



**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CAMPUS CURITIBA**

**GERÊNCIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA E INFORMÁTICA INDUSTRIAL - CPGEI**

**MARCELO KLEBER FELISBERTO**

**TÉCNICAS AUTOMÁTICAS PARA DETECÇÃO DE  
CORDÕES DE SOLDA E DEFEITOS DE SOLDAGEM EM  
IMAGENS RADIOGRÁFICAS INDUSTRIAIS**

**TESE DE DOUTORADO**

**CURITIBA  
OUTUBRO – 2007.**



**TESE**  
apresentada à UTFPR  
para obtenção do título de  
**DOUTOR EM CIÊNCIAS**

por

**MARCELO KLEBER FELISBERTO**

---

**TÉCNICAS AUTOMÁTICAS PARA DETECÇÃO DE  
CORDÕES DE SOLDA E DEFEITOS DE SOLDAGEM EM  
IMAGENS RADIOGRÁFICAS INDUSTRIAIS**

---

Banca Examinadora:

Presidência e Orientação:

**Profa. Dra. Tania Mezzadri Centeno** UTFPR

Co-Orientação:

**Profa. Dra. Lucia Valéria Ramos de Arruda** UTFPR

Banca Examinadora:

**Prof. Dr. Sidnei Paciornik** PUC-RIO

**Prof. Dr. Romeu Ricardo da Silva** PUC-SANTIAGO

**Prof. Dr. Humberto Remigio Gamba** UTFPR

**Profa. Dra. Myriam Regattieri De Biase da Silva Delgado** UTFPR

Curitiba, 22 de outubro de 2007.



**MARCELO KLEBER FELISBERTO**

**TÉCNICAS AUTOMÁTICAS PARA DETECÇÃO DE  
CORDÕES DE SOLDA E DEFEITOS DE SOLDAGEM EM  
IMAGENS RADIOGRÁFICAS INDUSTRIAIS**

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

Orientação: Profa. Dra. Tania Mezzadri Centeno

Co-orientação: Lúcia Valéria Ramos de Arruda

Curitiba  
2007

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da UTFPR – Campus Curitiba

F313t Felisberto, Marcelo Kleber

Técnicas automáticas para detecção de cordões de solda e defeitos de soldagem em imagens radiográficas industriais / Marcelo Kleber Felisberto. Curitiba. UTFPR, 2007  
XXII, 168 f. : il. ; 30 cm

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Tania Mezzadri Centeno

Tese (Doutorado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Curitiba, 2007  
Bibliografia: 157 – 167

1. Soldagem elétrica. 2. Radiografia digital. 3. Imagens digitais. I. Centeno, Tania Mezzadri, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD: 671.521

*Dedico aos meus pais José e Aparecida Felisberto.*





## AGRADECIMENTOS

À minha orientadora e amiga Tania Mezzadri Centeno por ter me aceitado como seu orientado, pelo grande apoio técnico que me estendeu durante todo o período de doutoramento e principalmente pela sua amizade e compreensão.

À minha co-orientadora Lúcia Valéria Ramos de Arruda e ao professor Flavio Neves Jr por expressarem sua confiança em mim e no meu trabalho, me apoiando desde o início de incontáveis maneiras.

Ao colega de trabalho e amigo professor Guilherme Schneider que, sempre disposto a discutir métodos e resultados, escrever mais um artigo, ou mesmo tomar um “choop”, me ajudou a progredir do começo ao fim.

Ao bolsista Lucas Pilkel pelas horas de dedicação que passou implementando rotinas computacionais, me ajudando muito a realizar os testes durante boa parte do período de doutoramento.

Ao professor Heitor Silvério Lopes por me ensinar AGs, bem como dar a sua contribuição na redação dos artigos que pudemos publicar juntos.

Ao professor Romeu Ricardo da Silva que, apesar da distância, com sua amizade e apoio técnico, sem dúvida está entre aqueles que mais colaboraram com o meu trabalho. Também agradeço por ter aceitado participar da minha banca de qualificação e da banca examinadora desta tese.

Aos professores Sidnei Paciornik e Humberto Remigio Gamba, bem como à professora Myriam Regattieri De Biase da Silva Delgado por não só aceitarem participar da banca examinadora, mas também pela colaboração técnica que me prestaram com seus comentários e sugestões.

Ao engenheiro Germano Xavier Pádua, da PETROBRÁS, que demonstrou prontidão em aceitar o convite de participar da banca examinadora, mesmo que, infelizmente, isto não tenha sido possível.

Ao engenheiro José Maurício Barbosa Rabello (PETROBRÁS/SEQUI) e à engenheira Carla Alves Marinho Ferreira (PETROBRÁS/CENPES) pelo apoio técnico e simpatia.

Ao professor Aldo Santos Pereira, por me permitir consultar o acervo bibliográfico do departamento de soldagem da UTFPR.

Ao MIT (*Michigan Institute of Technology*) por disponibilizar a biblioteca de classes GALib para utilização em trabalhos acadêmicos como este.

Ao Laboratório de Imagens e Multimídia do CPGEI/UTFPR por disponibilizar a biblioteca de classes DILabim 6.0, para processamento de imagens em trabalhos acadêmicos.

Ao IIW (*International Institute of Welding*) e ao BAM (*Bundesanstalt für Material Forschung und Prüfung*) por permitirem a utilização acadêmica de padrões radiográficos de defeitos de soldagem, bem como conceder permissão ao uso de tais padrões na produção de publicações científicas.

À empresa ARCTest, na pessoa do Engenheiro Hilton Milani que, também disposto a colaborar, me disponibilizou imagens de radiografia computadorizada e me concedeu permissão para usá-las em trabalhos acadêmicos.

À Agência Nacional do Petróleo (ANP) e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), através do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás - PRH-ANP/MCT (PRH10-UTFPR-PR) - pelo suporte financeiro, que incluiu uma bolsa de doutorado, laboratório e diversos outros custos ligados à pesquisa que foi desenvolvida durante todo o período de doutoramento.

Ao Conselho Nacional de desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq/CT-PETRO) por também fornecer suporte financeiro ao desenvolvimento desta pesquisa.

Aos pesquisadores Gilberto Pepe e Maria José Passos, aos demais professores e amigos do laboratório LASCA e PRH10, pelo apoio técnico e, principalmente, pela amizade durante todos estes anos.

Aos meus pais, José e Aparecida, à minha irmã, Vanessa, e aos meus amigos, alguns dos quais já mencionei aqui, pelo carinho e compreensão e por me apoiarem em todos os momentos.

A Deus por me dar forças e nunca me deixar esquecer das coisas que são as mais importantes na vida.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xi
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xv
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	xvii
<b>RESUMO</b> .....	ixx
<b>ABSTRACT</b> .....	xxi
<b>1) INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2) INSPEÇÃO RADIOGRÁFICA DE JUNTAS SOLDADAS DE TUBULAÇÕES</b> .....	7
2.1) Introdução .....	7
2.2) Juntas Soldadas .....	7
2.2.1) Princípios da Soldagem por Fusão com Arco Elétrico .....	8
2.2.2) Regiões de uma Junta Soldada .....	9
2.2.3) Principais Descontinuidades em Juntas Soldadas de Tubulações .....	9
2.3) Ensaio Radiográfico de Soldas .....	13
2.3.1) Princípios do Ensaio Radiográfico .....	13
2.3.2) Identificação de Descontinuidades em Radiografias de Soldas .....	14
2.3.3) Técnicas de Exposição Radiográfica para Inspeção de Soldas em Tubulações .....	16
2.3.4) Critérios para Avaliação de Radiografias de Juntas Soldadas .....	20
2.4) Considerações Finais .....	22
<b>3) ANÁLISE E PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS E ALGORITMOS GENÉTICOS</b> .....	23
3.1) Introdução .....	23
3.2) Imagem Digital .....	23
3.3) Conceitos Fundamentais do Processamento Digital de Imagens .....	24
3.4) Técnicas de PDI para Algumas Aplicações Específicas .....	30
3.4.1) Atenuação do Ruído pelo Filtro da Mediana.....	30
3.4.2) Aprimoramento do Contraste .....	30
3.4.3) Detecção de bordas .....	32
3.4.4) Limiarização .....	33
3.4.5) Casamento de Protótipos ( <i>Template Matching</i> ) .....	34
3.5) Algumas Considerações sobre Segmentação e Análise de Imagens .....	36
3.6) Algoritmos Genéticos (AG's) .....	37
3.6.1) Codificação de Soluções.....	39
3.6.2) Inicialização .....	39
3.6.3) Função de Avaliação e Adequabilidade (Função de <i>Fitness</i> ) .....	40
3.6.4) Método de Seleção .....	40
3.6.5) Recombinação ( <i>Crossover</i> ) .....	41
3.6.6) Mutação .....	42
3.6.7) Critério de Parada .....	43
3.7) Utilização de Algoritmos Genéticos em Segmentação de Imagens .....	43
<b>4) AQUISIÇÃO, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE RADIOGRAFIAS DIGITAIS DE SOLDAS.</b> .....	45
4.1) Introdução .....	45
4.2) Aquisição da Radiografia Digital .....	46
4.2.1) Digitalização de Filmes Radiográficos .....	46
4.2.2) Radiografia Computadorizada .....	48
4.3) Pré-Processamento .....	49
4.3.1) Atenuação do Ruído em Radiografias Digitais .....	49
4.3.2) Aprimoramento do Contraste em Radiografias Digitais .....	50
4.4) Segmentação do Cordão de Solda .....	50
4.4.1) Detecção do Cordão de Solda pelo Método de Lawson e Parker (1994) .....	51
4.4.2) Detecção do Cordão de Solda pelo Método de Schneider et al. (2004a) .....	52
4.4.3) Detecção do Cordão de Solda Através da Análise de Perfis Lineares .....	53
4.5) Segmentação de Defeitos .....	59
4.5.1) Detecção de Defeitos com Base na Intensidade dos Pixels, Usando RNA .....	60
4.5.2) Detecção de defeitos com Base em Momentos Geometricamente Invariantes .....	61
4.5.3) Detecção de defeitos com Base em Critérios Estocásticos .....	61
4.5.4) Detecção de defeitos com Base na Variância e Contraste, Usando Lógica <i>Fuzzy</i> .....	62
4.5.5) Detecção de defeitos com Base em Detecção de Bordas e Análise de Textura .....	63
4.5.6) Detecção de defeitos com Base na Análise do Perfil Transversal do Cordão de Solda .....	65

4.5.7) Detecção de defeitos com Base na Subtração da Imagem com um Fundo Estimado .....	68
4.5.8) Detecção de defeitos com Base em de Técnicas Semi-Automáticas .....	74
4.6) Extração de Características e Classificação de Defeitos .....	74
4.7) Considerações Finais .....	75
<b>5) METODOLOGIA</b> .....	<b>77</b>
5.1) Introdução .....	77
5.2) Especificação das Imagens .....	77
5.2.1) Coleções de Filmes Radiográficos Digitalizados .....	77
5.2.2) Imagens de Radiografia Computadorizada .....	81
5.3) Uma Proposta para Detecção Automática de Cordões de Solda .....	83
5.3.1) Geração de uma Imagem Modelo de Cordão de Solda .....	83
5.3.2) Codificação de Imagens para Representação de Padrões .....	84
5.3.3) Considerações Adicionais Sobre a Imagem Modelo e o Código Gerado .....	89
5.3.4) Transformações Aplicadas à Grade de Referência .....	92
5.3.5) Aproximação do Cordão de Solda Através de uma Janela de Imagem .....	98
5.3.6) Pontos Inválidos de uma Janela de Imagem .....	102
5.3.7) Codificação e Avaliação de Soluções .....	103
5.3.8) Otimização de Soluções .....	106
5.3.9) Implementação de um Algoritmo Genético .....	106
5.3.10) Verificação de Soluções .....	109
5.3.11) Extração do Cordão de Solda .....	109
5.3.12) Modelagem de um Sistema para Detecção e Reconhecimento de Cordões de Soldas .....	110
5.4) Considerações Finais .....	112
<b>6) TESTES E RESULTADOS</b> .....	<b>113</b>
6.1) Introdução .....	113
6.2) Testes para Ajuste de Parâmetros do Algoritmo Genético .....	113
6.2.1) Descrição do Teste para Ajuste dos Parâmetros do AG .....	113
6.2.2) Apresentação dos Resultados do Teste para Ajuste dos Parâmetros do AG .....	116
6.2.3) Discussão dos Resultados do Teste para Ajuste dos Parâmetros do AG .....	118
6.2.4) Aprimoramento dos Resultados do Teste para Ajuste dos Parâmetros do AG .....	119
6.2.5) Outras Alternativas para Melhorar a Precisão dos Resultados .....	121
6.3) Testes para Detecção de Cordões de Solda .....	122
6.3.1) Critérios para Avaliar a Detecção de Cordões de Solda .....	122
6.3.2) Testes para Detecção de Cordões de Solda de Comprimento Limite ( $C_{lim}$ ) .....	124
6.3.3) Testes para Detecção de Cordões de Solda de Comprimento Variado .....	126
6.3.4) Apresentação de Resultados dos Testes para Detecção de Cordões de Solda .....	126
6.3.5) Discussões dos Resultados dos Testes para Detecção de Cordões de Solda .....	127
6.3.6) Aprimoramento de Resultados na Detecção de Cordões de Solda .....	133
6.3.7) Detecção de Cordões de Solda em Radiografias PD-VD .....	135
6.3.8) Detecção de Cordões de Solda de Formato Elíptico .....	136
6.4) Testes para Reconhecimento de Cordões de Solda .....	138
6.4.1) Critérios para Avaliar a Classificação de Cordões de Solda .....	139
6.4.2) Teste para Avaliar o Desempenho do Classificador .....	141
6.4.3) Junções com Cordões de Solda Perpendiculares entre Si .....	142
6.5) Testes para Segmentação de Defeitos .....	143
6.6) Considerações Complementares e Artigos Publicados .....	147
<b>7) CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>151</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>157</b>

## LISTA DE FIGURAS

2.1	(a) Tubos a serem soldados; (b) Secção transversal de junta com chanfro em V; (c) Tubos unidos através da execução do procedimento de soldagem.....	7
2.2	(a) Jato de plasma (Marques, 1991); (b) Secção transversal de solda com vários passes.....	8
2.3	(a) Secção transversal de uma junta soldada com a identificação das regiões da solda. (b) Distribuição das temperaturas de pico e identificação das regiões afetadas pelo ciclo térmico da solda (Marques, 1991).....	9
2.4	Tipos de trincas (AWS, 2001).....	10
2.5	FF (a) na parede do chanfro, (b) na raiz e (c) entre passes.....	10
2.6	(a) Esquema de secção transversal de junta soldada com FP; (b) Fotografia da secção transversal de uma junta soldada com FP (AWS, 2001).....	11
2.7	(a) Esquema de secção transversal de junta soldada com ME e (b) com MI; (c) Fotografia da secção transversal de uma junta soldada com MI (AWS, 2001).....	11
2.8	Esquema representativo da vista superior do cordão de solda apresentando (a) escória alinhada, (b) isolada e (c) agrupada.....	12
2.9	Esquema da secção transversal (em cima) de uma junta soldada e da vista superior (em baixo) de um cordão de solda com (a) PO distribuída, (b) PO alinhada, (c) PO vermicular e (d) PO agrupada..	12
2.10	Esquema conceitual do ensaio radiográfico (AWS, 2001).....	13
2.11	Trechos de radiografias do BAM mostrando (a) TR longitudinal e (b) TR transversal.....	14
2.12	Trecho de radiografia do BAM ( <i>Bundesanstalt für Material forschung und prüfung, Berlin</i> ) mostrando FF na parede do chanfro.....	15
2.13	Trecho de radiografia do BAM mostrando FP.....	15
2.14	(a) Trecho de radiografia de solda do IIW ( <i>International Institute of Welding</i> ) com ME; (b) Trecho de radiografia de solda com MI (NDT-RESOURCE CENTER, 2007).....	15
2.15	Trecho de radiografia do BAM com (a) IE; (b) Trecho de radiografia IIW.....	16
2.16	Trechos de radiografias do IIW de soldas mostrando (a) poros tubulares espalhados e (b) poros arredondados agrupados.....	16
2.17	Configurações do ensaio radiográfico de juntas soldadas com exposição do tipo PS-VS para (a) radiografia panorâmica e técnicas com a fonte posicionada (b) dentro e (c) fora da tubulação (ASME, 2004).....	17
2.18	Configurações do ensaio radiográfico de juntas soldadas com exposição do tipo PD-VS para técnicas com a fonte em posição (a) alinhada ou (b) inclinada em relação ao plano longitudinal da solda (ASME, 2004).....	18
2.19	Configurações do ensaio radiográfico de juntas soldadas com exposição do tipo PD-VD para técnicas com a fonte em posição (a) alinhada ou (b) inclinada em relação ao plano longitudinal da solda (ASME, 2004).....	18
2.20	(a) Radiografia panorâmica de junta soldada cedida pelo BAM. (b) Radiografia PD-VS. (c) (d) Radiografias PD-VD cedida pelo BAM.....	19
2.21	Especificação de comprimento para indicações alongadas segundo a norma ASME (2001b).....	21
2.22	Especificação de comprimento para indicações arredondadas em soldas de espessura entre 3 a 6 mm , inclusive. Segundo a norma ASME (2001b).....	21
3.1	Representação de uma imagem no plano cartesiano $xy$ .....	23
3.2	Imagem, perfil horizontal e perfil vertical no ponto $(i,j)$ .....	25
3.3	Identificação dos tipos de vizinhança adjacentes ao $pixel p = (i,j)$ .....	26
3.4	3 exemplos de janelas quadráticas e em formato de cruz.....	26
3.5	(a) imagem digital; (b) região fechada da imagem com tons de cinza abaixo de um limiar específico $t$ ; (c) contorno da região fechada.....	27
3.6	Imagens binárias (a) A e (b) B; (c) Resultado da operação NOT aplicada à imagem A. Resultado das operações (d) OR e (e) AND aplicadas às imagens A e B.....	28
3.7	Operação da máscara $M_{média3x3}$ aplicada ao $pixel p$ .....	28
3.8	Filtro da mediana com janela $3 \times 3$ .....	30
3.9	Máscaras usadas no filtro <i>Sobel</i> . (Gonzalez e Woods, 2007).....	33
3.10	(a) Máscara ( <i>template</i> ) ampliada; (b) Imagem em análise; (c) Pontos detectados; (d) Objetos localizados na imagem. (Jain <i>et al.</i> , 1995).....	35
3.11	Fluxo básico de um algoritmo genético.....	38
3.12	Exemplo de cruzamento de 1 ponto.....	41
3.13	Exemplo de cruzamento uniforme.....	42
3.14	Exemplo de mutação (Fabro, 2004).....	43

4.1	Digitalização de filmes radiográficos através de (a) <i>scanner</i> e (b) câmera de vídeo. (Zscherpel, 2000).....	47
4.2	Perfil de níveis de cinza extraído de uma radiografia de solda (a) antes e (b) depois da imagem ser processada com o filtro da mediana 3x3 (Silva, 1999).....	50
4.3	(a) radiografia de cordão de solda e (b) resultado da segmentação automática pelo método de Lawson e Parker (1994).....	52
4.4	(a) Imagem radiográfica da junta soldada; (b) Resultado da limiarização pelo método Otsu (1979); (c) Projeção horizontal da imagem limiarizada; (d) Resultado da localização do cordão de solda. (Schneider <i>et al.</i> , 2004a).....	53
4.5	(a) Imagem de radiografia compactada contendo quatro cordões de solda lineares (Liao e Tang, 1997); (b) Mesma imagem sub-divida em 4 partes, cada qual com um único cordão de solda.....	54
4.6	Perfil linear de uma das sub-imagens utilizadas por Liao e Ni (1996).....	55
4.7	Perfil linear de uma das sub-imagens utilizadas por Liao e Ni (1996) com a indicação de características extraídas do trecho que atravessa o cordão de solda.....	56
4.8	(a) Exemplos de pares de treinamento utilizados por Nacereddine <i>et al.</i> (2000) no treinamento de uma rede neural para detecção de bordas de defeitos; (b) Imagem do defeito e resultado obtido através da técnica de Nacereddine <i>et al.</i> (2000) .....	61
4.9	Janelas de vizinhança orientadas vertical (a) e horizontalmente (b) para análise de defeitos; (i, j) é o <i>pixel</i> em análise. (Lashkia, 2000).....	63
4.10	Representação da detecção de bordas em imagem radiográfica de um cordão de solda através do filtro LoG e etapas da análise de possíveis defeitos (Mery e Berti, 2003).....	64
4.11	Perfil de uma linha transversal ao cordão de solda em uma imagem de baixo contraste antes (a) e após (b) o pré-processamento; (c) curva <i>spline</i> gerada com base em outro perfil pré-processado com a indicação de uma anomalia do tipo vale; (d) 2 curvas <i>spline</i> (uma mais suave e outra mais precisa) com indicação de uma anomalia do tipo concavidade (Liao e Li, 1998).....	66
4.12	Seqüência de resultados obtidos por Wang e Liao (2002), através da subtração da imagem original (a) com o fundo estimado (b) antes (c) e após (d) a limiarização.....	69
4.13	(a) Imagem radiográfica de um cordão de solda, com a indicação do perfil em análise; perfil original e sinal filtrado no sentido (b) de cima para baixo e (c) de baixo para cima; (d) composição dos dois perfis gerados (Schneider, 2005).....	71
4.14	Resultados das principais etapas do processo de segmentação proposto por (Schneider, 2004a): (a) Imagem original; (b) Resultado do pré-processamento; (c) Resultado da composição das duas imagens filtradas; (d) realce do contorno dos defeitos; (e) resultado da limiarização de Kapur; (f) contorno dos defeitos detectados.....	73
5.1	(a) Radiografia de um cordão de solda com reforço (imagem de 2929 × 938 <i>pixels</i> da coleção IIW-I) (b) Radiografia de dois cordões de solda que se interceptam formando uma junta “T” (imagem de 2784 × 958 <i>pixels</i> da coleção IIW-I).....	78
5.2	(a) Radiografia de junta soldada com dois cordões de solda que se cruzam (imagem de 3954 × 17668 <i>pixels</i> da coleção IIW-II); (b) Radiografia de um cordão de solda incompleto (imagem de 3812 × 17668 <i>pixels</i> da coleção IIW-II).....	79
5.3	(a) Radiografia panorâmica de um cordão de solda com reforço (imagem de 1298 × 4880 <i>pixels</i> da coleção BAM-I); (b) Radiografia PD-VD de um cordão de solda incompleto (imagem de 1760 × 4668 <i>pixels</i> da coleção BAM-I).....	80
5.4	(a) Radiografia computadorizada PD-VS de cordão de solda com aspecto sinuoso (imagem de 875×1689 <i>pixels</i> da coleção RC-I); (b) Radiografia computadorizada PD-VS de dois cordões de solda que se interceptam formando uma junta “T” (imagem de 875×1689 <i>pixels</i> da coleção RC-I)....	82
5.5	Imagem <i>Img</i> (modelo de cordão de solda).....	84
5.6	(a) Cálculo do perímetro $P_{pv}$ , de uma curva $g(i)$ qualquer, no trecho [0 1]; (b) Perfil vertical médio da imagem <i>Img</i> ; (c) Perímetro do perfil vertical médio de <i>Img</i> .....	86
5.7	(a) Linhas de referência distribuídas uniformemente. (b) Linhas de referência distribuídas sistematicamente em relação à distribuição de níveis de cinza.....	87
5.8	Imagem <i>Img</i> com a grade de referência para $n=16$ .....	88
5.9	Matriz de referência <i>Mref</i> gerada para a imagem modelo.....	89
5.10	(a) Imagem radiográfica de uma tubulação com a grade de referência; (b) Matriz de referência gerada para a imagem de tubulação.....	89
5.11	Identificação de características da imagem modelo de cordão de solda.....	90
5.12	(a) Técnica de exposição radiográfica tangencial para medição de espessura de tubulações (Onel <i>et al.</i> , 2000), (b) Radiografia PD-VD para inspeção de soldas (cedida pelo BAM).....	91

5.13	Componentes da primeira e da última coluna da matriz de referência sendo substituídos pelo valor máximo da respectiva coluna.....	91
5.14	(a) Grade de referência gerada para a imagem modelo <i>Img</i> , (b) resultado do deslocamento da linha central de referência e (c) visualização do posicionamento das linhas de referência antes e após o deslocamento da linha central.....	93
5.15	Ponto central de referência $P_0$ e sistema de coordenadas $yx$ .....	95
5.16	Operação de ajuste de curvatura aplicada a um ponto à direita de $P_0$ .....	96
5.17	Resultado do ajuste de curvatura aplicado a grade da 5.15.....	96
5.18	Grade de referência (modificada), após seqüência de operações.....	97
5.19	Grade modificada definindo uma janela na imagem radiográfica.....	99
5.20	Janela usada para definir a vizinhança ponto de referência $P_{iv}$ .....	100
5.21	Cordão de Solda e perfis transversais em três diferentes posições.....	100
5.22	Pontos inválidos de uma grade de referência.....	102
5.23	Exemplo de uma solução adequada para a detecção do cordão de solda na imagem utilizada como exemplo.....	108
5.24	Desenho esquemático que representa as regiões de um cordão de solda a serem extraídas separadamente.....	110
5.25	Diagrama de blocos ilustrando o funcionamento do sistema idealizado para detecção e reconhecimento de cordões de solda.....	111
6.1	Imagem teste e imagem modelo (extraída da imagem teste) que foram utilizadas na otimização dos parâmetros do AG.....	114
6.2	Resultados para probabilidade de mutação 0,0025.....	117
6.3	Resultados para probabilidade de mutação 0,005.....	117
6.4	Resultados para probabilidade de mutação 0,01.....	117
6.5	Resultados para probabilidade de mutação 0,02.....	117
6.6	Evolução da busca genética utilizando método (a) torneio e (b) roleta.....	119
6.7	Resultados obtidos para os novos valores de parâmetros do AG.....	120
6.8	Diagrama do sistema implementado para detecção de cordões de solda.....	122
6.9	(a) Exemplo de não-deteção 1 e (b) exemplo de não-deteção 2.....	123
6.10	(a) Solução de comprimento insuficiente e (b) de largura insuficiente.....	123
6.11	Deteção do cordão de solda nas imagens (a) RC 137, (b) RC 25, (c) RC 47 e (d) BAM-I 97.....	129
6.12	Deteção do cordão de solda na imagem IIW-I 34.....	130
6.13	Deteção do cordão de solda nas imagens (a) IIW-I 71 e (b) IIW-II 39.....	131
6.14	Deteção do cordão de solda na imagem IIW-I 72.....	131
6.15	Deteção do cordão de solda nas imagens (a) IIW-I 49 e (b) RC 215.....	132
6.16	Deteção do cordão de solda nas imagens (a) IIW-I 41 (b) IIW-I 38 (c) IIW-I 73.....	133
6.17	Resultados melhorados para detecção do cordão de solda nas imagens (a) IIW-I 41 (b) IIW-I 38 (c) IIW-I 73.....	135
6.18	Deteção do cordão na imagem BAM-I 70.....	136
6.19	(a) Primeira detecção de cordão de solda na imagem BAM-I 43; (b) Imagem BAM-I 43 sem a primeira detecção; (c) Segunda detecção de cordão de solda na imagem BAM-I 43.....	137
6.20	Diagrama de blocos do sistema de detecção e reconhecimento de cordões de solda.....	138
6.21	Valor de adequabilidade para amostras de exemplos e contra-exemplos de detecções de cordões de solda.....	139
6.22	Seqüência de operações para segmentação de defeito no cordão de solda, (a) conforme proposto por Schneider (2005) e (b) alterações propostas nesta tese.....	144





## LISTA DE TABELAS

3.1	Coeficientes de transformações geométricas com imagens.....	29
3.2	Aprimoramento do contraste através da modificação do histograma.....	32
4.1	Valores <i>default</i> dos parâmetros usados em (Schneider <i>et al.</i> , 2005) para segmentação de defeitos em cordões de solda em imagens radiográficas.....	74
5.1	Valores de dimensões úteis da imagem modelo do cordão de solda.....	90
5.2	Operações aplicadas à grade de referência e parâmetros de controle.....	98
5.3	Limites estabelecidos para os parâmetros do vetor $\tau$ .....	104
5.4	Valores <i>default</i> para as variáveis da tabela 5.3.....	104
5.5	Descrição das variáveis auxiliares utilizadas na tabela 5.4.....	104
5.6	Parâmetros do AG a serem ajustados.....	108
6.1	Parâmetros do AG a serem ajustados.....	114
6.2	Valores dos parâmetros do AG a serem testados.....	115
6.3	Dez melhores e dez piores vetores de parâmetros testados para os AG.....	116
6.4	Tempo médio da busca na imagem teste.....	116
6.5	Novos valores dos parâmetros do AG a serem testados.....	120
6.6	Dez melhores vetores de parâmetros testados para os AG.....	120
6.7	Limites dos parâmetros do vetor solução ( $\tau$ ) para uma busca local.....	121
6.8	Limites dos parâmetros do vetor solução para teste de detecção de cordões de solda de comprimento limite.....	125
6.9	Variáveis que mudam em relação aos valores da tabela 6.8 para teste de detecção de cordões de solda de comprimento variado.....	126
6.10	Desempenho na detecção de cordões de solda.....	126
6.11	Erros cometidos no teste para detecção de cordões de solda.....	127
6.12	Pré-classificação das imagens de detecções incorretas segundo faixas específicas de largura para o cordão de solda.....	134
6.13	Desempenho na detecção de cordões de solda após implementações para aprimoramento de resultados.....	134
6.14	Limites dos parâmetros do vetor solução para teste de detecção de cordões de solda em radiografias PD-VD.....	135
6.15	Limites dos parâmetros do vetor solução para teste de detecção de cordões de solda em radiografias PD-VD.....	137
6.16	Exemplos de múltiplas detecções classificadas pelo sistema proposto.....	141
6.17	Dados para avaliação de desempenho no teste para avaliar o classificador.....	142
6.18	Resultados para imagem com cordões que se unem em uma junção T.....	142
6.19	Resultados para imagem com cordões que se unem em uma junção +.....	143
6.20	Dados para avaliação de desempenho no teste para avaliar o classificador.....	143
6.21	Exemplo de resultado da segmentação do defeito trinca longitudinal.....	145
6.22	Exemplo de resultado da segmentação do defeito trinca transversal.....	145
6.23	Exemplo de resultado da segmentação de inclusões de escória em linha.....	145
6.24	Exemplo de resultado da segmentação do defeito falta de penetração.....	146
6.25	Exemplo de resultado da segmentação do defeito mordedura externa.....	146
6.26	Exemplo de resultado da segmentação do defeito falta de fusão.....	146
6.27	Exemplo de resultado da segmentação do defeito porosidade.....	146
6.28	Artigos publicados em periódicos de relevância internacional.....	149
6.29	Artigos publicados em anais de congressos nacionais, internacionais e outras publicações.....	150



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABENDE	- Associação Brasileira de Ensaios Não-Destrutivos
AG	- Algoritmo genético
ASME	- <i>The American Society of Mechanical Engineers</i>
ASNT	- <i>American Society for Nondestructive Testing</i>
BAM	- <i>Bundesanstalt für Materialforschung und-Prüfung</i> ( <i>Federal Institute for Materials Research and Testing</i> )
END	- Ensaios Não-Destrutivos
FCAW	- <i>Flux Cored Arc Welding</i>
FF	- Falta de fusão
FP	- Falta de penetração
GTAW	- <i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
IE	- Inclusão de Escória
IIW	- <i>International Institute of Welding</i>
IQI	- Indicador de qualidade da imagem
IT	- Inclusão de Tungstênio
ME	- Mordedura externa
MI	- Mordedura interna
PD	- Parede dupla
PDI	- Processamento digital de imagens
PO	- Porosidade
PS	- Parede simples
RNA	- Redes Neurais Artificiais
SMAW	- <i>Shielded Metal Arc Welding</i>
TIG	- <i>Tungsten Inert Gas</i>
TR	- Trinca
VD	- Vista dupla
VP	- Vista panorâmica
VS	- Vista simples



## RESUMO

Este trabalho propõe um novo método para a detecção automática de cordões de solda em imagens radiográficas de juntas soldadas de tubulações. A metodologia proposta baseia-se na otimização de parâmetros que controlam e adaptam o posicionamento, tamanho e formato de uma janela de imagem, de modo a enquadrar a região da imagem que mais se assemelha à representação visual de um cordão de solda radiografado. A busca por parâmetros ótimos é conduzida por um algoritmo genético, que parte de soluções aleatoriamente geradas e as avalia com base em um conceito de similaridade entre imagens, oriundo de técnicas de casamento de protótipos. Além de se tratar de uma proposta inédita, a solução apresentada cobre uma diversidade de situações, incluindo problemas de detecção do cordão de solda para os quais ainda não havia sido encontrada uma solução automatizada que a literatura tenha referenciado. Os resultados dos testes realizados alcançaram um desempenho entre 93 e 100%, para um total de 478 imagens consideradas, que incluem exemplos de praticamente todas as técnicas de exposição radiográfica recomendadas pelo código ASME V, para inspeção de juntas soldadas de tubulações. Entrementes, uma técnica já existente de segmentação de imagens foi adaptada para desempenhar a detecção automática de defeitos de soldagem. Para tais testes, foram utilizados padrões radiográficos das principais classes de defeitos, provenientes do *International Institute of Welding* (IIW). Após modificações agregadas à técnica de segmentação utilizada, foi possível detectar exemplos de todas as classes de defeitos testadas. Tais resultados contribuem para a análise automática de radiografias industriais e visa melhorar a qualidade e eficiência na inspeção radiográfica de soldas.



## ***ABSTRACT***

This work proposes a new method for the automatic detection of the weld seam in radiographic images of pipeline welded joints. The proposed methodology is based on the optimization of parameters that are used to control and modify the position, size and shape of an image window, in order to enclose the image region that best matches the radiographic representation of a reinforced weld seam. The search for the best matching is managed by a genetic algorithm and uses an image similarity concept that is commonly applied on template matching procedures. The proposed technique solved weld seam detection problems for which no other automatic detection method was successful. The test results achieved an accuracy between 93% and 100%, regarding different tests circumstances, for a total of 478 radiographic images. The images data set included radiograph samples that cover all the recommended radiographic exposure techniques that are recommended, in the ASME V code, for inspection of pipeline welded joints. Meanwhile, a known image segmentation technique was modified and applied to perform the automatic detection of welding defects. For that test series, radiographic patterns from the International Institute of Welding (IIW) were used, including samples of the most popular classes of welding defects. After the used segmentation technique has been properly modified, defect detection samples were achieved for all the tested defect classes. Such results contribute with advancements in the automatic analysis of industrial radiographs and, as a final goal, aim at aggregating quality and efficiency to the radiographic inspection of welded joints.





## 1) INTRODUÇÃO

Em instalações petroquímicas, redes de tubulações condutoras de fluidos são construídas através da união de tubos, conexões e diversos tipos de componentes, por meio de juntas soldadas (Telles, 2001). Tais instalações já são projetadas para suportar condições críticas de temperatura e pressão. Mesmo assim ocorrem falhas, que, quando não são solucionadas a tempo, podem resultar em vazamentos, paradas não-programadas, perdas de produção, incêndios ou mesmo acidentes com sérios danos ambientais.

Dentre as várias origens de tais problemas está a presença de defeitos internos em junções soldadas. Contudo, as graves conseqüências, em função do aparecimento de tais falhas, podem ser evitadas por programas de inspeção periódica através de Ensaios Não-Destrutivos (END) (Jagannathan *et al.*, 2000).

O termo Ensaio Não-Destrutivo (*Nondestructive Test/Evaluation*), de acordo com a *American Society for Nondestructive Testing* (ASNT, 2007), compreende métodos e procedimentos utilizados para examinar materiais e produtos sem interferir ou alterar a sua funcionalidade. De acordo com a Associação Brasileira de Ensaios Não-Destrutivos (ABENDE, 2007), a radiografia é um dos métodos de END mais amplamente usados na detecção de defeitos internos em juntas soldadas. Segundo Bray e Stanley (1997), há uma variedade de situações em que o ensaio radiográfico é a melhor, senão a única, técnica de inspeção aplicável. Conforme salientado por Silva (2003), o ensaio radiográfico fornece uma imagem que representa a “fotografia” interna da peça, e isso nenhum outro END é capaz de mostrar na área industrial.

Por outro lado, a confiabilidade do ensaio radiográfico está sujeita à qualidade da imagem radiográfica (radiografia) e à sua correta interpretação. Atualmente, a interpretação de imagens radiográficas, em inspeção industrial, é realizada visualmente por inspetores qualificados, com base na regulamentação de normas de projeto, construção e inspeção de tubulações, como os códigos ASME VIII e ASME V.

Quando a imagem é obtida em formato digital, podendo ser processada em um computador, técnicas de Processamento Digital de Imagens (PDI) podem ser empregadas com o objetivo de realçar aspectos visuais, facilitando a interpretação da radiografia (Silva, 1999). Entretanto, tais técnicas de apoio ao ensaio radiográfico não

eliminam a subjetividade nas interpretações das imagens radiográficas, que, conseqüentemente, permanece sujeita às habilidades, essencialmente acuidade e experiência de inspetores de radiografias.

Uma vez que o ensaio radiográfico fica sujeito às habilidades e erros humanos, tem-se uma situação crítica toda vez em que um grande volume de imagens necessita ser analisado. Limitações relacionadas ao tempo necessário para se realizar cada análise de forma cuidadosa preservando, durante toda análise, a mesma regularidade na aplicação de critérios, podem comprometer o tempo e a qualidade do processo de inspeção (Rajagopalan *et al.*, 2004). Mesmo quando a análise da radiografia é feita de maneira adequada, há ocorrência de erros de interpretação dos defeitos existentes no cordão de solda (Silva, 2003). Segundo Alaknanda *et al.* (2006), a interpretação visual de radiografias é um processo lento e os resultados podem variar quando se comparam laudos realizados por inspetores diferentes ou, até mesmo, no caso de laudos realizados pelo mesmo profissional sob circunstâncias que afetem de forma diferente o seu estado psicológico no momento da execução da tarefa.

Estudos desenvolvidos por Fucsock *et al.* (2000; 2002), sobre a confiabilidade da interpretação humana de filmes radiográficos, confirmam a situação descrita no parágrafo anterior. Em sua pesquisa, tais autores reuniram um grupo de inspetores de solda com experiência variando de 6 meses a 35 anos para analisarem padrões de defeitos que foram previamente avaliados no laboratório de confiabilidade do BAM (*Bundesanstalt für Material forschung und prüfung*<sup>1</sup>, Berlin). Mesmo o melhor inspetor não atingiu 100% de acerto nas indicações de defeitos e o desempenho médio nesta tarefa ficou em 68%. Tal situação é preocupante, pois, embora a consequência do descarte de peças em boas condições seja, em princípio, apenas financeira, a aprovação de peças defeituosas pode resultar em consequências muito piores, como as já mencionadas no início deste capítulo.

Diante desse quadro geral e com base no desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos de radiografia digital, há atualmente uma corrida em busca da automação parcial ou completa da interpretação radiográfica de soldas. Centros de pesquisa em diversos países têm focalizado seus esforços no estudo de metodologias que dão suporte ao desenvolvimento de ferramentas computacionais e na elaboração de normas que, junto com tais ferramentas, visam eliminar a subjetividade na interpretação radiográfica

---

<sup>1</sup> Federal Institute for Materials Research and Testing

de soldas. Tal assunto se tornou de tamanha importância que instituições como o BAM e ASNT têm organizado congressos exclusivos para divulgações científicas nesta área (Silva, 2003). Entretanto, mesmo nos trabalhos mais recentemente publicados (Silva e Mery, 2007a; 2007b), não se menciona a existência de um sistema completamente automático para a análise de radiografias de soldas. Ao invés disso, salienta-se que ainda não há uma via de regras bem estabelecida que, quando seguida, conduz ao desenvolvimento de um sistema automático de inspeção radiográfica (Silva e Mery, 2007a).

Neste contexto, uma área específica em que se tem avançado bastante é o estudo de parâmetros e a aplicação de técnicas de reconhecimento de padrões para caracterização e classificação automática de defeitos de soldagem. No entanto, para viabilizar o desenvolvimento de tais estudos, geralmente se recorre à extração manual ou semi-automática de regiões da imagem, denominadas regiões de interesse (ROI – *region of interest*), que incluem o cordão de solda e os defeitos a serem analisados. Isto acontece manualmente porque as propostas apresentadas até o momento, que poderiam servir como alternativa para extração automática de tais regiões, ainda são de aplicações bastante específicas e limitadas. No caso de soluções automáticas para detecção de cordões de solda, por exemplo, as propostas encontradas na literatura revelam a dificuldade em desvincular a detecção do cordão do conhecimento prévio de aspectos como posicionamento, orientação, tamanho e formato do cordão de solda na imagem. Já no caso de soluções para segmentação de defeitos, o seu correto funcionamento muitas vezes depende do ajuste de parâmetros, individualmente, para cada imagem diferente a ser processada. O ajuste de tais parâmetros, ou mesmo a extração manual das regiões, são tarefas repetitivas e se tornam exaustivas à medida que aumenta a quantidade de imagens a serem analisadas. Coerente com tais observações, Silva e Mery (2007b) apontam a necessidade de se melhorar as técnicas para segmentação de imagens radiográficas de soldas e afirmam que tal necessidade guiará os trabalhos futuros nesta área de pesquisa.

As dificuldades e obstáculos relacionados à segmentação do cordão de solda e de defeitos de soldagem em radiografias digitais, bem como a compreensão da importância e necessidade de se desenvolver uma ferramenta automática eficaz, voltada ao desempenho de tais tarefas, serviram de principal motivação ao desenvolvimento do estudo desta tese. Salientando tais importâncias, pode-se citar três aspectos principais:

- O desenvolvimento de uma ferramenta automática apropriada para segmentação de radiografias digitais favorecerá o inspetor de soldas por mostra-lhe com maior clareza informações – ex.: posicionamento do cordão de solda e formato de defeitos – que são essenciais à elaboração de um laudo exato e confiável.
- Tal ferramenta também pode contribuir para o desenvolvimento de um sistema automático completo para inspeção radiográfica de soldas. Vale ressaltar que tal sistema não terá a finalidade de substituir a função do inspetor de soldas, mas sim ajudá-lo a evitar cometer erros e acelerar o processo de análise.
- Trata-se de uma área de pesquisa que envolve tanto interesses econômicos como tecnológicos. E tal interesse existe tanto por parte de clientes como de prestadores de serviço na área de inspeção industrial.

Com base em tais considerações, foi estabelecido que o principal objetivo deste trabalho é desenvolver e/ou aprimorar técnicas para segmentação automática de imagens radiográficas de soldas. Entende-se que, com o desenvolvimento de tais tecnologias, se estará contribuindo de forma significativa para construção de uma ferramenta automática para a interpretação de radiografias industriais. Sendo assim, para atingir tais objetivos, foram estabelecidas as seguintes metas:

- Desenvolver e implementar uma nova metodologia para detecção automática de cordões de solda em radiografias industriais, que ofereça flexibilidade suficiente para ser usada em todas as principais circunstâncias que constam no código ASME (2004), para técnicas de exposição radiográfica recomendadas à inspeção de juntas soldadas de tubulações.
- Pesquisar e implementar melhorias na técnica de segmentação de imagens inicialmente proposta por Schneider (2004b), de forma a aprimorar a detecção automática de defeitos de soldagem.
- Testar e avaliar o desempenho de tais metodologias para as imagens disponibilizadas aos estudos desta tese.

Os principais esforços para atingir tais metas se concentraram na idealização, implementação e testes de um novo sistema para detecção e reconhecimento de cordões de soldas em imagens radiográficas de juntas soldadas. A metodologia desenvolvida

para propor tal sistema é inédita e baseia-se na otimização de parâmetros que controlam e adaptam o posicionamento, tamanho e formato de uma janela de imagem, de modo a enquadrar a região da imagem que mais se assemelha à representação visual de um cordão de solda radiografado. A busca por parâmetros ótimos é conduzida por um algoritmo genético, que parte de soluções geradas aleatoriamente e as avalia com base em um conceito de similaridade entre imagens, oriundo de técnicas de casamento de protótipos. Os resultados dos testes realizados alcançaram um desempenho entre 93 e 100%, para um total de 478 imagens consideradas, que incluem exemplos de praticamente todas as técnicas de exposição radiográfica recomendadas pelo código ASME (2004), para inspeção de juntas soldadas de tubulações. Tais imagens incluem 266 radiografias computadorizadas, e três coleções de padrões radiográficos de defeitos, incluindo dois grupos de imagens (um com 79 e outro com 66 filmes radiográficos digitalizados) provenientes do IIW (*International Institute of Welding*) e um grupo (com 67 filmes radiográficos digitalizados) proveniente do BAM.

Um dos principais objetivos da detecção dos cordões de solda é tornar possível que tais regiões de interesse sejam extraídas corretamente da radiografia original para um posterior processamento e análise visando a detecção dos defeitos de soldagem existentes. Os resultados dos testes realizados para a detecção dos cordões de solda permitiram que tais regiões pudessem ser extraídas automaticamente inclusive para as imagens que continham os padrões das principais classes de defeitos de soldagem. Confirmando que tais regiões de interesse foram detectadas e extraídas corretamente, as imagens extraídas puderam ser utilizadas para testar uma técnica já existente de segmentação de defeitos de soldagem (Schneider, 2004b). A observação dos resultados obtidos também permitiu verificar que seria possível agregar melhorias à técnica testada. Após reavaliar a seqüência de operações de processamento de imagens adotada por Schneider (2004b) e substituir algumas destas operações, foram alcançados melhores resultados, especialmente no caso de defeitos alongados que geralmente eram detectados de forma muito fragmentada, dificultando o seu reconhecimento. Desta forma, embora o foco principal desta tese seja na detecção do cordão de solda, também foi possível contribuir para o aprimoramento da segmentação de defeitos de soldagem.

Além de contribuições na área de inspeção radiográfica industrial, o desenvolvimento dos estudos desta tese também exigiu encontrar soluções para problemas da área de visão computacional, como a codificação de imagens para

representação de padrões, detecção e reconhecimento objetos e avaliação de similaridade entre imagens.

A seguir apresenta-se um resumo de como esta tese está estruturada, com os assuntos distribuídos em capítulos:

- Capítulo 2: Fundamentação teórica sobre inspeção radiográfica de juntas soldadas de tubulações, que visa esclarecer pontos relevantes à interpretação das imagens utilizadas no presente trabalho.
- Capítulo 3: Fundamentação teórica sobre análise e processamento digital de imagens e algoritmos genéticos, onde se fornece o esclarecimento de termos e técnicas bastante referenciados na revisão bibliográfica do capítulo 4 e que são essenciais à compreensão da metodologia proposta nesta tese.
- Capítulo 4: Revisão bibliográfica sobre técnicas de aquisição, processamento e análise de imagens radiográficas de juntas soldadas, que apresenta e comenta resumidamente as principais publicações existentes sobre este tema de pesquisa.
- Capítulo 5: Descrição da metodologia de trabalho, onde se detalha a proposta desta tese para detecção automática de cordões de solda, fornecendo-se também detalhes sobre o material (imagens) disponibilizado para este trabalho.
- Capítulo 6: Descrição dos testes, apresentação dos resultados e discussões sobre a metodologia de trabalho proposta no capítulo 5.
- Capítulo 7: Apresentação das principais conclusões desta tese, perspectivas e sugestões de trabalhos futuros.

## 2) INSPEÇÃO RADIOGRÁFICA DE JUNTAS SOLDADAS DE TUBULAÇÕES

### 2.1) Introdução

O objetivo principal deste capítulo é introduzir conceitos fundamentais à interpretação de radiografias de juntas soldadas de tubulações. Para tanto, dois tópicos principais são abordados aqui: (1) juntas soldadas e (2) ensaio radiográfico de soldas. O primeiro tópico apresenta os tipos de solda em estudo, como estas são construídas e as principais discontinuidades relacionadas a tais tipos de solda. O outro tópico visa esclarecer princípios do ensaio radiográfico e fornecer informações essenciais à compreensão do conteúdo gráfico das imagens que foram disponibilizadas para este estudo. No final do capítulo, são salientadas as principais considerações desta fundamentação teórica.

### 2.2) Juntas Soldadas

A figura 2.1a mostra um esquema de tubos a serem unidos por um tipo de solda denominada solda de topo com chanfro em V (figura 2.1b). A maioria das juntas soldadas que fazem parte do estudo desta tese constituem-se deste tipo de união entre tubos de aço-carbono. O resultado final da união dos tubos é ilustrado na figura 2.1c.

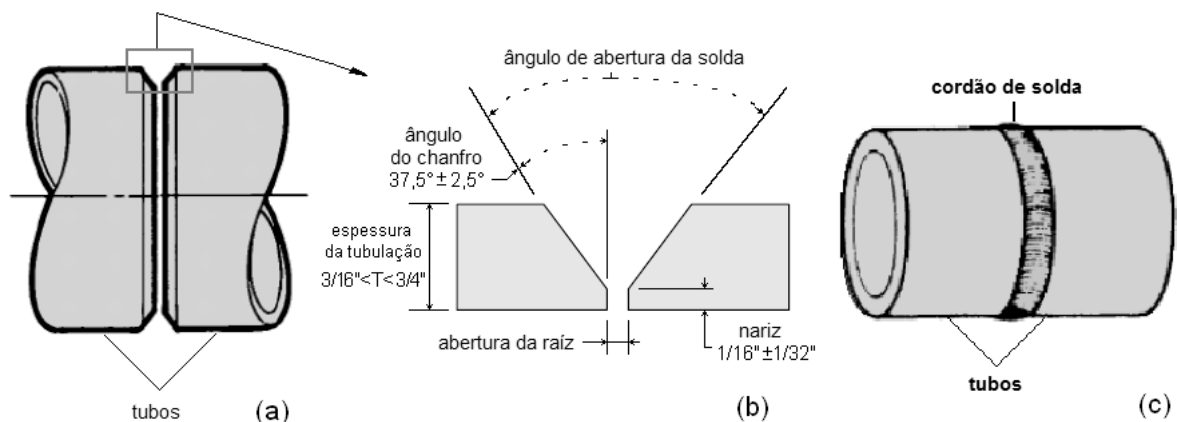


Figura 2.1 – (a) Tubos a serem soldados; (b) Secção transversal de junta com chanfro em V; (c) Tubos unidos através da execução do procedimento de soldagem.

### 2.2.1) Princípios da Soldagem por Fusão com Arco Elétrico

O termo soldagem é bastante genérico e pode ser aplicado a uma infinidade de processos para união de materiais, produzida por aquecimento, com ou sem a utilização de pressão e material de adição (Marques, 1991). Este trabalho trata de soldas com reforço (por metal de adição) que foram geradas por processos de soldagem onde o metal de adição é fundido pela ação de uma fonte de calor denominada arco elétrico.

O arco elétrico pode ser considerado um condutor elétrico gasoso (gás ionizado) de forma cônica, como mostra a figura 2.2a. Devido à diferença de potencial estabelecida entre as extremidades (eletrodo e peça), ocorre uma descarga elétrica, através do gás ionizado, produzindo energia térmica suficiente para a fusão (Marques, 1991). Conseqüentemente, a ação dessa fonte de calor provoca a fusão do metal de adição que, por sua vez, preenche o espaço entre os chanfros das duas peças (tubos). Naturalmente, a ligação entre as peças ocorre através da solidificação do metal fundido após seu resfriamento. Dependendo de especificações do procedimento de soldagem, tal deposição de material também pode ocorrer em vários passes (passadas) formando várias camadas de solda, conforme ilustrado na figura 2.2b.

Alguns exemplos de processos de soldagem por fusão com arco elétrico, amplamente usados na construção de tubulações, são o SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), popularmente conhecido por soldagem com eletrodo revestido, o FCAW (*Flux Cored Arc Welding*), mais conhecido como soldagem com arame tubular e o TIG (*Tungsten Inert Gas*) ou GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), que usa gases inertes para proteção do arco e eletrodo de tungstênio não consumível (neste caso, pode-se introduzir uma vareta de material de adição para preencher o espaço entre os chanfros).

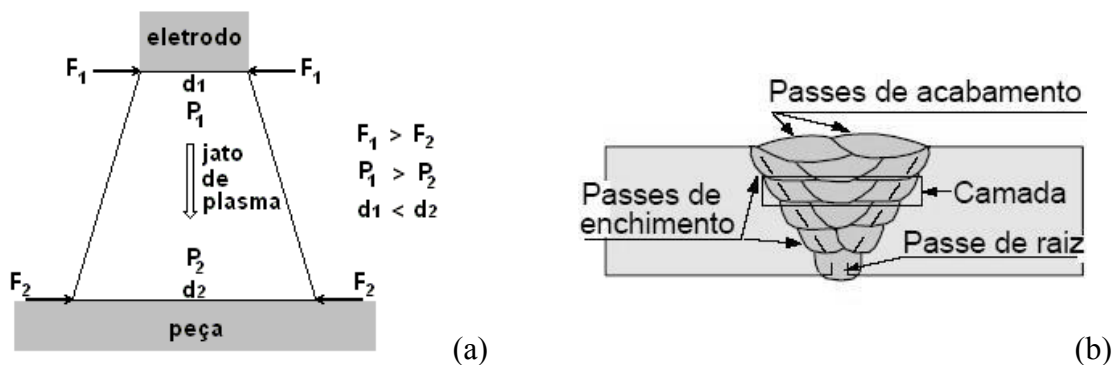


Figura 2.2 – (a) Jato de plasma (Marques, 1991); (b) Secção transversal de solda com vários passes.



### 2.2.2) Regiões de uma Junta Soldada

A soldagem por fusão é sempre considerada um tratamento térmico violento podendo provocar alterações (descontinuidades) na estrutura do material. Entretanto, tais descontinuidades, em sua maioria, são descritas e classificadas com relação ao seu posicionamento na solda. Portanto, antes de apresentar os tipos de descontinuidades, é importante identificar as regiões da junta soldada, tanto com relação à sua geometria, quanto às partes afetadas pelo ciclo térmico do processo de soldagem.

A figura 2.3a indica as regiões da junta soldada segundo a sua geometria. A figura 2.3b mostra a secção transversal de uma junta soldada com as regiões definidas pela distribuição das temperaturas de pico ( $T_p$ ) – ou máximas – atingidas durante a execução do procedimento de soldagem. A região de solda, ou seja, onde houve fusão e solidificação ( $T_p >$  temperatura de fusão  $T_f$ ), é referenciada por ZF (Zona de Fundição). As regiões não fundidas do metal base, mas que foram submetidas a temperaturas ( $T_p$ ) superiores à temperatura crítica do material ( $T_c$ ), e por este motivo sofrem alterações em sua estrutura cristalina, são referenciadas por ZTA (Zona Termicamente Afetada). As demais regiões do metal base ( $c$ ) são as que não foram afetadas pelo processo de soldagem (Marques, 1991).

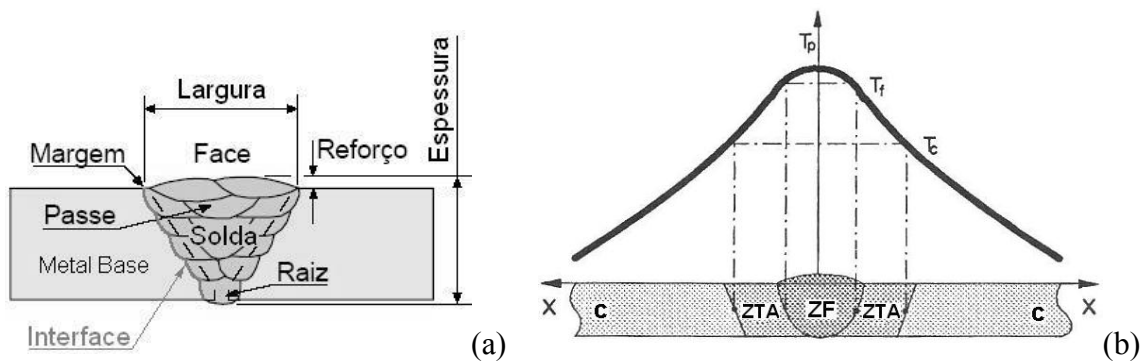


Figura 2.3 – (a) Secção transversal de uma junta soldada com a identificação das regiões da solda. (b) Distribuição das temperaturas de pico e identificação das regiões afetadas pelo ciclo térmico da solda (Marques, 1991).

### 2.2.3) Principais Descontinuidades em Juntas Soldadas de Tubulações

O termo descontinuidade se aplica à interrupção da estrutura típica de uma peça, no que se refere à homogeneidade de características físicas, mecânicas ou metalúrgicas (Wainer *et al.*, 1992). A seguir, são considerados os tipos de descontinuidades que, segundo a AWS (2001), são os mais comuns em juntas soldadas de tubulações.

- **Trincas (TR)**

O termo trinca se refere a uma ruptura local na estrutura interna do material como resultado da sua incapacidade em responder às solicitações impostas pela concentração local de tensões decorrentes do processo de soldagem ou mesmo da presença de outras descontinuidades na solda (Wainer *et al.*, 1992). Em geral, as trincas podem ser caracterizadas pela forma (longitudinal, transversal, estrela), pela localização (ZF, ZTA, metal base, face da solda, margem ou raiz) ou pela origem (fissuração a quente, fissuração a frio por hidrogênio). A figura 2.4 mostra alguns exemplos, de acordo com a AWS (2001), usando a terminologia da norma PETROBRÁS N-1738, apresentada em (Wainer *et al.*, 1992).

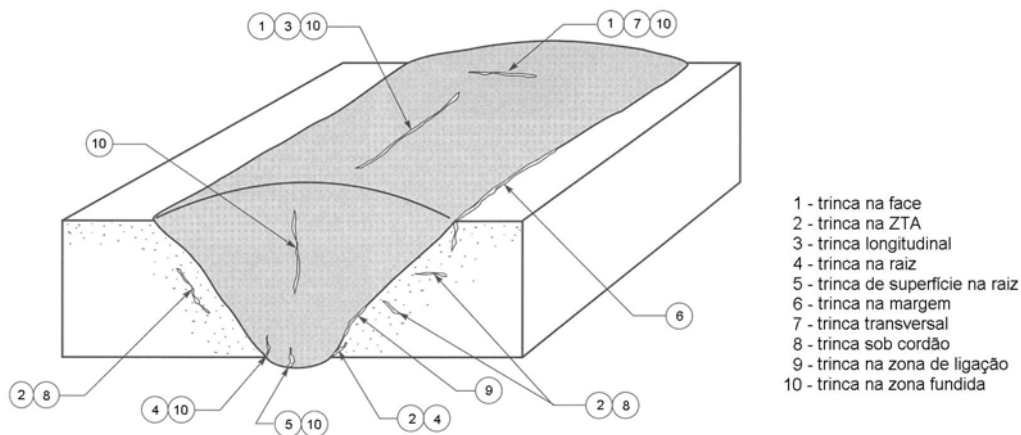


Figura 2.4 – Tipos de trincas (AWS, 2001).

