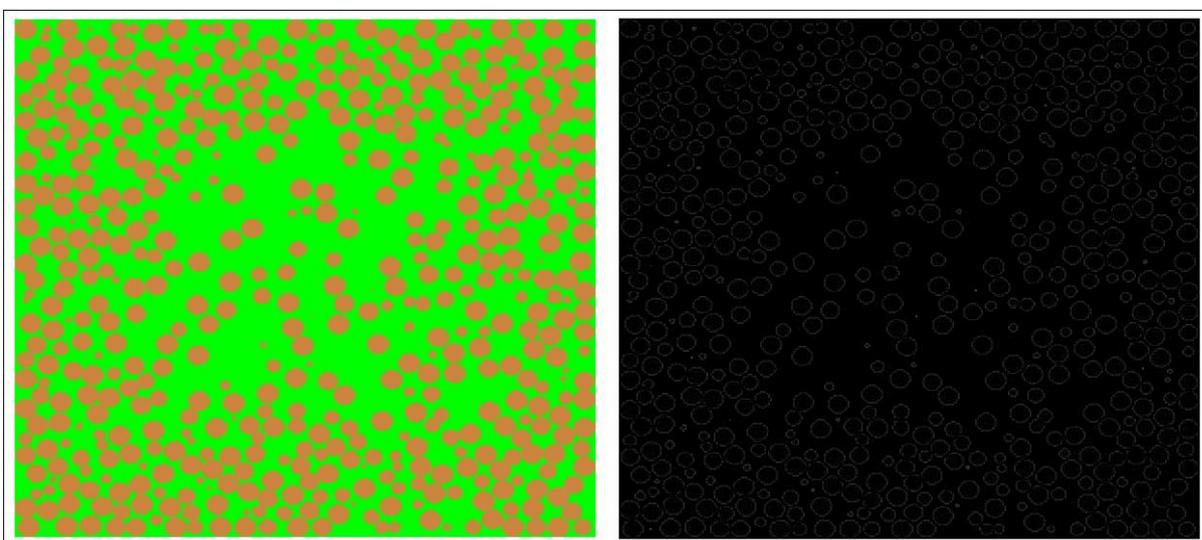


Figura 4.6 - Operador de Laplace aplicado em máscara 3x3.

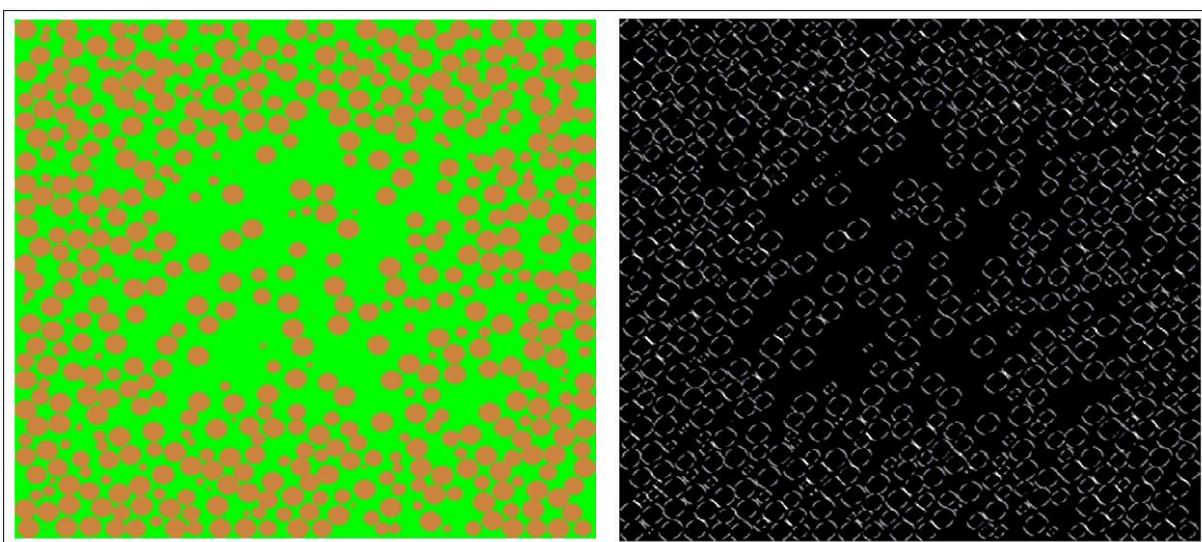


Figura 4.7 - Operador Sobel aplicado a imagem com máscara 5x5.

A dilatação e a erosão são os filtros morfológicos oferecidos pelo programa. O primeiro tende a expandir os objetos da imagem, enquanto o segundo tende a contrai-los. A Figura 4.8 mostra aplicação da dilatação em uma imagem de pites de corrosão em cupons. Um exemplo da aplicação da erosão é ilustrado na Figura 4.9.

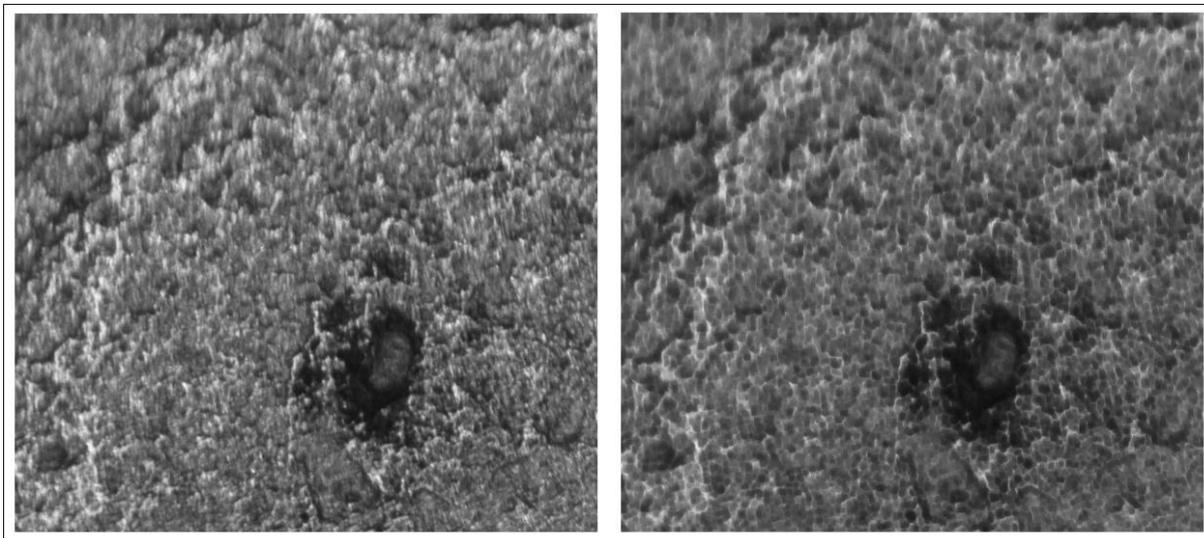


Figura 4.8 - Aplicação da dilatação.

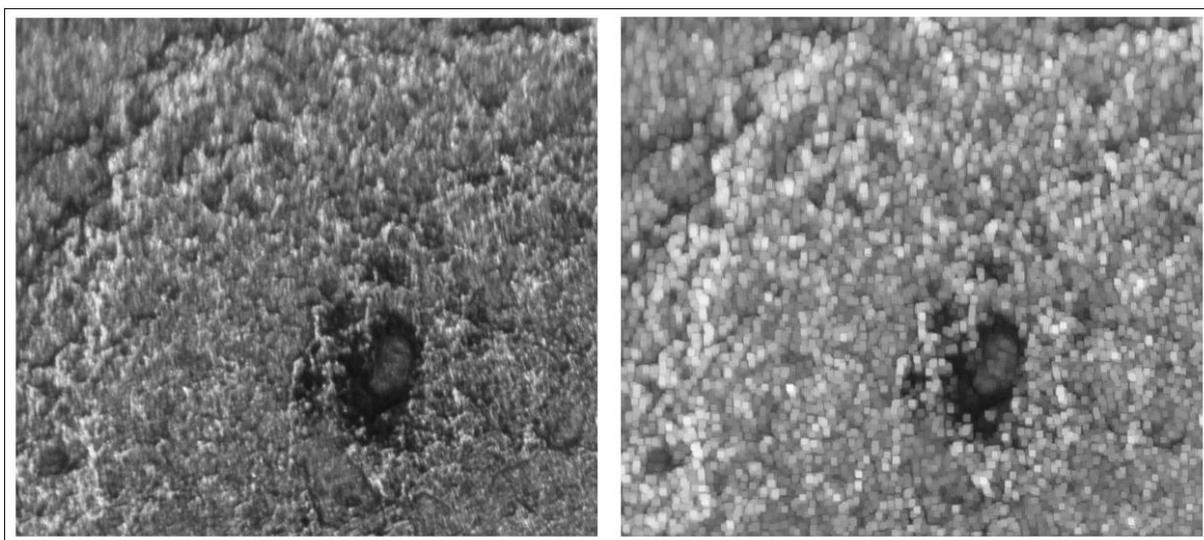


Figura 4.9 - Aplicação da erosão.

### 4.3 – Calibração da Dimensão

A opção “Escala”, presente no menu “Ferramentas” do menu principal, estabelece uma relação entre o tamanho da imagem em pixels ao tamanho real dos elementos representados na imagem. Obviamente, esse recurso funciona apenas se o usuário conhecer a escala da imagem que está sendo caracterizada.

Para estabelecer uma escala, o usuário escolhe a opção “Escala” no menu “Ferramentas” do menu principal. O usuário clica com o mouse em uma posição sobre a imagem. Mantendo o botão do mouse pressionado, o usuário arrasta o cursor, criando um segmento de reta. A ideia é que o comprimento da reta traçada seja igual ao comprimento de um detalhe da imagem cujo comprimento seja conhecido pelo usuário. Uma janela aparece com campos a preencher (Figura 4.10). O comprimento da reta traçada pelo usuário, em pixels, aparece na janela. O usuário deve preencher os campos com o comprimento real do segmento de reta e a unidade de medida utilizada. Logo abaixo dos campos preenchidos, o programa exibe a escala em pixels por unidade de trabalho.

Na janela de escalas há outras opções. O usuário pode salvar aquela escala com um nome qualquer para poder utilizá-la posteriormente na mesma imagem ou em outras que possuam a mesma relação de tamanho. Na janela, uma lista de escalas salvas anteriormente é mostrada para que o usuário possa escolher alguma, caso seja de seu interesse. O usuário pode ainda optar pela opção “global” da escala. Nessa opção, mesmo sem salvar a escala criada, pode-se usá-la em toda a sessão de trabalho, sem ter que fazer uma escala nova a cada imagem trabalhada.

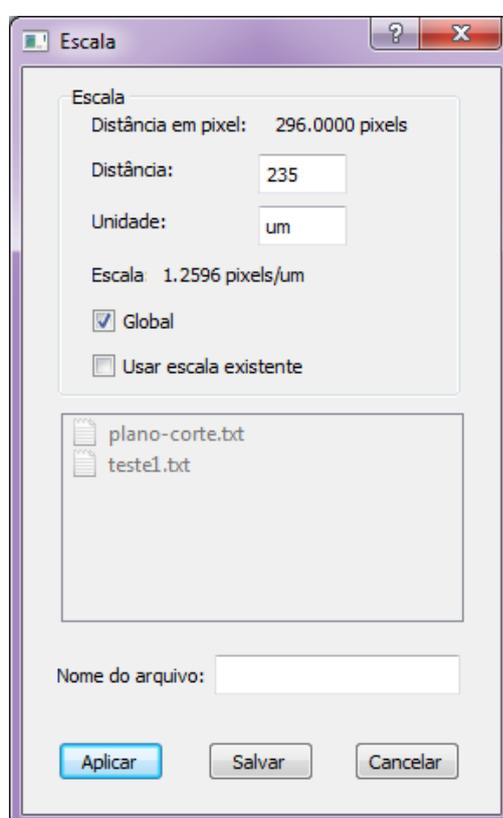


Figura 4.10 - Tela para preenchimento de informações da escala.

