

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TÉCNOLÓGICA DO PARANÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial

DISSERTAÇÃO
apresentada ao CEFET-PR
para a obtenção do título de

MESTRE EM CIÊNCIAS

por

GUILHERME ALCEU SCHNEIDER

**SEGMENTAÇÃO E EXTRAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE
DEFEITOS EM IMAGENS RADIOGRÁFICAS DE JUNTAS
SOLDADAS E TUBULAÇÕES**

Banca Examinadora:

Presidente e Orientador:

Prof^a Dra. LÚCIA VALÉRIA RAMOS DE ARRUDA CEFET-PR

Examinadores:

Prof. Dr. ALEXANDRE XAVIER FALCÃO UNICAMP

Prof. Dr. GIUSEPPE PINTAÚDE CEFET-PR

Prof^a Dra. TÂNIA MEZZADRI CENTENO CEFET-PR

Curitiba, 28 de janeiro de 2005.

GUILHERME ALCEU SCHNEIDER

**SEGMENTAÇÃO E EXTRAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE
DEFEITOS EM IMAGENS RADIOGRÁFICAS DE JUNTAS
SOLDADAS E TUBULAÇÕES**

Orientador: Prof^a Dra. Lúcia Valéria Ramos de Arruda

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial do Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de “Mestre em Ciências” – Área de Concentração: Informática Industrial.

Curitiba, 28 de janeiro de 2005.

À minha esposa Ariane, pelo amor e carinho que me fortaleceram, e aos meus pais Alceu e Sônia, e meus irmãos Gabriela, Germano e Joziane que compreenderam a minha ausência durante esta etapa e me deram força.

AGRADECIMENTOS

A Deus que guia os meus passos.

A orientadora Lúcia Valéria Ramos de Arruda, pelo apoio e respeito durante todo o curso e pelo ensinamento transmitido.

A professora Tânia Mezzadri Centeno pela ajuda nas etapas deste trabalho, e pela co-orientação.

Aos professores da Banca Examinadora, Alexandro Falcão e Giuseppe Pintaúde pela colaboração na avaliação deste trabalho.

Ao PRH10, na pessoa do professor Flávio Neves Jr., pelo apoio financeiro e pelo uso das instalações.

Aos amigos Marcelo Felisberto e Lucas Pilkel pelo apoio e companheirismo, e pela ajuda nos trabalhos de pesquisa e de laboratório que foram necessários.

Ao senhor Iliberto Hinça e senhora Elizabeth Hinça pelo apoio e força.

Aos amigos de laboratório: Gustavo Benvenuti e Marcos Rambo pelas conversas nos momentos difíceis; Sérgio, Elaine, Felizari, Rosalvo, Leandro e Orlando, e a todos que ajudaram com idéias.

Aos professores do CPGEI que apoiaram de forma direta ou indireta a realização deste curso.

A todos os pesquisadores e amigos que, de alguma forma, forneceram subsídios para a conclusão desta pesquisa.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xv
RESUMO.....	xvii
ABSTRACT.....	xix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVO E DELIMITAÇÃO DO TRABALHO.....	2
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 INTRODUÇÃO.....	7
2.2 SOLDAGEM.....	8
2.2.1 Formação da junta soldada.....	9
2.2.2 Processo de soldagem por fusão.....	10
2.2.3 Características da ZF e da ZTA.....	11
2.2.4 Descontinuidades comuns em soldas.....	12
2.3 DESCRIÇÃO DE TRABALHOS EXISTENTES.....	16
2.3.1 Análise de defeitos em tubulações.....	16
2.3.2 Análise de defeitos em juntas soldadas.....	18
2.4 CRITÉRIOS PARA ACEITAÇÃO DE DEFEITOS.....	24
2.5 CONCLUSÃO.....	25
3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS.....	27
3.1 IMAGEM DIGITAL.....	27
3.2 PROCESSAMENTO DE IMAGEM.....	30
3.2.1 Vizinhança de um <i>pixel</i>	31
3.2.2 Detecção de bordas.....	32
3.2.3 Filtro por mediana.....	33
3.2.4 Histograma.....	34
3.2.5 Perfil e projeção.....	36
3.2.6 Segmentação.....	37
3.2.6.1 Métodos de limiarização.....	38

3.2.7 Etiquetagem ou <i>labeling</i>	45
3.3 CONCLUSÃO.....	47
4 METODOLOGIA PROPOSTA.....	49
4.1 SEGMENTAÇÃO DOS DEFEITOS.....	49
4.1.1 Pré-processamento.....	51
4.1.2 Filtro.....	53
4.1.3 Técnica de Filtragem Proposta.....	55
4.1.4 Filtragem horizontal e filtragem vertical.....	59
4.1.5 Realce dos Defeitos.....	61
4.1.6 Composição final do filtro.....	62
4.1.7 Etapa de Limiarização.....	64
4.2 SEGMENTAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA.....	66
4.3 EXTRAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS DEFEITOS.....	71
4.4 ANÁLISE DE TUBULAÇÕES.....	74
4.5 CONCLUSÃO.....	80
5 RESULTADOS ESPECÍFICOS.....	83
5.1 TESTE COM OS COEFICIENTES.....	83
5.2 SEGMENTAÇÃO DOS DEFEITOS.....	85
5.2.1 Aplicação do método proposto: limiarizando com a técnica de <i>Otsu</i>	86
5.2.2 Aplicação do método proposto: limiarizando com a técnica de <i>Kapur</i>	95
5.2.3 Aplicação do método proposto: limiarizando com a técnica de <i>Sezgin & Sankur</i> (2003).....	99
5.2.4 Aplicação do método proposto: limiarizando com a técnica de <i>Kittler</i>	101
5.3 SEGMENTAÇÃO DOS CORDÕES DE SOLDA.....	102
5.3.1 Testes com valores de <i>K</i>	102
5.3.2 Testes com imagens.....	105
5.4 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS.....	106
5.4.1 Primeiro grupo de imagens.....	107
5.4.2 Segundo grupo de imagens.....	111
5.5 EXTRAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS DEFEITOS.....	116
6 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES.....	125
6.1 TRABALHOS FUTUROS.....	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129

LISTA DE FIGURAS

1.1	Passos em processamento digital de imagens (Gonzales & Woods, 1992, pg 5).....	3
2.1	Seção transversal de uma solda de topo (Marques, 1991, pg 36).....	9
2.2	Jato de Plasma (Marques, 1991, pg 53).....	10
2.3	Repartição térmica (Marques, 1991, pg 80).....	12
2.4	Porosidade Agrupada.....	13
2.5	Inclusão de Escória.....	14
2.6	Falta de Fusão.....	14
2.7	Falta de Penetração.....	15
2.8	Trincas em uma solda.....	15
2.9	Sistema utilizado para gerar a radiografia de uma tubulação (Onel et-al, 2000).....	17
2.10	Ilustração de imagem radiográfica de junta soldada.....	19
2.11	Seqüência para a segmentação dos defeitos de juntas soldadas proposto por Shafeek et-al (2004a).....	21
2.12	Dimensões dos defeitos segundo a norma ASME Seção VIII div. 1 (Andreucci, 2002, pg 84 e 85).....	24
3.1	Imagem analógica relacionada com a Imagem Digital.....	28
3.2	Representação de uma Imagem Digital (coordenadas).....	29
3.3	Exemplo de região fechada com o mesmo tom de cinza.....	32
3.4	Borda de uma região fechada com o mesmo tom de cinza.....	32
3.5	Máscaras para executar e detecção de bordas por meio do operador <i>Sobel</i>	33
3.6	Cálculo do resultante do operador <i>Sobel</i>	33
3.7	Filtro da Mediana com Janela a) 3 x 3, b) 5 x 5.....	34
3.8	Histograma das imagens.....	35
3.9	Histograma da imagem expandida.....	36
3.10	Perfil Vertical e Horizontal da Imagem.....	36
3.11	Projeção horizontal e vertical da imagem.....	37
3.12	Limiar T em um Histograma.....	38
3.13	Imagem Radiográfica. Imagem piloto para a aplicação dos limiarizadores.....	39
3.14	Resultado da aplicação da técnica de <i>Otsu</i> na imagem piloto.....	40
3.15	Resultado da aplicação da técnica de <i>Kittler</i> na imagem piloto.....	42
3.16	Resultado da aplicação da técnica de <i>Kapur</i> na imagem piloto.....	43

3.17	Resultado da aplicação da técnica de <i>Sezgin & Sankur</i> na imagem piloto.....	44
3.18	a) regiões com <i>pixels</i> de mesmo tom de cinza, b) regiões rotuladas.....	45
3.19	Fluxograma da rotina que rotula as regiões fechadas.....	46
4.1	Imagem de um cordão de solda em três dimensões.....	50
4.2	Diagrama em Blocos do Método Proposto para Segmentar os Defeitos.....	51
4.3	a) Imagem original, b) Imagem após a expansão do histograma e filtrada.....	52
4.4	Plano <i>Z</i> e resposta em frequência do filtro passa-baixas.....	55
4.5	Fluxograma do método proposto para uma filtragem vertical.....	56
4.6	Aplicação da técnica proposta no sentido de varredura de 1 até <i>M</i>	57
4.7	Aplicação da técnica proposta no sentido de varredura de <i>M</i> até 1.....	58
4.8	Resultado final da técnica proposta.....	59
4.9	Perfil filtrado horizontal, gerado a partir da técnica proposta.....	60
4.10	Fluxograma do método proposto para uma filtragem horizontal.....	61
4.11	Imagem subtraída resultante do perfil filtrado horizontal (matriz <i>sub_h</i>).....	62
4.12	Resultado do filtro da mediana.....	63
4.13	Histograma da imagem resultante <i>r</i>	64
4.14	Imagem <i>r</i> com expansão do histograma.....	64
4.15	Imagem <i>D</i> expandida, contornos dos defeitos.....	65
4.16	Imagem limiarizada com os possíveis defeitos segmentados.....	65
4.17	Imagem radiográfica de uma junta soldada com marcações.....	66
4.18	Imagem da figura 4.14 limiarizada pelo método de <i>Otsu</i>	67
4.19	Projeção vertical da imagem limiarizada.....	68
4.20	Projeção vertical da imagem radiográfica da figura 4.17.....	68
4.21	Cálculo da derivada sobre a projeção da imagem.....	69
4.22	Cálculo da derivada sobre a projeção da imagem com o sentido de varredura contrário.....	70
4.23	Cordão de solda segmentado.....	70
4.24	Contornos dos possíveis defeitos encontrados na imagem da figura 4.16.....	73
4.25	Características extraídas de um determinado defeito.....	73
4.26	Imagem com os defeitos segmentados e com as bordas da solda em destaque.....	74
4.27	Imagem radiográfica da tubulação, e a análise do perfil transversal.....	75
4.28	a) Imagem da tubulação sem corrosão, b) Imagem segmentada.....	76
4.29	Relação entre a espessura da parede e o vetor <i>v</i>	78

4.30	Valores de média e desvio padrão para uma tubulação não corroída.....	79
4.31	Imagem da tubulação corroída.....	79
4.32	Valores de média e desvio padrão para uma tubulação corroída.....	80
5.1	Plano Z e resposta em frequência do filtro.....	83
5.2	Perfis filtrado e original.....	84
5.3	Junta soldada com porosidade a) Imagem original, b) Defeitos segmentados.....	87
5.4	a) Análise do perfil vertical: original e estimado, b) resultado da segmentação.....	89
5.5	a) Análise do perfil vertical: original e estimado, b) resultado da segmentação.....	90
5.6	a) Solda com falta de penetração, b) Defeito segmentado.....	91
5.7	a) Solda com inclusão de escória, b) Defeito segmentado.....	92
5.8	a) Solda com porosidade, b) Defeito segmentado.....	92
5.9	a) Solda com falta de fusão, b) Defeito segmentado.....	93
5.10	a) Solda com trinca transversal, b) Defeito segmentado.....	94
5.11	Porosidades segmentadas.....	95
5.12	Falta de penetração segmentada.....	95
5.13	Inclusão de escória segmentada.....	96
5.14	Porosidade alinhada segmentada.....	96
5.15	Falta de fusão segmentada.....	96
5.16	Trinca transversal segmentada.....	97
5.17	Imagem radiográfica sem defeito a) Original, e b) Segmentada.....	98
5.18	Porosidades segmentadas.....	99
5.19	Falta de penetração segmentada.....	99
5.20	Inclusão de escória segmentada.....	99
5.21	Porosidade alinhada segmentada.....	100
5.22	Falta de fusão segmentada.....	100
5.23	Trinca transversal segmentada.....	100
5.24	Porosidades segmentadas.....	101
5.25	Falta de penetração segmentada.....	101
5.26	Trinca transversal segmentada.....	101
5.27	Imagem radiográfica de junta soldada.....	102
5.28	Cordão de solda segmentado ($K = 5$).....	103
5.29	Cordão de solda segmentado ($K = 15$).....	103

5.30	Cordão de solda segmentado ($K = 20$).....	103
5.31	Cordão de solda segmentado ($K = 30$).....	104
5.32	Cordão de solda segmentado ($K = 45$).....	104
5.33	Cordão de solda segmentado (imagem teste 1).....	105
5.34	Cordão de solda segmentado (imagem teste 2).....	105
5.35	Cordão de solda segmentado (imagem teste 3).....	106
5.36	Cordão de solda segmentado (imagem teste 4).....	106
5.37	a) Segmentação do Cordão, b) Segmentação dos Defeitos (Porosidade).....	107
5.38	a) Segmentação do Cordão, b) Segmentação dos Defeitos (Falta de Fusão).....	108
5.39	a) Segmentação do Cordão, b) Segmentação dos Defeitos (Falta de Penetração).....	108
5.40	a) Segmentação do Cordão, b) Segmentação dos Defeitos (Trinca Transversal).....	109
5.41	a) Segmentação do Cordão, b) Segmentação dos Defeitos (Inclusão de Escória).....	109
5.42	a) Segmentação do Cordão, b) Segmentação dos Defeitos (Porosidade Agrupada)...	110
5.43	a) Segmentação do Cordão, b) Segmentação dos Defeitos (Mordedura Externa).....	111
5.44	a) Segmentação do Cordão, b) Segmentação dos Defeitos (Concavidade Interna)....	111
5.45	a) Segmentação do Cordão, b) Segmentação dos Defeitos (Escória).....	112
5.46	a) Segmentação do Cordão, b) Segmentação dos Defeitos (Falta de Fusão).....	112
5.47	a) Segmentação do Cordão, b) Segmentação dos Defeitos (Mordedura Externa e Concavidade Interna).....	113
5.48	a) Segmentação do Cordão, b) Segmentação dos Defeitos (Mordedura Interna e Concavidade Interna).....	113
5.49	a) Segmentação do Cordão, b) Segmentação dos Defeitos (Porosidade).....	114
5.50	Extração das características, falta de penetração.....	117
5.51	Extração das características, porosidade.....	118
5.52	Extração das características, trinca longitudinal.....	119
5.53	Extração das características, trinca transversal.....	120
5.54	Extração das características, inclusão.....	121
5.55	Extração das características, falta de penetração.....	122

LISTA DE TABELAS

5.1	Parâmetros (teste 1).....	88
5.2	Parâmetros (teste 2).....	88
5.3	Parâmetros (teste 3).....	88
5.4	Parâmetros (teste 4).....	93
5.5	Parâmetros (teste 5).....	94
5.6	Parâmetros (teste 6).....	107
5.7	Porcentagem de Sucesso na Segmentação dos Defeitos das Imagens.....	115
5.8	Porcentagem de Acerto na Segmentação dos Possíveis Defeitos.....	115
5.9	Característica do defeito (exemplo 1).....	117
5.10	Característica do defeito (exemplo 2).....	118
5.11	Característica do defeito (exemplo 3).....	119
5.12	Característica: defeito 1 (exemplo 4).....	120
5.13	Característica: defeito 2 (exemplo 5).....	120
5.14	Característica do defeito (exemplo 6).....	121
5.15	Característica do defeito (exemplo 7).....	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABENDE	Associação Brasileira de Ensaios Não-destrutivos
ASM	American Society for Metals
AWS	American Welding Society
END	Ensaio Não Destrutivo
MB	Metal de base
PDI	Processamento Digital de Imagens
ZF	Zona fundida
ZL	Zona de ligação
ZTA	Zona termicamente afetada

RESUMO

A inspeção visual de imagens radiográficas de soldas e tubulações é uma tarefa difícil para o ser humano, devido a sua característica repetitiva. Desta forma, a partir da digitalização dessas imagens radiográficas, é possível o desenvolvimento de ferramentas de inspeção automática, reduzindo os erros cometidos por inspeção visual. Este trabalho apresenta uma metodologia que tem o objetivo de automaticamente segmentar os defeitos em soldas e tubulações e extrair características que permitam o reconhecimento destes defeitos. Os resultados obtidos com o uso da metodologia desenvolvida neste trabalho mostram que é possível segmentar os defeitos em imagens radiográficas de soldas e levantar as características desses defeitos de forma automática, mesmo que tais defeitos sejam de difícil visualização. O trabalho também propõe o uso de parâmetros para calibrar o método proposto, sendo que tais parâmetros conferem uma maior maleabilidade ao método. Desta forma o método proposto para segmentar os defeitos foi testado com dois grupos de imagens, cada grupo proveniente de origem diferente, e obteve resultados satisfatórios conseguindo segmentar os defeitos em quase todas as imagens. Para extrair as características utilizou-se a rotulação das regiões segmentadas fechadas, este algoritmo coloca um *label* em cada possível defeito e assim permite levantar os seus parâmetros de forma automática. Por sua vez o método de segmentação de cordões de solda também se mostrou visualmente robusto conseguindo segmentar os cordões mesmo em imagens onde haviam outros objetos inseridos.

Palavras-chaves: segmentação em soldas, imagens radiográficas de soldas, extração das características dos defeitos.

ABSTRACT

The visual inspection of radiographic images of welds and pipelines is a very repetitive task, very hard for humans. However, using digital radiographic images, it is possible to develop computational tools to be applied in the inspection process and to decrease the risks of inconsistent evaluations. This work presents a methodology to be applied in the automatic segmentation of defects in welds and pipes radiographic images, as well as to extract characteristics for the defects recognition. The tests and results, using the proposed methodology, show that it is possible to automatically perform the defect segmentation and characteristic extraction. As a result, some defects, difficult to be visually detected, were automatically segmented by the proposed method. Using some adjusting parameters, also proposed in this work, it is possible to adjust the method performance, obtaining more flexibility in the method applications. Two groups of images, originating from different sources, were tested and the results were satisfactory, since the defects, in almost all images, were segmented by the proposed method. A connected region labeling algorithm was used in order to make possible the automatic characteristics extraction for each detected defect. Besides, the proposed methodology shows to be robust also in some situations where other undesirable objects are presented in the image.

Keywords: weld segmentation, weld radiographic images, defects features extraction

1) INTRODUÇÃO

1.1) Motivação

A maioria das máquinas e componentes utilizados na indústria necessita cada vez mais de qualidade e confiabilidade no funcionamento. Toda a tecnologia empregada para estes objetivos tem como finalidade principal proteger a vida das pessoas que de alguma forma fazem uso ou dependem destes componentes, seja na indústria automobilística, aeronáutica, siderúrgica, nuclear ou petroquímica. Portanto, é fundamental existir qualidade nos projetos mecânicos, nos materiais envolvidos, nos processos de fabricação e montagem, manutenção e inspeção de máquinas e componentes (Andreucci, 2002).

Segundo Andreucci (2002), a solução para as questões de isenção de defeitos nas peças inspecionadas está em grande parte associada às aplicações de Ensaio Não Destrutivo (END's). Estas aplicações são consideradas um dos avanços mais importantes da engenharia moderna, pois executam a análise do componente sem ocorrer destruição e/ou inserção de fatores que alterem as características do componente, constituindo uma das ferramentas mais importantes para conferir o controle de qualidade dos produtos de uma indústria.

As aplicações de END's também permitem que o componente seja monitorado sem a necessidade do seu desligamento, verificando a degradação do material enquanto o componente opera (Redouane et-al, 2000). E segundo a Associação Brasileira de Ensaio Não-Destrutivo (ABENDE, 2004), os END's além de constituir uma das principais ferramentas do controle da qualidade de matérias e produtos, contribuindo para garantir qualidade, também aumentam a confiabilidade e reduzem os custos do processo.

Em especial na área de petróleo e gás, são utilizadas redes de tubulações para a condução dos fluidos. A união destas redes de tubulações é feita por meio de juntas soldadas, tubos, conexões, e outros componentes, que podem apresentar defeitos (Telles, 1994). Nestas aplicações também ocorrem problemas de corrosão nas paredes

das tubulações surgindo a necessidade da manutenção periódica das mesmas (Onel et-al, 2000; Redouane et-al, 2000; Zscherpel et-al, 2000).

Os defeitos que estes componentes podem apresentar em geral aparecem na forma de descontinuidades ou irregularidades nas estruturas das tubulações. Estes defeitos podem ocorrer devido a diversos fatores, e para a sua análise são utilizados em geral dois métodos: a radiografia e o ultra-som. São métodos eficazes e desempenham uma função importante em END's, sendo que a radiografia, além de ser um método bastante utilizado, (Silva, Siqueira, Caloba, et-al, 2001), permite registrar o resultado da inspeção em filmes radiográficos, gerando documentos permanentes (Telles, 1994; Andreucci, 2002).

1.2) Objetivo e Delimitação do Trabalho

É um desafio para a indústria, sobretudo de petróleo e gás, executar a inspeção nos componentes de forma a garantir a qualidade e a confiabilidade das instalações. Neste sentido a execução de uma inspeção automática é uma tarefa que está entre os principais objetivos a serem perseguidos nesta área de pesquisa. O desenvolvimento de metodologias computacionais que possibilitem a detecção de defeitos nas tubulações e nos componentes de forma automática aumenta a segurança no uso das instalações, facilita a análise dos resultados, reduz custos de manutenção, entre outras vantagens.

A análise de imagens radiográficas por computador vem sendo utilizada há algum tempo para a inspeção de peças (Andreucci, 2002). Portanto, técnicas de processamento de imagens digitais podem ser implementadas com o objetivo de automatizar a inspeção.

Segundo Gonzales & Woods (1992), o processamento de imagens digitais (PDI) abrange uma ampla escala de hardware, software e fundamentos teóricos como os apresentados na figura 1.1. A qual mostra o objetivo global de uma aplicação de PDI, que é produzir um resultado a partir do domínio do problema.

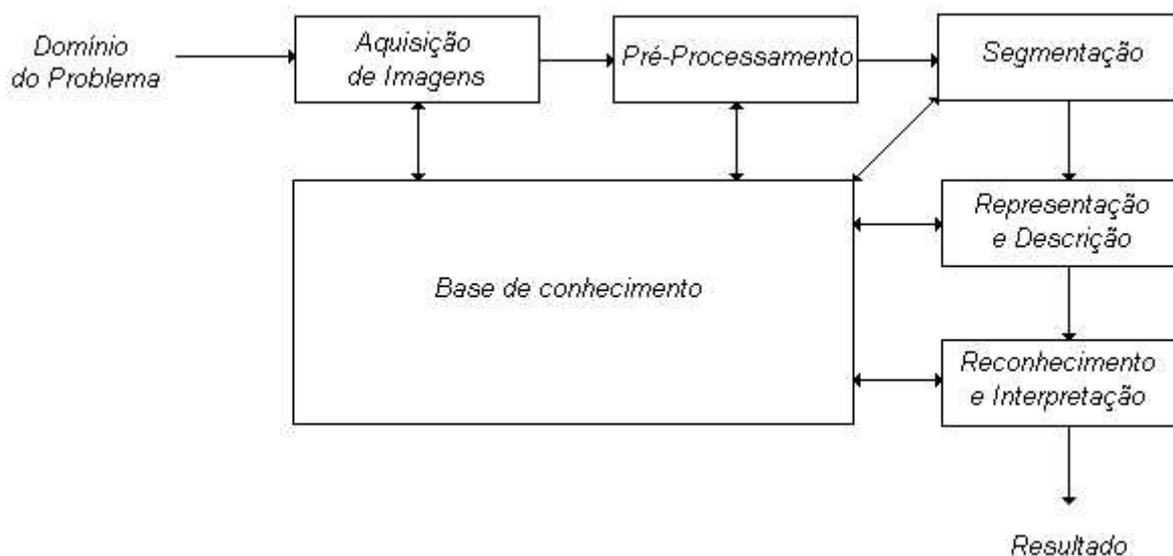


Figura 1.1 – Passos em Processamento Digital de Imagens.

(Gonzales & Woods, 1992, pg 5).

Na figura 1.1 pode-se observar os passos fundamentais em PDI. A descrição destes passos é feita, segundo Gonzales & Woods (1992), da seguinte forma:

- *Aquisição de imagens*: esta etapa corresponde à aquisição de uma imagem digital, ou seja, o uso de um sensor para imageamento e a capacidade de digitalizar o sinal que provém do sensor.
- *Pré-processamento*: a função desta etapa é melhorar a imagem de forma a aumentar as chances de sucesso no processamento da imagem.
- *Segmentação*: em geral é uma das etapas mais difíceis em PDI, e consiste em dividir uma imagem em partes ou objetos relevantes para a aplicação.
- *Representação e Descrição*: consiste em transformar os objetos em uma forma adequada de representação para o subsequente processamento computacional. A descrição também pode ser chamada de seleção de características, e deve enfatizar as características relevantes da imagem e representá-las de forma quantitativa ou de algum outro modo que faça a discriminação entre as classes do objeto.
- *Reconhecimento e Interpretação*: o reconhecimento atribui um rótulo ao objeto, por exemplo, o tipo do defeito encontrado. Por sua vez à interpretação cabe atribuir um significado ao objeto reconhecido, por

exemplo, informar se o defeito pode ser considerado ou não dependendo de alguma norma.

A base de conhecimento controla a interação entre os módulos (flechas duplas) como mostra a figura 1.1 e codifica o conhecimento sobre o domínio do problema (Gonzales & Woods, 1992). No caso da inspeção de materiais a base do conhecimento consiste em toda a informação que seja relevante para cada um dos passos fundamentais, por exemplo: o nível de ruído para a etapa de pré-processamento; o formato dos defeitos para as etapas de segmentação, descrição e reconhecimento; a localização da solda e dos defeitos para a etapa de reconhecimento; as normas para a etapa de interpretação.

Na aplicação tratada neste trabalho, o domínio do problema consiste em imagens radiográficas digitais de soldas lineares e de tubulações, sendo o objetivo principal da metodologia proposta encontrar os defeitos nestas imagens e extrair parâmetros destes defeitos que permitam eficácia na etapa seguinte de reconhecimento e interpretação. Deste modo a delimitação deste trabalho está na segmentação e na representação e descrição dos defeitos em soldas lineares e tubulações.

Este trabalho também se insere dentro de um projeto maior que tem o objetivo de desenvolver uma ferramenta computacional que identifique e classifique de forma automática os defeitos em soldas e a corrosão em tubulações. O sistema todo deve, além dos métodos propostos neste trabalho, possuir um modo de reconhecer os defeitos automaticamente por meio de análises das características extraídas, e deve interpretar esses defeitos automaticamente utilizando metodologias que interpretem os resultados do reconhecimento.

O resultado do sistema todo deve permite considerar ou não os defeitos em uma solda, e deve ter a capacidade de informar o nível de corrosão de uma tubulação.

1.3) Estrutura da Dissertação

No Capítulo 2 são descritas as metodologias existentes para analisar e interpretar de forma automática defeitos em componentes. A maioria dos trabalhos compilados trata da análise de imagens radiográficas para a detecção e classificação de defeitos em

juntas soldadas e em tubulações. Neste capítulo também é abordado o processo de soldagem onde são descritas as partes de uma junta de solda, são mostradas as regiões da junta e quais são os efeitos que o processo de soldagem pode causar no material, ou seja, a inserção dos defeitos.

No capítulo 3 são apresentadas as técnicas de processamento de imagens digitais que são utilizadas para o desenvolvimento da metodologia proposta neste trabalho. Neste capítulo são abordados conceitos e aplicações em imagens digitais de 256 tons de cinza que são úteis no tratamento das imagens, na segmentação dos defeitos e na extração das características. Portanto, são abordadas as seguintes técnicas: filtro da mediana, detecção de bordas, detecção de contornos, etiquetagem e limiarização.

No capítulo 4 são descritas a segmentação dos defeitos e a extração das características. Neste capítulo são mostradas as metodologias utilizadas para segmentar os defeitos na solda e nas paredes de uma tubulação, segmentar o cordão de solda para restringir a região em análise, e a extração das características para classificar os defeitos da solda e para analisar a corrosão na parede da tubulação.

No capítulo 5 são mostrados os resultados da aplicação das metodologias em imagens radiográficas. Para tanto são utilizadas imagens que possuem defeitos, e são feitas comparações e, apresentados resultados de testes. Por fim no capítulo 6 são apresentadas as conclusões e são propostos os trabalhos futuros.

2) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1) Introdução

Segundo a ABENDE (2004), os END's são ensaios realizados em materiais, acabados ou semi-acabados para verificar a existência ou não de descontinuidades ou defeitos, através de princípios físicos definidos, sem alterar suas características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais e sem interferir em seu uso posterior. Os END's mais aplicados em inspeção de tubulações e soldas são: ensaio visual, correntes parasitas, líquido penetrante, partículas magnéticas, emissão acústica, ultra-som e radiografia.

Para a análise de juntas soldadas são utilizados em geral dois métodos: a radiografia e o ultra-som. Ambas são ferramentas poderosas quando se deseja a inspeção interna de uma peça, possuem a capacidade de detectar descontinuidades com poucos milímetros de extensão (Andreucci, 2002). Contudo, a radiografia apresenta uma característica importante em relação ao ultra-som. Sua grande vantagem está na capacidade de registrar o resultado do processo de inspeção em documentos permanentes, também chamados de filmes radiográficos. Através da análise deste filme torna-se possível a detecção de defeitos internos da solda (Telles, 1994; Andreucci, 2002). Ainda, segundo Silva et-al (2001), a radiografia é utilizada para a análise de muitos processos de produção de componentes, sendo uma aplicação muito comum na inspeção de juntas soldadas nas indústrias. Redouane et-al (2000) destacam também a radiografia como um método que não requer a remoção da camada de isolamento de um duto para executar a inspeção em tubulações.

As imagens radiográficas são obtidas a partir da exposição da peça a uma fonte de radiação penetrante. Tal radiação possui, entre outras, as propriedades de atravessar materiais opacos à luz e de impressionar películas fotográficas, produzindo imagens (Andreucci, 2002; Andreucci, 2003, Scaff, 1997; Tipler, 1995; KODAK, 2004). Estas películas são conhecidas como filmes radiográficos.

A imagem radiográfica industrial é gerada com a intenção de executar análises que muitas vezes não são possíveis a olho nu, por se tratarem de análises do interior das peças. Desta forma é obtido o defeito na imagem radiográfica desde que haja diferença

de intensidade de radiação recebida entre o defeito e o restante da peça. A composição dos metais adicionados da junta soldada absorve as radiações, e, portanto forma uma região clara no filme. Por outro lado, observa-se que nas regiões onde ocorrem os defeitos a taxa de absorção no filme, ou densidade, difere em relação às partes da junta exposta à radiação. A maioria dos defeitos em solda é caracterizada por ausência de material, portanto a densidade projetada no filme destas regiões é maior em relação às outras partes da solda, formando regiões mais escuras nas projeções dos defeitos (Bray & Stanley, 1997).

Embora o filme radiográfico seja o principal componente utilizado para este tipo de inspeção, outras técnicas de visualização são utilizadas, como as telas de fluoroscopia e a imagem digital. Apesar destas técnicas serem implementadas de formas diferentes os princípios para a análise são praticamente os mesmos (Bray & Stanley, 1997).

Existem duas formas para a obtenção das imagens radiográficas digitais: a imagem digital e a imagem digitalizada. A imagem digitalizada é obtida pela digitalização do filme radiográfico utilizando um *scanner* de alta resolução. E a imagem digital é obtida pelo processo direto, que consiste na transformação da radiação em sinal elétrico através de um sensor (Andreucci, 2002). Esta digitalização das imagens radiográficas possibilita o armazenamento da imagem em forma de arquivo eletrônico, e permite também a utilização de técnicas de PDI para o desenvolvimento de ferramentas automáticas de inspeção.

Este capítulo aborda o processo de soldagem mostrando como os defeitos são gerados, bem como apresenta uma revisão bibliográfica de metodologias que buscam automatizar o processo de inspeção em imagens radiográficas digitais de soldas e tubulações.

2.2) Soldagem

Segundo Marques (1991) e Wainer et-al (1992), o processo de soldagem é a união entre duas partes metálicas fazendo o uso de uma fonte de calor, com ou sem a aplicação de pressão. A AWS (*American Welding Society*) apresenta uma definição operacional para o processo de soldagem como descreve (Marques, 1991):

“Processo de união de materiais usado para obter a união localizada de metais e não-metais, produzida por aquecimento até uma temperatura adequada, com ou sem a utilização de pressão e/ou material de adição.”

Também se costuma denominar de solda, o resultado do processo de soldagem.

2.2.1) Formação da junta soldada

Chama-se junta, a região onde as peças são unidas por soldagem. A formação de uma junta soldada pode ocorrer colocando-se dois metais muito próximos, porém existe a dificuldade em aproximar dois metais a uma distância mínima devido à rugosidade da superfície metálica e devido às camadas de gordura, óxidos, umidade e poeira que cobrem estas superfícies. Deste modo existem dois grandes grupos de processos que permitem transpor estes obstáculos conhecidos como: “Processos de Soldagem por Pressão” e “Processos de Soldagem por Fusão”. O primeiro grupo é de aplicação restrita e é usado somente em condições particulares, por outro lado o segundo grupo inclui a maioria dos processos industriais conhecidos (Marques, 1991).

A figura 2.1 mostra uma secção transversal da solda, ilustrando as regiões de uma junta soldada produzida por fusão.

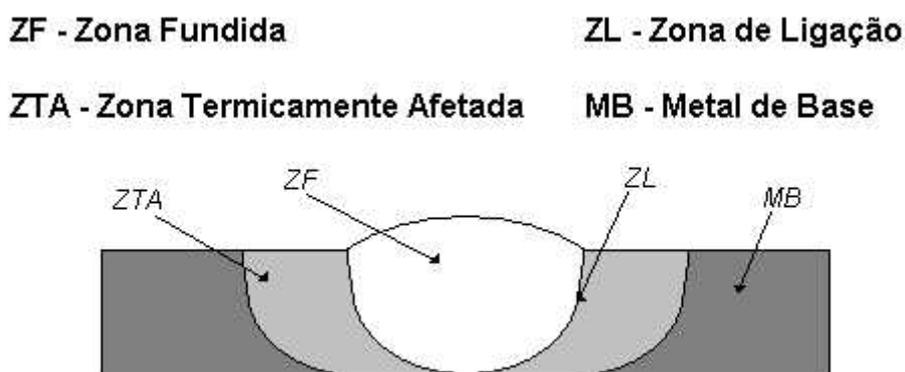


Figura 2.1 – secção transversal de uma solda de topo.

(Marques, 1991, pg 36)

Na figura 2.1, o metal de base (MB) é o metal a ser soldado, a zona fundida (ZF) é constituída pelo metal de solda, que é composto pelo metal de base e pelo metal de

adição, sendo que o metal de adição é o componente adicionado para preencher a junta. A zona termicamente afetada (ZTA) é a região que pertence ao metal de base e tem suas propriedades afetadas pelo calor do processo. Por fim a zona de ligação (ZL) é a fronteira entre a ZTA e a ZF.

2.2.2) Processo de soldagem por fusão

O “Processo por Fusão” necessita de uma fonte de energia para unir as peças, e dentre as fontes de energia utilizadas cita-se: fonte mecânica, fonte química, fonte radiante e fonte elétrica. Destas, a fonte elétrica é a mais usada nos processos por fusão, e consiste na produção de calor através da formação de um arco elétrico entre um eletrodo e o metal de base (Marques, 1991; Wainer et-al, 1992).

O arco pode ser considerado um condutor elétrico gasoso de forma cônica como mostra a figura 2.2. Como existe uma diferença de potencial entre as extremidades, ocorre uma descarga elétrica através de um gás ionizado a altas temperaturas, que produz energia térmica suficiente para a fusão.

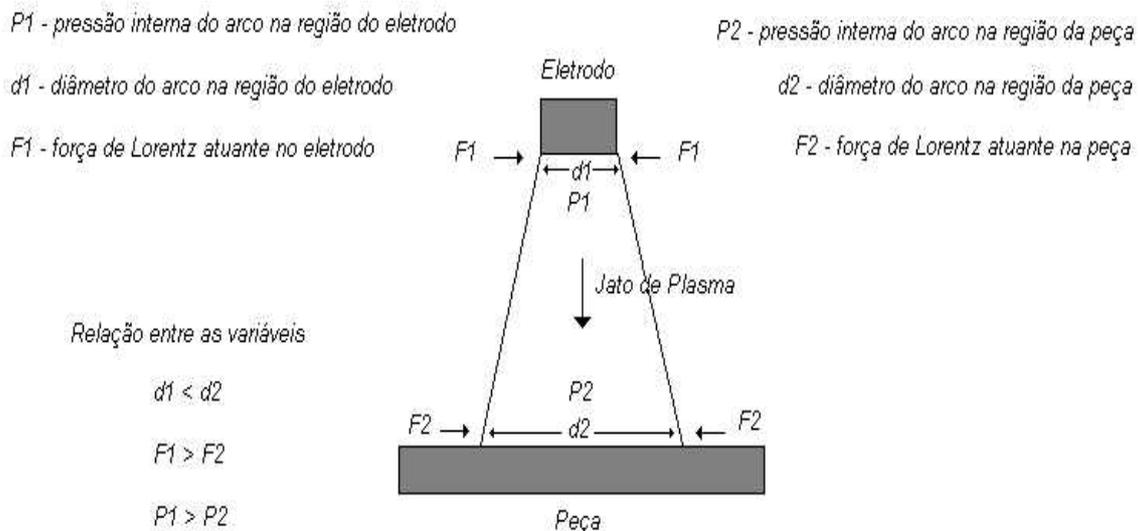


Figura 2.2 – Jato de Plasma. (Marques, 1991, pg 53)

Esse gás comporta-se como um condutor, e como tal está sujeito a uma corrente e a um campo magnético. A existência dessa corrente e desse campo magnético faz surgir uma força F conhecida como força de Lorentz, dada pela equação 2.1.

$$F = B.i.L \quad (2.1)$$

Onde F é a força de Lorentz, B é o campo magnético, L é o comprimento do condutor e i é a corrente elétrica.