- **Falta de Fusão (FF)**

Basicamente, o termo falta de fusão (FF) refere-se à ausência de continuidade metalúrgica entre o metal depositado e o metal base, podendo ocorrer na parede do chanfro (figura 2.5a), no chanfro próximo à raiz (figura 2.5b), o que é mais comum, ou entre passes da zona fundida (figura 2.5c). A FF é considerada um concentrador de tensões severo, podendo facilitar o aparecimento e propagação de regiões de rupturas no material (trincas), além de reduzir a secção efetiva da junta soldada (Brandi, 1997).

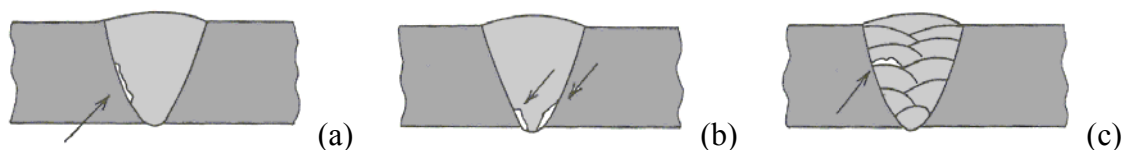


Figura 2.5 – FF (a) na parede do chanfro, (b) na raiz e (c) entre passes.

- **Falta de Penetração (FP)**

O termo falta de penetração (FP) se refere às falhas ocorridas no preenchimento da raiz da junta, como mostra o esquema da figura 2.6a e a fotografia da figura 2.6b (Marques, 1991). A ocorrência deste tipo de descontinuidade diminui a secção útil da junta soldada, resultando em concentração de tensões.



Figura 2.6 – (a) Esquema de secção transversal de junta soldada com FP; (b) Fotografia da secção transversal de uma junta soldada com FP (AWS, 2001);

- **Mordedura Interna (MI) e Externa (ME)**

Mordeduras são reentrâncias na região do metal base que acompanham a borda do cordão de solda e podem ocorrer na face externa à tubulação (mordedura externa – figura 2.7a) ou do lado oposto (mordedura interna), junto à raiz da solda (figura 2.7b e 2.7c). Tais descontinuidades além de reduzirem a área útil da junta, resultando em concentração de tensões, podem provocar a perda de resistência a solicitações cíclicas (fadiga) (Marques, 1991).

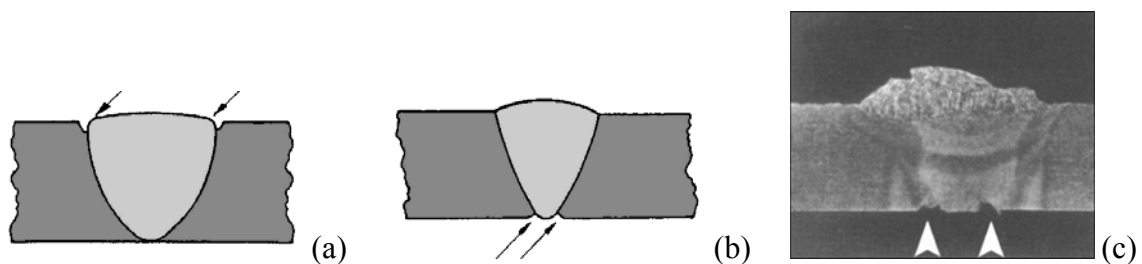


Figura 2.7 – (a) Esquema de secção transversal de junta soldada com ME e (b) com MI; (c) Fotografia da secção transversal de uma junta soldada com MI (AWS, 2001).

- **Inclusões de Escória (IE) e de Tungstênio (IT)**

Em processos de soldagem SMAW, sempre ocorre formação de escória (fuligem) sobre a camada de solda. Os resíduos de uma remoção inadequada desse material, antes de ser realizada a próxima camada de solda, resultam em descontinuidades denominadas inclusões de escória. Tais descontinuidades, em

quantidade excessiva, prejudicam a tenacidade da solda e, quando muito alongadas, tornam-se concentradores de tensão, favorecendo a ruptura do material. A figura 2.8 ilustra algumas variações deste tipo de descontinuidade: alinhada, isolada ou agrupada. No processo de soldagem TIG não há possibilidade de haver inclusões de escória, uma vez que os gases são inertes e por isso não reagem com o metal. Contudo, quando a ponta do eletrodo, que é de tungstênio, toca o metal base ou a poça de fusão, podem ocorrer inclusões deste elemento (tungstênio) na estrutura da solda (Marques, 1991).

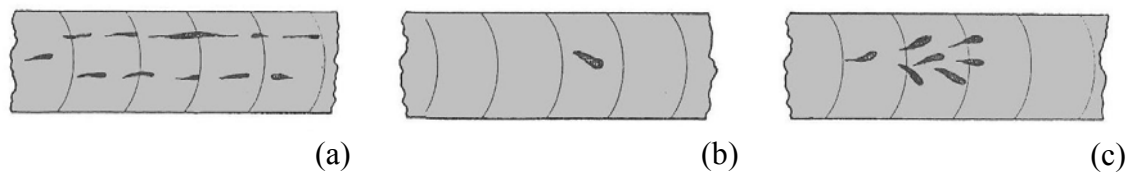


Figura 2.8 – Esquema representativo da vista superior do cordão de solda apresentando: (a) escória alinhada, (b) isolada e (c) agrupada.

- **Porosidades (PO)**

A presença de impurezas na região da junta (umidade, óleo, graxa, etc) bem como a presença de correntes de ar durante a soldagem são alguns dos fatores que podem resultar no aprisionamento de bolhas de gases pelo metal da solda quando em processo de solidificação (Marques, 1991). Como resultado, ocorre a formação de descontinuidades denominadas porosidades, que podem se apresentar de maneira uniformemente distribuída (figura 2.9a), agrupada (figura 2.9b), alinhada (figura 2.9c) ou vermicular (figura 2.9d).

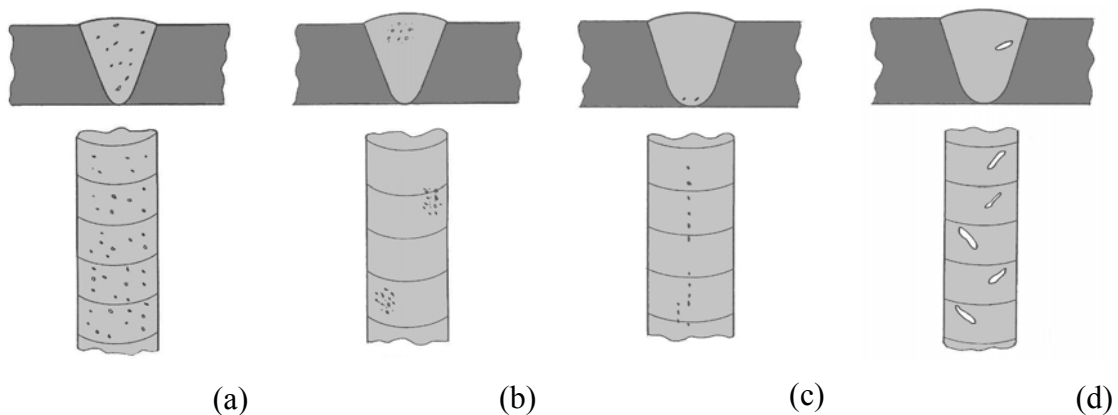


Figura 2.9 – Esquema da secção transversal (em cima) de uma junta soldada e da vista superior (em baixo) de um cordão de solda com (a) PO distribuída, (b) PO agrupada, (c) PO alinhada e (d) PO vermicular.

## 2.3) Ensaio Radiográfico de Soldas

O objetivo principal desta secção é abordar os princípios básicos do ensaio radiográfico e fornecer informações essenciais à compreensão do conteúdo gráfico exibido em uma radiografia de junta soldada de tubulação.

### 2.3.1) Princípios do Ensaio Radiográfico

A figura 2.10 ilustra como a radiação penetrante (raios-X ou raios gama) pode ser usada para investigar a estrutura interna e a geometria de uma peça. A imagem radiográfica é formada pela radiação que atravessa o material e atinge um dispositivo que contém elementos sensíveis à radiação. No caso da figura 2.10, tal dispositivo é o filme radiográfico e as áreas do filme expostas, depois de um processamento químico, escurecem proporcionalmente à intensidade da radiação recebida. Entretanto, nem toda a radiação emitida pela fonte alcança o filme radiográfico. Grande parte dela interage com a matéria e é difratada ou absorvida em quantidade tanto maior quanto mais espesso for o material a ser atravessado. Isto explica porque as áreas D, C e A da imagem da figura 2.10 vão ficando, nesta ordem, progressivamente mais claras. Tais áreas correspondem a regiões de diferentes espessuras de material, variando, na mesma ordem, da região mais fina para a mais espessa (AWS, 2001).

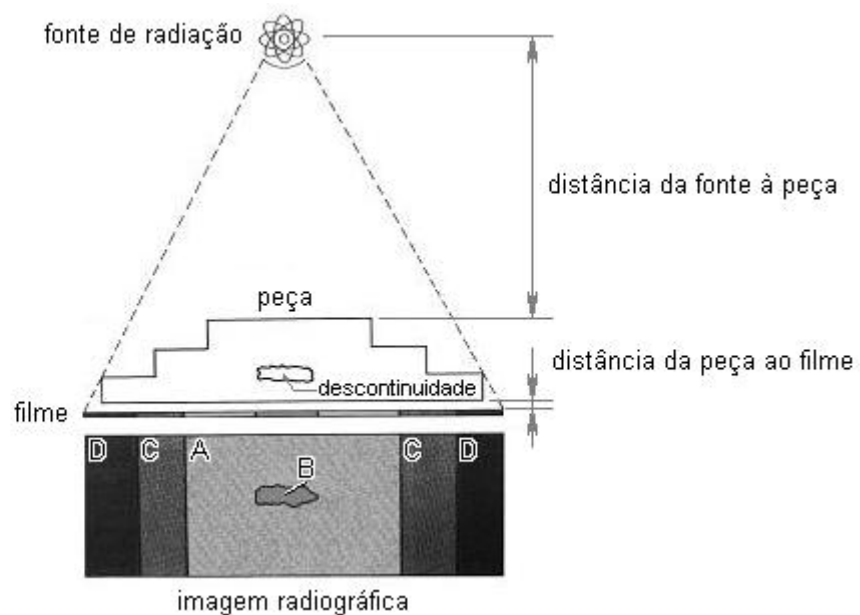


Figura 2.10 – Esquema conceitual do ensaio radiográfico (AWS, 2001).

A quantidade de radiação que interage com a matéria também varia com a densidade do material, aumentando para materiais mais densos. Em função disso é que surge a mancha escura B, na imagem radiográfica da figura 2.10. Tal indicação revela a presença de uma descontinuidade metalúrgica no interior da peça. Trata-se de uma região de densidade volumétrica menor do que a do material ao seu redor. Sendo assim, absorve menos radiação, levando a formação da mancha observada na imagem radiográfica (AWS, 2001). É com base em tais princípios que o ensaio radiográfico é utilizado para se detectar defeitos em soldas.

### 2.3.2) Identificação de Descontinuidades em Radiografias de Soldas

Nesta secção, são mostrados alguns trechos de radiografias de soldas para exemplificar os tipos de descontinuidades apresentados na secção 2.2.3 deste capítulo.

- **Trincas (TR)**

Quanto ao seu aspecto em imagens radiográficas, tais descontinuidades, quando visíveis, geralmente se apresentam na forma de linhas finas de formato e comprimento variado e de tonalidade mais escura que a da região do cordão de solda. Quando aparecem alinhadas ao eixo do cordão são denominadas trincas longitudinais (figura 2.11a) e quando aparecem ao longo da espessura do cordão são denominadas trincas transversais (figura 2.11b).

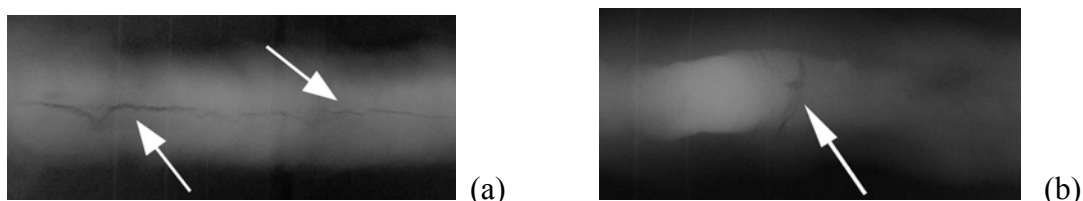


Figura 2.11 – Trechos de radiografias do BAM mostrando (a) TR longitudinal e (b) TR transversal.

- **Falta de Fusão (FF)**

A falta de fusão, quando ocorre na parede do chanfro (figura 2.5a e 2.12), é difícil de ser visualizada através do ensaio radiográfico por ser uma descontinuidade bidimensional, atravessada obliquamente pela radiação. Já no caso de falta de fusão na raiz da solda, geralmente aparece como linha escura e estreita, paralela ao eixo da solda e acompanhando o limite entre a região de raiz da solda e o metal base.

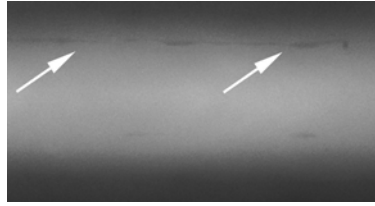


Figura 2.12 – Trecho de radiografia do BAM (*Bundesanstalt für Material forschung und prüfung – Berlin*) mostrando FF na parede do chanfro.

- **Falta de Penetração (FP)**

Na imagem radiográfica da junta soldada, esta descontinuidade apresenta-se como manchas escuras e alongadas, no centro do cordão, com bordas geralmente bem definidas e paralelas ao eixo da solda, podendo ser intermitente ou contínua. Em alguns casos, entretanto, pode apresentar um aspecto irregular devido à presença de outras descontinuidades (figura 2.13).

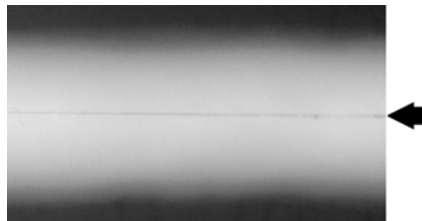
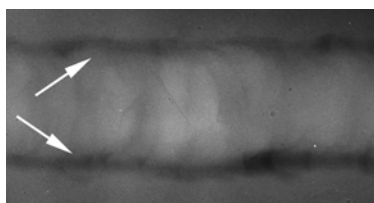


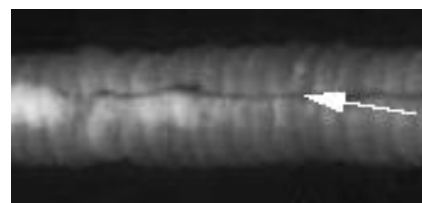
Figura 2.13 – Trecho de radiografia do BAM mostrando FP.

- **Mordedura Interna (MI) e Externa (ME)**

Em imagens radiográficas de juntas soldadas este tipo de descontinuidade aparece como manchas escuras e irregulares formando sulcos que acompanham ou a borda limite entre o cordão de solda e o metal base (mordedura externa – figura 2.14a) ou a raiz da solda, próximo ao centro do cordão (mordedura interna – figura 2.14b). Quanto mais escura a linha, maior é a profundidade do defeito. Quando é externa (figura 2.14a), sempre apresenta tonalidade mais escura que a do metal base.



(a)



(b)

Figura 2.14 – (a) Trecho de radiografia de solda do IIW (*International Institute of Welding*) com ME; (b) Trecho de radiografia de solda com MI (NDT-RESOURCE CENTER, 2007).

- **Inclusões de Escória (IE) e de Tungstênio (IT)**

Na radiografia da solda, o aspecto das inclusões de escória é irregular e a sua tonalidade é cinza médio, como mostra a figura 2.15a 2.15b. Quanto às inclusões de tungstênio, estas aparecem como regiões de brilho mais intenso em relação ao cordão de solda (figura 2.15c). Isto acontece porque o tungstênio é um material mais denso.

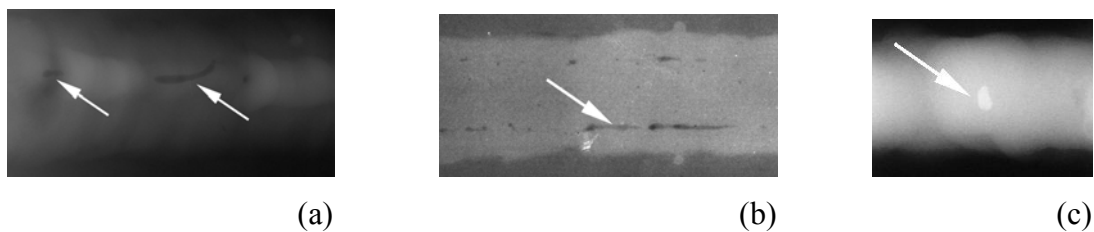


Figura 2.15 – Trecho de radiografia do BAM com (a) IE; (b) Trecho de radiografia IIW com IE alinhada; (c) Trecho de radiografia de solda do BAM com IT.

- **Porosidades (PO)**

Em radiografias de soldas, as porosidades aparecem como manchas relativamente mais escuras que as inclusões de escória e de formato arredondado (figura 2.16a) ou vermicular (tubular – figura 2.16b), podendo estar espalhadas esporadicamente, distribuídas em grupos ou alinhadas ao longo da linha central da zona de fusão da solda.

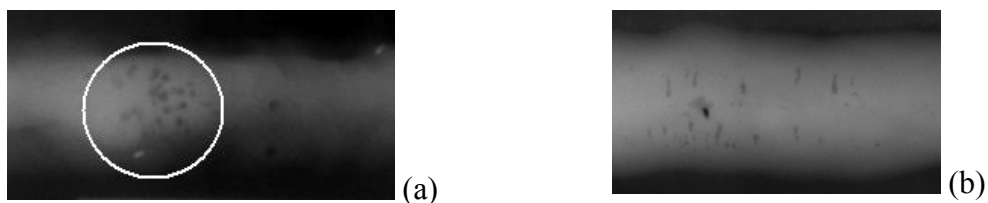


Figura 2.16 – Trechos de radiografias do IIW de soldas mostrando (a) poros arredondados agrupados e (b) poros tubulares espalhados.

### 2.3.3) Técnicas de Exposição Radiográfica para Inspeção de Soldas em Tubulações

A técnica de exposição radiográfica está relacionada à configuração geométrica do ensaio (arranjo fonte-peça-filme). Nas figuras 2.17-18 são ilustradas as técnicas de exposição radiográfica especificadas no código ASME (2004), para inspeção de juntas soldadas de tubulações. Exemplos de radiografias, obtidas através dessas técnicas, são mostrados na figura 2.20.



A figura 2.17a ilustra uma técnica que permite obter uma radiografia com vista panorâmica (VP) da solda. Um exemplo deste tipo de radiografia pode ser visualizado na figura 2.20a. Observa-se que o reforço de material na região do cordão de solda produz na imagem uma região mais clara que a região correspondente ao metal base. Tanto neste arranjo como para os das figuras 2.17b e 2.17c, a radiação emitida pela fonte atravessa a parede da tubulação por apenas um lado (de dentro para fora ou vice-versa). Por este motivo a sigla PS-VS, que significa parede simples vista simples, é usada para referenciar tais técnicas de exposição radiográfica (incluindo VP).

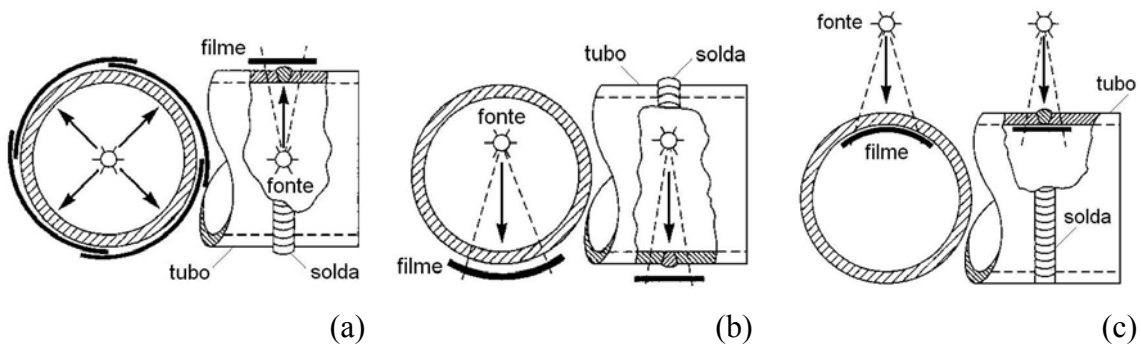


Figura 2.17 – Configurações do ensaio radiográfico de juntas soldadas com exposição do tipo PS-VS com fonte (a; b) interna e (c) externa. Em (a) a radiografia é do tipo panorâmica (ASME, 2004).

Quando não se tem acesso ao interior da tubulação, tanto a fonte quanto o filme podem ser posicionados na parte externa como nos arranjos ilustrados nas figuras 2.18 e 2.19. Em tais casos a técnica de exposição radiográfica é do tipo PD, que significa parede dupla, pois a radiação precisa atravessar os dois lados da parede da tubulação antes de alcançar o filme radiográfico. Como o feixe de radiação atravessa o dobro de material, a difração (espalhamento) de raios-X é mais intensa, prejudicando a qualidade da imagem.

Os arranjos da figura 2.18 são referenciados pela sigla PD-VS, que significa parede dupla e vista simples. Em ambas as situações a fonte fica posicionada nas proximidades da parede externa projetando com nitidez apenas o trecho de solda localizado na parede oposta da tubulação, que está mais próximo do filme radiográfico. O posicionamento da fonte, sendo alinhado (figura 2.18a) ou inclinado (figura 2.18b) em relação ao cordão de solda, influencia na geometria obtida para a projeção na imagem radiográfica. Por exemplo, quando a fonte está inclinada, a projeção do cordão de solda pode ter aspecto curvo, como mostra a figura 2.20b.

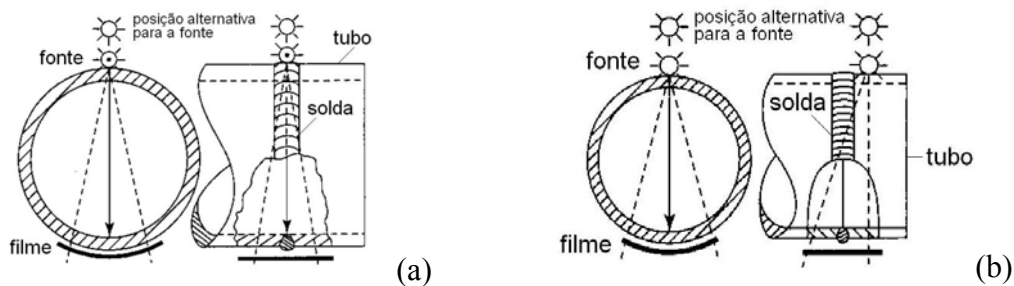


Figura 2.18 – Configurações do ensaio radiográfico de juntas soldadas com exposição do tipo PD-VS para técnicas com a fonte em posição (a) alinhada ou (b) inclinada em relação ao plano longitudinal da solda (ASME, 2004).

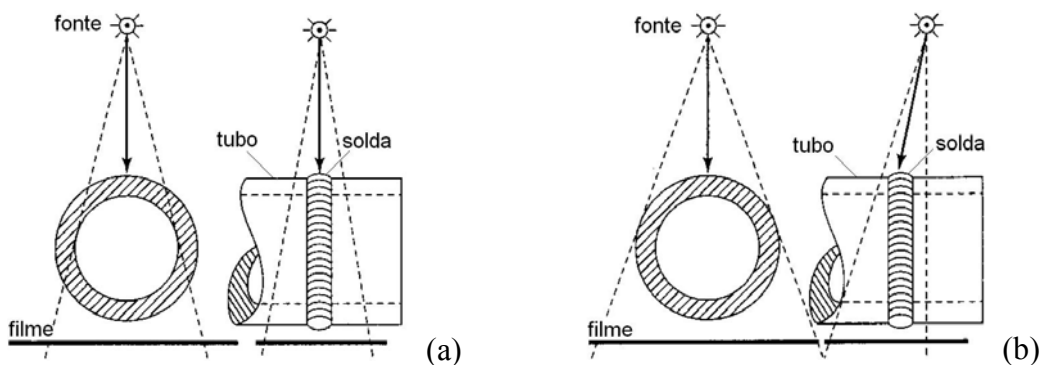


Figura 2.19 – Configurações do ensaio radiográfico de juntas soldadas com exposição do tipo PD-VD para técnicas com a fonte em posição (a) alinhada ou (b) inclinada em relação ao plano longitudinal da solda (ASME, 2004).

As outras duas situações, ilustradas na figura 2.19, são referenciadas pela sigla PD-VD, que significa parede dupla e vista dupla. Em tais situações a fonte fica posicionada a uma distância maior da peça. O resultado, para o caso em que a fonte está alinhada com o cordão (figura 2.19a), pode ser visualizado na figura 2.20c. Neste caso, as projeções da solda de ambos os lados da parede da tubulação se sobrepõem. Quanto à situação ilustrada na figura 2.19b, toda a solda é projetada no filme radiográfico apresentando um aspecto elíptico, como mostra a radiografia da figura 2.20d.

Como, sob cada ângulo, há um raio de cobertura efetivo para o feixe de radiação (Cartz, 1996), a área de cobertura do ensaio é limitada. Portanto, dependendo da técnica radiográfica, é necessário expor a mesma peça em diferentes ângulos e posições complementares. Por esse motivo, é comum o uso de marcadores de posição. Tais marcadores, feitos de chumbo, são fixados na peça durante o ensaio e aparecem em destaque indicando o trecho de solda a ser inspecionado sob aquela vista. Na radiografia da figura 2.20b, por exemplo, pode-se observar dois marcadores em formato numérico, indicando o trecho 2-3 da solda.

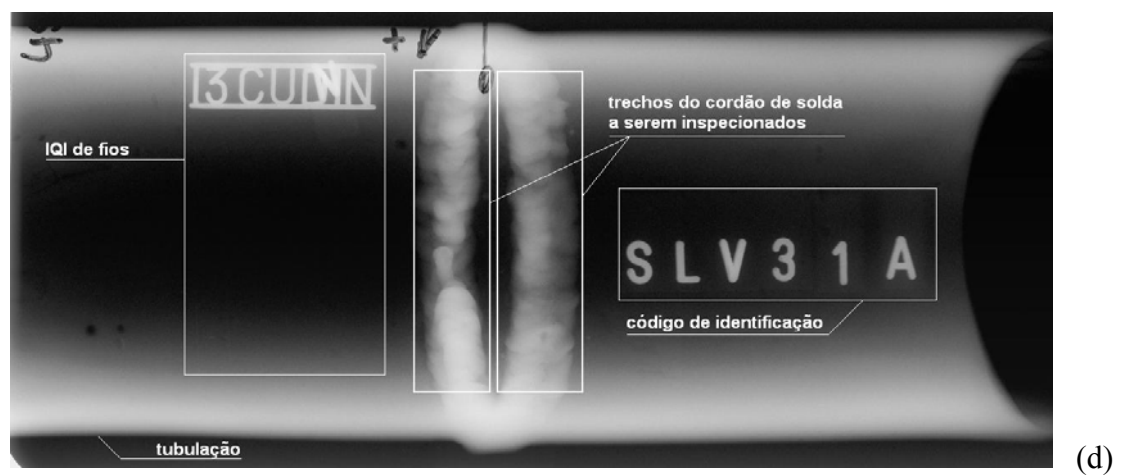
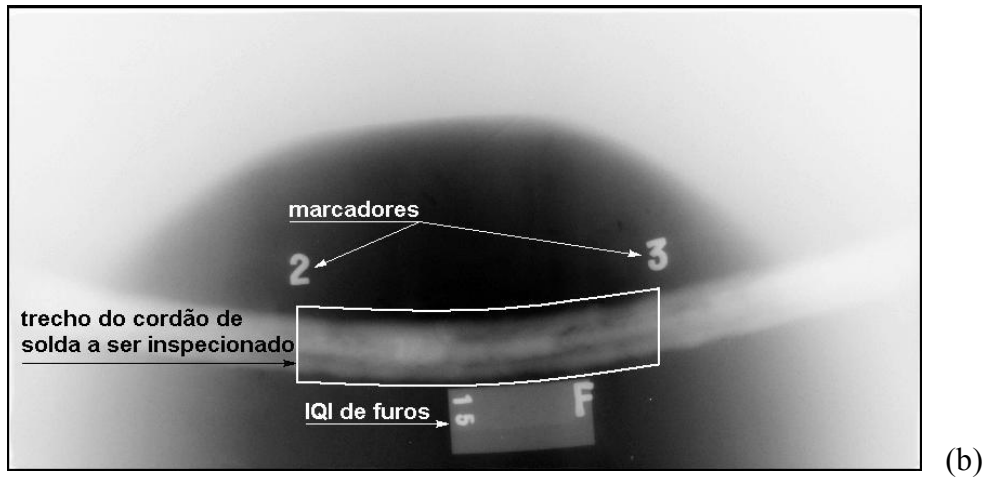
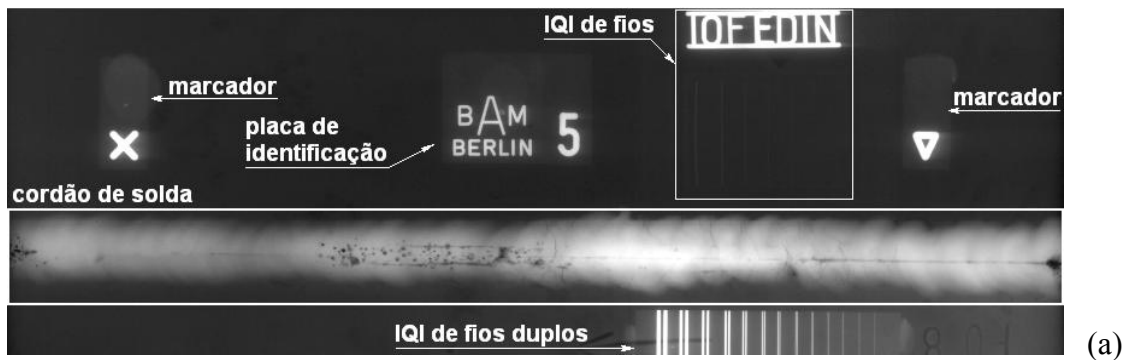


Figura 2.20 – (a) Radiografia panorâmica de junta soldada cedida pelo BAM. (b) Radiografia PD-VS. (c) (d) Radiografias PD-VD cedida pelo BAM.

Ao tamanho do menor detalhe que pode ser observado com clareza, está associado o conceito de sensibilidade radiográfica. A qualidade da imagem será tanto melhor quanto mais próximo se conseguir chegar do nível de sensibilidade ideal para a aplicação desejada. Para avaliar a sensibilidade radiográfica utilizam-se corpos de teste conhecidos como penetrâmetros ou indicadores de qualidade da imagem (IQI). Trata-se de objetos de tamanho e formato padronizados que são posicionados na peça durante o ensaio radiográfico. Vários tipos de IQIs podem ser observados nas radiografias da figura 2.20. A observação na imagem dos contornos de detalhes específicos destes corpos de prova revela uma informação que é utilizada para representar quantitativamente a sensibilidade da imagem radiográfica (Halmshaw, 1991).

O equipamento utilizado para visualizar radiografias é o negatoscópio, que consiste em um sistema de iluminação de fundo onde o filme é posicionado de forma a transmitir a luz emitida pelo equipamento. A AWS (2001) especifica as condições de uso e funcionamento do negatoscópio, bem como os requisitos exigidos do inspetor de soldas, salientando a necessidade de tal profissional ter habilidades como boa acuidade visual e conhecimento das normas, códigos, técnicas radiográficas, processos de soldagem e das discontinuidades associadas aos vários tipos de materiais e processos.

#### **2.3.4) Critérios para Avaliação de Radiografias de Juntas Soldadas**

Uma descontinuidade (indicação) é necessariamente um defeito apenas quando, por sua natureza, dimensões ou efeito acumulado torna a peça inaceitável, por não satisfazer os requisitos mínimos da norma técnica aplicável. Quando isso acontece, a solda deve ser reparada (Brandi, 1997). Nesta secção são fornecidos alguns exemplos de padrões que indicam defeitos, estabelecidos pelo código ASME (2001a), para vasos de pressão, utilizados como critério de aceitação no exame radiográfico total de soldas. Segundo tais critérios, é considerado defeito de soldagem:

- (1) Qualquer indicação caracterizada como trinca, falta de fusão ou falta de penetração;
- (2) Qualquer outra indicação alongada que tenha um comprimento maior que:
  - $\frac{1}{4}$  pol. (6,425 mm) para t até  $\frac{3}{4}$  pol. (19,75 mm),
  - $\frac{1}{3}$  t, para t entre  $\frac{3}{4}$  pol. (19,75 mm) até  $2\frac{1}{4}$  pol. (57,825 mm),
  - $\frac{3}{4}$  pol. (19,75 mm) para t acima de  $2\frac{1}{4}$  pol. (57,825 mm),

onde  $t$  é a espessura mais fina do cordão de solda.

- (3) Qualquer grupo de indicações alinhadas que, conforme as indicações da figura 2.21, tenham um comprimento agregado ( $L_1+L_2+ \dots$ ) maior que  $t$  num comprimento de  $12t$ , exceto quando a distância ( $C$ ), entre duas imperfeições sucessivas, exceder  $6L$ . Onde  $L$  é o comprimento da imperfeição mais longa do grupo.
- (4) Indicações arredondadas: Conforme a espessura da solda ( $t$ ), a norma ASME (2001b) utiliza padrões visuais, como os da figura 2.22, para estabelecer o tamanho e/ou concentração aceitáveis para indicações arredondadas na radiografia da solda.

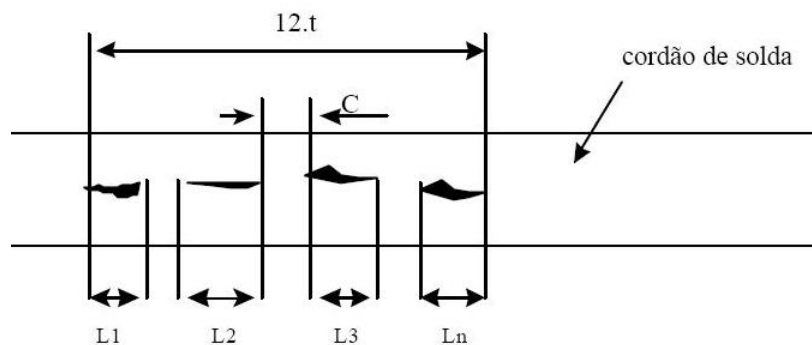


Figura 2.21 – Especificação de comprimento para indicações alinhadas segundo a norma ASME (2001b).

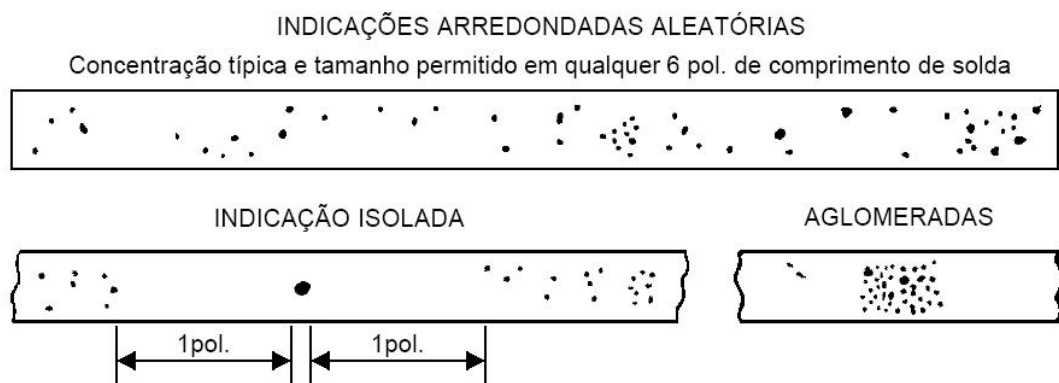


Figura 2.22 – Padrões visuais (figuras) da norma ASME (2001b) que estabelecem o tamanho e a concentração permitida para indicações arredondadas em radiografias de soldas de espessura ( $t$ ) entre 3 a 6 mm.

Os critérios do código ASME (2001a; 2001b) são citados aqui apenas como exemplo, pois ainda há outros códigos (DIN, API, EN, entre outros) que podem

apresentar variações com relação a estes critérios, podendo acrescentar ainda outras exigências. Entretanto, é importante salientar que a comparação da descontinuidade com o padrão estabelecido pelo código é, em geral, realizada visualmente pelo inspetor de solda.

## **2.4) Considerações Finais**

A maioria das juntas soldadas de tubulações em estudo neste trabalho é de soldas fabricadas com reforço de material através de processos de soldagem (SMAW, GTWA ou TIG) por fusão pela ação de um arco elétrico. Este capítulo destacou os tipos de descontinuidades mais comuns em soldas fabricadas por meio de tais processos. Em seguida, foram apresentados os princípios da inspeção de soldas através de ensaios com a utilização de filmes radiográficos. Ao recapitular as técnicas radiográficas e etapas que fazem parte da interpretação das radiografias, destacou-se a necessidade de o inspetor de soldas, além de ser hábil e experiente, possuir uma excelente acuidade visual. Isto não só é necessário para detectar as descontinuidades, mas também para compará-las com os padrões de indicações aceitáveis estabelecidos por normas. Tendo ciência do quanto tal situação pode limitar a confiabilidade do ensaio radiográfico, um dos principais objetivos do presente trabalho é propor novas tecnologias para viabilizar a segmentação automática de imagens radiográficas de solda. Através de tais técnicas, tanto o cordão de solda como os defeitos poderão ser visualizados com maior clareza. Isto, além de facilitar a comparação com os padrões especificados pela norma (ex.: figuras 2.21 e 2.22), favorece a extração de informações mais precisas, visando a caracterização e classificação (automática ou manual) das indicações de descontinuidades.

### 3) ANÁLISE E PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS E ALGORITMOS GENÉTICOS

#### 3.1) Introdução

O objetivo principal deste capítulo é introduzir conceitos fundamentais à compreensão da metodologia proposta nesta tese. Também procura-se esclarecer o significado de termos que são frequentemente referenciados no próximo capítulo, ao revisar técnicas de análise e processamento de radiografias digitais. Após a introdução de conceitos básicos, são apresentadas técnicas de processamento digital de imagens (PDI) com aplicações voltadas ao desenvolvimento do presente trabalho. Em seguida, são feitas algumas considerações sobre segmentação e análise de imagens. Por fim, apresenta-se uma revisão teórica sobre algoritmos genéticos (AGs) e uma breve revisão bibliográfica do emprego de AGs em análise e processamento digital de imagens.

#### 3.2) Imagem Digital

A radiografia, na sua concepção, é puramente uma imagem monocromática (em tons de cinza) onde o brilho em cada ponto está associado à absorção de radiação pelo corpo radiografado (Jain, 1989). Matematicamente, uma imagem monocromática pode ser descrita por uma função ( $f$ ) definida para a região de um plano cartesiano  $xy$  onde  $f(x,y)$  tem, como significado físico, um valor que representa o brilho no ponto  $(x,y)$ , como ilustra a figura 3.1 (Gonzalez e Woods, 2002).



Figura 3.1 – Representação de uma imagem analógica no plano cartesiano  $xy$ .

Uma imagem digital ( $I$ ) é obtida através de um processo de discretização de uma imagem analógica ( $f$ ), no qual duas etapas estão envolvidas: amostragem e quantização (Gonzalez e Woods, 2002). Na amostragem, são selecionados pontos  $(x,y)$  para representar as áreas que compõem a região do plano  $xy$  para a qual  $f$  é definida. Neste processo, as coordenadas de  $x$  e  $y$  são discretizadas para valores inteiros:  $i = 0, 1, \dots, m-1$  e  $j = 0, 1, \dots, n-1$ , respectivamente. Na quantização, as amplitudes dos valores de  $f(x,y)$ , para todo  $x = i$  e  $y = j$ , são convertidos para um conjunto de níveis (tons) de cinza, que variam do preto (nível 0) ao branco (nível  $L-1$ ). Sendo assim, o resultado do processo de discretização é uma matriz ( $I$ ) de dimensões  $m \times n$  onde cada elemento  $(i,j)$ , denominado *pixel* (do inglês *picture element*), representa uma região elementar da imagem analógica ( $f$ ) e o valor  $I(i,j)$  representa a intensidade luminosa na mesma região.

A equação 3.1 mostra que o número de tons de cinza da imagem é limitado pelo tamanho do código binário (número de *bits*:  $l$ ) usado para representá-lo:

$$L = 2^l, \quad (3.1)$$

Quanto ao tamanho do *pixel*, este é definido pela relação entre as dimensões originais de  $f$  e o número de linhas ( $m$ ) e colunas ( $n$ ) de  $I$ . Tal relação, quando medida em pontos (*pixels*) por polegada (*dpi* – do inglês *dots per inch*), define o significado do termo resolução da imagem. Até certo ponto, quanto mais refinado for o processo de amostragem e quantização, melhor a qualidade e a riqueza em detalhes da imagem digital resultante. Por outro lado, tais melhorias exigem mais espaço para armazenagem e esforço computacional no processamento. Além disso, merece consideração o fato de que a capacidade humana de observar pequenas diferenças entre tons de cinza é limitada (Gonzalez e Woods, 2002).

### 3.3) Conceitos Fundamentais do Processamento Digital de Imagens

O processamento digital de imagens (PDI) pode ser definido como o uso de operações matemáticas para alterar o conteúdo de uma ou mais imagens digitais com objetivos que variam desde a restauração ou aprimoramento de aspectos visuais até a preparação de uma imagem para ser analisada por outros processos (Rosenfeld, 2001). A seguir são definidos os termos de PDI utilizados neste trabalho.



- **Histograma**

O histograma de uma imagem é uma função  $h(k)$  que indica ou o número de *pixels* ( $n_k$ ) que apresentam um determinado nível de cinza ( $k$ ) ou a probabilidade, definida pela equação 3.2, desse nível de cinza ocorrer. Geralmente, o histograma é representado por um gráfico de barras, onde a altura de cada barra representa o valor do histograma  $h(k)$  para o nível de cinza correspondente ( $k$ ) (Rosenfeld, 2001).

$$h(k) = n_k / n_T, \quad (3.2)$$

onde:  $n_T$  é a quantidade de *pixels* da imagem ( $n_T = m \times n$ ).

- **Perfis Lineares**

O perfil linear é o gráfico que representa as variações de tons de cinza ao longo de uma linha (perfil horizontal) ou coluna (perfil vertical) da imagem. Na figura 3.2 pode-se visualizar os respectivos perfis horizontal ( $p_f(i)$ ) e vertical ( $p_i(j)$ ), para a linha e a coluna que passam pelo ponto  $(i,j)$  da imagem digital  $I$ . Tais gráficos são construídos com base nas equações 3.3 e 3.4, respectivamente:

$$p_i(j) = I(i,j) \quad (3.3)$$

$$p_f(i) = I(i,j), \quad (3.4)$$

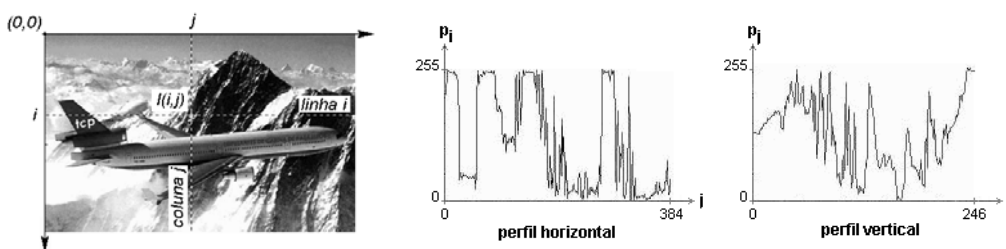


Figura 3.2 – Imagem digital, perfil horizontal e perfil vertical no ponto  $(i,j)$ .

- **Vizinhança de um *pixel***

O termo vizinhança aplica-se a um conjunto de *pixels* caracterizados pela sua posição e proximidade com relação a um determinado *pixel* ( $p$ ) de referência (Gonzalez e Woods, 2002). Por exemplo, considerando apenas os *pixels* adjacentes a  $p = (i,j)$ , pode-se definir 3 tipos principais de vizinhança (ilustradas na figura 3.3):

quatro:  $V_4 = \{(i-1,j), (i,j-1), (i,j+1), (i+1,j)\}$  (3.5)

diagonal:  $V_D = \{(i-1,j-1), (i-1,j+1), (i+1,j-1), (i+1,j+1)\}$  (3.6)

oito:  $V_8 = V_4 \cup V_D$  (3.7)

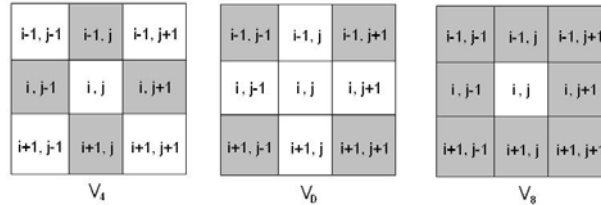


Figura 3.3 – Identificação dos tipos de vizinhança adjacentes ao *pixel*  $p = (i,j)$ .

• **Janela de Imagem**

Às vezes, a vizinhança  $V_8$  também é denominada vizinhança  $3 \times 3$  (Gonzalez e Woods, 2002). Na realidade, tal notação está relacionada ao conceito de janela de vizinhança de um *pixel*. Embora existam várias formas geométricas para as janelas de vizinhança, os exemplos utilizados no presente trabalho se restringem às janelas quadradas ( $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ ) e janelas em formato de cruz (+), como mostra a figura 3.4.

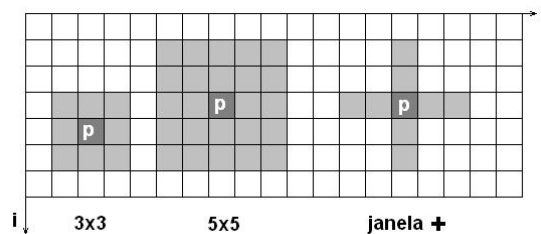


Figura 3.4 – Três exemplos de janelas quadradas e em formato de cruz.

• **Regiões conexas**

O termo região conexa, ou região fechada, está associado ao conceito de conectividade entre *pixels*. Basicamente, um *pixel* estará conectado a outro *pixel* de sua vizinhança adjacente se ambos obedecerem a um determinado critério de similaridade (exemplo: mesmo tom de cinza). O conceito de conectividade também se estende aos *pixels* não adjacentes, mas que, de alguma forma, estão interligados através de uma seqüência de *pixels* conexos (Gonzalez e Woods, 2002).

A figura 3.5 mostra exemplos de regiões conexas. O conjunto de *pixels* da imagem ilustrada na figura 3.5a, que atende ao critério de tons de cinza inferiores a um

limiar específico ( $t$ ), define uma região escura de *pixels* conectados entre si (figura 3.5b). O contorno desta região (fig. 3.5c), por sua vez, pode ser definido pelo conjunto de *pixels*, da mesma região, que atendem ao critério de apresentarem pelo menos 1 *pixel* claro em sua vizinhança  $V_4$ .

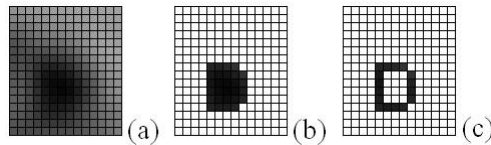


Figura 3.5 – (a) imagem digital; (b) região fechada da imagem com tons de cinza abaixo de um limiar específico  $t$ ; (c) contorno da região fechada.

- **Imagem binária**

Uma imagem binária, na sua concepção, é uma imagem quantizada nos tons preto ou branco. Uma imagem monocromática de 8 bits com *pixels* apenas nos tons de cinza no valor 0 (preto) e no valor 255 (branco) pode ser considerada uma imagem binária. Entretanto, é comum utilizar 0 e 1 para representar os tons branco e preto, respectivamente. A vantagem desta notação binária (0s e 1s) é que apenas 1 *bit* ( $l=1$ ) torna-se suficiente para representar o valor de cada *pixel* (Gonzalez e Woods, 2002).

- **Operações pontuais**

Uma operação pontual consiste em modificar os *pixels* de uma imagem de tal forma que o *pixel* de saída ( $q$ ) dependa apenas do *pixel* de entrada ( $p$ ) e de um operador ( $\lambda$ ). Tal conceito é expresso pela equação 3.8 (Gonzalez e Woods, 2002).

$$q = \lambda(p) \quad (3.8)$$

- **Operações entre imagens**

Nas operações entre imagens, um operador ( $\lambda$ ) é aplicado a dois *pixels* ( $I_1(i,j)$  e  $I_2(i,j)$ ) de imagens diferentes ( $I_1$  e  $I_2$ ) para produzir um terceiro resultado ( $I_3(i,j)$ ). Tal operação é formulada pela equação 3.9.

$$I_3(i,j) = \lambda(I_1(i,j), I_2(i,j)) \quad (3.9)$$

Em operações entre imagens binárias é mais comum o uso de operadores lógicos. A figura 3.6c mostra o resultado da operação lógica NOT sobre a imagem A (figura 3.6a). As figuras 3.6d e 3.6e ilustram os resultados das operações lógicas OR e AND, aplicadas às imagens binárias A e B (figura 3.6b).

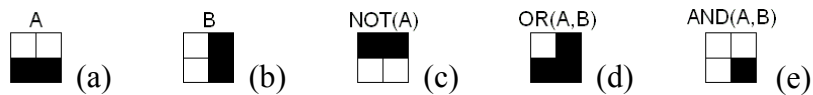


Figura 3.6 – Imagens binárias (a) A e (b) B; (c) Resultado da operação NOT aplicada à imagem A. Resultado das operações (d) OR e (e) AND aplicadas às imagens A e B.

### • Operações orientadas a vizinhança

Nas operações orientadas à vizinhança, o valor atribuído a um *pixel* é, na realidade, uma função de seu nível de cinza e do nível de cinza dos *pixels* de sua vizinhança. Dependendo da natureza da função utilizada, as operações orientadas a vizinhança podem ser classificadas em operações no domínio espacial com filtros lineares ou não-lineares. No caso de filtros lineares, tais operações estão associadas aos termos máscara e convolução.

Considerando-se uma janela de vizinhança para um *pixel* em evidência, pode-se definir uma máscara como sendo uma estrutura com o mesmo formato geométrico da janela, mas que contém coeficientes para serem utilizados em uma operação algébrica envolvendo os *pixels* da vizinhança definida pela máscara. A figura 3.7 ilustra a máscara  $M_{m\acute{e}dia3 \times 3}$  utilizada para calcular o valor médio da vizinhança  $V_8$  do *pixel* p.

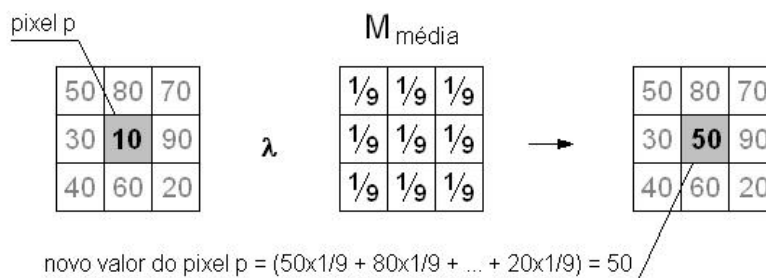


Figura 3.7 – Operação da máscara  $M_{m\acute{e}dia3 \times 3}$  aplicada ao *pixel* p.

O conceito de convolução está associado ao deslocamento de uma máscara sobre a imagem, desde o seu canto superior esquerdo até o seu canto inferior direito. A convolução de uma máscara  $M_{a \times a}$  com a uma imagem  $I_1$ , resulta em outra imagem ( $I_2$ ), onde o valor ( $I_2(x,y)$ ) de cada *pixel* ( $i,j$ ) da nova imagem é definido pela equação 3.10.

$$I_2(i, j) = \sum_{m=-b}^b \sum_{n=-b}^b M_{a \times a}(m, n) \cdot I_1(i + m, j + n), \quad (3.10)$$

onde:  $a$  é ímpar e  $b = (a-1)/2$

Esta expressão pode ser obtida a partir da convolução bidimensional discreta (equação 3.11) entre as funções  $f(i, j)$  e  $g(i, j)$  (Jain *et al.*, 1995).

$$f(i, j) * g(i, j) = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^m f(k, l) \cdot g(i - k, j - k), \quad (3.11)$$

Além das convoluções com máscara, existem outros tipos de operações não-lineares orientadas a vizinhança. Nesta categoria, encaixam-se os filtros da mediana, filtro de máximo, filtro de mínimo, entre outros (Gonzalez e Woods, 2002). Alguns exemplos de filtros digitais são detalhados na próxima secção.

- **Transformações geométricas**

Uma imagem pode ser modificada geometricamente de várias maneiras. Alguns exemplos são: translação, rotação e mudança de escala. De acordo com Jain (1989), tais transformações podem ser obtidas através de uma operação com matrizes aplicadas às coordenadas  $(i, j)$  de cada *pixel* da imagem, conforme mostra a equação 3.12.

$$\begin{bmatrix} i' \\ j' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i \\ j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}, \quad (3.12)$$

onde:  $i'$  e  $j'$  são as novas coordenadas do ponto  $(i, j)$ ;

$a, b, c, d, \alpha$  e  $\beta$  são os coeficientes da transformação, definidos na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Coeficientes de transformações geométricas com imagens

	rotação	escala em $x$	escala em $y$	translação	todas as operações
$a$	$\cos(\theta)$	$s_v$	0	0	$s_v \cos(\theta)$
$b$	$\text{sen}(\theta)$	0	$s_h$	0	$s_v \text{sen}(\theta)$
$c$	$\cos(\theta)$	$s_v$	0	0	$s_h \cos(\theta)$
$d$	$-\text{sen}(\theta)$	0	$s_h$	0	$-s_h \text{sen}(\theta)$
$\alpha$	0	0	0	$y_0$	$y_0$
$\beta$	0	0	0	$x_0$	$x_0$

### 3.4) Técnicas de PDI para Algumas Aplicações Específicas

O processamento digital de imagens fornece ferramentas para serem empregadas em diversas aplicações. De interesse especial ao desenvolvimento desta tese são técnicas de PDI para aprimoramento do contraste, atenuação do nível de ruído, detecção de bordas, limiarização e casamento de protótipos. A seguir, técnicas que foram empregadas no presente trabalho são fornecidas como exemplo. Vale ressaltar que o foco principal desta secção não é justificar a aplicação de tais técnicas, mas descrever o seu funcionamento.

#### 3.4.1) Atenuação do Ruído pelo Filtro da Mediana

O filtro da mediana é uma operação orientada à vizinhança do *pixel*, onde o valor atribuído a este corresponde ao valor mediano de sua vizinhança, incluindo o próprio *pixel*. A mediana, ou valor mediano, corresponde ao valor central de uma seqüência de números ordenados. Por exemplo, considerando a vizinhança 3×3 do *pixel* em análise, mostrado na figura 3.8, a seqüência ordenada dos valores dos *pixels* é: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90. Neste caso, o valor central (mediana) é 50, pois este é o 5º de uma seqüência de 9 números. Assim, o filtro da mediana é aplicado a todos os *pixels* como na convolução de uma máscara sobre a imagem. Uma das principais características do filtro da mediana é o seu efeito mais brando em borrar as regiões de contorno de objetos (Gonzalez e Woods, 2002).

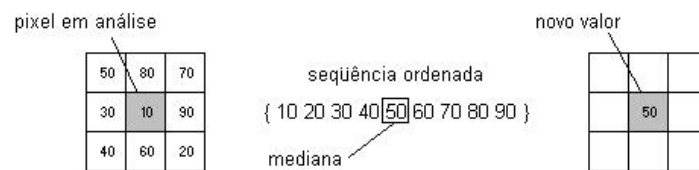


Figura 3.8 – Filtro da mediana com janela 3×3.

#### 3.4.2) Aprimoramento do Contraste

Um tipo de dado que pode fornecer informações qualitativas sobre o contraste é o histograma da imagem (Gonzalez e Woods, 2002). Uma das técnicas mais simples

para melhorar o contraste é atuar de forma a expandir o histograma da imagem. Para uma imagem de 8 bits (256 níveis de cinza) isto pode ser realizado através da adequação dos valores dos *pixels* para o intervalo [0 255], conforme a equação 3.13.

$$q = 255 (p - p_{\min}) / (p_{\max} - p_{\min}), \quad (3.13)$$

onde:  $q$  é o *pixel* de saída,

$p$  é o *pixel* de entrada,

$p_{\max}$  e  $p_{\min}$  são, respectivamente, o maior e o menor valor dentre os *pixels* da imagem de entrada.

Uma outra maneira de aumentar o contraste é através da equalização do histograma. O objetivo de tal operação é redistribuir os níveis de cinza de maneira mais uniforme, o que é realizado através da função discreta de distribuição acumulada  $s_k$ , definida pela equação 3.14 (Gonzalez e Woods, 2002):

$$s_k = \sum_{j=0}^k \left( \frac{n_j}{n_T} \right), \text{ para } 0 \leq n_j \leq n_T \text{ e } k=0, 1, \dots, L-1 \quad (3.14)$$

onde:  $s_k$  corresponde ao novo valor a ser atribuído aos *pixels* de tom de cinza  $k$ ,

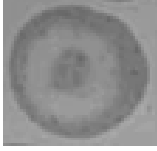
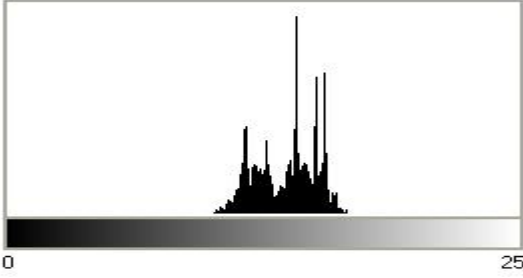
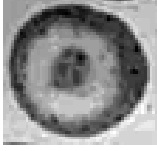
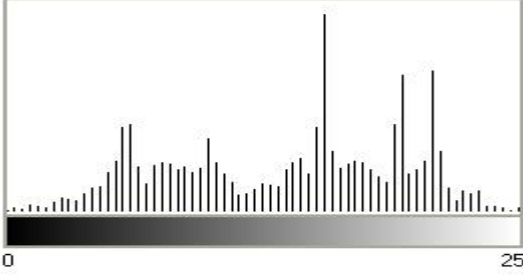
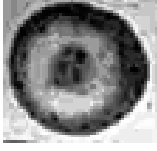
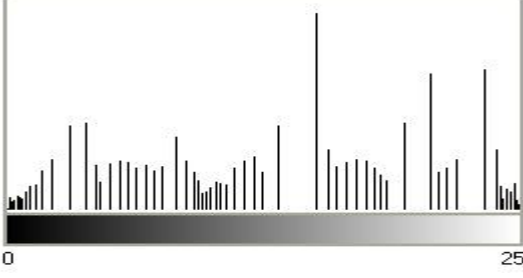
$n_j$  é a quantidade de *pixels* no tom de cinza  $j$ ,

$n_T$  é o total de *pixels* na imagem,

$(n_j/n_T)$  é a probabilidade de um *pixel* qualquer ser no tom de cinza  $j$ .

