



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA

**Avaliação da Integridade da União de
Chapas Navais por Soldagem com Alto Grau
de Distorção utilizando Radiografia Digital**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL
DE PERNAMBUCO PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Edwin Althor Jürgen Nieling Lundgren

RECIFE, 09 DE ABRIL DE 2010



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA

Avaliação da Integridade da União de Chapas Navais por Soldagem com Alto Grau de Distorção utilizando Radiografia Digital

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL
DE PERNAMBUCO PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Autor: Edwin Althor Jürgen Nieling Lundgren
Orientador: Prof. Armando Hideki Shinohara

RECIFE, 09 DE ABRIL DE 2010

L962a Lundgren, Edwin Althor Jurgen Nieling.

Avaliação da integridade da união de chapas navais por soldagem com alto grau de distorção utilizando radiografia digital / Edwin Althor Jurgen N. Lundgren. - Recife: O Autor, 2010.

xxi, 105 folhas., il., gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2010.

Orientador: Prof. Armando Hideki Shinohara.

Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Soldagem – Chapas Navais. 3. Radiografia Digital. 4. Construção Naval. I. Título.

621 CDD (22. Ed.)

**UFPE
BCTG/2010-099**

“AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DA UNIÃO DE CHIAPAS NAVAIS POR
SOLDAGEM COM ALTO GRAU DE DISTORÇÕES UTILIZANDO RADIOGRAFIA
DIGITAL”.

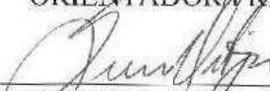
EDWIN ALTHOR JURGEN NIFLING LUNDGREN

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE



Prof. Dr. ARMANDO HIDEKI SHINOHARA
ORIENTADOR/PRESIDENTE

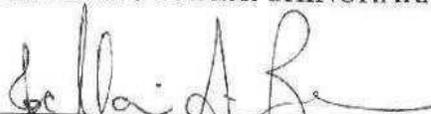


Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO
COORDENADOR DO CURSO

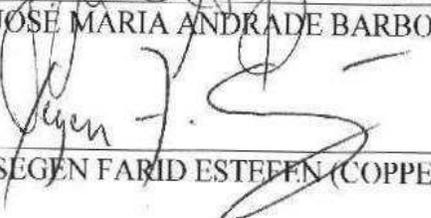
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. ARMANDO HIDEKI SHINOHARA (UFPE)



Prof. Dr. JOSÉ MARIA ANDRADE BARBOSA (UFPE)



Prof. Dr. SEGEN FARID ESTEFFEN (COPPE/UFRJ)

“... e nunca ficará pronta nossa edição convincente...”
Carlos Drummond de Andrade

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Armando Hideki Shinohara, meu professor orientador de mestrado. Durante todo o processo deste trabalho ele me aconselhou com alta competência acadêmica. A ajuda dele foi decisiva para que este trabalho.

Agradeço à Professora Ana Rosa Mendes Primo. Ela coordenou o curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Área Naval e Oceânica e mostrou um apoio extraordinário a todos alunos desta área. Ele me orientou em assuntos administrativos e estabeleceu as condições necessárias para o funcionamento do curso de especialização em Engenharia Naval e Oceânica.

Agradeço Professor Severino Leopoldino Urtiga Filho, Coordenador atual do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Área Naval e Oceânica pelas aulas sobre biocorrosão e pelas orientações administrativas.

Agradeço todo corpo discente do curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco pelo conhecimento transmitido em aulas.

Agradeço ao Professor de Hidrodinâmica teórica, Kamal Abdel Radi Ismail, da Universidade de Campinas.

Agradeço à Eliane Alves da Silva , a “boa alma” no secretariado do departamento de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica, que facilitou inúmeras questões burocráticas e ajudou com muitas dicas e conselhos.

Agradeço à Paternak de Souza Barros . Como colegas em diversos cursos estudamos juntos de forma muito efetiva.

Agradeço à Flávia Roberta de Souza Brasileiro. Ela participou na obtenção dos dados e das radiografias.

Agradeço ao João Silva Acioli. Ele participou de forma decisiva na obtenção dos dados.

Agradeço ao Pietro Paolo Jorge Corrêa Greco Pailleule de Oliveira Silva, Luís Carlos da Silva, Cidrack Guilherme Silveira, Afonso Gabriel dos Anjos Junior e todo time do laboratório “de materiais”.

Agradeço ao meu irmão Ervel Edmond Celsius Nieling Lundgren e à família dele.

Agradeço à minha irmã Cristina Lundgren.