Na figura 2.2 pode-se observar que o diâmetro do arco $d1$ é menor do que $d2$, e a força $F1$ tende a ser maior em relação à $F2$. Isto gera uma diferença de pressão $P1$ e $P2$ que causa um fluxo do gás no sentido do eletrodo para a peça, que é o jato de plasma. Esse jato de plasma é o responsável por garantir que a transferência do metal seja sempre no sentido eletrodo-peça. O metal de adição é transferido para a poça de fusão a temperaturas elevadas, e nas partes inferiores da poça o metal de adição é misturado ao metal de base sob intensa agitação, gerando uma poça fundida contendo o metal de base e o metal de adição na raiz da solda. Depois de completo o processo de soldagem, essa região consiste na ZF.

2.2.3) Características da ZF e da ZTA

O fluxo de calor utilizado na maioria dos processos de soldagem pode ser classificado em duas etapas: fornecimento de calor à junta e dissipação de calor pela peça. Do fornecimento de calor surge a energia de soldagem, que é uma medida de quantidade de calor cedida à peça. Por sua vez, a dissipação do calor ocorre por condução no sentido da solda para o material, o que implica que regiões de metal localizadas próximas à junta experimentam variações de temperatura.

O gráfico chamado de repartição térmica mostra a variação da temperatura de pico com a distância ao centro do cordão de solda, na direção perpendicular a este, figura 2.3.

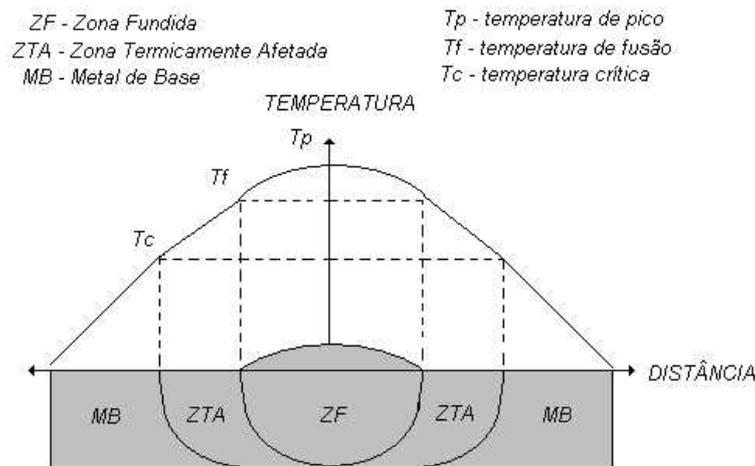


Figura 2.3 – Repartição Térmica. (Marques, 1991, pg 80)

A repartição térmica mostra a curva da temperatura de pico (T_p) em relação ao centro do cordão da solda, nesta curva observa-se que a ZF experimenta um valor de temperatura de pico superior às temperaturas de pico da ZTA e do MB como está descrito a seguir:

- Zona Fundida (ZF): região onde as temperaturas T_p são superiores às temperaturas de fusão (T_f) do metal.
- Zona Termicamente Afetada (ZTA): região onde as temperaturas T_p são superiores às temperaturas críticas (T_c) do material.
- Metal de Base (MB): região onde as temperaturas T_p são inferiores às temperaturas críticas (T_c) do material.

2.2.4) Descontinuidades comuns em soldas

A soldagem é um tratamento térmico violento que altera a estrutura das juntas, isto ocorre devido à aplicação localizada de calor que pode provocar alterações nas propriedades dos materiais. Estas alterações podem não ser aceitáveis, sendo que a maioria delas ocorrem devido ao resfriamento e à solidificação do cordão (Marques, 1991).

As alterações não aceitáveis são as descontinuidades. Uma descontinuidade é uma interrupção ou violação de uma estrutura em uma junta soldada. As descontinuidades são classificadas em três categorias, (Marques, 1991):

- Descontinuidades dimensionais: nesta categoria estão a distorção, dimensões incorretas e perfil incorreto da solda. Defeitos causados por soldagem em excesso, má escolha do local e da seqüência de soldagem, manipulação imperfeita do eletrodo, ou por falhas no dimensionamento da solda para atender algum requisito.
- Propriedades inadequadas: nesta categoria estão propriedades mecânicas. São defeitos causados por valores inadequados na resistência à tração, ao impacto, ou mesmo na resistência à corrosão.
- Descontinuidades estruturais: nesta categoria estão a porosidade, a inclusão, a falta de fusão, a falta de penetração, e as trincas entre outros.

As descontinuidades estruturais podem ser causadas pela manipulação incorreta do eletrodo, sujeira presente na junta, energia insuficiente de soldagem, velocidade da soldagem muito alta e até problemas de dimensão física do componente, como chanfro muito estreito ou diâmetro do eletrodo muito grande (Marques, 1991). Essas descontinuidades são detalhadas a seguir:

- Porosidades: ocorrem devido à inserção de bolhas de gás, que podem ser aprisionadas pelo metal solidificado, podem ocorrer distribuídas, em grupos, alinhadas ou vermiculares. A ocorrência deste defeito em pequenas quantidades não é considerada prejudicial à solda, porém acima de um determinado limite prejudica as propriedades mecânicas reduzindo a seção efetiva da junta. A figura 2.4 ilustra uma imagem radiográfica de uma junta soldada contendo este tipo de defeito.

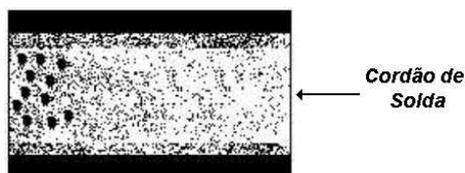


Fig 2.4 – Porosidade Agrupada

- Inclusão de escória: vários processos de soldagem utilizam fluxos que formam uma escória que pode ficar presa ao material solidificado. Uma proteção inadequada permite a contaminação da poça de fusão de tal forma que a escória flua à frente da poça e fique presa ao material solidificado. Possíveis medidas corretivas podem ser adotadas para evitar estes defeitos como: a manipulação correta do eletrodo e a remoção adequada das escórias. Visualmente estas inclusões diferem das porosidades devido ao formato alongado, a figura 2.5 ilustra uma imagem radiográfica de uma junta soldada contendo este tipo de defeito. Em uma quantidade excessiva estes defeitos tornam-se concentradores de tensão severos e podem favorecer a formação de trincas.

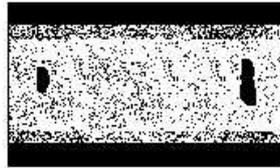


Figura 2.5 – Inclusão de Escória

- Falta de fusão: este defeito é a ausência de continuidade metalúrgica entre o metal depositado na poça e o metal de base, resultante do não aquecimento adequado do metal presente na junta. A consequência deste tipo de defeito também é a formação e propagação de trincas, a figura 2.6 ilustra uma imagem radiográfica de uma junta soldada contendo este tipo de defeito.

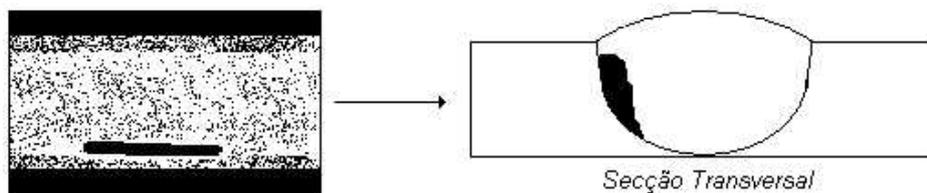


Figura 2.6 – Falta de Fusão.

- Falta de penetração: este defeito consiste em uma falha onde a raiz da junta não é completamente preenchida pelo metal depositado. Exceto em juntas projetadas para ter uma penetração parcial onde esta situação não é um defeito, a falta de penetração reduz a seção útil da solda e gera concentração

de tensões. A figura 2.7 ilustra uma imagem radiográfica de uma junta soldada contendo este tipo de defeito.

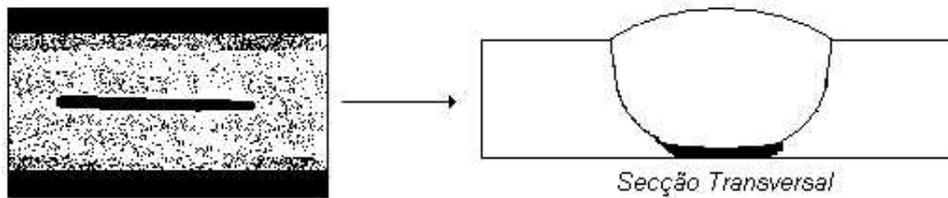


Figura 2.7 – Falta de Penetração.

- Trincas: são consideradas as descontinuidades mais graves em uma solda e resultam da tentativa de aliviar a tensão, sendo que todos os demais defeitos podem gerar trincas por serem concentradores de tensão. As trincas podem ser formadas durante a execução da soldagem, no resfriamento da solda ou mesmo algumas horas após a soldagem, mesmo quando são executados tratamentos térmicos para alívio de tensões. De uma forma geral a trinca surge da incapacidade do material em responder as tensões localmente impostas no processo de soldagem e também devido à presença de certos elementos químicos como o hidrogênio. As trincas podem ser externas (atingem a superfície), ou internas, não sendo possível detectá-las visualmente, e também podem ser localizadas na ZF, ZTA ou mesmo no metal de base. Na ZF ocorre a trinca de solidificação, formada a altas temperaturas nas etapas finais da solidificação. A figura 2.8 ilustra uma imagem radiográfica de uma junta soldada contendo este tipo de defeito.



Figura 2.8 – Trincas em uma Solda.

2.3) Descrição de Trabalhos Existentes

Segundo Felisberto et-al (2003) ainda não existe na literatura um sistema único capaz de executar automaticamente todas as etapas do processamento de análise de imagens em inspeção radiográfica: identificar através da imagem o que está sendo inspecionado, caracterizar não só os defeitos das juntas soldadas como também os defeitos internos do material, e apresentar uma avaliação com base nas normas vigentes.

Neste sentido, observa-se que algumas metodologias buscam a classificação dos defeitos em uma junta soldada, e outras metodologias buscam defeitos internos na parede da tubulação, sendo, portanto aplicações desenvolvidas em metodologias disjuntas.

2.3.1) Análise de defeitos em tubulações

A detecção de corrosão e erosão de tubulações é um dos maiores problemas na área industrial, e quando a análise é feita de forma visual está sujeita ao erro humano. A confiabilidade e a segurança do componente é influenciada pela degradação devido à corrosão, e a sua prevenção é essencial para evitar desastres. A tecnologia radiográfica permite a análise das tubulações enquanto o sistema está sendo usado, não sendo necessário interromper o processo e não sendo necessária a retirada da camada de isolamento (figura 2.9), permitindo desta forma diminuição nos custos de manutenção (Onel et-al, 2000; Redouane et-al, 2000; Zscherpel et-al, 2000).

Para a análise de corrosão e erosão, é prática comum obter-se a projeção da tubulação sobre um filme radiográfico utilizando o mecanismo que está ilustrado na figura 2.9, e a partir dela analisa-se a espessura de uma tubulação (Onel et-al, 2000; Redouane et-al, 2000; Zscherpel et-al, 2000).

Na figura 2.9 observa-se que a fonte emite os raios-X, registrando no filme radiográfico (detector) as partes da tubulação analisadas, sendo que a imagem radiográfica é a forma digitalizada do que foi registrado no filme. Observa-se a diferença de tonalidade na imagem radiográfica de acordo com a região da tubulação radiografada: parede (cinza claro), parte interna (cinza escuro) e isolamento (preto). A

partir desta imagem radiográfica pode-se analisar a espessura das paredes e diagnosticar a corrosão.

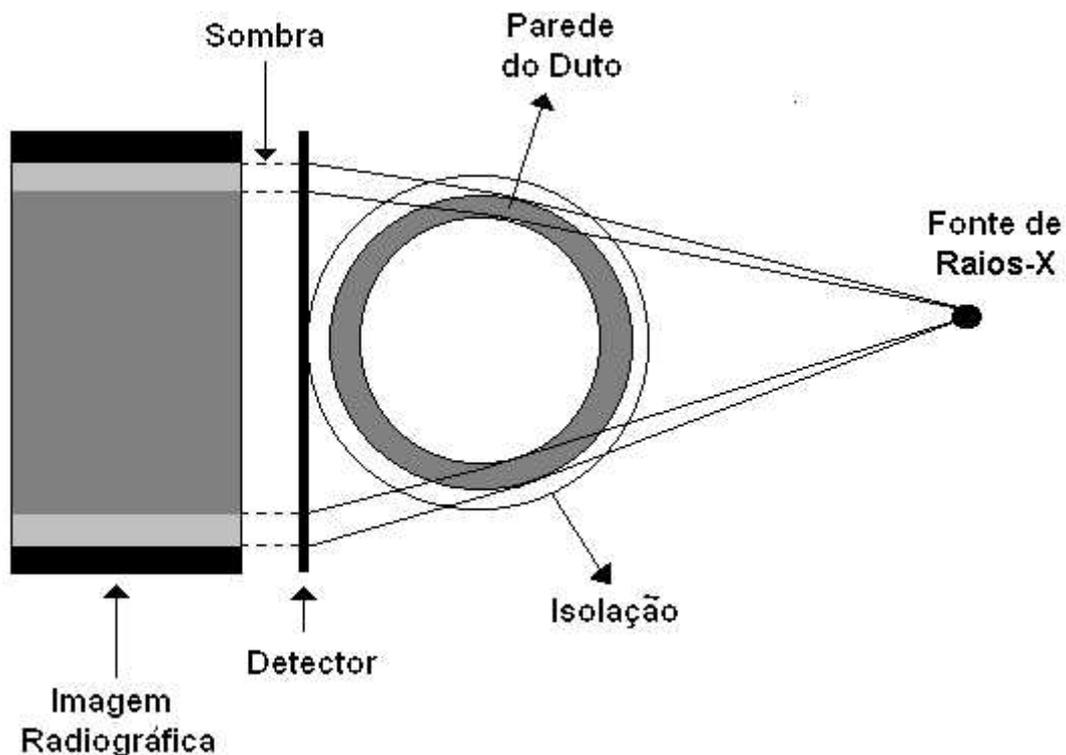


Figura 2.9 – Sistema utilizado para gerar a radiografia de uma tubulação
(Onel et-al, 2000).

Em tubulações existem outros tipos de defeitos além da análise de corrosão, dentre tais defeitos estão as descontinuidades nas paredes do tubo, descontinuidades que podem causar vazamentos, culminando em sérios danos ao sistema. Para a análise destas descontinuidades podem ser empregadas diferentes técnicas.

No trabalho de Soares (2003) foi utilizada a técnica da emissão acústica para encontrar falhas nas tubulações e a técnica do ultra-som para acompanhar a evolução das falhas mediante um teste hidrostático. Soares (2003) avaliou através de um teste, as condições das tubulações enquanto submetidas a pressões internas, com o objetivo de detectar descontinuidades geradas pelo desgaste ao longo do tempo. Para isso, colocou sensores de emissão acústica, distanciados em campos de prova de aço com 20 polegadas de diâmetro e 14mm de espessura, sendo que nestes campos de prova foram usinadas artificialmente descontinuidades. Os resultados dos testes mostraram dados

coletados com o auxílio dos sensores de emissão acústica que permitem com antecedência identificar a necessidade ou não de executar um END na tubulação.

Camerini et-al (2003) propôs o uso de um dispositivo chamado de *PIG* para detectar vazamento em oleodutos de forma preventiva. Os *PIG's* são dispositivos destinados a localizar defeitos como amassados, perdas de espessura por corrosão e vazamentos entre outros. Camerini et-al (2003) utilizam um *PIG* com seis sensores de pressão que monitoram três pontos: região traseira e região frontal, que são chamadas de regiões de referência; e a região do meio do *PIG* chamada de volume de teste. O *PIG* é inserido internamente na tubulação e é impulsionado pela pressão de bombeio. Quando não ocorre vazamento existe um gradiente de pressão crescente entre as regiões de referência, por outro lado, quando ocorre vazamento a pressão na região do volume sofre uma queda. Ao *PIG* são acoplados dispositivos eletrônicos que permitem a análise destes sensores de pressão em forma de sinal.

Também com o objetivo de analisar as tubulações Felisberto et-al (2004a) e Felisberto et-al (2004b) apresentaram uma metodologia que utiliza algoritmos genéticos para encontrar uma tubulação em uma imagem radiográfica mais complexa. O método utiliza um modelo de imagem para a tubulação e a partir de características retiradas deste modelo executa uma busca para encontrar a região que seja mais semelhante ao modelo. O método permite encontrar um trecho de tubulação mesmo que a imagem complexa tenha outros tipos de componentes e mesmo que o trecho do tubo tenha uma inclinação.

2.3.2) Análise de defeitos em juntas de solda

As tubulações são o meio mais seguro e econômico para executar o transporte de gás e líquidos sobre longas distâncias, e uma das formas mais importantes de inspecionar as juntas soldadas destas tubulações são as aplicações dos END's. A inspeção em junta de solda é uma forma de aumentar a segurança no uso da tubulação (Shafeek et-al, 2004a, Wang & Liao, 2002).

A forma visual ainda é o primeiro método a ser utilizado em inspeções industriais, porém Chan & Pang (2000) destacam o fato desta inspeção ser uma tarefa repetitiva e cansativa ao ser humano, sendo um dos principais fatores de erro do

processo. Chan & Pang (2000) ainda mencionam estudos que mostram a inspeção visual com um aproveitamento de 60 à 75 % na identificação de defeitos, e sugerem a automação do processo de inspeção como uma forma de contornar estes problemas. Com a intenção de identificar problemas nas tubulações de forma automática foram desenvolvidos trabalhos objetivando análises nas imagens radiográficas digitais que buscam defeitos em juntas soldadas (Shaffek, 2003a; Shafeek, 2004b; Wang & Liao 2002; Lawson & Parker, 1994; Lashkia, 2001; Yacine & Redouane 2000; Carvalho et-al, 2003; Silva et-al, 2001; Padua et-al, 2004).

As imagens radiográficas que são utilizadas para a análise de juntas soldadas são geralmente imagens digitalizadas a partir do filme radiográfico e, na maioria das situações apresentam o aspecto ilustrado na figura 2.10, contendo ruídos provenientes do sistema de digitalização, ou mesmo devido à técnica de exposição radiográfica. Ainda pode-se observar na mesma figura, a ocorrência de outros objetos na imagem, como a marcação de trechos de solda que são inseridos durante a obtenção da radiografia.

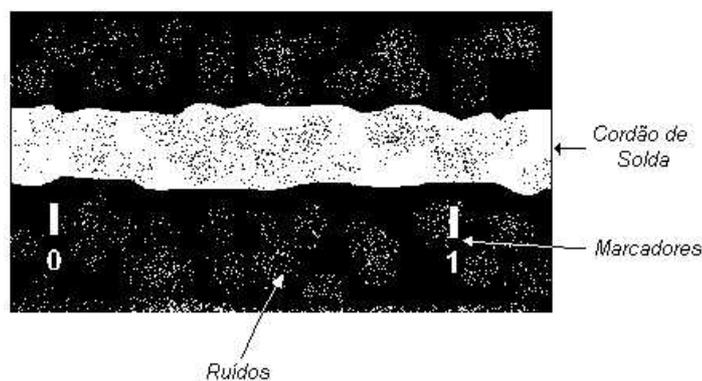


Figura 2.10 – Ilustração de imagem radiográfica de junta soldada

Existem alguns métodos que utilizam estas imagens radiográficas digitais de junta soldada para fazer a análise dos defeitos de forma automática, como os métodos descritos a seguir.

Lawson & Parker (1994) utilizaram um método baseado em redes neurais para a análise dos defeitos. A partir de imagens radiográficas que têm mais componentes além da junta soldada como ilustra a figura 2.10, é aplicada uma rede neural para a segmentação do cordão de solda na imagem total com o objetivo de restringir o espaço

de análise. Em uma segunda etapa, outra rede é utilizada para segmentar o defeito dentro do cordão de solda. Em ambas as etapas foram utilizadas redes neurais multicamadas com treinamento baseado na retropropagação do erro.

Yacine & Redouane (2000) apresentaram um método de segmentação aplicado a imagens de raio-X, que usa duas abordagens para segmentar as regiões que serão analisadas como defeitos. Através da análise das bordas e de similaridade da região, os defeitos são segmentados e é executado o levantamento de características destes defeitos dividindo-os em duas classes: defeitos lineares e defeitos volumétricos. Uma vez que os contornos dos defeitos aparecem é feita a seleção manual por meio do *mouse* e então é calculado o comprimento, a altura, a área, a forma e o eixo médio de cada um dos defeitos.

Lashkia (2001) apresentou um método para a segmentação automática de defeitos em juntas de solda. Neste método são utilizados parâmetros da imagem como variância e média, que servem como base para uma análise da imagem. De posse destes valores é aplicada uma lógica *fuzzy* para a obtenção dos resultados, através de operadores *fuzzy* são gerados níveis diferenciados de contraste e variância que separam na imagem os defeitos existentes.

Wang & Liao (2002) utilizaram o método de subtração do fundo para executar a segmentação dos defeitos em solda. O método de subtração do fundo é muito utilizado para a segmentação em imagens e tem o objetivo de eliminar regiões na imagem que não são significativas. São gerados perfis estimados para a secção transversal do cordão de solda, essas imagens estimadas são consideradas como fundo. Tal fundo é semelhante à imagem original da junta soldada, mas não possui os defeitos. Então se executa a subtração entre o fundo e a imagem original e consegue-se obter o realce dos defeitos.

Carvalho et-al (2003) trabalharam em um classificador de defeitos e descreveram uma forma de minimizar o número de características extraídas para a classificação de quatro tipos de defeitos (seção 2.2.4) em junta soldada. No método de Carvalho et-al (2003), as características são mensuradas a partir de aspectos de localização, forma, comprimento, nível de cinza, entre outros. Inicialmente oito características que são extraídas dos defeitos e enviadas ao classificador baseado em redes neurais. Com o objetivo de diminuir o número de características utilizadas para a classificação entre os quatro tipos de defeitos é executado um cálculo de correlação. A correlação ocorre entre as características extraídas com elas próprias, e entre as

características com os tipos de defeitos. Com base nos resultados obtidos no cálculo da correlação é possível eliminar características redundantes, fortemente correlatadas, desde que a característica eliminada não seja a única que tenha um alto grau de correlação com um determinado tipo de defeito. O melhor resultado acontece com a utilização de quatro características, e os autores mencionam que com essas características é possível identificar os quatro tipos de defeito com um aproveitamento de 97,5%.

Shafeek et-al (2004a) e Shafeek et-al (2004b), em dois trabalhos, realizaram a segmentação dos defeitos da junta soldada executando processamento nas imagens radiográficas para a extração das características e a identificação dos defeitos.

No primeiro trabalho, (Shafeek et-al 2004a), foi utilizado um método que executa as duas primeiras etapas: segmentação e extração das características. A região a ser analisada do cordão de solda é selecionada manualmente na imagem radiográfica, e então a imagem selecionada passa por um processo de realce e tratamento como é apresentado no diagrama em blocos da figura 2.11.

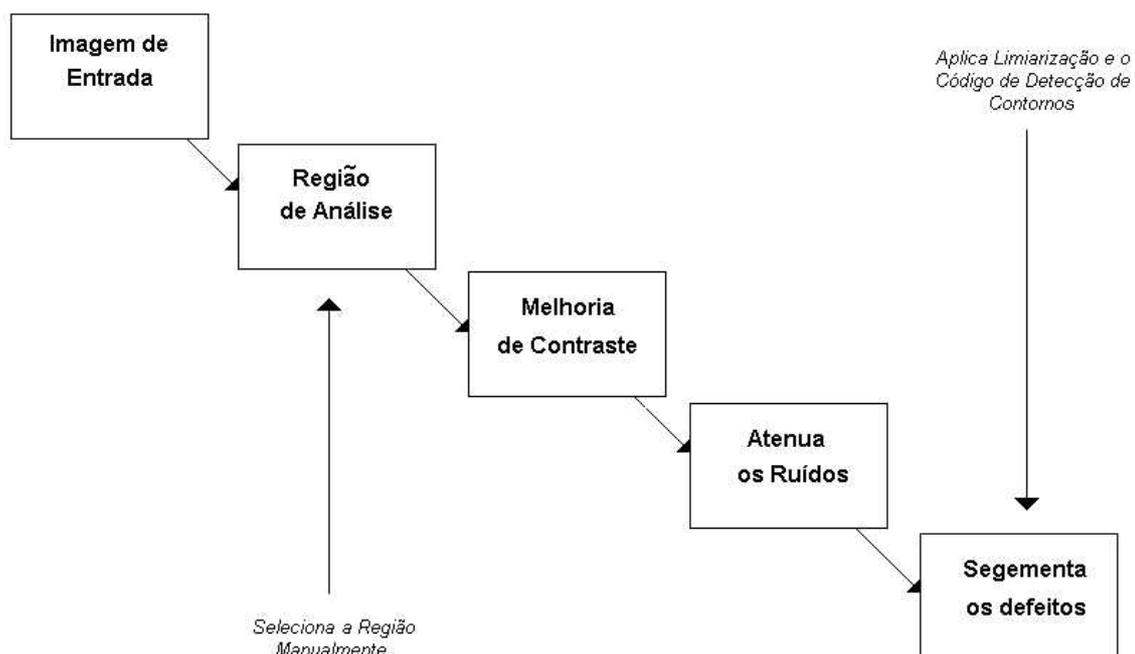


Figura. 2.11– Sequência para a segmentação dos defeitos de juntas soldadas proposto por Shafeek et-al (2004a)

São aplicadas técnicas de PDI com o objetivo de melhorar o contraste da imagem e eliminar ruídos. Em seguida são aplicadas outras técnicas de PDI, como

limiarização e detecção de contornos, para isolar os possíveis defeitos. Com cada um dos defeitos isolados é feita uma busca na imagem por regiões com contornos fechados, assumindo tais regiões como defeitos, e sobre estas regiões faz-se o levantamento das características.

No segundo trabalho, Shafeek et-al (2004b) utilizam as características extraídas automaticamente para identificar também automaticamente os defeitos. Os autores propõem a separação da junta soldada em quatro regiões: centro da solda, borda da solda, parte interna da solda e parte metálica. Em seguida é implementado um sistema de classificação dos defeitos com base nos parâmetros obtidos no trabalho anterior: perímetro, área, altura e comprimento, sendo também considerada a posição deste defeito em relação à solda. Valores de localização do defeito como: centro, borda, parte interna da solda ou parte metálica são considerados, valores de diâmetro para defeitos circulares e valores de altura e comprimento para defeitos alongados também auxiliam e permitem a classificação dos defeitos.

Para a classificação dos defeitos, Silva et-al (2001) elaboraram um método para comparar qual é a melhor estrutura para um classificador de defeitos em juntas soldadas: classificador não-hierárquico ou classificador hierárquico. O classificador não-hierárquico não faz distinção entre os defeitos, e em defeitos que apresentam mais similaridades o rendimento não é satisfatório, resultando em resposta dúbias. Por outro lado, o classificador hierárquico procura analisar se o defeito em questão corresponde a uma classe mais facilmente separável ou não. Se o defeito não pertence a uma classe deste tipo parte-se para a análise de classes menos separáveis. Neste sentido, é executado uma análise sobre cinco tipos de defeitos, e conclui-se que classificadores que apresentem uma hierarquia tem melhor desempenho.

No trabalho de Silva et-al (2004) foi feita uma análise da relevância das características para classificar um defeito. Os autores utilizam uma rede neural para executar a classificação de 4 e de 5 classes de defeitos. Para a entrada dessa rede os autores fazem o uso apenas de quatro descritores, ou características, do defeito obtendo resultados de 100% de aproveitamento. Os autores executam testes alterando os valores do número de neurônio da camada intermediária para encontrar a topologia que apresente o melhor desempenho, e alteram também o número de características para classificar os defeitos, obtendo aproveitamento acima de 90% até com a utilização de 2 características. As quatro características utilizadas são geradas a partir da relação entre

outras características, tais como: largura do cordão de solda, distância do defeito em relação ao centro do cordão, largura, comprimento, área e perímetro do defeito.

Também com o objetivo de classificar defeitos, Padua et-al (2004) apresentaram uma metodologia que analisa o perfil transversal da solda na imagem radiográfica. O trabalho consiste em um sistema que classifica o sinal (perfil) de acordo com a existência ou não de defeito. Para isto os autores mostram o perfil de uma solda com a ocorrência de uma queda abrupta de níveis de cinza na região do defeito. E deste modo utilizam uma rede neural para analisar estes perfis e classificar o sinal como D (com defeito) ou ND (sem defeito).

Existem ainda alguns trabalhos elaborados com metodologias que objetivam segmentar também o cordão de solda, com a intenção de diminuir o espaço de análise dos defeitos. Um exemplo deste tipo de abordagem é apresentado no trabalho de Liao & Ni (1996), onde os autores apresentam uma metodologia que localiza os cordões de solda em uma imagem através da comparação do perfil do cordão com uma curva gaussiana. Esta metodologia identifica como cordão de solda, o perfil que apresenta maior semelhança com uma curva *Gaussiana*.

Em dois diferentes trabalhos, Sezgin & Sankur (2001) e Sezgin & Sankur (2003), elaboraram um estudo envolvendo uma técnica de PDI para segmentar defeitos em imagens geradas a partir de END's. Os trabalhos tratam da análise de critérios necessários para um método de limiarização apresentar aproveitamento satisfatório em imagens de END's, e também desenvolvem um método próprio de limiarização.

Sezgin & Sankur (2001) é fizeram a separação dos métodos de limiarização em seis categorias, baseados em valores espaciais, de histograma e níveis de cinza. O resultado de sua pesquisa foi a obtenção de parâmetros que permitem analisar os métodos, e com o uso destes parâmetros é possível gerar uma tabela comparativa entre 41 métodos de limiarização.

No trabalho de Sezgin & Sankur (2003) foi desenvolvido um método de multi-limiarização em imagem que executa a análise da função de momento da amostra, com o objetivo de segmentar o objeto de interesse. Tal método possui melhor índice de aproveitamento de acordo com os critérios estabelecidos em (Sezgin & Sankur, 2001). Este método de limiarização será descrito no capítulo 3.

2.4) Critérios Para Aceitação de Defeitos

Em Andreucci (2002) estão descritos alguns critérios de aceitação ou rejeição de defeitos em juntas soldadas mediante ensaios radiográficos. Os critérios são retirados do código ASME Seção VIII div. 1, para vasos de pressão e são aplicados em juntas soldadas de topo. Estes critérios são apresentados para soldas projetadas para ensaio radiográfico total (parágrafo UW-51).

Para os critérios de aceitação na radiografia total (UW-51), as soldas devem ser livres de:

- *Qualquer indicação caracterizada como:* trinca, zona de fusão ou penetração incompleta;
- *Qualquer outra indicação alongada na radiografia que:* tenha um comprimento maior que:
 - a) $\frac{1}{4}$ pol. para t até $\frac{3}{4}$ pol.;
 - b) $1.3 t$ para t de $\frac{3}{4}$ pol. até $2.1/4$ pol.
 - c) $\frac{3}{4}$ pol. para t acima de $2.1/4$ pol.
 Onde t é a espessura do cordão de solda.
- *Qualquer grupo de indicações alinhadas que:* tenham um comprimento agregado maior que $t (c1 + c2 + c3 > t)$ num comprimento de $12t$. Exceto quando a distância entre as duas imperfeições sucessivas exceder à $6c$, onde c é o comprimento da mais longa imperfeição do grupo ($c_n > 6c$), como mostra a figura 2.12.
- *Indicações arredondadas:* em excesso ao especificado no padrão de aceitação ASME Seção VIII Div.1 Ap.4.

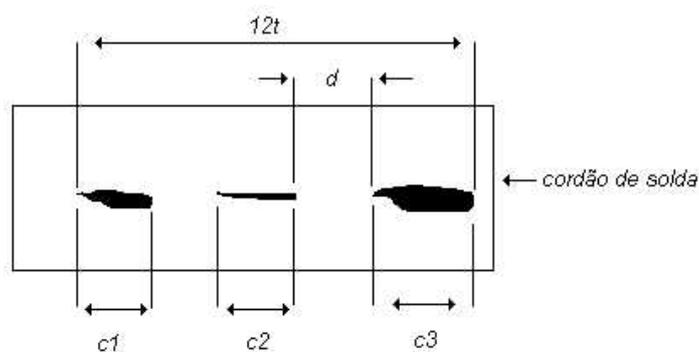


Figura 2.12 – Dimensões dos defeitos segundo a norma ASME Seção VIII div. 1, ensaio radiográfico total (Andreucci, 2002, pg 84 e 85).

2.5) Conclusão

Através da revisão bibliográfica feita neste capítulo foi possível observar alguns aspectos:

- A digitalização das imagens radiográficas possibilita o emprego de técnicas automáticas para encontrar os defeitos nas soldas e nas tubulações;
- Os defeitos surgem do próprio processo de soldagem devido a fatores de difícil controle como o resfriamento do material;
- Nas tubulações é possível medir o nível de corrosão analisando a espessura da parede do tubo na imagem radiográfica, e empregando a técnica da projeção da tubulação no filme;
- O desenvolvimento de técnicas que utilizam as imagens radiográficas vem sendo empregado atualmente com o objetivo de segmentar e classificar defeitos na tentativa de encontrar uma forma de automatizar a inspeção e diminuir a falha humana no processo;
- A importância na detecção de defeitos como descontinuidades estruturais para garantir a qualidade da solda, e o conhecimento da norma vigente no processo para o descarte ou o aceite da solda. Vale ressaltar que defeitos como trincas, falta de penetração e falta de fusão dificilmente são aceitos.

Algumas das referências utilizadas neste capítulo, como (Lashkia, 2001; Wang & Liao, 2002) possibilitaram o aparecimento de *insights* que contribuíram com o desenvolvimento deste trabalho, sendo utilizadas no desenvolvimento das etapas do método proposto.

Nos capítulos seguintes são abordadas as técnicas de PDI utilizadas para a implantação da metodologia proposta neste trabalho. Tais técnicas são utilizadas na: segmentação dos cordões de solda, segmentação dos defeitos, segmentação das paredes da tubulação, e na extração das características destes defeitos.

3) PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Este capítulo aborda os conceitos e técnicas de PDI que são necessários para a implementação dos métodos propostos neste trabalho. Tem o objetivo de explicar as rotinas de PDI que são utilizadas nos passos da segmentação e extração das características da metodologia desenvolvida, e também de explicar conceitos de imagem digital e processamento de imagens que foram utilizados. As imagens radiográficas utilizadas são de 256 tons de cinza e, portanto as ferramentas de PDI tratadas neste capítulo são mostradas para este tipo de imagem.

3.1) Imagem Digital

O termo imagem monocromática refere-se a uma função bidimensional $f(x,y)$ de coordenadas espaciais x e y , e valor f que representa o brilho da imagem (nível de cinza) para cada par (x,y) . Por sua vez uma imagem digital é uma imagem $f(x,y)$ discretizada, ou seja, pode ser considerada uma matriz onde as linhas e colunas possuem índices que identificam o ponto na imagem, e o valor do elemento dessa matriz neste ponto é o nível de cinza. Os elementos da matriz que representam essa imagem são conhecidos como elementos de figura, ou do inglês *pixels*, uma abreviação de *picture elements* (Gonzales & Woods, 1992).

Para a digitalização de uma imagem devem ocorrer dois passos: a amostragem das coordenadas x e y , e a quantização dos níveis de cinza de cada elemento. A amostragem das coordenadas pode ser compreendida como a partição do plano que forma a imagem em uma grade, como ilustra a figura 3.1. Da mesma forma a quantização consiste em atribuir valores inteiros para cada elemento dessa grade (*pixel*). Em processamento de imagem esses valores comumente são assumidos como potência de dois, equação 3.1.

$$L = 2^m \tag{3.1}$$

Onde L é o nível de cinza do elemento $f(x,y)$, e para as imagens utilizadas neste trabalho pode atingir 256, ou seja 2^8 .

Observa-se na figura 3.1 que os tons de cinza mais escuros correspondem a valores menores, ou seja, o preto corresponde a zero (0), e o branco corresponde a 255 em uma imagem de 256 tons de cinza.