A tabela 3.2 permite visualizar o resultado da expansão e equalização do histograma para uma imagem de baixo contraste. Vale ressaltar que a expansão e equalização do histograma não são as únicas operações utilizadas para aprimorar o contraste através da modificação do histograma da imagem. Existem diversas operações que podem ser utilizadas para especificar o histograma da imagem de modo a realçar determinadas faixas de níveis de cinza. Tanto Gonzalez e Woods (2002), como Jain (1989), introduzem conceitos e definições sobre operações de especificação de histogramas.

Tabela 3.2 – Aprimoramento do contraste através da modificação do histograma

Imagem	Histograma
<p data-bbox="384 338 557 367">Image Original</p> 	
<p data-bbox="320 613 624 687">Imagem após a Expansão do Histograma</p> 	
<p data-bbox="304 911 636 985">Imagem após a Equalização do Histograma</p> 	

### 3.4.3) Detecção de bordas

Gonzalez e Woods (2002) definem o termo borda como sendo o limite entre duas regiões com propriedades relativamente distintas de níveis de cinza. Segundo Jain (1989), os *pixels* localizados nas bordas são normalmente caracterizados por mudanças abruptas de intensidade. Por isso é comum a utilização de técnicas para detecção de bordas com base no gradiente, chamados detectores de bordas diferenciais (Martins, 1992).

O filtro *Sobel*, utilizado em metodologias testadas no presente trabalho, encaixa-se nesta categoria. Este filtro produz o realce das bordas dos objetos presentes na imagem. Segundo Gonzalez e Woods (2002), o filtro *Sobel* é caracterizado pela convolução de 2 máscaras  $3 \times 3$  ( $M_x$  e  $M_y$ ) com a imagem de entrada ( $I_1$ ). Os coeficientes das máscaras podem ser visualizados na figura 3.9. Como resultado preliminar destas operações, obtêm-se as duas imagens  $I_x$  e  $I_y$ , conforme as equações (3.15) e (3.16), com



base na definição de convolução dada anteriormente (equação 3.10). A imagem ( $I_2$ ) de saída do filtro *Sobel* é uma composição das imagens  $I_x$  e  $I_y$ , com base na equação (3.17)

$$I_x(i, j) = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 M_x(m, n) \cdot I_1(i + m, j + n), \quad (3.15)$$

$$I_y(i, j) = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 M_y(m, n) \cdot I_1(i + m, j + n), \quad (3.16)$$

$$I_2(i, j) = \sqrt{I_x^2(i, j) + I_y^2(i, j)} \quad (3.17)$$

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

$M_x$

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

$M_y$

Figura 3.9 – Máscaras usadas no filtro *Sobel*. (Gonzalez e Woods, 2002)

#### 3.4.4 Limiarização

Quando entidades de uma imagem (fundo e objetos) diferem entre si pela luminosidade, *pixels* pertinentes a diferentes entidades estarão em faixas limitadas por diferentes níveis de cinza. Se estas faixas forem bem definidas é possível distinguir as regiões de interesse (objetos) através da limiarização.

Este processo consiste em comparar os níveis de cinza dos *pixels* de uma imagem a um valor referencial (limiar) e então classificá-los. O resultado da limiarização é uma imagem binária, onde os *pixels* de valor inferior ao limiar são classificados como escuros e os demais como claros.

Embora a limiarização possa parecer uma operação bastante simples, para que este processo ocorra de forma adequada, é necessário que o valor do limiar seja escolhido de maneira conveniente. E para isso existem diversas técnicas automáticas. Basicamente, se apenas um único limiar é utilizado para toda a imagem, a limiarização é denominada global (Pal e Pal, 1993). Por outro lado, quando a imagem é dividida em várias sub-imagens e um limiar específico é designado a cada sub-região, a limiarização é denominada local, ou adaptativa.

Para uma aplicação idêntica à utilizada no presente trabalho, Schneider (2005) comparou resultados obtidos a partir de quatro técnicas de limiarização (Otsu (1979), Kittler e Illingworth (1986), Kapur *et al.* (1985) e Sezgin e Sankur (2003)) e, para todas as situações testadas, os resultados melhores foram obtidos com o método de Kapur *et al.* (1985). Tal método encaixa-se na descrição de técnicas de limiarização global baseadas na entropia. O termo entropia, em sua concepção, está associado a uma medida de desordem ou incertezas para um conjunto de informações. A entropia é máxima quando todos os elementos de um conjunto têm a mesma probabilidade de ocorrer (Duda *et al.*, 2001). O princípio da limiarização de Kapur *et al.* (1985) envolve encontrar o limiar  $T$ , para dividir a imagem em dois grupos (supostamente fundo e objeto), de modo que a soma das entropias dos dois grupos seja a máxima possível – conceito expresso pela equação 3.18. O conceito de entropia usado por Kapur *et al.* (1985), para o objeto ( $H_b$ ) e para o fundo ( $H_w$ ), é expresso pelas equações 3.19 e 3.20, respectivamente.

$$\psi(T) = \text{MAX} \{H_b(T) + H_w(T)\} \quad (3.18)$$

$$H_b(T) = - \sum_{i=1}^T \frac{p_i}{P_0} \log \frac{p_i}{P_0}, \quad (3.19)$$

$$H_w(T) = - \sum_{i=T+1}^G \frac{p_i}{P_1} \log \frac{p_i}{P_1}, \quad (3.20)$$

sendo:

$$P_0 = \sum_{i=1}^T p_i, \quad P_1 = \sum_{i=T+1}^G p_i, \quad \text{e} \quad P_0 + P_1 = 1$$

onde:

$p_i$  representa a probabilidade do nível de cinza  $i$  ser encontrado na imagem,

$G$  representa o número de intensidades de cinza da imagem.

### 3.4.5 Casamento de protótipos (*template matching*)

De acordo com Jain *et al.* (1995), em algumas situações, é viável detectar e abstrair regiões da imagem com base na comparação com uma imagem modelo (protótipo, máscara, *template*) de um objeto conhecido. Tal procedimento, denominado casamento de protótipos (*template matching*) em (Gonzalez e Woods, 2002), envolve

deslocar a máscara do objeto sobre a imagem buscando encontrar a localização onde ocorre uma melhor combinação ou “casamento” (*matching*) entre a máscara e a imagem em análise (Jain, 1989).

Um valor de dissimilaridade pode ser calculado para avaliar o casamento entre a máscara e a região (sub-imagem) da imagem a ela sobreposta. A medida de dissimilaridade ( $d$ ) entre uma máscara ( $g(i,j)$ ) e uma sub-imagem ( $f(i,j)$ ) pode ser calculada de diversas formas (Jain *et al.*, 1995):

$$d(f, g) = \max_{(i,j) \in R} |f - g|, \quad (3.21)$$

$$d(f, g) = \sum_{(i,j) \in R} |f - g|, \quad (3.22)$$

$$d(f, g) = \sum_{(i,j) \in R} (f - g)^2, \quad (3.23)$$

onde:  $R$  é a região da máscara

O objetivo principal desta técnica é encontrar os pontos da imagem onde a dissimilaridade ( $d$ ) é inferior a um limiar específico ( $T$ ). Isto pode ser realizado trasladando-se a máscara sobre a imagem, calculando, a cada ponto da imagem, a dissimilaridade ( $d$ ) e comparando-a com o limiar especificado ( $T$ ). A figura 3.10d ilustra o resultado desta operação para o modelo (máscara), ampliado na figura 3.10a, e para a imagem em análise (figura 3.10b). Note que na figura 3.10c estão indicados os pontos onde ocorreu casamento ( $d < T$ ). Com base na localização desses pontos, pode-se extrair os objetos encontrados na imagem, conforme ilustrado na figura 3.10d.

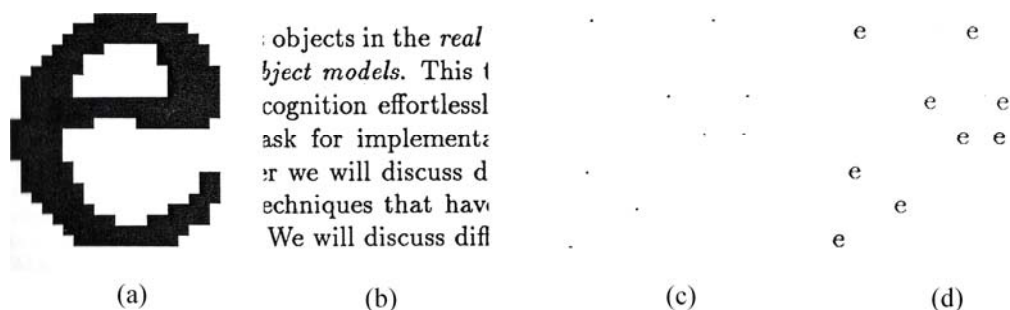


Figura 3.10 – (a) Máscara (*template*) ampliada; (b) Imagem em análise; (c) Pontos detectados; (d) Objetos localizados na imagem. (Jain *et al.*, 1995)

Uma das aplicações desta técnica é a verificação da presença de objetos ou formas conhecidas em uma imagem. Jain (1989) aponta a possibilidade de se utilizar rotação e mudança de escala para incrementar tal verificação. Entretanto, tanto Jain *et al.* (1995) como Jain (1989), advertem que tais possibilidades são limitadas e podem conduzir o problema a uma busca exaustiva, impraticável em tempo hábil.

### **3.5) Algumas Considerações sobre Segmentação e Análise de Imagens**

A análise de imagens, diferente do processamento digital de imagens, envolve operações que, quando aplicadas à imagem, resultam em uma informação descritiva sobre ela, e não apenas outra imagem modificada. Isto gera um nível de complexidade maior, pois a informação resultante geralmente depende de decisões baseadas em critérios heurísticos, para os quais não há uma teoria matematicamente bem definida (Rosenfeld, 2001). Em geral, um problema de análise de imagens é, ou pelo menos está, estreitamente relacionado a um problema de reconhecimento de padrões, tendo inclusive as mesmas etapas principais (Duda *et al.*, 2001):

1. Segmentação
2. Extração de características
3. Classificação

É digno de nota que a segmentação é um dos problemas mais complexos, tanto em análise de imagens (Jain *et al.*, 1995) como na área de reconhecimento de padrões (Duda *et al.*, 2001). Uma maneira de tratar o problema é realizar a segmentação em vários níveis, adotando técnicas de reconhecimento de padrões em níveis onde é mais difícil assegurar que o resultado da segmentação esteja correto. Por exemplo, no sistema para reconhecimento de objetos proposto por Costa e Shapiro (2000), a segmentação começa com a aplicação de um detector de bordas e termina com a identificação de formas primitivas como arcos e segmentos de retas. Só então, características são extraídas para a classificação dos objetos.

No caso da análise de defeitos em radiografias de soldas, pode ser necessário detectar e classificar características da imagem que permitam primeiro segmentar corretamente a região que corresponde ao cordão de solda, como em (Liao e Tang, 1997). Os defeitos são, portanto, segmentados em um segundo nível. Porém, ainda pode

haver a necessidade de usar classificadores de padrões para distinguir defeitos reais de falsos alarmes, como em (Mery e Berti, 2003). Considerando tais dificuldades, é comum a utilização de classificadores de padrões para detectar o cordão de solda e segmentar os defeitos, antes mesmo de classificá-los. No capítulo 4 são comentados diversos trabalhos em que os autores recorrem a redes neurais artificiais e/ou sistemas *fuzzy* para tais aplicações.

### **3.6) Algoritmos Genéticos (AG's)**

Os Algoritmos Genéticos (AGs), propostos inicialmente por Holland (1975), são técnicas de busca e otimização inspiradas em mecanismos de seleção natural e em fundamentos da genética. Por serem técnicas eficazes de busca e otimização, os algoritmos genéticos têm sido utilizados em várias aplicações nas áreas de engenharia e computação (Goldberg, 1989). Segundo Tanomaru (1995), as principais vantagens dos AG's em relação a outros métodos de otimização são:

- simplicidade de operação;
- operação num conjunto de soluções, e não a partir de um ponto isolado;
- eficácia na busca da região espacial onde, provavelmente, se encontra a solução ótima;
- aplicáveis em situações onde não se conhece o modelo matemático ou este é impreciso;
- aplicáveis em funções lineares e não-lineares;
- utilização de transições probabilísticas, e não regras determinísticas;
- operação sobre um espaço de soluções codificadas, e não no espaço de busca diretamente.

Em geral, um problema de otimização consiste em buscar valores para as variáveis de uma função, denominada função objetivo, de forma a maximizá-la ou minimizá-la. Cada conjunto de valores possíveis para as variáveis da função objetivo corresponde a uma solução individual que não precisa ser necessariamente a solução ótima. Em AGs, parte-se de um conjunto de soluções individuais codificadas, as quais são tratadas como indivíduos de uma população. Estes indivíduos são avaliados através

de um valor (*fitness* ou adequabilidade), usualmente entre 0 e 1, que expressa o quanto determinada solução é adequada para a função objetivo. Copiando o modelo biológico, indivíduos de uma população são selecionados de tal maneira a privilegiar as melhores soluções em detrimento das piores. Os indivíduos selecionados são submetidos a modificações probabilísticas através de "operadores genéticos", como recombinação (*crossover*) e mutação. Como resultado, uma nova geração de indivíduos é criada, substituindo a anterior. O mesmo processo (avaliação das soluções, seleção de indivíduos e atuação dos operadores genéticos) se repete para cada nova geração criada, até que se alcance um critério de parada pré-estabelecido. Ao longo de um determinado número de gerações, é possível que soluções muito boas sejam geradas ou que a solução ótima venha a ser encontrada (Whitley, 1994).

Na figura 3.11 pode-se visualizar as etapas de um procedimento de otimização usando AGs. Tal fluxograma é baseado no modelo de Algoritmo Genético Simples (SGA – *Simple Genetic Algorithm*), proposto por Goldberg (1989). Os principais pontos que precisam ser considerados ao empregar esta técnica para problemas reais são tratados separadamente nos próximos itens desta secção.

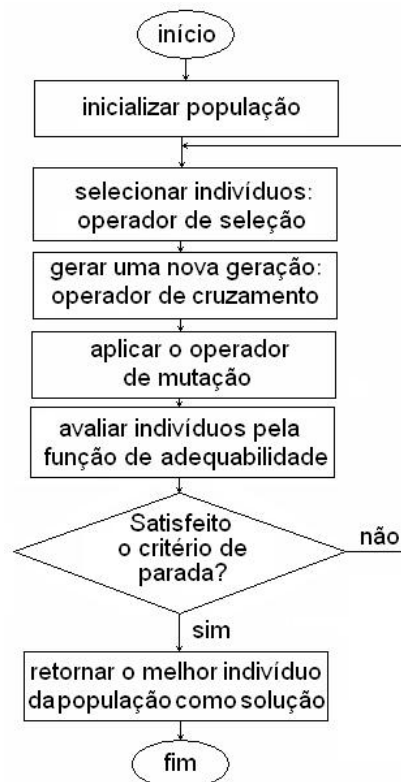


Figura 3.11 – Fluxo básico de um algoritmo genético.

### **3.6.1) Codificação de soluções**

Uma vez que cada indivíduo da população deve representar uma possível solução, o primeiro passo para a utilização de AG's é a codificação de soluções. A escolha da codificação depende essencialmente de cada problema. Segundo Michalewicz (1996), os AG's são capazes de operar com qualquer codificação: números reais, matrizes ou mesmo listas encadeadas. Entretanto, conforme destacado por Goldberg (1989), a codificação mais comum é a representação numérica em binário. Neste tipo de codificação, cada indivíduo (solução) é composto de uma estrutura binária de cadeias (*strings*) de *bits* (alelos ou genes), cada qual representado uma variável do problema.

### **3.6.2) Inicialização**

A operação do AG começa com a geração de uma população inicial de indivíduos. Para esta etapa é possível utilizar algum conhecimento sobre a natureza do problema para gerar indivíduos que sejam soluções “adequadas”. Entretanto, isto pode concentrar a busca em uma região mais restrita do espaço de soluções, impedindo o algoritmo de obter soluções melhores que as existentes na população inicial. Por este motivo, o método mais utilizado é a geração aleatória de indivíduos, pois esta opção normalmente promove a geração de uma população inicial com uma maior variedade de soluções para o problema. Isto é importante, uma vez que uma maior diversidade de indivíduos aumenta a probabilidade de se encontrar soluções próximas ao ótimo global (Goldberg, 1989).

Conforme observado por Fabro (2004), que utilizou AGs em problemas de otimização em automação e controle, o tamanho da população utilizada pelo algoritmo genético é um parâmetro que deve ser definido levando-se em conta dois critérios: cobertura do espaço de busca da solução do problema e tempo computacional. Quanto maior for o tamanho da população (em número de indivíduos), maior poderá ser a diversidade genética existente. Entretanto, populações muito grandes podem levar a um elevado tempo de processamento do algoritmo. Deste modo, é importante obter um compromisso entre estes dois critérios para definir este parâmetro.

### 3.6.3) Função de Adequabilidade (*fitness*)

Haja visto que cada indivíduo da população representa uma solução possível, faz-se necessário recorrer a alguma medida de qualidade dos indivíduos para discriminar as melhores soluções das piores. Esta medida de qualidade (em relação à solução para o problema) é conhecida como *fitness* e pode ser calculada através de uma função, denominada função de adequabilidade (ou função de *fitness*). A função de adequabilidade, por sua vez, deve ser definida com base na função que se deseja otimizar (função objetivo), de modo a fornecer um valor, entre 0 e 1 (reais), que represente o quanto determinada solução é adequada ao problema. Em geral, o algoritmo genético procura obter indivíduos que possuam a avaliação máxima (*fitness* =1). Sendo assim, o cálculo do *fitness* é considerado um ponto crítico para o algoritmo, já que, em última análise, é a função de *fitness* que está sendo otimizada (Goldberg, 1989).

### 3.6.4) Método de Seleção

O mecanismo de seleção é responsável por emular os processos de reprodução sexuada e seleção natural. Em princípio, quanto maior for a prioridade dada à seleção de indivíduos de maior *fitness*, tanto mais se espera que a convergência da busca ocorra em menos tempo. Mas, embora isto seja desejável, a velocidade de convergência da busca não deve ser o único critério a ser considerado na escolha de um método de seleção adequado. Este parâmetro deve ser avaliado porque quando apenas os indivíduos de alto *fitness* têm chances de serem selecionados, também aumenta a possibilidade da busca ser conduzida a uma situação de baixa diversidade na população, resultando na convergência prematura para soluções distantes do ótimo global. Segundo Bäck e Hoffmeister (1991), tal situação pode ocorrer quando a função a ser otimizada é multimodal.

O método de seleção mais conhecido é o método roleta (*roulette*). Segundo Goldberg (1989) este método consiste em fazer a probabilidade de seleção ser diretamente proporcional à adequabilidade de cada indivíduo. Uma variação deste método, também discutida por Goldberg (1989), é o torneio estocástico, que consiste em escolher dois indivíduos pelo método roleta e, então, optar pelo indivíduo de maior



*fitness*. Segundo Wall (2003), o método torneio é mais seletivo, ou seja, seleciona indivíduos de maior *fitness* com mais frequência que o método roleta. Entretanto, é importante ressaltar que ambos são métodos probabilísticos e, em geral, não eliminam completamente a possibilidade de indivíduos de baixo *fitness* serem selecionados. No presente trabalho, estes dois métodos são testados e comparados entre si quanto ao desempenho para o problema em estudo nesta tese.

### 3.6.5) Recombinação (*Crossover*)

Uma vez selecionados os indivíduos que propagarão suas características para a próxima geração, deve ser realizado o processo de recombinação. Este processo é realizado pelo operador de recombinação, que emula a função da reprodução sexuada, isto é, combina os genes de dois indivíduos, gerando um descendente com características herdadas de dois indivíduos originais.

Existem vários tipos de operadores de recombinação, sendo os mais comuns a “recombinação de um ponto” e a “recombinação uniforme” (ou múltiplos pontos). Na recombinação de um ponto, para a codificação binária, é selecionado um ponto intermediário de corte das codificações dos indivíduos, e os genes são recombinados gerando até dois indivíduos descendentes, como apresentado na figura 3.12 (Goldberg, 1989).

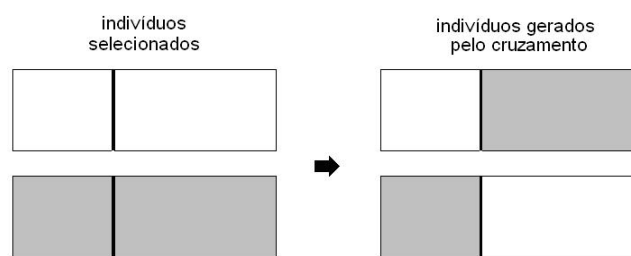


Figura 3.12 – Exemplo de recombinação de um ponto.

Na recombinação uniforme, os genes são selecionados individualmente, e cada gene possui a mesma probabilidade de estar presente em cada descendente gerado. Um exemplo da aplicação deste operador para a geração de dois descendentes é apresentado na figura 3.13. É importante observar que, com a aplicação deste operador, as

possibilidades para formação de novos indivíduos são mais diversificadas (Goldberg, 1989).

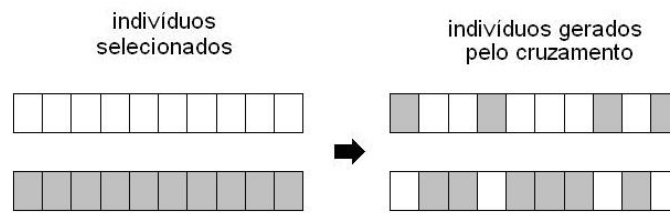


Figura 3.13 – Exemplo de recombinação uniforme.

O processo de recombinação é controlado por um parâmetro que define a probabilidade de sua aplicação, e deve continuar até que se obtenham indivíduos suficientes para compor a nova geração. Caso o operador não seja executado, os dois indivíduos selecionados são copiados para a nova população, mantendo suas características inalteradas.

Uma variação do algoritmo, denominada *elitista*, permite que os  $N$  melhores indivíduos de uma população sejam mantidos inalterados na população seguinte, impedindo deste modo que as melhores soluções deixem de existir devido à sua recombinação. Outra estratégia comum é armazenar numa memória auxiliar o melhor indivíduo já localizado, evitando que esta informação se perca no decorrer das gerações (Goldberg, 1989).

### 3.6.6) Mutação

A mutação é responsável por alterar aleatoriamente os genes dos indivíduos. Isto é necessário porque a recombinação só consegue obter a melhor combinação dentre os genes presentes em uma determinada população de soluções. Se, todavia, um gene específico que comporia a solução ótima não se encontra na população inicial, este gene nunca seria gerado, e a solução ótima nunca poderia ser encontrada. O operador de mutação insere modificações aleatórias nos genes, criando o potencial para que novas soluções inexistentes na população apareçam. Em estudos mencionados por Goldberg (1989), o bom desempenho do AG requer uma alta probabilidade de recombinação e baixa probabilidade de mutação (crescendo inversamente ao tamanho da população).

Um exemplo de mutação é apresentado na figura 3.14. Neste exemplo, apenas um dos genes foi alterado.

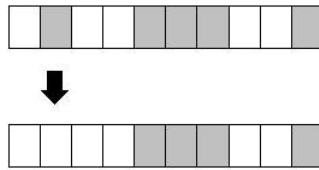


Figura 3.14 – Exemplo de mutação.

### 3.6.7) Critério de Parada

O algoritmo genético gera sucessivas gerações de indivíduos, até que seja satisfeito o seu critério de parada. O critério ideal seria que o algoritmo somente finalizasse sua execução ao encontrar a solução ótima. Na maioria dos casos, entretanto, não existe uma maneira de identificar a solução ótima. Nestas situações, são utilizados critérios, tais como um número fixo de gerações, ou um tempo de processamento máximo. Entretanto, é possível parar o processo antes destes limites fixos, ao se levar em conta o modo de funcionamento do algoritmo. As soluções com as melhores avaliações possuem uma maior probabilidade de repassarem seus genes para gerações futuras, devido ao processo de recombinação. Deste modo, é possível que os genes destas boas soluções se repliquem por todos os indivíduos da população, gerando uma convergência. Portanto um outro critério de parada é a convergência da população, isto é, quando todos os indivíduos da população são cópias idênticas da mesma seqüência de genes, codificando desta forma a mesma solução. Nesta situação, a probabilidade de melhora da população fica toda a cargo do operador de mutação, e todas as operações de recombinação se tornam sem efeito. Neste caso, em que a diversidade é mínima, pode-se determinar o final do algoritmo (Goldberg, 1989).

### 3.7) Utilização de Algoritmos Genéticos em Segmentação de Imagens

Pal e Pal (1993), que apresentaram uma revisão bibliográfica de técnicas de segmentação de imagens, destacaram o fato de ainda não haver um método universal de segmentação automática de imagens (Pal e Pal, 1993). Conforme mencionado por Mery

e Silva (2007), este problema persiste na área da segmentação de imagens radiográficas de soldas.

Muitas vezes, a utilização de um único método de segmentação, mesmo em aplicações bem semelhantes, fica atrelada a incertezas quanto ao ajuste de diversos parâmetros, que podem variar em um grande espaço de soluções. Assim, ao invés de tentar propor uma técnica universal de segmentação de imagens, Bhanu *et al.* (1995a; 1995b) utilizaram AGs para propor um método de ajuste automático de parâmetros para otimizar (ou adaptar) o desempenho de sistemas voltados à segmentação de imagens. Mais tarde Bhanu e Peng (2000) integraram esta metodologia a um sistema de reconhecimento de objetos. Um exemplo mais recente do emprego de AGs para otimizar os resultados da segmentação, é o de trabalho desenvolvido por Bocci *et al.* (2005), que propõe um modelo de algoritmo genético para encontrar uma solução ótima para o agrupamento de *pixels* de uma imagem.

Um campo onde se tem desenvolvido pesquisa com diversas aplicações em segmentação e análise de imagens é o estudo de técnicas de registro de imagens. Este termo é usado para se referir a tarefa de estabelecer relações de semelhanças entre imagens. Tais relações, porém, geralmente são estabelecidas através de transformações geométricas que envolvem o cálculo de muitos coeficientes. Os primeiros pesquisadores a utilizarem AGs com a finalidade de otimizar a escolha de tais coeficientes foram Fitzpatrick *et al.* (1984), que trabalharam com registro de imagens médicas. Desde então muitos trabalhos têm seguido a mesma linha de pesquisa visando outras aplicações, como, por exemplo, o reconhecimento de formas (Tsang, 1997; Simunic e Loncaric, 1998; Khoo e Suganthan, 2002) e correlação entre imagens de superfícies tridimensionais (Silva *et al.* 2005).

Quanto a utilização de AGs em segmentação de imagens radiográficas industriais, pode-se citar trabalhos voltados a otimização da detecção do contorno de defeitos de soldagem (Aoki *et al.*, 1999; Aoki e Suga, 2000) e uma técnica de limiarização, proposta recentemente por Wang e Wong (2005), visando a segmentação de defeitos. Tais trabalhos, entretanto, se restringem a segmentação de defeitos, não sendo abordado o problema da detecção do cordão de solda. Desta forma, pode-se afirmar que os trabalhos publicados em função do desenvolvimento desta tese estão entre os trabalhos precursores no uso de algoritmos genéticos em segmentação de cordões de solda em imagens radiográficas industriais.

## **4) AQUISIÇÃO, PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE RADIOGRAFIAS DIGITAIS DE SOLDAS**

### **4.1) Introdução**

A revisão bibliográfica apresentada neste capítulo está organizada sob os seguintes tópicos principais:

- Aquisição da Radiografia Digital
- Pré-processamento
- Segmentação do Cordão de Solda
- Segmentação de Defeitos
- Extração de Características e Classificação de Defeitos

A inspeção com radiografia digital começa com a aquisição da imagem em um formato próprio para leitura e processamento por um computador. Isto pode ser realizado através da digitalização de filmes radiográficos, sistemas de radiografia computadorizada, sistemas baseados em telas fluorescentes ou, ainda, por meio de placas para captura direta da imagem digital. As imagens que foram disponibilizadas para os estudos desta tese foram obtidas ou através da digitalização de filmes ou por um sistema de radiografia computadorizada. A revisão bibliográfica que trata desse assunto se limita, portanto, a considerações sobre estas duas técnicas apenas.

Uma vez que a radiografia esteja disponível em formato digital, esta pode ser processada em um computador com a finalidade de melhorar a qualidade da imagem e, assim, facilitar a visualização de informações relevantes. Um dos tópicos desta revisão bibliográfica é dedicado a considerar as alternativas para contornar dois problemas característicos de radiografias digitais de soldas: baixo contraste e presença de ruído.

A segmentação de imagens radiográfica de soldas é o foco principal desta revisão bibliográfica. Os trabalhos pesquisados foram agrupados sob os temas:

- Segmentação do Cordão de Solda
- Segmentação de Defeitos

Em quase todos os trabalhos incluídos nesta pesquisa, tais tópicos também são tratados separadamente e há pelo menos duas justificativas para isto. Primeiro, a segmentação direta dos defeitos seria uma tarefa muito difícil para ser desempenhada automaticamente, pois, conforme visto na seção 2.3.3, a imagem radiográfica da junta soldada possui não apenas o cordão de solda, mas também outros objetos que podem interferir na correta detecção dos defeitos. O segundo motivo é o fato de que, ao se detectar o cordão de solda antes, pode-se estabelecer uma referência ao posicionamento dos defeitos detectados, o que é uma informação importante para classificá-los ou distinguí-los de outros defeitos. Somam-se a estas duas justificativas o fato de que, uma vez que os itens de interesse estão no cordão ou nas imediações deste, detectá-lo primeiro é uma estratégia que permite diminuir consideravelmente o volume de informações a ser processado sem prejudicar a qualidade da análise.

Embora a caracterização e a classificação de defeitos de soldagem não seja o principal foco desta pesquisa, considera-se que o objetivo principal da segmentação é assegurar condições para que tais tarefas sejam realizadas corretamente. Portanto, julgou-se importante incluir uma breve revisão dos trabalhos que tratam da extração de características e classificação de defeitos em soldas, com o objetivo de destacar pontos relevantes e apontar diretrizes para trabalhos futuros. No final deste capítulo, são apresentadas algumas considerações sobre pontos desta revisão bibliográfica de significativa importância ao desenvolvimento desta tese.

## **4.2) Aquisição da Radiografia Digital**

A seguir são descritas as técnicas de aquisição de radiografias digitais utilizadas na obtenção das radiografias que foram disponibilizadas ao estudo desta tese.

### **4.2.1) Digitalização de Filmes Radiográficos**

Como destacado no capítulo 2, a verificação visual dos filmes radiográficos é realizada por meio de equipamentos de iluminação de fundo, denominados negatoscópios. A luz que atravessa o filme permite visualizar o contraste entre as regiões claras e escuras que formam a imagem do objeto radiografado. Tal imagem é analógica e, portanto, para ser processada em um computador, necessita ser convertida

para o formato digital. Para isso são utilizados sistemas e técnicas apropriados para digitalização de filmes radiográficos. A norma ASME V, que rege o exame radiográfico, também fornece diretrizes à digitalização de radiografias.

Segundo Zscherpel (2000), os atuais *scanners* utilizados em aplicações médicas não são apropriados para digitalização de filmes radiográficos industriais. Coerente com esta observação, constatou-se através do levantamento bibliográfico realizado que, na maioria dos trabalhos com radiografia digital de soldas, os autores recorreram ao uso de *scanners* especiais de alta resolução, próprios para digitalização de filmes radiográficos industriais. Tais equipamentos diferem dos *scanners* convencionais por virem munidos de um sistema de iluminação de fundo, de modo que a luz, atravessando o filme, é detectada eletronicamente por um dispositivo de acoplamento de carga (*Charge-Coupled Device* - CCD), localizado na parte inferior do equipamento (ver figura 4.1a). Outra opção para digitalização de radiografias, porém com qualidade de imagem muito inferior às obtidas com *scanner*, é o uso de câmera com dispositivo CCD. Basicamente, no lugar do observador humano, a câmera é instalada para capturar a imagem do filme já posicionado no negatoscópio. Um esquema desta técnica é ilustrado na figura 4.1b.

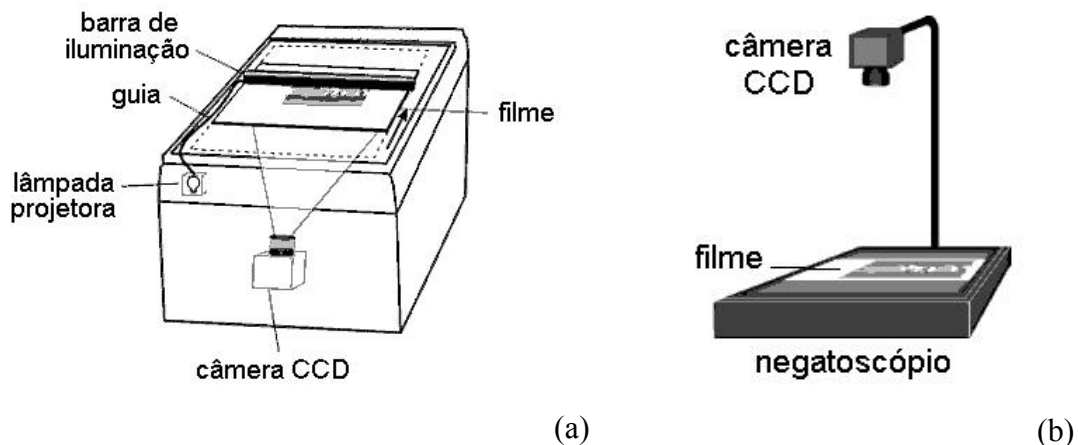


Figura 4.1 – Digitalização de filmes radiográficos através de (a) *scanner* e (b) câmera de vídeo. (Zscherpel, 2000)

Dentre os trabalhos mais recentes, apenas Shafeek *et al.*(2004a, 2004b) parecem ter optado pelo equipamento com câmera CCD, ilustrado na figura 4.1b. Os demais pesquisadores preferiram utilizar *scanners* radiográficos, que podem oferecer uma melhor resolução de imagem. Wang e Liao (2002), por exemplo, utilizaram um modelo NDT SCAN II para gerar imagens de 5000x6000 *pixels* com resolução de 70 $\mu$ m/*pixel*

( $\approx 360\text{dpi}$ ) e 12 bits para níveis de cinza. Um equipamento similar foi utilizado por Perner *et al.* (2001), com a mesma resolução espacial e quantidade de níveis de cinza. Nacereddine *et al.* (2004a) utilizaram um *scanner* da marca AGFA (atualmente GE), modelo Arcus II, usando 800 dpi e 8 bits. Rajagopalan *et al.* (2004) utilizaram um *scanner* da marca Lumisys/Kodak, modelo LS 85, mas não mencionam que resolução e quantidade de níveis de cinza foram empregados.

De interesse especial ao estudo desta tese foram os trabalhos de Silva (1999; 2003) e Padua (2004). Eles chegaram a utilizar 3 coleções de filmes contendo padrões radiográficos de defeitos que foram digitalizados através de equipamentos distintos. A primeira, uma coleção de padrões fornecida pelo IIW, foi digitalizada com um *scanner* da marca UMAX, modelo Mirage II, utilizando a resolução de 500 dpi e 8 bits. A segunda coleção, também de padrões do IIW, foi digitalizada com um *scanner* da marca Microtek, modelo ScanMaker 9800 XL, munido de um adaptador para aumentar a potência de iluminação e utilizando uma resolução de 2000 dpi e 8 bits. Por último, utilizaram uma coleção de filmes radiográficos fornecidos pelo BAM que foram digitalizados com um *scanner* da marca Lumisys/Kodak, modelo LS 85 SDR, utilizando a resolução de 630 dpi e 12 bits, tendo sido convertidos posteriormente para 8 bits. Estas mesmas coleções de padrões radiográficos, já em formato digital, foram assim cedidas para a realização do trabalho desta tese.

#### **4.2.2) Radiografia Computadorizada**

A radiografia computadorizada é um processo que utiliza um *scanner* de leitura a laser e telas de fósforo no lugar de filmes radiográficos. Estas telas contêm cristais de fósforo cujos elétrons se posicionam em órbitas de alta energia após terem sido estimulados por um feixe de radiação (raios-X ou gamma), formando uma imagem “latente”. Esta imagem se torna visível através de um processo de fotoestimulação por um feixe de laser, onde os elétrons são ainda mais excitados e depois emitem luz ao retornar ao nível quântico inicial. Um sensor fotomultiplicador é usado para capturar a luz emitida (amostragem) e convertê-la em um sinal digital (quantização) para armazenar tal informação na memória do computador na forma de uma imagem digital (Morro, 2000).



O sistema de radiografia computadorizada DenOptix QST, da Dentsply International (Gendex Dental X-Ray Division), primariamente produzido para fins odontológicos, foi testado no Brasil em alguns trabalhos de inspeção de tubulações de pequeno diâmetro (José e Milani, 2003; José *et al.*, 2003a) e de soldas (José *et al.*, 2003b; 2003c). Tais autores também cederam um grupo de radiografias digitais de juntas soldadas, obtidas com o mesmo equipamento, somando-se ao material disponibilizado ao estudo desta tese. Tais imagens foram obtidas com resolução de 150dpi (com 8 bits) apresentando, porém, qualidade de definição inferior às imagens de filmes digitalizados. Atualmente, diretrizes para o uso da radiografia computadorizada em inspeção industrial são fornecidas pela norma européia EN 14784.

### **4.3) Pré-Processamento**

A seguir são consideradas as principais alternativas empregadas por diversos autores para atenuar o ruído e melhorar o contraste de imagens radiográficas digitais de juntas soldadas.

#### **4.3.1) Atenuação do Ruído em Radiografias Digitais**

Após digitalização de filmes radiográficos, Silva (1999) observou a existência de ruído na forma de pontos aleatoriamente distribuídos nas imagens radiográficas. Tais pontos produzem “picos” e “vales” pontiagudos nos perfis de intensidade de nível de cinza das imagens, como se pode observar na figura 4.2a. Para tratar este tipo de ruído, Silva (1999) obteve resultados satisfatórios com o filtro da mediana 3x3, como mostra a figura 4.2b. Porém, ao testar outros filtros do tipo passa-baixas (Média, *Gauss* e *Rank*), as imagens ficaram muito embaçadas, dificultando a visualização dos defeitos de soldagem.

Coerente com tais observações, o filtro da mediana é o mais usado também por outros autores que trabalham nesta área de pesquisa (Aoki e Suga, 1999; Liao e Ni, 1996; Li e Liao, 1996; Liao e Tang, 1997; Liao *et al.*, 2000; Wang e Liao, 2002; Shafeek *et al.* 2004a, 2004b; Nacereddine *et al.* 2004a, 2005a, 2006a, 2006b). Wang e Liao (2002) ainda acrescentam que o filtro da mediana apresenta um desempenho superior ao de outros filtros em atenuar o ruído preservando os contornos da imagem.

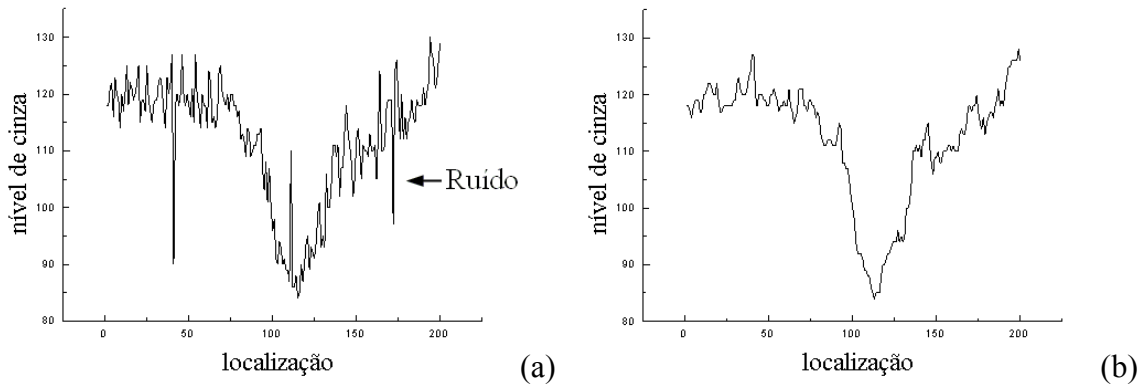


Figura 4.2 – Perfil de níveis de cinza extraído de uma radiografia de solda (a) antes e (b) depois da imagem ser processada com o filtro da mediana 3x3 (Silva, 1999).

#### 4.3.2) Aprimoramento do contraste em Radiografias Digitais

Para aprimorar o contraste, Wang e Liao (2002) recorreram à equalização do histograma. Nacceredine *et al.* (2004a) usaram primeiro um método de expansão do histograma para aprimorar o contraste da imagem como um todo, mas também propuseram uma técnica baseada em características locais para melhorar o contraste das regiões de defeitos. Em (Shafeek *et al.*, 2004a) as imagens são processadas através de uma seqüência de operações que incluem a expansão e equalização do histograma, filtro da mediana e especificação do histograma, sendo esta última aplicada de modo interativo. Nos testes realizados por Silva (1999), expandir o histograma melhorou o contraste na maioria dos casos, mas os melhores resultados foram obtidos fazendo-se ajustes manuais na curva brilho  $\times$  contraste. Silva (1999) também testou várias técnicas para realçar os contornos, mas, neste caso, não obteve resultados satisfatórios.

#### 4.4) Segmentação do Cordão de Solda

Na maioria dos trabalhos que fazem parte da revisão bibliográfica deste capítulo, o cordão de solda é extraído manualmente. No sistema para inspeção de soldas proposto por Shafeek *et al.* (2004a, 2004b), por exemplo, o operador do sistema utiliza o mouse para selecionar a região de interesse na imagem (cordão ou defeitos). Por outro lado, também houve alguns autores que se preocuparam em propor técnicas automáticas para detectar o cordão de solda. Tais propostas são agora consideradas nesta secção quanto ao funcionamento, aplicabilidade e limitações.

#### 4.4.1) Detecção do cordão de solda pelo método de Lawson e Parker (1994)

Lawson e Parker (1994) trabalharam com imagens digitalizadas de radiografias de soldas com reforço, que foram produzidas na construção de tubulações. Primeiramente, utilizaram um filtro passa-baixas para atenuar o ruído presente nas imagens. Depois propuseram dois métodos de segmentação automática de imagens, visando primeiro a detecção do cordão de solda e depois a detecção de defeitos no cordão. Nessa abordagem, eles trataram a detecção do cordão de solda como um problema de classificação de padrões. Basicamente, o que eles fizeram foi treinar uma rede neural para discriminar os *pixels* de uma imagem radiográfica em duas classes: solda e não-solda. Nessa abordagem, cada *pixel* é representado por um vetor com os seguintes parâmetros (características):

- linha do *pixel*;
- coluna do *pixel*;
- nível de cinza do *pixel*;
- valor médio da vizinhança-8 do *pixel*;
- valor mediano da vizinhança-8 do *pixel*;
- valor máximo da vizinhança-8 do *pixel*;

O classificador de padrões utilizado foi uma rede neural MLP (*Multi Layer Perceptron*) com 6 entradas (uma para cada característica), 1 camada intermediária com 5 neurônios e um neurônio na saída, cujo sinal produzido (entre 0 e 1) é normalizado para o intervalo [0 255]. Se o valor normalizado do sinal produzido for maior que 127, o *pixel* é classificado como solda.

Para o treinamento da rede neural, Lawson e Parker (1994) recorreram à técnica de retropropagação do erro (*error backpropagation*). Quanto aos dados de treinamento, estes foram levantados com base em uma classificação visual de *pixels* extraídos de uma radiografia real de junta soldada. Tal conjunto de treinamento excluiu propositalmente *pixels* difíceis de serem classificados, como os *pixels* da borda do cordão de solda. Quanto ao volume de dados para o treinamento da rede, foram utilizados primeiramente 15.000 e depois 40.000 vetores de treinamento.

A figura 4.3 mostra que este método é capaz de alcançar uma aproximação razoável (aceitável para os padrões de inspeção) para borda real do cordão de solda,

desprezando outros objetos da imagem. Por outro lado, conforme os próprios autores ressaltam, a aplicabilidade do método proposto está condicionada ao posicionamento e orientação do cordão de solda, que não podem ser diferentes em relação à imagem que forneceu os vetores de treinamento.

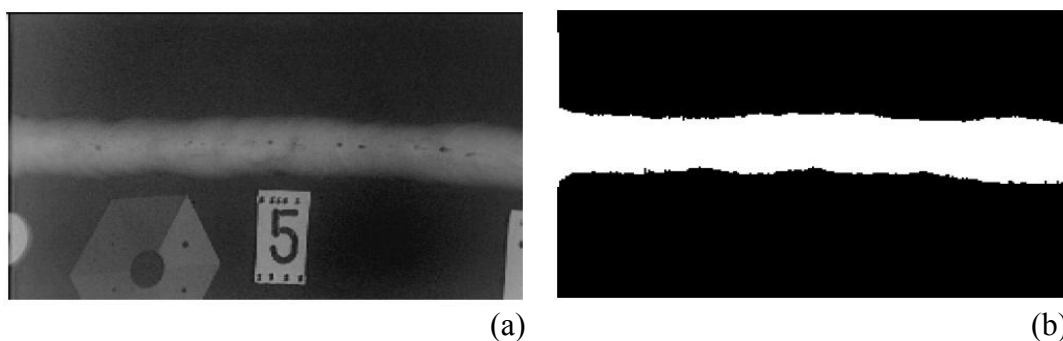


Figura 4.3: (a) radiografia de cordão de solda e (b) resultado da segmentação automática pelo método de Lawson e Parker (1994).

#### 4.4.2) Detecção do cordão de solda pelo método de Schneider *et al.* (2004a)

Para detectar cordões de solda lineares em imagens radiográficas de juntas soldadas, Schneider *et al.* (2004a) propuseram uma metodologia baseada na análise da projeção horizontal da imagem. A imagem do cordão de solda é inicialmente limiarizada através do método Otsu (1979), conforme ilustram as figuras 4.4a (imagem original) e 4.4b (imagem limiarizada). Ao analisar a projeção horizontal das imagens radiográficas limiarizadas, Schneider *et al.* (2004a) observaram que a região do cordão de solda gera um pico (fig. 4.4c), limitado por mudanças abruptas que coincidem com a posição média das bordas do cordão de solda. Tais mudanças abruptas são facilmente detectadas através dos valores mínimos e máximos para a derivada da projeção nos dois sentidos (esquerda e direita). Com base neste princípio, Schneider *et al.* (2004a) propuseram a sua metodologia para detecção do posicionamento e da espessura média do cordão de solda. A figura 4.4d mostra o resultado desta técnica aplicada à imagem da figura 4.4a.

Com tal proposta, Schneider *et al.* (2004a) ofereceram uma solução simples, porém eficiente, para se detectar cordões de solda com reforço de diferentes larguras e flexibilidade de translação na direção vertical. Entretanto, a principal limitação de tal técnica é que, para ser localizado perfeitamente, o cordão de solda deve estar na posição horizontal, se estendendo linearmente de uma a outra extremidade da imagem.

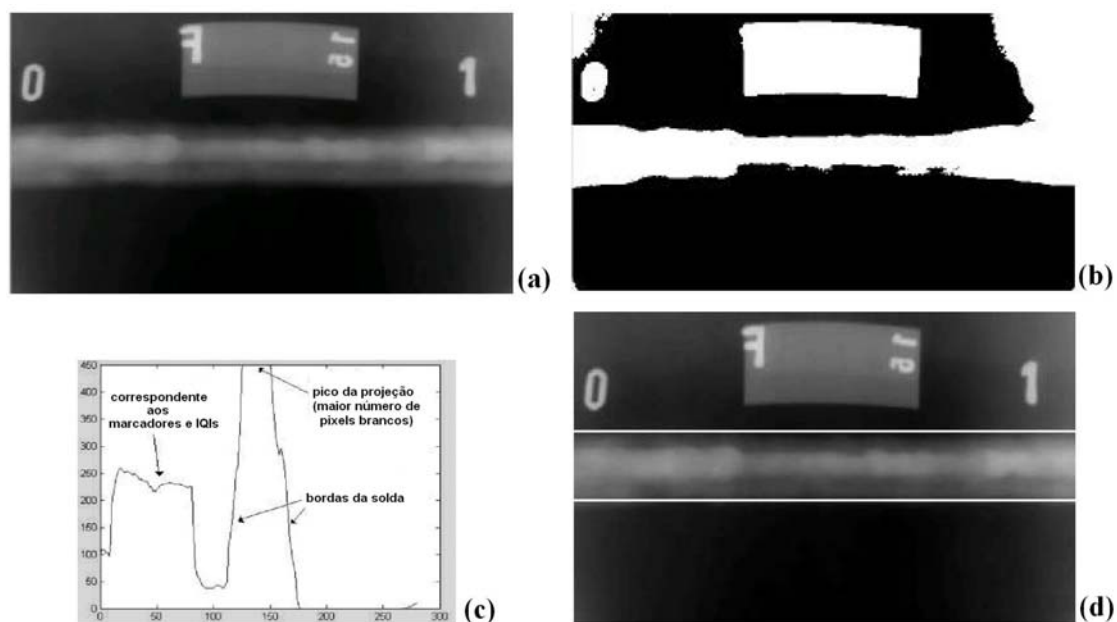


Figura 4.4 – (a) Imagem radiográfica da junta soldada; (b) Resultado da limiarização pelo método Otsu (1979); (c) Projeção horizontal da imagem limiarizada; (d) Resultado da localização do cordão de solda. (Schneider *et al.*, 2004a)

#### 4.4.3) Detecção do cordão de solda através da análise de perfis lineares

Liao e Ni (1996) trabalharam com 100 radiografias de soldas de fuselagem de foguetes espaciais, produzidas com reforço de material. Foram usados apenas filmes de 3,5 pol de largura por 17 pol de comprimento com a imagem radiográfica de um cordão de solda linear se estendendo ao longo do comprimento de cada filme.

Tais filmes foram posicionados lado a lado, quatro de cada vez, em um *scanner* apropriado para digitalização de radiografias (NDT SCAN II). Como resultado, foram produzidas 25 imagens digitais com quatro cordões de solda cada e com dimensões de 5000 x 6000 linhas de *pixels*, resolução de 70 $\mu$ m ( $\approx$ 7 lp/mm) e 12 bits para cada *pixel*.

Tal material foi utilizado em trabalhos subseqüentes dos mesmos autores. Porém, vale ressaltar que, nos trabalhos com enfoque na fase de detecção do cordão de solda (Liao e Ni, 1996; Li e Liao, 1996; Liao e Tang, 1997; Liao *et al.*, 2000), foram utilizadas imagens reduzidas, de 250 x 300 linhas de *pixels*, que foram geradas a partir de pontos extraídos das imagens originais a uma distância de 20 *pixels* entre si.

Liao e Ni (1996) explicaram que embora as imagens originais sejam de qualidade apropriada para a análise de defeitos, não é necessário trabalhar com imagens de tão alta resolução durante a fase de detecção do cordão de solda. Isto é importante

porque permite reduzir significativamente a quantidade de informação a ser processada nesta fase inicial. A figura 4.5a mostra uma das imagens reduzidas que Liao e Ni (1996) utilizaram em seus trabalhos. Nota-se que quatro cordões de solda lineares atravessam a imagem verticalmente em meio a outros objetos como escalas, penetrômetros, densitômetros e letras indicadoras, além de frestas entre os filmes.

Em uma primeira abordagem, Liao e Ni (1996) adotaram algumas medidas para simplificar o problema da detecção dos cordões de solda. Ao invés de trabalhar com as imagens de quatro cordões de solda, trabalharam com partições dessas imagens contendo apenas um cordão. Para isso, bastou dividir as imagens em partes aproximadamente iguais. Cada parte foi denominada sub-imagem, sendo as sub-imagens 1, 2 e 3 de 62 x 300 linhas e a sub-imagem 4 de 64 x 300 linhas de *pixels*. A figura 4.5b é uma tentativa de reproduzir esta operação apenas para fins ilustrativos.

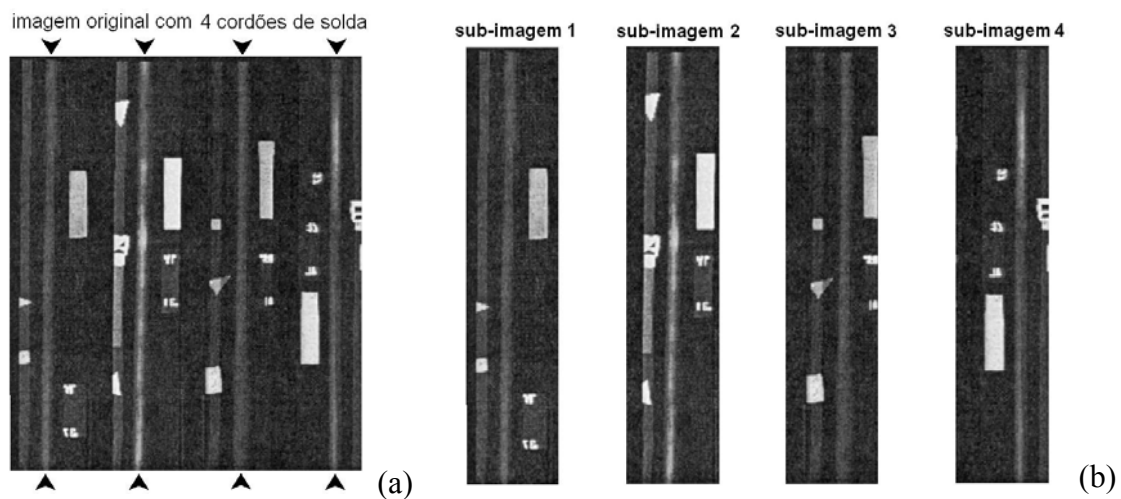


Figura 4.5 – (a) Imagem de radiografia compactada contendo quatro cordões de solda lineares e setas indicando onde começa e onde termina cada solda (Liao e Tang, 1997); (b) Mesma imagem sub-divida em 4 partes, cada qual com um único cordão de solda.

Observando os perfis lineares das sub-imagens, Liao e Ni (1996) perceberam que os objetos poderiam ser localizados através de picos e vales produzidos nesses perfis. Além disso, observaram que este tipo de solda (com reforço) geralmente apresenta um perfil transversal que lembra uma curva gaussiana (ver figura 4.6).

Com base em tais observações, Liao e Ni (1996) propuseram uma metodologia para extrair automaticamente os cordões de solda. Primeiramente, recorreram a um algoritmo para detectar picos e vales nos perfis lineares das imagens. Os picos foram utilizados para indicar o posicionamento dos objetos e a distância de um pico até o vale

mais próximo foi utilizada para indicar a respectiva meia largura. Então, com base nessas informações (posição e largura), os perfis individuais dos objetos podiam ser extraídos de cada linha da imagem.

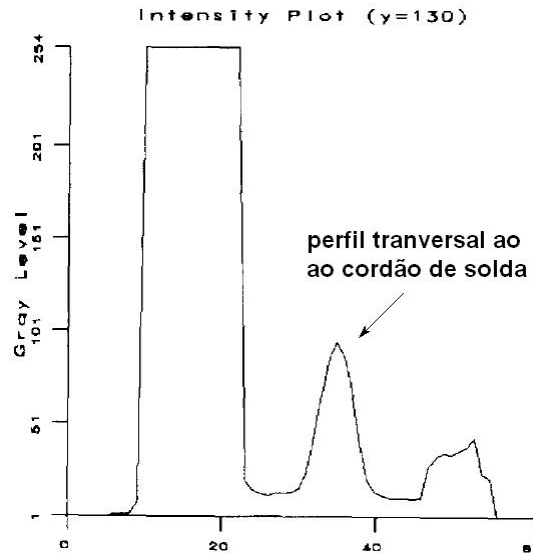


Figura 4.6 – Perfil linear de uma das sub-imagens utilizadas por Liao e Ni (1996).

Para cada perfil de objeto, uma curva gaussiana foi gerada nas mesmas proporções do perfil (largura e intensidade máxima) para fins comparativos. A comparação foi feita através do erro quadrático médio (MSE – *Mean Square Error*) entre o perfil do objeto e a sua curva gaussiana.

Para detectar os cordões de solda lineares em toda a sua extensão, Liao e Ni (1996) optaram por varrer a imagem analisando o posicionamento dos perfis de objetos simultaneamente em 3 linhas separadas por uma distância de 100 *pixels* (exemplo: linhas 35, 135 e 235). A seguir, o centro do objeto com perfil mais gaussiano (menor MSE), em cada linha, é marcado. Se houver alinhamento entre os pontos marcados nas três linhas, a reta definida por tais pontos é usada para indicar o posicionamento do cordão de solda. Quanto à largura do cordão, foi sempre adotada a largura máxima dentre os perfis analisados. Assim, tendo o posicionamento e a largura, Liao e Ni (1996) conseguiram extrair todos os 100 cordões de solda das imagens utilizadas.

Não obstante, a condição de se trabalhar com cordões de solda lineares tornava a solução apresentada por Liao e Ni (1996) muito restrita a uma aplicação específica. Na busca de uma alternativa mais versátil, Li e Liao (1996) testaram a utilização de um classificador *fuzzy* do tipo *K-NN* (*K Nearest Neighbor*) para reconhecer perfis de solda com base em características extraídas dos perfis (exemplo: valor de pico, largura e

MSE). Tais estudos apontaram as diretrizes para trabalhos subseqüentes, primeiro utilizando RNA (Redes Neurais Artificiais) (Liao e Tang, 1997) e, mais tarde, classificadores *fuzzy* do tipo *K-NN* e *c-means* (Liao *et al.*, 2000).

Uma das particularidades do trabalho de Liao e Tang (1997) foi a avaliação do desempenho de RNA no processo de classificação dos perfis. Eles trabalharam com redes do tipo *MLP* (*Multi-Layer Perceptron*) com uma camada intermediária e um neurônio na camada de saída. Após selecionar 51 dados para treinamento (25 exemplos e 26 contra-exemplos) e 33 dados para validação (12 exemplos e 21 contra-exemplos), compararam o desempenho de diversos parâmetros associados ao treinamento e funcionamento da rede. Nessa abordagem, Liao e Tang (1997) recorreram às seguintes características para discriminar os perfis de cinza dos objetos:

- $x_1$ : posição do pico (ver figura 4.7). Esta variável corresponde à posição do pico para uma da linha da sub-imagem e não da imagem original;
- $x_2$ : largura do perfil (ver figura 4.7);
- $x_3$ : MSE entre a curva do perfil e a sua gaussiana (mesmo princípio usado anteriormente em (Liao e Ni,1996));
- $x_4$ : valor de pico (ver figura 4.7).

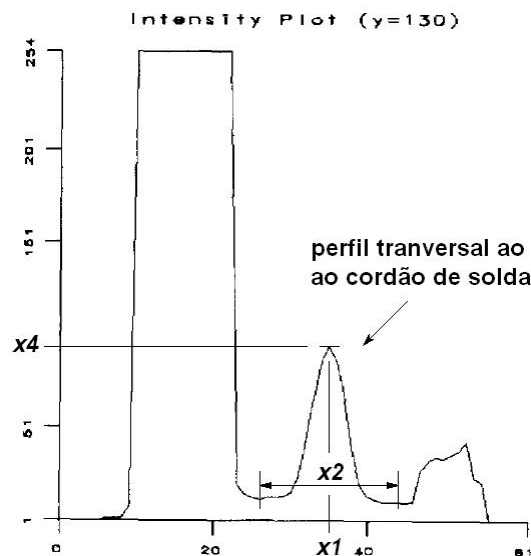


Figura 4.7 – Perfil linear de uma das sub-imagens utilizadas por Liao e Ni (1996) com a indicação de características extraídas do trecho que atravessa o cordão de solda.