#### 4.4 – Segmentação de Pites

A opção “Segmentação” do menu principal traz quatro operações: binária, detecção de contorno, limiar e cluster. A segmentação é um recurso que pode identificar e separar a região do pite do restante da imagem

A opção binária transforma uma imagem em outra com dois tons: branco e preto. Para isso, a tonalidade de cada pixel da imagem é lida. Se essa tonalidade é superior a um certo valor ajustável pelo usuário, então o pixel é modificado para branco, do contrário é modificado para preto. O resultado é ilustrado na Figura 4.11.

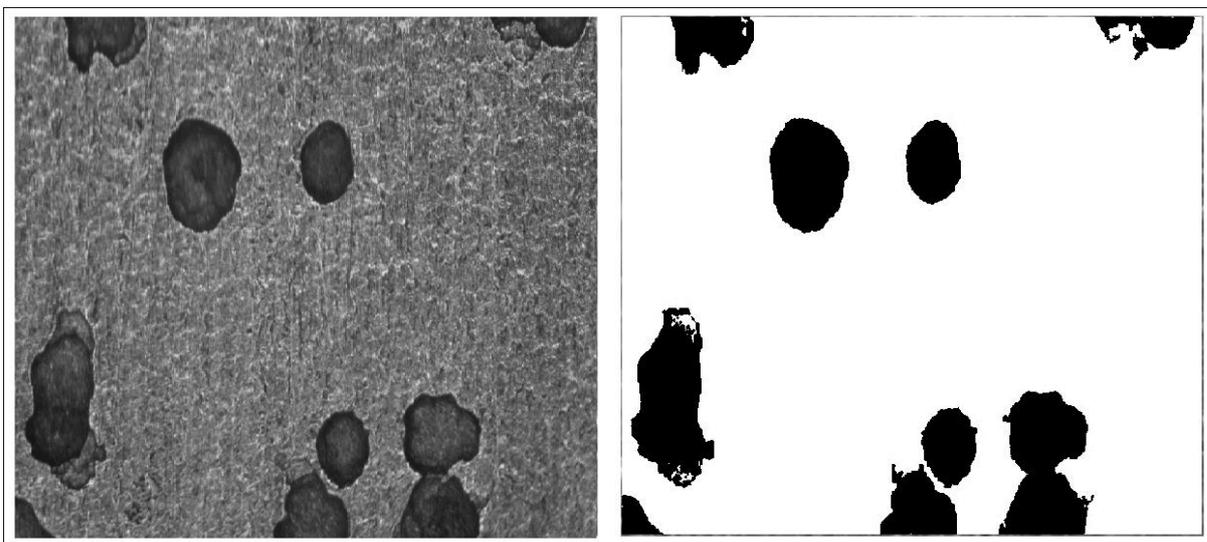


Figura 4.11 - Imagem binarizada com um limiar de 70.

A operação “detecção de contorno” identifica cada contorno, colorindo-os distintamente. A Figura 4.12 ilustra uma segmentação por esta técnica.

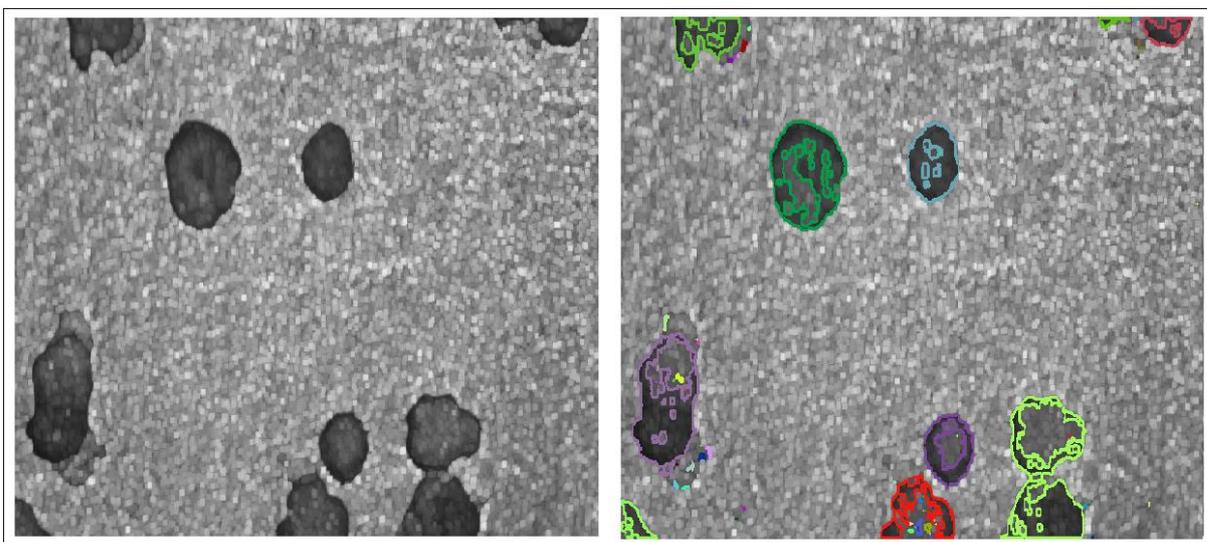


Figura 4.12 - Aplicação da detecção de contorno.

A operação “Limiar” é semelhante à binarização. Porém, enquanto a binarização transforma qualquer imagem em preto e branco, com uso de um valor referência dado pelo usuário, a operação limiar usa o valor de referência para transformar imagens, sem as transformar em preto e branco. Assim, imagens coloridas permanecem coloridas, embora mudem as cores. O resultado final é que o contraste entre as cores aumenta. Essa operação aplica o valor referência a cada canal de cor de todos os pixels. A Figura 4.13 exibe a imagem resultante da operação limiar, tornando melhor o contraste entre as fases.

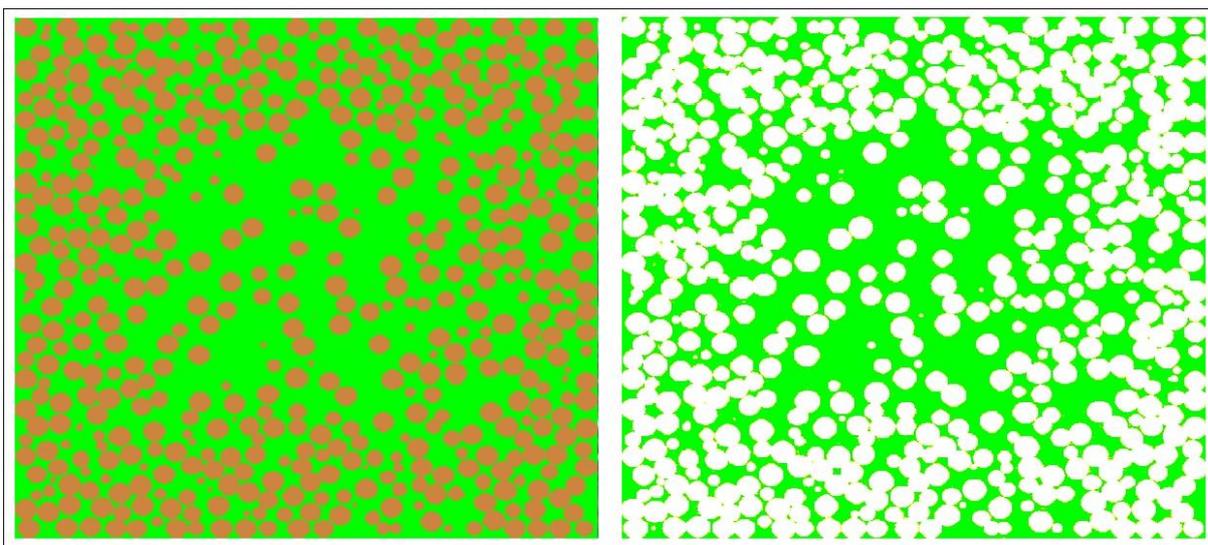


Figura 4.13 - Imagem após a aplicação da operação limiar.

A segmentação por cluster divide a imagem em diferentes regiões, identificadas por uma cor, de acordo com sua tonalidade e com base em quatro diferentes parâmetros ajustáveis pelo usuário. Tais parâmetros formam intervalos de valores e é a partir da verificação de em qual deles se encontra cada pixel que se dá a segmentação. Na Figura 4.15 pode se ver o resultado da mesma utilizando os parâmetros exibidos na Figura 4.14.

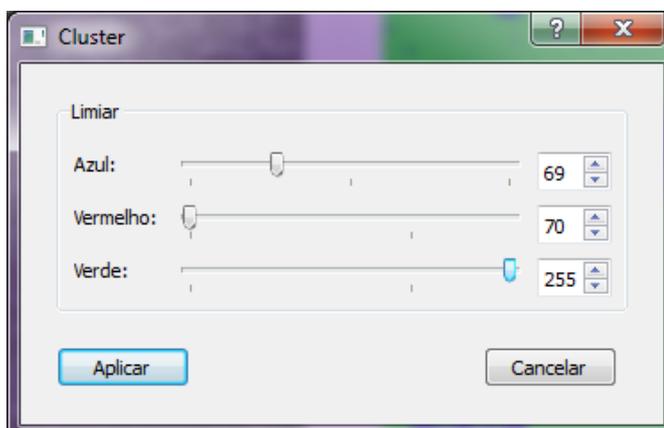


Figura 4.14 - Tela de ajuste de parâmetros da segmentação por cluster.

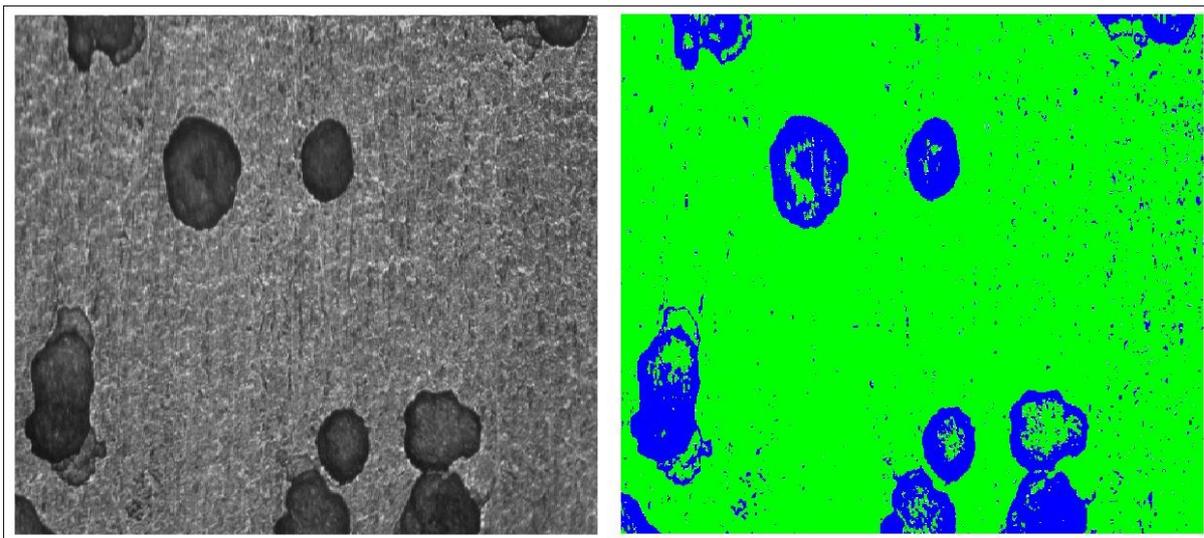


Figura 4.15 - Aplicação da segmentação por cluster.

#### 4.5 – Segmentação Supervisionada de Pites

Na barra de ferramentas existe a opção “Segmentação Supervisionada”, representada pelo ícone . Este recurso é um complemento à segmentação manual, através do qual pode-se incluir pites que não foram detectados e/ou eliminar, erodir e dilatar pites detectados.