Agradeço pelas longas amizade com Fuad Carlos Zazar Junior, Roberto Miranda , Célia Meira, Dayse Lys Caracciolo Maya, Sergio Benicio, Flávio Falcão, Frederico Freitas, , ,

Agradeço pelas muitas novas amizades.

Agradeço todas boas almas, que me ajudaram aqui e ali, em diversas situações desesperadas.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao Povo Brasileiro.

Depois de passar vinte e tres anos no exterior fui recebido com um carinho especial e único. O Brasileiro é uma pessoa erforçada em mudar as coisas para melhor, e Brasileiras e Brasileiros com esta postura se concentram nas nossas amizades, em nossas familias e em empresas e instituições, especialmente no Centro de Tecnologia e Geociencias da Universidade Federal de Pernambucoe e no departamento de Pós-Graduação da Engenharia Mecânica.

É um grande privilégio ter recebido uma bolsa de mestrado da Capes e uma grande honra para mim de eu poder fazer uma contribuição para melhorar o Brasil com a publicação desta monografia.

A publicação está longe de estar perfeita: muita perguntas ficaram em aberto, e outras opções tecnológicas continuarão sendo pesquisados, no próprio departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco.

O estabelecimento e o crescimento do novo curso de pós-graduação em Engenharia Mecânica com concentração em Engenharia Naval e Oceânica na Universidade Federal de Pernambuco é uma tarefa complexa e a aquisição de conhecimentos especias sobre a Engenharia Naval é um processo extenso.

Dedico este trabalho tambem ao otimismo.

Sem o otimismo ninguem não teria alcançado nada.

RESUMO

Na Construção Naval o campo de soldagem ocupa um lugar de elevada importância pela quantidade de serviços de soldagem elaborados em todo tipo de embarcação de aço. Uma eterna problemática inerente à solda é o fenômeno de distorções oriundas das soldas, efeito indesejável e que causa elevados custos para corrigi-los.

A resistência de grandes estruturas como plataformas marítimas e navios depende fundamentalmente de soldas bem elaboradas e por isso há grande necessidade de controlar a qualidade de soldas em Chapas Navais. Este controle é feito por vários tipos de Ensaio Destrutivos e, principalmente, Ensaio Não Destrutivos. Dentre os Ensaio Não Destrutivos se destaca a tecnologia de Radiografia.

Desde a descoberta dos raios-X as doses respectivamente os tempos de exposição vem sendo diminuídos gradativamente, sendo que houve um grande progresso com a introdução da Radiografia Digital utilizando os Imaging Plates. A tecnologia utilizada até os meados dos anos 90 não conseguia proporcionar uma qualidade equivalente à radiografia tradicional utilizando filmes susceptíveis à raio-X. Porém hoje em dia a qualidade de radiografias feitas com Imaging Plates têm qualidade equivalentes ou superior daquelas feitas com filmes convencionais. Iniciou-se o desenvolvimento de mais outra tecnologia, de ultra-alta resolução, denominada Digital Detector Array (DDA), que proporciona definitivamente qualidade de imagem superior às imagens concebidas por filmes de radiografia tradicional.

O trabalho agora apresentado mostra uma comparação entre os métodos de obtenção de radiografias industriais, Radiografia tradicional com filmes e Imaging Plate (Radiografia Digital). Para isto foram radiografadas chapas soldadas de aço utilizado na indústria naval. De forma geral o processo de soldagem industrial pode gerar diversos tipos de tensões residuais no material soldado, sendo que em alguns casos extremos torna-se necessário algum tratamento térmico tanto antes como após a soldagem.

Os parâmetros que definem se há necessidade ou não de tratamentos térmicos são altamente complexos incluindo a energia utilizada na soldagem, processos, liga do material base (neste caso as chapas), material de adição, qualificação do e experiência do operário de soldagem.

O objetivo é buscar novas técnicas de obtenção de imagens de radiografia industrial digital, e o processamento dessas imagens utilizando softwares como o MATLAB e o ISee!, com o pacote de ferramentas do IPT (Image Processing Toolbox), e o MEM (Maximum Entropy Method), um método de tratamento disponível em softwares comerciais. Para obtenção das imagens, foram usados filmes IP (Imaging Plate) e um scanner laser. A fonte de raios-X usada foi do tipo portátil de 120kV. Através da imagem radiográfica pode-se observar com maior nitidez o defeito na região de solda. Alguns tipos de defeitos podem provocar a formação e propagação de trincas e o consecutivo colapso da estrutura naval.