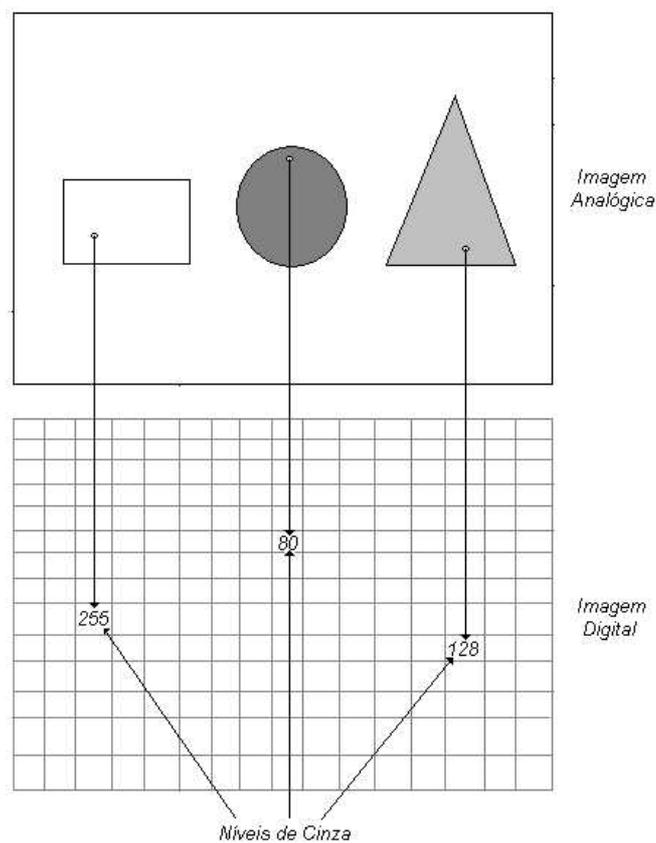


Figura 3.1 – Imagem Analógica relacionada com a Imagem Digital.

A figura 3.2 ilustra as componentes de uma imagem digital. Observando a figura, nota-se que a origem da imagem se situa no canto superior esquerdo, ou seja, é neste ponto que se encontra o elemento (0,0) da matriz. Também se nota que a coordenada x corresponde à linha, e que a coordenada y corresponde à coluna onde se situa o elemento, sendo que o valor do elemento $f(x,y)$ corresponde ao tom de cinza

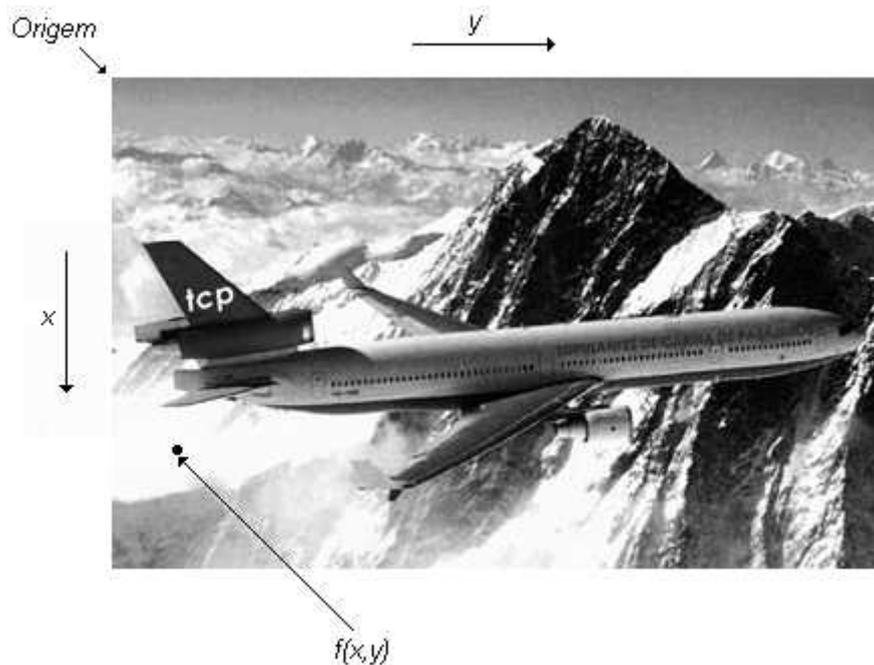


Figura 3.2 – Representação de uma Imagem Digital (Coordenadas)

Dessa forma é comum analisar uma imagem digital como uma matriz de M linhas e N colunas onde o valor de cada elemento pertence ao intervalo de 0 a $L-1$ e corresponde ao valor de cada *pixel* (Silva, 1999). A equação 3.2 mostra uma matriz que representa uma imagem digital, nesta matriz, por exemplo, o elemento (1, 1) tem o nível de cinza igual a 145.

$$f(x,y) = \begin{bmatrix} 255 & 234 & 241 \\ 128 & 145 & 190 \\ 56 & 68 & 90 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Além da quantização do *pixel*, outro parâmetro que é importante na digitalização de uma imagem é a resolução espacial, que representa o número de amostras existentes em uma imagem (o número de *pixels*), ou seja, $M \times N$. A imagem da matriz mostrada na equação 3.2 tem uma resolução de 9 *pixels*, ou seja, é uma matriz 3 x 3.

Nos próximos tópicos as coordenadas dos *pixels* serão tratadas como coordenadas (i, j) ao invés de (x, y) , pois as letras x e y serão usadas para indicar o perfil original e o perfil filtrado respectivamente, no capítulo 4.

3.2) Processamento de Imagem

Nesta seção são apresentados técnicas e algoritmos de processamento de imagens, que são utilizados na metodologia proposta neste trabalho. As aplicações destas técnicas obedecem a seguinte seqüência:

a) Segmentação dos Defeitos na Solda

- *Expansão Linear do Histograma*: executada com o objetivo de aumentar o contraste na imagem;
- *Filtro por Mediana*: executado logo após a aplicação da expansão com o objetivo de reduzir os ruídos provenientes da etapa de digitalização da imagem radiográfica.
- *Perfis da Imagem*: os perfis são filtrados e processados com o objetivo de realçar os possíveis defeitos na imagem;
- *Filtro por Mediana*: novamente é utilizado com o objetivo de reduzir os ruídos que prejudicam a limiarização;
- *Operador de Sobel*: é aplicado com o objetivo de realçar as bordas dos possíveis defeitos;
- *Segmentação*: é aplicada uma técnica de limiarização com o objetivo de isolar apenas os possíveis defeitos;
- *Filtro por Mediana*: é aplicado pela terceira vez com o objetivo de reduzir o número de “espigamentos” na imagem.

b) Segmentação do Cordão de Solda

- *Segmentação*: é aplicada uma técnica de limiarização para separar o cordão de solda do MB;
- *Projeção da Imagem*: é analisada e processada a projeção vertical da imagem limiarizada da junta soldada, com o objetivo de marcar as regiões que correspondem às bordas do cordão de solda, e dessa forma isolar o cordão do restante da imagem.

c) Extração das Características

- *Etiquetagem ou Labeling*: é executada após a segmentação dos defeitos, e tem como objetivo rotular todas as regiões fechadas da imagem (possíveis defeitos). Cada defeito possui um *Label* específico;
- *Vizinhança de um Pixel*: é feita a análise da vizinhança dos *pixels* de cada região fechada (cada *Label* específico) que representa cada possível defeito. O objetivo é encontrar o número de *pixels* que existem na borda de cada um destes possíveis defeitos.

d) Análise de Tubulações

- *Perfis da Imagem*: os perfis são analisados e processados com o objetivo de encontrar as partes internas e externas das paredes das tubulações. E com isso executar a segmentação destas paredes.

3.2.1) Vizinhança de um *pixel*

Um *pixel* p de coordenadas (i, j) possui quatro vizinhos: dois são horizontais e dois são verticais. Esses vizinhos possuem as coordenadas $(i+1, j)$, $(i-1, j)$, $(i, j-1)$, $(i, j+1)$ e são chamados de vizinhança de 4, $N_4(p)$. O *pixel* p também possui quatro vizinhos diagonais que têm as coordenadas $(i+1, j+1)$, $(i+1, j-1)$, $(i-1, j+1)$ e $(i-1, j-1)$ e são denotados por $N_D(p)$. O conjunto de *pixels* formado pela junção dos dois grupos de vizinhança é chamado de vizinhança de 8, $N_8(p)$ (Gonzales & Woods, 1992).

Para exemplificar considera-se a imagem digital representada pela matriz da equação 3.2. O *pixel* de coordenada $(1, 1)$ tem valor igual a 145, e dois de seus vizinhos são os *pixels* de coordenadas $(0,1)$ e valor igual a 234, e $(2, 2)$ cujo valor é 90, sendo respectivamente um vizinho vertical e outro diagonal.

A figura 3.3 ilustra uma região fechada que possui todos os *pixels* internos formando uma região clara, que é cercada por uma região externa de brilho escuro.



Figura 3.3 – Exemplo de região fechada com o mesmo tom de cinza.

Analisando a vizinhança de 8 sobre todos os *pixels* da região fechada, e atribuindo como *pixel* de borda todos aqueles que possuem brilho claro e alguma vizinhança com a região de brilho escuro têm-se a borda, como ilustrado na figura 3.4.

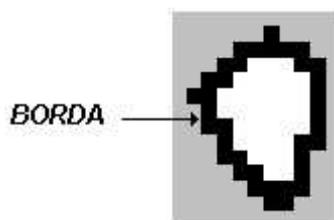


Figura 3.4 – Borda de uma região fechada com o mesmo tom de cinza

3.2.2) Detecção de bordas

Uma borda é o limite entre duas regiões com níveis de cinza distintos. E a detecção de bordas é uma abordagem muito comum para a detecção de discontinuidades significantes nestes níveis. (Gonzales & Woods, 1992).

Uma forma de realçar as bordas de uma imagem é através da aplicação do operador de *Sobel*, que consiste na aplicação de duas máscaras na vizinhança do *pixel* em análise (*pixel* central). As máscaras estão representadas na figura 3.5.

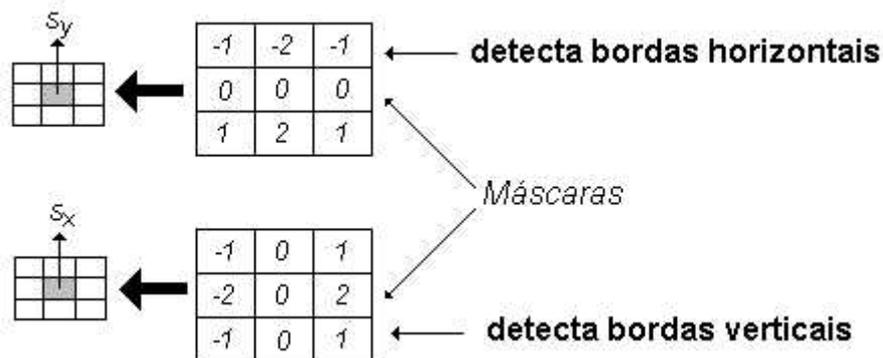


Figura 3.5 – Máscaras para executar a detecção de bordas por meio do operador *Sobel*.

As máscaras mostradas da figura 3.5 varrem toda a imagem. A operação consiste em selecionar um *pixel* e seus vizinhos (vizinhança 3 x 3) e aplicar a equações 3.3 e 3.4, obtendo os valores de S_x e S_y para o *pixel* central.

$$S_x = p(i-1, j+1) + 2p(i, j+1) + p(i+1, j+1) - p(i-1, j-1) - 2p(i, j-1) - p(i+1, j-1) \quad (3.3)$$

$$S_y = p(i+1, j+1) + 2p(i+1, j) + p(i+1, j-1) - p(i-1, j+1) - 2p(i-1, j) - p(i-1, j-1) \quad (3.4)$$

As equações 3.3 e 3.4 foram retiradas de Parker (1997).

Os valores S_x e S_y devem ser compostos em um único valor que será o valor do *pixel* central, como mostra a figura 3.6.

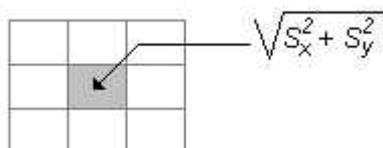


Figura 3.6 – Cálculo do resultante do operador de *Sobel*.

3.2.3) Filtro por mediana

A filtragem por meio da mediana é feita da seguinte forma. Seleciona-se um grupo formado por um *pixel* e por seus vizinhos, arranja-se o valor desses *pixels* em ordem crescente de nível de cinza, e considera-se como novo valor do *pixel* o valor central deste arranjo. Por exemplo, em uma vizinhança 3 x 3 a mediana é o 5º maior

valor, em uma vizinhança 5 x 5 a mediana é o 13º maior valor (Gonzales & Woods, 1992). As figuras 3.7 a e b ilustram essas duas situações.

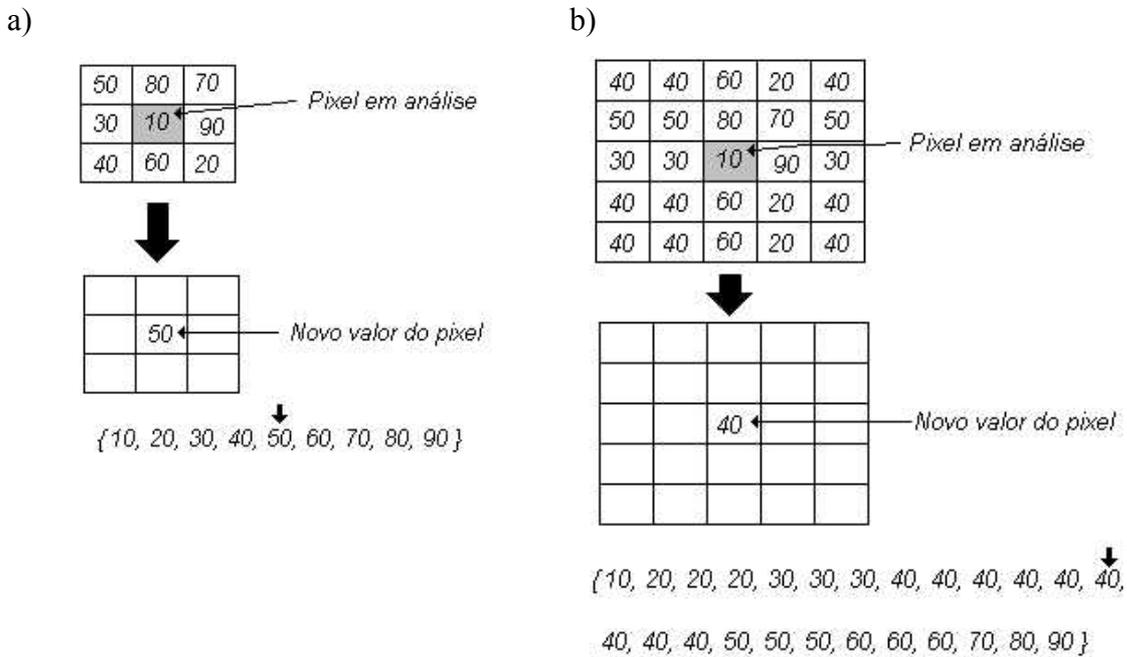


Figura 3.7 – Filtro da Mediana com Janela a) 3 x 3, b) 5 x 5

A janela ou máscara do filtro da mediana deve percorrer toda a imagem e tem o objetivo de eliminar total ou parcialmente ruídos que são distribuídos em picos ou que apresentam componente do tipo “espigada”, que aparecem isolados na área da janela do filtro (Silva, 1999; Gonzales & Woods, 1992). Sua vantagem é borrar menos a imagem e distorcer menos as bordas se for comparado com o cálculo de uma média.

3.2.4) Histograma

O histograma de uma imagem digital é uma função discreta que é dada pela equação 3.5 (Gonzales & Woods, 1992).

$$h(k) = \frac{n_k}{n} \quad (3.5)$$

Onde k representa os níveis de cinza, e varia de 0 a $L-1$ (256 níveis), n_k representa o número de *pixels* que possuem o nível de cinza k , e n representa o número total de *pixels* da imagem ($M \times N$). O histograma fornece uma descrição global da aparência da imagem, como mostram as imagens das figuras 3.8 a e b.

Desta forma pode-se notar na imagem da figura 3.8a que os valores dos *pixels* situam-se em uma região de tons de cinza não muito claros e nem muito escuros. Por sua vez a imagem da figura 3.8b apresenta um grande número de *pixels* com valores baixos de tons de cinza e o restante com valores intermediários, pois é uma imagem mais escura que a anterior. Quando uma imagem possui alto contraste praticamente todas as faixas de valores do histograma são preenchidas com algum número de *pixels*. Neste sentido o histograma auxilia no aumento de contraste da imagem com o uso de um procedimento chamado expansão linear de histograma. Tal procedimento pode ser representado pela equação 3.6.

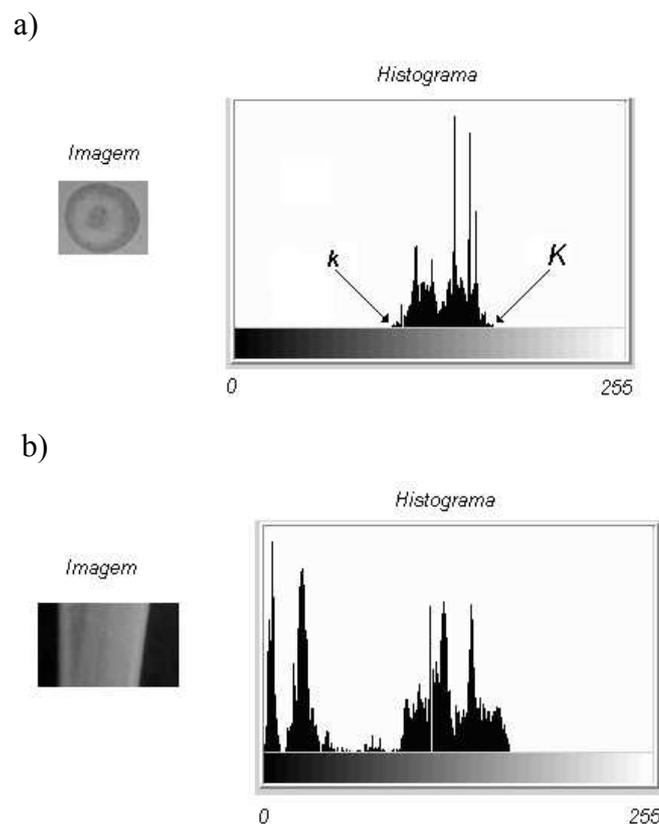


Figura 3.8 – Histograma das imagens

$$P(i, j) = \frac{p(i, j) - k}{K - k} \quad (3.6)$$

Onde P é o novo *pixel* pertencente a imagem com contraste maior, p é o *pixel* da imagem original, K é o maior valor de tom de cinza da imagem original, e k é o menor valor de tom de cinza da imagem original, K e k estão representados no histograma da imagem original na figura 3.8a. A figura 3.9 mostra o efeito da expansão linear do histograma sobre a imagem da figura 3.8a.

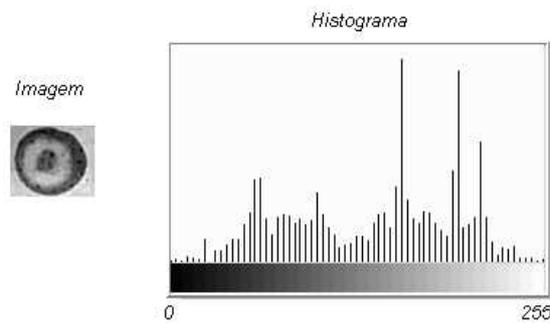


Figura 3.9 – Histograma da Imagem Expandida

3.2.5) Perfil e projeção

O perfil de uma imagem corresponde aos valores dos *pixels* de uma linha ou uma coluna inteira como mostra a figura 3.10.

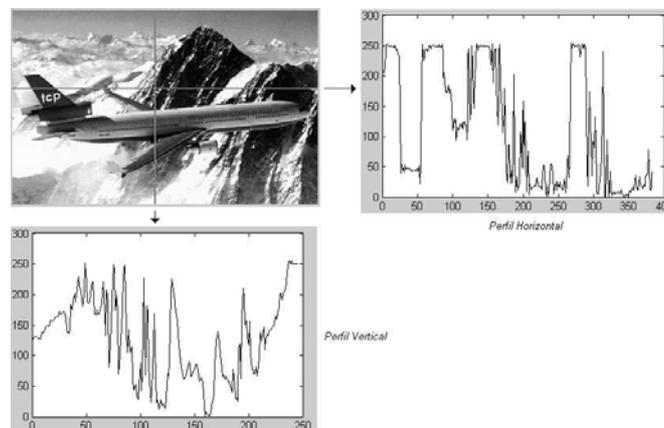


Figura 3.10 – Perfil Vertical e Horizontal da Imagem

A filtragem utilizada para o realce dos defeitos, e que é proposta na metodologia deste trabalho, é aplicada nos perfis verticais e horizontais das imagens radiográficas com o objetivo de segmentar os defeitos.

Por sua vez a projeção pode ser vertical, diagonal ou horizontal e quando é aplicada em uma imagem binária é obtida através da soma do número de *pixels* brancos ou pretos de cada uma das linhas e colunas dessa imagem, como ilustra a figura 3.11.

As projeções são informações compactas de uma imagem e podem ser usadas em reconhecimentos de objetos (Jain et-al, 1995). Na metodologia proposta neste trabalho a projeção da imagem radiográfica limiarizada é utilizada na segmentação do cordão de solda.

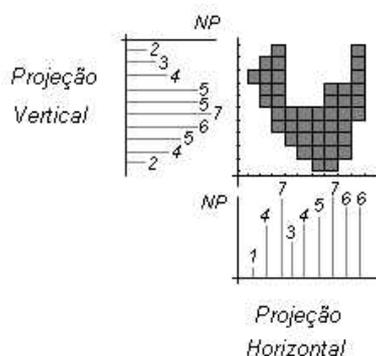


Figura 3.11 – Projeção horizontal e vertical da imagem

Onde *NP* é o número de *pixels* escuros em cada linha e coluna.

3.2.6) Segmentação

A segmentação consiste em executar uma subdivisão da imagem em partes de interesse, ou seja, deve isolar os objetos de interesse. A segmentação automática é uma das etapas mais difíceis em processamento digital de imagens, sendo que uma segmentação robusta pode garantir o sucesso ou o fracasso de um reconhecimento automático. Os algoritmos de segmentação podem ser baseados em duas propriedades no caso de imagens em tons de cinza: descontinuidade e similaridade (Gonzales & Woods, 1992).

Quando se faz o uso da propriedade da descontinuidade o objetivo do algoritmo é encontrar mudanças bruscas nos níveis de cinza. Os defeitos comuns em soldas são descontinuidades presentes na imagem radiográfica e, portanto a propriedade da descontinuidade torna-se útil para a resolução dos problemas tratados neste trabalho.

3.2.6.1) Métodos de limiarização

A limiarização é uma das técnicas mais simples de segmentação e, quando aplicada em situações que o fundo e objeto estão destacados como ilustra o histograma da figura 3.12, consiste em agrupar os níveis de cinza em dois grupos: objeto e fundo da imagem através da utilização de um limiar T (Gonzales & Woods, 1992). Este limiar é o nível de cinza que separa os *pixels* do objeto dos *pixels* do fundo, o resultado dessa limiarização pode ser colocado em uma imagem $g(i, j)$ como mostra a equação 3.7.

$$g(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{se } p(i, j) > T \\ 0 & \text{se } p(i, j) \leq T \end{cases} \quad (3.7)$$

Onde os *pixels* rotulados como 1 podem corresponder ao objeto e os *pixels* rotulados como zero (0) corresponder ao fundo, ou vice-versa.

A figura 3.12 ilustra onde está o limiar T em um histograma de uma imagem com fundo e objeto bem definidos.

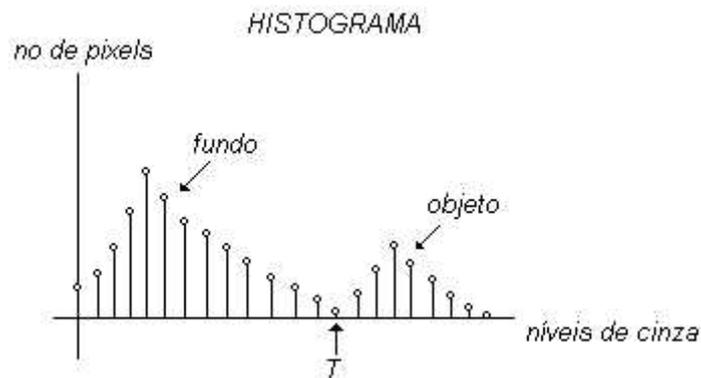


Figura 3.12 – Limiar T em um Histograma

A questão da limiarização em uma imagem está relacionada em encontrar um limiar T que separe o fundo da imagem do objeto de interesse. Desta forma existem várias técnicas para se obter este limiar, sendo que quatro delas são abordadas neste trabalho. As técnicas de limiarização utilizadas neste trabalho são: *Otsu*, *Kittler*, *Kapur* e *Sezgin & Sankur*. Os resultados da aplicação destas técnicas podem ser observados com a aplicação dos algoritmos sobre uma imagem piloto que é apresentada na figura 3.13. Esta imagem piloto é uma imagem radiográfica de uma junta soldada que contém falta de fusão.

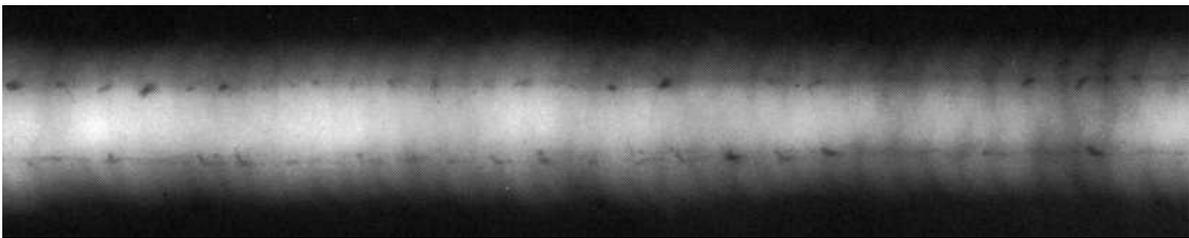


Figura 3.13 – Imagem Radiográfica. Imagem piloto para a aplicação dos limiarizadores.

a) *Técnica de Otsu*

Parker (1997) apresenta a técnica de *Otsu* como um método que utiliza os valores do histograma para encontrar um limiar, podendo se obter o limiar T com o emprego das equações 3.8 à 3.13. Primeiro utiliza-se os valores de histograma para efetuar o cálculo da equação 3.8.

$$mT = \sum_{i=0}^{L-1} i * h(i) \quad (3.8)$$

Onde h é o histograma e i é o nível de cinza.

Para cada tom de cinza do histograma são gerados 3 parâmetros a partir dos cálculos mostrados nas equações 3.9 à 3.11.

$$w_0 = \sum_{i=0}^t h(i) \quad (3.9)$$

$$w_1 = 1 - w_0 \quad (3.10)$$

$$mt = \sum_{i=0}^t i * h(i) \quad (3.11)$$

Onde t é o limiar examinado e varia de 0 até $L-1$. O valor de limiar para cada tom de cinza t é calculado conforme a equação 3.12.

$$T(t) = \frac{(mT * w_0 - mt)^2}{w_0 * w_1} \quad (3.12)$$

O limiar escolhido pela técnica de *Otsu* é o tom de cinza (t) onde o valor de T seja máximo, como mostra a equação 3.13.

$$T_{otsu} = \arg \max\{T\} \quad (3.13)$$

A figura 3.14 apresenta o resultado da aplicação da técnica de *Otsu* na imagem radiográfica da figura 3.13.



Figura 3.14 – Resultado da aplicação da técnica de *Otsu* na imagem piloto.

b) Técnica de Kittler

Centeno (1994) descreve a técnica de *Kittler*, que baseia-se no cálculo dos parâmetros $P_0(t)$, $P_1(t)$, $u_0(t)$ (média) e $u_1(t)$ (média) apresentadas nas equações 3.14 à 3.17.

$$P_0(t) = \sum_{i=0}^t h(i) \quad (3.14)$$

$$P_1(t) = \sum_{i=t+1}^{L-1} h(i) \quad (3.15)$$

$$u_0(t) = \frac{\sum_{i=0}^t h(i) * i}{P_0(t)} \quad (3.16)$$

$$u_1(t) = \frac{\sum_{i=t+1}^{L-1} h(i) * i}{P_1(t)} \quad (3.17)$$

Onde t é o limiar examinado, i representa cada nível de cinza da imagem (pode ser do objeto de interesse ou do fundo), $h(i)$ é o número de *pixels* para cada nível de cinza i . Os valores obtidos permitem o cálculo de σ_0^2 e σ_1^2 por meio das equações 3.18 e 3.19.

$$\sigma_0^2(t) = \frac{\sum_{i=0}^t (i - u_0(t))^2 * h(i)}{P_0(t)} \quad (3.18)$$

$$\sigma_1^2(t) = \frac{\sum_{i=t+1}^{L-1} (i - u_1(t))^2 * h(i)}{P_1(t)} \quad (3.19)$$

Para cada tom de cinza t deve ser calculada a função critério J como mostra a equação 3.20.

$$J(t) = 1 + 2 * \{P_0(t) * \log_e \sigma_0(t) + P_1(t) * \log_e \sigma_1(t)\} - 2 * \{P_0(t) * \log_e P_0(t) + P_1(t) * \log_e P_1(t)\} \quad (3.20)$$

O limiar escolhido pela técnica de *Kittler* é o tom de cinza (t) onde o valor de J seja mínimo, como mostra a equação 3.21.

$$T_{kittler} = \arg \min \{J\} \quad (3.21)$$

A figura 3.15 apresenta o resultado da aplicação da técnica de *Kittler* na imagem radiográfica da figura 3.13.



Figura 3.15 – Resultado da aplicação da técnica de *Kittler* na imagem piloto.

c) *Técnica de Kapur*

A técnica de *Kapur* é descrita por Parker (1997) como uma técnica que analisa a entropia dos *pixels* brancos e pretos, calculando os valores como mostram as equações 3.22 e 3.23.

$$H_b(t) = - \sum_{i=0}^t \frac{h(i)}{P_0(t)} * \log_e \left(\frac{h(i)}{P_0(t)} \right) \quad (3.22)$$

$$H_w(t) = - \sum_{i=t+1}^{L-1} \frac{h(i)}{P_1(t)} * \log_e \left(\frac{h(i)}{P_1(t)} \right) \quad (3.23)$$

Onde $P_0(t)$ e $P_1(t)$ são calculados conforme as equações 3.14 e 3.15.

Para cada tom de cinza t deve ser calculada a função critério H como mostra a equação 3.24.

$$H(t) = H_b(t) + H_w(t) \quad (3.24)$$

O limiar escolhido pela técnica de *Kapur* é o tom de cinza (t) onde o valor de H seja máximo, como mostra a equação 3.25.

$$T_{Kapur} = \arg \max \{H\} \quad (3.25)$$

A figura 3.16 apresenta o resultado da aplicação da técnica de *Kapur* na imagem radiográfica da figura 3.13.



Figura 3.16 – Resultado da aplicação da técnica de *Kapur* na imagem piloto.

d) *Técnica de Sezgin & Sankur*

Sezgin & Sankur (2003) apresentaram uma técnica de limiarização baseada na função momento SMF. Os autores testaram a técnica juntamente com outros 40 métodos de limiarização utilizando imagens de END's, e conseguiram resultados expressivos.

Os parâmetros necessários para encontrar o limiar são $P_0(t)$, $P_1(t)$, $u_0(t)$, $u_1(t)$, $V_0(t)$ e $V_1(t)$. $P_0(t)$ e $P_1(t)$ são calculados conforme as equações 3.14 e 3.15, e $u_0(t)$, $u_1(t)$, $V_0(t)$ e $V_1(t)$ são calculados conforme as equações 3.26 à 3.29.

$$u_0(t) = \sum_{i=0}^t h(i) * i \quad (3.26)$$

$$u_1(t) = \sum_{i=t+1}^{L-1} h(i) * i \quad (3.27)$$

$$V_0(t) = \sum_{i=0}^t \left[\left(i - \frac{u_0(t)}{P_0(t)} \right)^2 * \frac{h(i)}{P_0(t)} \right] \quad (3.28)$$

$$V_1(t) = \sum_{i=t+1}^L \left[\left(i - \frac{u_1(t)}{P_1(t)} \right)^2 * \frac{h(i)}{P_1(t)} \right] \quad (3.29)$$

Para cada tom de cinza t deve ser calculada a função SMF como mostra a equação 3.30.

$$SMF(t) = V_0(t) + V_1(t) \quad (3.30)$$

Sob a função SMF é feita uma análise de extremos como mostram as equações 3.31 e 3.32.

$$T_{conj}(a) = \arg\{t / SMF(t - K) < SMF(t) \text{ e } SMF(t + K) < SMF(t)\} \quad (3.31)$$

$$T_{conj}(a) = \arg\{t / SMF(t - K) > SMF(t) \text{ e } SMF(t + K) > SMF(t)\} \quad (3.32)$$

O resultado desta análise é um conjunto de limiares possíveis representados pelo vetor T_{conj} . O limiar escolhido pela técnica de Sezgin & Sankur (2003) é o menor valor de T_{conj} caso o objeto de interesse seja escuro ou o maior valor de T_{conj} caso o objeto de interesse seja claro.

A figura 3.17 apresenta o resultado da aplicação da técnica de *Sezgin & Sankur* na imagem radiográfica da figura 3.13.



Figura 3.17 – Resultado da aplicação da técnica de *Sezgin & Sankur* na imagem piloto.

A imagem radiográfica possui uma vasta variação de tons de cinza, o fato de apresentar defeitos com tons de cinza característicos, marcadores de trechos de solda na imagem, cordão de solda com tons de cinza não uniforme devido à espessura da peça, implica na impossibilidade da aplicação de um algoritmo de simples limiar na imagem como um todo (Silva, 1999). A aplicação das técnicas de limiarização, descritas nesta seção, nas imagens radiográficas utilizadas neste trabalho não apresentaram resultados satisfatórios. Observa-se pelos resultados mostrados nas figuras 3.14 a 3.17 que nenhuma das quatro técnicas de limiarização conseguiu segmentar os defeitos apresentados na imagem radiográfica da figura 3.13. A metodologia de realce dos

defeitos apresentada no capítulo 4 permite destacar os defeitos do restante da imagem e depois segmentá-los com a aplicação de um limiarizador.

3.2.7) Etiquetagem ou *labeling*

Quando se deseja encontrar regiões “fechadas” em uma imagem faz-se a utilização de um algoritmo de etiquetagem. As figuras 3.18a ilustra três regiões distintas que possuem *pixels* com o mesmo tom de cinza (componentes conexos), e a figura 3.18b mostra estas regiões ou componentes conexos etiquetadas (rotuladas).

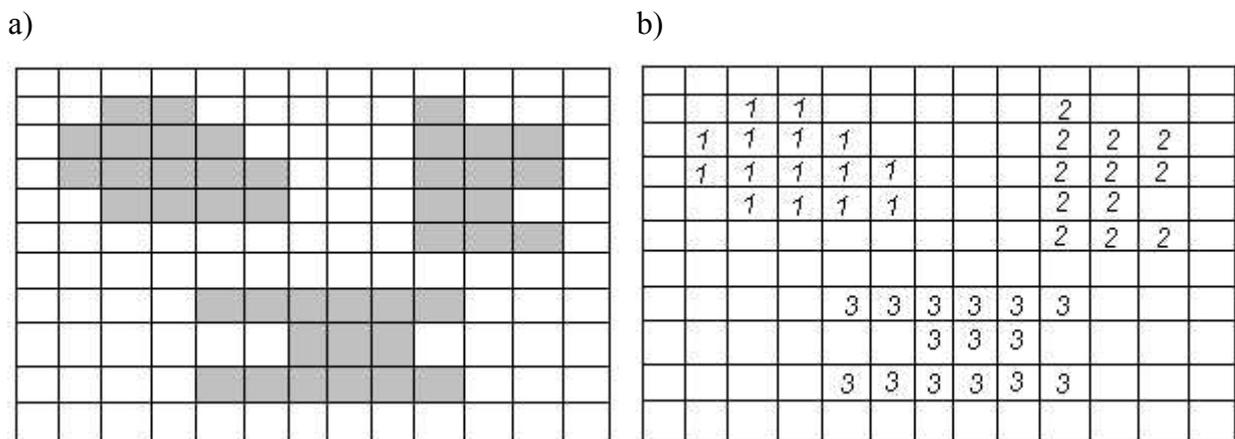


Figura 3.18 – a) regiões com *pixels* de mesmo tom de cinza, b) regiões rotuladas

Segundo Jain et-al (1995) existem duas formas de etiquetar uma região da imagem: recursivamente ou seqüencialmente.

A forma recursiva é executada através de uma função que “pinta” os *pixels* dos componentes conexos, como mostra o fluxograma da figura 3.19.