Ao clicar sobre o ícone deste recurso, o programa exibe duas áreas de exibição de imagem lado a lado, como mostra a Figura 4.16, além dos ícones para inclusão, exclusão, dilatação e erosão de pites. A imagem da esquerda é a original e a da direita a que será trabalhada para que sejam realizadas todas as medições. Ao ativar este recurso, toda transformação aplicada será visualizada apenas na imagem da direita.



Figura 4.16 - Sistema com a segmentação supervisionada ativada.

A inclusão de pites é um recurso que permite adicionar um pite na imagem de trabalho que não foi reconhecido como tal pela segmentação manual. Pode, ainda, ser utilizada em substituição à segmentação descrita no item 4.4 – Segmentação de Pites. Neste caso, cabe ao operador o reconhecimento de cada pite a ser considerado para caracterização. A Figura 4.17 ilustra a inclusão de alguns pites na imagem de trabalho para posterior análise. Para ativar este recurso basta selecionar o ícone , que é exibido com a ativação da segmentação supervisionada. Na imagem da esquerda o usuário deve clicar sobre o pite que deseja incluir e o mesmo é incluído na imagem da direita. No exemplo exibido na Figura 4.17, inicialmente gerou-se uma imagem completamente branca e em seguida foram selecionados alguns pites para inclusão.

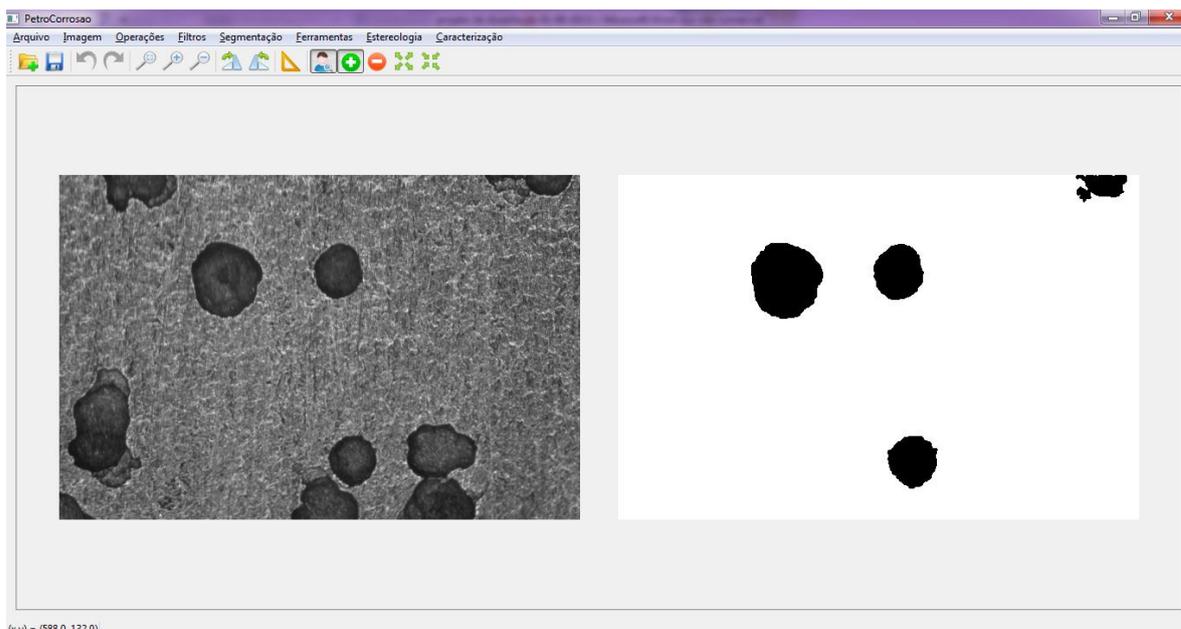


Figura 4.17 - Imagem da inclusão de pites.

O procedimento de exclusão de um pite é muito semelhante ao de inclusão. Para excluir um pite o usuário deve selecionar o ícone , na barra de Ferramentas e em seguida clicar sobre o pite que deseja excluir, na imagem original. Um exemplo desse recurso pode ser visto na Figura 4.18.

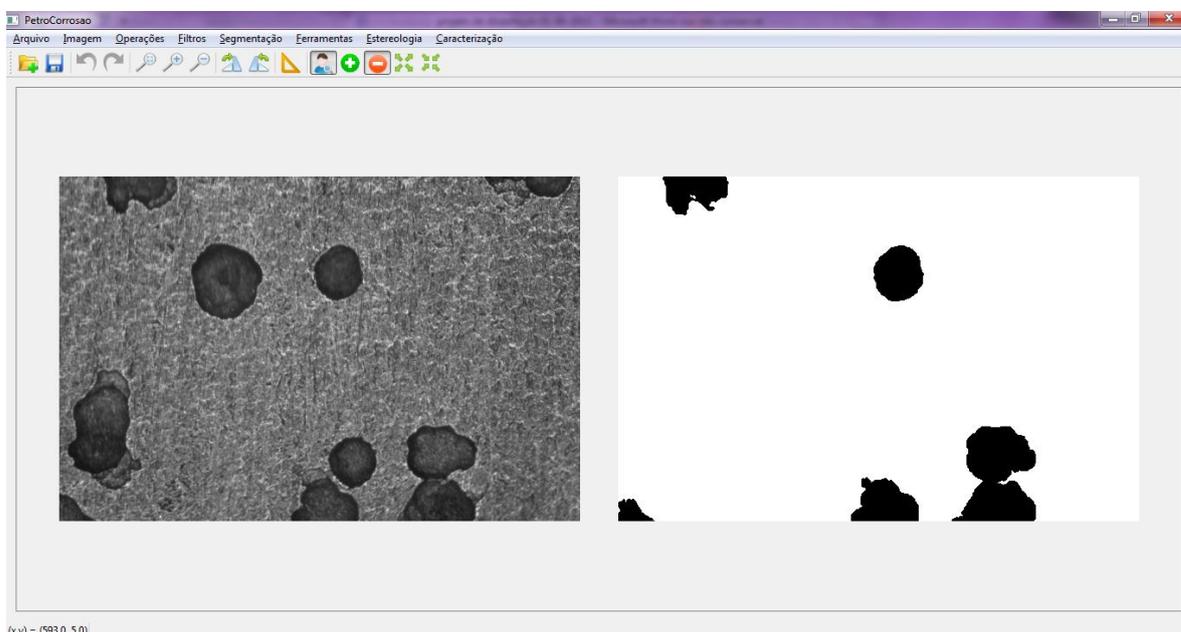


Figura 4.18 - Imagem da exclusão de pites.

Os filtros morfológicos podem ser aplicados em toda a imagem ou em apenas um determinado pite. Para aplicar em toda a imagem, basta selecionar a opção de “Dilatação” ou “Erosão” no menu “Filtros” do menu principal. Quando o intuito for aplicar tais filtros em pites isolados, basta selecionar o ícone  para dilatação ou o

ícone  para erosão na barra de Ferramentas. O usuário deve clicar sobre pite que deseja dilatar ou erodir, na imagem original e o mesmo será modificado na imagem de trabalho. A aplicação de tais recursos pode ser observada na Figura 4.19.

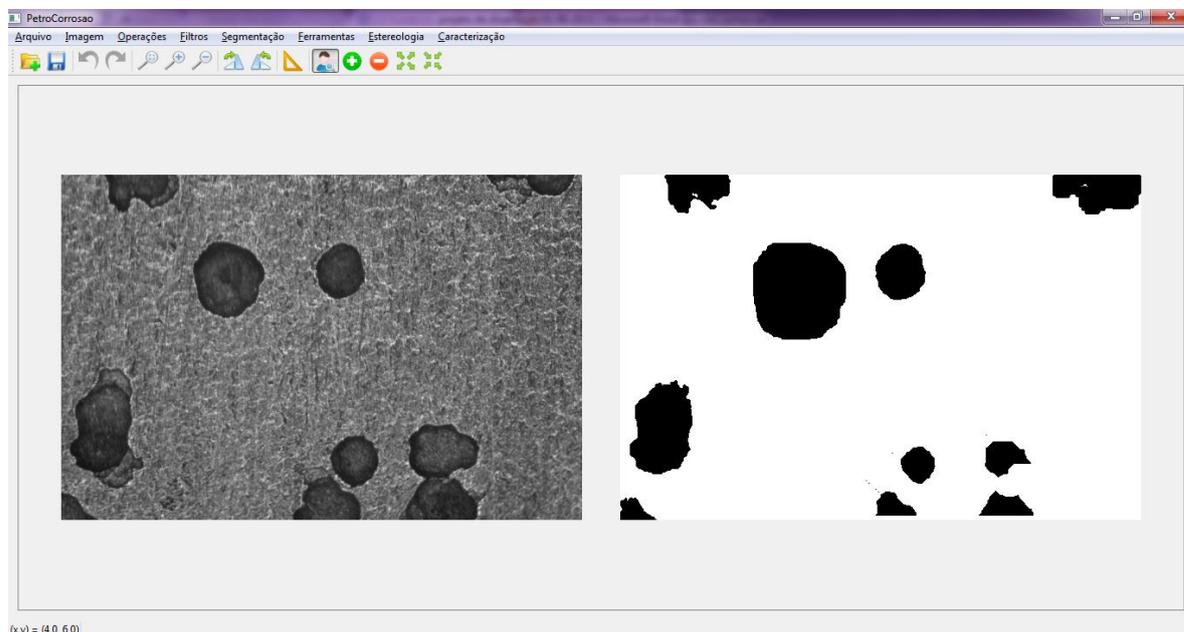


Figura 4.19 - Imagem com aplicação da dilatação e erosão em pites isolados.

O sistema conta ainda com um recurso de apagar um lote de pites. Na segmentação manual geralmente são identificados ruídos, como pode ser visto na Figura 4.20.



Figura 4.20 - Imagem de uma binarização manual.

Esses ruídos gerariam medições erradas se a análise fosse realizada sobre tal imagem. Para uma análise mais acurada é necessário apagar os ruídos da ima-

gem. Para isso basta selecionar a opção “Deletar lote de pites” no menu “Caracterização” do menu principal, um histograma da quantidade de pites pelo tamanho será gerado, como mostra a Figura 4.21. Para visualizar todo o histograma, basta clicar sobre o mesmo com o botão esquerdo do mouse e arrastar. A partir da análise do histograma pode-se informar um parâmetro de corte. Todos os objetos de tamanho menor ou igual ao parâmetro serão apagados da imagem. Um exemplo de aplicação pode ser visto na Figura 4.22, onde se observa que o valor do parâmetro de corte foi insuficiente para apagar todos os ruídos.

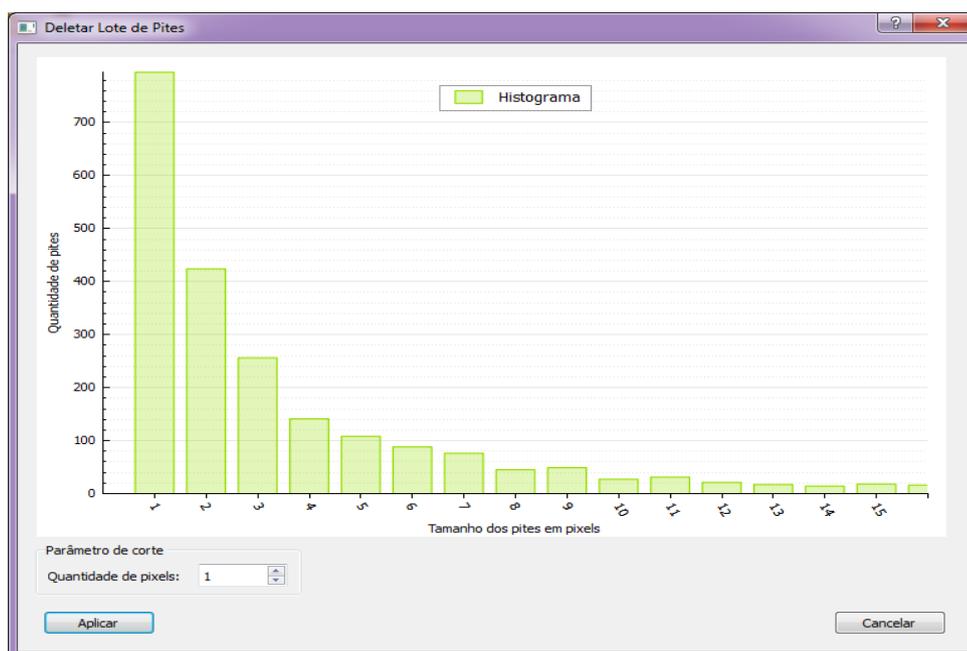


Figura 4.21 - Histograma da distribuição do tamanho dos pites.