Após comprovação dos métodos passou-se a análise de radiografias digitais do cordão de solda de uma chapa naval a qual foi radiografada com diversos parâmetros, e, por conseguinte aplicaram-se os métodos de manipulação de radiografias fornecido pelo software ISee, de uma forma mais direta, identificando e dimensionando os defeitos encontrados.

ABSTRACT

In Shipbuilding the field of welding has a place of high importance by the amount of welding services applied in all kinds of steel boats and ships. An eternal problem inherent to welding is the phenomenon of distortions arising from welding, an undesirable effect which provides high additional costs to correct them.

The strength of large structures such as offshore platforms and vessels depends crucially on well developed weldments and so there is great need to control the quality of welds in naval plates. This control is done by various types of destructive testing, and especially Non-Destructive Testing. Among the Non-Destructive Testing the X-ray technology stands out.

Since the discovery of X-rays the doses respectively the times of exposure have been reduced gradually, and there was a big step forward with the introduction of digital radiography using Imaging Plates. This technology until the mid-90 could not offer an equivalent quality to traditional radiography using film susceptible to X-ray. But today the quality of radiographs with Imaging Plates has equivalent or superior quality of those made with conventional films. The development of yet another technology was initiated, which provides ultra-high resolution, called Digital Detector Array (ADI), which definitely provides superior image quality than the images obtained by traditional film radiography.

The work here presented shows a comparison of the methods of obtaining industrial radiography, using traditional X-ray films and Imaging Plate (Digital Radiography). For this welded steel plates used in shipbuilding were radiographed. Generally the process of industrial welding can generate different types of residual stress in the welded material, and in some extreme cases it becomes necessary to apply some heat treatment both before and / or after welding.

The parameters that define whether or not there is a need of heat treatments are highly complex including the energy used in the welding process, alloy base material (in this case the plates), filler and qualification of the worker and the worker's experience in welding.

The objective is to seek new techniques for imaging of industrial digital radiography, and processing these images using software such as MATLAB and ISee!, With the package of tools IPT (Image Processing Toolbox), and MEM (Maximum Entropy Method), a method of image treatment is available within commercial software. To obtain the images there were used IP (Imaging Plate) and a laser scanner. The source of x-rays used was of a portable type of 120kV. The radiographic image permits to see more clearly the defects like cracks in the weldments. The formation and propagation of cracks can lead to the collapse of the naval structure.

After the method was proven by analysis of radiographs of the weld seam from shipbuilding plates which were radiographed with various parameters, the method provided by iSee! Software were applied, a more direct way was found to identify and determine the size of the defects.

SIGLAS E SÍMBOLOS

ZTA	ZONA TERMICAMENTE AFETADA
IP	IMAGING PLATE
EMAR	ELETO MAGNETIC ACOUSTIC RESSONANCE
f_n	N-ÉSIMA FREQUENCIA DE RESSONÂNCIA
n	NÚMERO INTEIRO ARBITRÁRIO
m	NÚMERO INTEIRO ARBITRÁRIO
V	VELOCIDADE DA PROPAGAÇÃO DO SOM
d	ESPESSURA
B	BIREFRINGÊNCIA ACÚSTICA
B_0	ANISOTROPIA INICIAL
C_A	PRIMEIRA CONSTANTE DA BIREFRINGÊNCIA ACÚSTICA
C_R	SEGUNDA CONSTANTE DA BIREFRINGÊNCIA ACÚSTICA
σ	TENSÃO
σ_1	TENSÃO EM DIREÇÃO DA LAMINAÇÃO DA CHAPA
σ_2	TENSÃO PERPENDICULAR À LAMINAÇÃO DA CHAPA
IQI	IMAGE QUALITY INDICATOR = INDICADOR DE QUALIDADE DE IMAGEM
SR _B	BASIC SPACIAL RESOLUTION = RESOLUÇÃO ESPACIAL BÁSICA
CS	SENSIBILIDADE DE CONTRASTE
SNR	SINAL TO NOISE RATIO = RAZÃO ENTRE SINAL E RUÍDO
CNR	CONTRAST TO NOISE RATIO = RAZÃO ENTRE CONTRASTE E RUÍDO
GLR	GREY LEVEL RESOLUTION = RESOLUÇÃO DE NÍVEIS DE CINZA
DDA	DIGITAL DETECTOR ARRAY = ARRANJO DE DETECTOR DIGITAL
a	DISTÂNCIA DA FONTE AO OBJETO CONSIDERADA IDEAL
b	DISTÂNCIA DA FONTE ATÉ O FILME