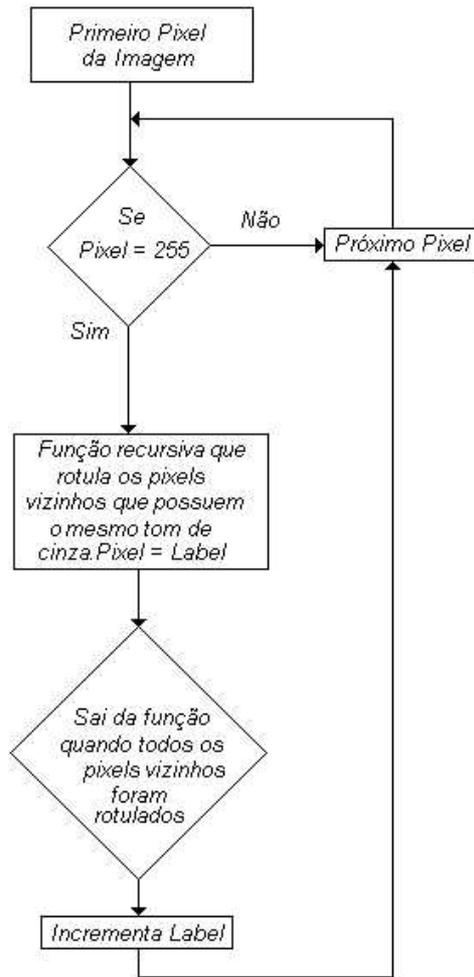


Figura 3.19 – Fluxograma da rotina que rotula as regiões fechadas

A rotina consiste em “varrer” toda a imagem procurando regiões que sejam homogêneas, por exemplo, com *pixels* brancos ($pixels = 255$). Quando encontrada esta região deve ser rotulada, deve ser atribuído um novo valor de tom de cinza de forma recursiva para todos os *pixels* vizinhos que tenham o mesmo valor ($pixel = Label$). A saída da função é marcada pela inexistência de *pixels* brancos na região em análise. Em seguida deve ser incrementado o valor de *Label* e deve ser reiniciada a rotina, isto ocorre até rotular todas as regiões que possuam *pixels* brancos (Jain et-al, 1995). O resultado é a etiquetagem (rotulação) de todos os componentes conexos da imagem.

3.3 Conclusão

Através da abordagem deste capítulo é possível perceber os seguintes aspectos:

- As técnicas de PDI apresentadas são utilizadas para a implementação dos métodos propostos neste trabalho. Contudo, existem outras técnicas de detecção de contornos, detecção de bordas, de filtragem, de etiquetagem e de limiarização que não foram aplicadas no desenvolvimento deste trabalho, e que podem ser objetivos de trabalhos futuros.
- Observa-se nas figuras 3.14 a 3.17 que o emprego dos limiarizadores faz uma separação entre as regiões claras e regiões escuras da imagem original (figura 3.13). O resultado desta aplicação implica em segmentações diferenciadas do objeto de interesse, no caso o cordão de solda e, alguns limiarizadores perdem regiões do cordão de solda.
- Aplicar o limiarizador diretamente na imagem radiográfica original é uma solução que não apresenta bons resultados na segmentação dos cordões de solda e dos defeitos localizados em uma solda, pois muitas vezes os níveis de cinza dos defeitos são muito próximos dos níveis de cinza do MB. Contudo, pode ser utilizada como última etapa da segmentação quando as características dos objetos de interesse (defeitos) estão realçadas através de uma metodologia específica, com a que é desenvolvida no capítulo 4.

Todas as técnicas e conceitos apresentados neste capítulo são aplicados na metodologia proposta neste trabalho, que é apresentada no capítulo 4.

4) METODOLOGIA PROPOSTA

Como foi mostrado nos capítulos anteriores, as juntas soldadas apresentam defeitos que podem ser encontrados a partir de uma imagem radiográfica, bem como as imagens radiográficas de uma tubulação permitem analisar a espessura da parede do tubo com o objetivo de encontrar pontos que apresentem corrosão.

A partir da digitalização das imagens radiográficas podem ser empregadas técnicas de PDI que permitem a segmentação dos defeitos, cordões de solda e paredes da tubulação para que estas regiões sejam analisadas.

Desta forma, neste capítulo são propostos métodos para analisar uma imagem radiográfica digital com os objetivos de:

- Segmentar os defeitos na solda;
- Segmentar os cordões de solda;
- Segmentar as paredes de uma tubulação;
- Extrair as características dos defeitos.

A seguir são descritos os passos para a execução de cada um destes objetivos.

4.1) Segmentação dos Defeitos

As técnicas de processamento de imagens empregadas e mostradas nesta seção têm o objetivo de segmentar possíveis defeitos (ou descontinuidades) da solda em uma imagem radiográfica digital, ressaltando que a segmentação é a diminuição da quantidade de informação em uma imagem, preservando somente informações relevantes.

Após o processo de digitalização, as imagens radiográficas apresentam um nível de ruído e um contraste deficiente, sendo necessário o uso de técnicas de filtragem e melhoria de contraste. É necessário também se avaliar a distinção dos defeitos pela morfologia superficial, ou seja, analisando-se a forma do cordão de solda em relação a sua magnitude como mostra a figura 4.1 (Silva, 1999).

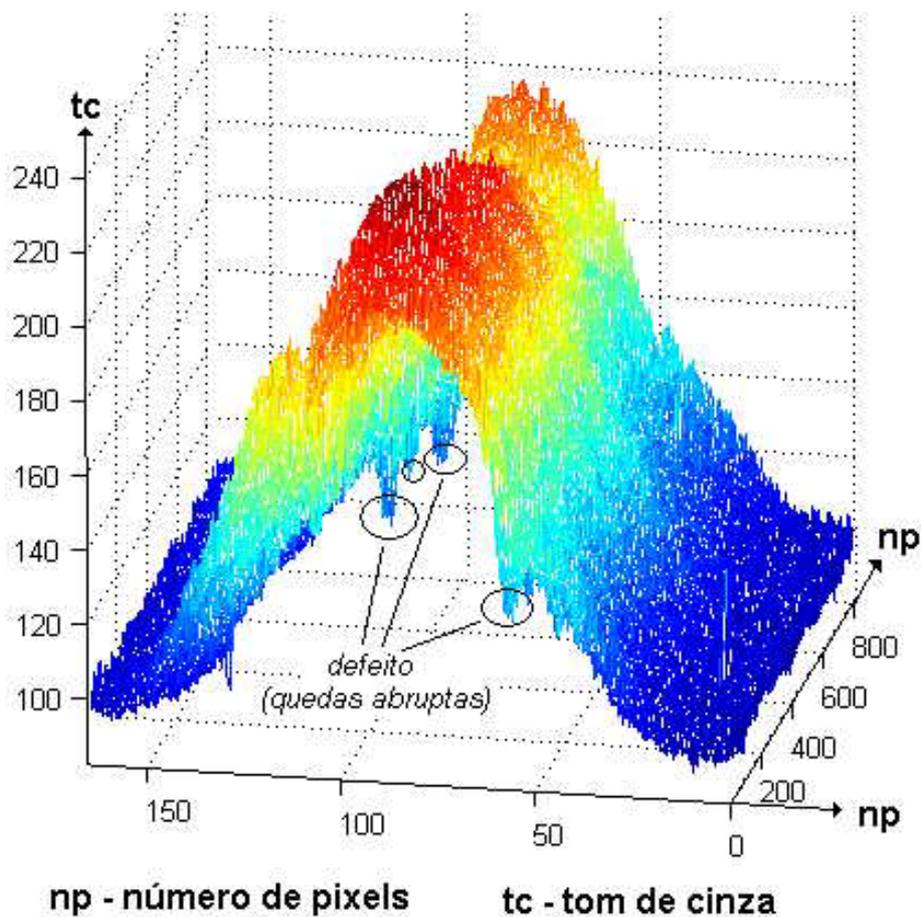


Figura 4.1 – Imagem de um cordão de solda em três dimensões

Nesta figura, observa-se a imagem em três dimensões da junta soldada da figura 4.2a. Nota-se que os defeitos são caracterizados por regiões que apresentam quedas abruptas de tons de cinza, enquanto as demais regiões da solda possuem uma variação gradativa, como está descrito em Wang & Liao (2002).

Neste sentido a segmentação consiste em extrair da imagem radiográfica digitalizada regiões que possam ser defeitos. Para tanto, basicamente, são necessárias três etapas: pré-processamento, realce dos defeitos e a limiarização. A figura 4.2 apresenta um diagrama em blocos que mostra os passos do método de segmentação de defeitos proposto neste trabalho. Tais passos são apresentados nas subseções 4.1.1 a 4.1.7.

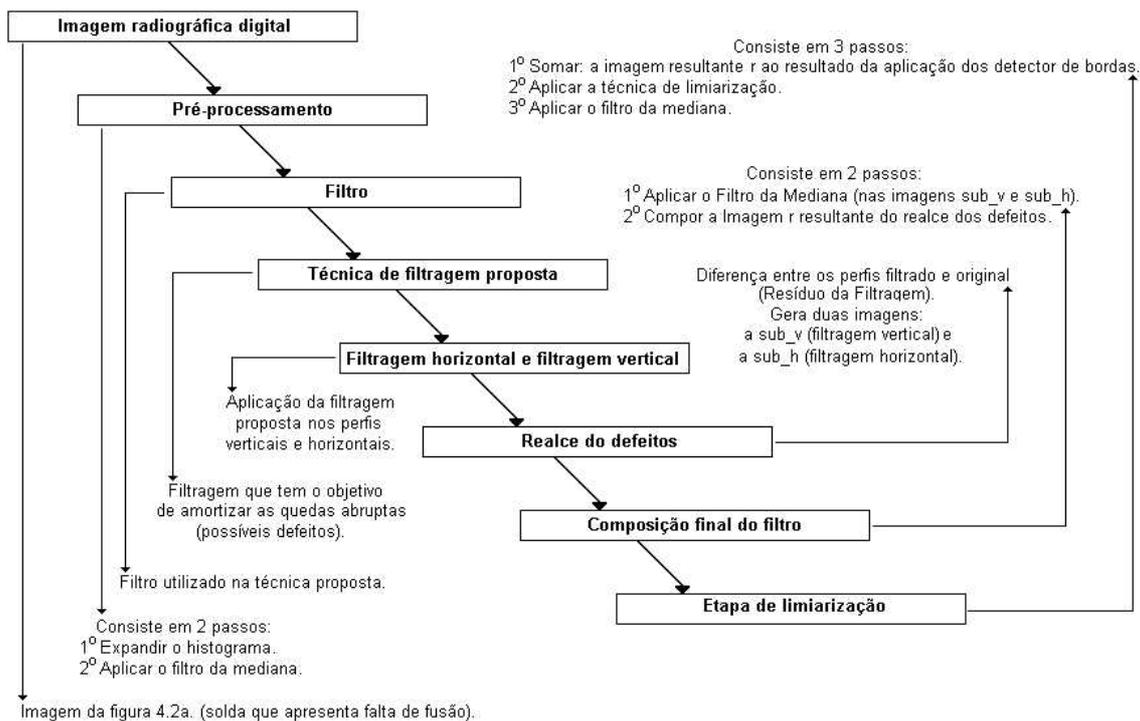


Figura 4.2 – Diagrama em Blocos do Método Proposto para Segmentar os Defeitos

4.1.1) Pré-processamento

A radiografia geralmente apresenta baixo contraste, devido a problemas de diferença de densidade no filme como é mencionado na subseção 3.2.2, e também apresenta níveis de ruído devido à técnica de exposição radiográfica e/ou a digitalização.

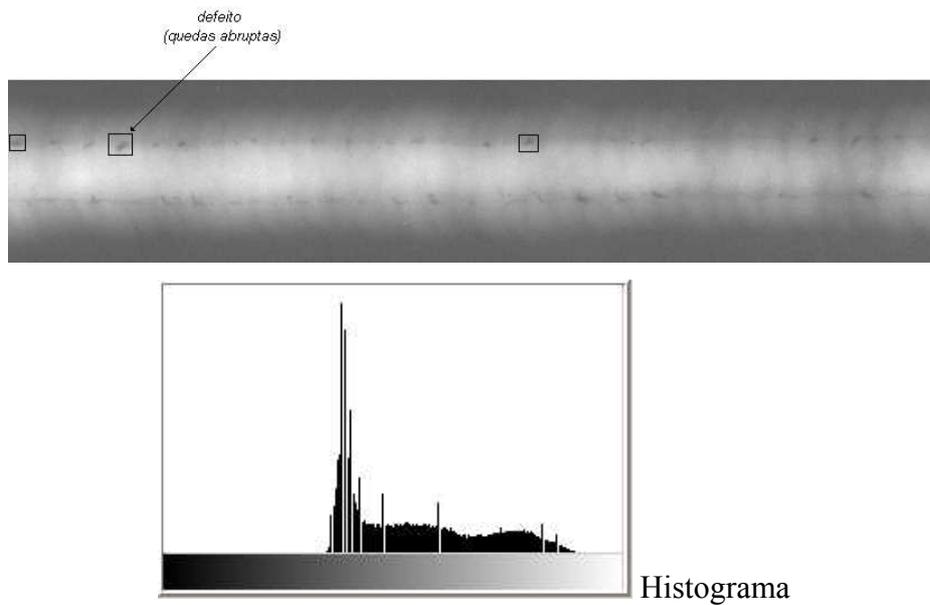
Alguns autores destacam a dificuldade em encontrar os defeitos em uma imagem sem a execução de um pré-processamento (Shafeek et-al, 2004a; Yacine & Redouane, 2000; Wang & Liao, 2002). Em imagens radiográficas destaca-se a utilização do aprimoramento do contraste como meio facilitador para detectar os defeitos, que em geral possuem baixo contraste. Para reduzir o ruído normalmente é utilizado o filtro da mediana, por tratar-se de um filtro que não causa distorção nas bordas a ponto de prejudicar a segmentação dos defeitos (Silva, 1999).

Seguindo este caminho, a primeira etapa no processo de segmentação de defeitos é o pré-processamento que neste trabalho consiste na execução da expansão linear do histograma com o objetivo de aumentar o contraste entre os *pixels* de maior e menor

magnitude da imagem original, e na aplicação do filtro da mediana, análogo ao pré-processamento executado em Shafeek et-al (2004a).

As figuras 4.3 a e 4.3 b mostram a imagem original e a imagem pré-processada, com seus histogramas. Observa-se que a imagem pré-processada tem um histograma mais espalhado e conseqüentemente tem os *pixels* mais claros mais distantes dos *pixels* mais escuros, acarretando em aumento de contraste.

a)



b)

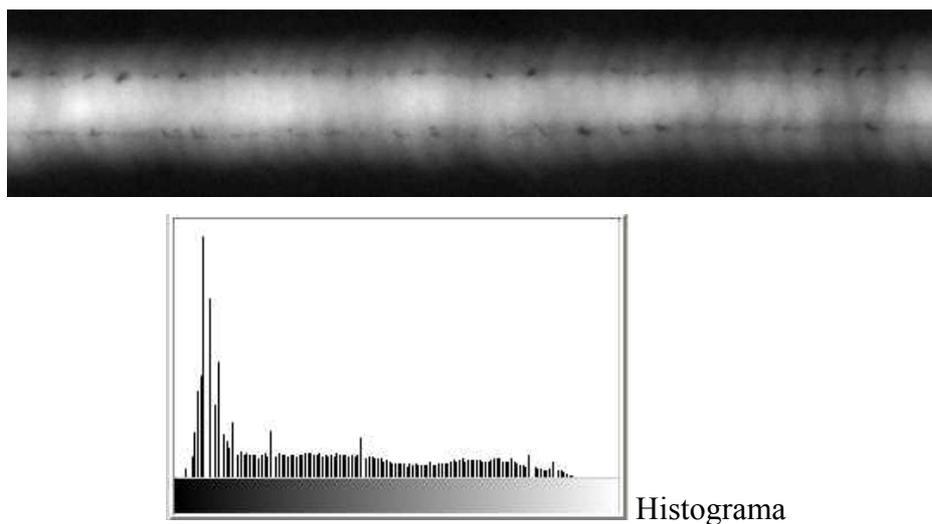


Figura 4.3 – a) Imagem original (Manual da AGFA), b) Imagem após a expansão do histograma e filtrada.

4.1.2) Filtro

A segunda etapa consiste em realçar os defeitos na imagem com o objetivo de segmentá-los. Esta etapa é executada posteriormente ao pré-processamento e anteriormente à limiarização.

O algoritmo de segmentação deve levar em considerações características específicas dos defeitos na solda como mostra a figura 4.1, e buscar uma maneira de separar as quedas abruptas do restante da imagem.

Com este objetivo, Wang & Liao (2002) apresentaram uma metodologia que analisa cada perfil transversal à solda separadamente. A forma de análise consiste em gerar um perfil estimado para cada perfil original, de modo que este perfil estimado acompanhe o perfil da solda em toda a sua seção transversal, com exceção das regiões onde ocorrem defeitos. Deste modo, uma subtração entre o perfil estimado e o perfil original produz um realce nos possíveis defeitos.

Algo semelhante é proposto neste trabalho. Porém para aplicar o método é necessário o entendimento da equação 4.1 que representa a equação de um filtro digital, e que foi utilizada no algoritmo que gera o perfil estimado, chamado no método proposto de perfil filtrado. Com a utilização deste filtro a idéia é obter um perfil filtrado que seja diferenciado em relação ao perfil original por apresentar uma amortização das quedas abruptas (possíveis defeitos), ou seja, procura-se obter um perfil filtrado isento dos possíveis defeitos. Para que ocorra a amortização apenas das quedas abruptas a aplicação deste filtro deve ser executada em conjunto com algumas condições como está descrito na seção seguinte (seção 4.13).

Para entender o filtro utilizado é necessária a análise da equação 4.1.

$$y(n) = coef1 * x(n) + coef2 * y(n - 1) \quad (4.1)$$

A equação 4.1 representa a equação de um filtro digital, em que y é o sinal de saída do filtro (sinal filtrado), x é o sinal de entrada do filtro, $coef1$ é o coeficiente que multiplica o sinal de entrada, e $coef2$ é o coeficiente que multiplica o sinal filtrado na interação anterior do filtro.

Para extrair características do filtro da equação 4.1 aplica-se à transformada Z, que possui um conjunto de propriedades conhecidas para a análise de sinais e sistemas.

A aplicação dessa transformada permite a obtenção da função de transferência do sistema $H(z)$, que generaliza a caracterização pela resposta em frequência e fornece informações sobre as características do sistema (Haykin & Van Veen, 1999). Para a aplicação dessa transformada no filtro representado pela equação 4.1 seguem-se os passos mostrados nas equações 4.2 a 4.6.

A equação 4.2 representa a propriedade da transformada Z denominada de deslocamento no tempo, foi retirada de (Haykin & Van Veen, 1999).

$$x(n - n_0) \xrightarrow{z} z^{-n_0} X(z) \quad (4.2)$$

A equação 4.3 representa a propriedade da transformada Z denominada de linearidade que afirma que a transformada Z de uma soma de sinais é exatamente a soma das transformadas Z individuais, foi retirada de (Haykin & Van Veen, 1999).

$$a * x(n) + b * y(n) \xrightarrow{z} a * X(z) + b * Y(z) \quad (4.3)$$

A equação 4.4 é o resultado da aplicação das propriedades das equações 4.2 e 4.3 com o objetivo de obter a transformada Z do filtro da equação 4.1.

$$Y(z) = coef1 * X(z) + coef2 * Y(z)z^{-1} \quad (4.4)$$

Em seguida isola-se o $Y(z)$ e $X(z)$ como mostra a equação 4.5.

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{coef1}{1 - coef2 * z^{-1}} \quad (4.5)$$

E se obtém a função de transferência $H(z)$ que é dada pela equação 4.6.

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = coef1 * \frac{z}{z - coef2} \quad (4.6)$$

As raízes do numerador de $H(z)$ são os *zeros* desse filtro, e as raízes do denominador são os *pólos*. Dessa forma a função de transferência do filtro mostra que

existe um *zero* em zero em um pólo em *coef2*, o coeficiente *coef1* é um ganho para a função de transferência. A figura 4.4 mostra a localização do *pólo* e do *zero* do filtro no plano *Z*, e a resposta em frequência do filtro. Essas informações foram obtidas com a utilização do *software* ft3d. Trata-se de um filtro passa-baixas, onde para os dados apresentados nesta figura foram utilizados os seguintes valores: *coef1* igual à 0,05; e *coef2* igual à 0,95.

Vale ressaltar que o valor de *coef2* não pode ser maior que 1, pois acontecendo o contrário o *pólo* se situaria fora do *círculo de raio unitário* e o sistema seria instável (Haykin & Van Veen, 1999).

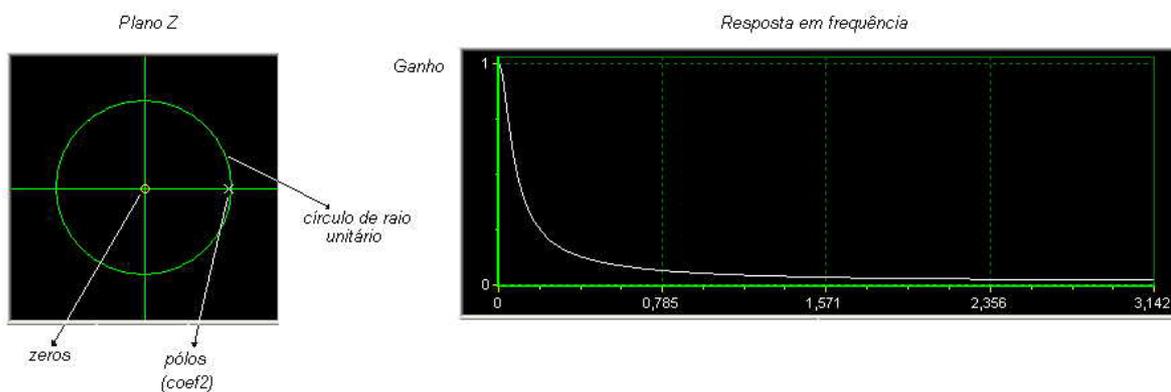


Figura 4.4 – Plano Z e resposta em frequência do filtro passa-baixas.

4.1.3) Técnica de Filtragem Proposta

A partir da caracterização do filtro passa-baixas representado na equação 4.1 partiu-se para a aplicação desse filtro em um perfil da imagem radiográfica da solda com o objetivo de amortizar as quedas abruptas nos valores de tons de cinza da imagem. O objetivo principal é realçar os defeitos da imagem executando a diferença entre o perfil filtrado e o perfil original (resíduo da filtragem).

Desta forma aplica-se o filtro passa-baixas (equação 4.1) quando o sinal do perfil original apresenta uma queda no valor de tom de cinza (amortizar as quedas abruptas), caso contrário, é atribuído ao perfil filtrado o valor do perfil original (acompanhar as subidas do sinal), como mostra o fluxograma representado na figura 4.5.

A cada interação, o *pixel* do perfil de entrada é comparado ao valor filtrado na interação anterior (y_antigo), quando o *pixel* em análise ($x(i)$) for maior que o valor de y_antigo , o resultado $y(i)$ será igual ao valor de entrada $x(i)$. Quando ocorrer a situação contrária, a resposta $y(i)$ será o valor filtrado pela equação 4.1. Depois de obtida a resposta ocorre a atualização do valor de y_antigo e do valor do índice i .

A técnica proposta, apresentada neste fluxograma, possui duas situações de contorno. A primeira é a inicialização do filtro, que ocorre quando a análise é sobre o primeiro *pixel*, nesta situação ainda não existe valor filtrado e, portanto é atribuído a $y(i)$ e a y_antigo , o valor do atual *pixel* de entrada $x(i)$. A segunda situação é o sentido de varredura. A filtragem proposta deve varrer o perfil original em dois sentidos, sendo i de 1 até M , e depois de M até 1. Esses dois sentidos de varredura originam dois perfis filtrados, $y_{1 \rightarrow M}$ (i de 1 até M) e $y_{M \rightarrow 1}$ (i de M até 1), desta forma ao final de cada interação pode ocorrer o incremento ou o decremento do valor de i dependendo do sentido da varredura, do mesmo modo o primeiro *pixel* em análise pode ser $x(i)$ ou $x(M)$.

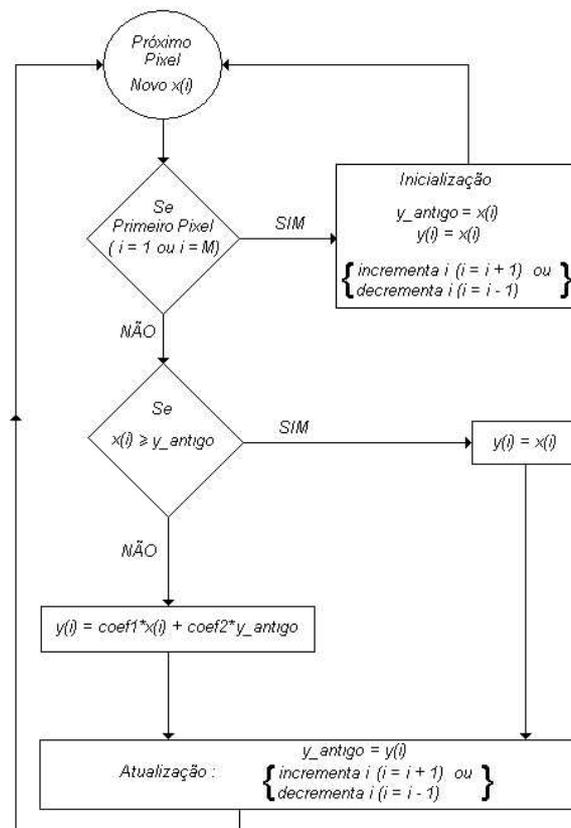


Figura 4.5 – Fluxograma do Método Proposto para uma Filtragem Vertical

O fluxograma da figura 4.5 mostra uma iteração do filtro e, desta forma pode-se notar a seqüência do filtro para um *pixel* do perfil original. Onde:

- x : representa o perfil de entrada para cada coluna da imagem;
- y : representa o perfil filtrado para cada coluna da imagem;
- i : é a indexação do *pixel* em análise na interação;
- y_antigo : é o valor auxiliar que armazena o último valor filtrado;
- M : é o tamanho do vetor no perfil original (número de *pixels*). É o mesmo que o número de linhas da imagem;
- $coef1$ e $coef2$: são os dois coeficientes do filtro. São os parâmetros que diminuem ou aumentam o efeito do filtro no perfil de entrada.

A necessidade da execução da varredura nos dois sentidos surge devido a um deslocamento do sinal filtrado que aparece quando a aplicação da técnica é feita em apenas um sentido. A figura 4.6 mostra a aplicação da técnica proposta no sentido de varredura de 1 até M , sendo o sinal de entrada um perfil vertical da imagem radiográfica.

Observa-se na figura 4.6 o deslocamento existente entre o sinal filtrado e o sinal original, este deslocamento também pode ser observado quando o sinal original é filtrado no sentido contrário de varredura (de M até 1), porém ocorre em outro trecho do sinal, figura 4.7.

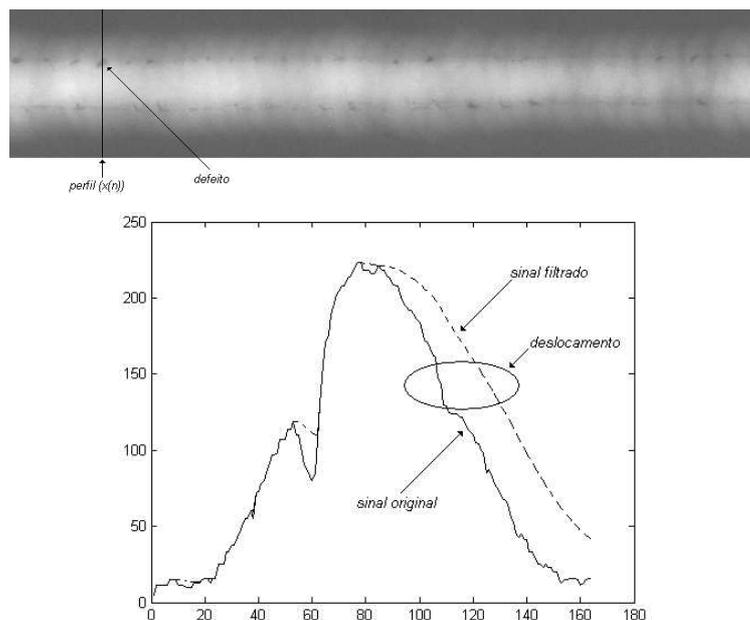


Figura 4.6 – Aplicação da técnica proposta no sentido de varredura de 1 até M .

A figura 4.7 mostra o resultado da aplicação da técnica proposta no mesmo perfil vertical da imagem de solda da figura 4.6, mas no sentido de varredura de M até 1.

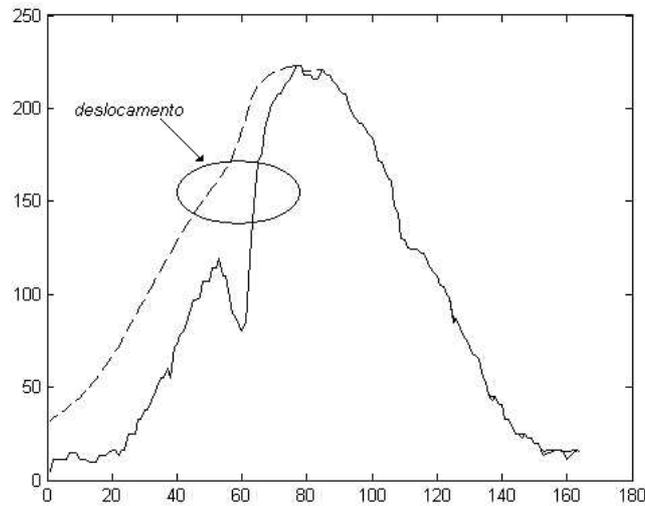


Figura 4.7 – Aplicação da técnica proposta no sentido de varredura de M até 1.

Para obter o perfil filtrado final (y_{final}) é executada a operação apresentada na equação 4.7. Esta operação consiste em atribuir como perfil filtrado final o menor valor entre os perfis dos dois sentidos de varredura, esta atribuição é feita para cada *pixel*, como mostra a equação 4.7.

$$y_{final}(i) = \min\{y_{1 \rightarrow M}(j), y_{M \rightarrow 1}(j)\} \quad (4.7)$$

A Figura 4.8 mostra o perfil filtrado final a partir da aplicação da equação 4.7 no perfil vertical original. Nota-se que os valores dos perfis filtrados não acompanham as quedas abruptas de magnitude dos *pixels* nas regiões onde se concentram possíveis defeitos.

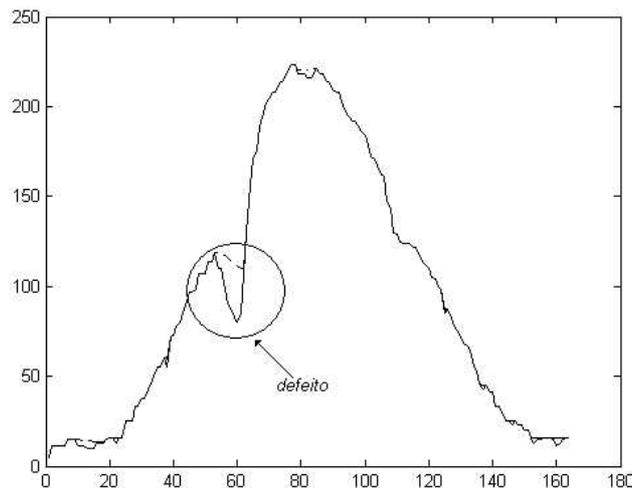


Figura 4.8 – Resultado final da aplicação da técnica proposta.

4.1.4) Filtragem horizontal e filtragem vertical

O fluxograma apresentado na figura 4.5 mostra a execução do filtro para um sinal que representa o perfil de uma coluna da imagem, denominado perfil filtrado vertical, e representado por $y_V(i)$. Porém os defeitos que aparecem em uma solda podem ser longitudinais, transversais e arredondados (Lashkia, 2001). Assim torna-se necessário executar algoritmos de filtragem vertical e horizontal, para a detecção de defeitos longitudinais e transversais e, além disso, para a detecção de defeitos arredondados é necessária a utilização de ambas as direções (horizontal e vertical).

Neste contexto o sistema de filtragem proposto através do perfil filtrado vertical $y_V(i)$ é capaz de realçar defeitos que tenham a posição longitudinal em relação a solda, pois captura quedas abruptas ao longo de uma coluna da imagem. E para o realce de defeitos transversais e arredondados torna-se necessária a execução do sistema de filtragem proposto nas linhas da imagem, chamado perfil filtrado horizontal, e representado por $y_H(j)$. A figura 4.9 mostra o perfil filtrado horizontal obtido com a aplicação da técnica proposta para uma linha da imagem. A figura 4.9 apresenta uma inversão de legenda, o perfil original é representado de forma tracejada e o perfil filtrado é representado de forma cheia. Isto ocorre para melhor visualizar o efeito do perfil filtrado horizontal nas regiões onde ocorrem possíveis defeitos.

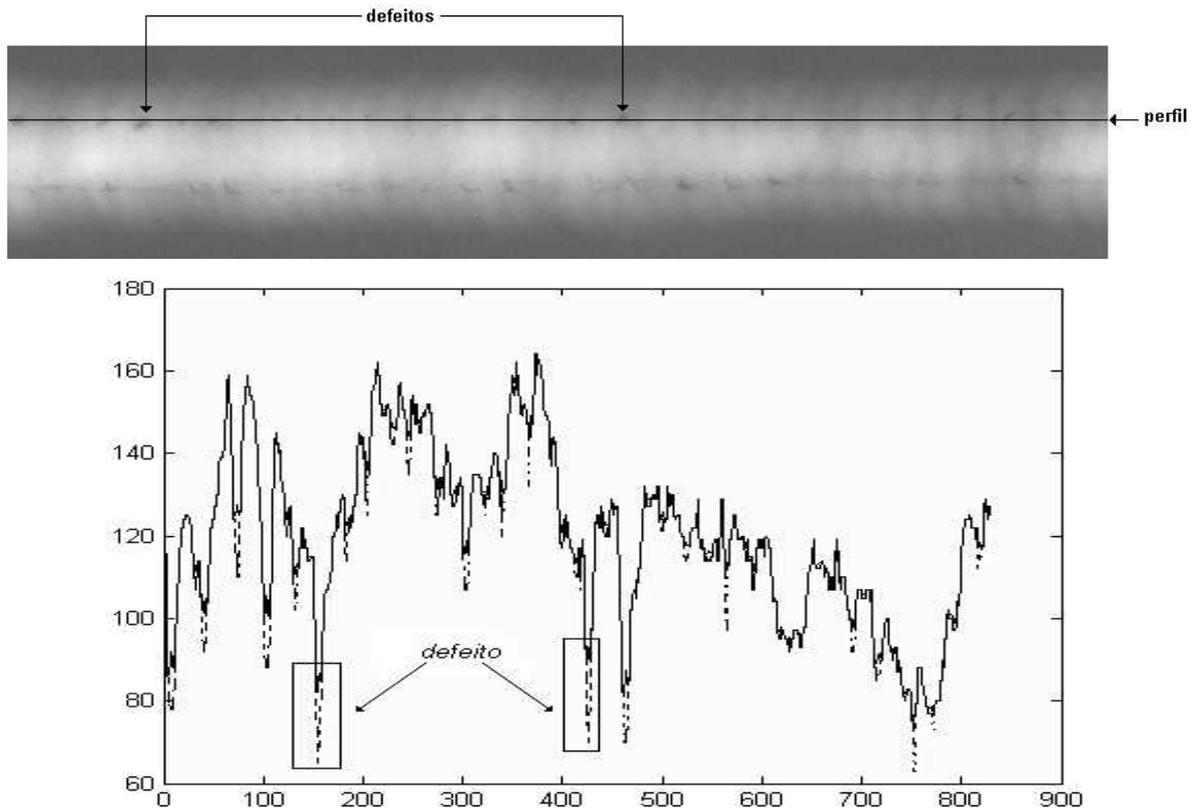


Figura 4.9– Perfil filtrado horizontal, gerado a partir da técnica proposta.

Para a obtenção do perfil filtrado y_H foi executada a técnica conforme mostra o fluxograma da figura 4.10. Observando este fluxograma, nota-se algumas diferenças de parâmetros. Do ponto de vista da forma de execução, as técnicas para a obtenção de y_V e y_H são idênticas, porém como neste segundo fluxograma a filtragem acontece nas linhas, o tamanho do perfil original é de N pixels, sendo N o número de colunas da imagem, o que implica em varredura de j de 1 até N , e depois de N até 1. Da mesma forma os coeficientes podem ter outros valores e, portanto são chamados de *coef3* e *coef4*. Teste com os valores dos coeficientes são apresentados no capítulo 5.