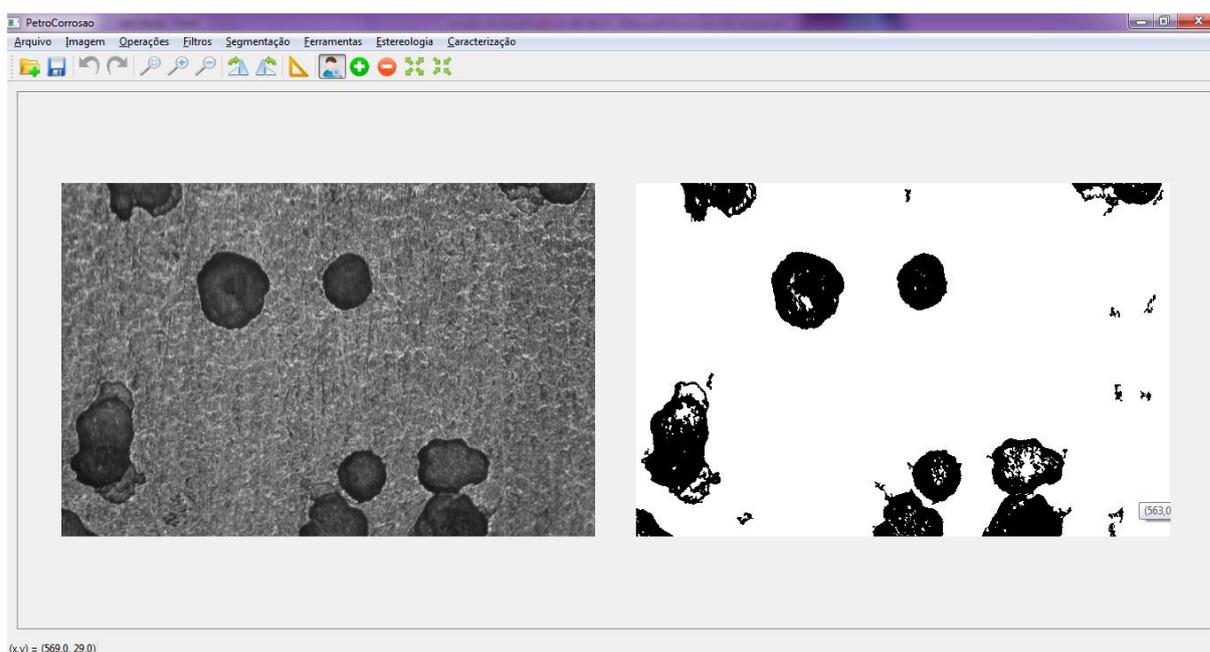


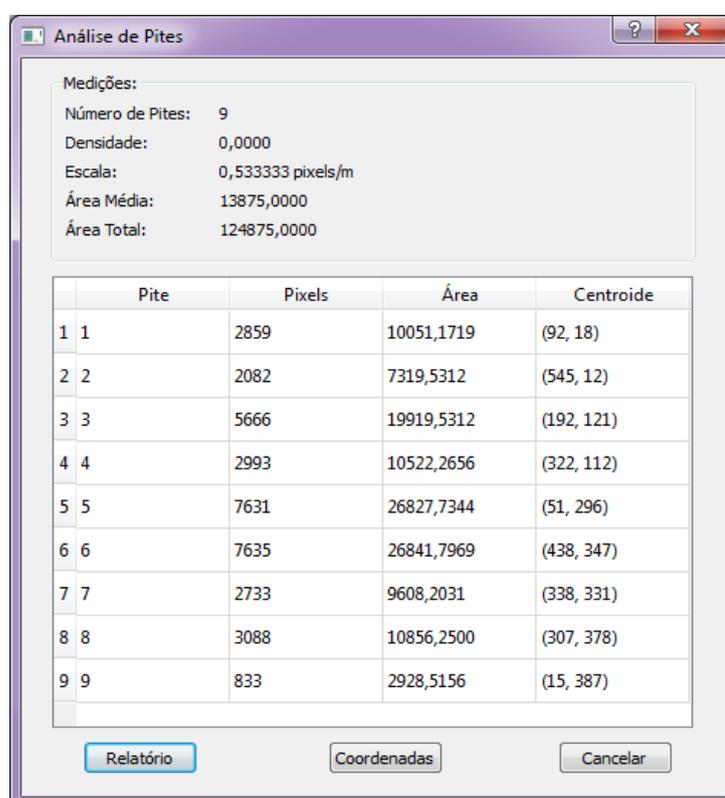
Figura 4.22 - Imagem após a aplicação do recurso de deletar lote de pites.

#### 4.6 – Caracterização dos Pites

O procedimento de caracterização dos pites fornece como resultado um relatório com as seguintes informações: número total de pites reconhecidos na imagem, escala adotada, densidade de pites, área total dos pites, área média de pites, número de pixels, área e coordenadas de centroide de cada pixel da imagem.

Esta opção pode ser encontrada no menu “Caracterização”, então “Análise de Pites”. Esta opção só poderá ser utilizada se a imagem estiver binarizada, ou seja, apenas existirem tons preto e branco. Obviamente, somente faz sentido proceder a caracterização, se a imagem estiver na qualidade desejada, ou seja, se ela exibir apenas os pites de interesse, de maneira satisfatória para o usuário. Caso uma escala ainda não estiver atribuída à imagem, o sistema requisitará que o usuário o faça.

A opção “Análise de Pites”, ao ser finalizada, exibe uma tela como aquela mostrada na Figura 4.23. Nesta tela, o usuário pode clicar em “Relatório” para gerar um arquivo no formato txt com os resultados, ou em “Coordenadas” para gerar um arquivo apenas com as coordenadas do centroide de cada pite, para ser utilizado pelo projeto encarregado de medir profundidade de pites.



Medições:

Número de Pites: 9  
 Densidade: 0,0000  
 Escala: 0,533333 pixels/m  
 Área Média: 13875,0000  
 Área Total: 124875,0000

	Pite	Pixels	Área	Centroide
1	1	2859	10051,1719	(92, 18)
2	2	2082	7319,5312	(545, 12)
3	3	5666	19919,5312	(192, 121)
4	4	2993	10522,2656	(322, 112)
5	5	7631	26827,7344	(51, 296)
6	6	7635	26841,7969	(438, 347)
7	7	2733	9608,2031	(338, 331)
8	8	3088	10856,2500	(307, 378)
9	9	833	2928,5156	(15, 387)

Relatório      Coordenadas      Cancelar

Figura 4.23 - Tela com a análise dos pites identificados.

#### 4.7 – Teste do Sistema

Três imagens com diferentes níveis de dificuldade de identificação de pites foram caracterizadas pelo método proposto aqui e pelo método tradicional de caracterização. Os recursos aplicados para melhoria da qualidade da imagem foram os mesmos, em ambos os procedimentos. Os resultados obtidos por ambos os métodos são apresentados e comparados.

A Figura 4.24 exibe a imagem de trabalho do primeiro teste. Nela pode-se observar o único pite presente na imagem, bem como a escala da mesma.

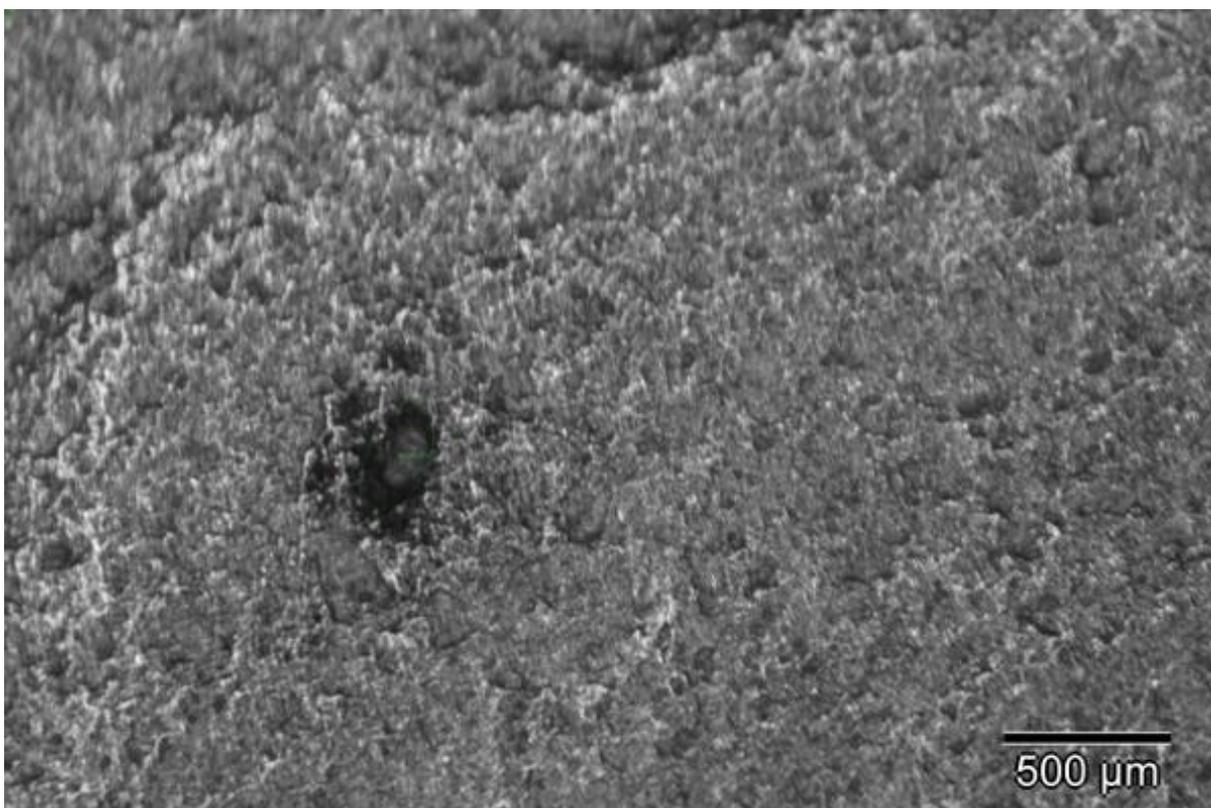


Figura 4.24 - Imagem original de alto contraste.

A Figura 4.25 mostra o único pite existente na imagem circundado pela ferramenta de medição do software Analysis 5 Olympus. Uma elipse foi usada para contornar o pite. A área da elipse é medida pelo software e representará a área do pite.