Os resultados revelaram que o conjunto  $\{x_1, x_4\}$  tem um poder de discriminação comparável a  $\{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ . Em contra partida, o conjunto que exclui  $x_1$  ( $\{x_2, x_3,$



$x_4$ ) apresentou o pior desempenho, fazendo aumentar a quantidade de falsos alarmes. Liao e Tang (1997) também calcularam o percentual de justaposição entre classes para avaliar o poder de discriminação das variáveis. Nessa avaliação, o resultado obtido para  $x_1$  foi o melhor (37,25%) em comparação com os valores (52,94%, 54,9% e 45,1%) para as demais variáveis ( $x_2$ ,  $x_3$  e  $x_4$ , respectivamente). Tais resultados revelaram que, no método implementado por Liao e Tang (1997), a posição do perfil ( $x_1$ ) é a característica com maior poder de discriminação.

Liao e Tang (1997) empregaram a metodologia proposta na detecção dos cordões de solda nas imagens disponíveis. A taxa de detecção foi bem próxima do ideal e a taxa de falsos alarmes (falsos positivos) girou em torno de 2 a 12%. Sendo assim, foi necessário recorrer ao pós-processamento das imagens binarizadas para a correta extração dos cordões de solda. Basicamente, o algoritmo de pós-processamento envolveu percorrer cada imagem binária na busca de linhas descontínuas e pontos isolados. Então, com base em uma análise dos *pixels* locais, tais regiões eram conectadas ou eliminadas da imagem. Finalizado o pós-processamento, todos, inclusive os cordões curvos, puderam ser extraídos corretamente usando-se as dimensões dos perfis reconhecidos como solda.

Apesar do bom desempenho do método proposto por Liao e Tang (1997), é importante destacar suas limitações. Por exemplo, pela natureza de sua definição, a variável  $x_1$  depende da posição e não do formato dos objetos na imagem. Portanto, o uso desta variável por Liao e Tang (1997) torna a solução apresentada por eles um caso particular para imagens onde o posicionamento do cordão de solda é típico e previsível (posição vertical, se estendendo da primeira à última linha imagem). O fato de os resultados de Liao e Tang (1997) realçarem o potencial de discriminação dessa variável salienta a dificuldade que há em se desvincular a detecção automática do cordão de solda do conhecimento prévio sobre a sua localização na imagem. Além disso, o valor de  $x_1$  representa uma coluna da sub-imagem em análise, que contém apenas um cordão de solda. Desta forma,  $x_1$  não representa a posição do cordão de solda na imagem original antes de ser sub-dividida.

Sendo assim, ainda que o novo método apresentado por Liao e Tang (1997) fosse capaz de detectar soldas curvas, havia a incômoda condição de se ter de separar a imagem em partições que contivessem apenas um cordão de solda cada. Portanto, em um trabalho posterior, Liao *et al.* (2000) abandonaram o uso da característica de posição ( $x_1$ ) e passaram a fazer novos testes comparando os resultados para duas outras técnicas

de classificação de padrões. Trabalhando apenas com o conjunto de características  $\{x_2, x_3, x_4\}$ , eles compararam o desempenho de classificadores do tipo *fuzzy K-NN* e *fuzzy c-means* para novamente distinguir os perfis de solda dos de outros objetos.

Para o treinamento do classificador *fuzzy K-NN*, Liao *et al.* (2000) usaram 112 padrões (56 exemplos e 56 contra-exemplos) selecionados manualmente. Ao passo que o classificador *fuzzy c-means* funciona com treinamento não-supervisionado, o mesmo também foi testado para gerar um segundo conjunto de dados para o treinamento do classificador *fuzzy K-NN*. Quatro imagens, incluindo a imagem da figura 4.5a, foram selecionadas para o teste de desempenho dos classificadores. Isto incluiu classificar todos os perfis de objetos para cada linha em todas as quatro imagens selecionadas.

Para o classificador *fuzzy K-NN*, treinado com os padrões selecionados manualmente, a taxa de acertos variou de 94,67 a 96,68% e a taxa de falsos alarmes ficou entre 16,08 e 23,14%. Para o classificador *fuzzy c-means*, embora a taxa de acertos tenha sido superior, seu desempenho foi considerado pior devido à alta taxa de falsos alarmes, que ficou entre 55,48 e 80,40%. Para o classificador *fuzzy K-NN*, treinado com os padrões selecionados pelo classificador *fuzzy c-means*, a taxa de falsos alarmes foi ainda maior (entre 57,82 e 81,57%). Com base em tais resultados Liao *et al.* (2000) concluíram que ambos os classificadores podem ser usados para ajudar a extrair o cordão de solda corretamente. Contudo, consideraram o desempenho do classificador *fuzzy K-NN* superior porque forneceu menor número de falsos alarmes, facilitando o pós-processamento.

A princípio, o algoritmo usado por Liao *et al.* (2000) para o pós-processamento das imagens foi idêntico ao que já havia sido proposto antes (Liao e Tang, 1997). O uso desse algoritmo permitiu extrair corretamente todos os 100 cordões de solda das imagens processadas pelo classificador *fuzzy K-NN*. Entretanto, para a correta extração das soldas das imagens processadas pelo classificador *fuzzy c-means*, o algoritmo de pós-processamento precisou ser modificado, devido à alta taxa de falsos alarmes alcançada.

Ao analisar os trabalhos iniciados por Liao e Ni (1996) pode-se observar uma constante busca por soluções mais autônomas e abrangentes para a detecção do cordão de solda. Primeiro houve uma tentativa de aplicar o uso de classificadores não-lineares, como RNA e sistemas *fuzzy K-NN*, para detectar cordões de solda curvos. Em seguida procurou-se eliminar a necessidade de sub-dividir a imagem em partições com um cordão de solda cada. Por fim, procurou-se conferir maior autonomia ao processo de

detecção do cordão de solda por se testar um classificador *fuzzy c-means*, que não utiliza treinamento supervisionado. Mesmo assim, é bom lembrar que nas imagens utilizadas por Liao e Ni (1996) e seus trabalhos subseqüentes, um dos requisitos esperados é que o cordão de solda esteja sempre na posição vertical, se estendendo ao longo da imagem. Entretanto, conforme os exemplos mostrados na figura 2.20, isto nem sempre acontece para radiografias de juntas soldadas de tubulações. Além disso, Liao e Ni (1996) utilizaram soldas de fuselagem de foguetes cujos cordões de solda apresentaram quase sempre um perfil gaussiano. Tal propriedade, entretanto, não se repete para soldas reparadas ou perfis de regiões do cordão onde haja certos tipos de defeitos.

Uma outra proposta para extração automática de cordões de solda foi apresentada por Padua (2004). Seguindo uma linha de pesquisa similar à proposta por Liao e Ni (1996), Padua (2004) recorreu à regressão não-linear dos perfis verticais da imagem (com o cordão de solda na posição horizontal) segundo uma curva gaussiana e usou parâmetros (média e desvio-padrão) dos perfis gaussianos obtidos para definir o limite de corte para a extração do cordão de solda. Entretanto, Padua (2004) concluiu que tal metodologia é ineficaz para a extração de cordões de solda contendo defeitos e optou, em tais casos, por extrair os perfis visualmente. Vale ressaltar que as imagens com que Padua (2004) trabalhou fazem parte do mesmo grupo de imagens que também foram cedidas para a realização dos estudos desta tese.

#### **4.5) Segmentação de Defeitos**

Conforme mencionado no capítulo 2 (secção 2.3.4), uma descontinuidade só será considerada defeito se violar os requisitos mínimos da norma técnica aplicável. Como esta verificação só pode ser feita depois de se classificar as descontinuidades detectadas, o termo correto para esta etapa da análise deveria ser segmentação de descontinuidades. Porém, o termo mais utilizado é segmentação de defeitos e, para evitar uma terminologia confusa, o mesmo termo continua a ser utilizado nesta tese. Por outro lado, pode-se dizer que o emprego desse termo não está completamente errado, uma vez que, no presente trabalho, assim como na maioria dos trabalhos pesquisados, foram utilizados padrões radiográficos cujas descontinuidades existentes já foram previamente analisadas e classificadas como defeitos.

Como se deu para a revisão de técnicas para segmentação do cordão de soldas, os trabalhos incluídos nesta revisão bibliográfica são aqueles que apresentam as contribuições mais significativas para a automação da segmentação de defeitos.

#### 4.5.1) Detecção de defeitos com base na intensidade dos *pixels*, usando RNA

Lawson e Parker (1994) propuseram uma metodologia para segmentação de defeitos em cordões de solda com base na utilização de uma rede neural MLP, com 2 camadas intermediárias (com 10 neurônios cada) e um neurônio na camada de saída. O número de neurônios ( $m \times m$ ) na camada de entrada é definido pelo tamanho ( $m \times m$ ) da janela de vizinhança, utilizada para percorrer os *pixel* da imagem. Os  $m \times m$  níveis de cinza, definidos pela vizinhança do *pixel* em análise, servem de entrada para a rede neural. A resposta do neurônio na saída da rede, definida no intervalo  $[0,0 \ 1,0]$ , é normalizada para o intervalo  $[0 \ 255]$  de níveis de cinza da imagem. Com base no valor calculado, o *pixel* em análise é classificado como defeito ou não-defeito, utilizando-se a seguinte regra:

$$\begin{cases} \text{Se } (255 - \text{saída normalizada da rede}) > (\text{valor original do pixel}), \text{ então é defeito,} \\ \text{Caso contrário, não é defeito} \end{cases} \quad (4.1)$$

Os dados de treinamento da rede são gerados a partir de imagens de defeitos conhecidos, antes e após serem submetidas a um processo supervisionado de limiarização utilizando o método de Kehoe (1990). Nos experimentos realizados, Lawson e Parker (1994) mostraram que os resultados obtidos foram superiores em comparação com métodos de limiarização adaptativa.

Conforme já mencionado, Lawson e Parker (1994) também desenvolveram uma metodologia baseada em RNA para segmentação do cordão de solda. Consequentemente, os mesmos autores propõem a utilização das duas técnicas de segmentação em paralelo, de modo que a imagem final possa ser construída através de uma composição das imagens segmentadas (do cordão de solda e dos defeitos).

Nacereddine *et al.* (2000) propuseram um método, também baseado em RNA, para detectar bordas de defeitos em imagens radiográficas. Eles implementaram uma rede neural MLP com 9 neurônios na camada de entrada, 10 neurônios na única camada intermediária e um neurônio na saída. A função da rede neural é classificar cada *pixel* da imagem como borda de defeito ou não-borda de defeito, daí a necessidade de apenas um neurônio na camada de saída. A camada de entrada possui 9 neurônios para comportar os valores dos *pixels* da vizinhança-8 do *pixel* em análise, inclusive. O treinamento da rede foi realizado através da técnica de retropropagação do erro, utilizando 28 pares de

treinamento, incluindo exemplos e contra-exemplos de contornos de defeitos no formato de janelas 3x3, como ilustra a figura 4.8a. A figura 4.8b mostra um dos resultados obtidos com esta técnica. Apesar dos falsos alarmes presentes na imagem resultante, os autores consideraram o resultado satisfatório.

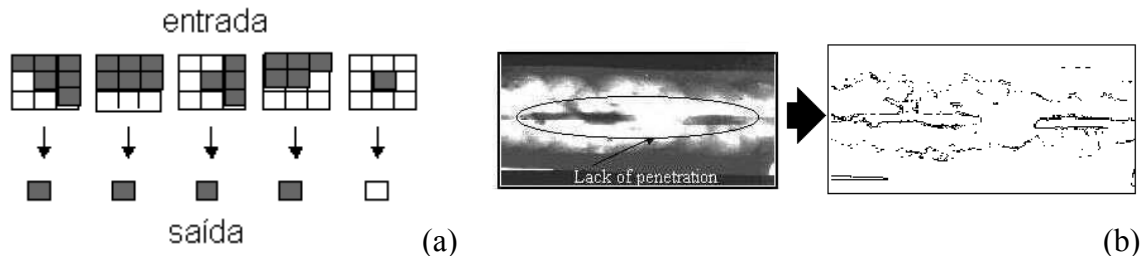


Figura 4.8 – (a) Exemplos de pares de treinamento utilizados por Nacereddine *et al.* (2000) no treinamento de uma rede neural para detecção de bordas de defeitos; (b) Imagem do defeito e resultado obtido através da técnica de Nacereddine *et al.* (2000).

#### 4.5.2) Detecção de defeitos com base em momentos geometricamente invariantes

Rajagopalan *et al.* (2004) propuseram a utilização de 52 momentos invariantes para detecção de defeitos em imagens radiográficas de solda. Rajagopalan *et al.* (2004) trabalharam com imagens de alta-resolução com cerca de 5120 *pixels* por 6140 linhas. Antes de se dar início ao processo de detecção de defeitos, a imagem é subdividida em blocos menores (de 128x128 *pixels*), resultando em 40 sub-imagens, que são analisadas separadamente. Para cada sub-imagem, são gerados 52 momentos invariantes, cujos valores são plotados em um gráfico. Adicionalmente, Rajagopalan *et al.* (2004) propõem a utilização do método de *ranking de Fisher* para seleção das características mais relevantes e sugere a utilização de uma rede neural MLP, para classificação das sub-imagens, quanto à presença de defeitos. Embora não se tenha apresentado uma análise de desempenho, os autores afirmam que esta técnica é apropriada para detectar a existência de defeitos na imagem radiográfica.

#### 4.5.3) Detecção de defeitos com base em critérios estocásticos

Kazantsev *et al.* (2004) propuseram uma metodologia para detecção de defeitos com base na validação de hipóteses segundo critérios estocásticos. Considera-se uma janela de vizinhança de um *pixel*, com formato, tamanho e orientação definidos segundo

o tipo de defeito que se deseja encontrar (retangular, circular, longitudinal, etc.). Ao percorrer os *pixels* da imagem, verifica-se a validade de duas hipóteses:  $H_0$  (ausência de defeito) ou  $H_1$  (presença de defeito). As hipóteses são verificadas com base em uma série de testes, considerando-se critérios estocásticos aplicados à vizinhança do *pixel* em análise. Para cada teste, existe um valor de nível de significância ( $\alpha$ ), que pode ser modificado manualmente. Tal variável atribui um limiar para a tomada de decisão de acordo com um nível de tolerância à ocorrência de ruído e falsos alarmes. Os testes realizados demonstraram a possibilidade de se utilizar a metodologia proposta na detecção de defeitos como trincas, que usualmente são difíceis de serem detectados a olho nu. Por outro lado, o método apresenta algumas limitações relacionadas à detecção de defeitos de diferentes tamanhos, sendo necessária a utilização de janelas de diferentes dimensões e formatos.

#### **4.5.4) Detecção de defeitos com base na variância e contraste, usando lógica *fuzzy***

Alguns defeitos, como trincas e falta de fusão, são difíceis de serem detectados em imagens radiográficas por apresentarem baixo contraste com relação à região ao seu redor. Isto gera alguns problemas, principalmente quando o ruído também é caracterizado por regiões de baixo contraste. Neste caso, um processamento para eliminar ruído pode também eliminar alguns defeitos, enquanto que um processamento para expandir o contraste de defeitos pode magnificar o ruído presente na imagem. Entretanto, Lashkia (2000) propôs uma metodologia capaz diferenciar ruído e defeitos de baixo contraste. Essa metodologia baseia-se na observação de que, quando o contraste do defeito com relação à área ao seu redor é baixo, a variância dos *pixels* no núcleo do defeito também é baixa, o que não ocorre no caso de ruído.

Basicamente, o método proposto por Lashkia (2000) consiste em percorrer, vertical e horizontalmente, os *pixels* da imagem com duas janelas de vizinhança retangulares e paralelas. Uma janela é centrada no *pixel* em análise e a outra é situada a uma distância pré-definida na vertical (figura 4.9a) ou na horizontal (figura 4.9b). Parâmetros como variância e contraste, com relação ao valor médio dos *pixels* nas duas janelas, são verificados. Os valores calculados servem de entrada a um sistema *fuzzy*, cuja resposta permite classificar o *pixel* em análise como sendo ou não um *pixel* de defeito. Então, aos pontos classificados como *pixels* de defeito, aplica-se a técnica de

segmentação por crescimento de região para se detectar o correto posicionamento e formato dos defeitos. O resultado final é uma imagem binária dos defeitos segmentados.

Vale ressaltar que, segundo Lashkia (2000), é necessário percorrer a imagem horizontal e verticalmente com as 2 janelas para detectar todos os defeitos. Pois, enquanto o percurso na horizontal possibilita a detecção dos defeitos orientados verticalmente, o percurso na vertical possibilita detectar os defeitos orientados na direção horizontal. Enquanto isso, os defeitos circulares dependem de uma composição dos resultados, considerando ambas as direções.

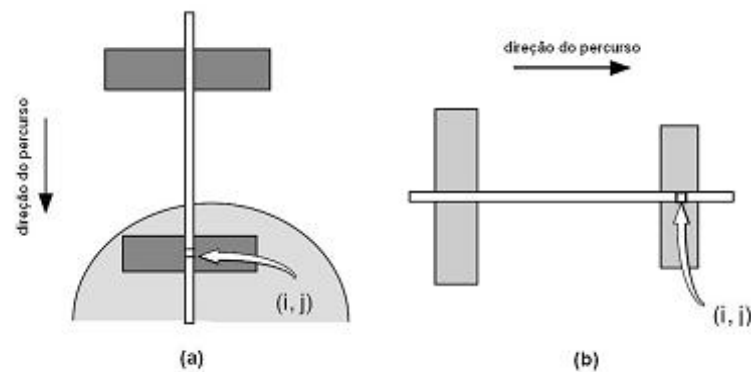


Figura 4.9 – Janelas de vizinhança orientadas vertical (a) e horizontalmente (b) para análise de defeitos;  $(i, j)$  é o *pixel* em análise. (Lashkia, 2000)

#### 4.5.5) Detecção de defeitos com base em detecção de bordas e análise de textura

Mery e Filbert (2002a; 2002b) propuseram a utilização do filtro LoG (Laplacian-of-Gaussian) para detecção de bordas em imagens radiográficas de peças fundidas. O mesmo filtro é utilizado em (Mery e Berti, 2003) para detecção de bordas em imagens radiográficas de cordões de soldas. Como resultado, o filtro implementado permite a detecção das bordas tanto no caso de ruído como de defeitos presentes na imagem. Portanto é necessário estabelecer critério para classificar cada região, cujas bordas foram detectadas, como defeito real ou falso alarme.

Mery e Berti (2003) propuseram a utilização de dois grupos de características baseadas na textura para caracterizar as regiões detectadas como defeitos ou não-defeitos. O primeiro grupo compreende um total de 84 características de textura, levantadas com base em parâmetros para reconhecimento de padrões, estudados por Haralick *et al.* (1973). O outro grupo corresponde a um total de 64 características de

textura, definidas pelas funções gaussianas de Gabor, melhor detalhadas em (Kumar e Pang, 2002).

Nos testes realizados por Mery e Berti (2003), para uma única radiografia de cordão de solda de dimensões 3512 *pixels* por 366 linhas (fig. 4.10), a utilização do filtro LoG permitiu detectar as bordas de 1419 objetos (possíveis defeitos), sendo apenas 198 defeitos reais. Para caracterizar estas regiões da imagem, as 148 características de textura propostas foram calculadas para cada um dos 1419 objetos detectados.

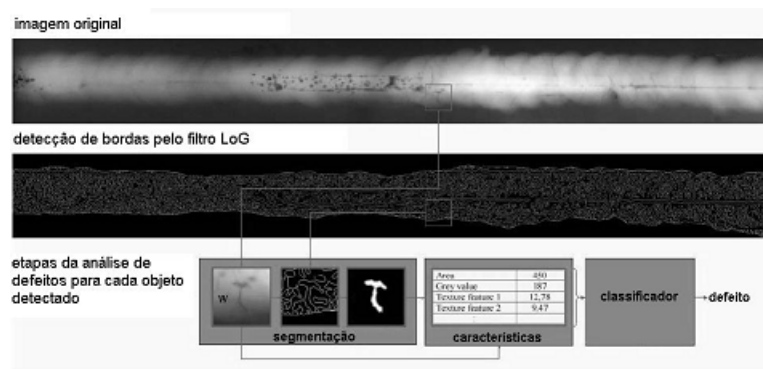


Figura 4.10 – Representação da detecção de bordas em imagem radiográfica de um cordão de solda através do filtro LoG e etapas da análise de possíveis defeitos. (Mery e Berti, 2003)

Para reduzir a quantidade de informação a ser processada, Mery e Berti (2003) investigaram a utilização de dois métodos para seleção de características: ROC (*Receiver Operation Characteristics*) e SFS (*Sequential Forward Selection*). As 7 melhores características, selecionadas através do método SFS, serviram de entrada para três tipos de classificadores implementados: polinomial, Mahalanobis e vizinho  $k$  mais próximo ( $k$ -NN). Os melhores resultados foram obtidos com o classificador polinomial, onde, dos 198 defeitos, 180 foram reconhecidos corretamente, junto com 99 falsos positivos e 18 falsos negativos.

Dando continuidade aos trabalhos de Mery e Berti (2003), Hernández *et al.* (2004) testaram a utilização de um outro seletor de características – SOM (*Self-Organizing Features Map*) – e um classificador neuro-fuzzy – ANFIS (*Adaptive Network Based Inference System*). No que se refere aos valores dos resultados obtidos (90,91% acertos, 7,37% falsos alarmes), não houve melhorias tão significativas com relação aos resultados anteriores (90,91% acertos, 8,11% falsos alarmes). Entretanto, a implementação do seletor de características SOM viabilizou a utilização de apenas 4



características para detecção de defeitos, ao invés de 7 (Mery e Berti, 2003), o que, por sua vez, exige menos esforço de processamento computacional.

#### **4.5.6) Detecção de defeitos com base na análise do perfil transversal do cordão de solda**

Liao e Li (1998) desenvolveram uma metodologia para detecção de defeitos em juntas soldadas com base na análise morfológica do perfil transversal do cordão de solda. O método proposto trabalha com sub-imagens contendo apenas os cordões de solda. Tais sub-imagens foram extraídas da radiografia original através das técnicas apresentadas anteriormente em (Liao e Ni, 1996), para reconhecimento de cordões de soldas em imagens radiográficas. Quanto à proposta para detecção de defeitos, esta compreende quatro etapas principais, aplicadas ao perfil horizontal (transversal ao cordão de solda) para cada linha da imagem:

- Pré-processamento
- Geração de curvas aproximadas ao perfil da linha
- Detecção de anomalias
- Pós-processamento

A primeira etapa consiste em empregar diversas operações para adequar as dimensões do perfil em análise a um padrão apropriado ao subsequente processamento. Tais operações são aplicadas ao gráfico do perfil da linha em análise e correspondem a mudanças de escala, remoção das extremidades excedentes do perfil, aprimoramento do contraste no caso de imagens escuras, e normalização do perfil para 256 níveis de cinza. As figuras 4.11a e 4.11b mostram um perfil de uma imagem de baixo contraste antes e após o pré-processamento, respectivamente.

A etapa seguinte consiste em gerar duas curvas *spline* próximas do perfil original. Os parâmetros para gerar as duas curvas são ajustados de maneira tal que uma das curvas seja bem mais precisa e a outra seja um pouco mais suavizada em relação ao perfil original, como pode ser visualizado na figura 4.11d. Dependendo do ajuste de parâmetros específicos, a primeira curva (denominada *curva mais precisa* por ser mais próxima da curva original) poderá apresentar três tipos anomalias em regiões de defeito:

pico, vale ou concavidade. A segunda curva (denominada *curva mais suave*) pode eliminar também as concavidades presentes na primeira, deixando apenas os picos e vales de defeitos.

A detecção de anomalias consiste em detectar os picos e vales presentes na curva mais precisa (conforme indicado na figura 4.11c) classificando-os, com base em um conjunto de regras, como defeito ou não-defeito. Quanto às anomalias do tipo concavidade, estas são detectadas por se comparar a primeira curva *spline* (mais precisa) com a segunda (mais suave), conforme ilustrado na figura 4.11d.

O pós-processamento é necessário para eliminar os erros e falsos alarmes gerados durante a detecção de anomalias. Tal processamento consiste em percorrer a imagem eliminando pontos isolados e corrigindo discontinuidades por agregar regiões de defeitos separadas por erros de não detecção.

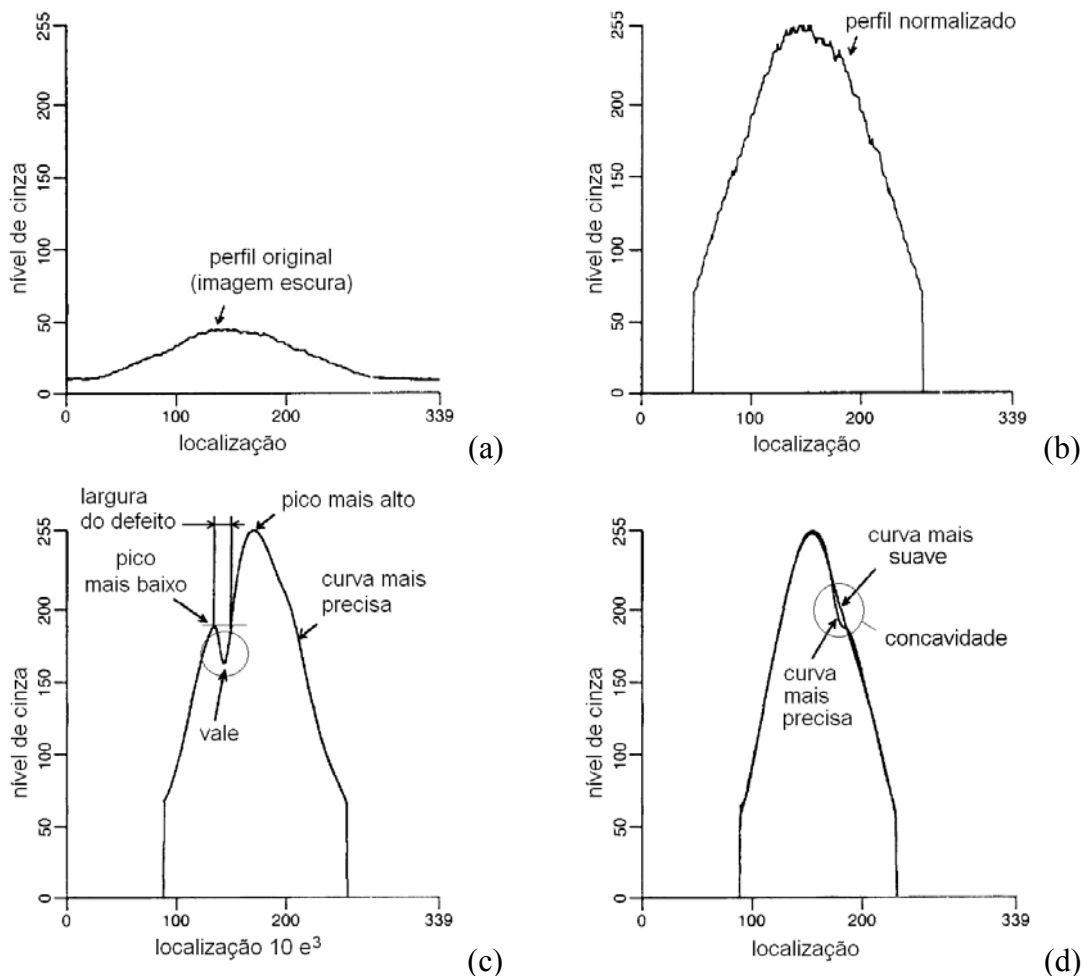


Figura 4.11 – Perfil de uma linha transversal ao cordão de solda em uma imagem de baixo contraste antes (a) e após (b) o pré-processamento; (c) curva *spline* gerada com base em outro perfil pré-processado com a indicação de uma anomalia do tipo vale; (d) 2 curvas *spline* (uma mais suave e outra mais precisa) com indicação de uma anomalia do tipo concavidade. (Liao e Li, 1998)

Uma das principais limitações desta técnica é que, tratando-se de um método baseado na suposição de que o perfil transversal do cordão de solda tenha o aspecto de uma curva gaussiana, a metodologia apresentada não é válida para soldas com outros perfis, como no caso de soldas com reparos ou raspagem, conforme observado pelos próprios autores (Liao e Li, 1998).

Em trabalhos posteriores, Liao *et al.* (1999) propuseram uma outra metodologia, também baseada na análise do perfil transversal do cordão de solda, para detecção de defeitos. As etapas iniciais são bem parecidas ao método anterior, envolvendo a normalização do perfil e a construção de uma curva *b-spline* próxima ao perfil original. Por outro lado, a análise do perfil é realizada com base em 25 características extraídas da curva *b-spline* gerada, que levam em consideração importantes atributos como simetria da curva, diferença com relação ao perfil original, tendências de crescimento e/ou decrescimento e valores médios entre características de perfis de linhas subseqüentes.

No mesmo trabalho, Liao *et al.* (1999) testaram 2 classificadores de agrupamento *fuzzy* (*k-NN* e *c\_means*) para atuar na classificação dos perfis em análise, considerando todas as 25 características levantadas. Os resultados demonstraram que, dentre os 2 classificadores testados, o classificador *fuzzy k-NN* foi mais apropriado ao problema estudado, apresentando menos erros (6,01%) e falsos alarmes (18,68%). Tais resultados foram obtidos para um grupo de 10501 perfis, incluindo 1517 perfis defeituosos, sendo que, 108 pares de exemplos e contra-exemplos foram utilizados para treinamento do algoritmo de classificação *fuzzy k-NN* e o restante dos dados foi utilizado nos testes. Entretanto, devido à presença de um valor percentual ainda significativo de erros (6,01%) e falsos alarmes (18,68%), um pós-processamento da imagem também é necessário neste caso.

Em (Liao *et al.*, 2003), outros tipos de classificadores também foram testados. Os melhores resultados foram obtidos utilizando-se uma rede neural MLP, com 25 neurônios de entrada (1 para cada característica), 25 neurônios na camada intermediária e 1 neurônio de saída. Liao *et al.* (2003) observaram, entretanto, que o desempenho da rede difere, dependendo das condições iniciais de treinamento (conjunto de pesos iniciais). Mesmo assim, o desempenho médio foi, em termos gerais, superior aos resultados obtidos anteriormente com os classificadores de agrupamento *fuzzy*.

Perner *et al.* (2001) realizaram um estudo comparativo entre vários tipos de RNA e árvores de decisão, em aplicações voltadas à detecção de defeitos longitudinais

ao cordão de solda, como trincas e mordeduras, em imagens radiográficas. Embora o principal enfoque de tal trabalho seja a comparação quantitativa e qualitativa entre ambos os classificadores, uma metodologia para detecção de defeitos com base nos perfis transversais do cordão de solda também é apresentada. A estratégia compreende subdividir a imagem da solda em blocos de 50x50 *pixels*, denominados regiões de interesse (ROI). Cada ROI é submetida a um pré-processamento para eliminação de ruído que inclui a utilização de um filtro passa-altas baseado na transformada rápida de Fourier e um filtro baseado na transformada *wavelet*, melhor detalhado em (Strang, 1989). Após esta etapa inicial, 36 parâmetros, baseados em características extraídas dos perfis transversais do cordão de solda, são calculados para cada ROI. As principais características utilizadas para detecção de defeitos estão baseadas nas dimensões dos principais picos e vales presentes nos perfis. Com base nos parâmetros levantados, as ROIs são classificadas quanto à ausência de defeitos ou quanto à presença de trinca ou mordedura.

#### **4.5.7) Detecção de defeitos com base na subtração da imagem com um fundo estimado**

Dando seqüência aos estudos apresentados nos trabalhos anteriores (Liao e Li, 1998; Liao *et al.*; 1999), Wang e Liao (2002) introduziram uma nova metodologia para detecção de defeitos em soldas radiografadas. O método de detecção apresentado, embora conservasse vários aspectos relacionados aos trabalhos precedentes, caracterizou-se pelo fato de sugerir a segmentação dos defeitos com base na subtração da imagem da solda com uma imagem do fundo estimado. O resultado desta subtração é, basicamente, uma imagem contendo apenas os defeitos e ruído de alta freqüência.

Para eliminar o ruído da imagem resultante da subtração, Wang e Liao (2002) obtiveram resultados satisfatórios utilizando uma técnica de limiarização baseada no histograma da imagem, proposta anteriormente por Aoki e Suga (1999). O resultado é uma imagem limiarizada contendo apenas os defeitos presentes no cordão de solda. A figura 4.12 mostra a seqüência de resultados obtidos através deste processamento.

Quanto ao fundo estimado, este é gerado com o auxílio de um software analítico (TableCurve 3D<sup>®</sup>), cujo princípio de funcionamento é gerar uma curva 3D aproximada da imagem de entrada (cordão de solda), com base em funções disponíveis em seu banco de dados. Para selecionar a função mais apropriada, utiliza-se um *ranking*

baseado no cálculo do menor erro quadrático. A função que apresentar o menor erro é selecionada pelo sistema.



Figura 4.12 – Sequência de resultados obtidos por Wang e Liao (2002), através da subtração da imagem original (a) com o fundo estimado (b) antes (c) e após (d) a limiarização.

Uma outra metodologia para detecção de defeitos em soldas foi proposta por Schneider *et al.* (2004b), melhor detalhada em Schneider (2005). Tal metodologia, assim como em (Wang e Liao, 2002), baseia-se na subtração da imagem do cordão de solda com uma imagem do fundo estimado. Schneider *et al.* (2004b) observaram que a presença de defeitos pode gerar quedas abruptas na curva dos perfis horizontais e/ou verticais da imagem do cordão de solda. Portanto, ao invés de utilizar funções aproximadas para gerar um fundo estimado como em (Wang e Liao, 2002), Schneider *et al.* (2004b) desenvolveram um filtro capaz “corrigir” o perfil da linha ou coluna em análise, eliminando as quedas abruptas do mesmo. Este procedimento, quando aplicado às linhas ou colunas da imagem radiográfica do cordão de solda, resulta em uma imagem do fundo estimado do cordão. O resultado da subtração da imagem original com o fundo estimado é o realce dos defeitos, o que permite que os mesmos sejam segmentados através de uma simples operação de limiarização. Por se tratar de uma das metodologias implementadas no presente trabalho, os próximos parágrafos fornecem detalhes adicionais sobre esta técnica de segmentação.

O método proposto por Schneider *et al.* (2004b) compreende três etapas principais:

- Pré-processamento
- Filtragem
- Pós-processamento

Schneider *et al.* (2004b) adotaram uma seqüência inicial de procedimentos para o aprimoramento da imagem radiográfica em análise em dois estágios:

- aprimoramento do contraste, com base na expansão do histograma;
- redução do ruído, através do filtro da mediana.

Antes de apresentar o filtro proposto por Schneider *et al.* (2004b), é necessário descrever alguns parâmetros:

- $i$ : linha (onde  $i = 0, 1, \dots, n-1$ );
- $j$ : coluna (onde  $j = 0, 1, \dots, m-1$ );
- $p_j$ : perfil original da coluna  $j$ ;
- $pf_j^+$ : perfil de  $j$  filtrado no sentido de cima para baixo ( $\downarrow$ );
- $pf_j^-$ : perfil de  $j$  filtrado no sentido de baixo para cima ( $\uparrow$ );
- $pf_j$ : composição dos sinais de saída do filtro ( $pf_j^+$  e  $pf_j^-$ ) para o perfil  $p_j$ ;
- $p_i$ : perfil original da linha  $i$ ;
- $pf_i^+$ : perfil de  $i$  filtrado no sentido da esquerda para direita ( $\rightarrow$ );
- $pf_i^-$ : perfil de  $i$  filtrado no sentido de direita para esquerda ( $\leftarrow$ );
- $pf_i$ : composição dos sinais de saída do filtro ( $pf_i^+$  e  $pf_i^-$ ) para o perfil  $p_i$ ;
- $coef_h$  e  $coef_v$ : coeficientes de filtragem horizontal e vertical do filtro;

Para cada coluna ( $j$ ) da imagem, a filtragem do perfil original ( $p_j$ ) ocorre em dois sentidos ( $\downarrow$  e  $\uparrow$ ), originando dois sinais ( $pf_j^+$  e  $pf_j^-$ ), calculados, respectivamente, através das equações (4.2) e (4.3). As figuras 4.13b e 4.13c permitem visualizar o perfil original e os perfis filtrados, respectivamente, nos sentidos  $\downarrow$  e  $\uparrow$ , para a coluna indicada na imagem da figura 4.13a.

condição inicial:  $pf_j^+(0) = p_j(0)$

$$p/ i = 1, 2, \dots, n-1: \begin{cases} se: p_j(i) > pf_j^+(i-1) \Rightarrow pf_j^+(i) = p_j(i) \\ caso\ contrário: pf_j^+(i) = coef_v * p_j(i) + (1 - coef_v) * pf_j^+(i-1) \end{cases} \quad (4.2)$$

condição inicial:  $pf_j^-(n-1) = p_j(n-1)$

$$p/ i = n-2, n-3, \dots, 0: \begin{cases} se: p_j(i) > pf_j^-(i+1) \Rightarrow pf_j^-(i) = p_j(i) \\ caso\ contrário: pf_j^-(i) = coef_v * p_j(i) + (1 - coef_v) * pf_j^-(i+1) \end{cases} \quad (4.3)$$

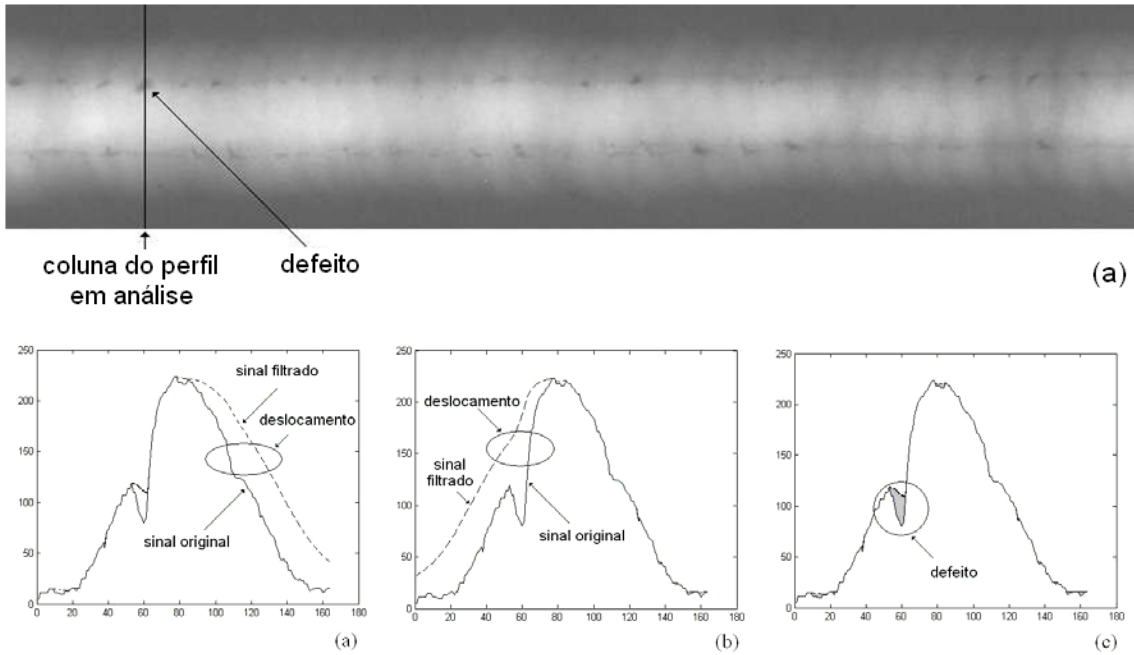


Figura 4.13 – (a) Imagem radiográfica de um cordão de solda, com a indicação do perfil em análise; perfil original e sinal filtrado no sentido (b) de cima para baixo e (c) de baixo para cima; (d) composição dos dois perfis gerados (Schneider, 2005).

A composição ( $pf_j$ ) dos sinais, conforme a equação (4.4), fornece o resultado final do procedimento de filtragem para cada coluna ( $j$ ) da imagem. Note que, ao comparar com o perfil original (fig. 4.13d), a região de defeito foi eliminada.

$$pf_j(i) = \min\{pf_j^+(i), pf_j^-(i)\} \quad (4.4)$$

Analogamente, para cada linha ( $i$ ) da imagem, a filtragem do perfil original ( $p_i$ ) ocorre em dois sentidos ( $\rightarrow$  e  $\leftarrow$ ), originando dois sinais ( $pf_i^+$  e  $pf_i^-$ ), calculados, respectivamente, através das equações (4.5) e (4.6). A composição ( $pf_i$ ) dos sinais, conforme a equação (4.7), fornece o resultado final do procedimento de filtragem para as linhas da imagem.

$$\text{condição inicial: } pf_i^+(0) = p_i(0)$$

$$p/j=0, 1, 2, \dots, m: \begin{cases} \text{se: } p_i(j) > pf_i^+(j-1) \Rightarrow pf_i^+(j) = p_i(j) \\ \text{caso contrário: } pf_i^+(j) = coef_h * p_i(j) + (1 - coef_h) * pf_i^+(j-1) \end{cases} \quad (4.5)$$

$$\text{condição inicial: } pf_i^-(m-1) = p_i(m-1) \quad (4.6)$$

$$p/j = m-2, m-3, \dots, 0: \begin{cases} \text{se: } p_i(j) > pf_i^-(j+1) \Rightarrow pf_i^-(j) = p_i(j) \\ \text{caso contrário: } pf_i^-(j) = coef_h * p_i(j) + (1 - coef_h) * pf_i^-(j+1) \end{cases}$$

$$pf_i^-(j) = \min\{pf_i^+(j), pf_i^-(j)\} \quad (4.7)$$

A filtragem das colunas é denominada filtragem vertical, enquanto que a filtragem das linhas é denominada filtragem horizontal. Os resultados obtidos são, respectivamente, os fundos vertical (*back\_v*) e horizontal (*back\_h*) estimados.

As operações de subtração (equações 4.8 e 4.9) da imagem original pré-processada (fig. 4.14b) com as imagens dos fundos estimados (*back\_v* e *back\_h*) geram 2 novas imagens (*sub\_v* e *sub\_h*), com detalhes diferentes dos defeitos realçados (Schneider *et al.*, 2004b). Tais imagens são combinadas através da equação (4.10), de forma a gerar um único resultado (*r*), que pode ser visualizado na figura 4.14c.

$$sub\_v(i, j) = back\_v(i, j) - p_j(i) = pf_j(i) - p_j(i) \quad (4.8)$$

$$sub\_h(i, j) = back\_h(i, j) - p_i(j) = pf_i(j) - p_i(j) \quad (4.9)$$

$$r(i, j) = \sqrt{sub\_v^2(i, j) + sub\_h^2(i, j)} \quad (4.10)$$

Terminada a etapa de filtragem, o pós-processamento envolve basicamente 3 estágios: realce dos contornos dos defeitos, limiarização e atenuação do ruído. O primeiro estágio compreende uma operação de adição entre a imagem filtrada e a imagem resultante de um processo de detecção de bordas, usando o filtro *Sobel*. Tal procedimento resulta no realce dos contornos dos defeitos, como se pode visualizar na figura 4.14d.

Para o segundo estágio (limiarização) do pós-processamento, Schneider (2005) testou 4 tipos diferentes de limiarizadores: Otsu (Otsu, 1979), Kittler (Kittler e Illingworth, 1986), Kapur (Kapur *et al.*, 1985) e Sezgin e Sankur (Sezgin e Sankur, 2003). Destes, o limiarizador Kapur mostrou um melhor desempenho (menor taxa de ruído e falsos alarmes) em todos os testes realizados, e portanto, ficou definido como limiarizador padrão (*default*).

Finalmente, no último estágio (atenuação do ruído) do pré-processamento, a imagem limiarizada é submetida a uma filtragem pelo filtro da mediana. Tal



procedimento, segundo Schneider (2005), é necessário para eliminar parte do ruído (pontos isolados) gerado por falhas no processo de limiarização. O resultado final pode ser visualizado na figura 4.14e.

O conjunto de parâmetros usados para obter os resultados da figura 4.14 são os valores *default*, definidos em (Schneider, 2005), mostrados na tabela 4.1. Ao todo, este compreende cinco valores: o coeficiente ( $coef_v$ ) da filtragem dos perfis verticais, o coeficiente ( $coef_h$ ) da filtragem dos perfis horizontais, o tamanho da janela do filtro da mediana usado no pré ( $m_1 \times m_1$ ) e no pós-processamento ( $m_2 \times m_2$ ), e a técnica de limiarização.

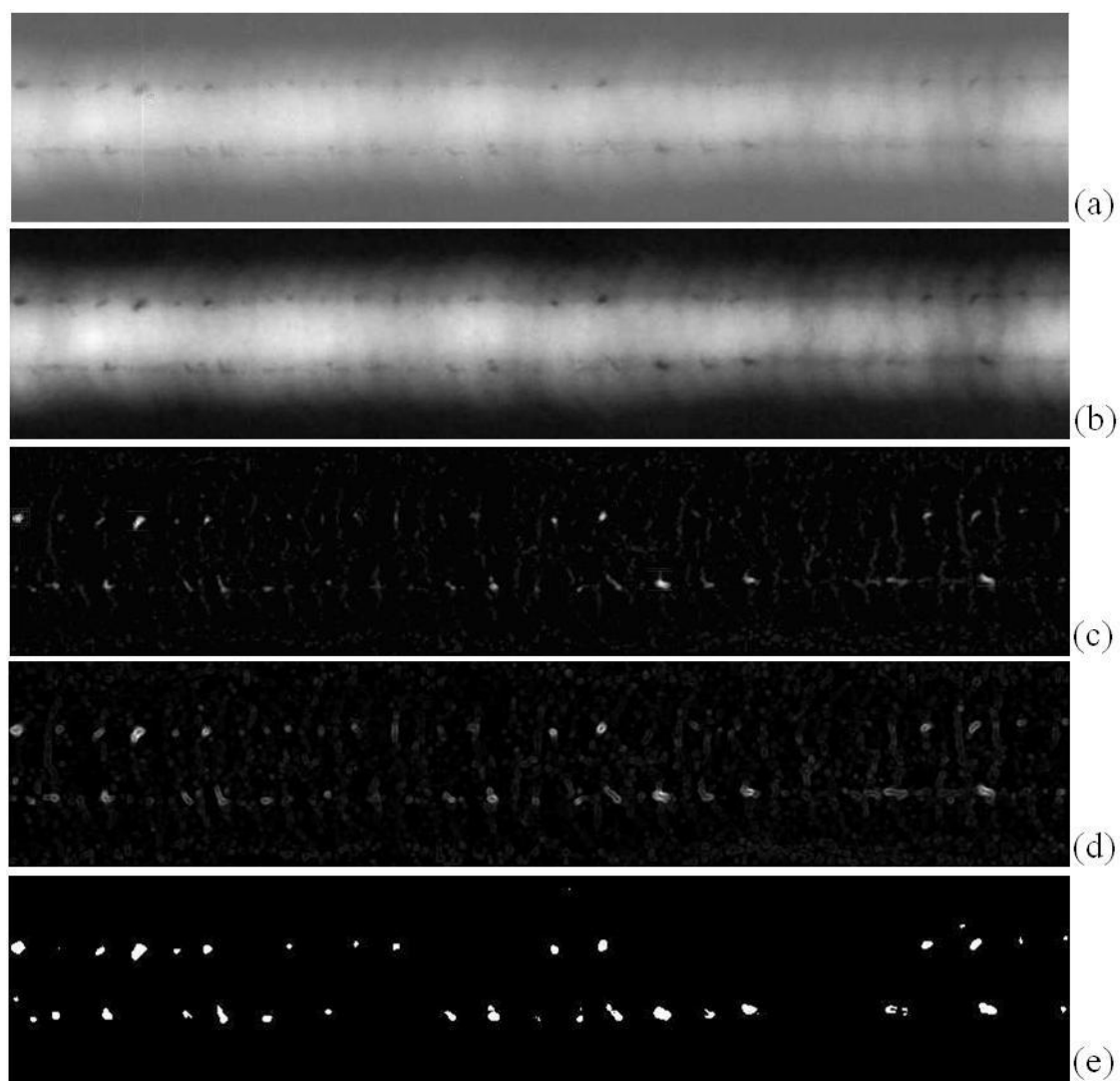


Figura 4.14 – Resultados das principais etapas do processo de segmentação proposto por (Schneider, 2004b): (a) Imagem original; (b) Resultado do pré-processamento; (c) Resultado da composição das duas imagens filtradas; (d) realce do contorno dos defeitos; (e) resultado da limiarização de Kapur.

Segundo Schneider (2005), quando os coeficientes ( $coef_h$  e  $coef_v$ ) de filtragem são muito próximos de 1, o perfil estimado acompanha o perfil original praticamente em toda a sua extensão, o que implica em perder algumas regiões de defeitos. Da mesma forma, quando os coeficientes são muito próximos de zero, o perfil estimado não acompanha o perfil original nas regiões de quedas abruptas e, conseqüentemente, os defeitos mais próximos entre si se fundem durante a segmentação.

Tabela 4.1: Valores *default* dos parâmetros usados em (Schneider, 2005) para segmentação de defeitos em cordões de solda em imagens radiográficas.

<b>símbolo</b>	<b>parâmetro</b>	<b>valor</b>
$coef_v$	coeficiente da filtragem dos perfis verticais	0,20
$coef_h$	coeficiente da filtragem dos perfis horizontais	0,05
$m_1 \times m_1$	tamanho da janela da mediana no pré-processamento	3×3
$m_2 \times m_2$	tamanho da janela da mediana no pós-processamento	3×3
–	limiarizador	Kapur

#### 4.5.8) Detecção de defeitos com base em técnicas semi-automáticas

Nacereddine *et al.* (2004a, 2005a, 2006a, 2006b) testaram diversas técnicas de limiarização para a segmentação de defeitos em imagens radiográficas de juntas soldadas. Embora as regiões de interesse (defeitos) sejam extraídas manualmente, as técnicas de limiarização que eles testaram em tais regiões são técnicas automáticas. Quanto aos resultados obtidos, os autores concluíram que os métodos de limiarização locais (adaptativos) apresentaram melhores resultados em comparação com métodos de limiarização global, exceto para imagens onde o defeito se contrasta melhor com fundo. Em tais casos, os métodos de Kapur e entropia relativa funcionaram satisfatoriamente. Entretanto, para todos os casos, foi necessário aplicar um pós-processamento à imagem resultante. Para tanto, os autores recorreram a recursos da morfologia matemática, como operações de abertura e fechamento de regiões, aplicadas de forma interativa.

#### 4.6) Extração de Características e Classificação de Defeitos

Após a segmentação, o próximo passo é a extração de características e classificação dos defeitos. Em tais áreas destacam-se uma série de trabalhos desenvolvidos por Silva *et al.* (2001; 2002a; 2002b; 2003; 2004a; 2004b). Tais

trabalhos apresentam um estudo minucioso sobre a relevância e exatidão de parâmetros para caracterização de defeitos e o uso de classificadores hierárquicos, não-hierárquicos, lineares e não-lineares para discriminá-los. No mesmo contexto, pode-se citar os trabalhos desenvolvidos por Nacereddine *et al.* (2000; 2004b; 2005b; 2006b) que também avaliaram parâmetros para caracterização de defeitos e o uso de RNA para classificá-los. Wang e Liao (2002), Perner *et al.* (2001) e Pádua (2004) também recorreram a RNA para classificação de defeitos. Entretanto, ao invés de utilizar características extraídas de defeitos detectados, Pádua (2004) propôs um método onde os defeitos são caracterizados a partir do formato de perfis lineares extraídos diretamente da imagem do cordão de solda. Shafeek *et al.* (2004a; 2004b) desenvolveram um sistema especialista para classificação de defeitos em juntas soldadas de tubulações, utilizando uma proposta baseada em árvores de decisão.

#### **4.7) Considerações Finais**

Como uma das primeiras conclusões do levantamento bibliográfico apresentado neste capítulo, pode-se afirmar que não existe um método universal para aprimorar a qualidade da imagem radiográfica digital. Entretanto, o uso do filtro da mediana para atenuação do ruído e de técnicas de aprimoramento do contraste baseadas na expansão ou equalização do histograma são os métodos mais frequentemente empregados, conduzindo a resultados geralmente satisfatórios.

Com relação à segmentação do cordão de solda, diferentes metodologias já foram investigadas. As soluções propostas estão direcionadas à segmentação de soldas fabricadas com reforço de material, que não tenham sido submetidas a reparos ou acabamento. Liao e Ni (1996) exploraram características extraídas dos perfis transversais deste tipo de solda para distingui-las de outros objetos. Liao *et al.* (2000) foram os pesquisadores que mais avançaram nesta linha de pesquisa. Eles propuseram uma técnica para segmentação automática de múltiplos cordões de solda, lineares ou curvos, em uma mesma imagem. Entretanto, como tal técnica se baseia na extração de características dos perfis transversais ao cordão de solda, é necessário distinguir a direção (horizontal ou vertical) que fornece tais perfis. Mesmo que tal informação fosse gerada automaticamente, ainda haveria problemas para se detectar os cordões de solda no caso de imagens com dois ou mais cordões que se interceptam. É possível que tais

problemas não tenham sido levados em consideração no trabalho de Liao *et al.* (2000) pelo fato de utilizarem apenas imagens onde todos os cordões de solda estavam na posição vertical sem se tocarem. Na realidade, em nenhuma das soluções encontradas na literatura faz-se referência a algum método de detecção automática do cordão que seja invariante à sua direção (ângulo de inclinação) na imagem. Estudos realizados por Pádua (2004) também demonstram que, em regiões de defeitos, os perfis transversais ao cordão de solda podem apresentar características bem diferentes dos perfis normalmente observados para soldas com reforço. Isto leva a concluir que o método proposto por Liao *et al.* (2000) também não é apropriado para detecção de cordões de solda que apresentam muitas indicações defeituosas ou defeitos muito grandes.

Nas últimas duas décadas, diversas metodologias para segmentação de discontinuidades em cordões de solda foram pesquisadas e desenvolvidas por diversos autores. É grande a variedade de soluções propostas para o mesmo problema. A maioria dos autores trata o problema da segmentação de defeitos como uma tarefa de reconhecimento de padrões, onde uma impressionante variedade de características para descrever regiões de defeitos, métodos para seleção de características e diversos tipos de classificadores são investigados. Em paralelo ao desenvolvimento de tais estudos, técnicas de processamento digital de imagens bastante eficientes foram desenvolvidas para segmentação de defeitos em cordões de solda, reduzindo a necessidade de um classificador para decisões do tipo defeito/não-defeito. Entretanto, percebeu-se que, para a maioria das soluções apresentadas, procura-se trabalhar com regiões de interesse que enquadram o cordão de solda ou defeitos. Geralmente, ao invés de se recorrer a um método automático para a detecção de tais regiões, estas são extraídas manualmente.

Quanto à caracterização e classificação de defeitos, é notório que, em praticamente todos estes trabalhos pesquisados, o posicionamento do defeito em relação ao cordão de solda é citado entre as principais características para discriminá-lo de outros defeitos. Na realidade, o posicionamento do cordão de solda serve de referência para o posicionamento dos defeitos. Este motivo soma-se às demais observações destas considerações finais, que justificam a busca de uma metodologia automática para a correta extração do cordão de solda, pelo menos em todas as situações mais frequentes. O próximo capítulo desta tese propõe um novo método para detecção automática de cordões de solda que visa atender a tal necessidade.

## 5) METODOLOGIA

### 5.1) Introdução

Este capítulo, além de apresentar as coleções de imagens radiográficas disponibilizadas para a realização do estudo desta tese, explica a metodologia proposta para a detecção automática de cordões de solda em imagens radiográficas.

### 5.2) Especificação das Imagens

Esta secção tem a finalidade de detalhar as especificações das imagens que foram disponibilizadas para estudos desta tese. Para tanto, tais imagens foram separadas em dois grupos principais, conforme o método de aquisição empregado:

- filmes radiográficos digitalizados através de *scanners* especiais;
- radiografias computadorizadas (RC);

#### 5.2.1) Coleções de Filmes Radiográficos Digitalizados

Três coleções de filmes radiográficos digitalizados foram obtidas das seguintes instituições: IIW (*International Institute of Welding*) e BAM (*Bundesanstalt für Material forschung und prüfung*). Tratam-se das mesmas coleções de imagens utilizadas nos trabalhos de Silva (1999; 2003). Todas estas imagens já foram disponibilizadas em formato digital. Para referenciar tais coleções, são utilizadas as seguintes siglas: IIW-I, IIW-II e BAM-I.

A primeira coleção (IIW-I) constitui-se de 83 filmes radiográficos provenientes do IIW. Tais filmes foram digitalizados por Silva (1999) com um *scanner* da marca UMAX, modelo Mirage II, utilizando a resolução de 500 dpi e 8 bits (256 níveis de cinza). As imagens possuem em média 950 linhas por 2900 colunas de *pixels* e foram fornecidas em formato digital do tipo *bitmap*. Embora não se tenha informações detalhadas sobre cada imagem, foi possível observar algumas características importantes, conforme destacado a seguir:

- Em 79 das 83 radiografias é possível observar que a solda foi fabricada com reforço de material. A figura 5.1a mostra uma destas radiografias. Devido ao reforço, o cordão de solda aparece mais claro, em contraste com o metal base.
- A grande maioria dos cordões de solda é de aspecto linear se estendendo horizontalmente de uma a outra extremidade da imagem, como geralmente ocorre para soldas radiografadas através de técnicas de exposição radiográfica do tipo PS com vista panorâmica VP.
- Em quatro das 79 radiografias de soldas com reforço, pode-se observar cordões de solda que se interceptam em uma junção em formato “T”, como ocorre para a imagem radiográfica da figura 5.1b.
- Quanto à largura das soldas, constatou-se que o cordão de solda mais estreito e o mais largo possuem uma largura média de aproximadamente 200 e 600 *pixels*, respectivamente.