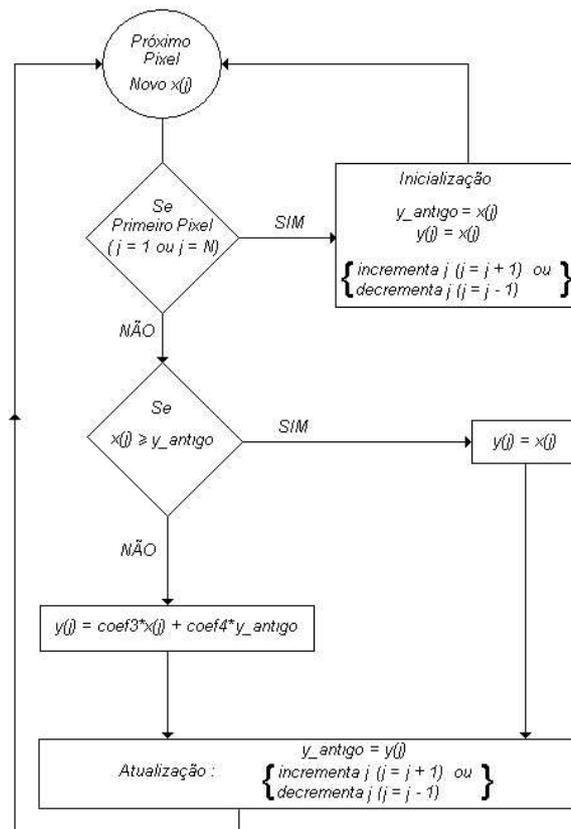


Figura 4.10 – Fluxograma do Método Proposto para uma Filtragem Horizontal

4.1.5) Realce dos Defeitos

A próxima etapa consiste em executar a subtração entre os perfis filtrados e os perfis originais para que se obtenha o realce dos possíveis defeitos, esta operação é executada em ambos os filtros $y_V(i)$ e $y_H(j)$, como mostram as equações 4.8 e 4.9.

$$sub_h(j) = y_H(j) - x(j) \quad (4.8)$$

$$sub_v(i) = y_V(i) - x(i) \quad (4.9)$$

O perfil filtrado $y_H(j)$ é gerado para todas as linhas da imagem, e conseqüentemente produz uma nova imagem, de forma análoga ocorre com o perfil $y_V(i)$, que é gerado para todas as colunas da imagem. Os resultados desses processos são duas novas imagens filtradas, uma proveniente da filtragem horizontal e a outra

proveniente da filtragem vertical. As operações de subtração são feitas para todas as linhas da imagem formando uma nova imagem oriunda de uma matriz $sub_h(i,j)$, e para todas as colunas da imagem formando uma segunda imagem oriunda da matriz $sub_v(i,j)$. Essas novas imagens são imagens escuras, pois devido à subtração os valores dos *pixels* dessas imagens são baixos. A figura 4.11 mostra uma dessas imagens com o histograma expandido.

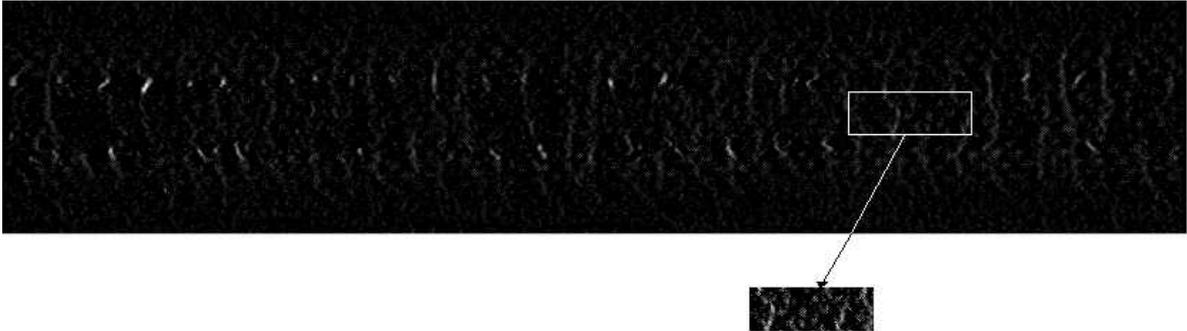


Figura 4.11 – Imagem subtraída resultante do perfil filtrado horizontal (matriz sub_h)

A figura 4.11 é a matriz sub_h resultante da aplicação da técnica proposta na imagem radiográfica da figura 4.3a. Esta é uma imagem expandida sendo possível observar pontos brancos, que são os realces dos defeitos da imagem original.

4.1.6) Composição final do filtro.

A imagem da figura 4.11 é o resultado da aplicação de um pré-processamento e o dos filtros y_V e y_H . Nesta imagem também é possível observar, em destaque, pontos brancos realçados que não fazem parte dos defeitos. Testes mostraram que esses ruídos dificultam a limiarização final dos defeitos e, portanto devem ser atenuados. Com esse objetivo é executado o filtro da mediana nas imagens sub_v e sub_h . A figura 4.12a mostra um perfil da imagem sub_h antes da execução do filtro da mediana, e a figura 4.12b mostra o mesmo perfil depois de executada o filtro da mediana. Observa-se a atenuação de pequenos picos correspondentes aos ruídos, ao mesmo tempo em que os picos maiores (possíveis defeitos) não sofrem grande atenuação.

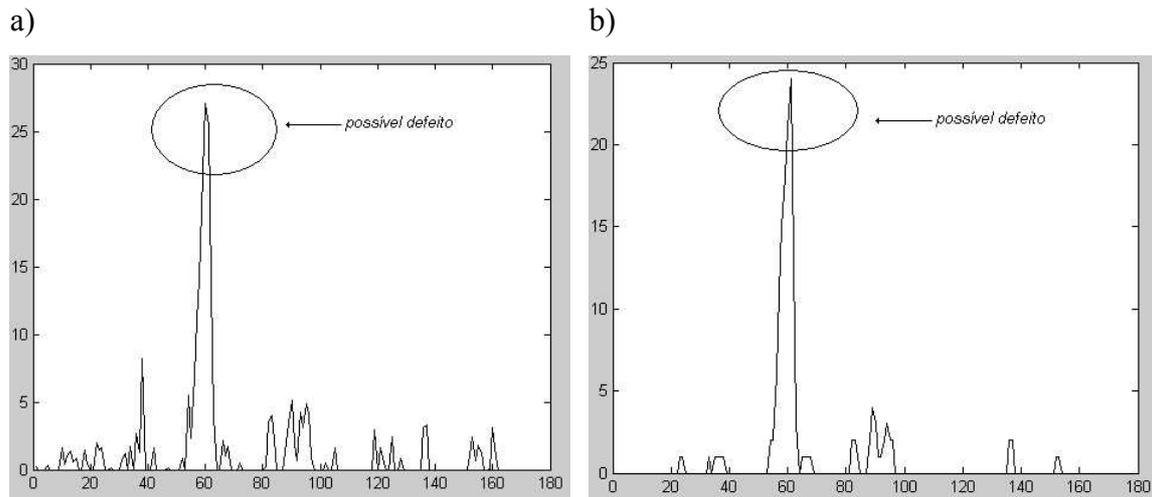


Figura 4.12 – Resultado do filtro da mediana

Após a aplicação do filtro da mediana é feita a composição entre a imagem resultante do perfil filtrado vertical sub_v e do perfil filtrado horizontal sub_h .

O método proposto neste trabalho faz uma composição das imagens sub_h e sub_v . Quando um determinado *pixel* faz parte de um possível defeito sua magnitude está entre as maiores da imagem, ou seja, este *pixel* está numa região de grandes picos. Caso ele esteja em um dos picos da imagem sub_v ele provavelmente pertence a um defeito longitudinal, caso esteja em um dos picos da imagem sub_h , provavelmente pertença a um defeito transversal. Contudo se o defeito for arredondado possuirá *pixels* provenientes das duas imagens (sub_v e sub_h). Desta forma é feito o cálculo do módulo entre os valores de magnitude da imagem sub_v e sub_h para cada *pixel* como mostra a equação 4.10.

$$r(i, j) = \sqrt{sub_v(i, j)^2 + sub_h(i, j)^2} \quad (4.10)$$

Onde r corresponde à imagem resultante, i é o índice que vai de 1 até M (número de linhas) e j é um índice que vai de 1 até N (número de colunas). A figura 4.13 mostra o histograma da imagem resultante r .



Figura 4.13 – Histograma da Imagem resultante r .

Como a imagem r é o resultado das subtrações dos perfis filtrados e dos perfis originais têm-se um histograma com componentes apenas nas faixas mais escuras de tons de cinza. Portanto para que o realce dos defeitos na imagem r seja visível é necessário executar a expansão do histograma, tendo como resultado a imagem da figura 4.14.

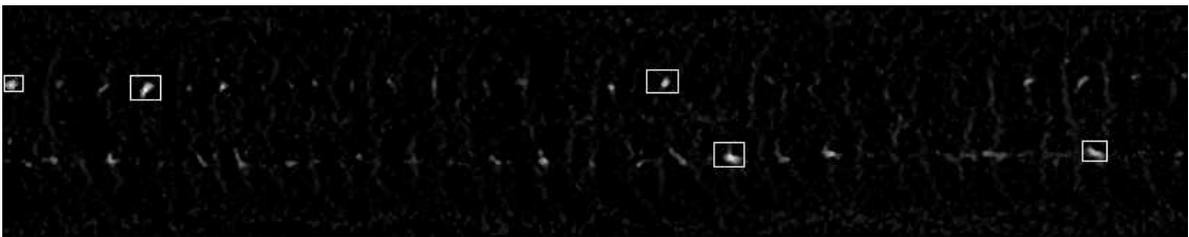


Figura 4.14 – Imagem r com expansão do histograma.

Na imagem da figura 4.14 alguns defeitos realçados estão em destaque, vale ressaltar que esta imagem não está limiarizada, e, portanto possui componentes em tons de cinza.

4.1.7) Etapa da limiarização

A última etapa do processo é a limiarização. Contudo foi observado em testes que antes da aplicação do algoritmo de limiarização é necessário um maior realce dos contornos dos defeitos. Desta forma antes da etapa de limiarização é executado um filtro detector de bordas na imagem r , mais precisamente o filtro de *Sobel* descrito no capítulo

3. Esse detector de bordas gera uma nova imagem chamada de imagem C . Essa imagem C é então adicionada *pixel à pixel* com a imagem r com o objetivo de aumentar o realce nos contornos dos possíveis defeitos, como mostra a equação 4.11.

$$D(i, j) = r(i, j) + C(i, j) \quad (4.11)$$

A imagem D tem os contornos dos possíveis defeitos realçados como mostra a figura 4.15.

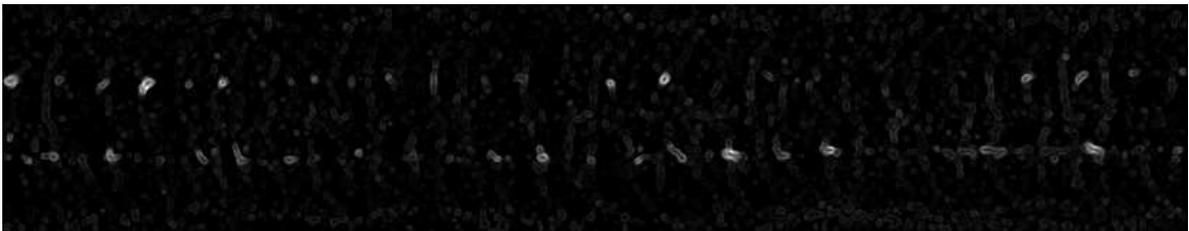


Figura 4.15 – Imagem D expandida, contornos dos defeitos.

Depois dos realces dos contornos é aplicado um algoritmo de limiarização, sendo o algoritmo em questão o algoritmo de *Kapur* que apresentou os melhores resultados, como está descrito no capítulo 5. A imagem resultante é uma imagem limiarizada, onde novamente é aplicado o filtro da mediana para eliminar pequenos pontos ruidosos, pode-se chamar os filtros da mediana que são executados antes da limiarização de *mediana_anterior*, e o filtro da mediana que é executado depois da limiarização de *mediana_posterior*. A figura 4.16 mostra essa imagem resultante com os possíveis defeitos segmentados, sendo esta imagem a imagem *final* resultante da metodologia proposta neste trabalho para segmentar os defeitos.

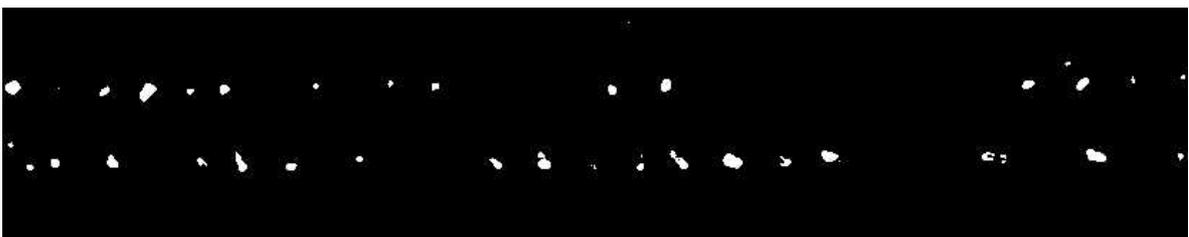


Figura 4.16 – Imagem limiarizada com os possíveis defeitos segmentados

Este método apresenta bons resultados para a segmentação dos defeitos nas soldas como será constatado no capítulo 5.

4.2) Segmentação do Cordão de Solda

A imagem radiográfica de uma junta soldada não apresenta somente o cordão, existem outros detalhes além do cordão de solda como, por exemplo, as marcações (subseção 2.3.2). A figura 4.17 mostra a imagem de uma junta soldada onde se observam esses outros detalhes.



Figura 4.17 – Imagem radiográfica de uma junta soldada com marcações.

Portanto, torna-se interessante uma segmentação que diferencie o cordão de solda do metal de base, diminuindo a área de análise para encontrar o defeito na solda (Schneider et-al, 2004a).

Em alguns trabalhos como em Shafeek et-al (2004a) a separação entre o cordão de solda e o metal de base é feita de forma manual. Por meio de um *software* de inspeção o usuário gera uma janela ao redor do cordão de solda para aplicar as técnicas de processamento de imagem. Com o cordão de solda isolado, consegue-se realçar os defeitos da solda, possibilitando o levantamento de parâmetros e a identificação.

Neste trabalho propõe-se um método de segmentação do cordão de solda para ser aplicado juntamente com o método proposto na seção 4.1. Tal método é baseado na propriedade da similaridade, através da busca dos valores de *pixels* que sejam similares. Os tons de cinza dos *pixels* que correspondem à região do cordão de solda são similares

entre si e diferentes dos tons de cinza dos *pixels* que correspondem ao metal de base, como é possível observar na figura 4.17.

Primeiramente, utiliza-se uma técnica de limiarização com o objetivo de separar a imagem em duas regiões. Ao contrário do método de segmentação de defeitos, que visa as discontinuidades, o método de segmentação da solda visa a similaridade entre os *pixels*, e portanto a limiarização pode ser usada para auxiliar a segmentação do cordão de solda. O algoritmo de limiarização utilizado é o algoritmo de *Otsu*, e o resultado desta limiarização pode ser observado na figura 4.18, onde se constata uma maior concentração de *pixels* brancos na região da solda em relação às outras regiões.

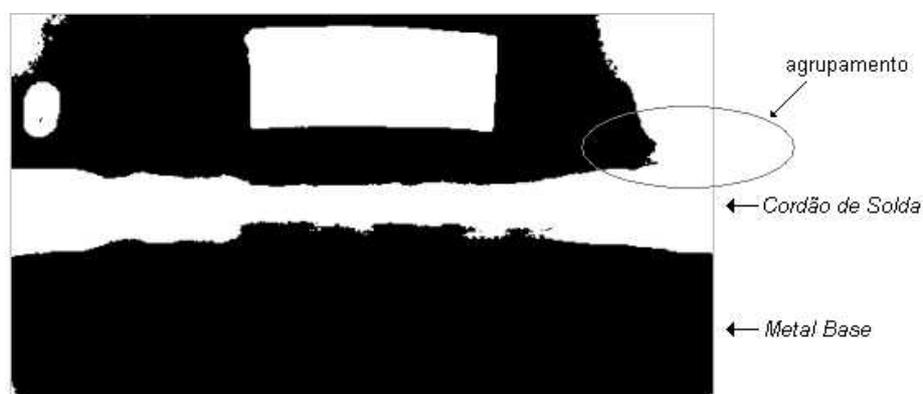


Figura 4.18 – Imagem da figura 4.14 limiarizada pelo método de *Otsu*

Na figura 4.18 pode-se observar que a limiarização separa o cordão de solda do metal de base, porém outras regiões que não fazem parte do cordão de solda são agrupadas à região segmentada do cordão como mostra em destaque o agrupamento. Desta forma para encontrar as bordas do cordão de solda e separá-lo do restante da imagem, inclusive destas regiões agrupadas, é feita uma análise da projeção vertical da imagem limiarizada (figura 4.18). A figura 4.19 mostra a projeção vertical desta imagem limiarizada, onde nota-se que a curva de maior amplitude corresponde a região do cordão de solda, e que o início da ascensão e o término do declínio dessa curva correspondem as bordas do cordão de solda.

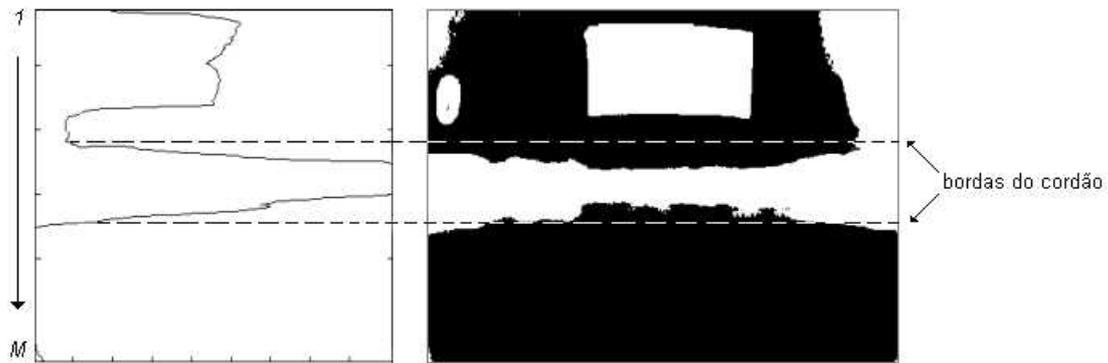


Figura 4.19 – Projeção vertical da imagem limiarizada.

A figura 4.20 mostra apenas o sinal que representa a projeção vertical. Este sinal tem tamanho M e apresenta maior pico na região onde se encontra o cordão.

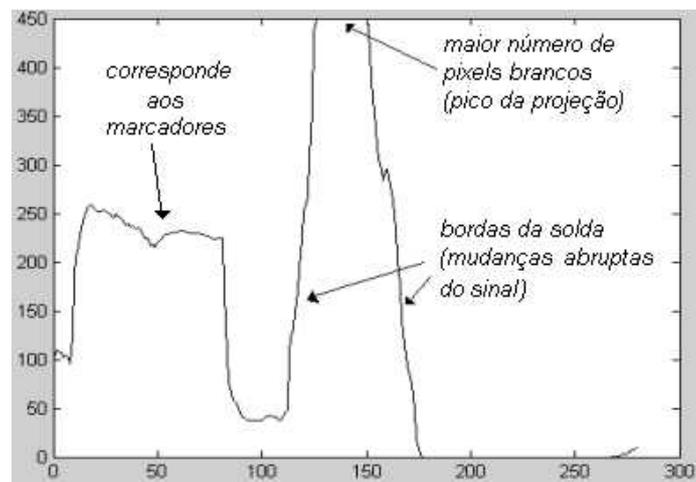


Figura 4.20 – Projeção vertical da imagem radiográfica da figura 4.17

A figura 4.20 destaca as regiões de interesse na projeção, estas regiões são as bordas da solda, que correspondem às mudanças mais abruptas do sinal. Assim propõe-se a utilização do cálculo da derivada para detectar as bordas do cordão de solda. O cálculo da derivada da projeção das imagens é dado pela equação 4.12.

$$p_d(i) = p(i) - p(i - K) \quad (4.12)$$

Onde $p(i)$ é o valor da projeção no ponto i , $p_d(i)$ é o valor da derivada da projeção, $p(i-K)$ é o valor da projeção distante de K amostras do ponto em análise e i é o índice que varia de 1 até M , sendo M o número de linhas da imagem. Por exemplo, para K igual valor 1, o valor da derivada seria o valor atual subtraído do valor anterior.

A figura 4.21 mostra o efeito do cálculo da derivada na projeção. É possível notar que as regiões mais abruptas da projeção são os pontos onde o valor da derivada atinge seu máximo e mínimo. Porém as bordas do cordão de solda encontram-se no início da ascensão e no término do declínio da curva de maior amplitude (figura 4.19). Por isso a utilização do valor de máximo da derivada como marca para segmentação acarreta em perda de parte do cordão como mostra a figura 4.21. Assim para não perder os extremos do cordão de solda é utilizado como marca apenas o valor de mínimo da derivada.

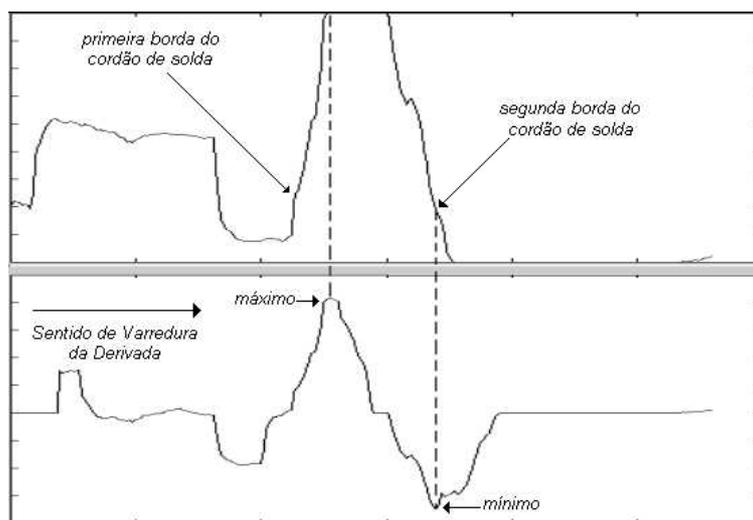


Figura 4.21 – Cálculo da Derivada sobre a Projeção da Imagem

Para a marcação da linha da primeira borda deve ser executado o cálculo da derivada com o sentido de varredura contrário como mostra a figura 4.22.

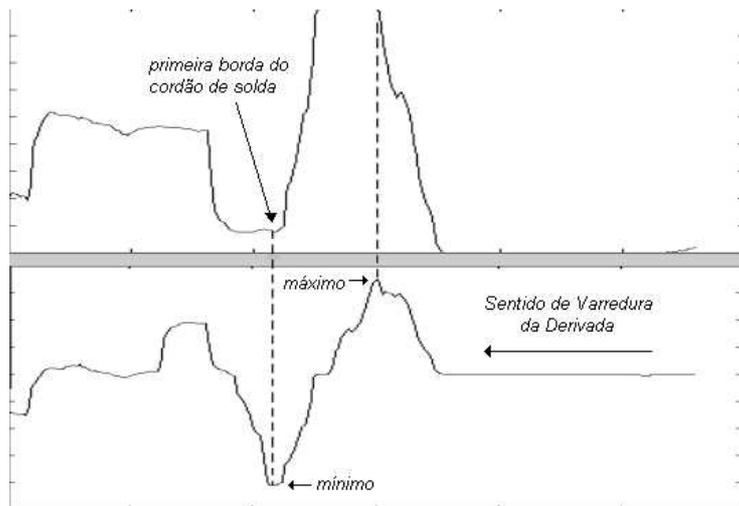


Figura 4.22 – Cálculo da Derivada sobre a Projeção da Imagem com sentido de varredura contrário

Para o cálculo da derivada que encontra a primeira borda é utilizada a equação 4.13.

$$p_d(i) = p(i) - p(i + K) \quad (4.13)$$

Onde $p(i)$ e $p_d(i)$ são respectivamente o valor da projeção e o valor de sua derivada no ponto em análise, $p(i+K)$ é o valor da projeção distante de K amostras do ponto em análise. Porém neste cálculo o índice i varia de M até 1.

A figura 4.23 mostra a imagem da figura 4.17 com as bordas da solda em destaque (linhas brancas).

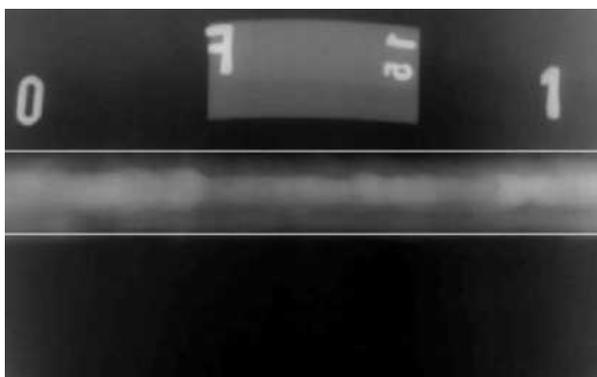


Figura 4.23 – Cordão de Solda Segmentado

Desta forma pode ser restringida a aplicação do método proposto para segmentar defeitos (seção 4.1) apenas entre as duas bordas que separam o cordão de solda. Os resultados da aplicação conjunta da segmentação do cordão de solda e da segmentação dos defeitos são mostrados no capítulo 5.

4.3) Extração das Características dos Defeitos.

A imagem da figura 4.16, chamada de imagem *final*, possui os possíveis defeitos da solda segmentados. Estes possíveis defeitos devem ser analisados em um processo de classificação que tem o objetivo de classificar os defeitos entre trincas, porosidades, falta de penetração e falta de fusão entre outros. Este processo, por sua vez, necessita do levantamento de algumas características dos defeitos.

Essas características consideram a área do defeito, a área do retângulo que envolve o defeito, o maior comprimento do defeito, a maior altura do defeito, o perímetro do defeito, a densidade dos tons de cinza do defeito, a localização do defeito em relação à solda entre outras (Shafeek et-al, 2004b; Silva et-al, 2001; Carvalho et-al (2003).

Devido a essas atribuições é necessária a implementação de uma rotina que isole os defeitos que estão segmentados na imagem da figura 4.16 de forma automática. Para isto é utilizada a rotina que rotula os *pixels* de uma mesma região descrita na subseção 3.2.7. Essa rotina que “pinta” as áreas de contornos fechados é executada com o objetivo de identificar através do tom de cinza cada um dos defeitos da imagem (cada defeito tem um *Label* específico), possibilitando o levantamento de algumas características.

Para o levantamento das características é utilizada a metodologia proposta por Shafeek et-al (2004a), onde tais características são: área e o centróide x e y, e são dados pelas equações 4.14 a 4.16 respectivamente. Segundo o autor esses cálculos devem ser repetidos para cada área fechada, ou seja, para uma região que possua o mesmo *Label*.

$$M_{ij} = \sum_X \sum_Y X^i Y^j \quad (4.14)$$

$$\bar{x} = \frac{M_{10}}{M_{00}} \quad (4.15)$$

$$\bar{y} = \frac{M_{01}}{M_{00}} \quad (4.16)$$

Onde:

- M_{ij} é a área quando os valores de i e j são zero, ou seja, a área é o termo M_{00} (soma de todos os termos internos do defeito);
- M_{10} é a soma das coordenadas em x internas ao defeito, M_{01} é análogo para as coordenadas em y;
- \bar{x} e \bar{y} são as coordenadas do centróide do defeito em x e em y respectivamente.

Em Shafeek et-al (2004a) outra característica do defeito é gerada a partir do cálculo do perímetro. Para tanto o autor faz uso de um código detector de contornos para detectar os contornos fechados de cada um dos defeitos. Com os contornos detectados e com os *Labels* de cada defeito é possível calcular o perímetro dos defeitos como mostra a equação 4.17.

$$P = \sum_{K=1}^N c_K \quad (4.17)$$

Onde:

- P é o perímetro do defeito;
- N é o número de *pixels* de borda do defeito;
- c_K representa os *pixels* de contorno.

Neste trabalho o cálculo do perímetro é obtido por meio da soma de todos os *pixels* de borda dos defeitos segmentados. Para a obtenção destas bordas é aplicada a técnica de análise da vizinhança de um *pixel* descrita na seção 3.2.1, sendo que esta técnica é aplicada para cada defeito (para cada *Label* específico). O resultado da aplicação desta técnica sobre a imagem *final* (figura 4.16) pode ser observado na figura

4.24. Para o cálculo do perímetro dos defeitos realizado neste trabalho c_K representa os *pixels* pretos que formam as bordas de cada defeito segmentado.

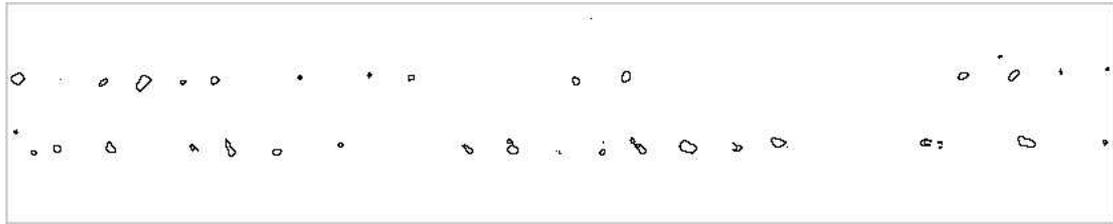


Figura 4.24 – Contornos dos possíveis defeitos segmentados (figura 4.16).

A figura 4.25 mostra o exemplo de um defeito com todas as características em destaque. Essas características praticamente permitem a análise do defeito, de acordo com Shafeek et-al. (2004b), Silva et-al (2001) e Carvalho et-al (2003).

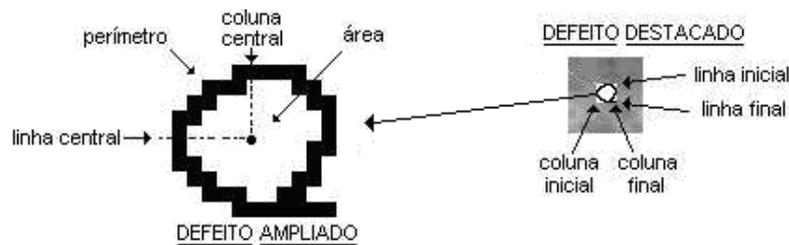


Figura 4.25 – Características extraídas de um determinado defeito.

Na figura 4.25 observa-se que além das características já apresentadas como perímetro, área e centróide, também é possível encontrar o menor retângulo que envolve o defeito, buscando os extremos de uma região fechada por meio da linha inicial, linha final, coluna inicial e coluna final, esta característica é importante para a identificação dos defeitos. Da mesma forma o centróide auxilia na identificação da localização do defeito em relação ao cordão de solda, existem defeitos que só podem ocorrer no centro do cordão como é o caso da falta de penetração, e outros que podem ocorrer somente perto das bordas como é o caso da falta de fusão (seção 2.2.4). Assim, conhecer as bordas da solda, como é mostrado no item 4.2, também é importante para a classificação dos defeitos. A figura 4.26 mostra a imagem com os possíveis defeitos e com as bordas da solda segmentados.

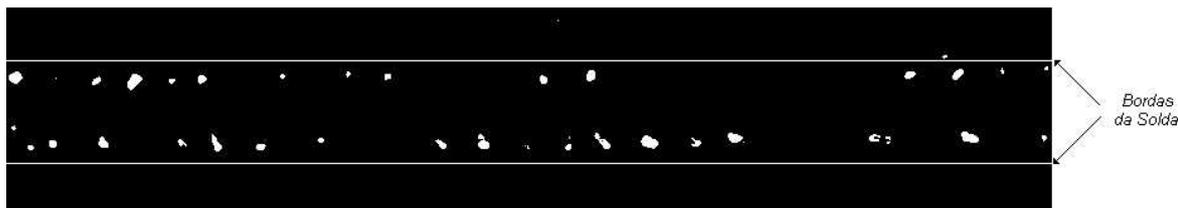


Figura 4.26 – Imagem com os defeitos segmentados e com as bordas da solda em destaque.

Vale ressaltar que segundo o Manual da AGFA, a imagem segmentada da figura 4.26, apresenta o defeito de falta de fusão na parede da solda, e como pode-se notar a maioria dos possíveis defeitos encontrados está nas proximidades das bordas, confirmando a proximidade com a parede da solda, e destacando a importância de se conhecer a localização dos defeitos.

4.4) Análise de Tubulações

Segundo a ASM Handbook (1997) a corrosão é uma reação química ou eletroquímica entre um material e seu ambiente que produz uma deterioração do material e suas propriedades, sendo que este material é normalmente um metal.

Segundo Onel et-al (2000) as áreas corroídas das tubulações apresentem variações nas medidas de espessura e deste modo, alguns autores, dentre eles Onel et-al (2000), Redouane et-al (2000) e Zscherpel et-al (2000) utilizam a análise de processamento de imagens sobre a imagem resultante de uma projeção da tubulação, como é descrito na seção 2.3.1, com o objetivo de analisar a espessura dessa tubulação. Sobretudo Redouane et-al (2000) executam uma análise do perfil desta imagem com o objetivo de segmentar as áreas da tubulação para identificar regiões de corrosão. Também em Zscherpel et-al (2000) é analisada a sombra gerada pela parede da tubulação com o objetivo de executar um cálculo preciso da espessura.

Neste contexto desenvolve-se uma metodologia que permite segmentar as duas paredes de uma tubulação através do cálculo da segunda derivada sobre o perfil da imagem, e também uma forma de diagnosticar a corrosão no trecho de tubulação analisado.

Para descrever a metodologia primeiramente deve-se analisar a figura 4.27.

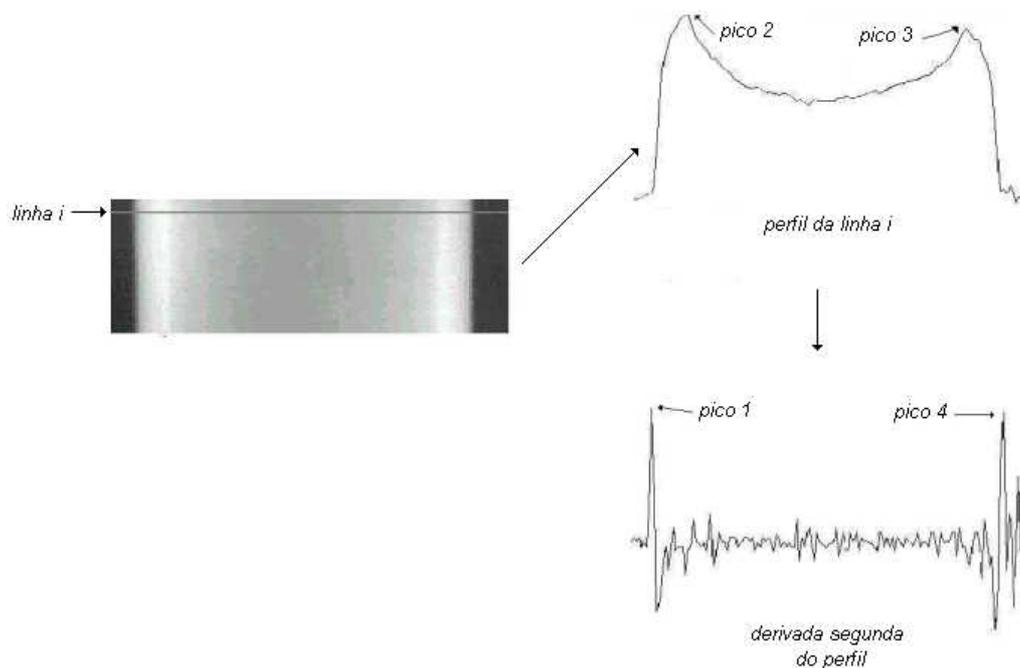


Fig. 4.27 - Imagem Radiográfica da Tubulação e a análise do perfil transversal.

Nesta figura nota-se a existência de uma diferença de intensidade nos tons de cinza da imagem radiográfica. Tal diferença provém da quantidade de Raios X absorvida pelo material que sofre radiação. As regiões escuras da imagem correspondem à camada de isolamento do tubo, por outro lado as regiões mais claras correspondem à parte interna da tubulação e à parede gerada pela sombra.

Desta forma, observando as informações da figura 4.27, pode-se notar como foi executada a segmentação das paredes do duto. Primeiramente é feita uma análise do perfil transversal à tubulação (linha i), para cada uma das linhas do perfil é feito a análise dos dois maiores picos (pico 2 e pico 3), de acordo com os perfis das tubulações esses dois picos correspondem as partes internas das paredes. Em seguida é feito o cálculo da derivada segunda sobre os perfis transversais com o objetivo de detectar as partes externas das paredes do duto, neste cálculo são obtidos os picos 1 e 4. Para o cálculo da segunda derivada são utilizadas as equações 4.18 e 4.19, primeira derivada e segunda derivada respectivamente.

$$d1(i, j) = x(i, j) - x(i, j - 1) \quad (4.18)$$

$$d2(i, j) = d1(i, j) - d1(i, j - 1) \quad (4.19)$$

Onde x é a matriz que forma a imagem original, $d1$ é o valor da primeira derivada, $d2$ é o valor da segunda derivada, i é o índice que representa as linhas da imagem, e j é o índice que representa as colunas da imagem.

Cada linha da imagem tem os seus valores de *pico 1*, *2*, *3* e *4*. O processo de segmentação das paredes segue com a execução da limiarização da imagem atribuindo valor 0 às regiões situadas entre o pico 1 e o pico 2, e entre o pico 3 e o pico 4 como mostra a equação 4.20.

$$y(i, j) = \begin{cases} 0 & , p1 < j < p2 \\ 0 & , p3 < j < p4 \\ 255, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4.20)$$

Onde y é a matriz que forma a imagem segmentada, i é o índice que representa as linhas da imagem, j é o índice que representa as colunas da imagem, $p1$ e $p4$ são os valores de pico da segunda derivada e $p2$ e $p3$ são os valores de pico do perfil transversal. A figura 4.28 mostra a imagem de uma tubulação com as paredes segmentadas

a)



b)



Figura 4.28 – a) imagem da Tubulação sem corrosão, b) imagem segmentada

A segunda etapa consiste na análise da corrosão nas paredes do duto. A corrosão gera uma variação na espessura da parede, que pode ser observado na projeção da sombra sobre a imagem radiográfica (seção 2.3.1).