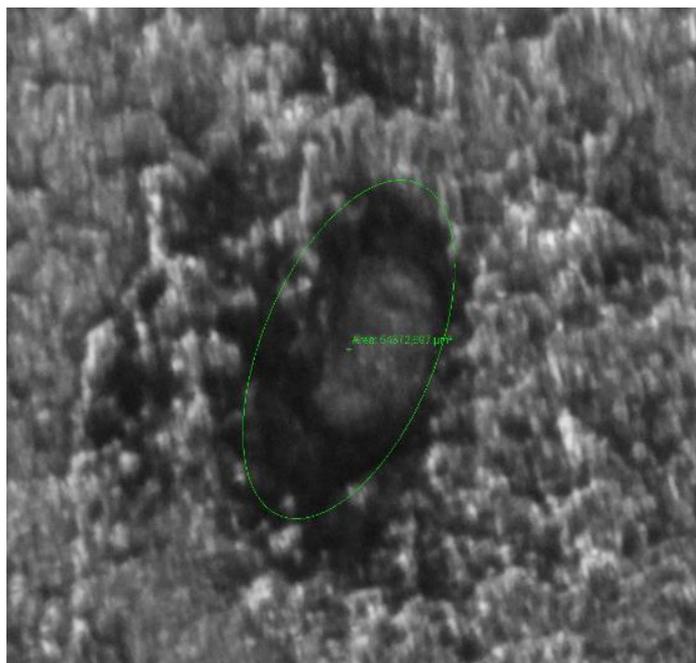
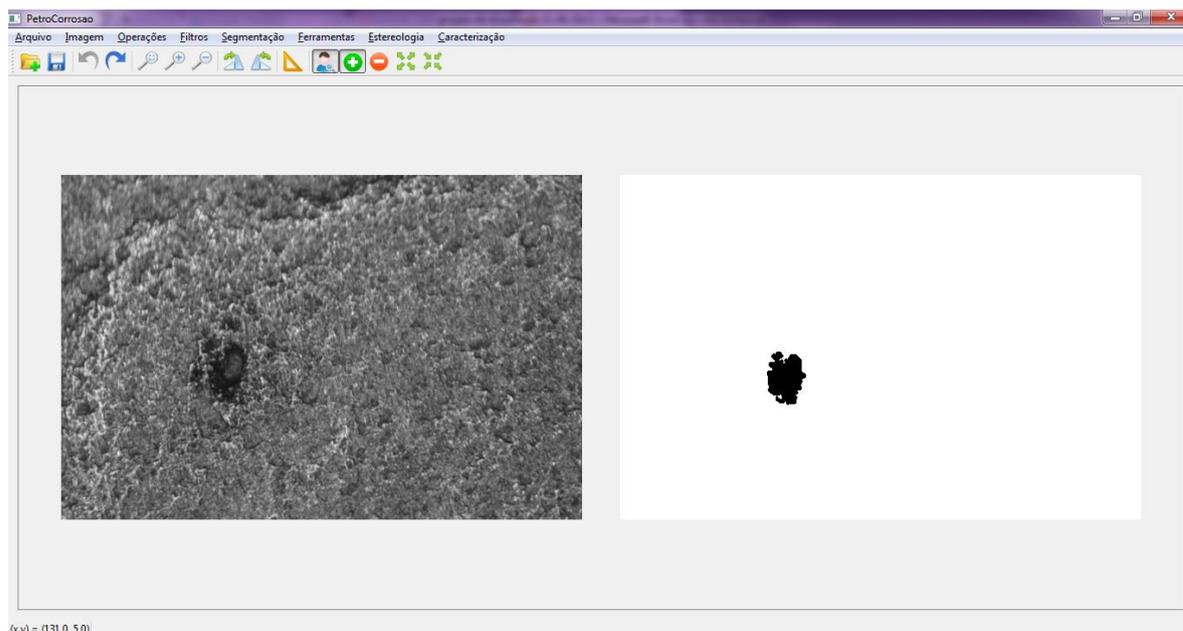


Figura 4.25 - Identificação de um pite com o Analysis 5 Olympus.

A Figura 4.26 é uma captura de tela do programa desenvolvido neste trabalho, que exibe a imagem a ser analisada, à esquerda, e o resultado da aplicação da segmentação supervisionada do pite, à direita. A técnica de segmentação supervisionada empregada foi a de inclusão de pite. Nesta, o operador clica com o mouse sobre a região do pite original. Sobre a imagem totalmente branca à direita, o pite existente na região clicada é desenhado em preto. O pite foi segmentado como resultado de um único clique. Cliques adicionais poderiam incluir novas regiões a este pite.

A área medida da elipse é de  $54.372,70 \mu\text{m}^2$ , enquanto que a área segmentada da Figura 4.26 é de  $75.546,88 \mu\text{m}^2$ . A medição tradicional é 72% da medição com o método proposto. Esta diferença pode ser facilmente explicada. Observando a Figura 4.25, percebe-se que a elipse utilizada para contornar o pite exclui partes dele. Esta é a razão da menor área medida.



**Figura 4.26 - Identificação do pite com o sistema.**

Aparentemente, a imagem do pite segmentado, mostrado na Figura 4.26 (direita), reproduz bem a imagem do pite original. Ela se assemelha mais ao pite original do que a elipse usada na medição tradicional. Isto explica o maior valor de área determinado pelo método proposto e assegura que este valor está mais próximo do valor real da área do pite.

Na Figura 4.27, o contorno do pite segmentado é sobreposto à imagem do pite original. Percebe-se claramente a melhor correspondência entre as formas dos pites original e segmentado, porém a correspondência não é ótima, visto que a parte superior do pite original não foi incluída no pite segmentado. Melhores resultados podem ser obtidos com novos cliques de mouse em regiões não incluídas inicialmente pelos cliques anteriores. Contudo, haveria o risco de inclusão de regiões não pertencentes ao pite original. Além disso, como as fronteiras do pite original quase nunca são nítidas, não é tarefa simples identificar regiões não incluídas, ou incluídas indevidamente nos pites segmentados. O certo é que a medição ficaria mais trabalhosa e longa, sem a garantia de que fique melhor.



Figura 4.27 - Sobreposição de contorno do pite segmentado na imagem original.

A Figura 4.29 mostra alguns pites da segunda imagem analisada. Para selecionar os pites desejados, uma ferramenta, do software Analysis 5 Olympus, que reproduz melhor o contorno do pite, foi utilizada. Nota-se que o pite foi mais bem contornado com esta ferramenta do que aquele pite exibido na Figura 4.25 foi com a elipse.

A delimitação de cada pite é importante na determinação de sua área. No caso da medição tradicional, é o operador quem determina o contorno do pite e, portanto, sua área. A Figura 4.29 mostra, em sua parte superior, dois pites juntos. Provavelmente, eram dois pites diferentes que se uniram ao crescerem. O da esquerda é mais escuro. O operador decidiu contornar somente o pite da esquerda. Assim, o pite mais à direita é ignorado.

A imagem de médio contraste, utilizada para o segundo teste do sistema, é apresentada na Figura 4.28, onde se pode visualizar todos os pites existentes na imagem e a escala da mesma.

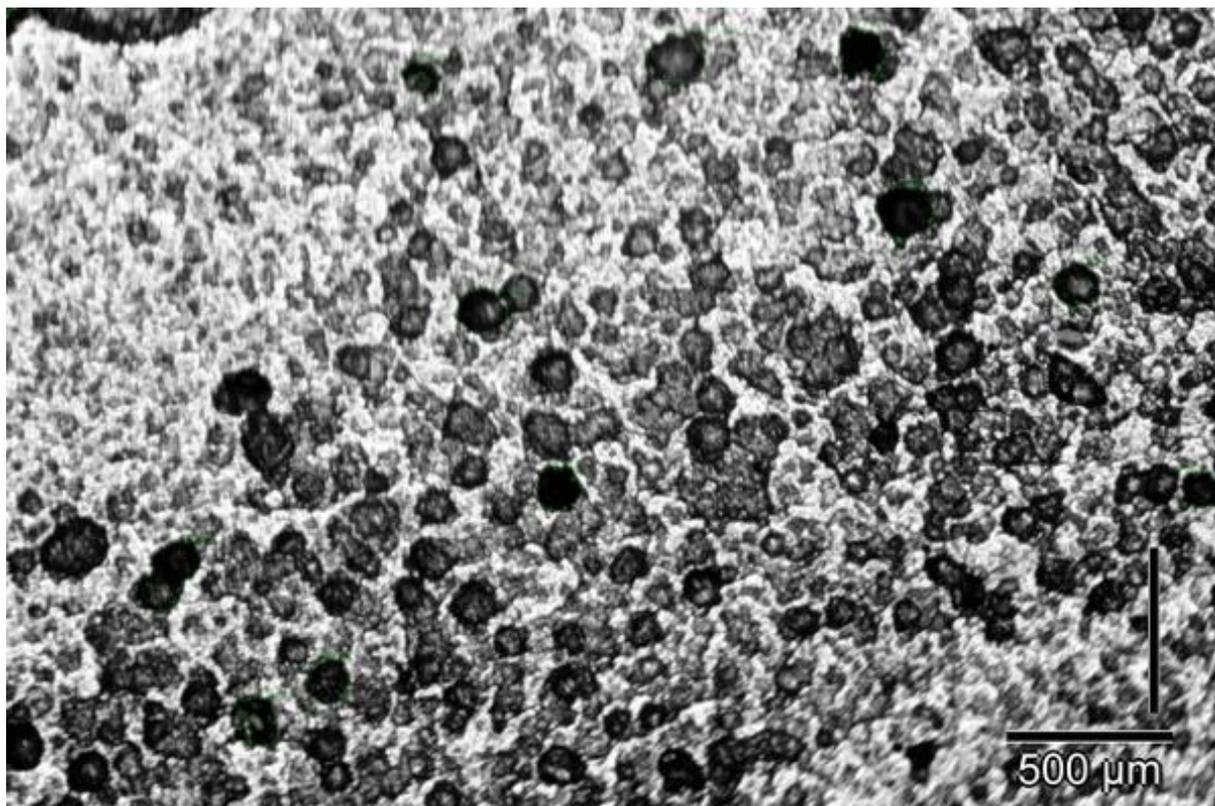


Figura 4.28 - Imagem original de médio contraste.

A Figura 4.30 exibe a tela do programa após a segmentação dos mesmos pites que foram reconhecidos pela medição tradicional. O recurso de segmentação utilizado aqui foi a da inclusão de pites a partir de uma tela branca à direita. O operador clica sobre os pites da imagem esquerda que ele deseja reconhecer. A área ocupada pelo pite é determinada pelo programa, e não pelo operador, com base no tom de cinza do pixel, em que houve o clique do mouse. Para aquele pite especificamente mostrado na Figura 4.29, o programa reconheceu os dois pites agregados como um só. O programa poderia reconhecer os pites separadamente, somente se a diferença de tonalidade fosse maior.

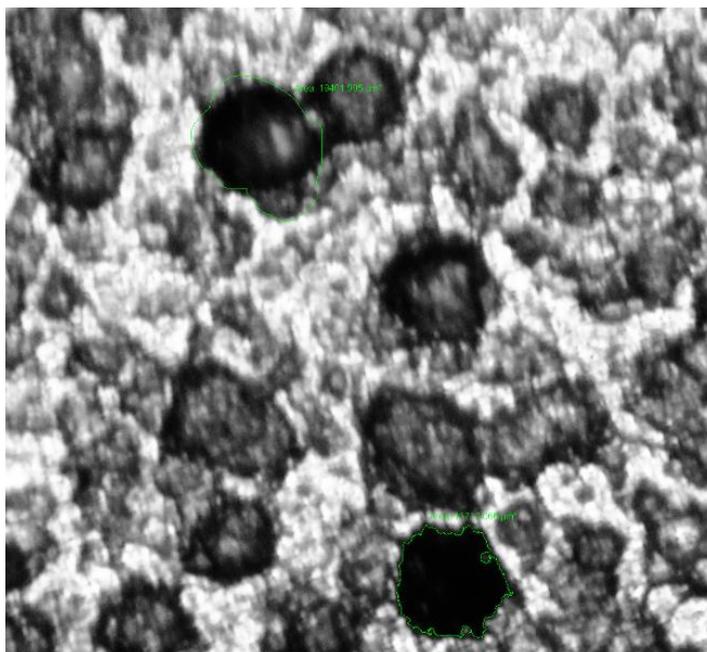


Figura 4.29 - Identificação de pites em imagem de médio contraste.