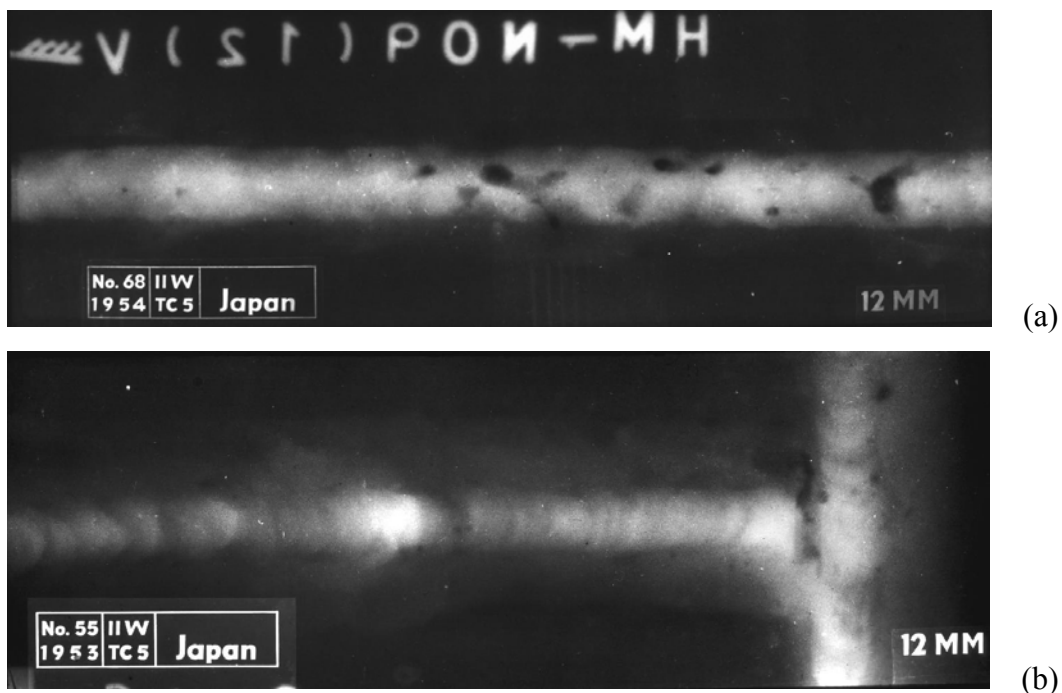


Figura 5.1 – (a) Radiografia de um cordão de solda com reforço (imagem de  $938 \times 2929$  *pixels* da coleção IIW-I) (b) Radiografia de dois cordões de solda que se interceptam formando uma junta “T” (imagem de  $958 \times 2784$  *pixels* da coleção IIW-I).

A segunda coleção (IIW-II) constitui-se de 66 filmes radiográficos também provenientes do IIW. Tais filmes foram digitalizados com um *scanner* da marca Microtek, modelo ScanMaker 9800 XL, munido de um adaptador para aumentar a intensidade de iluminação e utilizando uma resolução de 2000 dpi e 8 bits. Tais imagens

possuem em média 4000 linhas por 17500 colunas de *pixels* e foram fornecidas em formato digital comprimido (JPEG). Sobre os cordões de solda, também foram observadas algumas características importantes, conforme detalhado a seguir:

- Para todas as 66 radiografias, pode-se observar que as soldas foram fabricadas através de processos de soldagem por fusão com reforço de material.
- Em 62 das 66 radiografias, o cordão de solda se estende horizontalmente de uma a outra extremidade da imagem, como geralmente ocorre para a técnica PS (VP).
- Em uma das imagens, dois cordões de solda com reforço que se interceptam em uma junção em formato “T”, similar ao caso anterior, da figura 5.1b.
- Em outras duas imagens, há dois cordões de solda que se cruzam. Uma dessas imagens é mostrada na figura 5.2a.
- Em outra imagem (figura 5.2b), o cordão de solda parece não ter sido concluído e, por isso, não se estende de uma a outra extremidade da imagem.
- Quanto à largura da solda, constatou-se que o cordão de solda mais estreito e o mais largo possuem uma largura média de aproximadamente 570 e 3000 *pixels*, respectivamente.

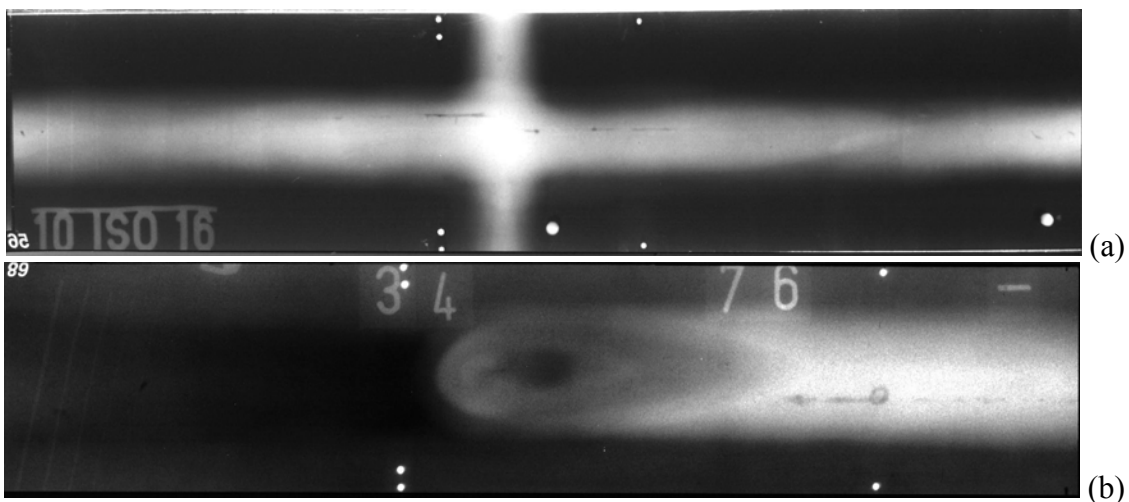


Figura 5.2 – (a) Radiografia de junta soldada com dois cordões de solda que se cruzam (imagem de  $3954 \times 17668$  *pixels* da coleção IIW-II); (b) Radiografia de um cordão de solda incompleto (imagem de  $3812 \times 17668$  *pixels* da coleção IIW-II).

A terceira coleção (BAM-I) constitui-se de 68 filmes radiográficos provenientes do BAM. Tais filmes foram digitalizados com um *scanner* da marca Lumisys/Kodak, modelo LS 85 SDR, utilizando a resolução de 630 dpi e 12 bits, tendo sido convertidos

posteriormente para 8 bits. Tais imagens possuem dimensões aproximadas de 1300 linhas por 5000 colunas de *pixels* e foram fornecidas em formato digital do tipo *bitmap*. Sobre os cordões de solda, várias observações são detalhadas a seguir.

- Para 67 das 68 radiografias, pode-se observar que as soldas foram fabricadas através de processos de soldagem por fusão com reforço de material.
- Quanto à técnica de exposição radiográfica, trata-se da coleção mais diversificada dentre as que foram disponibilizadas para este estudo, incluindo:
  - 45 radiografias do tipo PS-VS e VP (figura 2.24a do capítulo 2) com alguns cordões curvos (figura 5.3a).
  - 11 radiografias do tipo PD-VS (figura 5.3b)
  - três radiografias do tipo PD-VD com a fonte alinhada (figura 2.24c da secção 2.3.3 capítulo 2)
  - oito radiografias do tipo PD-VD com a fonte inclinada, projetando o cordão de solda com formato elíptico (figura 2.24d do capítulo 2).
- Constatou-se que o cordão de solda mais estreito e o mais largo possuem uma largura média de aproximadamente 150 e 980 *pixels*, respectivamente.



Figura 5.3 – (a) Radiografia panorâmica de um cordão de solda com reforço (imagem de 1298 × 4880 *pixels* da coleção BAM-I); (b) Radiografia PD-VD de um cordão de solda incompleto (imagem de 1760 × 4668 *pixels* da coleção BAM-I).



### 5.2.2) Imagens de Radiografia Computadorizada

Através do contato com autores de trabalhos que envolvem radiografia computadorizada (José e Milani, 2003), e com o consentimento da empresa ARCtest Serviços Técnicos de Inspeção e Manutenção Industrial Ltda. (Paulínea, SP), um total de 266 radiografias computadorizadas de juntas soldadas foi disponibilizado para o estudo deste trabalho. RC-I é a sigla utilizada para referenciar as imagens desta coleção. Junto com as imagens, foram fornecidas as seguintes informações:

- Sobre as juntas soldadas:
  - Tratam-se de juntas soldadas entre tubos de aço-carbono com chanfro V, com diâmetro nominal variando de 6 a 16 polegadas, com espessuras (parede) variando de 6,4 a 12,7 mm.
  - As soldas foram realizadas por processo de soldagem TIG, utilizando, como metal de adição, eletrodos revestidos de aço-carbono.
  
- Sobre o ensaio radiográfico:
  - As radiografias das juntas foram obtidas utilizando fonte de raios-x com potencial constante de 150 kV a 5 mA.
  - Para a aquisição das imagens, ao invés de filmes radiográficos, foram utilizadas telas de fósforo de 150mm×300mm da marca Gendex.
  - A técnica de exposição radiográfica PD-VS foi utilizada para todas as juntas radiografadas.
  - Após exposição em tempos variados (dependendo da espessura da peça), as telas de fósforo são transferidas a um equipamento de leitura óptica (Gendex-Denoptix), para aquisição da imagem em formato digital *bitmap*, com 256 tons de cinza e resolução de 150dpi.
  - Também foi fornecido um laudo especificando defeitos existentes.
  
- Também foram observadas as seguintes características sobre as imagens:
  - Vários cordões apresentam formato curvo ou sinuoso (figura 5.4a).
  - Em todas as imagens são usados marcadores de posição para indicar o trecho da solda a ser inspecionado.

- Constatou-se que o cordão de solda mais estreito e o mais largo possuem, respectivamente, largura em torno de 90 e 200 *pixels*.
- Também houve duas imagens em que dois cordões de solda se interceptam, formando uma junção “T”, como a radiografia mostrada na figura 5.4b.

Infelizmente, tais imagens só foram disponibilizadas em formato compactado JPEG (*Joint Photographic Experts Group*), resultando em perda de detalhes com relação ao seu formato original. Neste formato, todas as imagens possuem 256 tons de cinza e dimensões de 875×1689 *pixels*.

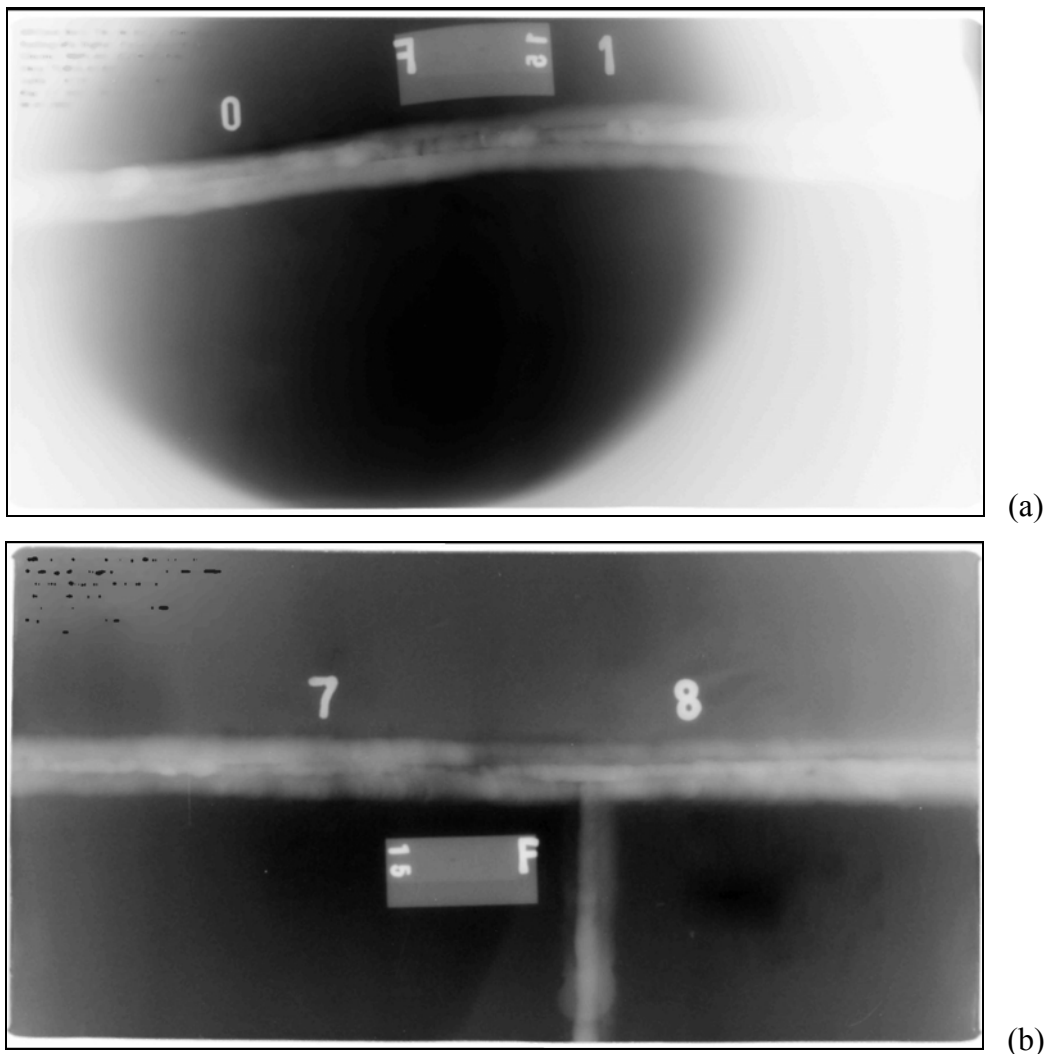


Figura 5.4 – (a) Radiografia computadorizada PD-VS de cordão de solda com aspecto sinuoso (imagem de 875×1689 *pixels* da coleção RC-I); (b) Radiografia computadorizada PD-VS de dois cordões de solda que se interceptam formando uma junta “T” (imagem de 875×1689 *pixels* da coleção RC-I).

### **5.3) Uma Proposta para Detecção Automática de Cordões de Solda**

A principal dificuldade encontrada ao tentar propor uma metodologia automática para detecção de cordões de solda está associada ao fato de que o cordão de solda pode apresentar diversas variações morfológicas de uma imagem para outra. Conforme ilustram as radiografias da figuras 5.1-5.4, o cordão de solda pode ser linear, curvo ou sinuoso e ter comprimento e largura variáveis. Em alguns casos, o cordão de solda ainda pode apresentar defeitos que dificultam o seu reconhecimento. Além de aspectos morfológicos, o contraste, a definição e o nível de ruído também podem variar de forma imprevisível de uma imagem para outra. Quanto à posição, os cordões podem estar localizados em diferentes regiões da imagem e em diferentes ângulos de orientação em relação à linha horizontal. Todos estes fatores destacam a complexidade do problema, mesmo quando se está considerando apenas um mesmo tipo de solda.

A solução proposta para a detecção automática de cordões de solda surgiu da idéia de se utilizar uma janela de imagem que possa ser modificada através de operações geométricas para se ajustar ao formato do cordão de solda. Busca-se otimizar os parâmetros que controlam as modificações na janela de imagem de forma a fazê-la convergir para a região da imagem que mais se assemelha a um padrão pré-estabelecido de cordão de solda. Para avaliar a semelhança entre o conteúdo da janela de imagem e o padrão, são utilizadas técnicas de codificação e comparação entre imagens. Para conduzir a busca e otimização dos parâmetros de controle, recorreu-se a implementação de um algoritmo genético. Todos os aspectos desta proposta são detalhados nos próximos itens desta secção.

#### **5.3.1) Geração de uma Imagem Modelo de Cordão de Solda**

A seguinte estratégia foi adotada para gerar uma imagem sem ruído e sem defeitos para representar um modelo de cordão de solda:

- Selecionar uma dentre as imagens radiográficas disponíveis.
- Recortar manualmente a região do cordão de solda.
- Extrair os perfis transversais ao cordão de solda
- Gerar a média dos perfis

- Tomar apenas metade (pode ser qualquer uma das duas metades) do perfil médio e repetir os valores para o outro lado, formando um perfil simétrico.
- Construir a imagem modelo, de modo que cada coluna da imagem seja uma cópia do perfil simétrico gerado.

Com base em tais procedimentos foi gerada a imagem da figura 5.5. Tal imagem, denominada imagem modelo (*Img*), foi adotada neste trabalho como padrão radiográfico de cordões de solda com reforço.



Figura 5.5 – Imagem *Img* (modelo de cordão de solda).

### 5.3.2) Codificação de imagens para representação de padrões

O método proposto nesta secção para a codificação de imagens utiliza o conceito de matriz de referência, que foi desenvolvido e aprimorado durante o estudo desta tese. Em sua concepção, a matriz de referência *Mref* é uma matriz onde seus elementos ( $Mref(u,v)$ ) representam pontos de referência ( $P_{uv}$ ) uniformemente distribuídos pela imagem. O valor de cada elemento da matriz está associado ao valor dos níveis de cinza na região do ponto correspondente.

Desde o seu conceito inicial, a principal melhoria agregada a esta técnica foi o critério utilizado para distribuir os pontos de referência na imagem. Ao invés de trabalhar com uma distribuição uniforme dos pontos de referência, a atual proposta recorre a uma distribuição sistemática dos pontos, de forma a privilegiar a extração de informações sobre regiões da imagem onde há significativas mudanças de níveis de cinza.

A imagem da figura 5.5 é usada a seguir para demonstrar tal método de codificação, o que inclui cinco passos principais:

- gerar o perfil vertical (horizontal) médio
- gerar o perímetro do perfil vertical (horizontal) médio

- distribuir as linhas (colunas) de referência
- definir a grade de referência
- gerar a matriz de referência

O primeiro passo para gerar a codificação da imagem  $Img$  é calcular a curva  $pv_{médio}$ , denominada perfil vertical médio e definida pela equação 5.1:

$$pv_{médio}(i) = f_A \times \frac{\sum_{j=0}^{nc-1} Img(i, j)}{nc}, \text{ para } 0 \leq i < nl \text{ e } 0,0 \leq f_A \leq 2,0 \quad (5.1)$$

onde:

$Img(i, j)$ : valor do *pixel*  $(i, j)$  da imagem  $Img$ ,

$nc$ : número de colunas da imagem  $Img$ .

$nl$ : número de linhas da imagem  $Img$ .

$f_A$ : fator de amplificação do perfil.

$pv_{médio}(i)$ : média dos níveis de cinza da linha  $i$ , amplificada pelo fator  $f_A$ .

O segundo passo é encontrar curva  $P_{pv}$ , denominada perímetro do perfil vertical médio e definida pela equação 5.2:

$$\begin{cases} P_{pv}(0) = 1 \\ P_{pv}(i) = P_{pv}(0) + i + \sum_{k=1}^i (|pv_{médio}(k) - pv_{médio}(k-1)|), \text{ quando } 1 \leq i \leq (nl-1) \end{cases} \quad (5.2)$$

onde:

$nl$ : número de linhas da imagem  $Img$ .

$P_{pv}(i)$  representa o perímetro da curva  $pv_{médio}$  para o intervalo  $[0, i]$ .

A figura 5.6a ajuda a visualizar o significado de  $P_{pv}(g(i))$ , para uma função  $g(i)$  qualquer. A figura 5.6b mostra o perfil vertical médio da imagem  $Img$  (para  $f_A=1,0$ ) e a figura 5.6c mostra a função  $P_{pv}(i)$ , aplicada ao perfil vertical médio da figura 5.6b. Para a imagem modelo, vale lembrar que o perfil é o mesmo para todas as colunas da imagem e, portanto, coincide com o perfil da figura 5.6b.

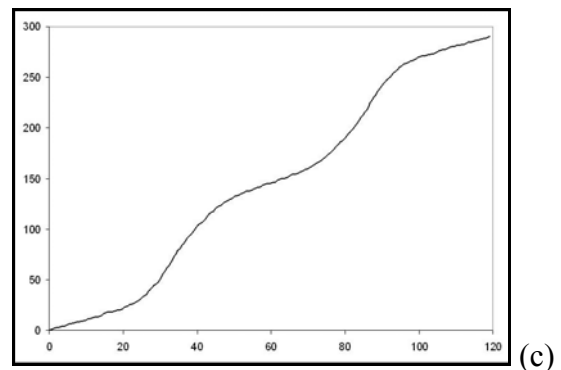
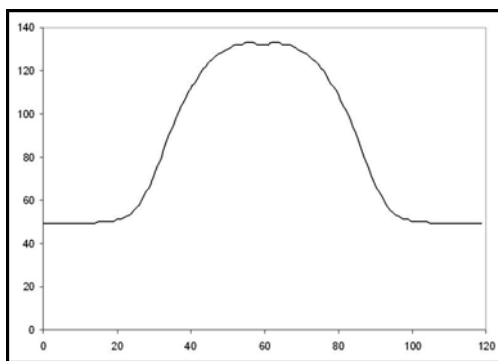
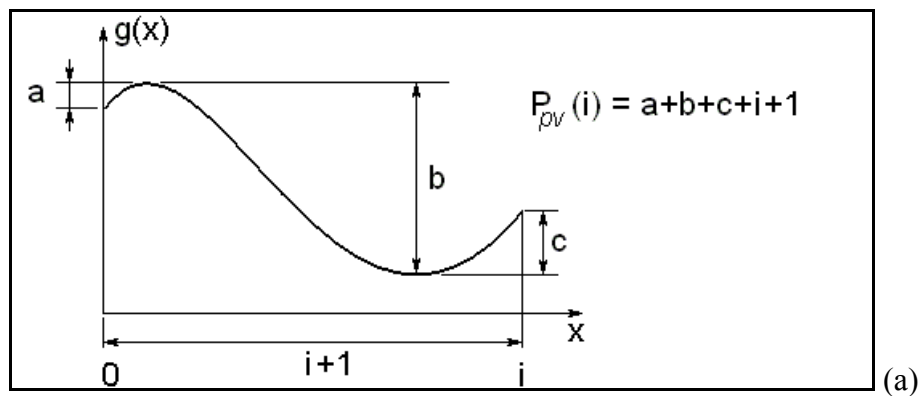


Figura 5.6 – (a) Cálculo do perímetro  $P_{pv}$ , de uma curva  $g(i)$  qualquer, no trecho  $[0 \ 1]$ ; (b) Perfil vertical médio da imagem  $Img$ ; (c) Perímetro do perfil vertical médio de  $Img$ .

O terceiro passo para gerar a codificação da imagem  $Img$  compreende a seleção de  $n+1$  linhas da imagem denominadas linhas de referência ( $i_0, i_1, \dots, i_{n+1}$ ). Tal seleção pode ser realizada de maneira que as linhas de referência estejam uniformemente distribuídas na imagem, como ilustra a figura 5.7a. Entretanto, no presente trabalho, as linhas de referência são selecionadas da seguinte forma:

1. primeira linha de referência:  $i_0 = 0$ ;
2. última linha de referência:  $i_n = nl-1$ ;
3. demais linhas de referência:  $i_u = P_{pv}^{-1}(P_{pv}(i_u))$ , para  $u = 1, 2, \dots, (nl-1)$

onde:

$P_{pv}(i_1), P_{pv}(i_2), \dots$  e  $P_{pv}(i_{n-1})$  são pontos que dividem o intervalo  $P_{pv}(0) \leq P_{pv}(i_u) \leq P_{pv}(nl-1)$  em  $n$  partes iguais.

Tal procedimento permite que as linhas de referência sejam selecionadas de maneira a se concentrar com mais frequência na proximidade de regiões onde há significativas mudanças de níveis de cinza (exemplo: bordas do cordão de solda), como mostra o resultado da figura 5.7b.

Uma observação importante é que existe uma relação entre a distribuição das linhas de referência e o fator de amplificação do perfil ( $f_A$ ), da equação 5.1. Aumentando  $f_A$ , as linhas ficam ainda mais concentradas nas regiões de bordas. Ao passo que diminuindo  $f_A$  as linhas ficam mais uniformemente distribuídas na imagem. No limite, quando  $f_A = 0,0$ , a distribuição das linhas de referência se torna a mesma da figura 5.7a. Isto acontece porque quando  $f_A = 0,0$ , a curva do perfil se iguala ao eixo das abscissas ( $pv_{médio} = 0$ ) e as equações 5.2 e 5.3 se resumem à seguinte igualdade:  $P_{pv}(i) = i$ .

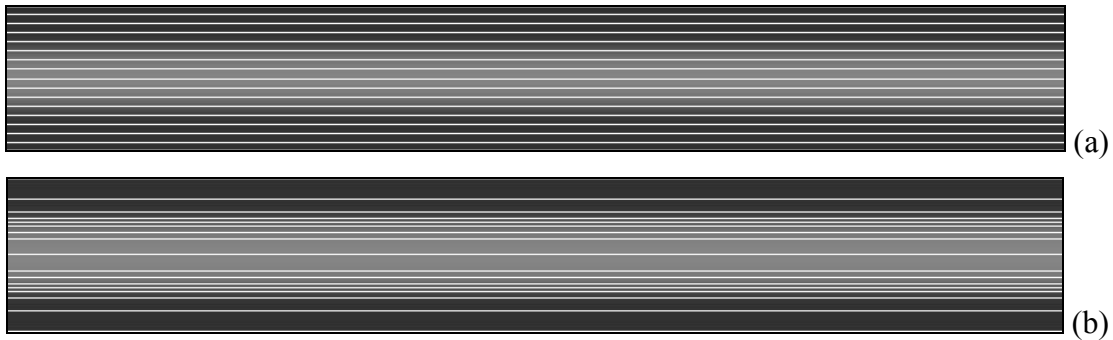


Figura 5.7 – (a) Linhas de referência distribuídas uniformemente. (b) Linhas de referência distribuídas sistematicamente em relação à distribuição de níveis de cinza.

Antes de dar início ao quarto passo, é necessário, primeiramente, gerar o posicionamento das colunas de referência ( $j_0, j_1, \dots$  e  $j_n$ ). Isto, na realidade, compreende uma repetição dos passos anteriores na imagem rotacionada em  $90^\circ$ . A figura 5.8 mostra a imagem *Img* com as linhas e colunas de referência geradas para  $n=16$ . Tal estrutura, formada de linhas e colunas, é denominada grade de referência. Então, no cruzamento das linhas e colunas dessa grade, são definidos os pontos de referência:

$$P_{uv} = (i_u, j_v), \text{ para } u = 0, 1, \dots, n \text{ e } v = 0, 1, \dots, n \quad (5.5)$$

onde:

$(i_u, j_v)$  são as coordenadas do ponto  $P_{uv}$  na imagem *Img*.

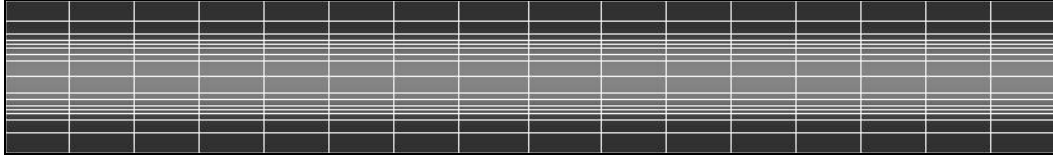


Figura 5.8 – Imagem *Img* com a grade de referência para  $n=16$ .

O quinto, e último, passo para a codificação da imagem *Img* é a construção da matriz de referência *Mref*:

$$\underline{Mref} = \begin{bmatrix} \underline{Mref}(0,0) & \dots & \underline{Mref}(0,n) \\ \dots & \underline{Mref}(u,v) & \dots \\ \underline{Mref}(n,0) & \dots & \underline{Mref}(n,n) \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Cada elemento *Mref*(*u,v*) da matriz é calculado em função dos níveis de cinza da imagem na região do ponto de referência correspondente (*P<sub>uv</sub>*). Para evitar que a presença de defeitos ou de ruído na imagem seja uma fonte de distúrbios na construção da matriz de referência, pode ser conveniente usar o valor médio dos pixels da vizinhança de *P<sub>uv</sub>*. Entretanto, como a imagem modelo *Img* não apresenta ruído e tampouco defeitos, recorreu-se a igualdade da equação 5.7 para definir o valor de cada elemento da matriz de referência para a imagem modelo:

$$\underline{Mref}(u, v) = \text{Img}(i_u, j_v) \quad (5.7)$$

onde:

*Img*(*i<sub>u</sub>*, *j<sub>v</sub>*) é o valor da imagem *Img* no ponto de coordenadas (*i<sub>u</sub>*, *j<sub>v</sub>*).

A barra, sublinhando a notação *Mref*, foi adotada para indicar que *Mref* é a matriz de referência gerada para a imagem modelo. Os valores gerados para os elementos da matriz de referência *Mref* podem ser visualizados na figura 5.9.

A metodologia descrita nesta secção também pode ser utilizada para a codificação de diferentes tipos de imagens de objetos. A figura 5.10, por exemplo, mostra o resultado do emprego deste método para a codificação de uma imagem radiográfica de um trecho de tubulação. Na figura 5.10a pode-se observar que a distribuição das colunas de referência é influenciada pelo formato cilíndrico da





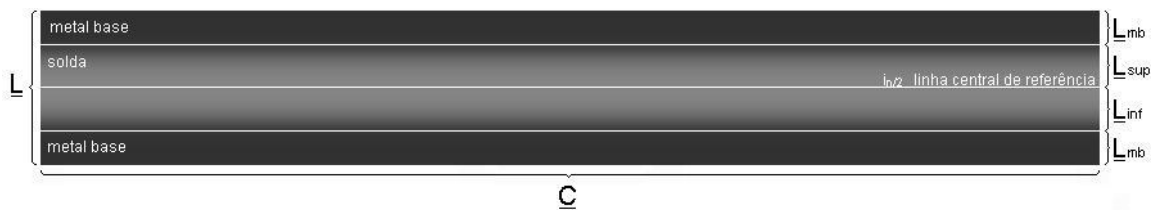


Figura 5.11 – Identificação de características da imagem modelo de cordão de solda.

Para indicar o centro do cordão de solda foi utilizada a linha de referência  $i_{n/2}$ . Com  $n$  valendo 16, esta corresponde à linha de referência  $i_8$ , que coincide com a 60ª linha da imagem *Img*. Tal linha é denominada linha central de referência.

Para determinar as bordas do cordão de solda da imagem modelo, foi utilizado o método proposto por Schneider *et al.* (2004a), descrito na revisão bibliográfica do capítulo 4 (secção 4.4.2). O emprego de tal método só foi possível porque a imagem modelo atende às seguintes condições: (1) o cordão de solda é linear, (2) está posicionado na direção horizontal e (3) se estende de uma extremidade a outra da imagem. A divisão da imagem em regiões de solda e de metal base é útil para identificar na matriz de referência (figura 5.9) quais pontos pertencem as quais entidades. As bordas encontradas para o cordão de solda se sobrepueram às linhas de referência  $i_2$  e  $i_{14}$ . Tais linhas são denominadas interface solda/metal base superior e inferior, respectivamente.

A tabela 5.1 descreve e fornece os valores das dimensões indicadas na figura 5.11. Por ser conveniente, adotou-se o uso de letras sublinhadas para indicar parâmetros originais referentes à imagem modelo do cordão de solda. A representação do padrão na realidade inclui as informações da tabela 5.1, a matriz de referência da figura 5.9 e as proporções da grade de referência, que aparece sobreposta à imagem *Img* na figura 5.8.

Tabela 5.1: Valores de dimensões úteis da imagem modelo do cordão de solda.

símbolo	descrição	valor
$\underline{L}_{sup}$	largura da solda do lado superior à linha $i_{n/2}$	34 <i>pixels</i>
$\underline{L}_{inf}$	largura da solda do lado inferior à linha $i_{n/2}$	34 <i>pixels</i>
$\underline{L}_{mb}$	largura de metal base adjacente ao cordão de solda	26 <i>pixels</i>
$\underline{L}_{solda}$	largura do cordão de solda (coincide com a soma das larguras $\underline{L}_{inf}$ e $\underline{L}_{sup}$ )	68 <i>pixels</i>
$\underline{L}$	largura total (coincide com $\underline{nl}$ , o número de linhas da imagem)	120 <i>pixels</i>
$\underline{C}$	comprimento do cordão de solda (coincide com $\underline{nc}$ , o número de colunas da imagem)	825 <i>pixels</i>

Outra consideração importante tem a ver com as extremidades do cordão de solda. Em radiografias panorâmicas (VP) e PS-VS o cordão de solda geralmente se estende de uma a outra extremidade da imagem, como ilustrado na imagem modelo *Img*. Entretanto, uma situação diferente pode ocorrer em radiografias PD-VS e, mais frequentemente, em radiografias PD-VD. Em tais casos as extremidades do cordão de solda muitas vezes são limitadas não pelas bordas da imagem, mas por regiões que correspondem à espessura da tubulação. A figura 5.12a ilustra uma técnica de exposição radiográfica (exposição tangencial) frequentemente empregada para medição de espessura de tubulação. A imagem produzida por tal técnica permite verificar que as regiões correspondentes à espessura da tubulação possuem tonalidade mais clara. Tal efeito é observado também na radiografia PD-VD da figura 5.12b. Observa-se que o comprimento do cordão de solda é limitado por tais regiões mais claras (regiões A e B, indicadas na figura 5.12b).

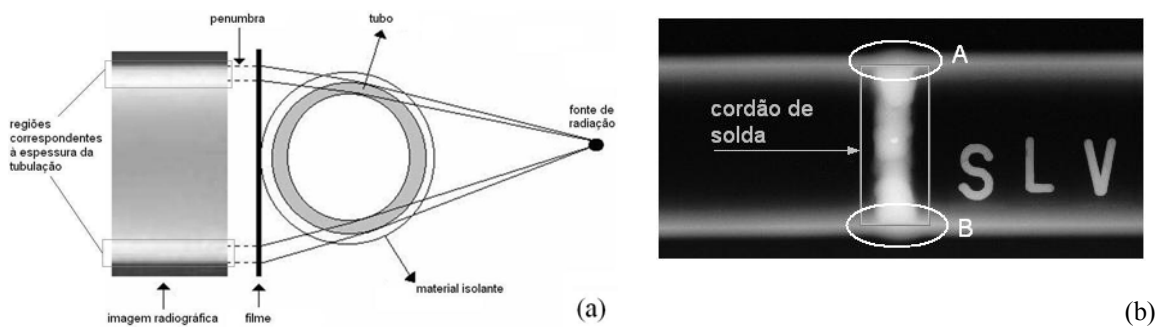


Figura 5.12 – (a) Técnica de exposição radiográfica tangencial para medição de espessura de tubulações (Onel et al, 2000), (b) Radiografia PD-VD para inspeção de soldas (imagem do BAM).

A estratégia adotada para incorporar tal informação à matriz de referência da imagem modelo foi alterar a primeira e a última coluna da matriz, substituindo cada elemento pelo valor máximo da respectiva coluna, conforme ilustra a figura 5.13.

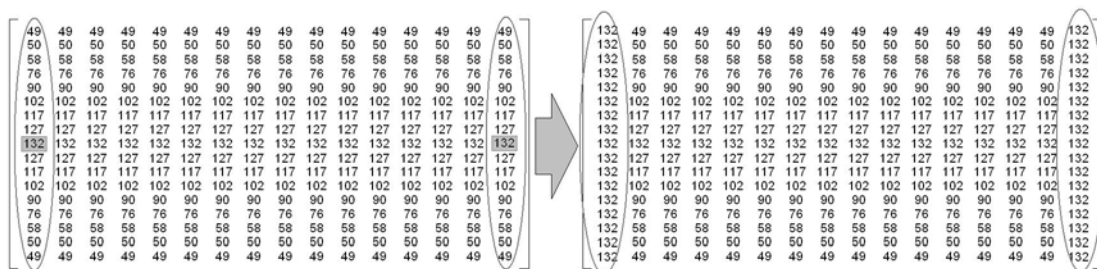


Figura 5.13 – Elementos da primeira e da última coluna da matriz de referência sendo substituídos pelo valor máximo da respectiva coluna.

### 5.3.4) Transformações aplicadas à grade de referência

A grade de referência é utilizada neste trabalho para associar pontos de uma região da imagem teste (denominação dada à imagem que estiver sendo analisada) com a representação da imagem modelo. Esta seção descreve as transformações geométricas utilizadas para modificar o tamanho, o formato e a posição da grade de referência, bem como estabelecer os parâmetros que controlam tais transformações. O objetivo de modificar a grade de referência é adequá-la de forma a enquadrar o cordão de solda existente na imagem teste e, então, estabelecer os limites de corte para extraí-lo. Para tanto, as transformações geométricas descritas aqui envolvem os seguintes itens:

- deslocamento da linha central de referência
- mudança de escala na direção horizontal
- mudança de escala na direção vertical
- escolha do ponto central de referência ( $p_0$ )
- ajuste de curvatura do lado direito de  $p_0$
- ajuste de curvatura do lado esquerdo de  $p_0$
- rotação em torno de  $p_0$
- translação de  $p_0$  para  $p_0$ .

O deslocamento da linha central de referência ( $i_{n/2}$ ) ajusta o formato da grade para situações onde o perfil do cordão de solda não é simétrico em relação à linha central (exemplo: soldas que sofreram reparos). Esta operação é aplicada somente aos pontos da região de solda e apenas altera a proporção  $L_{sup}/L_{inf}$ , mantendo a largura  $\underline{L}_{solda}$ . O parâmetro que controla tal modificação é definido pela equação 5.8:

$$sv_{rel} = \frac{L_{sup}'}{\underline{L}_{solda}}, \text{ onde } 0,0 < sv_{rel} < 1,0 \quad (5.8)$$

onde:

$sv_{rel}$ : fator de escala vertical relativa,

$L_{sup}'$ : largura superior da solda após o deslocamento da linha  $i_{n/2}$ .

$\underline{L}_{solda}$ : largura da região de solda na imagem modelo  $Img$ .

Como a largura da solda  $L_{solda}$  permanece a mesma, o novo valor para a largura inferior da solda ( $L_{inf}'$ ) é dado pela equação 5.9:

$$L_{inf}' = L_{solda} - L_{sup}' \quad (5.9)$$

As novas coordenadas ( $i_u'$ ,  $j_v'$ ) para os pontos da grade são dadas pelas equações 5.10 e 5.11:

$$i_u' = \begin{cases} = L_{mb} + 2sv_{rel}(i_u - L_{mb}), & \text{se } 0 \leq (i_u - L_{mb}) \leq L_{sup} \\ = (L_{mb} + L_{solda}) + 2(1 - sv_{rel})(i_u - (L_{mb} + L_{solda})), & \text{se } L_{sup} \leq (i_u - L_{mb}) \leq L_{solda} \\ = i_u, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5.10)$$

$$j_v' = j_v \quad (5.11)$$

Na figura 5.14a é mostrada a grade de referências original. A grade modificada pelo deslocamento da linha central de referência, usando  $sv_{rel} = 10/17$ , é mostrada na figura 5.14b. Na figura 5.15 é possível visualizar com maior clareza o deslocamento das linhas de referência devido a esta operação.

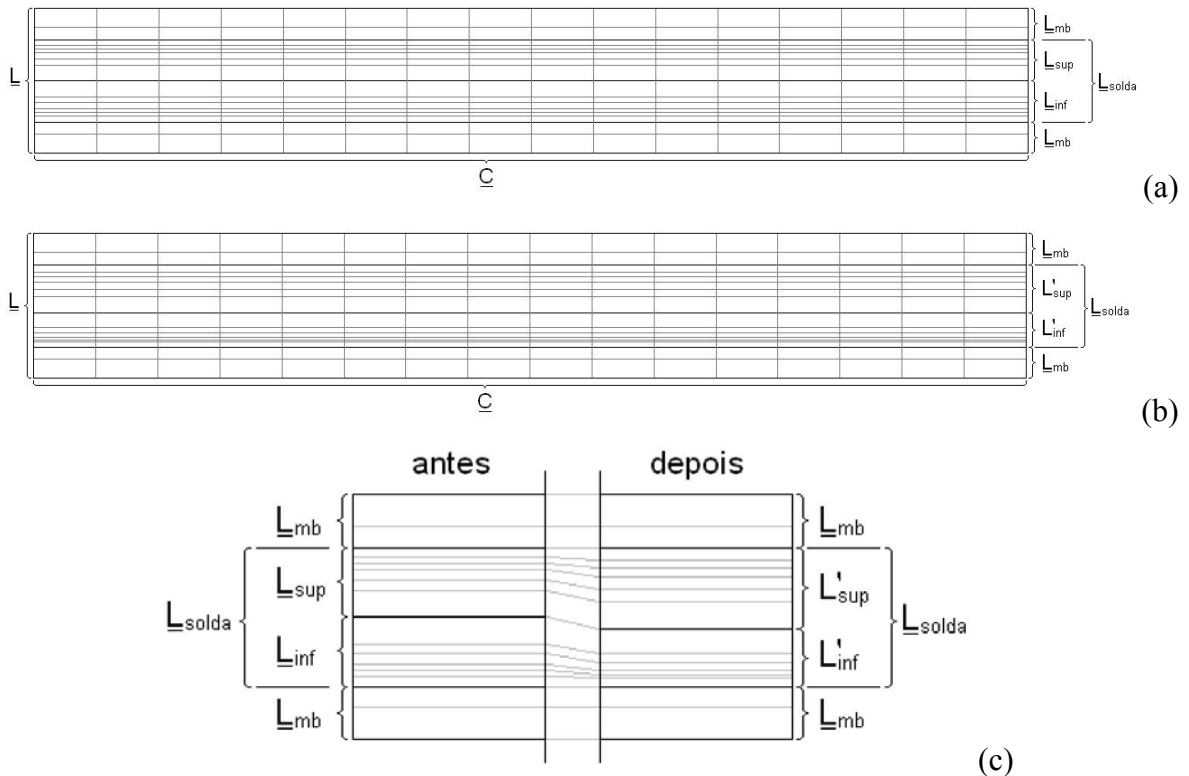


Figura 5.14 – (a) Grade de referência gerada para a imagem modelo *Img*, (b) resultado do deslocamento da linha central de referência e (c) visualização do posicionamento das linhas de referência antes e após o deslocamento da linha central.

As mudanças de escala na direção horizontal e vertical são operações controladas pelos respectivos fatores de escala:

$$sh = \frac{C}{\underline{C}} \quad (5.12)$$

$$sv = \frac{L}{\underline{L}} \quad (5.13)$$

onde:

*sh*: fator de escala horizontal,

*sv*: fator de escala vertical,

$\underline{C}$ : comprimento da grade gerada para a imagem modelo *Img*,

*C*: comprimento da grade gerada após a mudança de escala,

$\underline{L}$ : largura da grade gerada para a imagem modelo *Img*,

*L*: largura da grade gerada após a mudança de escala.

Diferente do que ocorre na operação de deslocamento da linha central de referência, todas as dimensões da imagem são alteradas proporcionalmente às novas escalas atribuídas. As equações 5.14-5.19 dão os valores atualizados dessas dimensões:

$$L_{solda} = sv \times \underline{L}_{solda} \quad (5.14)$$

$$L_{sup} = sv \times \underline{L}_{sup} \quad (5.15)$$

$$L_{inf} = sv \times \underline{L}_{inf} \quad (5.16)$$

$$L_{mb} = sv \times \underline{L}_{mb} \quad (5.17)$$

$$C_{esq} = sh \times \underline{C}_{esq} \quad (5.18)$$

$$C_{dir} = sh \times \underline{C}_{dir} \quad (5.19)$$

As equações 5.20 e 5.21 dão os valores atualizados das coordenadas dos pontos da grade, após as operações de mudança de escala:

$$i_u = sh \times \underline{i}_u \quad (5.20)$$

$$j_v = sv \times \underline{j}_v \quad (5.21)$$

A grade ilustrada na figura 5.15 resulta das operações de mudança de escala sobre a grade da figura 5.14b, utilizando os fatores  $sh=41/55$  e  $sv=25/24$ .

A escolha do ponto central de referência divide a imagem em duas partes (esquerda e direita) que passam a estar sujeitas a diferentes modificações. Por definição, o ponto central de referência  $\underline{P}_0$  sempre é selecionado dentre os pontos da linha central de referência.  $C_{esq}$  e  $C_{dir}$  representam, respectivamente, o comprimento do lado esquerdo e do lado direito de  $\underline{P}_0$ . A relação entre  $C_{esq}$  e o comprimento total  $C$  define o fator de escala horizontal relativa  $sh_{rel}$ :

$$sh_{rel} = \frac{C_{esq}}{C}, \text{ onde } 0,0 \leq sh_{rel} \leq 1,0 \quad (5.22)$$

Como o comprimento  $C$  não é afetado pela escolha do ponto  $\underline{P}_0$ , o valor do comprimento da grade do lado direito de  $\underline{P}_0$  é dado pela equação 5.23:

$$C_{dir} = C - C_{esq} \quad (5.23)$$

A figura 5.15 mostra um sistema de coordenadas  $yx$  centrado em  $\underline{P}_0$ , onde  $sh_{rel} = 157/246$  e as equações 5.24 e 5.25 dão os valores das coordenadas  $(\underline{y}_u, \underline{x}_v)$  dos pontos da grade, em função das coordenadas  $(i_u, j_v)$ :

$$\underline{y}_u = i_u - (L_{mb} + L_{sup}) \quad (5.24)$$

$$\underline{x}_v = j_v - C_{dir} \quad (5.25)$$

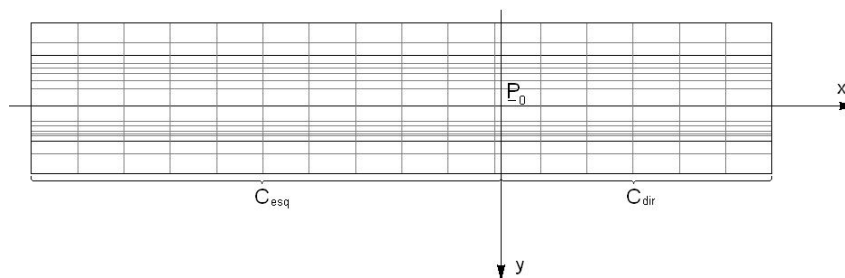


Figura 5.15 – Ponto central de referência  $\underline{P}_0$  e sistema de coordenadas  $yx$ .

A figura 5.16 ilustra a operação de ajuste de curvatura aplicada a um ponto  $\underline{P}_{uv}$  localizado à direita de  $\underline{P}_0$ . Caso  $\underline{P}_{uv}$  estivesse à esquerda de  $\underline{P}_0$ , o raio de curvatura mudaria de  $R_{dir}$  para  $R_{esq}$ . O ajuste de curvatura aplicado a  $\underline{P}_{uv}$  (posição original) se resume a transladar este ponto das suas coordenadas  $(\underline{y}_u, \underline{x}_v)$  para a posição do ponto  $\underline{P}_{uv}'$  (posição intermediária), cujas coordenadas  $(\underline{y}_u', \underline{x}_v')$  são obtidas das equações 5.26-5.30:

$$y_u' = \underline{y}_u + \Delta y_u' \quad (5.26)$$

$$x_v' = \underline{x}_v + \Delta x_v' \quad (5.27)$$

onde:

$$\Delta y_u' = R (1 - \cos(\underline{x}_v / R)) \quad (5.28)$$

$$\Delta x_v' = - (R/|R|) R ((\underline{x}_v / R) - \text{sen}(\underline{x}_v / R)) \quad (5.29)$$

$$R = \begin{cases} = R_{esq}, \text{ se } \underline{x}_v < 0 \\ = R_{dir}, \text{ caso contrário} \end{cases} \quad (5.30)$$

$R_{esq}$  é o raio de curvatura para  $\underline{P}_{uv}$  localizado à esquerda de  $\underline{P}_0$

$R_{dir}$  é o raio de curvatura para  $\underline{P}_{uv}$  localizado à direita de  $\underline{P}_0$

Na figura 5.17 pode-se verificar o resultado do ajuste de curvatura aplicado a todos os pontos da grade, usando  $R_{esq} = -1000$  e  $R_{dir} = 850$ .

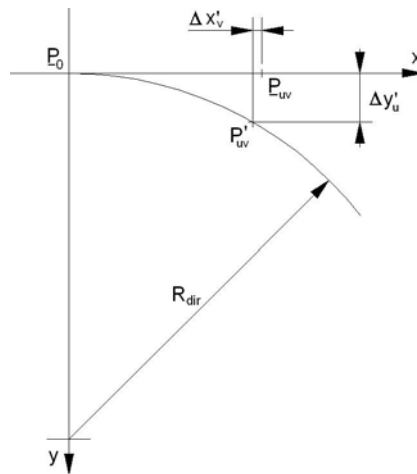


Figura 5.16 – Operação de ajuste de curvatura aplicada a um ponto à direita de  $\underline{P}_0$ .

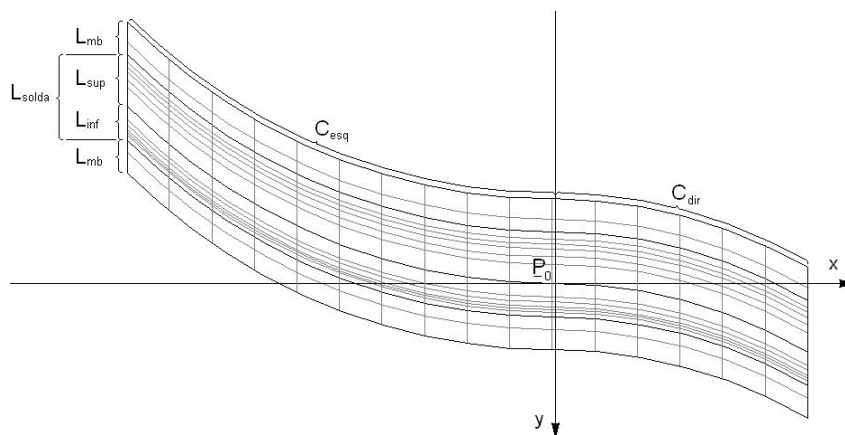


Figura 5.17 – Resultado do ajuste de curvatura aplicado à grade da figura 5.15.



A rotação e a translação de imagens estão entre os assuntos abordados no capítulo 3 (secção 3.3). Os mesmos princípios são aplicados aqui para girar a grade de referência em torno do ponto  $\underline{P}_0$  e fazer a translação para o ponto  $P_0$ . Considerando as coordenadas  $(y_u', x_v')$  de um ponto  $P_{uv}'$  (posição intermediária) da grade, com as operações de rotação e translação, a nova posição de  $P_{uv}'$  será dada pelo ponto  $P_{uv}$  (posição final), cujas coordenadas  $(y_u, x_v)$  são dadas pelas equações 5.31 e 5.32:

$$y_u = y_0 + x_v' \text{sen}(\theta) + y_u' \text{cos}(\theta) \quad (5.31)$$

$$x_v = x_0 + x_v' \text{cos}(\theta) - y_u' \text{sen}(\theta) \quad (5.32)$$

onde:

$(y_0, x_0)$  são as coordenadas de  $P_0$ ,

$\theta$  é o ângulo de rotação.

A figura 5.18 mostra o resultado da rotação e translação da grade da figura 5.14, utilizando  $\theta = 30$ ,  $y_0 = 475$  e  $x_0 = 1000$ . Para facilitar futuras citações deste exemplo neste mesmo capítulo, esta grade será denominada grade modificada.

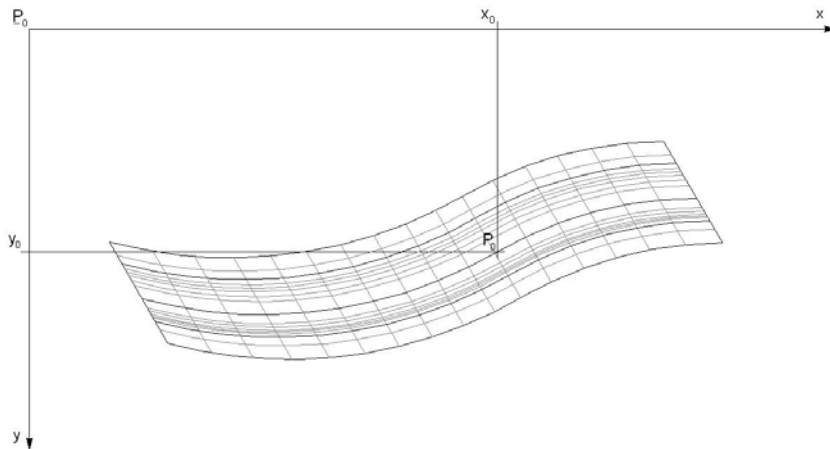


Figura 5.18 – Grade de referência (modificada), após seqüência de operações.

O conjunto dos parâmetros que controlam as operações aplicadas à grade de referência é representado pelo vetor  $\tau^2$ :

$$\tau = (y_0, x_0, sh, sv, sh_{rel}, sv_{rel}, R_{esq}, R_{dir}, \theta), \quad (5.33)$$

<sup>2</sup> No presente trabalho, ao fornecer as coordenadas de um ponto na imagem, convencionou-se escrever a coordenada da linha ( $y_0$ ) sempre antecedendo a coordenada da coluna ( $x_0$ ).

A tabela 5.2 lista as operações aplicadas à grade de referência, identifica os parâmetros que controlam cada operação e fornece os valores dos parâmetros que foram utilizados no exemplo das figuras 5.14-5.18. A ordem em que as operações estão listadas na tabela segue a mesma seqüência em que foram empregadas.

Tabela 5.2: Operações aplicadas à grade de referência e parâmetros de controle.

operação	parâmetro de controle		
	símbolo	descrição	valor do exemplo
deslocamento da linha central de referência	$sv_{rel}$	fator de escala vertical relativa	10/17
mudança de escala na direção horizontal	$sh$	fator de escala horizontal	41/55
mudança de escala na direção vertical	$sv$	fator de escala vertical	25/24
escolha do ponto central de referência ( $\underline{P}_0$ )	$sh_{rel}$	fator de escala horizontal relativa	157/246
ajuste de curvatura do lado direito de $\underline{P}_0$	$R_{dir}$	raio de curvatura do lado direito	-1000
ajuste de curvatura do lado esquerdo de $\underline{P}_0$	$R_{esq}$	raio de curvatura do lado esquerdo	850
rotação em torno de $\underline{P}_0$	$\theta$	ângulo de rotação	30°
translação de $\underline{P}_0$ para $P_0$	$(y_0, x_0)$	coordenadas de $P_0$	(475, 1000)

### 5.3.5) Aproximação do cordão de solda através de uma janela de imagem

No plano  $(xy)$  em que a grade de referência foi definida há agora a imagem radiográfica ( $I_{test}$ ) da figura 5.19. Nesta imagem, o contorno da grade modificada traça uma janela  $img_k$ , cujo conteúdo poderia ser o cordão de solda. Esta secção estabelece critérios para avaliar a semelhança do conteúdo de  $img_k$  com o da imagem modelo do cordão de solda ( $Img$ ). Tal verificação se sustenta em duas etapas principais:

- codificação do conteúdo da janela de imagem  $img_k$
- comparação com o conteúdo da imagem modelo  $Img$

A primeira etapa consiste em gerar a matriz de referência  $Mref_k$  para a janela  $img_k$ . Neste caso, o posicionamento dos pontos de referência já é dado pelo cruzamento das linhas e colunas da grade modificada. Sendo assim, a matriz de referência  $Mref_k$  pode ser gerada com base na formulação anterior (da equação 5.34):

$$Mref_k = \begin{bmatrix} Mref_k(0,0) & \dots & Mref_k(0,n) \\ \dots & Mref_k(u,v) & \dots \\ Mref_k(n,0) & \dots & Mref_k(n,n) \end{bmatrix} \quad (5.34)$$

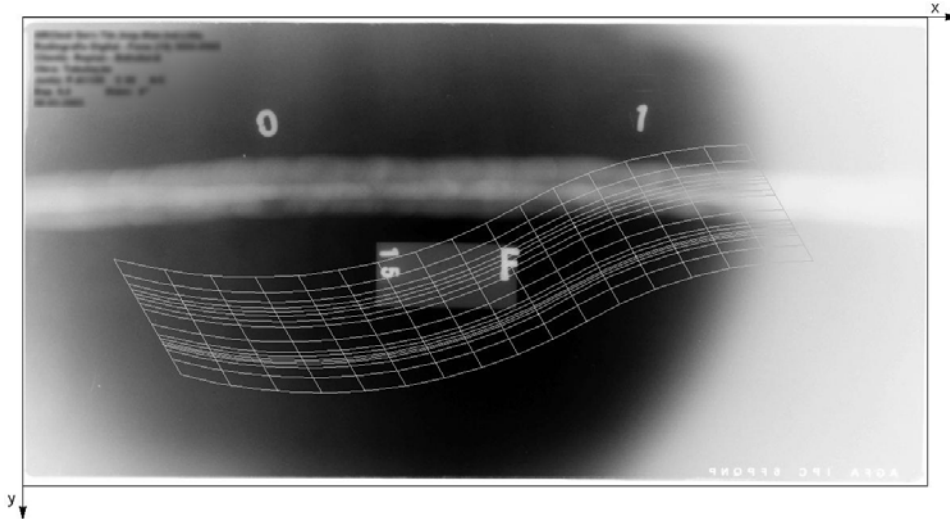


Figura 5.19 – Grade modificada definindo uma janela na imagem radiográfica

Alguns cuidados especiais foram tomados antes de definir as funções que atribuem valores aos elementos da matriz. Isto porque, diferente do que ocorre para a imagem modelo  $Img$ , a imagem teste  $I_{test}$  está sujeita a apresentar ruído e defeitos no cordão de solda. Sendo assim, mesmo que a grade tenha sido definida de forma a enquadrar perfeitamente o cordão de solda, alguns pontos de referência podem cair em regiões de ruído ou de defeitos. Isto, por sua vez, pode gerar valores inconsistentes com o que a matriz deveria representar. Para amenizar tais efeitos, ao invés de definir  $Mref_k(u, v)$  em função de apenas um ponto  $P_{uv}$ , recorreu-se a operações orientadas à vizinhança, de forma que:

$$Mref_k(u, v) = \begin{cases} = f_{\max}(V_{n^+}(P_{uv})), & \text{se } u = n/2 \\ = f_{\text{med}}(V_{n^+}(P_{uv})), & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5.35)$$

onde:

$P_{uv}$  é o ponto de referência com as coordenadas  $(y_u, x_v)$  na imagem  $I_{test}$

$V_{n^+}(P_{uv})$  é a vizinhança  $n^+$  do ponto  $P_{uv}$ , descrita a seguir

$f_{\text{med}}(V_{n^+}(P_{uv}))$  é o valor médio dos *pixels* de  $V_{n^+}(P_{uv})$

$f_{\max}(V_{n^+}(P_{uv}))$  é o valor máximo dos *pixels* de  $V_{n^+}(P_{uv})$

Como o tamanho da janela  $img_k$  depende das mudanças de escala que foram aplicadas à grade de referência, recorreu-se ao uso de uma janela de vizinhança  $V_{n^+}$  (figura 5.20) de tamanho adaptável à escala vertical (direção em se espera haver mudanças mais significativas de tons de cinza no cordão de solda). Sendo  $V_{n^+}$  uma

janela em formato de cruz,  $n^+$  corresponde ao número de *pixels* em cada ponta, como indicado na figura 5.20. Tal número pode aumentar ou diminuir proporcionalmente ao fator de escala vertical  $sv$ , pela seguinte relação:

$$n^+ = 2 \times sv \quad (5.36)$$

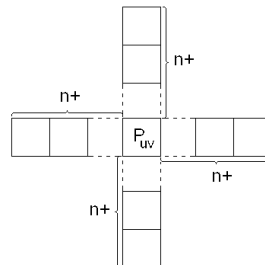


Figura 5.20 – Janela usada para definir a vizinhança ponto de referência  $P_{uv}$ .