f	DIMENSÃO DO FOCO DA FONTE DE RAIOS-X
p	RESOLUÇÃO, DIMENSÃO DO PIXEL
D	DISTÂNCIA, DIMENSÃO
$I_{\text{máx.}}$	INTENSIDADE MÁXIMA
$I_{\text{mín}}$	INTENSIDADE MÍNIMA
R	DISTÂNCIA DO FILME AO CENTRO DA PEÇA
f	DISTÂNCIA ENTRE A FONTE E O FILME
r	DIMENSÃO RESPECTIVAMENTE RAIOS DE UMA PEÇA
w'	VALOR DA DIMENSÃO FORNECIDO PELO ISEE!
w	VALOR REAL DA DIMENSÃO
k	FATOR DE AMPLIAÇÃO DE UMA IMAGEM RADIOGRÁFICA
KV	KILOVOLT
mA	MILLIAMPÉRE
s	SEGUNDO (MEDIDA DE TEMPO)
A	DISTÂNCIA ENTRE IMAGING PLATE E FONTE DE RAIOS-X
B	DISTÂNCIA ENTRE IMAGING PLATE E PEÇA RADIOGRAFADA
W	DIMENSÃO OBTIDA POR MEDIÇÃO COM PAQUÍMETRO

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:	Placas de aço com abaulamento/curvamento entre zonas rígidas longitudinais podem ser vistas claramente no casco deste navio [UNIFEI].	28
Figura 2:	Tipos de distorções [Masubuchi].	29
Figura 3:	Fotos tiradas no Estaleiro Atlântico Sul em Suape mostrando Chapas Navais com deformações provocadas por de tensões residuais oriundas do processo de soldagem	31
Figura 4:	Exemplos de processos que causam tensões residuais [Silva C.C.].	32
Figura 5:	Arranjo de três barras fixadas nas extremidades. (a) sem aquecimento. (b) barra central aquecida [Modenesi].	33
Figura 6:	Ciclo térmico durante o processo de soldagem [Welding Handbook].	34
Figura 7:	Elemento volumétrico durante o aquecimento [Silva C.C.].	36
Figura 8:	Elemento volumétrico durante o resfriamento [Silva C.C.].	36
Figura 9:	Distribuição de temperatura e tensões residuais [Masubuchi].	37
Figura 10:	Distribuição das tensões residuais transversais (a) e longitudinais (b) em juntas de topo [Kou].	38
Figura 11:	Distribuição de tensões residuais em peças soldadas [Gurowa].	40
Figura 12:	Representação esquemática da variação de tensões transversais (σ_1) mostrando a superposição linear dos efeitos: a) contração (C); b) resfriamento superficial mais intenso (R); c) transformação de fase (T); d) C+R; e) C+R+T; f) C+T [Gurowa].	41
Figura 13:	Tensões de solda em aço: a) espessura das placas = 2,5 mm (resfriamento no ar); b) espessura das placas = 10 mm (resfriamento no ar); c) espessura das placas = 2,5 mm (resfriamento na água) [Gurowa].	42
Figura 14:	Esquema de distribuição de bolhas em diferentes casos de Porosidade. (a) distribuição aleatória, (b) agrupados e (c) alinhados [Modenesi].	44
Figura 15:	Esquema de um típico exemplo de inclusão de escória entre um passe de solda e outro [Modenesi].	44

Figura 16:	Esquemática do fenômeno da falta de fusão [Modenesi].	45
Figura 17:	Desenho esquemático do fenômeno de falta de penetração [Modenesi].	45
Figura 18:	Esquemática de mordeduras em peças soldadas [Modenesi].	46
Figura 19:	Foto de uma solda trincada [Modenesi].	46
Figura 20:	Estrutura básica de um filme radiográfico.	47
Figura 21:	Estrutura básica de um Imaging Plate [Fujifilm].	48
Figura 22:	Princípio do escaneamento do Imaging Plate: Um raio laser efetua a varredura da área da imagem, liberando luminescência, à qual é capturada e arquivada pelo sistema, transformando em sua soma as informações em imagem radiográfica visível na tela do computador ou imprimida [Fujifilm].	48
Figura 23:	Comparação entre Imaging Plate e filme radiográfico convencional. Com doses mais de 100 vezes menores, o IP apresenta imagens com possibilidade de detecção de detalhes comparáveis ao filme convencional [Fujifilm].	49
Figura 24:	Exemplos de três parâmetros utilizados em radiografias digitais: SR_B (resolução espacial básica), GLR (resolução de níveis de cinza) e SNR (razão entre sinal e ruído). [Bavendiek].	52
Figura 25:	Comparação da qualidade de imagem do melhor filme convencional (à esquerda), radiografia computacional sem ampliação (centro) e com a ampliação de 3,5 DDA (à direita). [Ewert].	53
Figura 26:	Esquema da construção de um detector digital utilizando camada de scintilizadores < http://www.gehealthcare.com/usen/xr/cardiovascular/products/innova4100image.html > acesso em 15.03.2010].	54
Figura 27:	Foto de um detector digital [< http://www.securitydefense.com/paxscan4030R.htm > acesso em 15.03.2010].	55
Figura 28:	Visualização do conceito da técnica “Projection Magnification” com uma fonte relativamente grande.	55
Figura 29:	Visualização do conceito da técnica “Projection Magnification” com uma fonte microfocal.	56
Figura 30:	Amostra original da chapa naval presa em gabarito. Posteriormente foram recortados três partes desta chapa. Foto tirada no laboratório da COPPE/Rio de Janeiro.	57