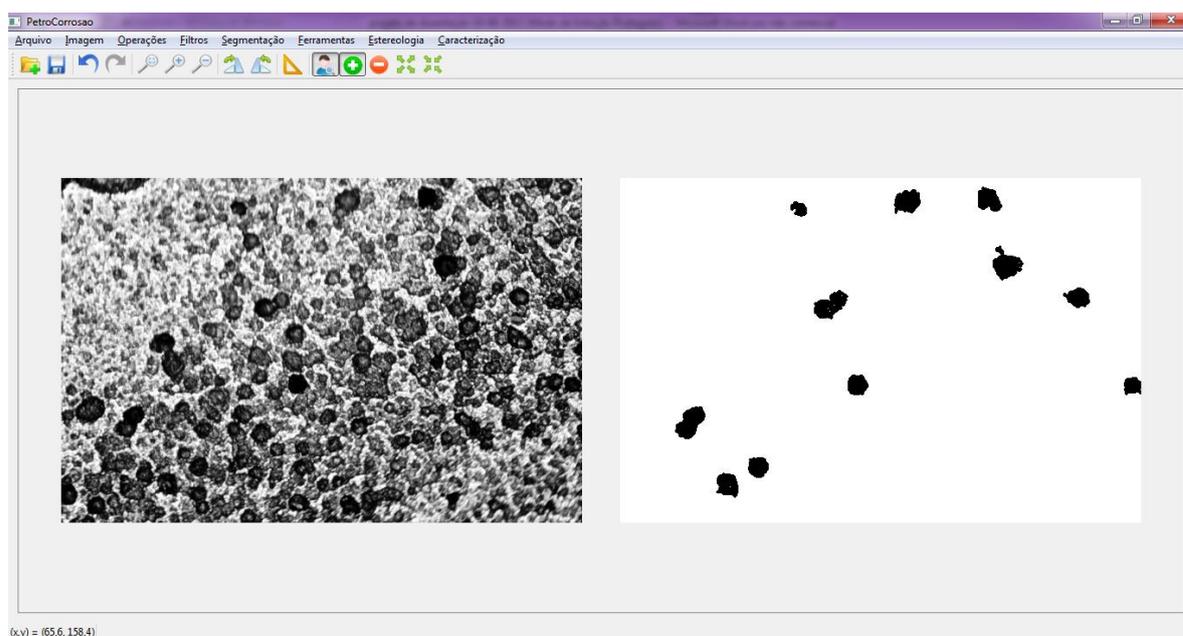


Figura 4.30 - Imagem de médio contraste, com pites identificados através do sistema.

Observando a sobreposição de contorno dos pites na imagem original, exibida na Figura 4.31, nota-se que os pites segmentados são muito semelhantes aos originais. Esta semelhança assegura que os valores calculados estão mais próximos dos valores reais. Percebe-se ainda que alguns pites não são contínuos, ou seja, possuem regiões internas que não são consideradas como pertencentes a ele. Isto ocorre por causa da tonalidade bastante mais clara destas regiões desconsideradas, em comparação ao tom do pixel em que houve o clique do mouse.

Na maioria das vezes, esta ocorrência é um erro. A tonalidade clara é causada por reflexos da iluminação do microscópio nas paredes do pite, e não por um eventual relevo do material dentro do pite. Alguns destes erros podem ser corrigidos com a aplicação das operações de erosão e dilatação em seguida para os pites em questão. Nos casos presentes, este recurso não foi aplicado.

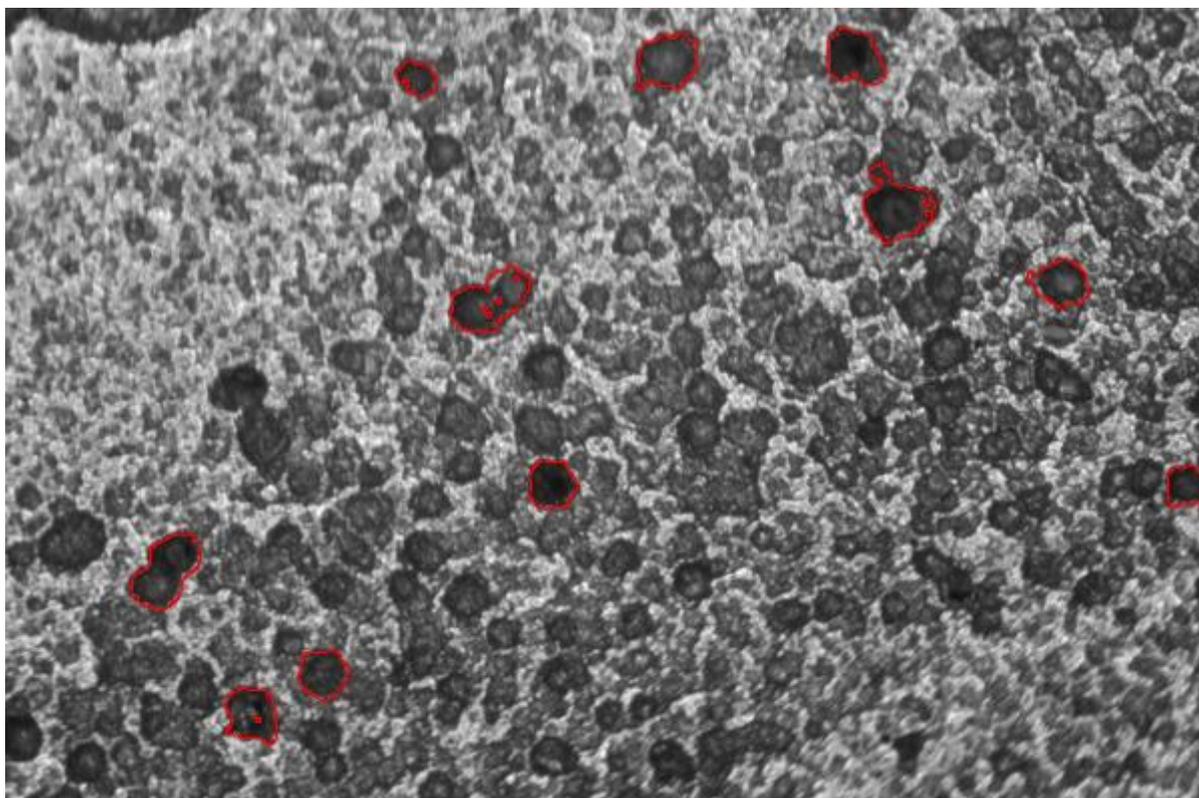


Figura 4.31 - Sobreposição de contorno de pite na imagem original de médio contraste.

O Gráfico 4.1 exibe os resultados de área para os 11 pites medidos tanto pelo método convencional, quanto pelo método proposto. O gráfico exibe ainda os valores médios de área dos pites medidos por ambos os métodos.

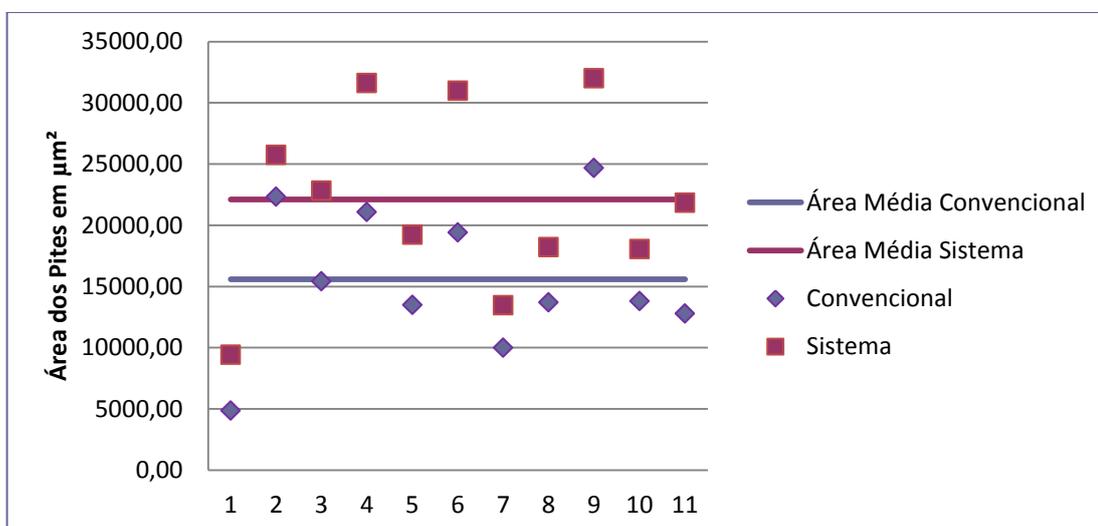


Gráfico 4.1 - Distribuição da área dos pites da imagem de médio contraste.

Nota-se que para todos os pites medidos, o método proposto apresentou área superior. Em média, os valores de área de pite determinados pelo método proposto foram 46% superiores aos valores determinados pelo método convencional. Porém estes valores variaram entre 15 e 93% superiores. Isto indica que o operador tendeu a uma avaliação conservadora ao contornar a área de cada pite, desconsiderando regiões que foram consideradas pelo programa desenvolvido aqui.

A Figura 4.32 mostra a terceira imagem caracterizada pelo método proposto. Devido à falta de contraste, esta imagem é considerada difícil de ser caracterizada.

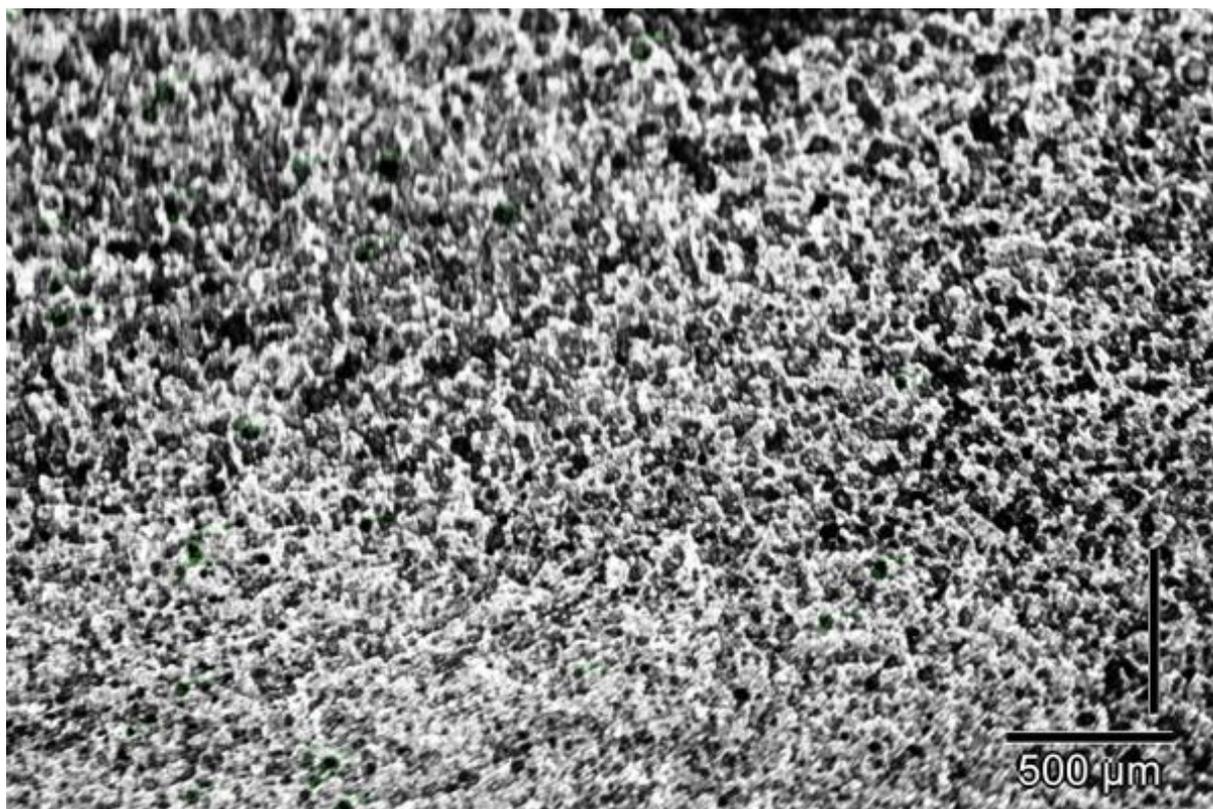


Figura 4.32 - Imagem original de baixo contraste.