O formato de janela de vizinhança da figura 5.20 foi escolhido porque sempre possui uma quantidade de *pixels* ( $1+4n^+$ ) menor ou igual à de outros formatos que apresentam os mesmos valores para comprimento ( $2n^++1$ ) e largura ( $2n^++1$ ) da janela.

O valor médio ( $f_{med}(V_{n^+}(P_{uv}))$ ), da equação 5.35, atua como um filtro passa-baixas e ajuda a evitar que a presença de ruído ou de defeitos no cordão de solda influencie a geração dos valores da matriz referência. A presença de defeitos escuros no centro do cordão de soldas é uma situação ainda mais severa, pois esta região corresponde à parte mais clara da imagem modelo. O valor máximo ( $f_{max}(V_{n^+}(P_{uv}))$ ), utilizado para os pontos da linha central da grade, aliado à extensão ( $2n^++1$ ) da janela de vizinhança, produz o efeito semelhante a uma ponte sobre os defeitos existentes nessa região. Os valores calculados são agrupados na matriz de referência  $Mref_k$  (da equação 5.34), que representa o conteúdo da janela de imagem  $img_k$  (da figura 5.19).

Ainda observou-se que, principalmente nas radiografias do tipo PD-VS, a amplitude do perfil transversal ao cordão de solda pode variar não só de uma imagem para outra, mas em diferentes posições do mesmo cordão, como mostra a figura 5.21.

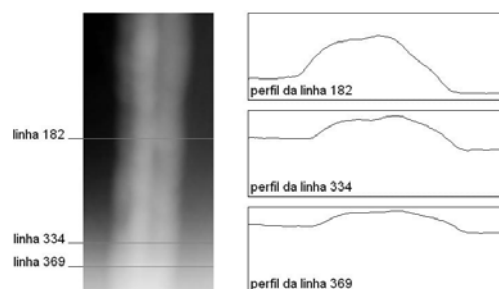


Figura 5.21 – Cordão de Solda e perfis transversais em três diferentes posições.

Com base em tais observações, julgou-se necessário adequar os valores das colunas de  $Mref_k$  através de uma normalização. Sendo assim, para cada coluna da matriz de referência  $Mref_k$ , os valores foram normalizados de forma a se adequarem à mesma faixa de valores da coluna correspondente em  $\underline{Mref}$  (do padrão). A equação 5.37 define esta operação aplicada a um elemento da matriz  $Mref_k$ :

$$Mref'_k(u, v) = \min(\underline{Mref}(v)) + \frac{(Mref_k(u, v) - \min(Mref_k(v)))}{(\max(Mref_k(v)) - \min(Mref_k(v)))} \times (\max(\underline{Mref}(v)) - \min(\underline{Mref}(v))) \quad (5.37)$$

somente se:  $\max(Mref_k(v)) > \min(Mref_k(v))$

onde:

- $Mref'_k(u, v)$  é o novo valor de  $Mref_k(u, v)$
- $\min(Mref_k(v))$  é o valor mínimo da coluna  $v$  de  $Mref_k$
- $\max(Mref_k(v))$  é o valor máximo da coluna  $v$  de  $Mref_k$
- $\min(\underline{Mref}(v))$  é o valor mínimo da coluna  $v$  de  $\underline{Mref}$
- $\max(\underline{Mref}(v))$  é o valor máximo da coluna  $v$  de  $\underline{Mref}$

Uma vez que  $Mref'_k$  tenha sido gerada, o passo seguinte se resume a comparar o conteúdo das duas matrizes de referência:  $Mref'_k$  e  $\underline{Mref}$ . Para tanto, buscou-se entre técnicas de casamento de protótipos (secção 3.4.5 do capítulo 3), meios de mensurar a semelhança entre imagens. O conceito expresso através da equação 3.22, para similaridade, foi adaptado para a verificação da semelhança entre o conteúdo das matrizes  $Mref'_k$  e  $\underline{Mref}$ :

$$S_k = 1 - \frac{\sum_{u=0}^n \sum_{v=0}^n D_{uv}}{(n+1)^2 \times D_{max}} \quad (5.38)$$

onde:

- $S_k$  é a similaridade entre  $\underline{Mref}$  e  $Mref'_k$ .
- $D_{uv}$  é o valor absoluto da diferença entre  $\underline{Mref}(u, v)$  e  $Mref'_k(u, v)$ .
- $D_{max}$  é o valor máximo de  $D_{uv}$ , para  $u=0, 1, \dots, n$  e  $v=0, 1, \dots, n$ .

A similaridade  $S_k$  é um valor real que pode variar entre 0 e 1, sendo tanto mais próximo de 1, quanto mais próximos entre si forem os conteúdos das matrizes  $Mref$  e  $Mref_k'$ . Como  $Mref$  e  $Mref_k'$  representam, respectivamente, a imagem modelo  $Img$  e a janela de imagem  $img_k$ , o valor de similaridade  $S_k$  foi adotado como parâmetro para mensurar a semelhança entre as duas imagens.

### 5.3.6) Pontos inválidos de uma janela de imagem

A figura 5.22 ilustra uma situação na qual os valores utilizados para modificar a grade de referência acabaram definindo uma janela de imagem que extrapola os limites para os quais a imagem  $I_{test}$  possui valor definido. Esta secção tem por objetivo esclarecer como tal problema é tratado, de modo a viabilizar a construção da matriz de referência  $Mref_k$ .

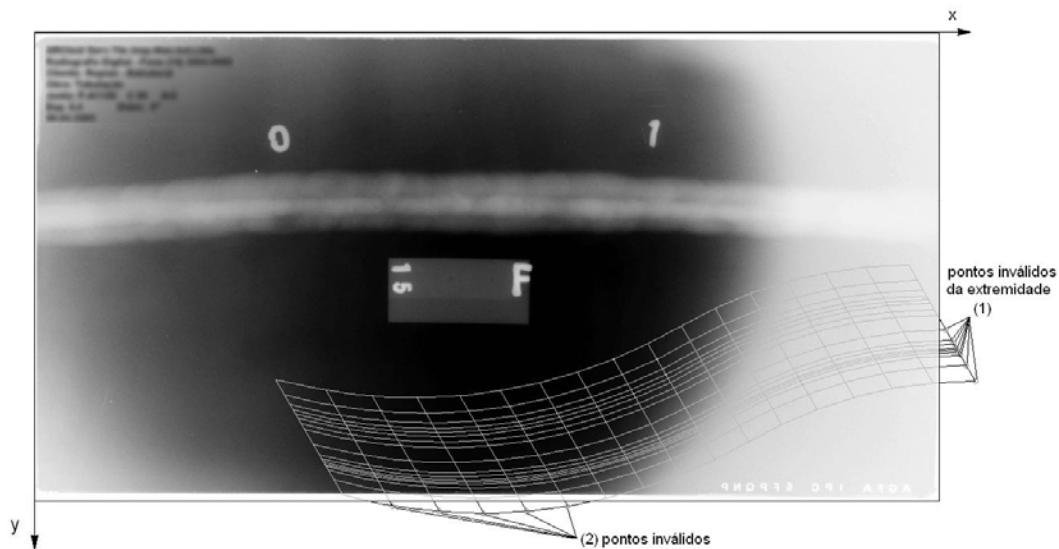


Figura 5.22 – Pontos inválidos de uma grade de referência.

Em relação aos pontos da grade que caem fora dos limites da imagem, têm-se as duas situações ilustradas na figura 5.22: (1) pontos da primeira ou última coluna de referência, que representam as extremidades do cordão de solda, e (2) demais pontos. Na primeira situação os pontos são simplesmente excluídos do cálculo da similaridade  $S_k$ . Na segunda situação atribui-se ao ponto o mesmo valor do *pixel* da imagem  $I_{test}$  que estiver mais próximo. Entretanto, todos os pontos de referência que caem fora dos limites da imagem entram na estatística do número de pontos inválidos  $n_{inv}$ . A intenção

é punir o valor de similaridade  $S_k$  quando  $n_{inv}$  ultrapassar um limite máximo permitido (exemplo: 20% do número de pontos de referência). Isto é realizado através do produto de  $S_k$  pelo valor da penalidade por pontos inválidos ( $Pen_k$ ), definida pela equação 5.39:

$$Pen_k = \begin{cases} = \frac{n_{totalk}}{n_{totalk} + n_{invk}}, & \text{se } p_{inv} > p_{max} \\ = 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5.39)$$

onde:

$n_{total}$  é total de pontos de referência,

$n_{inv}$  é total de pontos de referência inválidos,

$p_{inv}$  é a porcentagem de ponto de referência inválidos,

$p_{max}$  é a porcentagem máxima permitida para  $p_{inv}$ .

Como  $n_{inv}$  é sempre um número entre 0 e  $n_{total}$ , a penalidade  $Pen_k$  sempre será um valor real entre 0 e 1.

### 5.3.7) Codificação e avaliação de soluções

Conforme observado nas seções anteriores, os parâmetros  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $sh$ ,  $sv$ ,  $sh_{rel}$ ,  $sv_{rel}$ ,  $R_{esq}$ ,  $R_{dir}$  e  $\theta$  controlam operações que, quando aplicadas à grade de referência, conduzem à definição de uma janela de imagem de onde poderia ser extraído o cordão de solda existente em uma imagem teste. Neste sentido, o vetor  $\tau_k$ , da equação 5.40, fornece uma solução hipotética  $img_k$ , para descrever o tamanho, posicionamento e formato do cordão de solda:

$$\tau_k = (y_{0k}, x_{0k}, sh_k, sv_k, sh_{relk}, sv_{relk}, R_{esqk}, R_{dirk}, \theta_k) \quad (5.40)$$

O valor de cada parâmetro de  $\tau_k$  pode variar de forma independente, mas dentro de um intervalo de valores pré-definidos pelas variáveis da tabela 5.3. A tabela 5.4 fornece os valores *default* das variáveis da tabela 5.3. Em seguida, a tabela 5.5 descreve as variáveis auxiliares que foram utilizadas para estabelecer tais valores.

Tabela 5.3: Limites estabelecidos para os parâmetros do vetor  $\tau$

coordenadas de $P_0$		
$y_{0\_min}$	$\leq y_0 \leq$	$y_{0\_max}$
$x_{0\_min}$	$\leq x_0 \leq$	$x_{0\_max}$
ângulo de rotação		
$\theta_{min}$	$\leq \theta \leq$	$\theta_{max}$
raios de curvatura		
$R_{min}$	$\leq  R_{esq}  \leq$	$R_{max}$
$R_{min}$	$\leq  R_{dir}  \leq$	$R_{max}$
escalas relativas		
$sv_{rel\_min}$	$\leq sv_{rel} \leq$	$sv_{rel\_max}$
$sh_{rel\_min}$	$\leq sh_{rel} \leq$	$sh_{rel\_max}$
escalas absolutas		
$sh_{min}$	$\leq sh \leq$	$sh_{max}$
$sv_{min}$	$\leq sv \leq$	$sv_{max}$

Tabela 5.4: Valores *default* para as variáveis da tabela 5.3

variável e valor <i>default</i>	observações
$y_{0\_min} = 0;$	-
$y_{0\_max} = nl\_I_{test};$	depende da imagem teste
$x_{0\_min} = 0;$	-
$x_{0\_max} = nc\_I_{test};$	depende da imagem teste
$\theta_{min} = -45^\circ;$	-
$\theta_{max} = 135^\circ;$	-
$R_{min} = menor\_I_{test};$	depende da imagem teste
$R_{max} = maior\_I_{test} \times 10^5;$	depende da imagem teste
$sv_{rel\_min} = 0,3;$	-
$sv_{rel\_max} = (1 - sv_{rel\_min});$	-
$sh_{rel\_min} = 0,0;$	-
$sh_{rel\_max} = (1 - sh_{rel\_min});$	-
$sh_{min} = 0,5;$	pode ser ajustado para $(C_{min}/\underline{C})$ ou $(f_{Cmax} \times sh_{max})$
$sh_{max} = 2,0;$	pode ser ajustado para $(C_{max}/\underline{C})$ ou $(f_{Clim} \times (C_{lim}/\underline{C}))$
$sv_{min} = 0,5;$	pode ser ajustado para $L_{min}/L_{solda}$
$sv_{max} = 2,0;$	pode ser ajustado para $L_{max}/L_{solda}$

Tabela 5.5: Descrição das variáveis auxiliares utilizadas na tabela 5.4

símbolo	descrição
$nc\_I_{test}$	número de colunas da imagem teste
$nl\_I_{test}$	número de linhas da imagem teste
$menor\_I_{test}$	menor valor dentre $nc\_I_{test}$ e $nl\_I_{test}$
$maior\_I_{test}$	maior valor dentre $nc\_I_{test}$ e $nl\_I_{test}$
$C_{lim}$	comprimento limite (comprimento máximo que a linha central de referencia pode ter sem ultrapassar os limites da imagem teste).
$C_{min}$	comprimento do cordão de solda mais curto que se deseja detectar
$C_{max}$	comprimento do cordão de solda mais longo que se deseja detectar
$f_{Cmax} = C_{min}/C_{max}$	fração do comprimento máximo
$f_{Clim} = C_{max}/C_{lim}$	fração do comprimento limite
$\underline{C}$	comprimento do cordão de solda modelo
$L_{solda}$	largura do cordão de solda modelo
$L_{min}$	largura do cordão de solda mais estreito que se deseja detectar
$L_{max}$	largura do cordão de solda mais largo que se deseja detectar



Os limites estabelecidos na tabela 5.4 para as coordenadas  $(y_{0k}, x_{0k})$  garantem condições para que  $P_0$  seja um ponto da imagem teste. Quanto aos limites estabelecidos para os valores absolutos dos raios de curvatura ( $|R_{esq}|$  e  $|R_{dir}|$ ), estes permitem que a curvatura do cordão de solda possa variar desde um círculo inscrito na imagem a um segmento de reta, pelo menos dentro dos limites da imagem. Visto que a imagem modelo é simétrica, todas as possibilidades de inclinação para do cordão de solda caem em um intervalo angular de  $180^\circ$ . Portanto, o intervalo  $-45^\circ \leq \theta \leq 135^\circ$  é apropriado para o ângulo de rotação. Como já mencionado,  $sv_{rel}$  permite ajustar o formato da grade de referência para as situações em que a linha de centro do cordão não estiver equidistante das bordas. Usando  $sv_{rel\_min} = 0,3$ , é permitido que a largura de um lado (superior ou inferior) do cordão possa se ajustar para valores entre 30 e 70% da largura total da solda. A proporção entre o que está à direita ou à esquerda do ponto  $P_0$  é controlada pelo parâmetro  $sh_{rel}$ . Fazendo  $sh_{rel\_min} = 0$ , isto significa que o comprimento do cordão, tanto à direita quanto à esquerda de  $P_0$ , pode variar desde 0 ao comprimento total do cordão. Sendo assim,  $sh_{rel\_min} = 0$  é a situação mais abrangente possível. Embora se tenha definido valores para  $sv_{min}$ ,  $sh_{min}$ ,  $sv_{max}$  e  $sh_{max}$ , pode ser mais viável ajustar os limites dos fatores de escala  $sv$  e  $sh$  em função das seguintes variáveis:  $C_{lim}$ ,  $f_{Clim}$  ou  $C_{max}$ ,  $f_{Cmax}$  ou  $C_{min}$ ,  $L_{min}$  e  $L_{max}$ . O valor  $C_{lim}$  representa o comprimento que a solda teria caso se estendesse de uma a outra borda da imagem.  $C_{max}$  pode ser definido manualmente em número de *pixels* ou como uma fração de  $C_{lim}$ :  $f_{Clim}$ .  $C_{min}$ , por sua vez, pode ser definido manualmente em número de *pixels* ou como uma fração de  $C_{max}$ :  $f_{Cmax}$ .  $L_{min}$  e  $L_{max}$  podem ser ajustados para atender situações específicas que exijam a detecção de cordões de solda para uma faixa limitada de largura.

Dependendo dos valores dos parâmetros utilizados para  $\tau_k$ , a solução pode ser próxima da solução ótima ou mesmo estar bem longe disso. Para avaliar o quanto a solução proposta é próxima da solução ótima, define-se o valor de adequabilidade (*fitness*) da solução  $\tau_k$ , pela seguinte função:

$$fit(\tau_k) = S_k \times Pen_k \quad (5.41)$$

onde:

$S_k$  é a similaridade com a imagem modelo,  
 $Pen_k$  é penalidade por pontos inválidos.

Assim como a similaridade  $S_k$ , a função  $fit(\tau_k)$  é um valor real que pode variar entre 0 e 1, sendo tanto mais próximo de 1, quanto mais adequada for a solução  $\tau_k$ .

### 5.3.8) Otimização de soluções

Basicamente, a busca pela solução ótima consiste em maximizar o valor da função de adequabilidade (da equação 5.41) através da busca pelo melhor conjunto de valores associados aos parâmetros do vetor  $\tau_k$  (aqui denominado vetor solução).

Uma alternativa possível, porém inviável, devido às dimensões do espaço de busca, seria testar todas as possibilidades para o vetor  $\tau_k$ , calculando o valor de adequabilidade para cada uma delas, e então selecionar a opção que proporciona o valor máximo. Uma segunda opção seria uma análise baseada na construção de uma modelagem matemática do problema. Contudo, a complexidade e não-linearidade do problema, desencorajam a busca por alternativas desta natureza.

Por outro lado, conforme considerado no capítulo 3, os algoritmos genéticos (AG's) são técnicas de busca e otimização adequadas a problemas não-lineares envolvendo grandes espaços de busca. Desta forma, os AG's tornam-se uma alternativa bastante atraente ao problema em questão.

### 5.3.9) Implementação de um Algoritmo Genético

Esta secção tem o objetivo de descrever aspectos fundamentais relacionados à implementação e funcionamento do algoritmo genético empregado no presente trabalho. O tipo de algoritmo utilizado é o mesmo descrito em (Goldberg, 1989) e apresentado esquematicamente na secção 3.6. Agora, os mesmos itens são considerados aqui:

- codificação
- inicialização
- função de adequabilidade
- métodos de seleção
- operador de recombinação (cruzamento)
- operador de mutação
- critério de parada

O código gerado para representar um vetor solução qualquer ( $\tau_k$ ) é um código binário de nove *strings* de 16 *bits*. Cada *string* representa a codificação de um parâmetro individual de  $\tau_k$ , onde  $(0000\ 0000\ 0000\ 0000)_2$  representa o valor mínimo e  $(1111\ 1111\ 1111\ 1111)_2$  representa o valor máximo. Isto significa que, dentro dessa faixa (valor mínimo e máximo), cada parâmetro de  $\tau_k$  pode assumir até  $2^{16}$  valores diferentes.

Na inicialização, uma quantidade ( $z$ ) de soluções hipotéticas do tipo  $\tau_k$  é gerada com valores aleatórios a partir de uma semente ( $s$ ). Cada solução é denominada indivíduo e ao conjunto de todas as soluções geradas nesta primeira etapa denomina-se população inicial ( $P_0$ ):

$$P_0 = \{ \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k, \dots, \tau_{z-1}, \tau_z \}, \quad (5.42)$$

Cada indivíduo  $\tau_k$  é avaliado através da função de adequabilidade ( $fit(\tau_k)$ ):

$$fit(\tau_k) = S_k \times Pen_k \quad (5.41)$$

Para os indivíduos que estarão sujeitos a operações de cruzamento, dois métodos de seleção foram testados. O primeiro é o método da roleta. O segundo é o método torneio que, conforme descrito em (Goldberg, 1989), consiste em selecionar dois indivíduos pelo método da roleta e, então, optar pelo indivíduo com maior valor de adequabilidade.

Para recombinar seguimentos do código binário de um par de indivíduos selecionados, recorreu-se à técnica de cruzamento uniforme, com uma probabilidade  $pc$ . Apenas os filhos, indivíduos resultantes do cruzamento, são inseridos na próxima população. Tais indivíduos terão a probabilidade  $pm$  de sofrerem mutação. Por elitismo, o melhor indivíduo da população corrente é preservado na geração seguinte.

A partir da população inicial ( $P_0$ ), populações subseqüentes ( $P_1, P_2, \dots, P_u$ ) são geradas com base em operadores genéticos de mutação, cruzamento uniforme e elitismo. O critério de parada estabelecido é um número pré-definido ( $u$ ) de gerações. Como as técnicas empregadas são inspiradas em mecanismos de seleção natural, que favorecem os mais aptos (ou mais adequados), espera-se que o melhor indivíduo gerado, denominado  $\tau_i$ , presente na última geração ( $P_u$ ), represente a solução ótima (ou mais adequada) para o problema:

$$\tau_t = (y_{0t}, x_{0t}, sh_t, sv_t, sh_{relt}, sv_{relt}, R_{esqt}, R_{dir_t}, \theta_t) \quad (5.43)$$

A figura 5.23 ilustra uma solução que pode ser considerada adequada ao problema da detecção do cordão de solda para a imagem inicialmente ilustrada na figura 5.19. O vetor solução e o valor da adequabilidade para esta solução são:

$$\tau_t = (192; 329; 1,747; 0,829; 0,124; 0,544; 105565; -14006; 2,49^\circ)$$

$$fit(\tau_t) = 0,885063$$

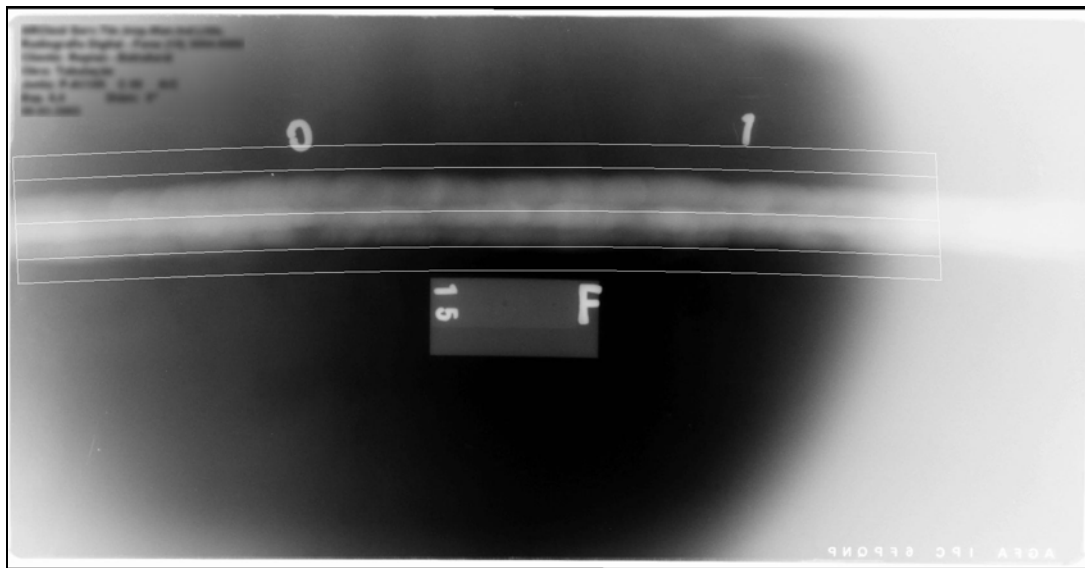


Figura 5.23 – Exemplo de uma solução adequada para a detecção do cordão de solda na imagem utilizada como exemplo.

O bom desempenho do AG definido nesta secção ainda depende do ajuste dos parâmetros listados na tabela 5.6 que, basicamente, controlam o funcionamento dos operadores genéticos, define o tamanho da população e o critério de parada do AG. A busca de valores adequados para tais variáveis é um dos assuntos tratados no capítulo 6, sob o tópico Testes Preliminares.

Tabela 5.6 – Parâmetros do AG a serem ajustados.

<b>símbolo</b>	<b>identificação</b>
<i>z</i>	tamanho da população
<i>u</i>	número máximo de gerações
<i>p<sub>c</sub></i>	probabilidade de cruzamento
<i>p<sub>m</sub></i>	probabilidade de mutação
<i>msel</i>	método de seleção

### 5.3.10) Verificação de soluções

A verificação de soluções tem o objetivo de averiguar a legitimidade da solução  $\tau_t$  encontrada pelo algoritmo genético. Isto é necessário quando não se tem a informação de quantos cordões de solda existem na imagem teste. A idéia é repetir todo o procedimento de busca sempre que houver a suspeita de que nem todos os cordões de solda presentes na imagem tenham sido detectados e extraídos. Tal suspeita não existirá mais quando a melhor solução encontrada pelo algoritmo genético não for mais um cordão de solda.

A alternativa mais simples para se implementar tal verificação, foi estabelecer um limiar ( $T$ ) para a adequabilidade de  $\tau_t$ , com base na comparação do valor de adequabilidade para exemplos e contra-exemplos. A equação 5.44 sintetiza este critério de classificação:

$$\begin{cases} \text{se } \text{fit}(\tau_t) > T \Rightarrow \text{img}_t \text{ é cordão de solda} \\ \text{caso contrário} \Rightarrow \text{img}_t \text{ não é cordão de solda} \end{cases} \quad (5.44)$$

Variações desta mesma solução são apresentadas no capítulo 6, como melhorias ao algoritmo implementado.

### 5.3.11) Extração do cordão de solda

Visando facilitar o processamento para detecção de defeitos, o cordão de solda é extraído em três partes: interface solda-metal superior ( $Img_{sup}$ ), solda ( $Img_{solda}$ ) e interface solda-metal inferior ( $Img_{inf}$ ).

A figura 6.24 mostra um desenho esquemático que reproduz a grade de referência com as linhas de interface solda-metal e a linha central de referência. Nesta imagem, são indicados os vértices A, B, C, ... H, que definem retângulos de onde são extraídas as partes do cordão de solda:

- ABCD define  $Img_{sup}$
- IJKL define  $Img_{solda}$
- EFGH define  $Img_{inf}$

O valor *default* para a largura  $d_{mb}$  é  $L_{mb}$ . Entretanto, tal valor pode ser ajustado manualmente para atender a largura de metal base que, conforme especificações do código aplicável, deve ser inspecionada junto com o cordão de solda.

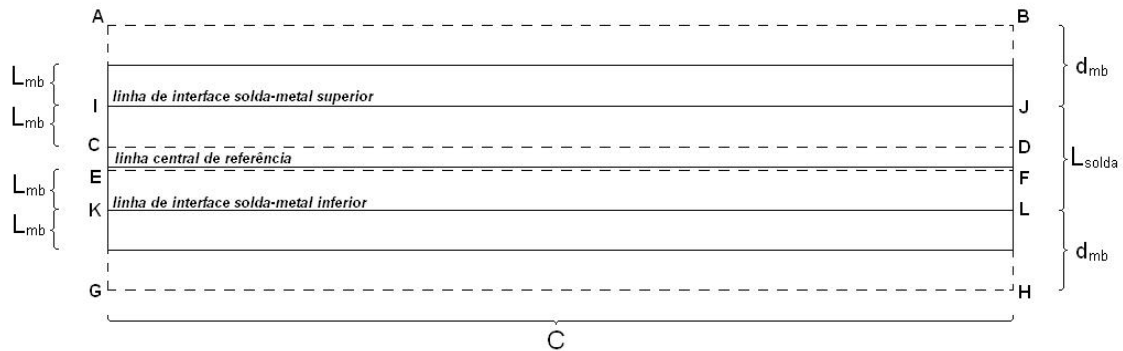


Figura 5.24 – Desenho esquemático que representa as regiões de um cordão de solda a serem extraídas separadamente.

### 5.3.12) Modelagem de um sistema para detecção e reconhecimento de cordões de soldas

O diagrama de blocos apresentado na figura 5.25 ilustra o sistema idealizado para detecção e reconhecimento de cordões de solda em imagens radiográficas digitais, com base na metodologia proposta neste capítulo. Cada bloco do sistema proposto é descrito a seguir:

- Construção do Modelo:
  - Neste bloco a grade e a matriz de referência são calculadas para a imagem modelo. Adicionalmente, os demais parâmetros ( $L_{solda}$ ,  $L_{mb}$ ,  $C$ ,  $i_{n/2}$ ) relacionados à imagem modelo também são armazenados.
- Busca Genética:
  - É neste bloco que ocorre a detecção dos cordões de solda. Isto é realizado através da busca gerenciada pelo AG. O espaço de busca é definido pela imagem teste. O objeto a ser detectado é definido pelo modelo gerado no bloco Construção do Modelo. Os parâmetros do AG são fornecidos pelo bloco Ajuste de Parâmetros. A saída do bloco é o resultado da busca.

- Verificação:
  - Este bloco utiliza o critério de classificação baseado no valor da função de adequabilidade em comparação com o limiar  $T$ , para aceitar ou rejeitar o resultado da busca genética. Se o resultado obtido for aceito, uma nova busca por outra ocorrência do mesmo objeto é reiniciada. Caso contrário, a análise termina.
- Ajuste de Parâmetros:
  - Este bloco tem basicamente duas funções:
    - arquivar os valores *default* dos parâmetros utilizados nas buscas.
    - permitir a modificação dos valores dos parâmetros do AG e limites para os parâmetros do vetor solução  $\tau$ .

O *loop* entre os blocos Busca Genética e Verificação habilita o sistema a encontrar mais de uma ocorrência de um mesmo padrão na imagem teste.

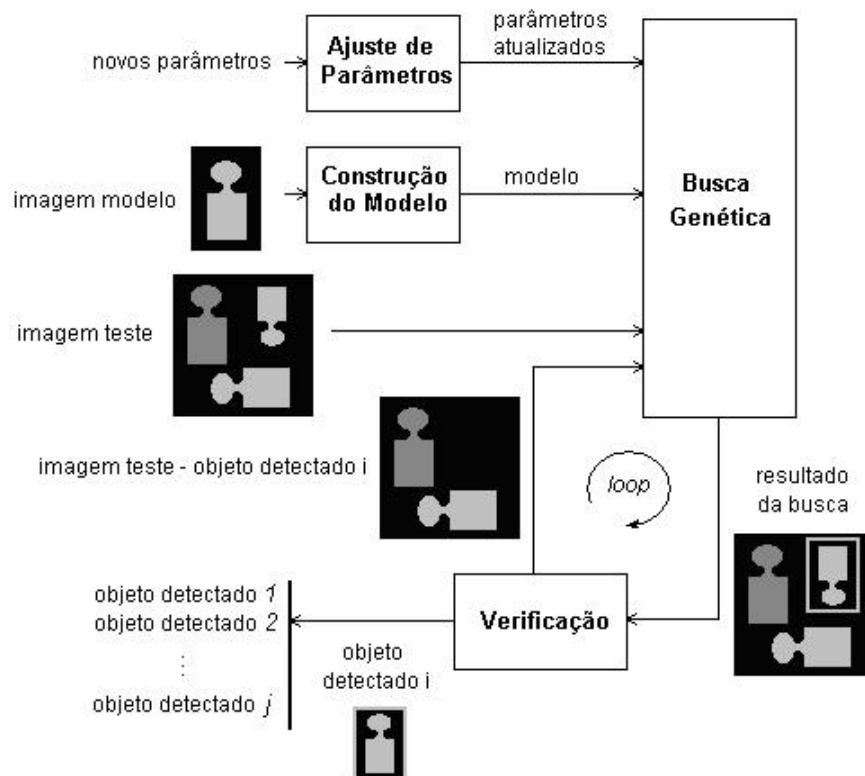


Figura 5.25 – Diagrama de blocos ilustrando o funcionamento do sistema idealizado para detecção e reconhecimento de cordões de solda.

## **5.4) Considerações Finais**

Toda a metodologia proposta neste capítulo foi implementada em linguagem C++, em plataforma Windows XP. Para implementar um algoritmo genético (GA), recorreu-se ao uso da biblioteca de classes GALib (Wall, 2003). Para a construção de rotinas de acesso e modificação de imagens, foram utilizados recursos da biblioteca de classes DILabiem 6.0, desenvolvida no Laboratório de Imagens e Multimídia do CPGEI/UTFPR. Tal metodologia foi testada para todas as coleções de radiografias disponíveis através de uma série de testes que são apresentados e discutidos no próximo capítulo.



## **6) TESTES E RESULTADOS**

### **6.1) Introdução**

Neste capítulo são apresentados três tipos de testes. O primeiro compreende uma série de testes preliminares que tem por objetivo a geração de dados para o ajuste adequado dos parâmetros do algoritmo genético (AG). O segundo tipo de teste visa avaliar o desempenho e as limitações da metodologia proposta para detectar cordões de solda em radiografias digitais onde se conhece a quantidade de cordões existentes na imagem. O último tipo de teste tem o objetivo de avaliar a capacidade do sistema proposto não apenas em detectar, mas em reconhecer e contar o número de cordões solda existentes na imagem.

### **6.2) Testes para Ajuste de Parâmetros do Algoritmo Genético**

Os testes apresentados nesta secção visam o ajuste dos parâmetros do AG com a finalidade de habilitar o algoritmo de busca a ser capaz de migrar, em tempo hábil, de uma população inicial de indivíduos gerados aleatoriamente para valores o mais próximo possível da solução ótima, mesmo havendo outras soluções quase tão boas em diferentes regiões do mesmo espaço de busca.

#### **6.2.1) Descrição do Teste para Ajuste dos Parâmetros do AG**

Para a realização dos testes descritos nesta secção, foram mantidas constantes as seguintes variáveis:

- imagem teste
- imagem modelo
- limites dos parâmetros do vetor solução
- quantidade de soluções geradas durante a busca

Quatro imagens foram selecionadas aleatoriamente do grupo de 266 radiografias computadorizadas (RC) para gerar uma imagem teste com quatro cordões de solda, como mostra a figura 6.1. Em seguida, no lugar da imagem modelo da figura 5.5 (página 84), utilizou-se o trecho de cordão de solda indicado na figura 6.1. Tal procedimento faz parte da estratégia adotada para se gerar uma situação particular onde a região do cordão de solda 1 é o máximo global, ao passo que as regiões dos outros três cordões de solda (2, 3 e 4) são máximos locais.

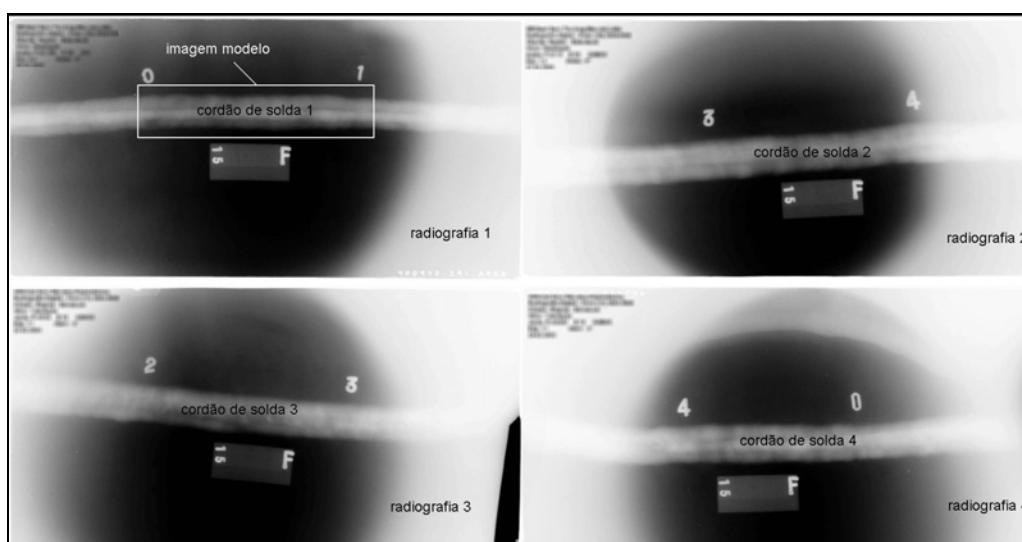


Figura 6.1 – Imagem teste e imagem modelo (extraída da imagem teste) que foram utilizadas na otimização dos parâmetros do AG.

Os limites estabelecidos para os parâmetros do vetor solução ( $\tau$ ) foram os valores *default*, conforme apresentados na tabela 5.4. Tais limites cobrem as possibilidades de a busca migrar para qualquer um dos quatro cordões de solda presentes na imagem teste da figura 6.1. A tabela 6.1 reproduz a tabela 5.4, porém, incluindo os valores a serem testados para cada parâmetro do AG.

Tabela 6.1 – Parâmetros do AG a serem ajustados.

Identificação	símbolo	valores testados
tamanho da população	$z$	100, 250 e 500
número máximo de gerações	$u$	500, 200 e 100
probabilidade de cruzamento	$p_c$	0,90, 0,95, 0,98 e 1,00
probabilidade de mutação	$p_m$	0,0025, 0,005, 0,01 e 0,02
método de seleção	$msel$	roleta (conforme Goldberg 1989) e torneio (conforme Wall, 2003)

O produto ( $z \times u$ ) define a quantidade de soluções geradas e avaliadas durante a busca. Ao escolher os valores dos parâmetros de forma a manter este produto constante, é possível comparar alternativas diferentes, mas que implicam no mesmo custo computacional (exemplos:  $(z, u) = (100, 500)$ ,  $(250, 200)$  ou  $(500, 100)$ ). Vale ressaltar, entretanto, que  $z$  e  $u$  não são os únicos parâmetros da tabela 6.1 que influenciam no tempo de processamento. A escolha do método de seleção roleta ou torneio pode conduzir a pequenas diferenças neste sentido, uma vez que o método torneio corresponde a escolher o melhor dentre dois indivíduos previamente selecionados pelo método roleta (Wall, 2003). Para verificar essa diferença, também foram registrados os tempos de processamento para situações idênticas envolvendo estes dois métodos.

Ao passo que a tabela 6.2 define os parâmetros a serem ajustados, a tabela 6.3 resume as combinações de valores a serem testadas. Tais combinações englobam dois métodos de seleção, três opções de tamanho de população com um número específico de gerações, quatro opções de probabilidade de cruzamento e quatro opções de probabilidade de mutação. Tais valores levam a  $2 \times 3 \times 4 \times 4$ , ou seja, 96 possibilidades para o vetor de parâmetros  $(z, u, p_c, p_m, msel)$ .

Tabela 6.2 – Valores dos parâmetros do AG a serem testados.

<i>msel</i>	$(z, u)$	$p_c$	$p_m$
torneio	(100, 500)	0,90	0,0025
	(250, 200)	0,95	0,005
roleta	(500, 100)	0,98	0,01
		1,00	0,02

Uma vez que os indivíduos da população inicial são constituídos a partir de valores aleatoriamente gerados, existe a possibilidade da população inicial ser ou não gerada com indivíduos cujo código genético favoreça a convergência para a solução ótima. Para evitar que isto venha a produzir resultados tendenciosos, são utilizadas 20 populações iniciais diferentes para cada tamanho de população testado ( $z$ ). Então, para cada vetor de parâmetros, o AG é inicializado das 20 formas diferentes, e os seguintes resultados são utilizados na avaliação:

- $N_{erro}$ : quantas vezes o resultado da busca não foi um dos cordões da imagem.
- $fit_{med}$ : valor médio da função de adequabilidade.
- $N_I$ : quantas vezes o resultado da busca foi o cordão 1 (máximo global).

## 6.2.2) Apresentação dos Resultados do Teste para Ajuste dos Parâmetros do AG

Todos os 96 vetores de parâmetros foram testados e o *ranking* dos valores foi ordenado, do melhor para o pior, segundo os seguintes critérios, em ordem de importância: (I) menor  $N_{erro}$ , (II) maior  $fit_{med}$  e (III) maior  $N_1$ .

A tabela 6.3 apresenta o que, segundo tais critérios, foram os dez melhores e os dez piores vetores testados. Como esta forma de apresentar os resultados revela pouco sobre como cada parâmetro influenciou o desempenho do AG, também são fornecidos os gráficos de barras das figuras 6.2-6.5. A altura de cada barra representa o valor  $fit_{med}$  do vetor de parâmetros testado. Finalizando, a tabela 6.4 compara o tempo médio de processamento para o método torneio e o método roleta.

Tabela 6.3 – Dez melhores e dez piores vetores de parâmetros testados para os AG.

		parâmetros					$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$N_{erro}$	$fit_{med}$
		$m_{sel}$	$z$	$u$	$\rho_c$	$\rho_m$						
10 melhores	torneio	500	100	0,90	0,005	15	3	1	1	0	0,9803	
	torneio	500	100	0,90	0,01	14	1	1	4	0	0,9793	
	torneio	500	100	0,98	0,01	15	0	2	3	0	0,9789	
	torneio	500	100	1,00	0,01	15	1	2	2	0	0,9785	
	torneio	500	100	1,00	0,0025	15	0	3	2	0	0,9780	
	torneio	250	200	1,00	0,02	13	0	4	3	0	0,9769	
	torneio	500	100	1,00	0,005	15	0	2	3	0	0,9760	
	torneio	500	100	0,90	0,0025	15	1	1	3	0	0,9758	
	torneio	500	100	0,98	0,0025	13	1	4	2	0	0,9739	
	10 piores	torneio	100	500	1,00	0,01	6	2	8	3	1	0,9561
torneio		100	500	0,90	0,01	4	3	6	6	1	0,9546	
torneio		100	500	0,95	0,005	4	2	7	5	2	0,9471	
torneio		100	500	0,98	0,005	4	1	6	7	2	0,9464	
torneio		100	500	0,98	0,0025	5	0	5	8	2	0,9408	
torneio		100	500	0,95	0,0025	6	2	4	6	2	0,9407	
torneio		100	500	0,95	0,01	4	1	8	4	3	0,9508	
torneio		100	500	0,90	0,005	5	2	6	3	4	0,9404	
torneio		100	500	0,90	0,0025	5	2	5	4	4	0,9295	
torneio		100	500	1,00	0,0025	6	0	8	5	7	0,9416	

Tabela 6.4 – Tempo médio da busca na imagem teste.

método de seleção	tempo médio do processo de busca na imagem teste
torneio	52 segundos*
roleta	49,4 segundos*

\* em um computador com processador AMD Athlon™ XP 2GHz

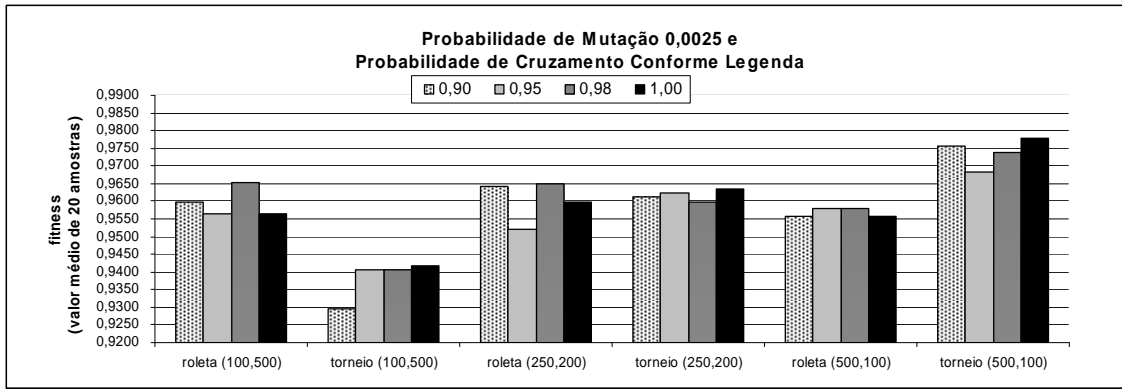


Figura 6.2 – Resultados para probabilidade de mutação 0,0025.

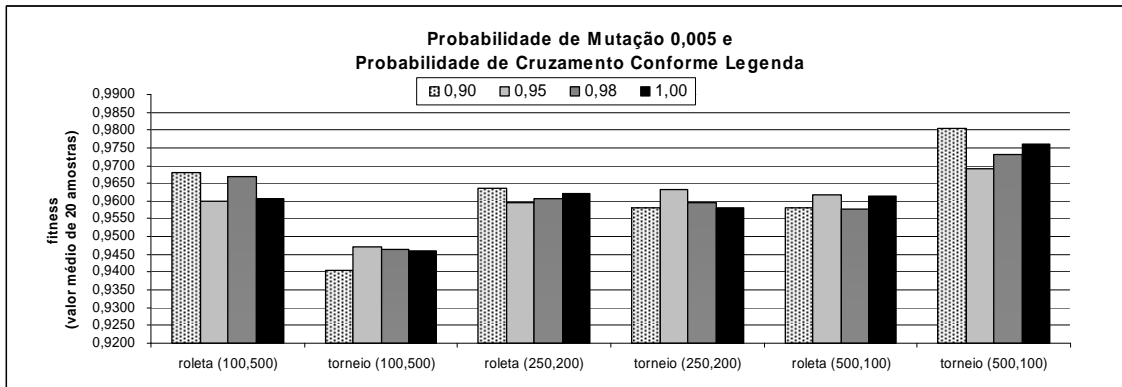


Figura 6.3 – Resultados para probabilidade de mutação 0,005.

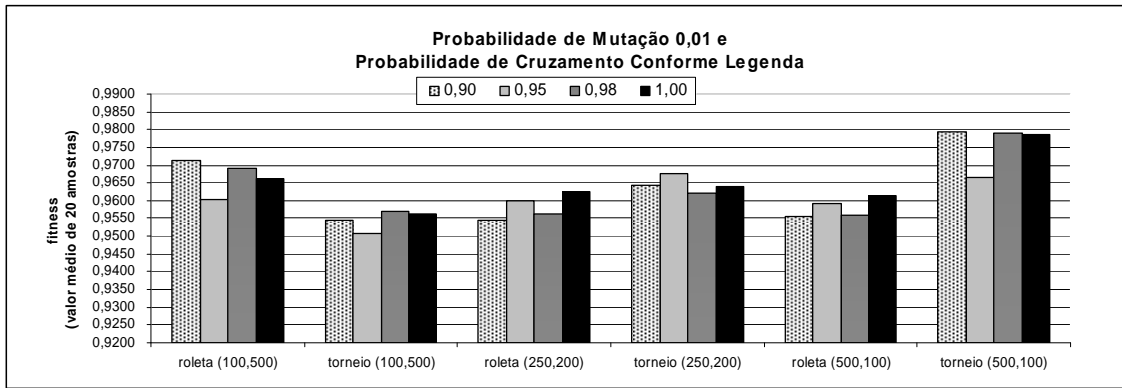


Figura 6.4 – Resultados para probabilidade de mutação 0,01.

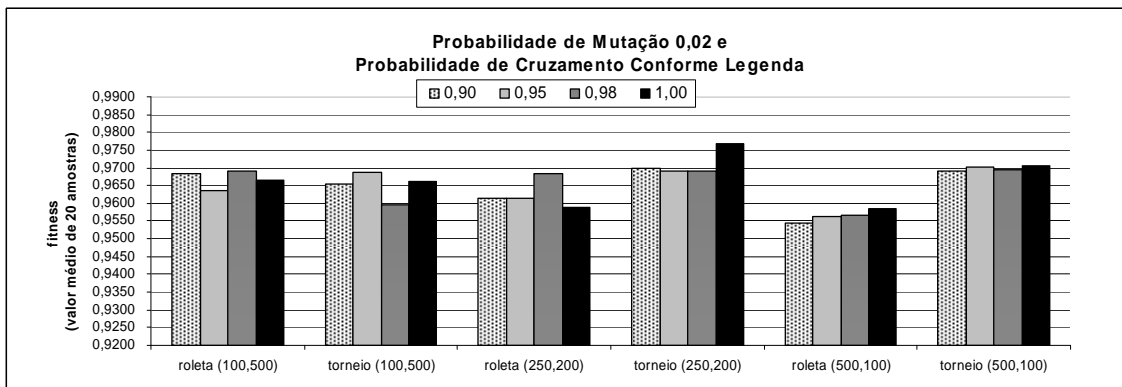


Figura 6.5 – Resultados para probabilidade de mutação 0,02.

### 6.2.3) Discussão dos Resultados do Teste para Ajuste dos Parâmetros do AG

Quanto à probabilidade de cruzamento, os resultados obtidos não revelaram com clareza de que forma as mudanças de valores testadas para tal parâmetro contribuíram para melhorar ou piorar os resultados.

Quanto ao tempo de processamento, o método torneio leva uma pequena desvantagem em relação ao método roleta. Ao verificar os resultados da tabela 6.4, pode-se observar que o método torneio é aproximadamente 5% mais lento. Isto, entretanto, é aparentemente compensado pelo fato dos dez melhores resultados terem sido obtidos com o uso do método torneio, conforme mostra a tabela 6.3. Notável, porém, é fato dos dez piores resultados da tabela 6.3 também terem sido obtidos com o mesmo método. A princípio, tais resultados impedem afirmar que o método torneio seja melhor do que o método roleta e vice-versa. Por outro lado, uma análise mais cuidadosa dos resultados da tabela 6.3 sugere fortemente que o tamanho da população é um dos principais parâmetros que influenciam o desempenho do método torneio. Mesmo diminuindo o número de gerações reproduzidas, o método torneio apresentou melhores resultados para populações maiores. A única exceção foi o sexto melhor resultado da tabela 6.3, onde a população foi de 250 indivíduos. Entretanto, é digno de nota que tal resultado também seja o único, dentre os dez primeiros, a apresentar a maior probabilidade de mutação testada (0,02). Isto gera a suspeita de que o aumento da probabilidade de mutação pode, até certo ponto, contrabalançar alguns efeitos do uso de uma população com menos indivíduos.

Tais suspeitas são confirmadas pelos gráficos das figuras 6.2-6.5. O segundo aglomerado de barras (da esquerda para a direita), em cada gráfico, é indicado pelo rótulo: torneio (100, 500). Isto significa que tais resultados foram gerados utilizando o método torneio com população de tamanho 100 e número de gerações igual a 500. Ao comparar os valores para torneio (100, 500), nos quatro gráficos, é possível observar claramente que os resultados melhoraram à medida que se aumentou a probabilidade de mutação. Ao comparar, em cada gráfico, os resultados de torneio (100, 500) com os de torneio (250, 200) e torneio (500, 100), também é possível observar, pelo menos nos três primeiros gráficos, que houve melhorias em termos do valor  $fit_{med}$  quando o tamanho da população aumentou de 100 para 250 e disso para 500.

Diferente do que ocorreu para o método torneio, os resultados do método roleta se mantiveram mais estáveis diante de mudanças nos parâmetros testados. Entretanto,

pode-se observar, principalmente no último gráfico (figura 6.5), que o desempenho para o método roleta diminuiu com a redução do número de gerações. Uma vez que o aumento da população não poderia diminuir as possibilidades de surgir uma solução adequada, tal observação sugere que o método roleta precisaria de um maior número de gerações, e mais tempo, para chegar a soluções mais refinadas. Os gráficos da figura 6.6 retratam tal situação e permite comparar a evolução da busca para um mesmo caso, utilizando torneio (figura 6.6a) e roleta (figura 6.6b). Tais gráficos apresentam o valor médio (série 1), máximo (série 2) e mínimo (série 3) da adequabilidade dos indivíduos da população a cada geração reproduzida. Pode-se observar que a curva de valores máximos atingiu valores mais altos para o método torneio. Entretanto, também se pode observar que, em comparação com o método roleta, a curva de valores médios está mais próxima da curva de valores máximos. Isto aumenta a possibilidade de haver convergência prematura para um máximo local. Para evitar que isto ocorra, é necessário tomar medidas que favoreçam a manutenção de uma diversidade genética, como aumentar o tamanho da população ou a probabilidade de mutação.

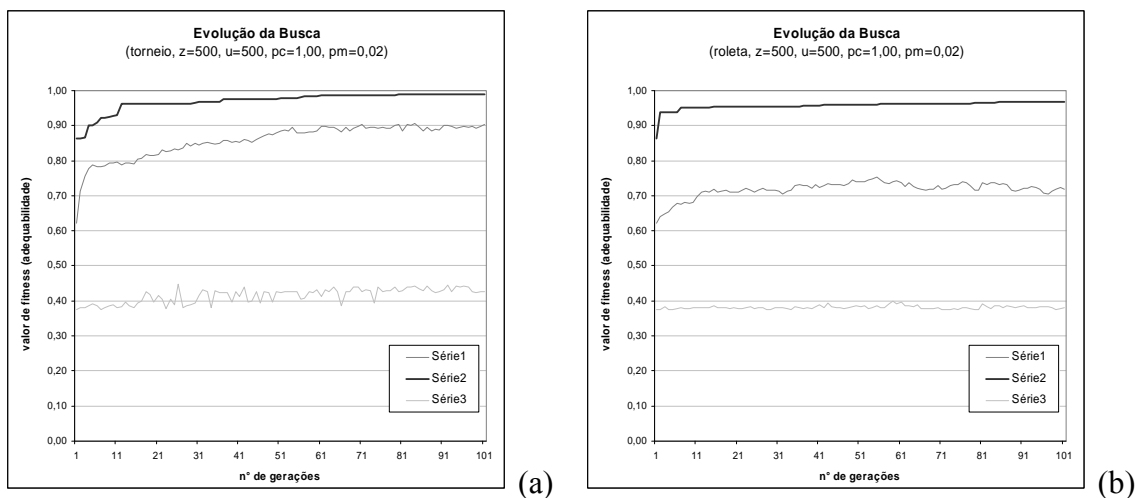


Figura 6.6 – Evolução da busca genética utilizando método (a) torneio e (b) roleta.

#### 6.2.4) Aprimoramento dos Resultados do Teste para Ajuste dos Parâmetros do AG

Os resultados discutidos no item anterior permitiram observar que, para probabilidade de mutação entre 0,0025 e 0,01, o método torneio apresenta melhor desempenho com uma população maior (500 indivíduos). Entretanto, quando a população é menor (100 indivíduos), o desempenho do método torneio pode ser melhorado aumentando a probabilidade de mutação para 0,02. Sendo assim, foi

decidido testar os novos valores de parâmetros mostrados em negrito na tabela 6.5. Os novos resultados obtidos apresentaram melhorias. Conforme pode ser observado na tabela 6.6, o *ranking* dos dez melhores resultados agora passou a incluir quatro dos novos vetores testados. Note que o melhor resultado apresentou uma melhoria significativa quanto ao número de vezes em que a busca foi conduzida para a região do máximo global ( $N_1 = 19$ ). No gráfico da figura 6.7 também podem ser visualizados o  $fit_{med}$  dos outros resultados.

Tabela 6.5 – Novos valores dos parâmetros do AG a serem testados.

<i>msel</i>	$(z, u)$	$p_m$	$p_c$
torneio	<b>(1000, 50)</b>	0,0025	0,90
		0,005	0,95
	0,01	0,98	
	<b>(100, 500)</b>	<b>0,05</b>	1,00

Tabela 6.6 – Dez melhores vetores de parâmetros testados para os AG

		parâmetros					$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$N_{erro}$	$fit_{med}$
	<i>msel</i>	<i>z</i>	<i>u</i>	$p_c$	$p_m$							
10 melhores	<b>torneio</b>	<b>1000</b>	<b>50</b>	<b>0,98</b>	<b>0,01</b>	<b>19</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0,9831</b>	
	torneio	500	100	0,90	0,005	15	3	1	1	0	0,9803	
	torneio	500	100	0,90	0,01	14	1	1	4	0	0,9793	
	<b>torneio</b>	<b>1000</b>	<b>50</b>	<b>0,98</b>	<b>0,005</b>	<b>16</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>0,9791</b>	
	torneio	500	100	0,98	0,01	15	0	2	3	0	0,9789	
	<b>torneio</b>	<b>1000</b>	<b>50</b>	<b>1,00</b>	<b>0,005</b>	<b>16</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>0,9787</b>	
	torneio	500	100	1,00	0,01	15	1	2	2	0	0,9785	
	<b>torneio</b>	<b>1000</b>	<b>50</b>	<b>0,90</b>	<b>0,01</b>	<b>16</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>0,9780</b>	
	torneio	500	100	1,00	0,0025	15	0	3	2	0	0,9780	

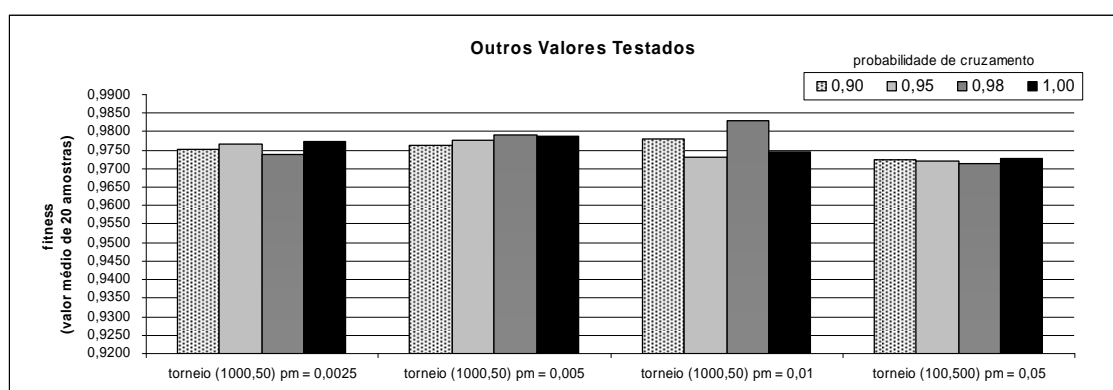


Figura 6.7 – Resultados obtidos para os novos valores de parâmetros do AG.

O melhor vetor de parâmetros (torneio, 1000, 50, 0,98, 0,01) ainda foi submetido a um teste final. Além das 20 vezes que o AG havia sido inicializado, o mesmo procedimento foi repetido com mais 80 populações de indivíduos gerados



aleatoriamente. Como resultado final, 89% das soluções encontradas foram resultados próximos do máximo global ( $N_1$ ) e 11% convergiram para as regiões dos cordões de solda 2, 3 e 4. Desta forma, decidiu-se manter o vetor (torneio, 1000, 50, 0,98, 0,01) como conjunto de valores *default* para os parâmetros do AG.

### 6.2.5) Outras Alternativas para Melhorar a Precisão dos Resultados

Duas alternativas propostas para aprimorar os resultados da busca genética são:

- I inicializar o AG com três populações e escolher o melhor resultado
- II empregar uma busca local com base na melhor solução encontrada

Os resultados anteriores revelaram que, mesmo utilizando o melhor vetor testado (torneio, 1000, 50, 0,98, 0,01), ainda existe 11% de probabilidade do resultado esperado ser um dos máximos locais conhecidos (outros três cordões de soldas). A alternativa proposta para diminuir esta margem, foi repetir a busca com mais duas inicializações diferentes e tomar o resultado que apresentar o maior valor de adequabilidade. Assim, a probabilidade de ocorrer um máximo local diminui para 0,1331%, que é a probabilidade de tal evento ocorrer três vezes seguidas, para a imagem da figura 6.1.

Quando ainda é possível aprimorar o resultado obtido, pode-se realizar uma busca local. Isto compreende repetir a busca genética, porém, limitando os valores das coordenadas do ponto  $P_0 (X_0, Y_0)$  e do ângulo de rotação ( $\theta$ ). A idéia é fazer com que as soluções geradas na busca local oscilem em torno dos valores encontrados na busca global para  $x_{0t}$ ,  $y_{0t}$  e  $\theta_t$ . Para isso os próprios valores de  $x_{0t}$ ,  $y_{0t}$  e  $\theta_t$ , bem como a largura encontrada para a solda ( $L_{solda}$ ), são usados para gerar novos limites de parâmetros do vetor solução, como mostra a tabela 6.7.