Desta forma é proposto o uso do desvio padrão da medida da espessura da parede, como forma de mensurar a corrosão. As paredes do duto corroídas perdem a homogeneidade, e assim devem apresentar um valor maior para o desvio padrão. Para o cálculo o cálculo do desvio padrão da imagem segmentada é efetuado a equação 4.21.

$$S = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (v(i) - X)^2} \quad (4.21)$$

Onde v é o vetor que representa o número de *pixels* que correspondem à espessura da parede para cada linha, M é o número de linhas da imagem que corresponde ao tamanho do vetor v , X é a média de v , e i é o índice que assume valores até M . A média é dada pela equação 4.22.

$$X = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M v(i) \quad (4.22)$$

A figura 4.29 mostra de forma gráfica o vetor v que representa os valores de espessura da parede para cada linha da imagem segmentada. Nota-se que o valor do vetor v para cada linha corresponde ao número de *pixels* (espessura) pretos da parede, ou seja, $v(i)$ é maior onde a espessura é maior.

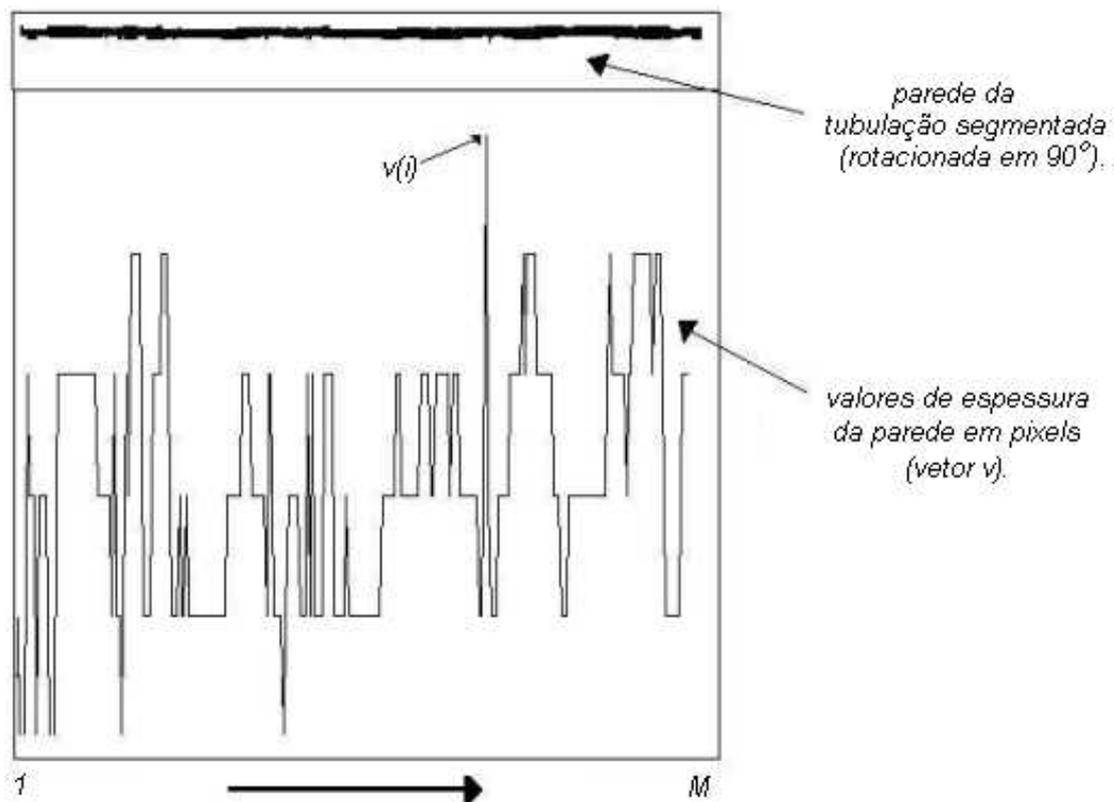


Figura 4.29 – Relação entre a espessura da parede e o vetor v .

Aplicando o cálculo do desvio obtêm-se uma medida quantitativa sobre a variação da espessura e conseqüentemente sobre o efeito da corrosão no duto. As figuras 4.30 e 4.32 mostram os resultados dos cálculos do desvio padrão para uma tubulação não corroída e outra corroída, respectivamente.

Os resultados apresentados na figura 4.30 são calculados a partir da imagem original da figura 4.28a, que trata de uma tubulação não corroída. Para os cálculos apresentados na figura 4.32, a imagem original utilizada é a da tubulação corroída e é apresentada na figura 4.31.

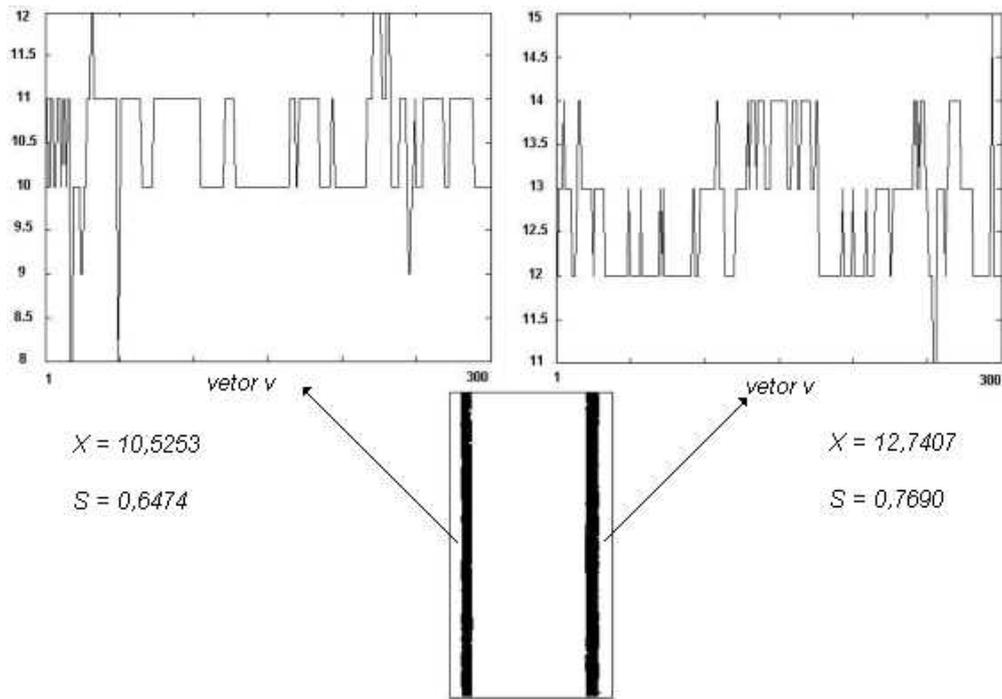


Fig 4.30 - Valores de média e desvio padrão para uma tubulação não corroída.

A figura 4.31 apresenta a imagem radiográfica de uma tubulação corroída.

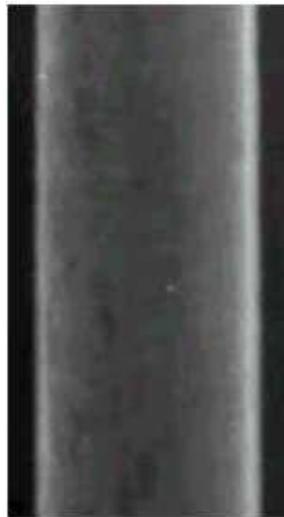


Figura 4.31 – Imagem da tubulação corroída.

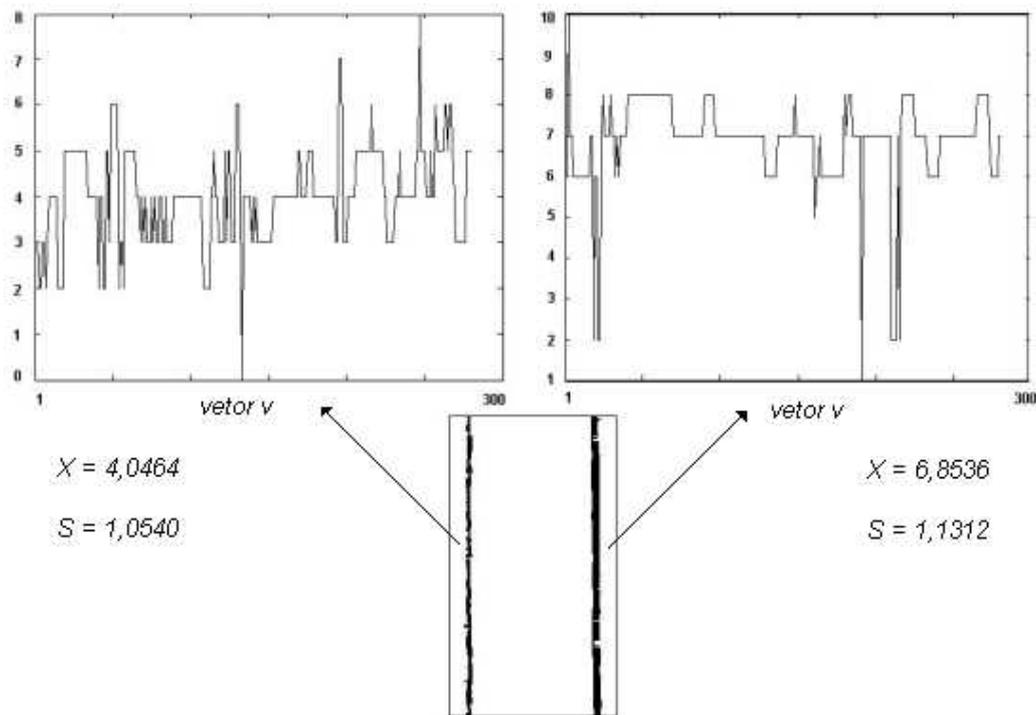


Fig 4.32 - Valores de média e desvio padrão para uma tubulação corroída.

As tubulações corroídas têm a espessura das paredes mais irregulares. Como a segmentação das paredes do duto permite notar a variação da espessura, estas irregularidades são observadas na medida em que o desvio padrão resulta em um maior valor para as imagens de tubulações corroídas. Desta forma o cálculo do desvio padrão mostrado na imagem da figura 4.32 resultou em valores maiores do que os cálculos apresentados na figura 4.30, mostrando que aumento nos valores do desvio padrão está associado em aumento do nível de corrosão.

4.5) Conclusão

Com a utilização dos métodos propostos, apresentados neste capítulo pode-se ressaltar alguns aspectos:

- A utilização dos perfis das imagens é uma ferramenta poderosa quando o objetivo é encontrar soluções para a segmentação de objetos em uma imagem radiográfica digital, pois foi empregada para segmentar os defeitos na solda, e para segmentar as paredes da tubulação;

- Os defeitos das soldas são descontinuidades representadas por quedas abruptas dos valores de tons de cinza na imagem, sendo assim a utilização de um filtro que amortize o efeito destas quedas apenas nessas regiões contribui para destacar regiões da imagem que possam ser defeitos, permitindo a segmentação;
- A região da imagem correspondente aos cordões de solda apresenta uma similaridade nos tons de cinza dos *pixels*, neste caso a aplicação de uma limiarização na imagem como um todo contribui para salientar características de formato do cordão que permitem utilizar a projeção da imagem limiarizada para uma segmentação eficaz;
- As características extraídas dos defeitos são as mesmas utilizadas por alguns autores como é descrito no texto. Estas características podem ser utilizadas também para a composição de outras características que venham a ser utilizadas por um reconhecedor de defeitos, como por exemplo, características que utilizem composição entre área e perímetro, área e área do menor retângulo que envolve o defeito entre outros.

Os métodos propostos neste trabalho para executar as segmentações dos defeitos, dos cordões de solda, das paredes da tubulação e a extração de características dos defeitos apresentaram bons resultados em imagens testes. Alguns resultados são apresentados no capítulo 5. Estes métodos também resultaram na publicação de três artigos em congressos na área: Schneider et-al (2004a), Schneider et-al (2004b) e Felisberto et-al (2004b).

5) RESULTADOS ESPECÍFICOS

Este trabalho não tem o foco na classificação dos defeitos e sim na sua segmentação, desta maneira as normas não serão avaliadas para a validação do método proposto. Para validar o método são utilizadas as informações do laudo que mostra qual o tipo de defeito presente na imagem radiográfica.

Para a implementação das rotinas foram utilizados os *softwares* *MATLAB 6.1*[®] e *Borland C++ Builder 5*[®].

5.1) Testes com os coeficientes

Foram feitas algumas análises sobre o filtro utilizado na técnica de realce dos defeitos, este filtro é apresentado na seção 4.1.2 e utiliza valores de coeficientes *coef1* e *coef2*. A alteração da localização de *coef1* e *coef2* no círculo unitário altera o valor de ganho do filtro. Neste sentido observou-se através de testes que a utilização de um ganho na frequência zero que não seja unitário (*Ganho* diferente de 1) produz uma segmentação que foge das características da técnica proposta, ou seja, produz um perfil filtrado que deixa de destacar as quedas abruptas do perfil original (seção 4.1).

A figura 5.1 mostra a curva de resposta em frequência de um filtro com *Ganho* na frequência zero maior que 1, neste filtro os valores dos coeficientes são os seguintes: *coef1* igual à 0,2 e *coef2* igual à 0,95.

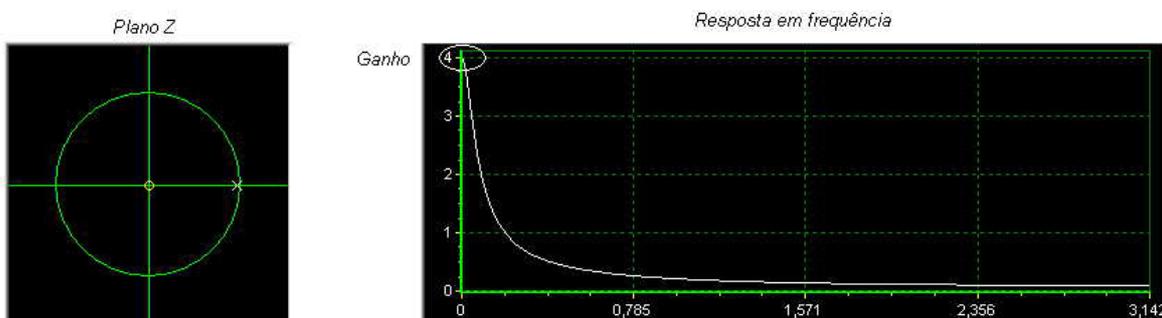


Figura 5.1 – Plano Z e resposta em frequência do filtro.

A figura 5.2 mostra o perfil filtrado obtido com a utilização da técnica proposta neste trabalho e com a utilização dos valores de coeficientes mencionados no parágrafo anterior.

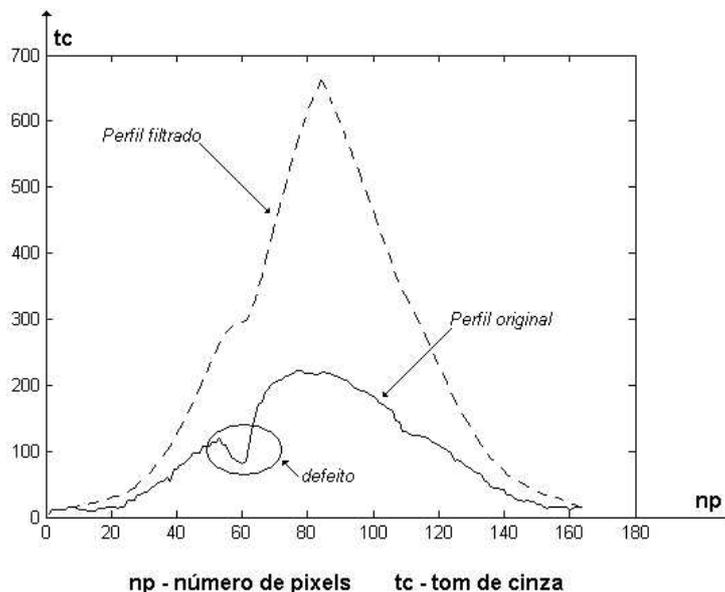


Figura 5.2 – Perfis filtrado e original.

Observa-se na figura que o perfil filtrado não acompanha o perfil original e não destaca a queda abrupta da região do defeito.

A verificação do *Ganho* do filtro bem como da sua curva de resposta em frequência foi feita com a utilização do *software* ft3d, e simulações atribuindo valores diferentes de *coef1* e *coef2* foram realizadas, obtendo valores de *Ganhos* na frequência zero maiores e menores que 1. Em ambas as situações, o perfil filtrado não acompanha o perfil original de forma a realçar as quedas abruptas de sinal.

As conclusões obtidas com estes testes são que a atribuição dos valores dos coeficientes do filtro deve ocorrer de tal forma que o *Ganho* na frequência zero tenha o valor unitário, e de acordo com a função de transferência deste filtro (equação 4.5) para que se obtenha este valor a soma dos coeficientes deve ser igual a 1.

A técnica de filtragem proposta executa a filtragem em dois sentidos: vertical e horizontal (seção 4.1.4). A filtragem vertical utiliza na equação do filtro os coeficientes *coef1* e *coef2*, e a filtragem horizontal utiliza outros coeficientes: *coef3* e *coef4*. Da mesma forma que a soma dos coeficientes *coef1* e *coef2* deve ser igual a 1, a soma de

coef3 e *coef4* também deve ser unitária, e ainda da mesma forma que *coef2*, *coef4* não pode ser maior que 1, por tratar-se do pólo do filtro (seção 4.1.2).

Os coeficientes *coef1* e *coef3* indicam a amortização do sinal original que pode ser observada no sinal filtrado, e influenciam no resultado dos perfis filtrados verticais e horizontais respectivamente. Quanto menor é o valor do coeficiente, mais significativa é a amortização das quedas abruptas do sinal, por outro lado quanto maior é o valor do coeficiente, menos significativo é a amortização do sinal. Pode-se notar este efeito com os resultados apresentados nas figuras 5.4 e 5.5, nestes testes o *Ganho* igual a 1 foi mantido e foram alterados os valores dos coeficientes. A figura 5.4, que utiliza os parâmetros da tabela 5.2, mostra o efeito de uma superamortização do sinal com a utilização de valores muito baixos para *coef1* e *coef3*, e por outro lado, a figura 5.5, que utiliza os parâmetros da tabela 5.3, mostra o efeito de uma subamortização entre os sinais original e filtrado com a utilização de valores muito altos para *coef1* e *coef3*, ocorrendo até sobreposição entre os sinais.

Durante os teste realizados com as imagens utilizadas neste trabalho observou-se que para a filtragem vertical deve-se utilizar o valor do coeficiente *coef1* igual a 0,05, que resulta em uma amortização eficiente para executar o realce das quedas abruptas. Por sua vez na filtragem horizontal o valor do coeficiente *coef3* utilizado não foi constante, para alguns testes foi utilizado *coef3* igual a 0,2 (figuras 5.37 a 5.43) e para outros testes *coef3* igual a 0,03 (figuras 5.44 a 5.49). Isto se deve ao fato do perfil horizontal poder apresentar um número maior de quedas abruptas (possíveis defeitos) como, por exemplo, em uma imagem radiográfica de solda com falta de fusão (figura 5.9a), e ainda ao fato destas quedas abruptas poderem estar muito próximas umas das outras como ocorre em uma imagem radiográfica de solda com porosidade alinhada (figura 5.8a), nestas situações torna-se necessário utilizar *coef3* igual a 0,2, pois uma amortização muito significativa pode acarretar em agrupamento dos defeitos na imagem segmentada.

5.2) Segmentação dos Defeitos

Nesta etapa são mostrados os resultados das aplicações do método de segmentação de defeitos descrito no capítulo 4. Sob as imagens resultantes são

executados os seguintes passos: pré-processamento, obtenção do fundo estimado e limiarização. Sendo que para a etapa de limiarização são apresentados alguns resultados onde foram utilizadas as quatro técnicas de limiarização descritas no capítulo 3, e também são feitos comentários sobre o uso de cada uma destas técnicas ao final de cada subseção. Para comparar as técnicas de limiarização utilizadas na última etapa do método proposto são utilizadas seis imagens radiográficas de juntas soldadas com defeitos, figuras 5.3a, 5.6a, 5.7a, 5.8a, 5.9a e 5.10a.

No pré-processamento são executados a expansão do histograma e o filtro da mediana conforme está escrito no capítulo 4. Para a obtenção do fundo estimado são mostrados os resultados provenientes da aplicação do método proposto onde os coeficientes *coef1*, *coef2*, *coef3* e *coef4* foram testados com valores extremos e com valores que apresentaram o melhor resultado. Na etapa de limiarização para a obtenção dos resultados faz-se o uso dos quatro limiarizadores descritos no capítulo 3.

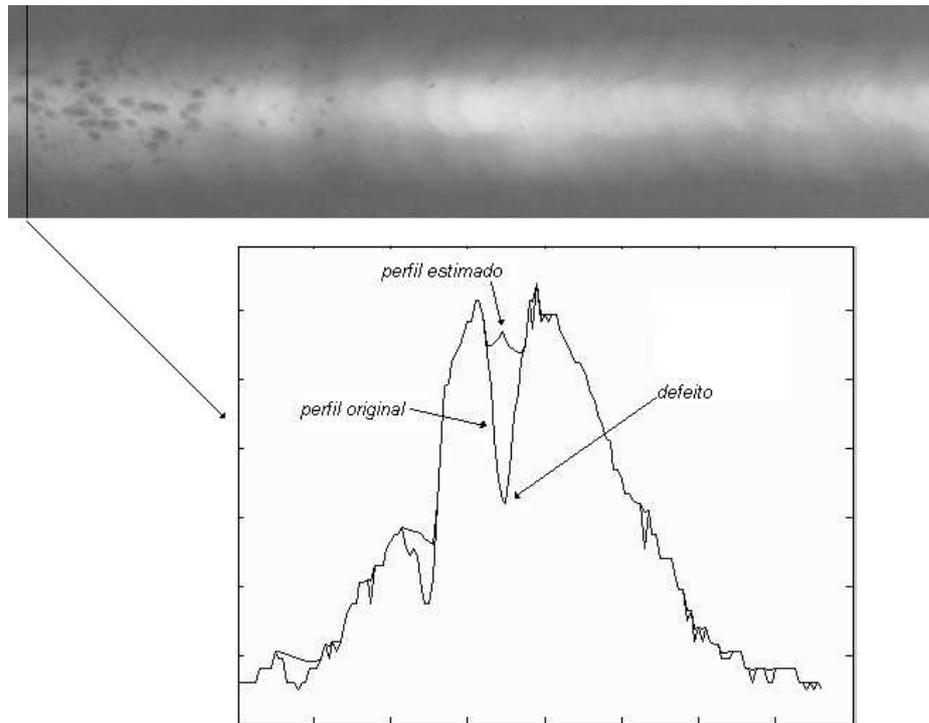
Do mesmo modo para mostrar os resultados são testadas janelas do filtro da mediana de tamanho diferente, e deve ser considerado como *mediana_anterior* a janela utilizada antes da limiarização e como *mediana_posterior* a janela utilizada depois da limiarização.

É importante ressaltar que, como escrito na seção 2.4 (critério de aceitação), defeitos como trincas, falta de fusão e de penetração dificilmente são aceitos e, portanto, devem ser segmentados.

5.2.1) Aplicação do método proposto: limiarizando com a técnica de *Otsu*.

A figura 5.3a mostra a imagem de uma junta soldada com porosidade agrupada, segundo o manual da AGFA. O resultado da segmentação é a imagem da figura 5.3b que é calculada segundo os parâmetros da tabela 5.1.

a)



b)

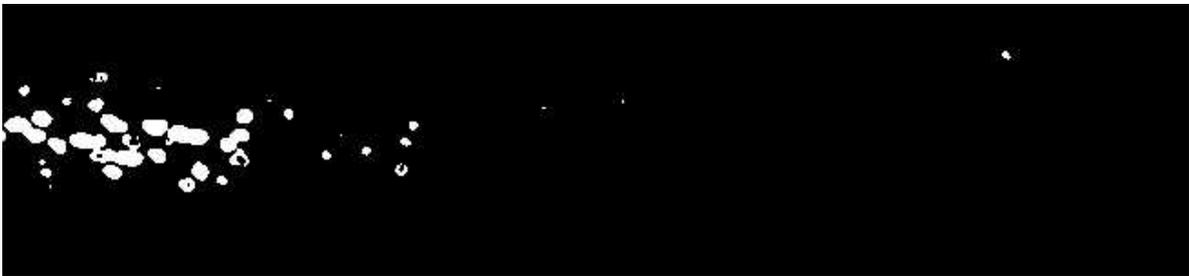


Figura 5.3 – Junta Soldada com Porosidade a) Imagem Original (manual da AGFA) e b) Defeitos Segmentados

Tabela 5.1 – Parâmetros (teste 1).

<i>Coef1</i>	0,05
<i>Coef2</i>	0,95
<i>Coef3</i>	0,2
<i>Coef4</i>	0,8
<i>mediana_anterior</i>	3 x 3
<i>mediana_posterior</i>	3 x 3

Tabela 5.2 – Parâmetros (teste 2).

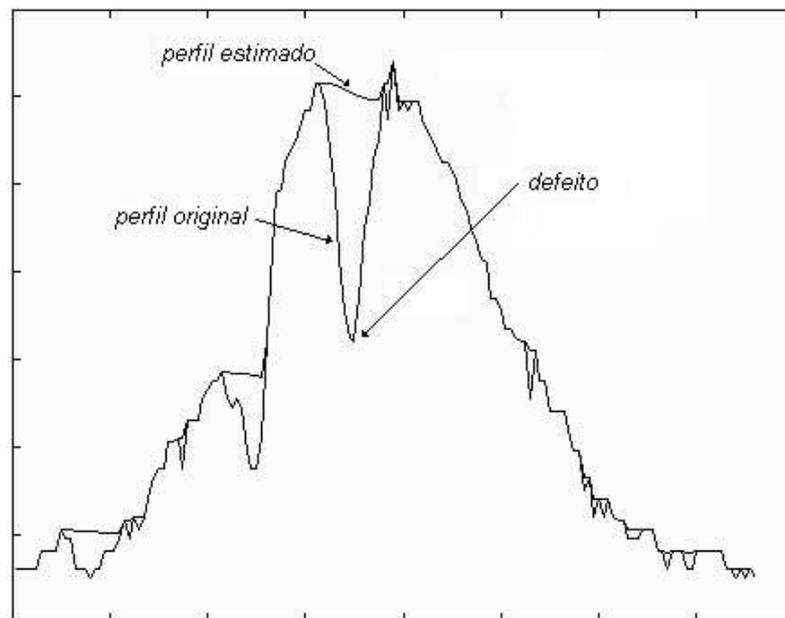
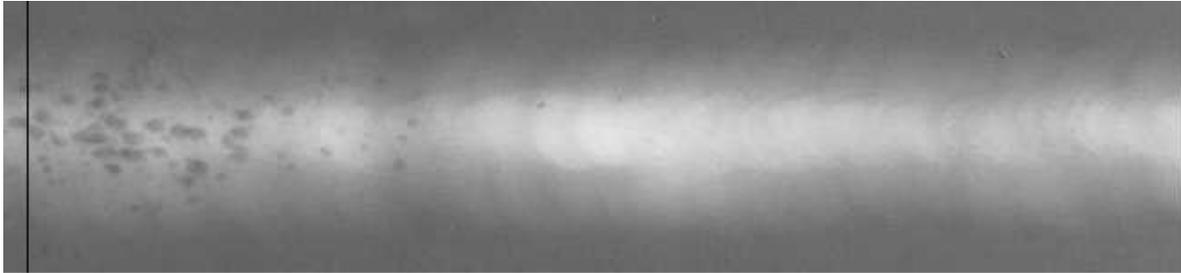
<i>coef1</i>	0,01
<i>coef2</i>	0,99
<i>coef3</i>	0,01
<i>coef4</i>	0,99
<i>mediana_anterior</i>	3 x 3
<i>mediana_posterior</i>	3 x 3

Tabela 5.3 – Parâmetros (teste 3).

<i>coef1</i>	0,9
<i>coef2</i>	0,1
<i>coef3</i>	0,9
<i>coef4</i>	0,1
<i>mediana_anterior</i>	3 x 3
<i>mediana_posterior</i>	3 x 3

A figura 5.4 mostra o resultado da segmentação das porosidades utilizando os parâmetros da tabela 5.2.

a)



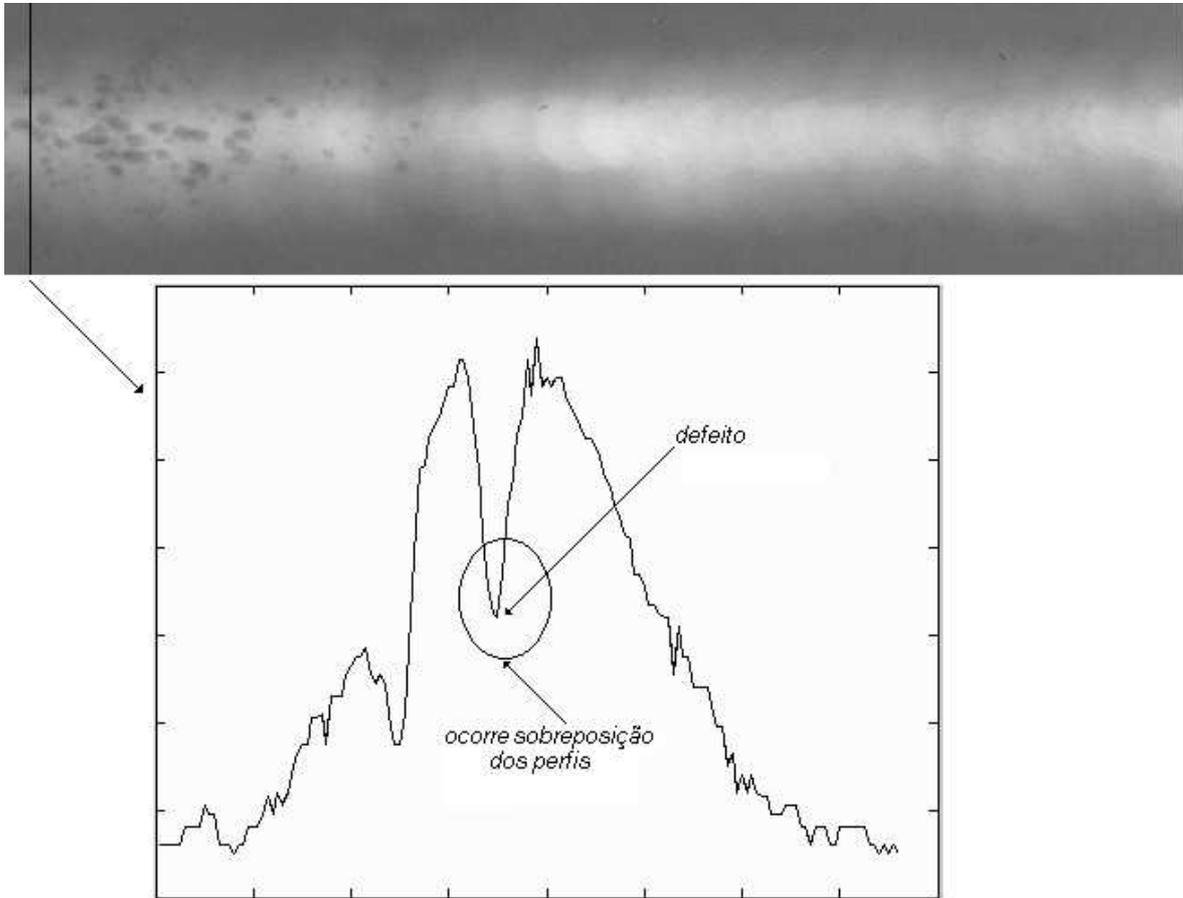
b)



Figura 5.4 – a) Análise do perfil vertical: original e estimado, b) resultado da segmentação.

A figura 5.5 mostra o resultado da segmentação das porosidades utilizando os parâmetros da tabela 5.3.

a)



b)

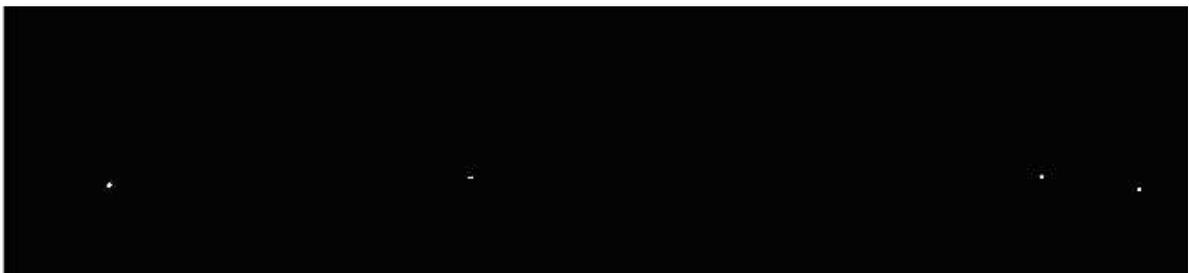


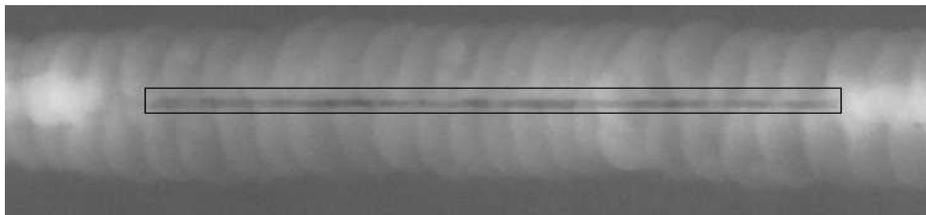
Figura 5.5 – a) Análise do perfil vertical: original e estimado, b) resultado da segmentação.

As alterações nos coeficientes podem resultar em uma segmentação boa ou ineficiente. Quando os valores dos coeficientes $coef1$ e $coef3$ são muito próximos de 1 o perfil estimado acompanha o perfil original praticamente em toda a extensão, o que implica em uma segmentação com pouca região separada. Da mesma forma quando os coeficientes $coef1$ e $coef3$ são valores próximos de zero o perfil estimado não

acompanha o perfil original nas regiões de quedas abruptas, mas por outro lado funde os defeitos na segmentação. Para as imagens utilizadas neste trabalho os melhores valores de coeficientes são os da tabela 5.1, pois permaneceram inalterados para todos os tipos de imagem testados e apresentam bons resultados.

A figura 5.6a mostra a imagem de uma junta soldada com falta de penetração, segundo o manual da AGFA. O resultado da segmentação é a imagem da figura 5.6b que é obtido com o uso dos parâmetros da tabela 5.1.

a)



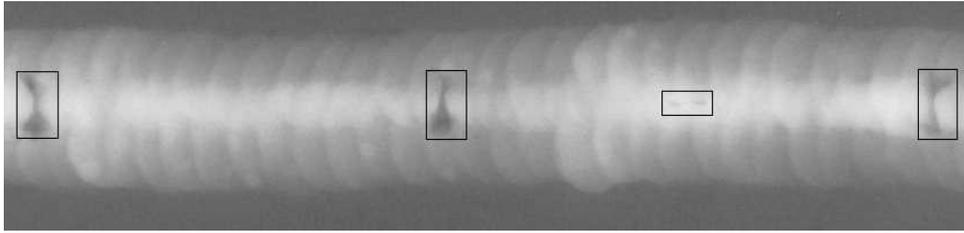
b)



Figura 5.6 – a) Solda com Falta de Penetração (Manual da AGFA), b) Defeito Segmentado.

A figura 5.7a mostra a imagem de uma junta soldada com inclusão de escória, segundo o manual da AGFA. O resultado da segmentação é a imagem da figura 5.7b que é calculado segundo os parâmetros da tabela 5.1.

a)



b)

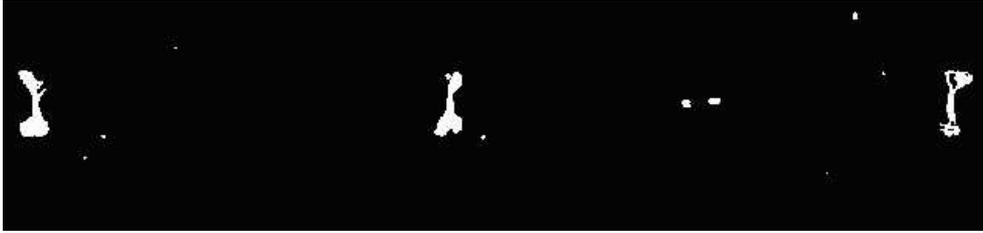
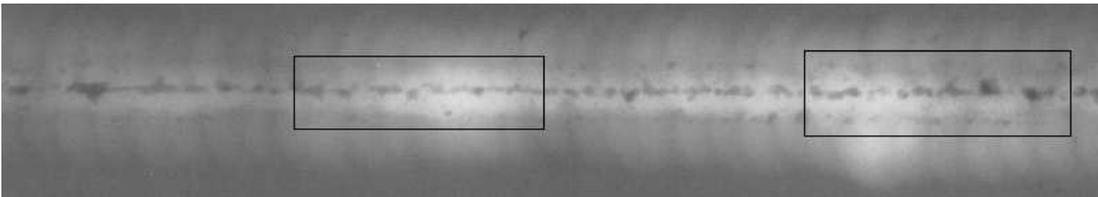


Figura 5.7 – a) Solda com Inclusão de Escória (Manual da AGFA), b) Defeito Segmentado.