Na Figura 4.33 três pites contornados em verde são ilustrados para mostrar como o operador reconheceu os pites e sua extensão. Nota-se que existem outras regiões de aparência semelhante àquelas que foram reconhecidas como pites, mas que foram desconsideradas. A ferramenta usada pelo operador é capaz de seguir contornos sinuosos, para simular a geometria do pite. Mesmo assim, falhas de contorno podem ocorrer, como se pode verificar no pite mais à esquerda, cujo contorno não reproduz a região escura que identifica o pite.

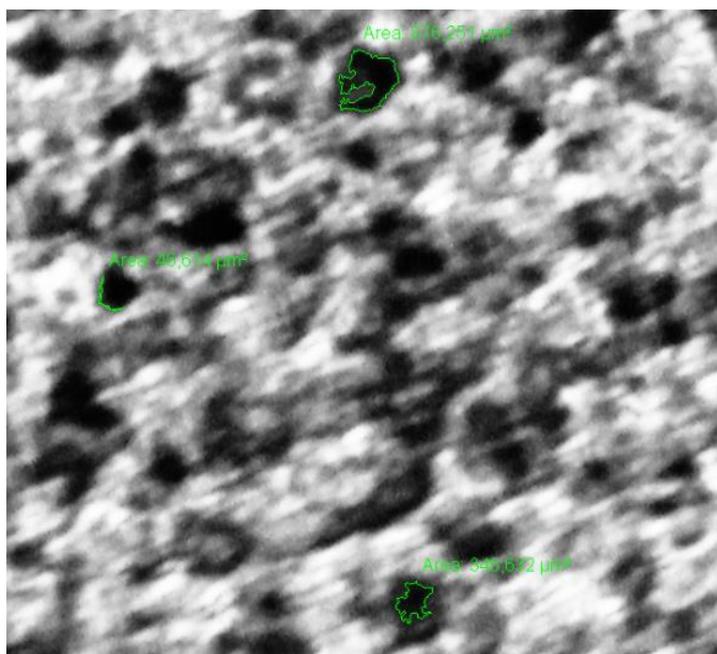


Figura 4.33 - Identificação de pites em imagem de baixo contraste.

A Figura 4.34 mostra a tela do programa após a identificação dos pites da terceira imagem. O recurso usado para de reconhecimento dos pites é o de inclusão de pites em uma imagem branca. Este recurso foi escolhido para que somente os pites reconhecidos pelo método tradicional fossem medidos pelo programa. Aparentemente, o programa consegue reproduzir bem os contornos dos pites, como pode ser notado comparando-se a imagem à direita com os pites correspondentes da imagem à esquerda.

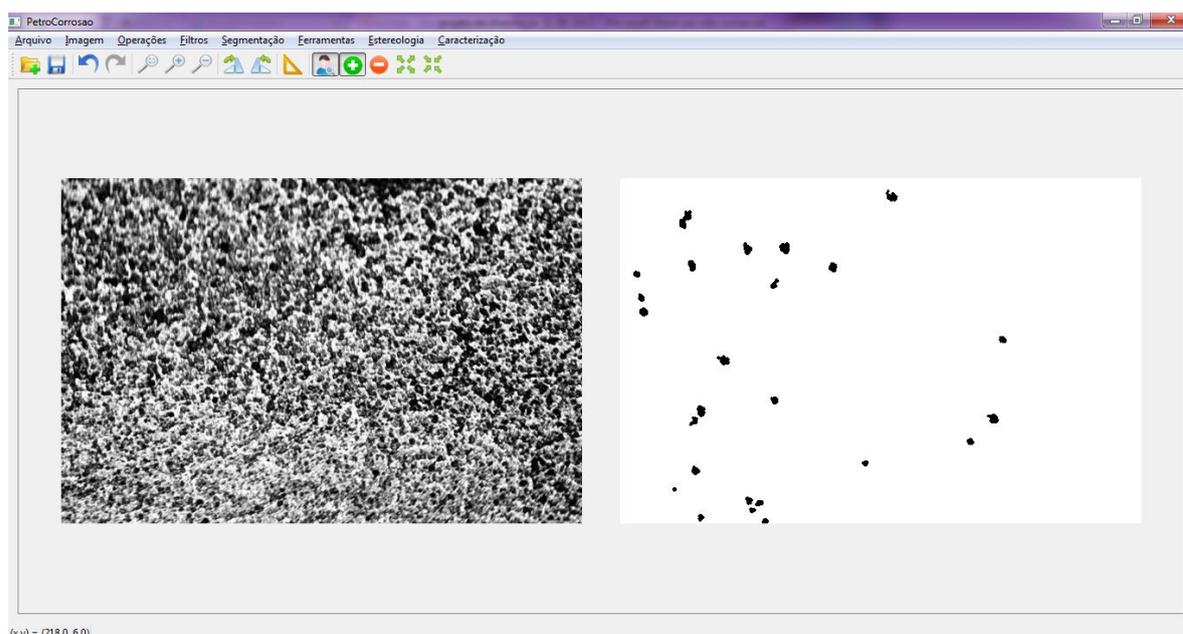


Figura 4.34 - Imagem de baixo contraste, com pites identificados através do sistema.

A Figura 4.35 mostra a sobreposição dos contornos dos pites segmentados na imagem original de baixo contraste. Nota-se que em alguns casos, a imagem original do pite é corresponde muito bem ao contorno que representa o pite segmentado pelo programa. Contudo, em alguns casos, nota-se que o contorno dos pites segmentados são claramente maiores do que a imagem do pite. Pode-se afirmar que o programa apresenta uma tendência a superestimar a área dos pites.

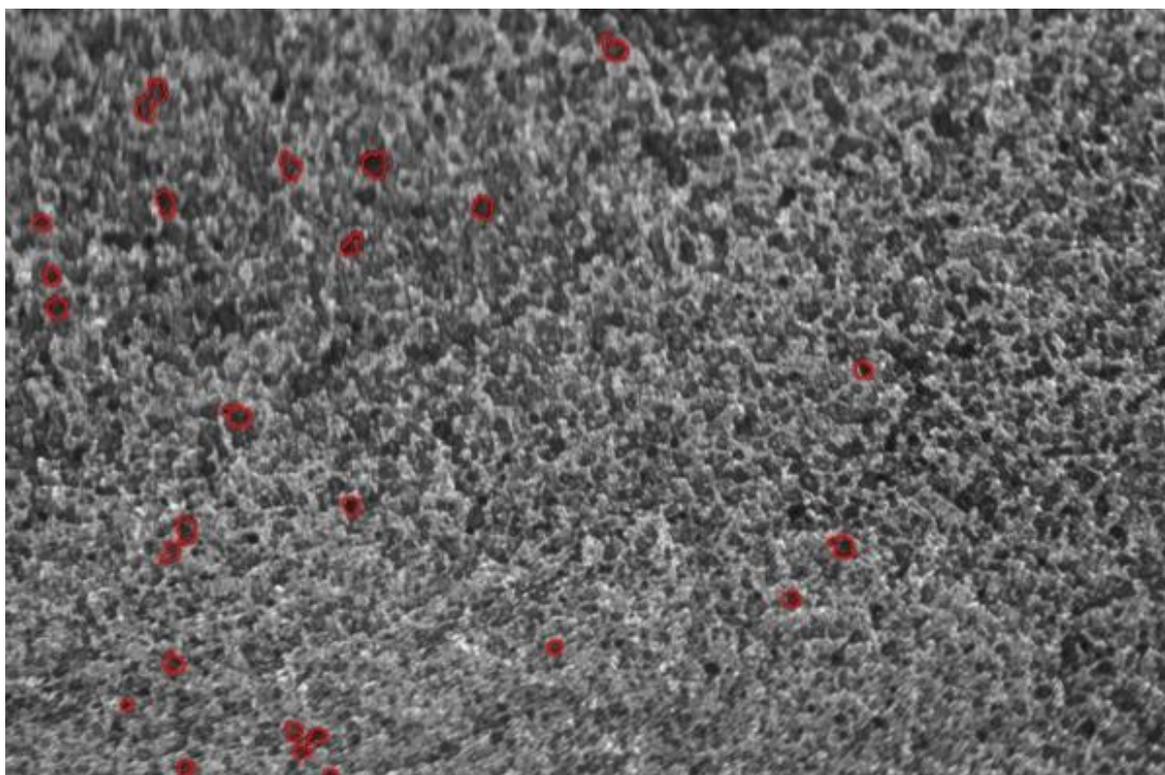


Figura 4.35 - Sobreposição de contorno de pites na imagem de baixo contraste.

O Gráfico 4.2 exibe os resultados da área de cada um dos pites medidos por ambos os métodos, tradicional e proposto. Exibe também os valores médios de área de pite para os dois métodos. As áreas de todos os pites medidas pelo método proposto é superior àquelas medidas pelo método tradicional. Em média, a área dos pites determinada pelo sistema é três vezes maior do que aquela determinada pelo método tradicional. Isto confirma o que é observado na Figura 4.35.

A ferramenta de inclusão de pites começa a funcionar quando o operador dá um clique de mouse sobre uma região que ele deseja reconhecer como um pite de corrosão. O valor do tom de cinza do pixel em que houve um clique é lido e tomado como referência. Em seguida, todos os pixels ao redor daquele clicado cujo tom de cinza estiver em um dado intervalo abaixo ou acima do valor de referência é considerado pertencente ao pite. O valor do intervalo de tom de cinza é um parâmetro

internamente fixado. A inclusão de áreas dos pites que notadamente são mais claras, aparentando não pertencerem aos pites pode ser corrigida com o ajuste deste intervalo de tons de cinza. O operador não consegue fazer este ajuste. Ele é possível apenas no nível de código de programação.

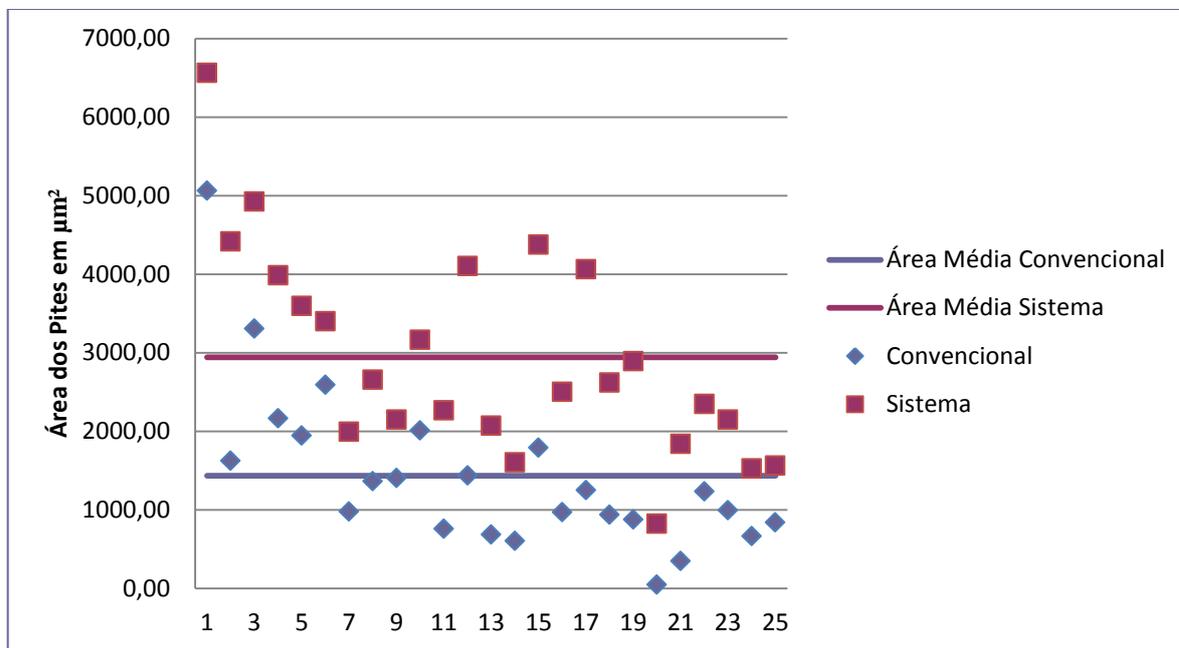


Gráfico 4.2 - Distribuição da área dos pites da imagem de baixo contraste.