Tabela 6.7: Limites dos parâmetros do vetor solução ( $\tau$ ) para uma busca local

variável e valor	observações
$y_{0min} = y_{0t} - L_{solda};$	novo valor
$y_{0max} = y_{0t} + L_{solda};$	novo valor
$x_{0min} = x_{0t} - L_{solda};$	novo valor
$x_{0max} = x_{0t} + L_{solda};$	novo valor
$\theta_{min} = \theta_t - 5^\circ;$	novo valor
$\theta_{max} = \theta_t + 5^\circ;$	novo valor
demais variáveis	não mudam

### 6.3) Testes para Detecção de Cordões de Solda

Os testes descritos nesta secção são utilizados para avaliar a capacidade do sistema proposto em detectar a posição, tamanho e formato do cordão de solda existente na imagem. Nesta avaliação, foram utilizadas imagens que contêm apenas um cordão de solda para ser detectado. A princípio, tal situação exclui a necessidade de um sistema para verificação de resultados. O diagrama que representa o sistema implementado para a realização dos testes desta secção é mostrado na figura 6.8 e constitui uma simplificação do sistema proposto no diagrama da figura 5.24

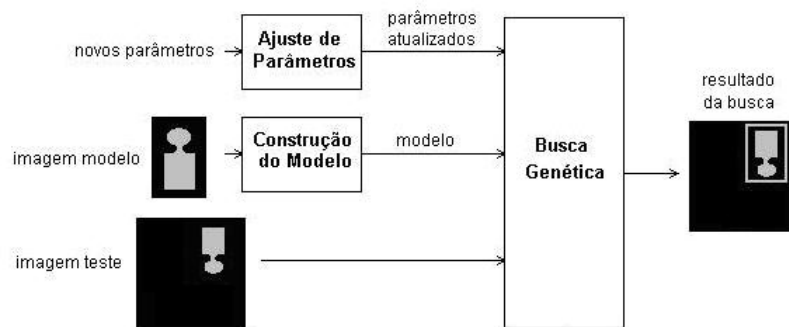


Figura 6.8 – Diagrama do sistema implementado para detecção de cordões de solda.

#### 6.3.1) Critérios para avaliar a detecção de cordões de solda

Para um resultado ser considerado como detecção, o seguinte critério deve ser atendido:

- I A linha central de referência deve estar posicionada de forma a se estender ao longo do cordão de solda, em toda a sua extensão, ou pelo menos na extensão limitada pelos marcadores de posição, quando houver.

Para uma detecção ser aceita como detecção correta, um critério adicional deve ser verificado:

- II A janela de imagem deve estar posicionada de forma a englobar as duas bordas do cordão de solda, em toda a sua extensão, ou pelo menos na extensão limitada pelos marcadores de posição, quando houver.

As figuras 6.9a e 6.9b ilustram dois casos de não-deteccção. Pois, as duas soluções ilustradas não atendem ao critério I. No caso da figura 6.9a, apenas uma parte da linha central de referência passa por uma região de solda. Quanto à situação ilustrada na figura 6.9b, a janela de imagem engloba o cordão de solda, mas a linha central de referência nem passa pelo cordão. Portanto, tal solução é considerada um caso de não deteção. Isto pode acontecer quando a faixa de valores estabelecida para a escala vertical ( $sv$ ) não atende a largura do cordão de solda existente na imagem.

As figuras 6.10a e 6.10b ilustram dois casos de deteção incorreta. Isto acontece quando a solução proposta atende ao critério I, mas não ao critério II. No caso da figura 6.10a, o comprimento da janela de imagem não foi suficiente para englobar toda a extensão do cordão de solda entre os marcadores de posição. Quanto à situação ilustrada na figura 6.10b, a altura da janela de imagem foi menor que a largura do cordão de solda.

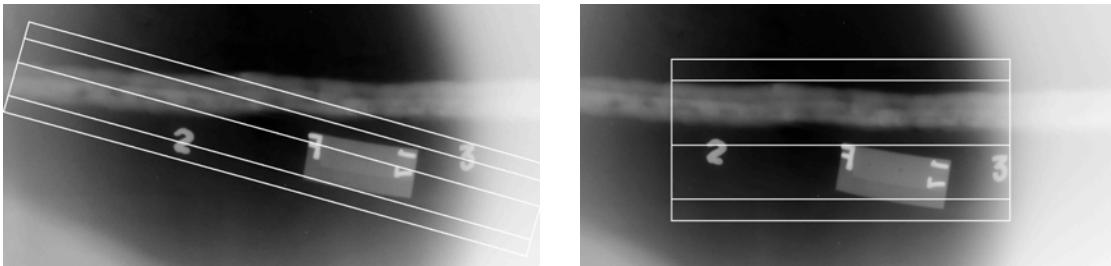


Figura 6.9 – (a) Exemplo de não-deteccção 1 e (b) exemplo de não-deteccção 2.

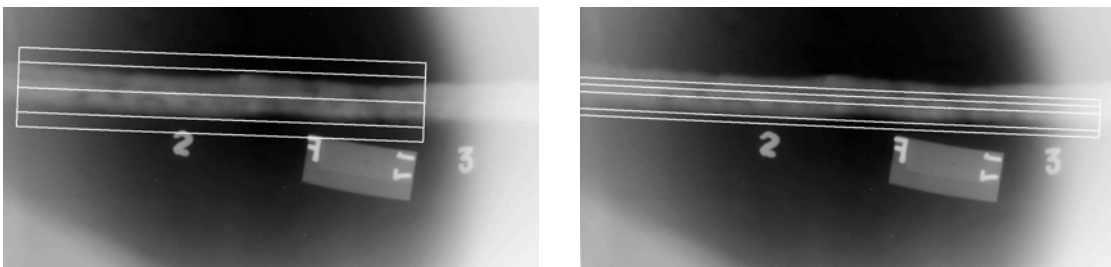


Figura 6.10 – (a) Solução de comprimento insuficiente e (b) de largura insuficiente.

Com base nos critérios I e II, são consideradas as seguintes possibilidades para cada solução, individualmente:

- $E_{D1}$ : foi cometida uma falha de deteção (não atende ao critério I);
- $E_{D2}$ : o cordão de solda foi detectado, mas não corretamente (atende ao critério I, mas não atende ao critério II);
- $A_D$ : o cordão de solda foi detectado corretamente (atende aos critérios I e II);

Para avaliar o desempenho do método proposto para a detecção de cordões de soldas, são estabelecidos os seguintes parâmetros:

- $e_{D1}$ : quantidade de erros  $E_{D1}$ ;
- $e_{D2}$ : quantidade de erros  $E_{D2}$ ;
- $a_D$ : quantidade de acertos  $A_D$ ;
- $n_d$ : número total de soluções avaliadas na detecção;
- $m_{FD}$ : margem de falhas de detecção;
- $m_{DI}$ : margem de detecções incorretas;
- $d_{detecção}$ : desempenho na detecção;

Considerando que  $nd$  seja a quantidade de soluções avaliadas na detecção, este número pode ser definido pela equação 6.1:

$$n_d = e_{D1} + e_{D2} + a_{D2} \quad (6.1)$$

A margem de falhas de detecção ( $m_{FD}$ ), a margem de detecções incorretas ( $m_{DI}$ ) e o desempenho na detecção ( $d_{detect}$ ) são dados, respectivamente, pelas equações 6.2-6.4:

$$m_{FD} = e_{D1} / n_d \quad (6.2)$$

$$m_{DI} = e_{D2} / n_d \quad (6.3)$$

$$d_{detecção} = a_D / n_d \quad (6.4)$$

### 6.3.2) Testes para Detecção de Cordões de Solda de Comprimento Limite ( $C_{lim}$ )

A denominação *cordão de solda de comprimento limite*, aplica-se ao tipo de cordão de solda que se estende de uma a outra extremidade da imagem em análise. Isto acontece para a maioria das soldas radiografadas através de técnicas do tipo PS-VS e inclui 183 padrões radiográficos das três coleções de filmes disponibilizados: 75 imagens da coleção IIW-I, 63 imagens da coleção IIW-II e 45 imagens da coleção BAM-I.

Para diminuir o volume de dados a serem processados, optou-se por reduzir o tamanho das imagens das coleções fornecidas. Conforme mencionado no capítulo 4, Liao e Ni (1996) também recorreram a este recurso, justificando que, para a detecção do cordão de solda, não há a necessidade de utilizar imagens com a mesma resolução exigida para se detectar defeitos. Desta forma, as imagens da coleção IIW-I, IIW-II e BAM-I foram reduzidas, respectivamente, para 50%, 10% e 25% do seu tamanho original. Tal procedimento também viabilizou a manipulação de imagens com tamanhos mais padronizados, e cordões de solda com larguras de dimensões menos discrepantes. Mesmo assim, a largura do cordão de solda mais fino foi 50 *pixels* e o mais largo 300 *pixels*.

A tabela 6.8 reproduz a tabela 5.4, indicando as variáveis que mantêm o valor *default* e os novos valores definidos para as variáveis que mudam. Além dos valores da tabela 6.8, utilizou-se um limite de 20%, do total de pontos de referência, como sendo a máxima quantidade permitida de pontos inválidos. Ao fazer  $f_{Cmax} = f_{Clim} = 1$ , assegura-se que as soluções geradas para a detecção do cordão de solda sejam sempre de comprimento igual ao comprimento limite ( $C_{lim}$ ). Para definir a faixa de valores para a escala vertical, foram utilizados limites estabelecidos para a largura do cordão de solda. Tais limites foram definidos com base nas observações que constam na secção 5.2 considerando as proporções de redução de tamanho das imagens.

Tabela 6.8: Limites dos parâmetros do vetor solução para teste de detecção de cordões de solda de comprimento limite

variável e valor	observações
$y0_{min} = 0;$	não muda
$y0_{max} = nl_{I_{test}};$	não muda
$x0_{min} = 0;$	não muda
$x0_{max} = nc_{I_{test}};$	não muda
$\theta_{min} = -45^\circ;$	não muda
$\theta_{max} = 135^\circ;$	não muda
$R_{min} = menor_{I_{test}};$	não muda
$R_{max} = maior_{I_{test}} \times 10^5;$	não muda
$sv_{rel_{min}} = 0,3;$	não muda
$sv_{rel_{max}} = (1 - sv_{rel_{min}});$	não muda
$sh_{rel_{min}} = 0,0;$	não muda
$sh_{rel_{max}} = (1 - sh_{rel_{min}});$	não muda
$sh_{min} = C_{min}/C = f_{Cmax} \times sh_{max}$	$f_{Cmax} = 1$
$sh_{max} = C_{max}/C = f_{Clim} \times (C_{lim}/C);$	$f_{Clim} = 1$
$sv_{min} = L_{min}/L_{solda};$	$L_{min} = 50 \text{ pixels}$
$sv_{max} = L_{max}/L_{solda};$	$L_{max} = 300 \text{ pixels}$

### 6.3.3) Testes para Detecção de Cordões de Solda de Comprimento Variado

A denominação *cordão de solda de comprimento variado* aplica-se ao tipo de cordão de solda cujo comprimento é uma fração de  $C_{lim}$ . Isto acontece em todas as 266 imagens obtidas com equipamento de radiografia computadorizada, que utilizaram a técnica PD-VS. Também foram incluídos nesta categoria os 11 padrões radiográficos do BAM obtidos através da mesma técnica de exposição radiográfica. As imagens de radiografia computadorizada não foram reduzidas e as imagens do BAM sofreram redução de 25% do seu tamanho original.

A tabela 6.9 fornece os valores que foram atualizados para a realização dos testes descritos nesta secção. Ao fazer  $f_{Cmax} = 0,7$  e manter  $f_{Clim} = 1$ , as soluções geradas para a detecção do cordão de solda ficam com o comprimento limitado entre 70 e 100% do comprimento limite ( $C_{lim}$ ). O valor  $L_{min} = 90 \text{ pixels}$  atende às condições que permitem a detecção do cordão de solda mais estreito desta categoria.

Tabela 6.9: Variáveis que mudam em relação aos valores da tabela 6.8 para teste de detecção de cordões de solda de comprimento variado

variável e valor	observações
$sh_{min} = C_{min}/C = f_{Cmax} \times sh_{max}$	$f_{Cmax} = 0,7$
$sv_{min} = L_{min}/L_{solda}$	$L_{min} = 90 \text{ pixels}$

### 6.3.4) Apresentação de Resultados dos Testes para Detecção de Cordões de Solda

A tabela 6.10 mostra os resultados da detecção do cordão de solda para as duas situações testadas e a tabela 6.11 especifica os casos de detecções incorretas e não-detecções.

Tabela 6.10: Desempenho na detecção de cordões de solda

parâmetro de avaliação	cordões de tamanho limite	cordões de tamanho variado	todos os cordões
$e_{D1}$	4	2	6
$e_{D2}$	18	4	22
$a_D$	161	273	434
$n_d$	183	279	462
$m_{FD}$	2,18%	0,72%	1,30%
$m_{DI}$	9,84%	1,43%	4,76%
$d_{detecção}$	<b>87,98%</b>	<b>97,85%</b>	<b>93,94%</b>

Tabela 6.11: Erros cometidos no teste para detecção de cordões de solda

imagem	tipo de erro	valor de adequabilidade	variável do erro	valor esperado	valor calculado
IW-I 25	não-deteção ( $E_{D1}$ )	0,788850	$\theta$	$\sim 0^\circ$	-37,98°
IW-I 49	não-deteção ( $E_{D1}$ )	0,766360	$\theta$	$\sim 0^\circ$	-44,83°
IW-I 72	não-deteção ( $E_{D1}$ )	0,803024	$ R_{esq} $	$> 10^4$	1542
IW-I 76	não-deteção ( $E_{D1}$ )	0,815545	$ R_{esq} $	$> 10^4$	891
IW-I 15	largura insuficiente ( $E_{D2}$ )	0,873329	$L_{solda}$	$> 219$	135
IW-I 23	largura insuficiente ( $E_{D2}$ )	0,895015	$L_{solda}$	$> 239$	122
IW-I 32	largura insuficiente ( $E_{D2}$ )	0,842570	$L_{solda}$	$> 307$	93
IW-I 37	largura insuficiente ( $E_{D2}$ )	0,832790	$L_{solda}$	$> 260$	76
IW-I 38	largura insuficiente ( $E_{D2}$ )	0,833735	$L_{solda}$	$> 190$	92
IW-I 39	largura insuficiente ( $E_{D2}$ )	0,789369	$L_{solda}$	$> 237$	57
IW-I 45	largura insuficiente ( $E_{D2}$ )	0,841625	$L_{solda}$	$> 234$	76
IW-I 66	largura insuficiente ( $E_{D2}$ )	0,881928	$L_{solda}$	$> 190$	65
IW-I 73	largura insuficiente ( $E_{D2}$ )	0,872195	$L_{solda}$	$> 280$	94
IW-I 82	largura insuficiente ( $E_{D2}$ )	0,854996	$L_{solda}$	$> 195$	71
IW-II 18	largura insuficiente ( $E_{D2}$ )	0,915426	$L_{solda}$	$> 162$	75
IW-II 23	largura insuficiente ( $E_{D2}$ )	0,885141	$L_{solda}$	$> 127$	75
IW-II 30	largura insuficiente ( $E_{D2}$ )	0,918545	$L_{solda}$	$> 100$	50
IW-II 37	largura insuficiente ( $E_{D2}$ )	0,877014	$L_{solda}$	$> 139$	64
IW-II 40	largura insuficiente ( $E_{D2}$ )	0,900638	$L_{solda}$	$> 127$	71
IW-II 41	largura insuficiente ( $E_{D2}$ )	0,863643	$L_{solda}$	$> 115$	50
IW-II 50	largura insuficiente ( $E_{D2}$ )	0,859532	$L_{solda}$	$> 195$	123
BAM-I 11	largura insuficiente ( $E_{D2}$ )	0,881928	$L_{solda}$	$> 118$	72
RC-163	não-deteção ( $E_{D1}$ )	0,790428	$P_0$	-	-
RC-215	não-deteção ( $E_{D1}$ )	0,824447	$P_0$	-	-
RC-38	largura insuficiente ( $E_{D2}$ )	0,890107	$L_{solda}$	$> 140$	93
RC-48	largura insuficiente ( $E_{D2}$ )	0,879643	$L_{solda}$	$> 164$	105
RC-145	largura insuficiente ( $E_{D2}$ )	0,895693	$L_{solda}$	$> 133$	99
RC-146	largura insuficiente ( $E_{D2}$ )	0,904740	$L_{solda}$	$> 140$	99

### 6.3.5) Discussões dos Resultados dos Testes para Detecção de Cordões de Solda

No capítulo 5, recorreu-se a uma grade de linhas e colunas, denominada grade de referência, para associar pontos de uma região da imagem teste com a representação da imagem modelo. Transformações geométricas foram apresentadas como meio de se definir a posição da grade e adaptar o seu formato de modo a enquadrar a região de interesse, isto é, o cordão de solda. Em seguida, foram apresentados os procedimentos para codificar o conteúdo da região da imagem indicada pela grade de referência modificada. Agora, nesta secção são mostrados exemplos, dentre os resultados obtidos, que ilustram como tais operações permitiram alcançar a correta detecção do cordão de solda para a grande maioria dos casos. Nas imagens da figura 6.11, são mostrados quatro dos 273 resultados corretos obtidos no teste com cordões de solda de comprimento variável. O resultado é indicado pelo desenho das bordas da grade modificada, contendo a linha central de referência e as linhas de interface solda/metal.

Na imagem da figura 6.11a também foi indicada a posição do ponto  $P_0$ . Nota-se que à esquerda de  $P_0$ , o cordão de solda tem aspecto linear e está levemente inclinado com relação à linha horizontal. À direita de  $P_0$ , entretanto, o cordão de solda apresenta uma leve curvatura e um comprimento mais curto. Pode-se verificar nesta imagem que o formato da grade de referência modificada reproduz tais características do cordão de solda. Isto se dá porque as operações de translação, rotação, mudança de escala, escolha do ponto central de referência e ajuste de curvatura, foram realizadas através de valores adequados para os parâmetros do vetor solução. Outra observação importante é que a grade modificada começa e termina em regiões de alto nível de cinza e de baixo contraste. Acredita-se que tal resultado tenha sido favorecido pela maximização dos valores da primeira e da última coluna da matriz de referência modelo (procedimento explicado na secção 5.3.3 e imagem 5.13).

A imagem da figura 6.11b possui algumas características diferentes da primeira. Uma das principais diferenças é posição relativa da linha central de referência. Nota-se que esta linha não está equidistante das duas bordas (superior e inferior) do cordão de solda. Isto se dá porque a região mais clara do cordão de solda, que corresponde à parte que recebeu mais reforço de material, também não está centralizada em relação às bordas do cordão. Tal resultado foi obtido porque foi encontrado um valor adequado para o parâmetro ( $sv_{rel}$ ) que controla a operação de deslocamento da linha central de referência, descrita na secção 5.3.4.

A imagem da figura 6.11c ilustra uma situação onde a região do cordão de solda apresenta muito ruído e baixo contraste. Além disso, tal resultado salienta uma vantagem da metodologia proposta em detectar cordões de solda curvos. Caso a grade fosse um retângulo, provavelmente interceptaria o IQI que está próximo do cordão.

A imagem da figura 6.11d ilustra uma situação que poderia confundir o algoritmo de detecção. Pois, além do cordão de solda a ser inspecionado, na mesma imagem há outra região de solda e uma parede de tubulação, que também se assemelha a um cordão de solda. Tal resultado indica que os parâmetros do AG foram escolhidos de forma adequada, priorizando a detecção do máximo global. Outra observação importante sobre esta imagem é que, para o cordão de solda ser detectado corretamente, parte da grade de referência acabou incluindo pontos inválidos (fora dos limites da imagem). Daí a importância de se ter apresentado, na secção 5.3.6, considerações sobre como tratar tais casos.



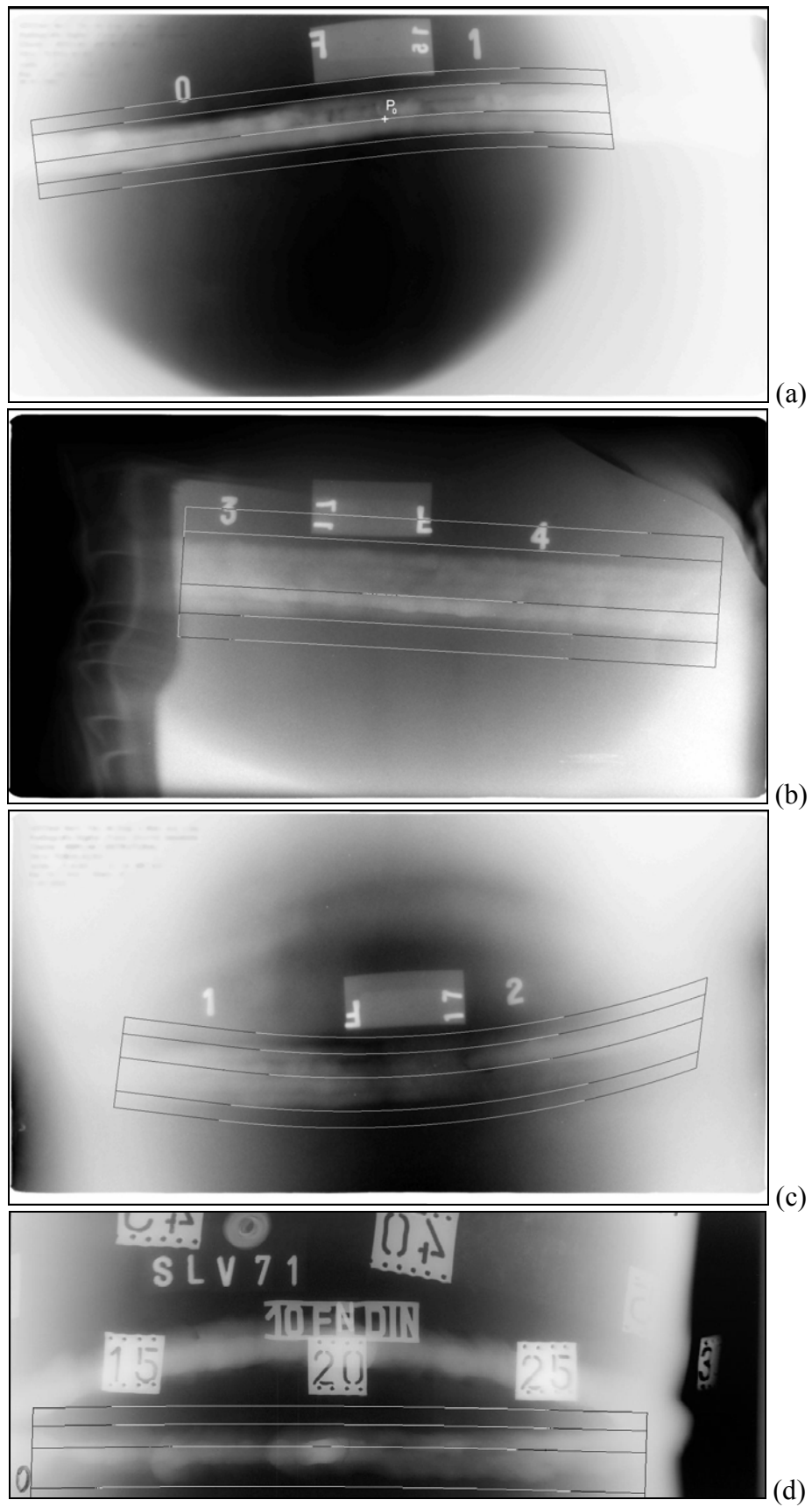


Figura 6.11 – Detecção do cordão de solda nas imagens (a) RC 137, (b) RC 25, (c) RC 47 e (d) BAM-I 97.

As figuras 6.12 e 6.13 mostram três dos 161 resultados corretos obtidos no teste com cordões de solda de comprimento limite. Pode-se observar que, para tais radiografias, o cordão de solda se estende horizontalmente de uma a outra borda da imagem. Conforme previsto, ao utilizar  $f_{Cmax} = f_{Clim} = 1$ , sempre se obteve a grade modificada com um comprimento suficiente para alcançar as duas bordas da imagem. Tais condições viabilizaram a detecção de cordões desta categoria em toda a sua extensão.

Recordando alguns dos recursos utilizados para a codificação do conteúdo da janela de imagem (secção 5.3.5), na qual o cordão de solda está enquadrado, destaca-se o fato da matriz de referência ter sido construída utilizando os valores máximo ou médio da vizinhança dos pontos de referência. Atribuí-se ao uso deste recurso, o fato da presença de muitos defeitos não impedirem a detecção correta do cordão de solda na imagem da figura 6.12. Por outro lado, possivelmente devido às irregularidades de formato, as bordas do cordão acabaram ultrapassando, em alguns trechos, as linhas da grade que marcam a interface solda/metal. Entretanto, tais bordas não avançam a ponto de ultrapassar as bordas da grade de referência e, portanto, esta solução ainda atende o critério de aceitação II.

A imagem da figura 6.13a representa um dos casos mais críticos. Além de ruído e baixo contraste, o reforço de material é quase imperceptível. Mesmo assim, o cordão de solda foi detectado e o resultado está correto, segundo os critérios estabelecidos.

Na secção 5.3.5 foi destacada a necessidade de se recorrer a uma normalização, coluna a coluna, dos valores da matriz de referência gerada para uma janela de imagem. Recorrer a tal recurso favoreceu a detecção do cordão de solda para situações como a da imagem da figura 6.13b, que apresenta diferenças de contraste ao longo do comprimento de cordão de solda.



Figura 6.12 – Detecção do cordão de solda na imagem IIW-I 34.

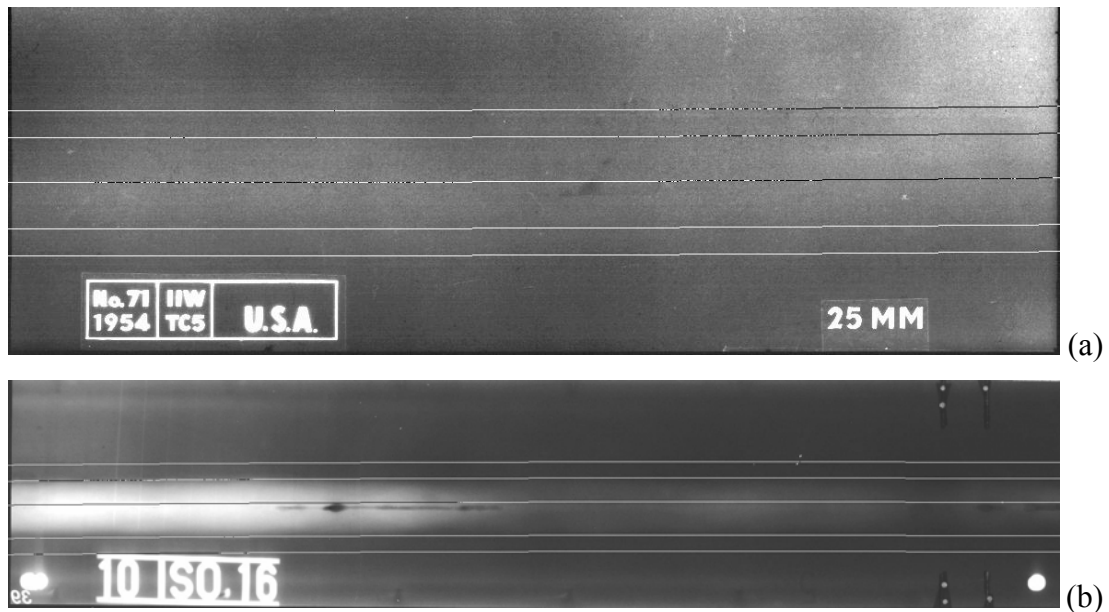


Figura 6.13 – Detecção do cordão de solda nas imagens (a) IIW-I 71 e (b) IIW-II 39.

Sobre as não-detecções, houve três situações diferentes ilustradas nas figuras 6.14 e 6.15. A primeira situação (figura 6.14) envolve um valor incorreto para a curvatura do lado esquerdo do cordão de solda. Embora o cordão seja linear, acredita-se que tal resultado ocorreu porque a solda não apresenta reforço de material suficiente para gerar contraste na imagem radiográfica, especialmente na extremidade esquerda, onde ocorreu o problema. Na imagem da figura 6.15a, o ângulo de rotação está incorreto. Entretanto, o reforço de cordão de solda também é quase imperceptível e isto, somado à presença de defeitos, dificulta estabelecer semelhanças com a imagem modelo. Na imagem da figura 6.15b, o baixo contraste solda/metal de apenas um lado do cordão dificultou estabelecer semelhanças com a imagem modelo, conduzindo a um resultado incorreto.

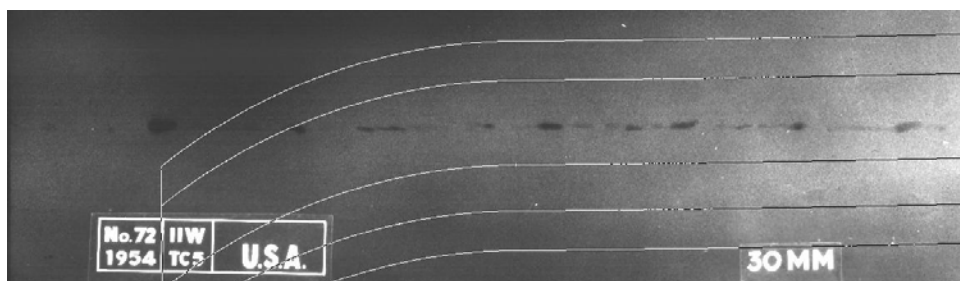


Figura 6.14 – Detecção do cordão de solda na imagem IIW-I 72.

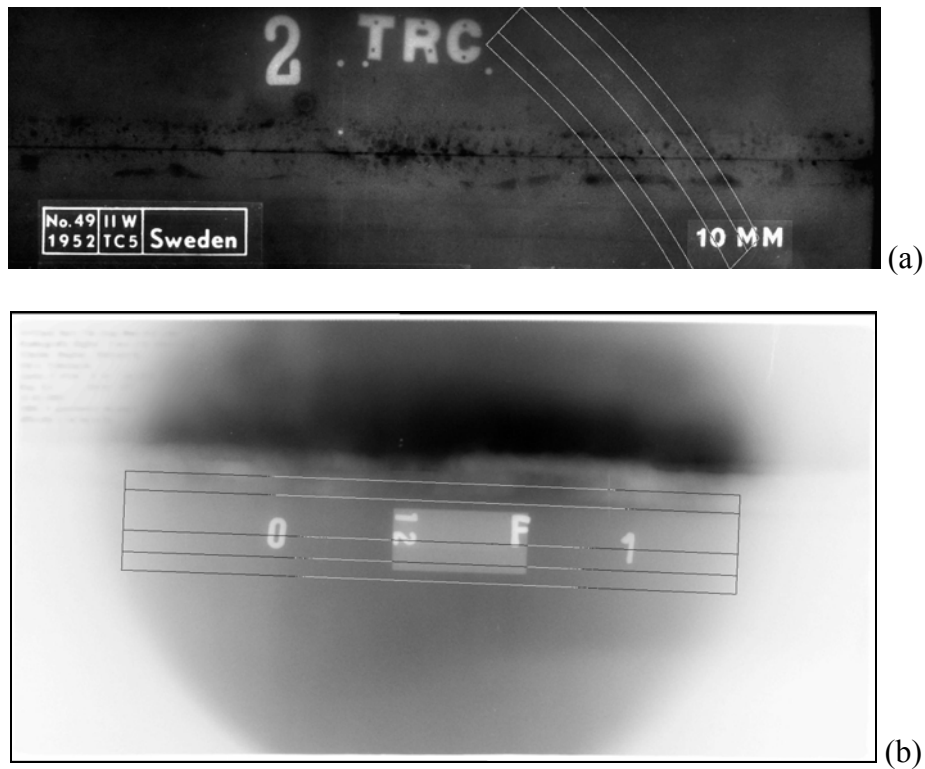


Figura 6.15 – Detecção do cordão de solda nas imagens (a) IIW-I 49 e (b) RC 215

Sobre as detecções incorretas, o erro cometido foi sempre o mesmo, ou seja, a largura da janela de imagem não foi grande o suficiente para englobar as duas bordas do cordão de solda em toda sua extensão. Em geral, isto aconteceu porque trechos menores da largura do cordão de solda, como ilustrado nas imagens das figuras 6.16a e 6.16b, são mais semelhantes à imagem modelo do que o próprio cordão. Uma alternativa para melhorar o resultado obtido consiste em estabelecer um intervalo mais estreito de larguras para o cordão de solda. Quando a distância entre chanfros consta na documentação da junta, pode-se usar tal informação para estabelecer os limites de largura automaticamente.

Em uma outra situação, ilustrada na imagem da figura 6.16c, há variações abruptas de largura ao longo do comprimento do cordão de solda. Neste caso, entretanto, aumentar a largura da grade de referência pode englobar o cordão inteiro, mas tal resultado ainda será uma aproximação grosseira do formato do cordão. Isto, por sua vez, destaca uma limitação da técnica proposta. Tal técnica não é direcionada a situações onde há variações abruptas de largura ao longo do comprimento do cordão de solda.



Figura 6.16 – Detecção do cordão de solda nas imagens (a) IIW-I 41 (b) IIW-I 38 (c) IIW-I 73

### 6.3.6) Aprimoramento de Resultados na Detecção de Cordões de Solda

O primeiro teste para melhorar os resultados obtidos foi recorrer às alternativas I e II da secção 6.2.5. Entretanto tais alternativas pouco colaboraram para melhorar o desempenho geral. Na realidade, embora o valor de adequabilidade tenha melhorado em alguns casos, o número de detecções-incorretas e não-detecções continuou o mesmo.

O segundo teste, por outro lado, trouxe resultados bem mais eficazes. A tabela 6.12 mostra uma pré-classificação das imagens de detecções incorretas segundo determinadas faixas de largura para o cordão de solda. Nos novos testes, os limites para a largura do cordão de solda foram estabelecidos em harmonia com tais intervalos. Os demais parâmetros das tabelas 6.8 e 6.9 foram mantidos.

A tabela 6.13 mostra que, em função da estratégia adotada para aprimorar a detecção dos cordões de solda, o número de detecções incorretas caiu de 22 para zero. Para citar apenas o desempenho geral, este aumentou de 93,94% para 98,27%. Em compensação, houve duas não-detecções e alguns resultados que merecem uma

consideração especial. Na figura 6.17 são mostrados os novos resultados para as imagens da figura 6.16. A primeira imagem (figura 6.17a) e a segunda (figura 6.17b) desta figura ilustram como o problema da largura insuficiente foi resolvido. Por outro lado, o resultado para a terceira imagem (figura 6.17c) confirma a expectativa anunciada para casos onde o mesmo cordão de solda possui largura variável.

Tabela 6.12: Pré-classificação das imagens de detecções incorretas segundo faixas específicas de largura para o cordão de solda

faixa de largura	imagens
100–150 pixels	IIW-II 23
	IIW-II 30
	IIW-II 37
	IIW-II 40
	IIW-II 41
	BAM-I 11
150–200 pixels	IIW-I 38
	IIW-I 66
	IIW-I 82
	IIW-II 18
	IIW-II 50
200–250 pixels	IIW-I 15
	IIW-I 23
	IIW-I 39
	IIW-I 45
	RC-I 38
	RC-I 48
	RC-I 145
	RC-I 146
250–300 pixels	IIW-I 37
	IIW-I 73
>300 pixels	IIW-I 32

Tabela 6.13: Desempenho na detecção de cordões de solda após implementações para aprimoramento de resultados

parâmetro de avaliação	cordões de tamanho limite	cordões de tamanho variado	todos os cordões
$e_{D1}$	6	2	8
$e_{D2}$	0	0	0
$a_D$	177	277	454
$n_d$	183	279	462
$m_{FD}$	3,28%	0,72%	1,73%
$m_{DI}$	0%	0%	0%
$d_{detecção}$	<b>96,72%</b>	<b>99,28%</b>	<b>98,27%</b>

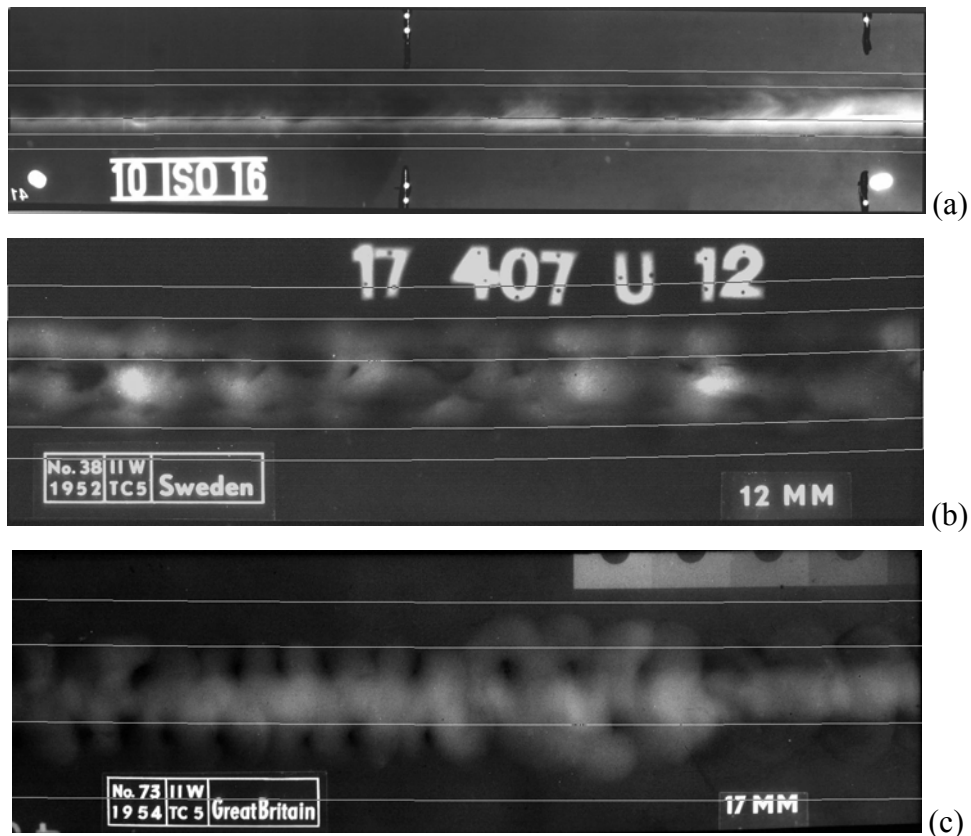


Figura 6.17 – Resultados melhorados para detecção do cordão de solda nas imagens (a) IIW-I 41 (b) IIW-I 38 (c) IIW-I 73

### 6.3.7) Detecção de Cordões de Solda em Radiografias PD-VD

Adicionalmente, foram realizados testes para a detecção do cordão de solda em três padrões da coleção BAM-I, que foram gerados a partir da técnica PD-VD, com a fonte alinhada em relação à peça. A principal dificuldade relacionada a tais imagens é o fato da parede da tubulação radiografada apresentar muitas semelhanças com o modelo do cordão de solda. Para evitar que os resultados convergissem para essas regiões da imagem, recorreu-se a uma faixa mais estreita para o ângulo de rotação. Tais valores, bem como os valores para os demais parâmetros do teste, são fornecidos na tabela 6.14.

Tabela 6.14: Limites dos parâmetros do vetor solução para teste de detecção de cordões de solda em radiografias PD-VD

variável e valor	observações
$\theta_{min} = +45^\circ;$	novo valor
$sh_{min} = C_{min}/\underline{C} = f_{Cmax} \times sh_{max}$	$f_{Cmax} = 0,8$
$sh_{max} = C_{max}/\underline{C} = f_{Clim} \times (C_{lim}/\underline{C});$	$f_{Clim} = 0,5$
$sv_{min} = L_{min}/L_{solda};$	$L_{min} = 30 \text{ pixels}$
$sv_{max} = L_{max}/L_{solda};$	$L_{max} = 40 \text{ pixels}$

Utilizando os parâmetros da tabela 6.14 foi possível detectar os cordões de solda nas três imagens testadas, não havendo a necessidade de recorrer a recursos para aprimoramento de resultados. Uma dessas três soluções é apresentada na figura 6.18. Como não houve não-deteccões ou deteccões incorretas, o desempenho dos testes desta secção foi 100%.

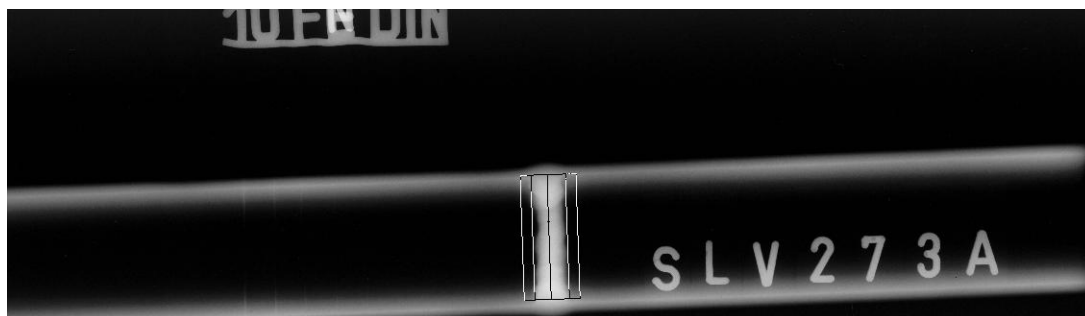


Figura 6.18 – Detecção do cordão na imagem BAM-I 70.

### 6.3.8) Detecção de Cordões de Solda de Formato Elíptico

Os testes descritos nesta secção são utilizados para avaliar a capacidade do sistema proposto em detectar a posição, tamanho e formato de cordões de solda existentes em radiografias do tipo PD-VD com a fonte inclinada em relação à peça. Conforme visto no capítulo 2, em tais radiografias o cordão de solda é projetado em formato elíptico. Fazem parte desta categoria oito padrões radiográficos da coleção BAM-I.

Para detectar este tipo de cordão, recorreu-se a um processo que ocorre em duas etapas. As imagens da figura 6.19 fornecem um exemplo para se explicar tais etapas. Primeiro, a imagem radiográfica é fornecida ao bloco busca genética para a primeira detecção (figura 6.19a). Em seguida, o resultado da primeira detecção é extraído (figura 6.19b) e a imagem é realimentada ao sistema para a segunda detecção (figura 6.19c).

Para a realização dos testes desta secção, os parâmetros que foram ajustados para valores diferentes de seus respectivos valores *default* estão especificados na tabela 6.15. Como não houve não-deteccões ou deteccões incorretas, o desempenho dos testes desta secção foi 100%.



Tabela 6.15: Limites dos parâmetros do vetor solução para teste de detecção de cordões de solda em radiografias PD-VD

variável e valor	observações
$\theta_{min} = +45^\circ;$	novo valor
$sh_{min} = C_{min}/\underline{C} = f_{Cmax} \times sh_{max}$	$f_{Cmax} = 0,7$
$sh_{max} = C_{max}/\underline{C} = f_{Clim} \times (C_{lim} / \underline{C});$	$f_{Clim} = 1,0$
$sv_{min} = L_{min}/\underline{L}_{solda};$	$L_{min} = 70 \text{ pixels}$
$sv_{max} = L_{max}/\underline{L}_{solda};$	$L_{max} = 150 \text{ pixels}$

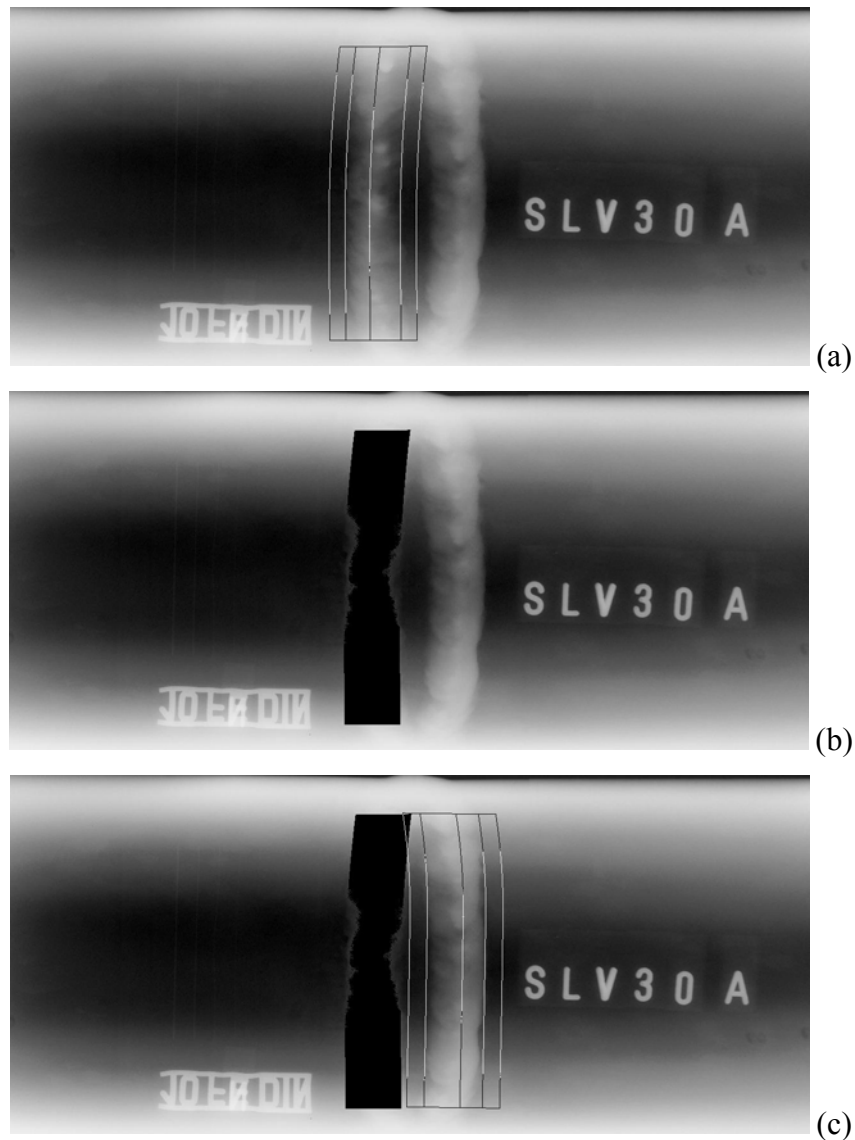


Figura 6.19 – (a) Primeira detecção de cordão de solda na imagem BAM-I 43; (b) Imagem BAM-I 43 sem a primeira detecção; (c) Segunda detecção de cordão de solda na imagem BAM-I 43.

## 6.4) Testes para Reconhecimento de Cordões de Solda

Os testes descritos nesta secção visam cobrir situações onde não se sabe a quantidade de cordões de solda existentes para serem detectados em uma mesma imagem. Tal situação envolve a utilização do sistema idealizado através do diagrama de blocos da figura 5.25, repetido aqui (figura 6.20) para facilitar a compreensão do mecanismo de detecção e reconhecimento.

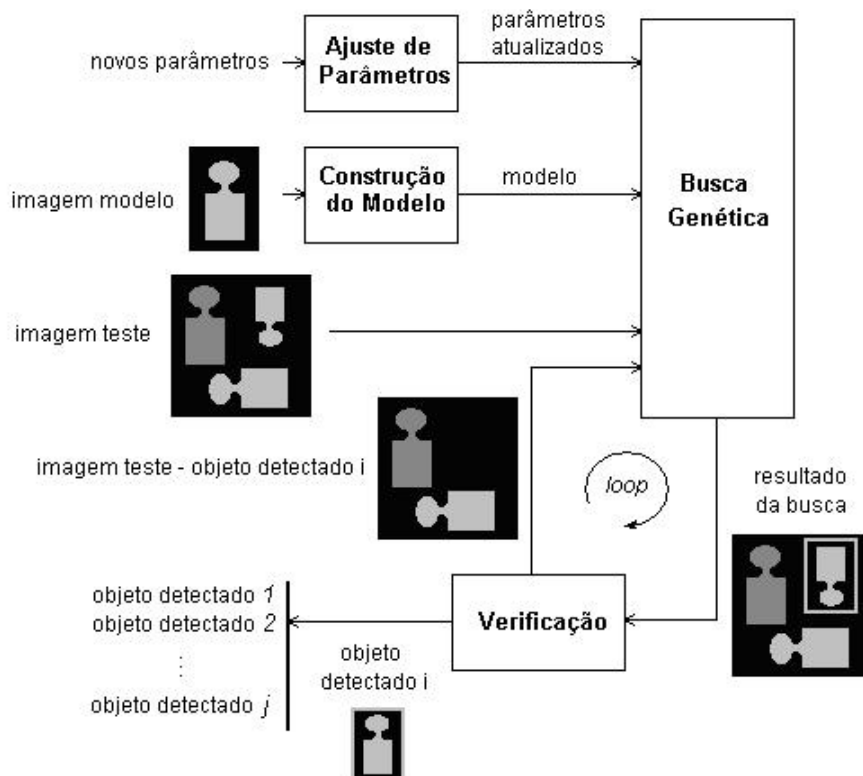


Figura 6.20 – Diagrama de blocos do sistema de detecção e reconhecimento de cordões de solda.

Conforme já mencionado, a implementação do bloco verificação exige a utilização de um classificador. Com base na avaliação visual dos resultados dos testes para detecção de cordões de solda, foi possível estabelecer um banco de dados para treinamento do classificador. Tal banco de dados, com 323 detecções e 323 não-detecções, foi usado para construir o gráfico da figura 6.21. Este gráfico mostra o valor de adequabilidade para os resultados extraídos de 323 imagens utilizadas nos testes anteriores. Para gerar um grande número de contra-exemplos (não-detecções), foi necessário primeiro eliminar os cordões de solda das imagens e, então, realimentá-las ao sistema de detecção para uma nova busca. Utilizando valores com apenas duas casas

decimais, pode-se chegar, pelo método de Otsu (1979), ao limiar  $T=0,82$ . Este valor permite separar os dados do gráfico da figura 6.21 em duas classes distintas: detecção ou não-deteção. Ou seja, se o valor de adequabilidade é menor que  $T$ , o resultado é classificado como não-deteção. Para os dados do gráfico da figura 6.21, tais condições conduzem a 23 erros de classificação: cinco não-deteções e 18 falsos alarmes (falsos positivos). A seguir são estabelecidos os critérios para avaliar o desempenho neste tipo de classificador.

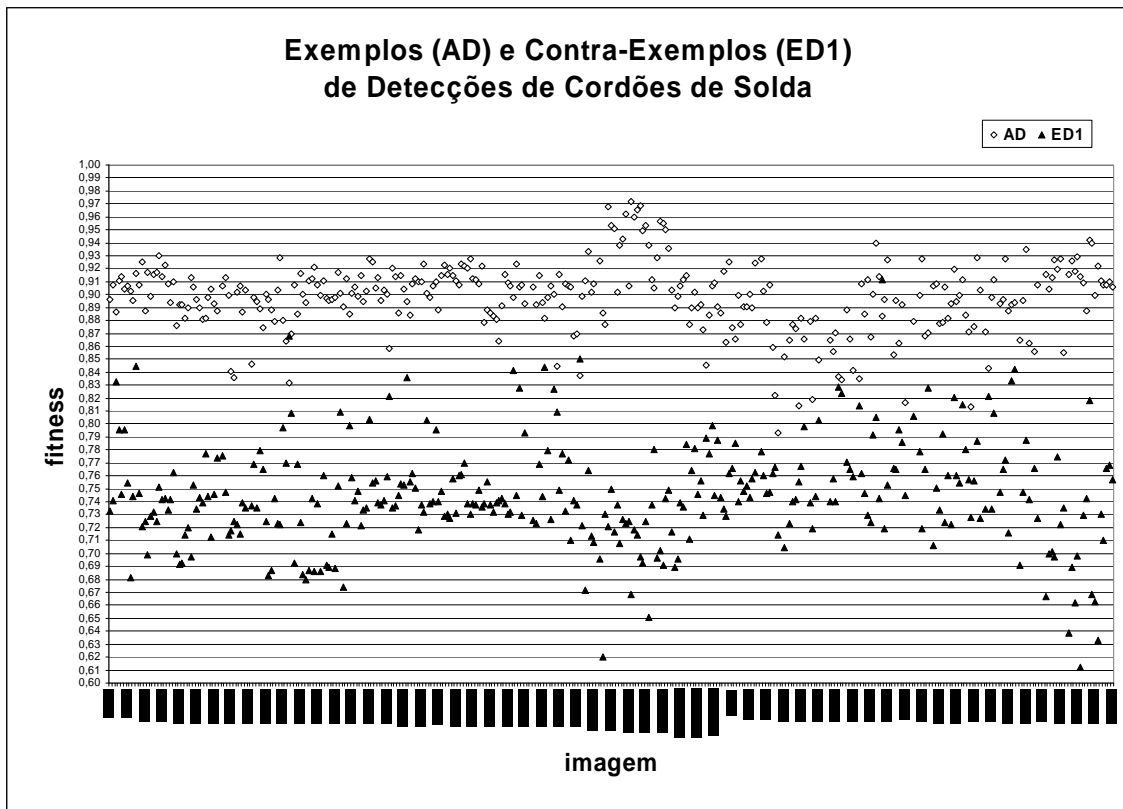


Figura 6.21 – Valor de adequabilidade para amostras de exemplos e contra-exemplos de detecções de cordões de solda

#### 6.4.1) Critérios para avaliar a classificação de cordões de solda

Ao implementar o classificador para verificar o resultado da detecção, as seguintes possibilidades foram consideradas:

- $FP$ : o classificador aceitou uma detecção incorreta ( $E_{D1}$ )  
ou uma não-deteção ( $E_{D2}$ );

- $FN$ : o classificador rejeitou uma detecção correta ( $A_D$ );
- $VP$ : o classificador aceitou uma detecção correta ( $A_D$ );
- $VN$ : o classificador rejeitou uma detecção incorreta ( $E_{D1}$ )  
ou uma não-deteção ( $E_{D2}$ );

Para avaliar o desempenho do classificador, os seguintes parâmetros são estabelecidos:

- $e_{FP}$ : quantidade de erros do tipo  $FP$ ;
- $e_{FN}$ : quantidade de erros do tipo  $FN$ ;
- $a_{VP}$ : quantidade de acertos do tipo  $VP$ ;
- $a_{VN}$ : quantidade de acertos do tipo  $VN$ ;
- $Se$ : sensibilidade;
- $Sp$ : especificidade;
- $d_{class}$ : desempenho do classificador;

A sensibilidade ( $Se$ ) do classificador representa a proporção de cordões de solda classificados corretamente e é dada pela equação 6.5 (Hand, 1997):

$$Se = (a_{VP}) / (a_{VP} + e_{FN}) \quad (6.5)$$

A especificidade ( $Sp$ ) do classificador representa a proporção de não-deteções e deteções incorretas que o classificador é capaz de rejeitar e é dada pela equação 6.6 (Hand, 1997):

$$Sp = (a_{VN}) / (a_{VN} + e_{FP}) \quad (6.6)$$

O desempenho geral do classificador ( $d_{class}$ ) é dado pela equação 6.7 (Hand, 1997):

$$d_{class} = (a_{VP} + a_{VN}) / (e_{FP} + e_{FN} + a_{VP} + a_{VN}) \quad (6.7)$$

#### 6.4.2) Teste para Avaliar o Desempenho do Classificador

Das 266 imagens de radiografia computadorizada, utilizadas nos testes para detecção de cordões de solda, apenas 166 forneceram dados para a construção do gráfico da figura 6.21. As 100 imagens restantes foram reservadas para testar o desempenho do classificador. Embora haja apenas um cordão de solda por imagem, também é avaliada a capacidade do sistema implementado em gerar tal informação automaticamente. Os valores dos parâmetros do AG foram os mesmos do teste para detecção de cordões de solda de comprimento variado (secção 6.3.3).

Para a imagem da tabela 6.16, o sistema testado reconheceu três objetos como sendo cordões de solda. Esta foi a imagem para o qual houve maior quantidade de erros do tipo *FP* (falso positivo ou falso alarme). Observa-se que, até a terceira detecção, o valor de adequabilidade ainda foi maior que o limiar  $T=0,82$ . A tabela 6.17 resume os resultados obtidos e fornece os parâmetros de desempenho do sistema.

Tabela 6.16: Exemplos de múltiplas detecções classificadas pelo sistema proposto.

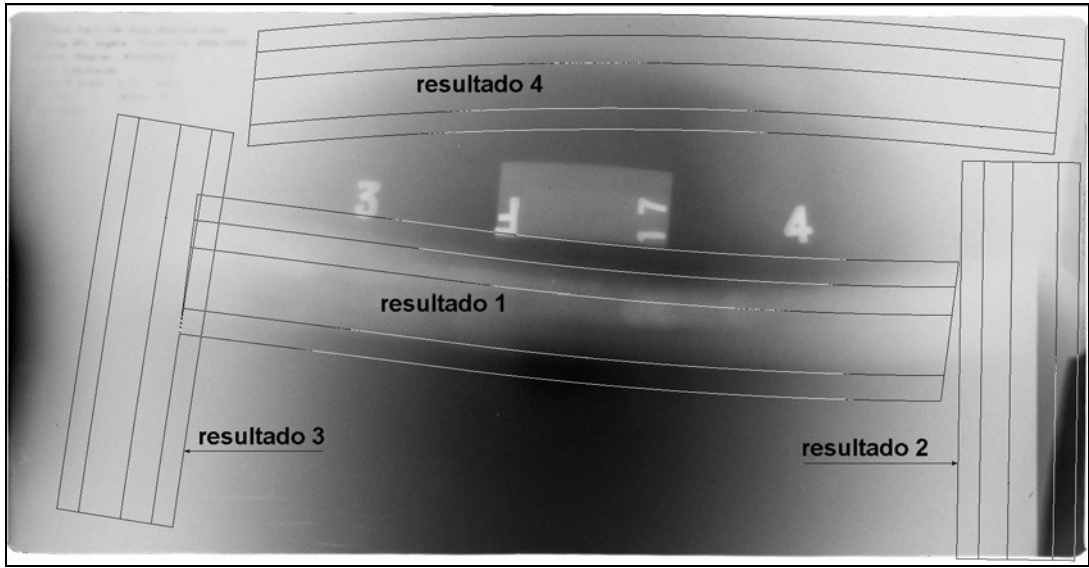
radiografia com os resultados da detecção		
		
especificação dos resultados		
saída da busca	valor de adequabilidade	saída da verificação
resultado 1	0.876975	solda
resultado 2	0.822237	solda
resultado 3	0.826114	solda
resultado 4	0.731271	não-solda

Tabela 6.17: Dados para avaliação de desempenho no teste para avaliar o classificador.

classe	resultados		Parâmetros para avaliar o desempenho	
	solda	não-solda		
solda	$a_{VP} = 99$	$e_{FN} = 1$	$Se = 98,02\%$	$d_{class} = 97,55\%$
não-solda	$e_{FP} = 4$	$a_{VN} = 100$	$Sp = 96,15\%$	

### 6.4.3) Junções com Cordões de Solda Perpendiculares entre Si

Uma das aplicações do sistema proposto envolve a análise de radiografias com cordões de solda que se juntam, formando uma bifurcação “T” ou um cruzamento “+”. Para tratar tal situação, os parâmetros do sistema de detecção devem ser ajustados para detectar cordões de comprimento limite na primeira detecção e, a partir da segunda detecção, cordões de comprimento variável. As tabelas 6.18 e 6.19 mostram os resultados obtidos para duas das imagens testadas. Para avaliar o desempenho do sistema proposto nesta aplicação, havia nove imagens disponíveis. A tabela 6.20 resume o desempenho mensurado e revela que todos os cordões de solda foram detectados, havendo apenas dois falsos alarmes.