A figura 5.8a mostra a imagem de uma junta soldada com porosidade alinhada no cordão da solda, segundo o manual da AGFA. O resultado da segmentação é a imagem da figura 5.8b que é calculado segundo os parâmetros da tabela 5.1.

a)



b)

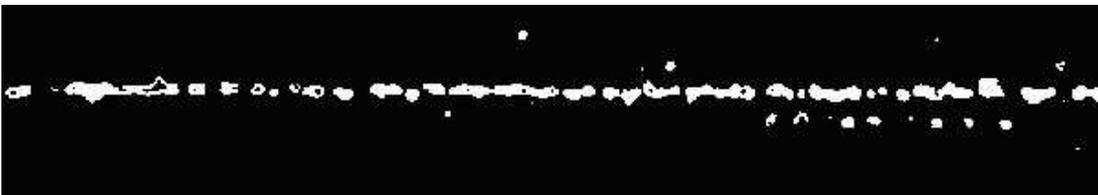
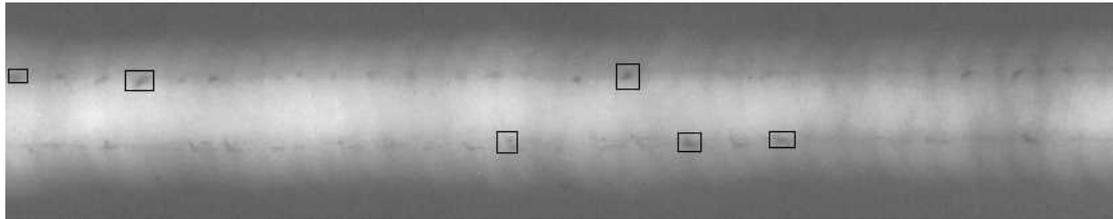


Figura 5.8 – a) Solda com Porosidade (Manual da AGFA), b) Defeito Segmentado.

A figura 5.9a mostra a imagem de uma junta soldada com falta de fusão, segundo o manual da AGFA. O resultado da segmentação é a imagem da figura 5.9b que é calculado segundo os parâmetros da tabela 5.4 que apresenta o parâmetro *mediana_posterior* com alteração de tamanho da janela (5 x 5).

a)



b)

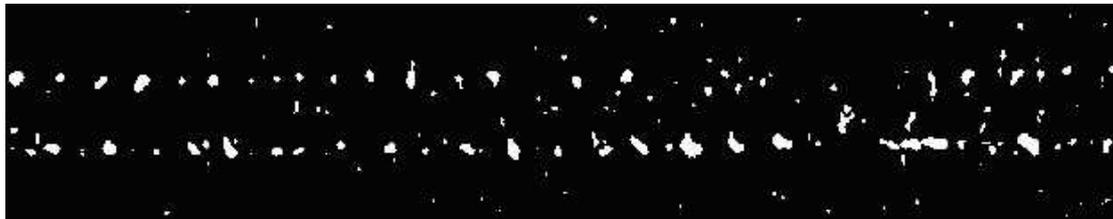


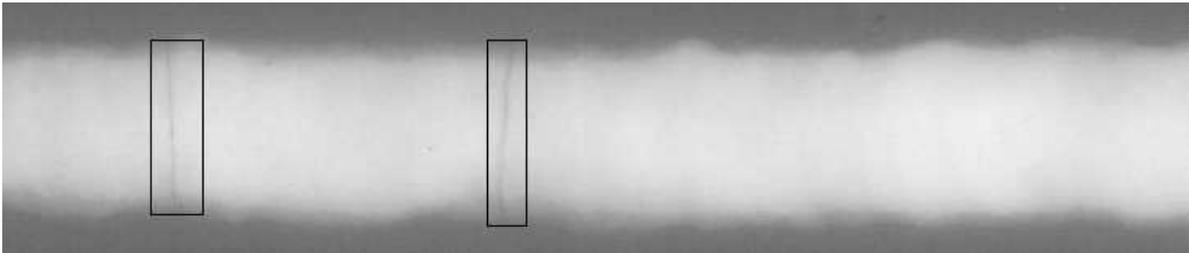
Figura 5.9 – a) Solda com Falta de Fusão (Manual da AGFA), b) Defeito Segmentado.

Tabela 5.4 – Parâmetros (teste 4).

<i>Coef1</i>	0,05
<i>Coef2</i>	0,95
<i>Coef3</i>	0,2
<i>Coef4</i>	0,8
<i>mediana_anterior</i>	3 x 3
<i>mediana_posterior</i>	5 x 5

A figura 5.10a mostra a imagem de uma junta soldada com duas trincas transversais, segundo o manual da AGFA. O resultado da segmentação é a imagem da figura 5.10b que é calculado segundo os parâmetros da tabela 5.5, que também apresenta o parâmetro *mediana_posterior* com alteração de tamanho da janela (7 x 7)

a)



b)



Figura 5.10 – a) Solda com Trinca Transversal (Manual da AGFA), b) Defeito Segmentado.

Tabela 5.5 – Parâmetros (teste 5).

<i>Coef1</i>	0,05
<i>Coef2</i>	0,95
<i>Coef3</i>	0,2
<i>Coef4</i>	0,8
<i>mediana_anterior</i>	3 x 3
<i>mediana_posterior</i>	7 x 7

A utilização da técnica de *Otsu* para a etapa de limiarização permitiu que o método proposto conseguisse segmentar a maioria dos possíveis defeitos como pode ser observado ao se fazer uma análise visual pelas imagens 5.3b e 5.6b a 5.10b. Contudo, para segmentar os defeitos das imagens radiográficas das figuras 5.9 e 5.10, foi necessário o ajuste do tamanho (aumento) da janela da *mediana_posterior* para reduzir

o número de “espigamentos” na imagem, porém mesmo com estes ajustes a incidência de falsos alarmes (defeitos segmentados que não são defeitos) foi maior do que o número de defeitos segmentados corretamente. Além disso, esta ocorrência pode ser um fator limitante, pois torna a segmentação mais dependente dos parâmetros.

5.2.2) Aplicação do método proposto: limiarizando com a técnica de *Kapur*.

O resultado da segmentação é a imagem da figura 5.11. Esta segmentação é obtida utilizando os parâmetros da tabela 5.1. A imagem original é a da figura 5.3a.



Figura 5.11 – Porosidades Segmentadas.

O resultado da segmentação é a imagem da figura 5.12. Esta segmentação é obtida utilizando os parâmetros da tabela 5.1. A imagem original é a da figura 5.6a.



Figura 5.12 – Falta de Penetração Segmentada.

O resultado da segmentação é a imagem da figura 5.13. Esta segmentação é obtida utilizando os parâmetros da tabela 5.1. A imagem original é a da figura 5.7a.



Figura 5.13 – Inclusão de Escória Segmentada.

O resultado da segmentação é a imagem da figura 5.14. Esta segmentação é obtida utilizando os parâmetros da tabela 5.1. A imagem original é a da figura 5.8a.



Figura 5.14 – Porosidade Alinhada Segmentada.

O resultado da segmentação é a imagem da figura 5.15. Esta segmentação é obtida utilizando os parâmetros da tabela 5.1. A imagem original é a da figura 5.9a.



Figura 5.15 – Falta de Fusão Segmentada.

O resultado da segmentação é a imagem da figura 5.16. Esta segmentação é obtida utilizando os parâmetros da tabela 5.1. A imagem original é a da figura 5.10a.

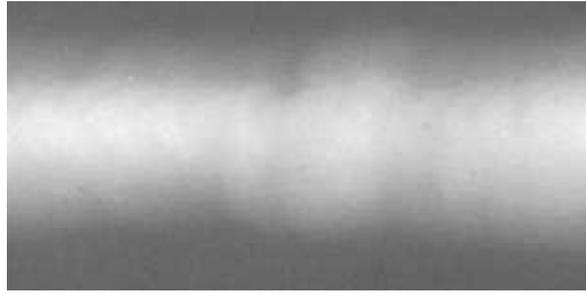


Figura 5.16 – Trinca Transversal Segmentada.

A utilização da técnica de *Kapur* para a etapa de limiarização apresentou resultados satisfatórios como pode ser observado ao se fazer uma análise visual nas imagens segmentadas das figuras 5.11 a 5.16, conseguindo segmentar os possíveis defeitos encontrados nas imagens radiográficas utilizadas neste trabalho. Sendo que em imagens como a da figura 5.15 nenhum dos outros três limiarizadores apresentou resultado tão bom, pois nesta imagem o emprego da técnica de *Kapur* conseguiu segmentar todos os defeitos presentes, sem a inserção de falsos alarmes (regiões que não são defeitos). Das técnicas utilizadas é a técnica mais eficiente para segmentar os defeitos que foram realçados pelo método proposto neste trabalho e, portanto é a indicada para ser utilizada. Para todas as imagens testadas, quando utilizada a técnica de *Kapur*, não foi necessário alteração dos parâmetros da tabela 5.1, isto indica uma segmentação menos dependente dos parâmetros e mais robusta. Por esse motivo nos resultados apresentados na seção 5.4 é utilizada a técnica de *Kapur* para a etapa de limiarização.

A aplicação da técnica de *Kapur* na etapa de limiarização também apresentou bons resultados para imagens radiográficas que não apresentam defeitos como é o caso da imagem da figura 5.17a. O resultado da aplicação do método proposto com a utilização da limiarização por meio da técnica de *Kapur* para a imagem da figura 5.17a é mostrado na figura 5.17b. Os parâmetros utilizados são os mesmo da tabela 5.1.

a)



b)



Figura 5.17 – Imagem radiográfica sem defeito a) Original, e b) Segmentada.

Nestes casos o método de segmentação encontra regiões como possíveis defeitos que na verdade não são defeitos. Nestas situações as informações, como nível de cinza da região segmentada, são importantes para que a etapa de reconhecimento possa determinar se a região encontrada é ou não é defeito.

5.2.3) Aplicação do método proposto: limiarizando com a técnica de Sezgin & Sankur (2003).

O resultado da segmentação é a imagem da figura 5.18. Esta segmentação é obtida utilizando os parâmetros da tabela 5.1. A imagem original é a da figura 5.3a.

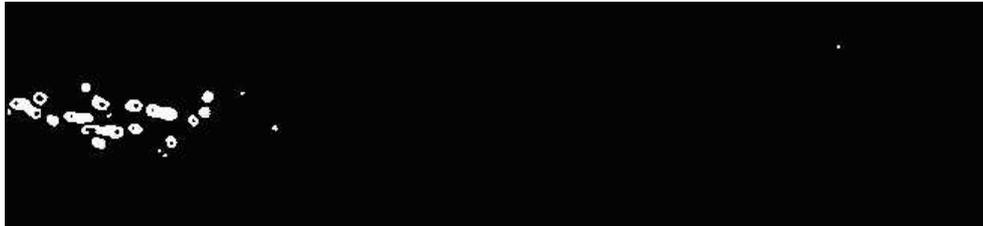


Figura 5.18 – Porosidades Segmentadas.

O resultado da segmentação é a imagem da figura 5.19. Esta segmentação é obtida utilizando os parâmetros da tabela 5.1. A imagem original é a da figura 5.6a.



Figura 5.19 – Falta de Penetração Segmentada.

O resultado da segmentação é a imagem da figura 5.20. Esta segmentação é obtida utilizando os parâmetros da tabela 5.1. A imagem original é a da figura 5.7a.



Figura 5.20 – Inclusão de Escória Segmentada.

O resultado da segmentação é a imagem da figura 5.21. Esta segmentação é obtida utilizando os parâmetros da tabela 5.1. A imagem original é a da figura 5.8a.



Figura 5.21 – Porosidade Alinhada Segmentada.

O resultado da segmentação é a imagem da figura 5.22. Esta segmentação é obtida utilizando os parâmetros da tabela 5.1. A imagem original é a da figura 5.9a.



Figura 5.22 – Falta de Fusão Segmentada.

O resultado da segmentação é a imagem da figura 5.23. Esta segmentação é obtida utilizando os parâmetros da tabela 5.1. A imagem original é a da figura 5.10a.



Figura 5.23 – Trinca Transversal Segmentada.

A utilização da técnica de *Sezgin & Sankur* para a etapa de limiarização resultou em uma segmentação onde ocorreram perdas de regiões dentro dos defeitos como pode-se observar nas figuras 5.18, 5.19, 5.20 e 5.21, ou mesmo perdas de defeitos inteiros como pode-se observar nas figura 5.22. O emprego desta técnica não apresentou bons resultados para a segmentação dos defeitos das imagens radiográficas utilizadas neste trabalho.

5.2.4) Aplicação do método proposto: limiarizando com a técnica de *Kittler*.

O resultado da segmentação é a imagem da figura 5.24. Esta segmentação é obtida utilizando os parâmetros da tabela 5.1. A imagem original é a da figura 5.3a.



Figura 5.24 – Porosidades Segmentadas.

O resultado da segmentação é a imagem da figura 5.25. Esta segmentação é obtida utilizando os parâmetros da tabela 5.1. A imagem original é a da figura 5.6a.



Figura 5.25 – Falta de Penetração Segmentada.

O resultado da segmentação é a imagem da figura 5.26. Esta segmentação é obtida utilizando os parâmetros da tabela 5.1. A imagem original é a da figura 5.10a.

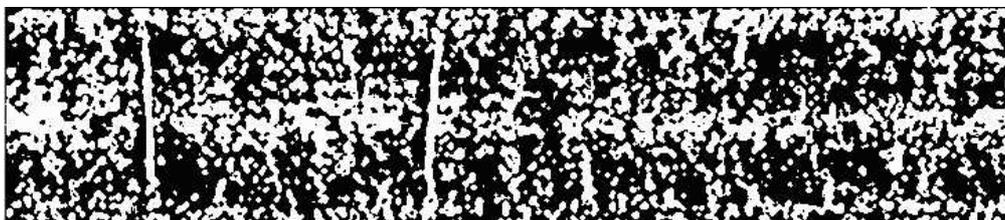


Figura 5.26 – Trinca Transversal Segmentada.

A utilização da técnica de *Kittler* não apresentou bons resultados para a aplicação desejada neste trabalho, pois com o emprego desta técnica o método proposto apresentou como defeito muitas regiões que não são defeitos. E nas regiões da imagem

onde existem defeitos ocorreu agrupamento das partes como observa-se nas figuras 5.24 e 5.26. Este fator pode apresentar problemas em etapas de reconhecimento futuras e, portanto, é o limiarizador menos indicado para atuar em conjunto com o método de realce dos defeitos, proposto neste trabalho.

5.3) Segmentação dos Cordões de Solda

Nesta etapa são mostrados os resultados das aplicações do método de segmentação de cordões de solda descrito no capítulo 4. Nas imagens resultantes é executada a segmentação dos cordões mostrada como duas linhas que marcam as fronteiras do cordão.

5.3.1) Testes com os valores de K .

Para esta etapa é utilizada como imagem base a imagem de solda da figura 5.27, e como limiarizador é utilizada a técnica de *Otsu*, devido ao fato da imagem da junta soldada possuir diferenças destacadas de tons de cinza entre o cordão de solda (claro) e o MB (escuro). Para a variável K são atribuídos quatro valores diferentes como mostram as figuras 5.28 à 5.32.



Figura 5.27 – Imagem Radiográfica de Junta Soldada.

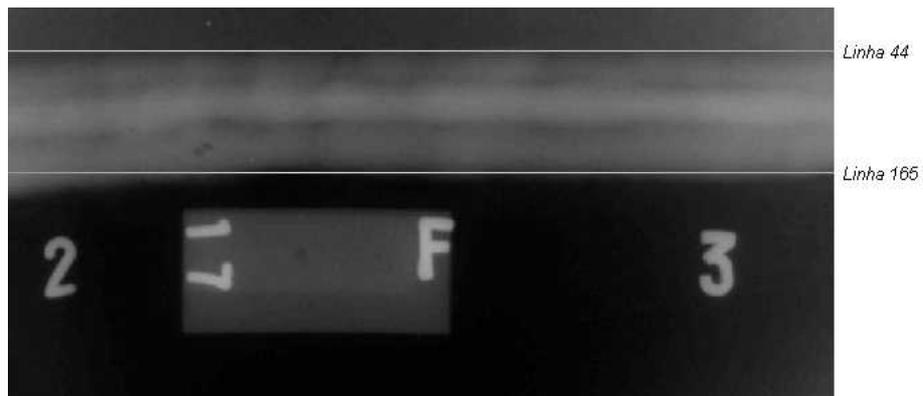


Figura 5.28 – Cordão de Solda Segmentado ($K = 5$).



Figura 5.29 – Cordão de Solda Segmentado ($K = 15$).

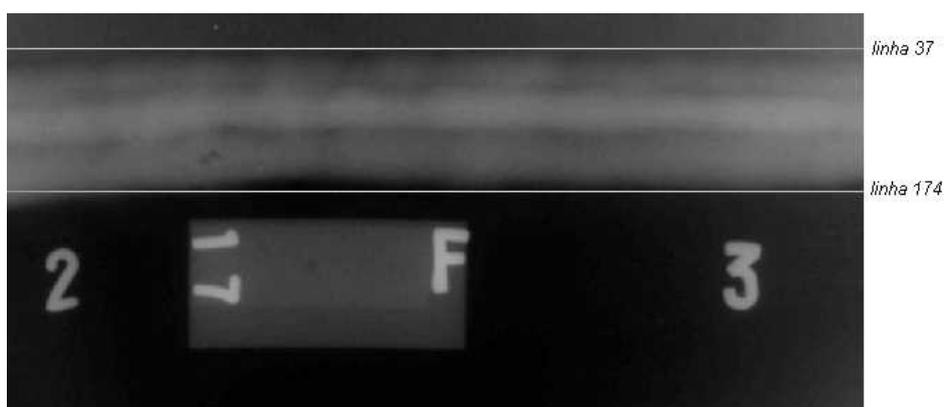


Figura 5.30 – Cordão de Solda Segmentado ($K = 20$).

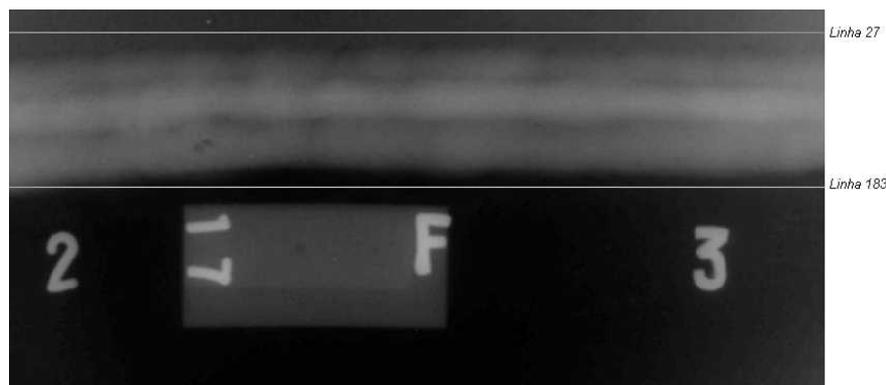


Figura 5.31 – Cordão de Solda Segmentado ($K = 30$).



Figura 5.32 – Cordão de Solda Segmentado ($K = 45$).

Observou-se que o aumento do valor de K significa a obtenção de maior espaçamento entre as linhas que marcam a fronteira do cordão, acarretando em uma região segmentada de maior tamanho. Para as imagens de juntas soldadas apresentadas neste trabalho, o valor de K igual a 20 apresentou um resultado melhor, segmentando o cordão de solda de forma a aproximar as linhas que marcam as fronteiras das bordas do cordão. Estes resultados podem ser comprovados observando as segmentações obtidas nas imagens da seção seguinte (5.3.2), que possuem outros tipos de objetos na imagem que foram inseridos manualmente com o objetivo de dificultar a aplicação do método proposto para segmentar os cordões de solda.

Vale ressaltar que o valor de K igual a 20 apresentou bons resultados para o grupo de imagens testadas, porém trata-se de um parâmetro que pode ser alterado dependendo da densidade, da resolução da imagem, do tamanho do cordão de solda ou de outros fatores que possam existir.

5.3.2) Testes com imagens.

Para esta etapa, a variável K é utilizada com valor 20 e como limiarizador é utilizada a técnica de *Otsu*. Os resultados são mostrados nas figuras 5.33 a 5.36.

A figuras 5.33 a 5.36 mostram a robustez visual do método de segmentação de cordões de solda lineares. A inserção de outros objetos que possuem *pixels* com diferentes tons de cinza e que possuem diferentes tamanhos não confundiu o método. A análise da projeção da imagem limiarizada que considera a região com o maior número de *pixels* claros mostrou-se bastante eficiente mesmo quando a imagem radiográfica possui outros objetos claros (figura 5.35). Desta forma o método de segmentação de cordões de solda lineares é robusto e eficiente para encontrar as bordas da solda na imagem radiográfica.

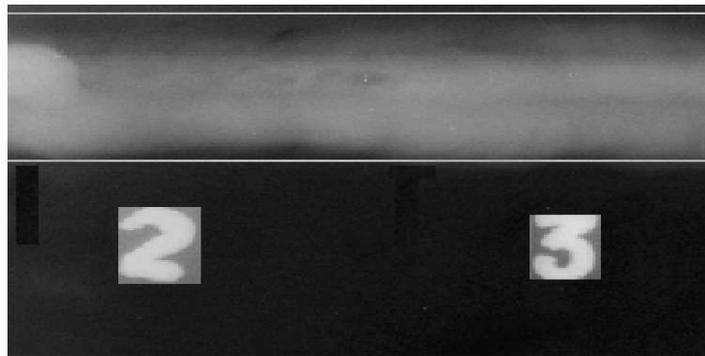


Figura 5.33 – Cordão de Solda Segmentado (imagem teste 1).

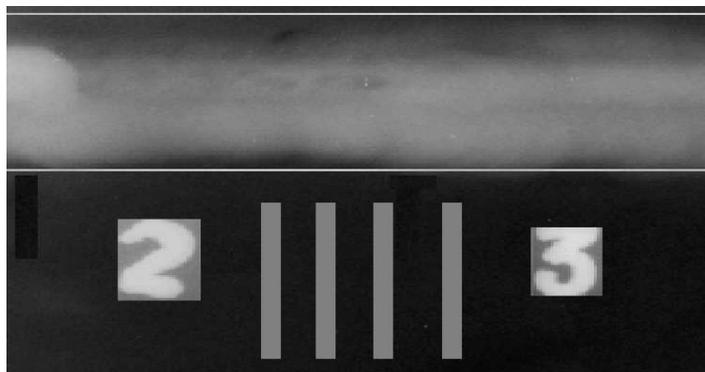


Figura 5.34 – Cordão de Solda Segmentado (imagem teste 2).

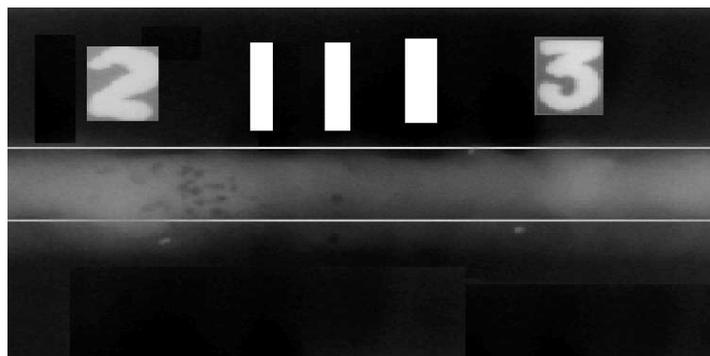


Figura 5.35 – Cordão de Solda Segmentado (imagem teste 3).



Figura 5.36 – Cordão de Solda Segmentado (imagem teste 4).

5.4) Validação dos Resultados

Nesta etapa são mostrados os resultados obtidos com a aplicação em conjunto dos métodos propostos de: segmentação dos cordões de solda e segmentação de defeitos. Esta aplicação foi realizada em um grupo de 13 imagens radiográficas de juntas soldadas que contém defeitos (figuras 5.37 a 5.49), sendo que estas figuras são oriundas de duas fontes diferentes e, portanto foram divididas em duas subseções: 5.4.1 e 5.4.2. Para a segmentação dos cordões a limiarização utilizada é a técnica de *Otsu* e o valor do parâmetro K é 20 para o grupo de imagens da subseção 5.4.1, e 45 para o grupo de imagens da subseção 5.4.2. Para a segmentação dos defeitos a limiarização utilizada é a técnica de *Kapur* e os coeficientes utilizados são os da tabela 5.1 para o grupo de imagens da subseção 5.4.1, e os da tabela 5.6 para o grupo de imagens da subseção

5.4.2. Ao final desta seção é apresentada a porcentagem de acertos ocorridos na segmentação dos defeitos e na segmentação dos cordões de solda para este grupo de 13 imagens.

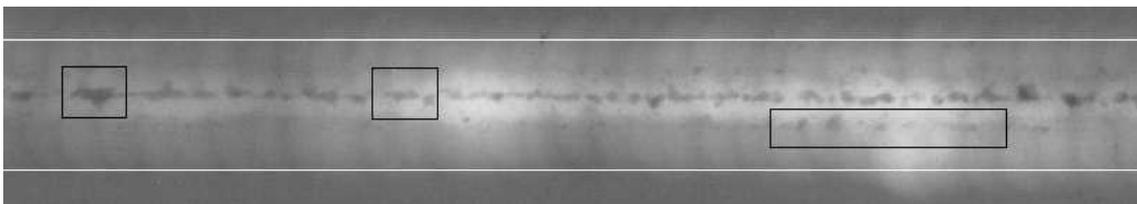
Tabela 5.6 – Parâmetros (teste 6).

<i>Coef1</i>	0,05
<i>Coef2</i>	0,95
<i>Coef3</i>	0,03
<i>Coef4</i>	0,97
<i>mediana_anterior</i>	3 x 3
<i>mediana_posterior</i>	3 x 3

5.4.1) Primeiro grupo de imagens

A figura 5.37a apresenta uma imagem radiográfica de uma junta soldada contendo porosidades alinhadas, alguns destes defeitos estão em destaque. A figura 5.37b mostra os defeitos segmentados.

a)



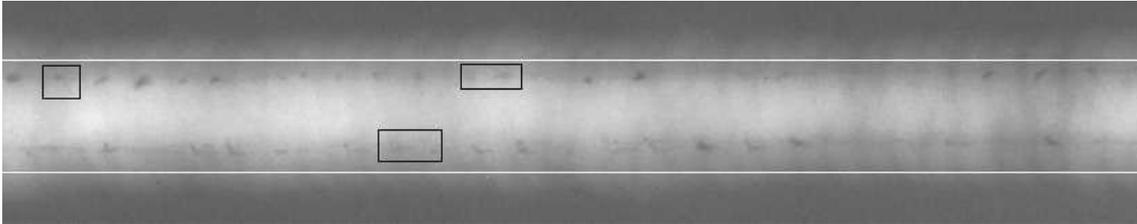
b)



Figura 5.37 – a) Segmentação do Cordão, b) Segmentação dos Defeitos (Porosidade).

A figura 5.38a apresenta uma imagem radiográfica de uma junta soldada contendo falta de fusão, alguns destes defeitos que não foram segmentados estão em destaque. A figura 5.38b mostra os defeitos segmentados.

a)



b)

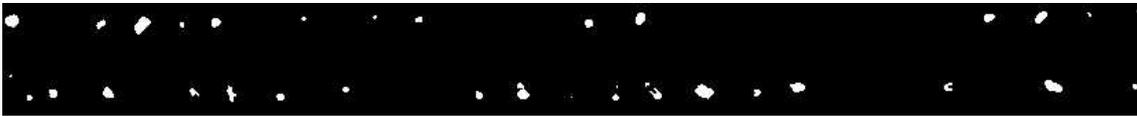
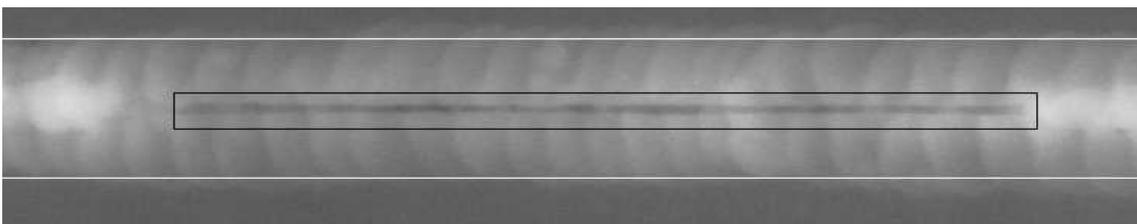


Figura 5.38 – a) Segmentação do Cordão, b) Segmentação dos Defeitos (Falta de Fusão).

A figura 5.39a apresenta uma imagem radiográfica de uma junta soldada contendo falta de penetração, este defeito está em destaque. A figura 5.39b mostra o defeito segmentado.

a)



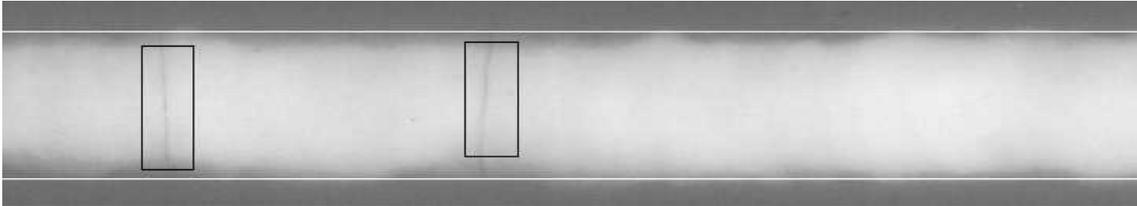
b)



Figura 5.39 – a) Segmentação do Cordão, b) Segmentação dos Defeitos (Falta de Penetração).

A figura 5.40a apresenta uma imagem radiográfica de uma junta soldada contendo trincas transversais (destaque). A figura 5.40b mostra os defeitos segmentados e incidência de falsos alarmes, defeitos segmentados que não são defeitos.

a)



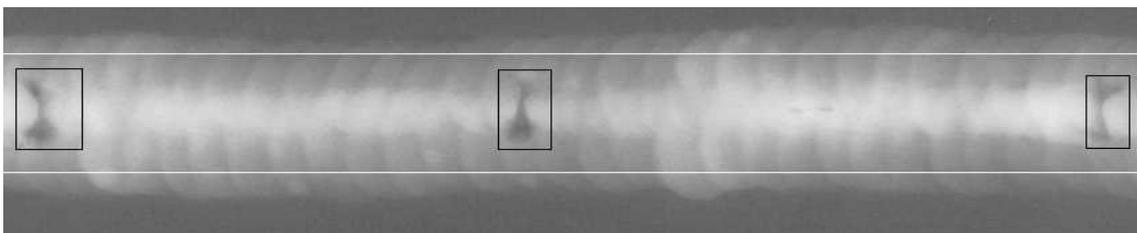
b)



Figura 5.40 – a) Segmentação do Cordão, b) Segmentação dos Defeitos (Trinca Transversal).

A figura 5.41a apresenta uma imagem radiográfica de uma junta soldada contendo inclusões de escória em destaque. A figura 5.41b mostra os defeitos segmentados e incidência de falsos alarmes.

a)



b)

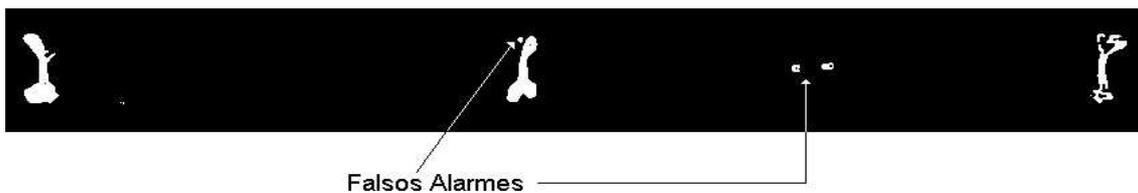
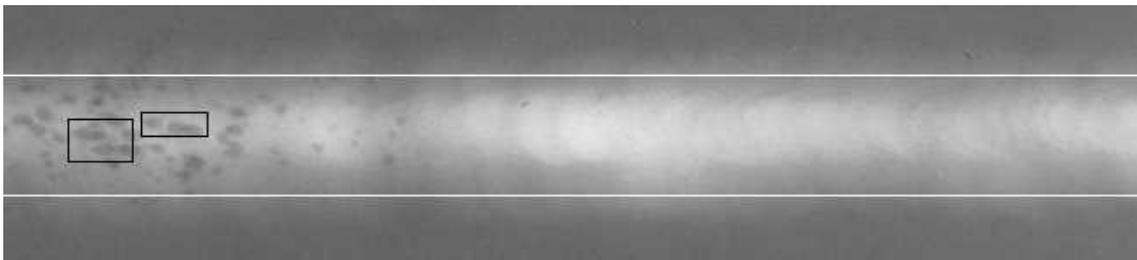


Figura 5.41 – a) Segmentação do Cordão, b) Segmentação dos Defeitos (Inclusão de Escória).

A figura 5.42a apresenta uma imagem radiográfica de uma junta soldada contendo porosidades agrupadas. Em destaque encontram-se algumas porosidades que foram agrupadas depois de executada a segmentação como mostra a figura 5.42b, para os critérios deste trabalho isto é considerada uma segmentação inadequada, porém observa-se que algumas porosidades foram segmentadas sem ocorrer o agrupamento de regiões.

a)



b)



Figura 5.42 – a) Segmentação do Cordão, b) Segmentação dos Defeitos (Porosidade Agrupada).

A figura 5.43a apresenta uma imagem radiográfica de uma junta soldada contendo mordedura externa em destaque. A figura 5.43a mostra que a segmentação do cordão de solda excluiu a região que corresponde ao defeito, portanto este defeito não foi segmentado e a imagem segmentada da figura 5.43b apresenta apenas e incidência de um falso alarme.

a)



b)



Falso Alarme

Figura 5.43 – a) Segmentação do Cordão, b) Segmentação dos Defeitos (Mordedura Externa).

5.4.2) Segundo grupo de imagens

A figura 5.44a apresenta uma imagem radiográfica de uma junta soldada contendo concavidade interna em destaque. A figura 5.44b mostra os defeitos segmentados e incidência de falsos alarmes.

a)



b)

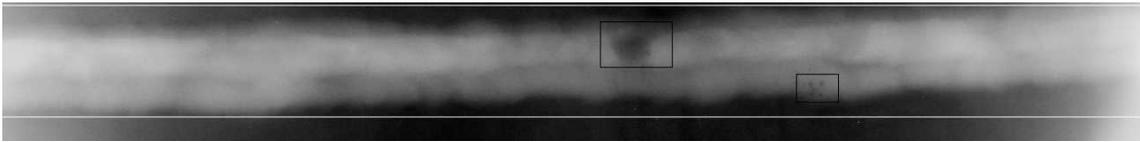


Falso Alarme

Figura 5.44 – a) Segmentação do Cordão, b) Segmentação dos Defeitos (Concavidade Interna).

A figura 5.45a apresenta uma imagem radiográfica de uma junta soldada contendo escórias (destaque). A figura 5.45b mostra os defeitos segmentados.

a)



b)



Figura 5.45 – a) Segmentação do Cordão, b) Segmentação dos Defeitos (Escória).

A figura 5.46a apresenta uma imagem radiográfica de uma junta soldada contendo falta de fusão (destaque). A figura 5.46b mostra os defeitos segmentados e incidência de falsos alarmes.

a)



b)



Falso Alarme

Figura 5.46 – a) Segmentação do Cordão, b) Segmentação dos Defeitos (Falta de Fusão).

A figura 5.47a apresenta uma imagem radiográfica de uma junta soldada contendo concavidade interna e mordedura externa (destaque). A figura 5.47b mostra os defeitos segmentados e incidência de falsos alarmes.

a)



b)

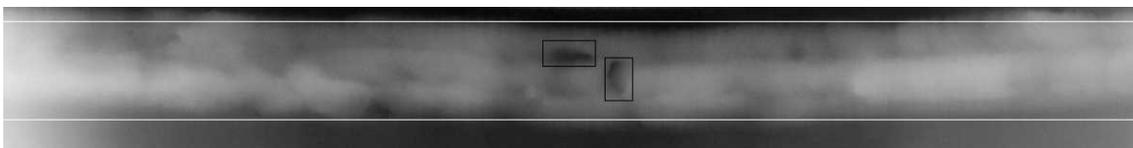


Falso Alarme

Figura 5.47 – a) Segmentação do Cordão, b) Segmentação dos Defeitos (Mordedura Externa e Concavidade Interna).

A figura 5.48a apresenta uma imagem radiográfica de uma junta soldada contendo concavidade interna e mordedura interna (destaque). A figura 5.48b mostra os defeitos segmentados.

a)



b)



Figura 5.48 – a) Segmentação do Cordão, b) Segmentação dos Defeitos (Mordedura Interna e Concavidade Interna).

A figura 5.49a apresenta uma imagem radiográfica de uma junta soldada contendo porosidade. A figura 5.49b mostra os defeitos segmentados.

a)



b)

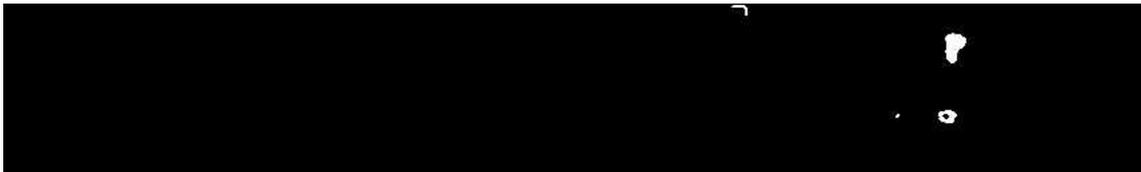


Figura 5.49 – a) Segmentação do Cordão, b) Segmentação dos Defeitos (Porosidade).