A qualidade das medidas de área de pites depende fortemente da qualidade da imagem a ser caracterizada, do operador da medição e da ferramenta utilizada para medir as áreas dos pites. Quanto mais pobre a qualidade da imagem, mais difícil o reconhecimento dos pites e de seus limites, independente do método de medição empregada. Os resultados da segmentação dos pites da imagem mais difícil pelo sistema mostrou claramente que alguns pites segmentados aparentavam ser maiores do que os pites originais.

Ao operador compete reconhecer os pites e sua extensão. Se operadores distintos realizarem medições na mesma imagem, utilizando o mesmo método de medição, espera-se que obtenham resultados distintos, tanto nos valores das áreas medidas, quanto nos pites reconhecidos. Nos testes conduzidos nesta seção com o sistema desenvolvido no projeto, foram segmentados os mesmos pites reconhecidos pelo método tradicional. Isto foi feito para eliminar a influência exercida pelo operador quanto ao reconhecimento dos pites. Com isso, a influência da ferramenta de segmentação pode ser avaliada.

Os resultados mostraram que o sistema desenvolvido tende a reconhecer pites com áreas superiores àquelas da medição tradicional. Isto não significa uma fa-

lha do sistema. Como visto nas imagens consideradas de baixa e média dificuldade, os pites segmentados pelo sistema apresentavam correspondência superior com as imagens originais do que os pites reconhecidos pelo método tradicional. Somente na imagem de alta dificuldade de caracterização, falhas na região dos pites reconhecidos pelo sistema foram observadas. Entretanto, cabe ressaltar que o sistema proposto possui recursos de edição de imagens que não foram utilizados nas imagens caracterizadas, pois a intenção era a de usar imagens com a mesma qualidade daquelas caracterizadas pelo método convencional. Certamente, se a qualidade das imagens fosse aumentada, os pites segmentados corresponderiam melhor aos pites originais.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÃO

Neste trabalho, um sistema que faz uso de técnicas da Computação Gráfica para caracterizar pites de corrosão em cupons, extraíndo informações através de uma análise quantitativa, foi apresentado. O programa contém recursos que são comumente utilizados para melhorar a qualidade de uma imagem, além de diferentes técnicas de segmentação que permitem a identificação dos pites, para posterior análise. O foco do trabalho se concentra em segmentar pites, cujo contorno seja o mais semelhante possível com o pite original, para se obter medidas mais acuradas.

Os diversos recursos e filtros disponíveis no programa permitem que a imagem a ser analisada seja trabalhada em busca de um melhor contraste. Filtros que permitem reduzir os ruídos, destacar arestas e expandir ou reduzir áreas da imagem, estão entre os recursos do sistema. A segmentação depende diretamente da qualidade da imagem. Dessa forma, quanto melhor o contraste, mais satisfatório será o resultado.

A identificação e caracterização dos pites ocorrem com base na segmentação e os cálculos de área, densidade, determinação do centro geométrico e sua localização na imagem, são realizadas sobre estes. Os pites podem, individualmente, ser dilatados, erodidos, incluídos e excluídos. Ao fim de cada análise o sistema gera um relatório com os dados da análise quantitativa.

A fim de validar o sistema, foram realizados testes cujos resultados foram comparados àqueles obtidos com o método convencional de análise. Os dois procedimentos foram realizados sobre as mesmas imagens, com a mesma qualidade, para que as comparações se baseassem apenas no resultado dos cálculos. O sistema aqui proposto se mostrou, na maioria dos casos, mais preciso na identificação dos pites, o que tornou, por conseguinte, o resultado da análise quantitativa melhor. Quando a qualidade da imagem é pobre, percebe-se que o resultado produzido pelo sistema torna-se insatisfatório. Em casos assim, tem-se como alternativa melhorar a qualidade da imagem, fazendo uso dos inúmeros recursos disponíveis para tal, visto que quanto maior a qualidade, melhores são os resultados obtidos.

## CAPÍTULO 6

### TRABALHOS FUTUROS

Apesar da qualidade satisfatória dos resultados, algumas ações podem colaborar para o aumento da qualidade do sistema. Como trabalhos futuros pode ser feita a implementação de novas ferramentas, como o zoom localizado em uma determinada região de interesse. Desta forma, o poder de decisão do operador sobre a inclusão e exclusão de pites é aumentada. O ajuste do intervalo de tom de cinza da ferramenta de inclusão de pites é outra melhoria a ser introduzida. A classificação por redes neurais, pois assim o processo dependeria quase que unicamente do software. Por fim, a implementação da capacidade de captura de imagens diretamente de uma câmera digital tornará o sistema mais ágil no trabalho de caracterização de pites de corrosão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, M. P., & Albuquerque, M. P. (2000). *Processamento de Imagens: Métodos e Análises*. Rio de Janeiro, Brasil: Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF/MCT.
- Alves, G. M. (2006). *Método Fundamentado em Processamento Digital de Imagens para Contagem Automática de Unidades Formadoras de Colônias*. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - São Paulo - SP, Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, 105 p.
- Arruda, E. A. (2009). *Estudo Comparativo do Processo Corrosivo do Aço Patinável e do Aço Carbono Comum*. Monografia (Engenharia Mecânica) - Belém - PA, Universidade Federal do Pará - UFPA, 80p.
- Ataide, T. P., & Pimentel, R. C. (Dezembro de 2011). Segmentação de Imagens Aplicada a Jogos. *Reverte*(9).
- Azevedo, E., & Conci, A. (2003). *Computação gráfica: teoria e prática*. Rio de Janeiro: Campus.
- Bento, M. P., Medeiros, F. N., Paula Jr, I. C., & Ramalho, G. L. (2009). Image Processing Techniques applied for Corrosion Damage Analysis. *Proceedings of the XXII Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing*.
- Blanchette, J. S. (2008). *C++ Gui Programming with Qt 4*. (2 ed.). Massachusetts: Prentice Hall.
- Choi, K., & Kim, S. (2005). Morphological analysis and classification of types of surface corrosion damage by digital image processing. *Corrosion Science*, 47(1), 1-15.
- Fazano, C. A. (Outubro/Novembro de 2005). A Aplicação da Análise de Imagem na Quantificação das Características Microestruturais de Materiais. *Revista Analytica*(19), 46-60.

- Felisberto, M., Schneider, G., Pilkel, L., Centeno, T., & Arruda, L. (2004). Identificação Automática de Tubulação em Imagens Radiográficas e Detecção de Corrosão. *3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás*.
- Fernandes, J. C. (2010). *Desenvolvimento de um Dispositivo Tipo Carga Constante para Avaliação da Susceptibilidade à Corrosão Sob Tensão de Aço Inoxidável Austenítico*. Dissertação (Mestrado em Materiais para Engenharia) - Itajubá - MG, Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, 94 p.
- Fernandes, S. M., Duarte, A. G., Soares, T. J., & Araújo, S. A. (2012). Desenvolvimento de um software de análise de imagens para caracterização microestrutural de materiais. *Exacta*, 10(3), 325-332.
- Ferreira, L. A., Costacurta, R. F., Alberti, S. M., & Zdebsky, S. R. (2002). *Curso de Formação de Operadores de Refinaria - Química Aplicada - Corrosão*. Curitiba: UnicemP.
- Gentil, V. (1996). *Corrosão*. (3 ed.). Rio de Janeiro: LTC.
- Gomes, J., & Velho, L. (2003). *Fundamentos da Computação Gráfica*. (Vol. S.I.). Rio de Janeiro: IMPA.
- Gomes, O. F. (2001). *Processamento e Análise de Imagens Aplicados à Caracterização Automática de Materiais*. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Metalúrgica) - Rio de Janeiro - RJ, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC- Rio, 141p.
- Gonçalves, J. (s.d.). *Hiperbytes*. Acesso em 20 de outubro de 2012, disponível em <http://www.hiperbytes.com.br/artigos/introducao-a-computacao-grafica/>
- Gonzalez, R., & Woods, R. (2002). *Digital Image Processing*. (2 ed.). Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- Hall, E. L. (1979). *Computer Image Processing and Recognition*. New York: Academic Press.
- Haykin, S. (2001). *Redes Neurais-Princípios e Prática*. (2 ed.). Porto Alegre: Bookman.

- Itzhak, D., Dinstein, I., & Zilberberg, T. (1981). Pitting corrosion evaluation by computer image processing. *Corrosion Science*, 21(1), 17-22.
- Kapsalas, P., Maravelaki-Kalaitzaki, P., Zervakis, M., Delegou, E., & Moropoulou, A. (2007). Optical inspection for quantification of decay on stone surfaces. *NDT&E International*, 40(1), 2-11.
- Lopes, F. M. (2003). *Um modelo perceptivo de limiarização de imagens digitais*. Dissertação (Mestrado em Informática) - Curitiba - PR, Universidade Federal do Paraná - UFPR, 115 p.
- Manssour, I. H., & Cohen, M. (2006). Introdução à Computação Gráfica. *Rita, Volume XIII, Número 2*.
- Marques Filho, O., & Vieira Neto, H. (1999). *Processamento Digital de Imagens*. Rio de Janeiro: Brasport.
- Matias, I. O. (2007). *O Uso do Algoritmo Genético em Segmentação de Imagens Digitais*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Rio de Janeiro - RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 89p.
- Merçon, F., Guimarães, P. I., & Mainier, F. B. (2004). Corrosão: Um Exemplo Usual de Fenômeno Químico. *Química Nova na Escola*(19).
- NACE International. (2005). *Preparation, Installation, Analysis, and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operations*. Houston: NACE International.
- Neta, S. R., Dutra, L. V., & Erthal, G. J. (Maio de 2008). Limiarização automática em histogramas multimodais. *Proceedings of the 7th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications, FCT– Unesp de Presidente Prudente*.
- OpenCV. (2012). Acesso em 23 de setembro de 2012, disponível em <http://opencv.willowgarage.com/wiki/>
- Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), 62-66.
- Passaglia, E. (1979). *The Economic Effects of Corrosion Research, Corrosion* (Vol. 35).

- Queiroz, J. E., & Gomes, H. M. (2001). Introdução ao Processamento Digital de Imagens. *Rita, Volume VIII, Número 1*.
- Quiumento, F. (14 de Dezembro de 2011). *knowledgeispowerquiumento*. Acesso em 13 de Julho de 2013, disponível em <http://knowledgeispowerquiumento.wordpress.com/article/corrosao-por-pites-2tlel7k7dcy4s-94/>
- Revista Química e Derivados. (31 de Julho de 1996). Corrosão: Novas Soluções para o Problema. *Revista Química e Derivados*(340).
- Riella, H. G. (2009). *Apostila de corrosão*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Materiais e Corrosão-LABMAC.
- Rugolo, J., Erlebacher, J., & Sieradzki, K. (12 de Dezembro de 2006). Length scales in alloy dissolution and measurement of absolute interfacial free energy. *Nature Materials*(5), 946 - 949.
- Zaidan, B. B., Zaidan, A. A., Alanazi, H. O., & Alnaqeib, R. (2010). Towards Corrosion Detection System. *International Journal of Computer Science Issues*, 7(3), 33-36.