Tabela 6.18: Resultados para imagem com cordões que se unem em uma junção T.

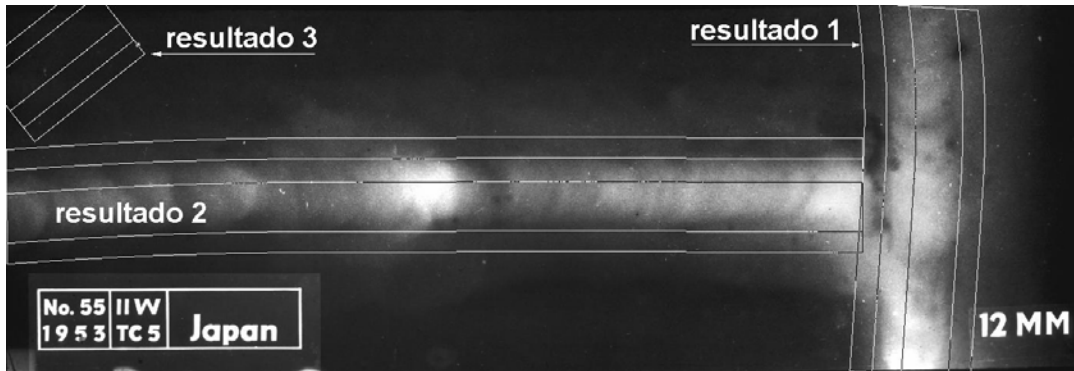
radiografia com os resultados da detecção		
		
especificação dos resultados		
saída da busca	valor de adequabilidade	saída da verificação
resultado 1	0.869360	solda
resultado 2	0.867514	solda
resultado 3	0.750532	não-solda

Tabela 6.19: Resultados para imagem com cordões que se unem em uma junção +.

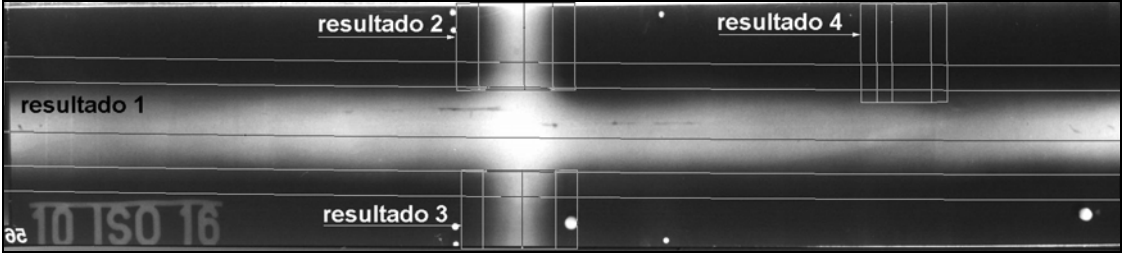
radiografia com os resultados da detecção		
		
especificação dos resultados		
saída da busca	valor de adequabilidade	saída da verificação
resultado 1	0.925868	solda
resultado 2	0.898742	solda
resultado 3	0.825989	solda
resultado 4	0.769375	não-solda

Tabela 6.20: Dados para avaliação de desempenho no teste para avaliar o classificador

classe	resultados		parâmetros para avaliar o desempenho
	solda	não-solda	
solda	$a_{VP} = 18$	$e_{FN} = 0$	$Se = 100\%$
não-solda	$e_{FP} = 2$	$a_{VN} = 9$	$Sp = 81,81\%$
$d_{class} = 93,10\%$			

## 6.5) Testes para Segmentação de Defeitos

A metodologia proposta para detecção e reconhecimento de cordões de solda foi utilizada para extrair imagens de cordões com padrões de defeitos das coleções disponíveis. Para tanto, recorreu-se ao procedimento descrito na secção 5.3.11. Em seguida, as partes dos cordões extraídos ( superior:  $Img_{sup}$ ; centro:  $Img_{solda}$ ; inferior:  $Img_{inf}$ ) foram processadas através da metodologia proposta nos trabalhos de Schneider *et al.* (2004b) e Schneider (2005), descrita na secção 4.5.7. O objetivo de se recorrer a tais procedimentos foi verificar a possibilidade de utilizar a técnica proposta nesta tese para construir uma parte integrante de um *software* para auxiliar na visualização e interpretação de imagens radiográficas de soldas. Para tanto, o filtro e a seqüência de operações definidas por Schneider (2005), para detecção de defeitos, também foram implementados em linguagem C++, plataforma Windows XP.

Os primeiros resultados obtidos revelaram dificuldades na detecção de defeitos alongados, principalmente trincas. Entretanto, a seqüência de operações proposta por Schneider (2005) foi revista e resultados melhores foram obtidos após algumas alterações no pós-processamento das imagens. Tais alterações são destacadas na figura 6.22a, que mostra a seqüência de operações inicialmente proposta por Schneider (2005), e na figura 6.22b, que ilustra a seqüência proposta no presente trabalho.

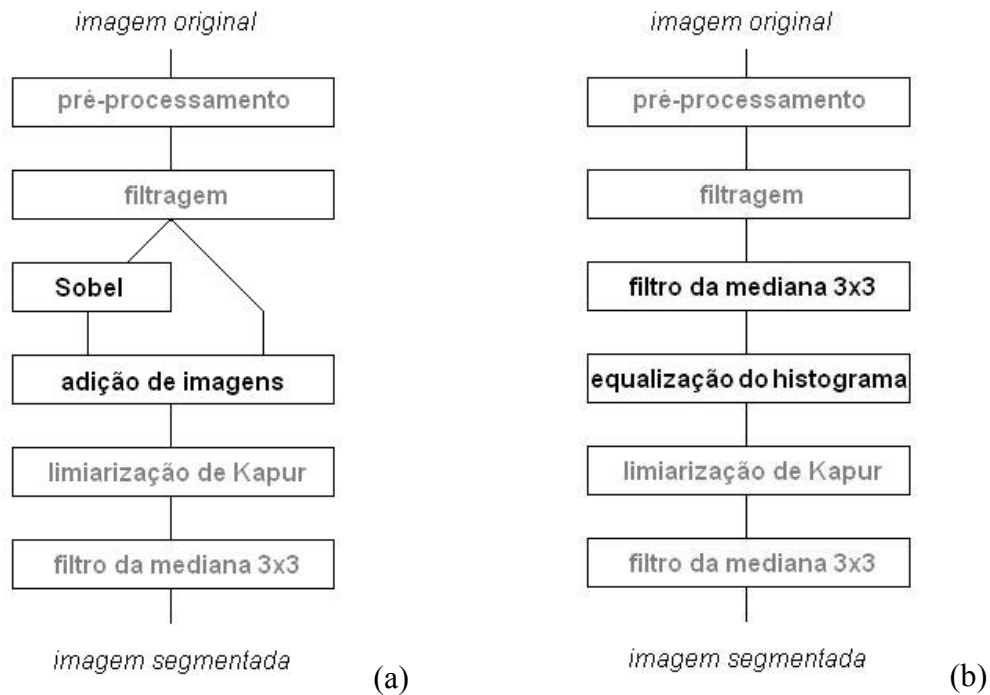


Figura 6.22 –Seqüência de operações para segmentação de defeito no cordão de solda, (a) conforme proposto por Schneider (2005) e (b) alterações propostas nesta tese.

Os resultados de tais procedimentos para segmentação de defeitos são comparados através das imagens das tabelas 6.21-6.27, que utilizam padrões de defeitos da coleção IIW-I. Procurou-se diversificar os exemplos de imagens de modo a cobrir todas as classes de defeitos consideradas nas secções 2.2.4 e 2.3.2. Tais resultados demonstram que as alterações agregadas à técnica proposta por Schneider *et al.* (2004b) e Schneider (2005) permitiram segmentar defeitos com mais precisão. Usando a trinca da tabela 6.21 como exemplo, pode-se observar que tal defeito foi segmentado de forma menos fragmentada. Tais resultados não só contribuem para se ter uma melhor visualização dos defeitos, mas também facilitam, principalmente, a extração de informações que permitirão classificá-los.



Tabela 6.21: Exemplo de resultado da segmentação do defeito trinca longitudinal

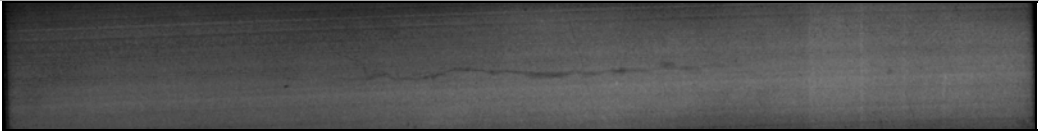
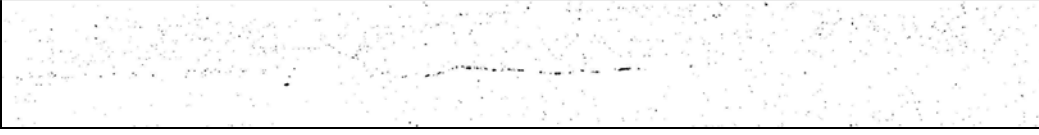
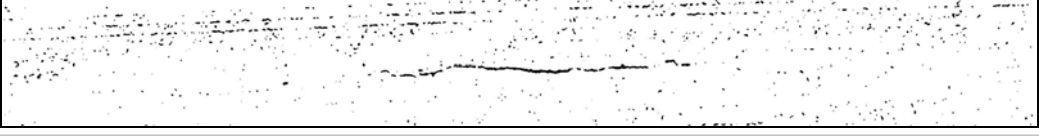
A:	
B:	
C:	
<p>A: imagem original (parte central do cordão de solda extraído do padrão IIW-I 82)                  B: imagem segmentada pelo método de Schneider (2005) original                  C: imagem segmentada pelo método de Schneider (2005) modificado                  coeficientes da filtragem: <math>\text{coefh} = 0,10</math> e <math>\text{coefv} = 0,10</math>;</p>	

Tabela 6.22: Exemplo de resultado da segmentação do defeito trinca transversal

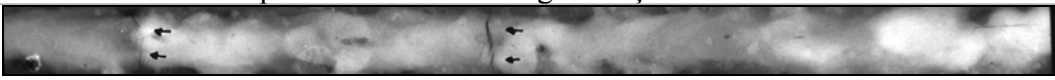
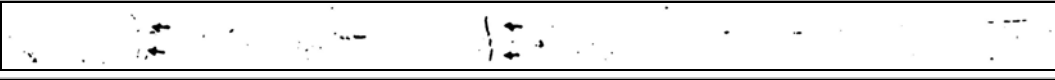
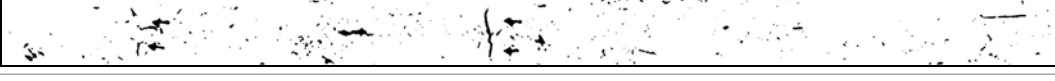
A:	
B:	
C:	
<p>A: imagem original (parte central do cordão de solda extraído do padrão IIW-I 46)                  B: imagem segmentada pelo método de Schneider (2005) original                  C: imagem segmentada pelo método de Schneider (2005) modificado                  coeficientes da filtragem: <math>\text{coefh} = 0,10</math> e <math>\text{coefv} = 0,10</math>;</p>	

Tabela 6.23: Exemplo de resultado da segmentação de inclusões de escória em linha

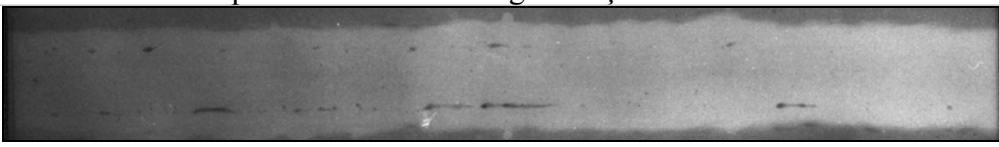
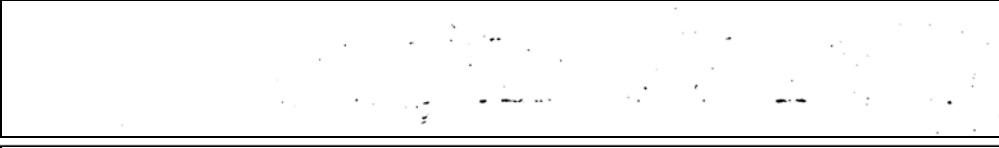
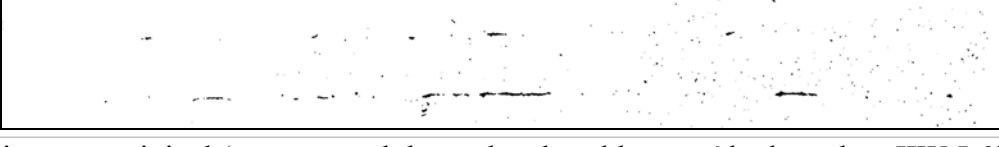
A:	
B:	
C:	
<p>A: imagem original (parte central do cordão de solda extraído do padrão IIW-I 69)                  B: imagem segmentada pelo método de Schneider (2005) original                  C: imagem segmentada pelo método de Schneider (2005) modificado                  coeficientes da filtragem: <math>\text{coefh} = 0,10</math> e <math>\text{coefv} = 0,10</math>;</p>	

Tabela 6.24: Exemplo de resultado da segmentação do defeito falta de penetração

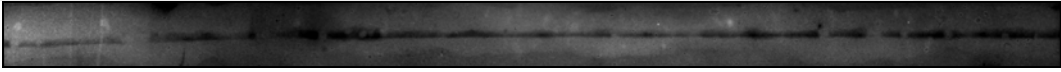
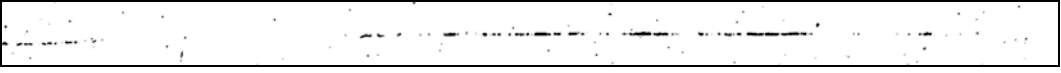
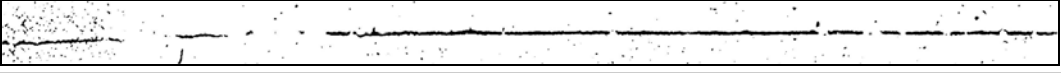
A:	
B:	
C:	
<p>A: imagem original (parte central do cordão de solda extraído do padrão IIW-I 47)                  B: imagem segmentada pelo método de Schneider (2005) original                  C: imagem segmentada pelo método de Schneider (2005) modificado                  coeficientes da filtragem: <math>\text{coefh} = 0,10</math> e <math>\text{coefv} = 0,10</math>;</p>	

Tabela 6.25: Exemplo de resultado da segmentação do defeito mordedura externa


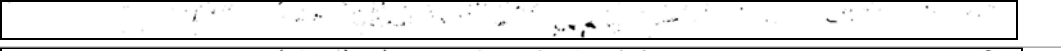
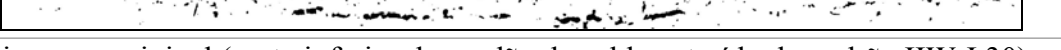
A:	
B:	
C:	
<p>A: imagem original (parte inferior do cordão de solda extraído do padrão IIW-I 30)                  B: imagem segmentada pelo método de Schneider (2005) original                  C: imagem segmentada pelo método de Schneider (2005) modificado                  coeficientes da filtragem: <math>\text{coefh} = 0,10</math> e <math>\text{coefv} = 0,10</math>;</p>	

Tabela 6.26: Exemplo de resultado da segmentação do defeito falta de fusão

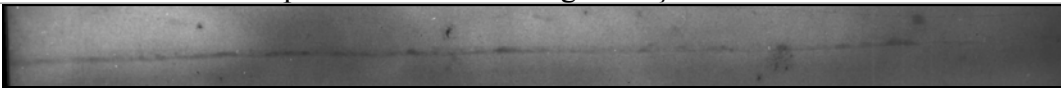

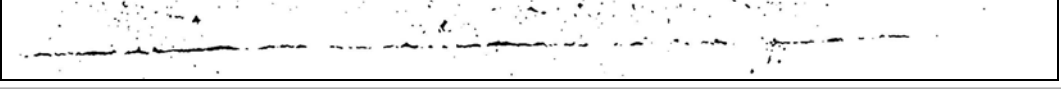
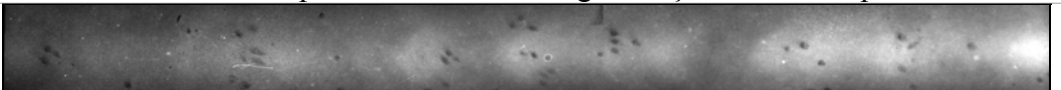
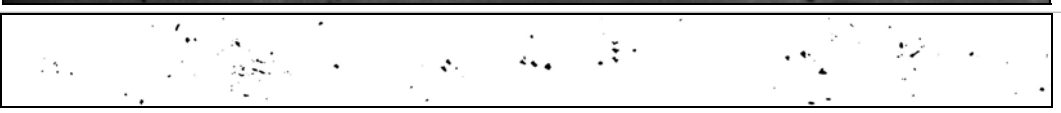
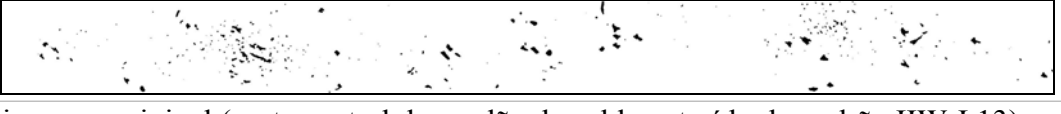
A:	
B:	
C:	
<p>A: imagem original (parte inferior do cordão de solda extraído do padrão IIW-I 40)                  B: imagem segmentada pelo método de Schneider (2005) original                  C: imagem segmentada pelo método de Schneider (2005) modificado                  coeficientes da filtragem: <math>\text{coefh} = 0,05</math> e <math>\text{coefv} = 0,05</math>;</p>	

Tabela 6.27: Exemplo de resultado da segmentação do defeito porosidade

A:	
B:	
C:	
<p>A: imagem original (parte central do cordão de solda extraído do padrão IIW-I 13)                  B: imagem segmentada pelo método de Schneider (2005) original                  C: imagem segmentada pelo método de Schneider (2005) modificado                  coeficientes da filtragem: <math>\text{coefh} = 0,10</math> e <math>\text{coefv} = 0,10</math>;</p>	

## 6.6) Considerações Complementares e Artigos Publicados

A metodologia que este trabalho propôs, para detecção e reconhecimento de cordões de solda, foi testada para diversas situações, incluindo todas as técnicas de exposição radiográfica recomendadas no código ASME (2004) para inspeção de juntas soldadas de tubulações. Quanto aos resultados obtidos, foi alcançado um desempenho que variou entre 93,1 e 100%. Tais resultados demonstram a flexibilidade e eficácia da metodologia proposta neste trabalho. Entretanto, há alguns aspectos que ressaltam o ineditismo da proposta apresentada e que, por este motivo, merecem uma consideração especial:

- A linha de pesquisa adotada nesta tese, para se chegar à proposta de um sistema para detecção e reconhecimento de cordões de solda, difere de todas as propostas anteriores e, mesmo assim, é válida para todas as situações consideradas em tais trabalhos (Lawson e Parker, 1994; Schneider *et al.*, 2004a; Liao e Ni, 1996; Li e Liao, 1996; Liao e Tang, 1997; Liao *et al.*, 2000). Isto inclui a detecção de cordões curvos e situações com mais de um cordão de solda por imagem, quer o cordão de solda esteja na direção horizontal ou vertical.
- A aplicabilidade da proposta apresentada nesta tese também é mais abrangente que as demais, pois inclui casos para os quais os métodos anteriores se mostram inadequados. Por exemplo, nos trabalhos (Liao e Ni, 1996; Li e Liao, 1996; Liao e Tang, 1997; Liao *et al.*, 2000) os autores recorrem ao perfil transversal do cordão de solda para diferenciá-lo de outros objetos. Entretanto isto exige que se tenha conhecimento prévio de qual é a direção (horizontal ou vertical) que é transversal ao cordão de solda. Porém, através da metodologia proposta nesta tese, o cordão de solda pode ser detectado em qualquer orientação angular, mesmo sem essa informação. Outra situação que ainda não havia sido considerada em trabalhos anteriores são os casos ilustrados nas tabelas 6.18 e 6.19, onde mais de um cordão de solda aparecem se interceptando, perpendicularmente, na mesma imagem.
- Um outro aspecto particular da metodologia proposta é que o tipo de cordão de solda a ser detectado é especificado pela imagem modelo. Sendo assim, ao substituir ou modificar tal imagem, pode-se adaptar a metodologia proposta para atender outros casos.

Durante o desenvolvimento desta tese também foi possível contribuir com alguns trabalhos científicos, apresentados em congressos e outros publicados periódicos de relevância internacional. A seguir, são comentados diferentes estágios da pesquisa desenvolvida no período de doutoramento que resultaram na publicação de alguns destes trabalhos (a lista completa dos trabalhos publicados é fornecida nas tabelas 6.28 e 6.29):

- Logo no início, a busca por uma solução para a detecção de cordões de solda resultou em uma proposta inédita com aplicação na área de visão computacional. Isto aconteceu porque a concepção inicial da metodologia proposta nesta tese foi primeiro testada para a detecção de objetos 2D em imagens digitais onde estes objetos podiam apresentar variações de escala ( $s$ ), posição ( $x,y$ ) e ângulo ( $\theta$ ). Os resultados obtidos, além de contribuírem para o amadurecimento da proposta, resultaram na publicação do artigo intitulado *Object Detection for Computer Vision Using a Robust Genetic Algorithm*, que foi apresentado no evento *7th European Workshop on Evolutionary Computation in Image Analysis and Signal Processing* (Lausanne, Switzerland, de 30 de março a 1º de abril de 2005) e publicado em *Lecture Notes in Computer Science* (v. 3449, p. 284 – 293, 2005).
- Uma proposta mais elaborada, porém ainda não cobrindo todos os aspectos da proposta desta tese, envolveu utilizar os mesmos princípios da detecção de objetos 2D para detectar cordões de solda lineares em imagens de radiografia computadorizada (RC), onde tais cordões poderiam variar em largura ( $L$ ), comprimento ( $C$ ), posição ( $x,y$ ) e ângulo de orientação ( $\theta$ ). Tais estudos resultaram na edição do artigo intitulado *An Object Detection and Recognition System for Weld Bead Extraction from Digital Radiographs*, publicado no periódico *Computer Vision and Image Understanding* (v. 102, p. 238–249, 2006).
- Uma variação desta proposta ainda foi testada para um outro problema de segmentação de radiografias industriais. Trata-se da segmentação de trechos de tubos que poderiam apresentar corrosão, em imagens radiográficas de tubulações. Os tubos radiografados, semelhante ao caso anterior, também poderiam variar em largura ( $L$ ), comprimento ( $C$ ), posição ( $x,y$ ) e ângulo de orientação ( $\theta$ ). Tais estudos resultaram na edição dos artigos: Automação do

Processo de Identificação de Tubulação em Imagens Radiográficas para Inspeção de Defeitos, publicado na revista *Petro & Química* (Ano XXVIII, n° 275, p. 142-146, agosto de 2005) e *Automatic Pipe Identification and Corrosion Detection*, apresentado na *VI IEEE INDUSCON, 7th IEEE International Conference on Industrial Applications* (Joinville, SC, de 12 a 15 de outubro de 2004).

- Uma proposta mais semelhante ao que foi apresentado nesta tese, já incluindo a detecção de cordões curvos e testes com a metodologia proposta por Schneider (2005) para detecção de defeitos, foi testada para as imagens de radiografia computadorizada (RC), sendo os resultados publicados no artigo intitulado *Weld Bead Recognition and Defect Detection in Pipeline Radiographs*, apresentado no evento *International Pipeline Conference* (Calgary, Alberta, Canada, de 25 a 29 de Setembro de 2006).

Conforme salientado por Silva e Mery (2007b), a necessidade de se melhorar as técnicas para segmentação de imagens radiográficas de soldas tendem a guiar os trabalhos futuros nesta área de pesquisa. Seguindo tal tendência, a proposta apresentada nesta tese, para a detecção de defeitos, incluiu estudar e implementar mudanças em uma técnica já existente, mas que havia apresentado resultados insatisfatórios nos testes realizados. Os resultados apresentados na secção 6.5 permitem verificar que tais mudanças agregaram melhorias à técnica estudada.

Tabela 6.28: Artigos publicados em periódicos de relevância internacional

---

**lista de artigos**

---

CENTENO, T. M., LOPES, H. S., FELISBERTO, M. K., ARRUDA, L. V. R. Object Detection for Computer Vision Using a Robust Genetic Algorithm. *Lecture Notes in Computer Science*, v. 3449, p. 284 – 293, 2005.

FELISBERTO, M. K., CENTENO, T. M., LOPES, H. S., ARRUDA, L. V. R. An object detection and Recognition System for Weld Bead Extraction from Digital Radiographs. *Computer Vision and Image Understanding*, v. 102, p. 238 – 249, 2006.

---

Tabela 6.29: Artigos publicados em anais de congressos nacionais, internacionais e outras publicações

---

**lista de artigos**

---

FELISBERTO, M. K., CENTENO, T. M.; ARRUDA, L. V. R. LOPES, H. S. Automatic Analysis of Radiographic Images for Non Destructive Test Applications. Proceedings of *X SEM, 10th Society For Experimental Mechanics International Congress*, Costa Mesa, CA, USA, 2004.

SCHNEIDER, G. A., FELISBERTO, M. K., CENTENO, T. M., ARRUDA, L. V. R. H. S. Análise Automática de Imagens Radiográficas Aplicada à Inspeção de Juntas Soldadas em Tubulações de Óleo e Gás. Proceedings of *Rio Oil and Gas Conference*, Rio de Janeiro, RJ, de 04 a 07 de outubro de 2004.

FELISBERTO, M. K., SCHNEIDER, G. A., CENTENO, T. M., ARRUDA, L. V. R. H. S. Automatic Pipe Identification and Corrosion Detection. Proceedings of *VI IEEE INDUSCON, 7th IEEE International Conference on Industrial Applications*, Joinville, SC, de 12 a 15 de outubro de 2004

CENTENO, T. M., LOPES, H. S., FELISBERTO, M. K., ARRUDA, L. V. R. Object Detection for Computer Vision Using a Robust Genetic Algorithm. Proceedings of *7th European Workshop on Evolutionary Computation in Image Analysis and Signal Processing*, Lausanne, Switzerland, de 30 de março a 1º de abril de 2005.

FELISBERTO, M. K., CENTENO, T. M., SCHNEIDER, G. A., ARRUDA, L. V. R. Automação do Processo de Identificação de Tubulação em Imagens Radiográficas para Inspeção de Defeitos. *Petro & Química*, Ano XXVIII, nº 275, p. 142-146, agosto de 2005.

FELISBERTO, M. K., SCHNEIDER, G. A., CENTENO, T. M., ARRUDA, L. V. R. H. S. Identificação Automática de Tubulação em Imagens Radiográficas e Detecção de Corrosão. Proceedings of *III Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás Natural*, Salvador, BA, de 02 à 05 de outubro de 2005.

FELISBERTO, M. K., SCHNEIDER, G. A., CENTENO, T. M., ARRUDA, L. V. R. H. S. Uma Abordagem Automática Aplicada à Inspeção Radiográfica Não-Destrutiva de Soldas em Tubulações. Proceedings of *Rio Pipeline- Conference & Exposition*, Rio de Janeiro, RJ, de 17 à 19 de outubro de 2005.

FELISBERTO, M. K., SCHNEIDER, G. A., CENTENO, T. M., ARRUDA, L. V. R. H. S. Automatic Weld Bead Recognition and Defect Detection in Pipeline Radiographs. Proceedings of *International Pipeline Conference*, Calgary, Alberta, Canada, de 25 a 29 de Setembro de 2006.

FELISBERTO, M. K., SCHNEIDER, G. A., CENTENO, T. M., ARRUDA, L. V. R. H. S. Automatic Detection of Pipeline Components in Radiographs for Corrosion Monitoring. Proceedings of *International Pipeline Conference*, Calgary, Alberta, Canada, de 25 a 29 de Setembro de 2006.

---

## 7) CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

O principal objetivo deste trabalho foi desenvolver e/ou aprimorar técnicas para segmentação automática de imagens radiográficas de soldas que contribuem à construção de uma ferramenta automática para a interpretação de radiografia industriais. A proposta desta tese para um sistema automático de detecção e reconhecimento de cordões de solda é inédita e, conforme demonstrado em testes de desempenho, cobre eficazmente uma diversidade de situações, incluindo problemas para os quais ainda não havia sido encontrada uma solução automatizada na literatura. Adicionalmente, a proposta desta tese para detecção de defeitos permitiu agregar melhorias a uma técnica já existente, em todas as situações testadas. Com base em tais resultados, pode-se afirmar que o principal objetivo deste trabalho foi alcançado. Entretanto, faz-se necessária a observação de conclusões resultantes desta pesquisa que, além de realçar a aplicabilidade e o ineditismo das soluções individuais propostas nesta tese, apontam as diretrizes para trabalhos futuros. Tais conclusões são comentadas a seguir.

- O uso dos parâmetros  $(x_0, y_0, sh, sv, sh_{rel}, sv_{rel}, R_{esq}, R_{dir}, \theta)$  para dimensionar uma janela de imagem, de modo a enquadrar um cordão de solda, viabiliza a detecção de cordões de solda que podem apresentar variações (em relação à representação visual de um cordão de solda radiografado) nas seguintes características:
  - comprimento (depende do parâmetro  $sh$ )
  - largura (depende do parâmetro  $sv$ )
  - falta de simetria no perfil transversal (depende do parâmetro  $sh_{rel}$ )
  - falta de simetria em relação a um corte transversal (depende do parâmetro  $sv_{rel}$ )
  - curvatura em trechos diferentes (depende dos parâmetros  $sv_{rel}, R_{esq}$  e  $R_{dir}$ )
  - posicionamento no plano da imagem (depende dos parâmetros  $x_0$  e  $y_0$ )
  - rotação no plano da imagem (depende do parâmetro  $\theta$ )
- As faixas de valores possíveis para os parâmetros  $x_0, y_0, sh, sv, sh_{rel}, sv_{rel}, R_{esq}, R_{dir},$

$\theta$ , foram inicialmente definidas de forma a cobrir todas as situações possíveis. Entretanto, os testes da secção 6.3.6 indicam que é recomendável trabalhar separadamente com grupos de imagens com faixas mais restritas de largura para o cordão de solda.

- Para gerar a matriz ( $Mref_k$ ) que representa o conteúdo de uma janela de imagem, não se recorreu a valores de pontos isolados (pontos de referência), mas a funções ( $f_{med}$  e  $f_{máx}$ ) orientadas a vizinhança de tais pontos. Tal estratégia viabilizou a detecção de cordões de solda, mesmo para os seguintes casos:
  - cordões com muitos defeitos
  - cordões em imagens com ruído
  
- Após gerar a matriz ( $Mref_k$ ) que representa o conteúdo de uma janela de imagem, se recorreu a uma normalização, coluna a coluna, dos valores da matriz gerada. Tal estratégia viabilizou a detecção de cordões de solda, mesmo no seguinte caso:
  - cordões que apresentam variações de contraste a longo de sua extensão
  
- Ao apresentar uma solução baseada na detecção e verificação (reconhecimento) das detecções, conforme detalhado para o sistema proposto nesta tese, foi possível abranger a detecção automática de cordões também nos seguintes casos:
  - quantidade variada e desconhecida de cordões de solda na imagem
  - imagens com cordões de solda que se interceptam
  
- Ao cobrir todas as situações de detecção aqui mencionadas, a proposta desta tese para detecção e reconhecimento de cordões de soldas mostrou ser apropriada para todas as técnicas de exposição radiográfica recomendadas no código ASME (2004) para inspeção de juntas soldadas de tubulações (secção 2.3.3).
  
- Quanto à metodologia proposta nesta tese para segmentação de defeitos, esta



mostrou ser apropriada à detecção dos principais tipos de defeitos de soldagem (testados através de padrões radiográficos de defeitos provenientes do *International Institute of Welding – IIW*):

- trincas
  - falta de fusão
  - falta de penetração
  - mordedura
  - inclusões de escória
  - porosidades
- A metodologia proposta para segmentação destes defeitos baseia-se em modificações agregadas ao o método inicialmente proposto por Schneider (2005). Tais modificações são:
    - eliminaram-se as operações de adição da imagem filtrada com a imagem resultante da detecção de bordas pelo filtro *Sobel*.
    - recorreu-se às operações com o filtro da mediana e equalização do histograma, para a imagem filtrada, antes da etapa de limiarização.
  - Os procedimentos adotados para ajustar os parâmetros do algoritmo genético (testes da secção 6.2) se mostraram eficazes, pois os resultados dos testes para avaliação da metodologia proposta não apresentou nenhum caso de não-deteção que tenha sido causado pela convergência para uma região de máximo local. Ao limitar o número de soluções geradas e avaliadas durante a busca ( $5 \times 10^4$ ), o tempo de funcionamento do AG ficou em torno de 50 segundos por imagem (para um processador AMD Athlon™ XP 2GHz) e os melhores parâmetros encontrados para os operadores genéticos foram:
    - tamanho da população inicial: 1000 indivíduos
    - número de gerações: 50
    - método de seleção: torneio (Wall, 2003)
    - elitismo: sim

- probabilidade de cruzamento: 0,98
  - probabilidade de mutação: 0,01
- O desenvolvimento de uma nova metodologia para a detecção e reconhecimento de cordões de solda também exigiu propor soluções inéditas para dois problemas:
  - codificação de imagens para representação de padrões:
    - Foi desenvolvido um novo método de codificação (matriz de referência) com base na extração de informações sobre o nível de cinza da vizinhança de pontos sistematicamente espalhados pela imagem. Guiados pela distribuição de linhas e colunas, segundo a curva do perfil médio (horizontal ou vertical) da imagem, tais pontos são definidos de modo a se concentrarem com mais frequência em áreas com variações mais significativas de níveis de cinza. O emprego de tal técnica de codificação de imagens se mostrou eficaz para representar o modelo de cordão de solda utilizado nesta tese e permitiu reduzir o volume de dados a ser manipulado pelo sistema proposto.
  - avaliação de similaridades entre o conteúdo de imagens:
    - Apresentou-se uma solução baseada em conceitos de similaridade oriundos de técnicas de casamento de protótipos. Entretanto, ao invés de avaliar a similaridade entre imagens *pixel a pixel*, propôs-se uma função (função de adequabilidade) que avalia a similaridade entre imagens pela comparação do código (matriz de referência) gerado para elas.
- A verificação do valor da função de adequabilidade para um banco de dados de 646 amostras (323 detecções corretas e 323 não-detecções) possibilitou estabelecer o limiar  $T=0,82$  (para o valor da função de adequabilidade), para distinguir se o resultado encontrado na busca por um cordão de solda poderia ser classificado como solda ou rejeitado como falso alarme.

- Os resultados obtidos nesta tese confirmam que é possível utilizar as metodologias aqui propostas na construção de um *software* com a finalidade de dar suporte à visualização e interpretação de imagens radiográficas de soldas.

A continuidade dos estudos voltados à área de pesquisa desta tese visa não só agregar melhorias à metodologia apresentada, mas também contribuir para a construção de *softwares* de análise de imagens eficazes, com a finalidade de melhorar a qualidade do ensaio radiográfico de soldas. Neste contexto, algumas perspectivas de trabalhos futuros são mencionadas a seguir.

- O fato de haver situações para as quais o reconhecimento de cordões de solda não atingiu 100% sugere que esta proposta ainda pode ser melhorada. Por exemplo, a solução utilizada para classificar a saída do algoritmo genético é por um filtro linear, que depende apenas de uma característica (valor da função de adequabilidade) e de um limiar ( $T=0,82$ ). Desta maneira, uma das sugestões para trabalhos futuros consiste no estudo de outras características, bem como técnicas de classificação não-lineares, para aprimorar o desempenho do classificador do sistema proposto.
- Os testes realizados para detecção de defeitos permitiram fazer uma avaliação qualitativa dos resultados. Entretanto, alguns autores, como Nacceredine *et al.* (2006a), já propuseram metodologias para avaliar a detecção de defeitos quantitativamente. Sendo assim, outra proposta de trabalho futuro consiste em recorrer a tais recursos para avaliar melhor o desempenho do método de detecção de defeitos testado. Tais estudos não só viabilizarão a comparação com outras técnicas, mas também podem apontar diretrizes para se agregar melhorias ao método proposto.
- A proposta desta tese para detecção do cordão de solda pode viabilizar a extração automática de características que podem ser utilizadas para classificação de defeitos. Por exemplo, no trabalho proposto por Pádua (2004), os defeitos existentes no cordão de solda são classificados com base na análise do perfil transversal do cordão. Desta maneira, uma outra proposta de trabalho

futuro consiste em adaptar a metodologia desta tese para extrair tais perfis automaticamente.

- Naturalmente, a continuidade dos estudos apresentados nesta tese também deverá incluir a caracterização e classificação de defeitos de soldagem.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABENDE (Associação Brasileira de Ensaio Não-Destrutivos). Ensaio Não-Destrutivos. 2007. Disponível em: [http://www.abende.org.br/info\\_end\\_oquesao.php](http://www.abende.org.br/info_end_oquesao.php). Acessado em 01/06/07.

AOKI, K., SUGA, Y., YOSHIDA, Y., SUEMORI, R. Detection of Weld Defect Image by Genetic Algorithm. Nippon Kikai Gakkai Kansai Shibu Teiji Sokai Koenkai Koen Ronbunshu, v. 74, n.10, pp. 10.9-10.10, 1999.

AOKI, K., SUGA, Y. Application of Artificial Neural Network to Discrimination of Defect Type in Automatic Radiographic Testing of Weld. ISIJ International, v. 39, n.10, pp. 1081-1087, 1999.

AOKI, K., SUGA, Y. Detecting Shape of Weld Defect Image in X-Ray Film by Image Processing Applied Genetic Algorithm. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers C, v. 66, n. 644, pp. 1380-1387, 2000.

ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section V, Subsection A, Article 2, Nonmandatory Appendices, Appendix A: Recommended Radiographic Technique Sketches for Pipe or Tube Welds, pp. 34-37, The American Society of Mechanical Engineers (ASME), New York, 2004.

ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1, Subsection B, Part UW, Inspection and Tests UW-51: Radiographic and Radioscopic Examination of Welded Joints, pp. 152-153, The American Society of Mechanical Engineers (ASME), New York, 2001a.

ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1, Mandatory Appendices, Appendix 4: Rounded Indications Charts Acceptance Standard for Radiographically Determined Rounded Indications in Welds, pp. 353-359, The American Society of Mechanical Engineers (ASME), New York, 2001b.

ASNT (American Society for Nondestructive Testing). Introduction to Nondestructive Testing. 2007. Disponível em: [www.asnt.org/ndt/primer1.htm](http://www.asnt.org/ndt/primer1.htm). Acessado em 01/06/07.

AWS (American Welding Society). Welding Handbook - Weld Science & Technology, v.2, 9ª ed., Miami: AWS, 2001.

BHANU, B., LEE, S. DAS, S. Adaptive Image Segmentation Using Genetic and Hybrid Search Method. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, v.31, n.4, pp. 1268-1290, 1995a.

BHANU, B., LEE, S. MING, J. Adaptive Image Segmentation Using Genetic Algorithm. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - part C: Applications and Reviews, v.25, n.12, pp. 1543-1567, 1995b.

BHANU, B., PENG, J. Adaptive Integrated Image Segmentation and Object Recognition. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, v.30, n.4, pp.427-441, 2000.

BOCCHI, L., BALLERINI, L., HÄSSLER, S. A New Evolutionary Algorithm for Image Segmentation. Lecture Notes in Computer Science, v. 3449, p. 264–273, 2005.

BRANDI, S. D. Metalurgia da Soldagem: Descontinuidades. Coleção Tecnológica SENAI - Soldagem, São Paulo: SENAI, 1997.

BRAY, D. E., STANLEY, R. K. Nondestructive Evaluation - A Tool in Design, Manufacturing and Service. Boca Raton: CRC Press, 1997.

CARTZ, L. Nondestructive Testing. 2ª ed. Materials Park: ASM International, 1996.

COSTA, M. S., SHAPIRO, L. G. 3D Object Recognition and Pose with Relational Indexing, Computer Vision and Image Understanding, v. 79, n. 3, p.364-407, 2000.

DUDA, R.O., HART, P.E., STORK, D.G. Pattern Classification. 2ª ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.

FABRO, J. Uma Abordagem Neuro-Nebulosa para Controle Preditivo de Processos Multi-Estágios. Tese de Doutorado, CPGEI-UTFPR, Curitiba, 2004.

FITZPATRICK, J. M., GREFENSTETTE, J. J., VAN-GUCHT, D. Image Registration by Genetic Search. Proceedings of IEEE SoutheastCon-1984. Louisville: pp.460-464, 1984.

FÜCSÖK, F., MÜLLER, C., SCHARMACH, C. Human Factors: The NDE Reliability of Routine Radiographic Film Evaluation. Proceedings of WCNDT-2000, 15<sup>th</sup> World Conference on Nondestructive Testing. Roma: idn 740, 2000.

FÜCSÖK, F., MÜLLER, C., SCHARMACH, C. Reliability of Routine Radiographic Film Evaluation – An Extended ROC Study of the Human Factor. Proceedings of ECNDT-2002, 8<sup>th</sup> European Conference on Nondestructive Testing. Roma: idn 429, 2002.

GOLDBERG, D. E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Reading: Addison-Wesley, 1989.

GONZALEZ, R.C., WOODS, R. E. Digital Image Processing. 3<sup>a</sup> ed. Reading: Addison-Wesley, 2007.

HALMSHAW, R. Non-destructive Testing. 2<sup>a</sup> ed. New York: Edward Arnold, 1991.

HAND, D.J. Construction and Assessment of Classification Rules. New York: John Wiley, 1997.

HARALICK, R., SHANMUGAM, K. DINSTEN, I. Textural Features for Image Classification. IEEE Transaction on Systems, Man, Cybernetics, v.3, n.6, pp.610-621, 1973.

HERNÁNDEZ, S., SÁEZ, D., MERY, D., SILVA, R. R., SIQUEIRA, M. Automated Defect Detection in Aluminium Castings And Welds Using Neuro-Fuzzy Classifiers. Proceedings of WCNDT-2004, 16<sup>th</sup> World Conference on Nondestructive Testing. Montreal: ind 586, 2004.

HOLLAND, J. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbour: The University of Michigan Press, 1975.

JAGANNATHAN, H., BHASKAR, N., SRIRAMAN, C. N., VIJAY, N. A. A Step Towards Automatic Defect Pattern Analysis and Evaluation in Industrial Radiography using Digital Image Processing. Proceedings of WCNDT-2000, 15<sup>th</sup> World Conference on Nondestructive Testing. Roma: idn 673, 2000.

JAIN, A. K. Fundamentals of Digital Image Processing. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1989.

JAIN, R., KASTURI, R., SCHUNCK, B. G. Machine Vision. New York: McGraw-Hill and MIT Press, 1995.

JOSÉ, J. C. V., MILANI H. S. B., PAES E. A. O., HEIN, J. H. O., SERRA, F. A. S., RABELO, J. M. B. Inspeção de Juntas Soldadas Através de Radiografia Computadorizada como Ferramenta de Avaliação de Engenharia. Proceedings of PANNDT-2003, 3<sup>rd</sup> Pan-American Conference for Nondestructive Testing. Rio de Janeiro: PANNDT-098, 2003a.

JOSÉ, J. C. V., MILANI H. S. B., PAES E. A. O., BOITA, M., SERRA, F. A. S., SOUZA, L, SERRA, F. A. S. Vantagens Obtidas em Radioproteção quando do Uso do Ensaio de Radiografia Computadorizada – RC (Digital) em Plantas de Processo. Proceedings of PANNDT-2003, 3<sup>rd</sup> Pan-American Conference for Nondestructive Testing. Rio de Janeiro: PANNDT-100, 2003b.

JOSÉ, J. C. V., MILANI H. S. B., MOURA JR., M. G, ARAÚJO, M. F. Vantagens da Radiografia Computadorizada em Comparação com Outras Ferramentas de Inspeção de Tubulações de Pequeno Diâmetro. Proceedings of COTEQ-2003, 7<sup>a</sup> Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos. Florianópolis: COTEQ 287-03, 2003c.

JOSÉ, J. C. V., MILANI H. S. B., Radiografia Computadorizada Para Avaliação de Mecanismos de Deterioração e Medição de Espessura Remanescente em Tubulações de Processo. Proceedings of PANNDT-2003, 3<sup>rd</sup> Pan-American Conference for Nondestructive Testing. Rio de Janeiro: PANNDT-097, 2003.

KAPUR, J. N., SAHOO, P. K., WONG, A. K. C. A New Method for Gray-Level Picture Thresholding Using the Entropy of the Histogram. Computer Vision, Graphics and Image Processing, v.29, pp. 273-285, 1985.

KAZANTSEV, D., SALOV, G, PYATKIN, V. Statistical Detection of Defects in Radiographic Images of Welds. Proceedings of WCNDT-2004, 16<sup>th</sup> World Conference on Nondestructive Testing. Montreal: ind 251, 2004.



KEHOE, A. The Detection and Evaluation of Defects in Industrial Images. Tese de doutorado, University of Surrey, 1990.

KHOO K. G., SUGANTHAN P. N. Evaluation of genetic operators and solution representations for shape recognition by genetic algorithms. *Pattern Recognition Letters*, v.23, n.13, pp.1589–1597, 2002.

KITTLER, J., ILLINGWORTH, J. Minimum Error Thresholding. *Pattern Recognition*, v.19, n.1, pp.41-47, 1986.

KUMAR, A., PANG, G. K. H. Defect Detection in Textured Materials Using Gabor Filters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v.38, n.2, pp. 425-440, 2002.

LASHKIA, V. Defect Detection in X-ray Images Using Fuzzy Reasoning. *Image and Vision Computing*, v. 19, n. 5, p.261-269, 2001.

LAWSON, S. E., PARKER, G. A. Intelligent Segmentation of Industrial Radiographic Images Using Neural Networks. *SPIE – Machine Vision Applications, Architectures and Systems Integration III*, v. 2347, pp. 245-255, 1994.

LI, D, LIAO, T. W. Applications of Fuzzy K-NN in Weld Recognition and PCBN Tool Failure Monitoring. *Proceedings of 28<sup>th</sup> IEEE Southeastern Symposium on System Theory*. Baton Rouge: pp. 222-226, 1996.

LIAO, T. W., LI, J. An Automated Radiographic NDT System for Weld Inspection: Part I – Weld Extraction. *NDT&E International*, v. 29, n.3, pp.157-162, 1996.

LIAO, T. W., LI, J. An Automated Radiographic NDT System for Weld Inspection: Part II – Flaw Detection. *NDT&E International*, v.31, n.3, pp.183-192, 1998.

LIAO, T. W., TANG, K. Automated Extraction of Welds from Digitized Radiographic Images Based on MLP Neural Networks. *Applied Artificial Intelligence*, v.11, n.13, pp. 197-218, 1997.

LIAO, T. W., LI, D., LI, Y. Detection of Welding Flaws from Radiographic Images with Fuzzy Clustering Methods. *Fuzzy Sets and Systems*, v.108, n.2, pp. 145-158, 1999.

LIAO, T. W., LI, D., LI, Y. Extraction of Welds from Radiographic Images Using Fuzzy Classifiers. *Information Sciences*, v.126, n.1-4, pp. 21-40, 2000.

LIAO, T. W. TRIANTAPHYLLOU, E., CHANG, P. C. Detection of Welding Flaw With MLP Neural Network and Case Based Reasoning. *Intelligent Automation and Soft Computing*, v.9, n.4, pp. 259-267, 2003.

MARQUES, P. V. *Tecnologia da Soldagem*. Belo Horizonte: O Lutador, 1991.

MARTINS, F. C. M. *Aplicações de Redes Neurais em Processamento de Imagens - Detecção de Bordas Através de Cooperação e Competição*. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

MERY, D., BERTI, M. A. Automated Inspection of Moving Aluminium Castings. *Proceedings of ECNDT-2002, 8<sup>th</sup> European Conference on Nondestructive Testing*. Barcelona: idn 234, 2002a.

MERY, D., BERTI, M. A. Classification of Potential Defects in Automated Inspection of Aluminium Castings Using Statistical Pattern Recognition. *Proceedings of ECNDT-2002, 8<sup>th</sup> European Conference on Nondestructive Testing*. Barcelona: idn 232, 2002b.

MERY, D., BERTI, M. A. Automatic Detection of Welding Defects Using Texture Features. *Insight*, v.45, n.10, 2003.

MICHALEWICZ, Z. *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*. 3<sup>rd</sup> ed (extended). New York: Springer-Verlag, 1996.

MORRO, F. A. *Computed Radiography: The Future of Radiographic Inspection*. *Proceedings of WCNDT-2000, 15<sup>th</sup> World Conference on Nondestructive Testing*. Roma: idn 056, 2000.

NACEREDDINE, N., REDOUANE, D, BENCHAALA A. Weld Defect Extraction and Classification in Radiographic Testing Based Artificial Neural Networks. *Proceedings of WCNDT-2000, 15<sup>th</sup> World Conference on Nondestructive Testing*. Roma: idn 575, 2000.

NACEREDDINE, N., HAMAMI, L., TRIDI, M, OUCIEF, N. Non-Parametric Histogram-Based Thresholding Methods for Weld Defect Detection in Radiography.

IEEE Transactions on Engineering, Computing and Technology, v.9, n.11, pp. 213-217, 2005a.

NACEREDDINE, N., ZELMAT, M., BELAÏFA, S. S, TRIDI, M. Weld Defect Detection in Industrial Radiography Based Digital Image Processing. IEEE Transactions on Engineering, Computing and Technology, v.2, n.12, pp. 145-148, 2004a.

NACEREDDINE, N., TRIDI, M., BELAÏFA, S. S, ZELMAT, M. Quantitative Analysis of Weld Defect Images in Industrial Radiography Based Invariant Attributes. IEEE Transactions on Engineering, Computing and Technology, v.2, n.12, pp. 313-316, 2004b.

NACEREDDINE, N, TRIDI, M. Computer-Aided Shape Analysis and Classification of Weld Defects in Industrial Radiography Based Invariant Attributes and Neural Networks. Proceedings of ISPA-2005, IEEE 4<sup>th</sup> International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis. Zagreb: 2005b.

NACEREDDINE, N., HAMAMI, L, ZIOU, D. Image Thresholding for Weld Defect Extraction in Industrial Radiographic Testing. International Journal of Signal Processing, v.3, n.4, pp. 257-265, 2006a.

NACEREDDINE, N., TRIDI, M., HAMAMI, L, ZIOU, D. Statistical Tools for Weld Defect Evaluation in Radiographic Testing. Proceedings of ECNDT-2006, 9<sup>th</sup> European Conference on Nondestructive Testing. Berlin: Mo 2.4.4, 2006b.

NDT - RESOURCE CENTER. Radiograph Interpretation – Welds. 2007. Disponível em: <http://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/TechCalibrations/RadiographInterp.htm>. Acessado em 01/06/2007.

OTSU, N. A. Threshold Selection Method from Gray-Level Histogram. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, v.9, n.1, pp. 62-66, 1979.

PADUA, G. X. Detecção e Classificação de Defeitos de Soldagem em Radiografias Utilizando Perfil Transversal ao Cordão de Solda. Tese de Doutorado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

PAL, N. R., PAL, S. K. A Review on Image Segmentation Techniques. Pattern Recognition, v.26, n.9, pp. 1277-1294, 1993.

PERNER, P., ZSCHERPEL, U., JACOBSEN, C. A Comparison Between Neural Networks and Decision Trees Based on Data From Industrial Radiographic Testing. Pattern Recognition Letters, v.22, n.1, 47-54, 2001.

RAJAGOPALAN, C., VENKATRAMAN, B., JAYAKUMAR, T., KALYANASUNDARAM P., RAJ, B. A Novel Tool for Automated Evaluation of Radiographic Weld Images. Proceedings of WCNDT-2004, 16<sup>th</sup> World Conference on Nondestructive Testing. Montreal: idn 736, 2004.

REDOUANE, D., YACINE, K., AMAL, A., FARID, A., AMAR, B. Evaluation of Corroded Pipelines Wall Thickness Using Image Processing in Industrial Radiography. Proceedings of WCNDT-2000, 15<sup>th</sup> World Conference on Nondestructive Testing. Roma: idn 588, 2000.

ROSENFELD, A. From Image Analysis to Computer Vision: An Annotated Bibliography, 1955-1979. Computer Vision and Image Understanding, v.84, n.1, p.298-324, 2001.

SCHNEIDER, G. A., FELISBERTO, M. K., ARRUDA, L. V. R., CENTENO, T. M. Segmentação de Cordões de Solda por meio do Perfil em Imagens Radiográficas. Proceedings of CBA-2004, 15<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Automação. Gramado: n.731, 2004a.

SCHNEIDER, G. A., FELISBERTO, M. K., PILKEL, L. V., CENTENO, T. M., ARRUDA L. V. R. Análise Automática de Imagens Radiográficas Aplicadas à Inspeção de Juntas Soldadas em Tubulações de Óleo e Gás. 12<sup>th</sup> Rio Oil & Gas Expo and Conference. Rio de Janeiro: 2004b.

SCHNEIDER, G. A. Segmentação e Extração das Características de Defeitos em Imagens Radiográficas de Juntas Soldadas e Tubulações. Dissertação de Mestrado, CPGEI-UTFPR, Curitiba, 2005.

SEZGIN, M., SANKUR, B. Image Multi-Thresholding Based on Sample Moment Function. Proceedings of ICIP-2003, IEEE 10<sup>th</sup> International Conference on Image Processing. Barcelona: 2003.

SHAFEEK, H. I., GADELMAWLA, E. S., ABDEL-SHAFY, A. A., ELEWA, I. M. Assessment of Welding Defects for Gas Pipeline Radiographs. NDT&E International, vol.37, n.4, pp. 291-299, 2004a.

SHAFEEK, H. I., GADELMAWLA, E. S., ABDEL-SHAFY, A. A., ELEWA, I. M. Automatic Inspection of Gas Pipeline Welding Defects Using an Expert System. NDT&E International, v.37, n.4, pp. 301-307, 2004b.

SILVA, L., BELLON, O. R. P., BOYER, K. L. Robust Range Image Registration Using Genetic Algorithms and The Surface Interpenetration Measure – Series in: Machine Perception Artificial Intelligence, v.60. World Scientific, Singapore, 2005.

SILVA, R. R. Processamento de Imagens Radiográficas e Análise de Defeitos em Cordões de Solda. Dissertação de Mestrado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 1999.

SILVA, R. R., SIQUEIRA, M. H. S., CALOBA, L. P., REBELLO, J. M. A. Radiographic Pattern Recognition of Welding Defects Using Linear Classifiers. Insight, v.43, n.10, pp. 635-637, 2001.

SILVA, R. R., SIQUEIRA, M. H. S., SILVA, I. C., CARVALHO, A. A., REBELLO, J.M.A. Contribution to the Development of a Radiographic Inspection Automated System. Proceedings of ECNDT-2002, 8<sup>th</sup> European Conference on Nondestructive Testing. Barcelona: idn 274, 2002a.

SILVA, R. R., CALOBA, L. P., SIQUEIRA, M. H. S., SAGRILO, L. V. S., REBELLO, J. M. A. Evaluation of the Relevant Characteristic Parameters of Welding Defects and Probability of Correct Classification Using Linear Classifiers. Insight, v.44, n.10, pp. 616-622, 2002b.

SILVA, R. R. Reconhecimento de Padrões de Defeitos de Soldagem em Radiografias Industriais. Tese de Doutorado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

SILVA R. R., SIQUEIRA M. H. S., SOUZA M. P. V., REBELLO J. M. A., CALOBA L. P. Pattern Recognition of Weld Defects Detected by Radiographic Test. NDT & E International, v.37, n.6, pp. 461-470, 2004a.

SILVA, R. R., SIQUEIRA, M. H. S., SOUZA, M. P. V., REBELLO, J. M. A., CALOBA, L. P. Estimated Accuracy of Classification of Defects Detected in Welded Joints by Radiographic Tests. NDT & E International, v.38, n.5, pp. 335-343, 2004b.

SILVA, R. R., MERY, D. State-of-the-Art of Weld Seam Inspection by Radiographic Testing: Part I – Image Processing. Materials Evaluation, v.65, n.6, pp. 643-647, 2007a.

SILVA, R. R., MERY, D. State-of-the-Art of Weld Seam Inspection by Radiographic Testing: Part II – Pattern Recognition. Materials Evaluation, v.65, n.8, pp. 833-839, 2007b.

SIMUNIC K. S., LONCARIC S. A Genetic Search-Based Partial Image Matching. Proceedings of ICIPS-1998, IEEE 2<sup>nd</sup> International Conference on Intelligent Processing Systems. Gold Coast: pp. 119-122, 1998.

STRANG, G. Wavelets and Dilation Equations: A Brief Introduction. Sam Review, v.31, pp. 613-627, 1989.

TANOMARU, J. Motivação, Fundamentos e Aplicações de Algoritmos Genéticos. Proceedings of CBRN-1995, II Congresso Brasileiro de Redes Neurais, v.1, n.3, pp.331-411, Curitiba, 1995.

TELLES, P. C. S. Tubulações Industriais - Materiais, Projeto e Montagem. 10<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

TSANG P. W. M. A Genetic Algorithm for Affine Invariant Recognition of Object Shapes from Broken Boundaries. Pattern Recognition Letters, v.18, n.7, pp. 631-639, 1997.

WAINER, E., BRANDI, S. D., MELLO, F. D. H. Soldagem - Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgard Blücher, 1992.

WALL, M. GALib – A C++ Library Of Genetic Algorithm Components, Versão 2.4.7, 2003. Disponível em: <http://lancet.mit.edu/ga/>. Acessado em 01/06/07.

WANG, G., LIAO, T. W. Automatic Identification of Different Types of Welding Defects in Radiographic Images. NDT&E International, v.35, n.8, pp. 519-528, 2002.

WHITLEY, D. A Genetic Algorithm Tutorial. Statistics and Computing, v.4, n.2, p.65-85, 1994.

Y. ONEL., U. EWERT AND P. WILLEMS. "Radiographic Wall Thickness Measurement of Pipes by a New Tomographic Algorithm," Proceedings of WCNDT-2000, 15<sup>th</sup> World Conference on Nondestructive Testing. Roma: idn 369, 2000.

ZSCHERPEL U. Film Digitisation Systems for DIR: Standards, Requirements, Archiving and Printing. NDT.net, v.5, n.5, 2000.