Com o objetivo de quantificar os acertos e erros dos métodos de segmentação de defeitos e de cordões são apresentados dois resultados estatísticos para o grupo destas 13 imagens, figuras 5.37 a 5.49. Para critério de comparação a verificação da existência ou não do defeito na imagem original é feita subjetivamente de forma visual.

A tabela 5.7 apresenta a relação entre o número de juntas soldadas onde a segmentação dos defeitos ocorreu de forma satisfatória e aquelas em que os possíveis defeitos não foram segmentados, ou seja, considera-se como sucesso de segmentação aqueles resultados em que os possíveis defeitos podem ser reconhecidos mesmo que, além dos defeitos ocorram incidências de falsos alarmes, agrupamento de alguns defeitos ou perda de alguns defeitos. Por exemplo, na segmentação dos defeitos mostrada na figura 5.42b ocorreu um agrupamento de algumas porosidades, porém as porosidades que não estão agrupadas são suficientes para levantar as características e executar o reconhecimento. Da mesma forma ocorre na figura 5.38b, onde os possíveis defeitos segmentados, caracterizados como falta de fusão, constituem informações suficientes para executar um reconhecimento mesmo havendo a perda de alguns destes defeitos. Estas duas situações estão relacionadas entre os acertos nos resultados apresentados na tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Porcentagem de Sucesso na Segmentação dos Defeitos das Imagens.

Total de Imagens	Sucesso	Fracasso	Porcentagem de Sucesso (sucesso / n° de imagens)
13	12	1	92,31 %

O sucesso na segmentação dos defeitos na imagem apresentou um percentual de 92,31% de acertos para o grupo de 13 imagens testadas. A única ocorrência negativa aconteceu na segmentação do defeito da imagem da figura 5.43a, este erro ocorreu devido ao método de segmentação do cordão de solda excluir a região onde se encontra o defeito da execução do método de segmentação dos defeitos, e essa exclusão desconsiderou o defeito resultando em um fracasso de segmentação, pois não segmentou um defeito existente na solda.

A tabela 5.8 apresenta a relação existente entre o número total (em todas as imagens) de possíveis defeitos segmentados e três situações: segmentação positiva ou SP (possíveis defeitos que são defeitos); falso alarme ou FA (possíveis defeitos que não são defeitos); segmentação negativa ou SN (situações onde ocorre agrupamento ou perda de parte do defeito). Os resultados apresentados na tabela 5.8 verificam o acerto em segmentar os defeitos, nestes resultados não estão inclusos defeitos perdidos, como o que ocorre na figura 5.43b, e sim apenas os possíveis defeitos segmentados.

Tabela 5.8 - Porcentagem de Acerto na Segmentação dos Possíveis Defeitos.

TOTAL (Para as 13 imagens)	SP	FA	SN
202	111 ocorrências	74 ocorrências	17 ocorrências
Possíveis Defeitos Segmentados	(54,95 %)	(36,63 %)	(8,41 %)

Como mostra a tabela 5.8 o total de possíveis defeitos segmentados é de 202, sendo que este valor é extraído a partir do número de regiões brancas das imagens segmentadas (método proposto para a segmentação de defeitos) que foram rotuladas pelo algoritmo descrito na seção 3.27 (etiquetagem ou *labeling*). A partir de uma análise visual subjetiva observou que o percentual de possíveis defeitos segmentados que de fato são defeitos é de 54,95%, os resultados mostram também uma incidência de 36,63% de falsos alarmes, porém a maioria destes falsos alarmes aparece como pontos

brancos espúrios na imagem segmentada, alguns são tão pequenos que se torna difícil sua visualização a olho nu, e podem ser considerados como ruído resultante do processo de segmentação. Alguns poucos falsos alarmes, como os que ocorrem nas figuras 5.46b e 5.47b podem exigir um tratamento mais elaborado de uma futura etapa de reconhecimento. Os resultados também mostram um baixo percentual de ocorrências de segmentação negativa (8,41%) se comparado ao de falsos alarmes, isto se deve ao fato de existir uma concentração maior de problemas de agrupamento de possíveis defeitos apenas nas imagens segmentadas das figuras 5.37b e 5.42b, contudo o número de defeitos segmentados e não agrupados destas imagens é suficiente para levantar as características como está descrito anteriormente.

5.5) Extração das Características dos Defeitos

Nesta etapa são mostrados os resultados dos levantamentos das características de alguns defeitos das imagens radiográficas de juntas soldadas. Desta forma, são utilizados em conjunto os métodos automáticos de: segmentação dos cordões de solda, segmentação de defeitos e extração das características. Na segmentação dos cordões a limiarização é feita pela técnica de *Otsu* e o valor de K é 20. Na segmentação dos defeitos a limiarização e as janelas da mediana utilizadas são indicadas nas figuras, os coeficientes utilizados são os da tabela 5.1. As características extraídas são calculadas considerando as dimensões do cordão de solda segmentado e a unidade das características é dada em *pixels*.

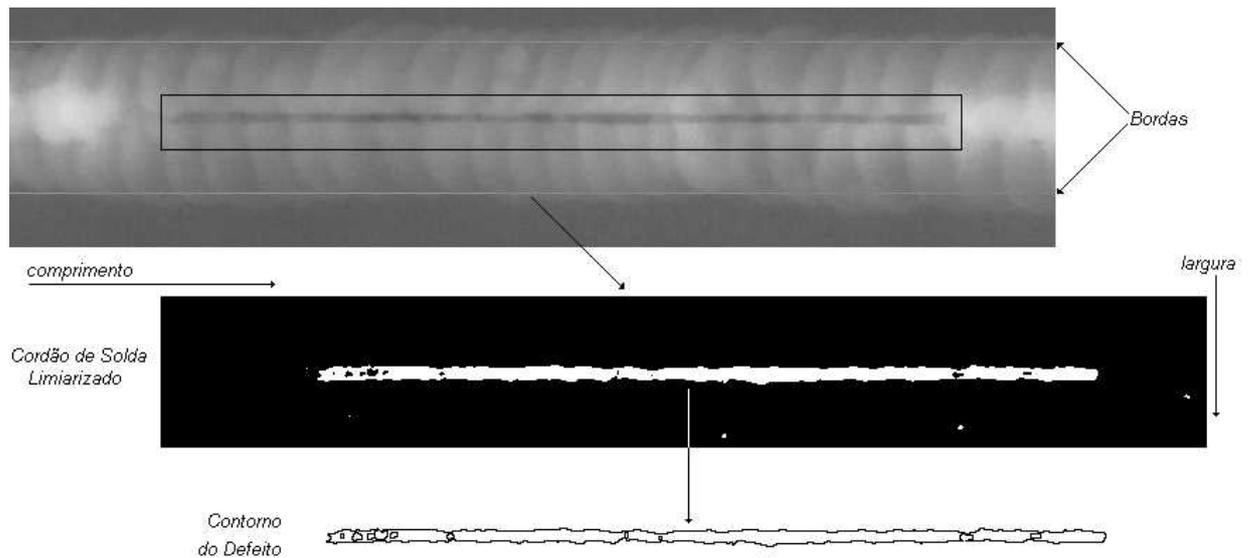


Figura 5.50 – Extração das características, Falta de Penetração (Manual da AGFA) .

$mediana_anterior = 3 \times 3$

$mediana_posterior = 3 \times 3$

Limiarizador: técnica de Kapur

Tabela 5.9 – Característica do defeito (exemplo 1).

Linha Inicial	50
Linha Final	63
Coluna Inicial	112
Coluna Final	663
Área do defeito	4800
Perímetro do defeito	1442
Centróide em x	55,81
Centróide em y	388,58
Largura do Cordão de Solda	108
Comprimento do Cordão de Solda	740

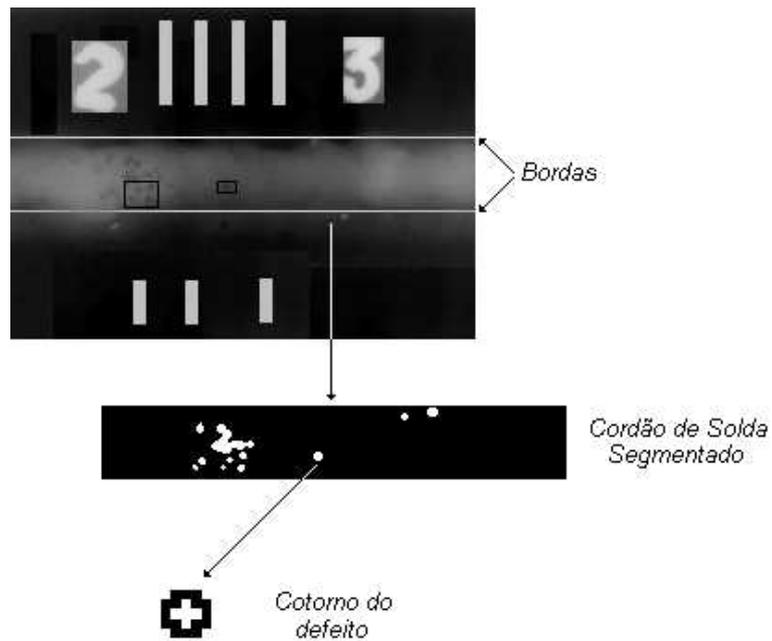


Figura 5.51 – Extração das características, Porosidade.

$mediana_anterior = 3 \times 3$

$mediana_posterior = 3 \times 3$

Limiarizador: técnica de Kapur

Tabela 5.10 – Característica do defeito (exemplo 2).

Linha Inicial	26
Linha Final	30
Coluna Inicial	115
Coluna Final	119
Área do defeito	21
Perímetro do defeito	16
Centróide em x	28
Centróide em y	117
Largura do Cordão de Solda	40
Comprimento do Cordão de Solda	250

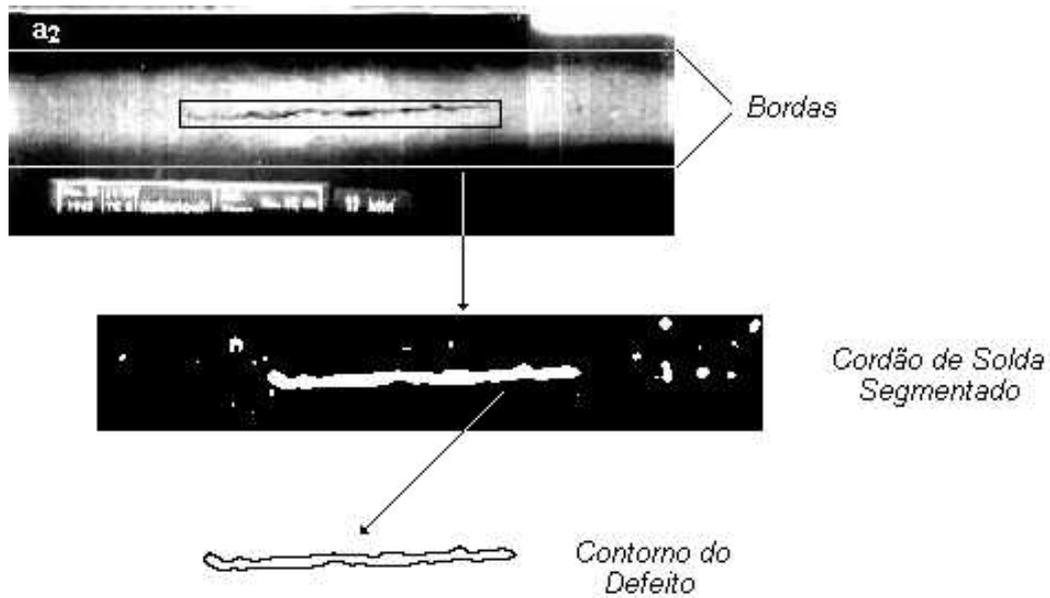


Figura 5.52 – Extração das características, Trinca Longitudinal (Yacine & Redouane, 2000).

$$mediana_anterior = 3 \times 3$$

$$mediana_posterior = 3 \times 3$$

Limiarizador: técnica de Kapur

Tabela 5.11 – Característica do defeito (exemplo 3).

Linha Inicial	23
Linha Final	34
Coluna Inicial	78
Coluna Final	219
Área do defeito	791
Perímetro do defeito	337
Centróide em x	29,18
Centróide em y	147,32
Largura do Cordão de Solda	53
Comprimento do Cordão de Solda	301

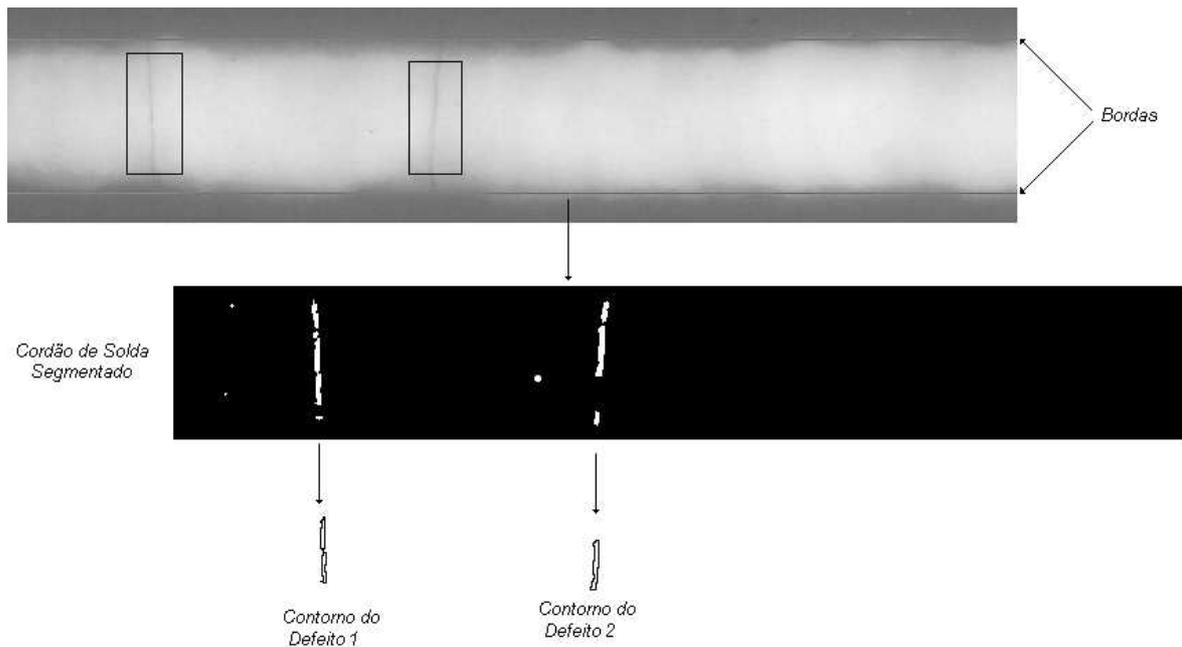


Figura 5.53 – Extração das características, Trinca Transversal (Manual da AGFA).

$mediana_anterior = 3 \times 3$

$mediana_posterior = 3 \times 3$

Limiarizador: técnica de Kapur

Tabela 5.12 – Característica: defeito 1
(exemplo 4).

Linha Inicial	39
Linha Final	87
Coluna Inicial	103
Coluna Final	107
Área do defeito	174
Perímetro do defeito	111
Centróide em x	63,25
Centróide em y	105,04
Largura do Cordão de Solda	112
Comprimento do Cordão de Solda	730

Tabela 5.13 – Característica: defeito 2
(exemplo 5).

Linha Inicial	30
Linha Final	66
Coluna Inicial	306
Coluna Final	312
Área do defeito	159
Perímetro do defeito	88
Centróide em x	48,18
Centróide em y	309,74
Largura do Cordão de Solda	112
Comprimento do Cordão de Solda	730

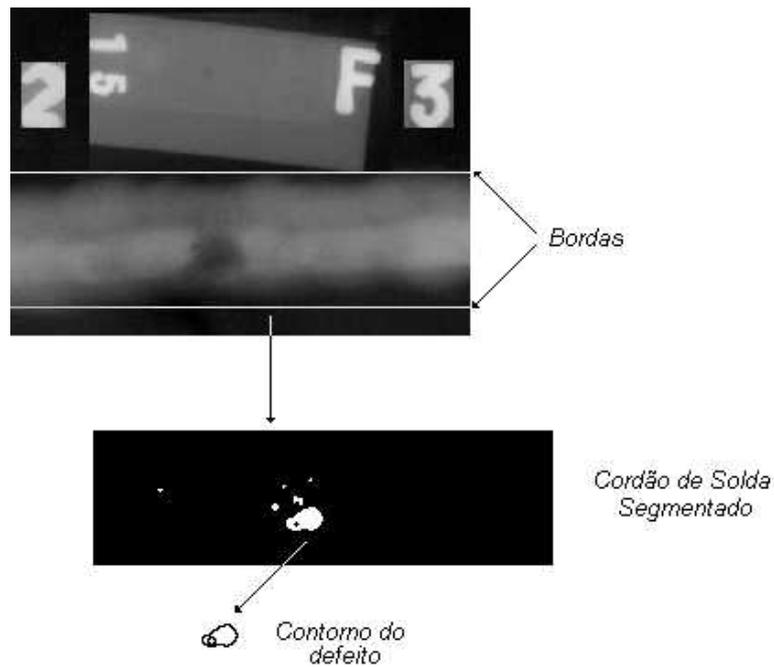


Figura 5.54 – Extração das características, Inclusão.

$$mediana_anterior = 3 \times 3$$

$$mediana_posterior = 3 \times 3$$

Limiarizador: técnica de Kapur

Tabela 5.14 – Característica do defeito (exemplo 6).

Linha Inicial	43
Linha Final	55
Coluna Inicial	106
Coluna Final	125
Área do defeito	179
Perímetro do defeito	80
Centróide em x	49,63
Centróide em y	116,22
Largura do Cordão de Solda	74
Comprimento do Cordão de Solda	250

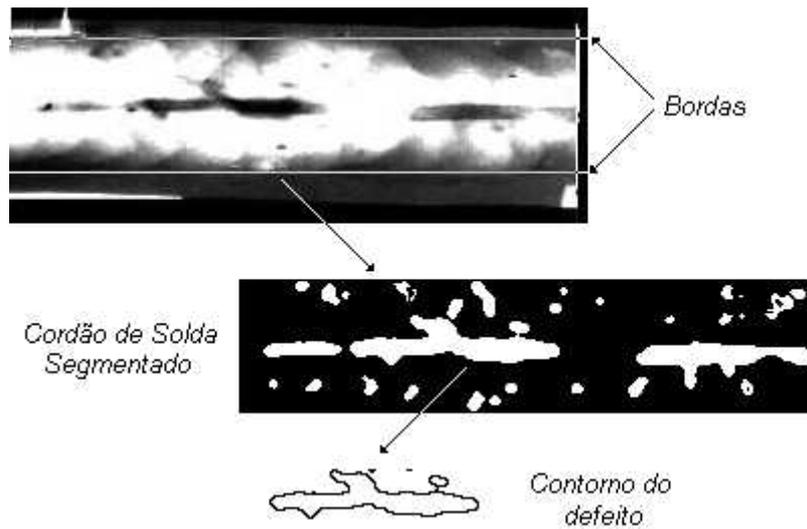


Figura 5.55 – Extração das características, Falta de Penetração (Yacine & Redouane, 2000).

$mediana_anterior = 3 \times 3$

$mediana_posterior = 3 \times 3$

Limiarizador: técnica de Kapur

Tabela 5.15 – Característica do defeito (exemplo 7).

Linha Inicial	19
Linha Final	43
Coluna Inicial	56
Coluna Final	159
Área do defeito	1215
Perímetro do defeito	327
Centróide em x	33,24
Centróide em y	108,64
Largura do Cordão de Solda	67
Comprimento do Cordão de Solda	287

As figuras 5.50 a 5.55 permitem a conclusão dos seguintes aspectos:

- Com a utilização do método de segmentação de cordões de solda é possível eliminar regiões da imagem radiográfica que não sejam o cordão e dessa forma restringir a busca por defeitos apenas na região de interesse. Também é possível localizar a borda do cordão e com isso analisar se um determinado defeito segmentado ocorreu na ZF ou próximo a ZL de uma solda. A importância da segmentação do cordão pode ser verificada observando a figura 5.37, onde seria praticamente impossível segmentar e extrair as características dos defeitos caso não fosse executada a separação entre o cordão de solda e os demais componentes da imagem;
- Com a utilização da segmentação de defeitos em cordões de solda é possível localizar onde estão os defeitos para o levantamento das características destes defeitos. Em imagens que possui muitas porosidades, a segmentação pode agrupar alguns defeitos, porém os defeitos que não são agrupados são suficientes para levantar as características e executar o reconhecimento. A eficácia da segmentação dos defeitos pode ser observada nas figuras 5.38 e 5.40, onde os defeitos são quase imperceptíveis a olho nu;
- As características extraídas permitem quantificar um defeito, mostrando suas dimensões e localização dentro do cordão de solda. Estes fatores são importantes para executar o reconhecimento em uma etapa posterior, e permitem também gerar outros descritores baseados em composições ou relações entre duas ou mais características. Nesta etapa de extração, a marcação de um único *Label* para cada defeito, e a detecção dos contornos (capítulo 3) permitiram a extração automática das características de todos os defeitos da imagem sem a necessidade de uma seleção manual.

É importante ressaltar que as figuras 5.37 a 5.42 são os resultados de uma implementação que automatiza todos os passos, ou seja, uma vez que os parâmetros da tabela 5.1 são escolhidos não existe mais a necessidade da mudança dos parâmetros até que seja concluída a extração das características de todos os defeitos segmentados.

6) DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Este trabalho fornece subsídio para o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que analise e classifique de forma automática os defeitos de uma solda em uma imagem radiográfica. A proposta do trabalho compreende: segmentar a região de interesse (cordão de solda), segmentar os defeitos no cordão e extrair as características que permitam a classificação, sendo que todas estas técnicas são implementadas de forma a analisar automaticamente uma imagem radiográfica de uma junta soldada.

Para a realização deste trabalho fez-se uma revisão bibliográfica que permitiu a constatação de como são formados os defeitos em uma solda. Da mesma forma a revisão permitiu constatar, de acordo com a norma técnica, que as discontinuidades estruturais são defeitos críticos para uma solda e, portanto devem ser detectados em uma operação de inspeção. Dentre os defeitos inaceitáveis estão falta de penetração, falta de fusão, inclusões e trincas.

A penetração dos raios X ocorre de forma que a existência destes defeitos gera uma alteração na densidade da imagem radiográfica, acarretando em regiões de defeitos com níveis de cinza diferentes (menores) na região do cordão de solda. Desta forma a imagem apresenta quedas abruptas de níveis de cinza nas regiões onde ocorrem os defeitos.

Observou-se também que para as imagens radiográficas das juntas soldadas apresentadas neste trabalho, a região do cordão apresenta uma maior concentração de tons claros em relação a qualquer outra região da imagem, e que a análise sobre a projeção vertical desse cordão permite diferenciá-lo do restante.

Logo, as metodologias apresentadas neste trabalho utilizam estas informações para executar as segmentações dos defeitos e do cordão de solda.

Para a segmentação dos defeitos deseja-se a obtenção de um filtro que realce as quedas abruptas de perfil. Neste sentido o método que filtra o perfil original (vertical e horizontal) é uma proposta para realçar as regiões onde se encontram defeitos. Neste método a utilização dos coeficientes (*coef1*, *coef2*, *coef3* e *coef4*) é necessária, pois a aplicação da ferramenta de inspeção torna-se maleável para imagens que apresentem densidades diferentes das imagens testadas.

Os testes realizados e apresentados no capítulo 5 mostraram o efeito destes

coeficientes. Quando aos coeficientes $coef1$ e $coef3$ são atribuídos valores baixos (próximos de 0) ocorre um acompanhamento menor das quedas abruptas do perfil, e pode gerar o agrupamento dos defeitos na imagem *final*. Por outro lado, quando aos mesmos coeficientes são atribuídos valores altos (próximos de 1) ocorre um acompanhamento quase total do perfil, o que praticamente elimina as regiões dos defeitos na imagem *final*. Os valores de coeficientes da tabela 5.1 são os melhores valores encontrados para as imagens testadas neste trabalho, sendo que os resultados obtidos foram satisfatórios, pois é possível observar a segmentação de defeitos pouco visíveis a olho nu.

O método de segmentação dos defeitos sofre a influência do limiarizador escolhido. Testes com limiarizadores diferentes mostram diferenças de eficácia nas segmentações. Percebeu-se que os limiarizadores que apresentam os melhores resultados são as técnicas de *Otsu* e *Kapur*. Entretanto, a aplicação da técnica de *Kapur* é a indicada para as imagens testadas, não exigindo a alteração de nenhum parâmetro da tabela 5.1 na aplicação do método em imagens com diferentes defeitos.

O método de segmentação do cordão de solda depende do parâmetro K , e testes apresentados no capítulo 5 permitem constatar que o aumento do valor deste parâmetro aumenta a largura da região do cordão de solda segmentado. A utilização do parâmetro K torna o uso do método maleável para imagens que apresentam cordões de solda de diferentes tamanhos. A aplicação do método de segmentação de cordões de solda mostrou-se visualmente robusta, conseguindo segmentar o cordão mesmo quando a imagem possui outros objetos de tamanhos e tons variados.

Neste trabalho também é apresentada uma metodologia que objetiva analisar as paredes de uma tubulação. A segmentação das paredes da tubulação é feita a partir das características que este tipo de imagem apresenta. Também é proposto o levantamento de parâmetros que podem permitir o diagnóstico de corrosão nessa parede. Os testes com esta metodologia mostraram bons resultados, porém o conjunto de imagens analisadas é muito pequeno.

O resultado final deste trabalho é o desenvolvimento de metodologias que sirvam como rotinas para uma ferramenta computacional que tem a finalidade de inspecionar uma junta soldada de forma automática. Esta ferramenta compreende as etapas de segmentação e extração de características feitas neste trabalho, e também metodologias de reconhecimentos de defeitos e interpretação dos resultados. Tal ferramenta não necessita da intervenção do operador do *software*, exceto na calibração

inicial dos parâmetros. Também permite a execução do *software* de forma autônoma, como, por exemplo, abrir um diretório de imagens, analisá-las e apresentar os resultados em relatórios.

6.1) Trabalhos Futuros

A continuidade deste trabalho se dará pelas seguintes medidas:

- Desenvolvimento de uma metodologia de reconhecimento dos defeitos e detecção a partir das características extraídas;
- Desenvolvimento de uma metodologia de interpretação dos defeitos reconhecidos, baseado em normas;
- Junção destas duas etapas e das etapas apresentadas neste trabalho com o objetivo de desenvolver uma ferramenta computacional para a inspeção de juntas soldadas (Implementação em linguagem C).

Trabalhos futuros também podem ser a execução das seguintes tarefas:

- A obtenção de um grupo maior de imagens para testes da metodologia proposta, principalmente imagens radiográficas de tubulações.
- O desenvolvimento de uma metodologia para reconhecer corrosão em imagens de tubulações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABENDE (2004). Apostila Sobre Ensaios Não-Destrutivos, disponível em: www.abende.org.br, campo *Conheça os Ensaios Não Destrutivos*, acessado em: 26/05/04.
- AGFA (Manual). Radiographer's weld interpretation reference, *Published by Agfa-Gevaert N. V.*, B-2640 Mortsel-Bélgica.
- Andreucci, R. (2002). A Radiologia Industrial, Ed. 5^a. www.infosolda.com.br/raio_x, acessado em: 26/11/04.
- Andreucci, R. (2003). Proteção Radiológica - Aspectos Industriais. www.infosolda.com.br/proteção_radiologica, acessado em: 26/11/04.
- ASM Handbook (1997). Materials Selection and Design - Volume 20. *Prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee.*
- Bray, D. E., Stanley, R. K. (1997). Nondestructive Evaluation – A Tool in Design, Manufacturing and Service. CRC Prees, Inc, Boca Ranton, Florida, USA.
- Camerini, D. A., von der Weid, J. P., Camerini, C. S., Maia, C. E. (2003). PIG Detector de Vazamentos em Oleodutos, *Rio Pipeline Conference & Exposition*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Carvalho, A. A., Suita, R. C. S. B., Silva, R. R., Rebello, J. M. A. (2003). Evaluation of the Relevant Features of Welding Defects in Radiographic Inspection. *Materials Research*, vol. 6, no 3, p. 427-432.
- Centeno, T. M. (1994) . Limiarização de Impressões Digitais a Partir da Morfologia Matemática, *Dissertação de Mestrado*, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, CPGEI, CEFET-PR, Curitiba.

- Chan, C., Pang, G. K. H. (2000). Fabric Defect Detection by Fourier Analysis, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol 36, no 5, p. 1267-1276.
- Felisberto, M. K., Centeno, T. M., Arruda, L. V. R. (2003). Revisão de Técnicas para Análise Automática de Imagens Radiográficas Aplicadas à Inspeção Não-Destrutiva em Instalações de Petróleo e Gás, ***PRH10 –Planejamento e Otimização de Processos de Petróleo e Gás Natural***, Relatório técnico, CEFET-PR, Curitiba.
- Felisberto, M. K., Centeno, T. M., Arruda, L. V. R., Lopes H. S. (2004a). Automatic Analysis of Radiographic Images for Non Destructive Test Applications, ***Anais do 10th Society for Experimental Mechanics International Congress***, Costa Mesa, CA, USA.
- Felisberto, M. K., Schneider G. A., Pilkel, L. V., Centeno, T. M., Arruda, L. V. R. (2004b). Automatic Pipe Identification and Corrosion Detection, ***VI Induscon***, API_57, Joinville, Brasil.
- Gonzales, R. C., Woods, R. E. (1992). *Processamento Digital de Sinais*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Publicação em língua portuguesa Editora Edgar Blücher Ltda, São Paulo , Brasil.
- Haykin, S., Van Veen, B. (1999). *Sinais e Sistemas*. John Wiley & Soncs, Inc. Publicação em língua portuguesa Bookman Companhia Editora, Porto Alegre, Brasil.
- Jain R., Kasturi, R., Schunck, B. G. (1995). *Machine Vision*. McGraw-Hill, Inc, USA.
- KODAK (2004). *Radiography in Modern Industry*. Eastman KODAK Company, Rochester, New York.
<http://www.kodak.com/US/en/business/aim/industrial/ndt/literature/radiography/>,
acessado em:27/11/04.

- Lashkia, V. (2001). Defect Detection in X-ray Images Using Fuzzy Reasoning, *Image and Vision Computing*, no 19, issue 5, pp 261-269.
- Lawson, S. W., Parker, G. A. (1994). Intelligent Segmentation of Industrial Radiographic Images Using Neural Networks, *Machine Vision Applications, Architectures and Systems Integration III*, Proc of SPIE, vol. 2347, pp. 245–255.
- Liao, T. W., Ni, J. (1996). An Automated Radiographic NDT System for Weld Inspection: Part1 – Weld Extraction, *NDT&E International*, vol 29, no 3, p. 157-162.
- Marques, P. V. (1991). Tecnologia da Soldagem. ESAB S/A Indústria e Comércio, Belo Horizonte, Brasil.
- Onel, Y., Ewert, U., Willems, P. (2000). Radiographic Wall Thickness Measurement of Pipes by a New Tomographic Algorithm, *15th World Conference on Non-Destructive Testing*, Rome, Italy.
- Padua, G. X., Silva, R. R., Siqueira, M. H. S., Rebello, J. M. A., Caloba, L. P. (2004). Classification of Welding Defects in Radiographs Using Transversal Profiles to the Weld Seam, *16th World Conference on Non-Destructive Testing*, Montreal, Canada.
- Parker, J. R. (1997). Algorithms for image Processing and Computer Vision. John Wiley & Sons, Inc, USA.
- Redouane, D., Yacine, K., Amal, A., Farid, A., Amar, B. (2000). Evaluation of Corroded Pipelines Wall Thickness Using Image Processing in Industrial Radiography, *15th World Conference on Non-Destructive Testing*, Rome, Italy.
- Scaff, L. A. M. (1997). Física da Radioterapia. Sarvier Editora de Livros Médicos Ltda, São Paulo, Brasil.

- Schneider, G. A., Felisberto, M. K., Arruda, L. V. R., Centeno, T. M. (2004a). Segmentação de Cordões de Solda por meio do Perfil em Imagens Radiográficas, *XV Congresso Brasileiro de Automação, CBA*, Gramado, Brasil.
- Schneider, G. A., Felisberto, M. K., Pilkel, L. V., Centeno, T. M., Arruda L. V. R. (2004b). Análise Automática de Imagens Radiográficas Aplicadas à Inspeção de Juntas Soldadas em Tubulações de Óleo e Gás, *Rio Oil & Gas Expo and Conference*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Sezgin, M., Sankur, B. (2001). Selection of Thresholding Methods for Non-Destructive Testing Application, *ICIP-International Conference on Image Processing*, Thessaloniki, Greece.
- Sezgin, M., Sankur, B. (2003). Image Multi-Thresholding Based on Sample Moment Function, *ICIP-International Conference on Image Processing*, Barcelona, Spain.
- Shafeek, H. I., Gadelmawla, E. S., Abdel-Shafy, A. A., Elewa, I. M.(2004a). Assessment of Welding Defects for Gas Pipeline Radiographs Using Computer Vision, *NDT&E International*, vol 37, issue 4, p. 291-299.
- Shafeek, H. I., Gadelmawla, E. S., Abdel-Shafy, A. A., Elewa, I. M.(2004b). Automatic Inspection of Gas Pipeline Welding Defects Using an Expert Vision System, *NDT&E International*, vol 37, issue 4, p. 301-307.
- Silva, R. R. (1999). Processamento de Imagens Radiográficas e Análise de Defeitos em Cordões de Solda, *Dissertação de Mestrado*, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Silva, R. R, Siqueira, M. H. S., Caloba, L. P., Rebello, J. M. A. (2001). Radiographic Pattern Recognition of Welding Defects Using Linear Classifiers. *INSIGHT*, vol. 43 n. 10, p. 669 – 674.

- Silva, R. R., Caloba, L. P., Siqueira, M. H. S., Rebello, J. M. A. (2004). Pattern recognition of weld defects detected by radiographic test, *NDT&E International*, vol 37, issue 6, p. 461-470.
- Soares, S. D. (2003). Monitoração de Teste Hidrostático de Tubos com Descontinuidades Artificiais Empregando as Técnicas de Emissão Acústica e Ultrassom, *Rio Pipeline Conference & Exposition*, Rio de Janeiro, Brasil.
- Telles, P. C. S. (1994). Tubulações Industriais – Materiais, Projetos e Montagem. Ed 8ª, LTC – Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, Brasil.
- Tipler, P. A. (1995). Física – para cientistas e engenheiros – Volume 4 – ótica e física moderna. LTC – Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, Brasil.
- Wainer, E., Brandi, S. E., De Mello, F. D. H. (1992). Soldagem – Processos e Metalurgia. Edgard Blücher Ltda, São Paulo, Brasil.
- Wang, G., Liao, T. W. (2002). Automatic Identification of Different Types of Welding Defects in Radiographic Images, *NDT&E International*, vol 35, issue 8, p. 519–528.
- Yacine, K., Redouane, D. (2000). A New Co-operative Segmentation Method Applied to X-ray Images, *15th World Conference on Non-Destructive Testing*, Rome, Italy.
- Zscherpel, U., Onel, Y., Ewert, U. (2000). New concepts for corrosion Inspection of Pipelines by Digital Industrial Radiology (DIR), *15th World Conference on Non-Destructive Testing*, Rome, Italy.

RESUMO:

A inspeção visual de imagens radiográficas de soldas e tubulações é uma tarefa difícil para o ser humano, devido a sua característica repetitiva. Desta forma, a partir da digitalização dessas imagens radiográficas, é possível o desenvolvimento de ferramentas de inspeção automática, reduzindo os erros cometidos por inspeção visual. Este trabalho apresenta uma metodologia que tem o objetivo de automaticamente segmentar os defeitos em soldas e tubulações e extrair características que permitam o reconhecimento destes defeitos. Os resultados obtidos com o uso da metodologia desenvolvida neste trabalho mostram que é possível segmentar os defeitos em imagens radiográficas de soldas e levantar as características desses defeitos de forma automática, mesmo que tais defeitos sejam de difícil visualização. O trabalho também propõe o uso de parâmetros para calibrar o método proposto, sendo que tais parâmetros conferem uma maior maleabilidade ao método. Desta forma o método proposto para segmentar os defeitos foi testado com dois grupos de imagens, cada grupo proveniente de origem diferente, e obteve resultados satisfatórios conseguindo segmentar os defeitos em quase todas as imagens. Para extrair as características utilizou-se a rotulação das regiões segmentadas fechadas, este algoritmo coloca um *label* em cada possível defeito e assim permite levantar os seus parâmetros de forma automática. Por sua vez o método de segmentação de cordões de solda também se mostrou visualmente robusto conseguindo segmentar os cordões mesmo em imagens onde haviam outros objetos inseridos.

PALAVRAS-CHAVE

segmentação em soldas, imagens radiográficas de soldas, extração das características dos defeitos.

ÁREA/SUB-ÁREA DE CONHECIMENTO

3.04.05.02 – 5 Automação Eletrônica de Processos Elétricos e Industriais

1.03.03.05 – 7 Processamento Gráfico (Graphics)

2005

Nº: 357