Figura 31:	Joelho e os dois segmentos de tubulação usados na comprovação dos métodos da análise dimensional.	58
Figura 32:	Scanner Laser Cyclone utilizado para efetuar a leitura do Imaging Plate.	58
Figura 33:	Fonte de raios-X utilizada, com 120 kV - 1 mA, foco de 0,8mm e uma angulação de até 60° na vertical.	59
Figura 34:	Desenhos esquemáticos das duas estruturas de ensaio utilizados na obtenção das radiografias.	59
Figura 35:	Diagrama de um procedimento de aquisição e processamento de imagens.	61
Figura 36:	Acima: Esquema demonstrando a influência da ampliação em uma imagem radiográfica influência da ampliação em uma imagem real; abaixo a esquerda: gráfico gerado pela ferramenta Profiler; abaixo a direita: identificação de seus elementos em uma imagem radiografada [Zscherpel].	62
Figura 37:	Detecção de defeitos em cordões de solda através da análise dos tons de cinza [Ewert].	63
Figura 38:	Foto da Chapa naval soldada original da qual foi recortada a chapa mostrada na figura 40. mostrando detalhes do gabarito e strain gauges fixados.	64
Figura 39:	Fotos das chapas navais com a junta soldada das amostras 01, 02 e 03.	65
Figura 40:	Chapa naval unida por solda, destacando-se a distorção angular provocada pelo processo de soldagem. Dimensões: 500 x 500 x 19 mm.	66
Figura 41:	Representação esquemática de uma borda, sem ruído (à esquerda), e com ruído (à direita).	67
Figura 42:	Aplicação do método de Klasens a uma borda. Acima á esquerda: gráfico da borda; acima á direita: determinação das retas 1 e 2 e dos pontos (A) e (B); abaixo: a conclusão do método, onde se encontra a reta 3 e o ponto (C).	68
Figura 43:	Aplicação da primeira derivada no gráfico apresentado na figura 46 indicando o mesmo ponto (C).	69
Figura 44:	Após se traçar com uma reta com a ferramenta Profiler na radiografia, surge um gráfico na janela da mesma ferramenta, onde se encontra a intensidade em função da posição ao longo do comprimento da linha traçada pela ferramenta Profiler em mm. (Propositalmente traçou-se a reta em uma região de borda).	70

Figura 45:	Posicionamento dos delimitadores. Eles devem estar localizados próximos à área examinada.	70
Figura 46:	Aplicação da primeira derivada.	71
Figura 47:	Reposicionamento do delimitador esquerdo para o pico indicado pela derivada, e obtenção de forma direta do valor procurado.	71
Figura 48:	Marcando-se a opção OSD destacado na figura 39 o valor do mensurando aparece na imagem.	71
Figura 49:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, Distância B: 0 cm, 10 s, Original	72
Figura 50:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, Distância B: 0 cm, 10 s, Original -> Local Histogram	73
Figura 51:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, Distância B: 0 cm, 10 s, Original -> Local Histogram -> Negativo	73
Figura 52:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, Distância B: 0 cm, 190 s, Original	73
Figura 53:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, Distância B: 0 cm, 190 s, Original -> Local Histogram	74
Figura 54:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, Distância B: 0 cm, 190 s, Original -> Local Histogram -> Negativo	74
Figura 55:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, Distância B: 0 cm, 345 s, Original	74
Figura 56:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, Distância B: 0 cm, 345 s, Original -> Local Histogram	75
Figura 57:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, Distância B: 0 cm, 345 s, Original -> Local Histogram -> Negativo	75
Figura 58:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, Distância B: 0 cm, 345 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram	75
Figura 59:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, Distância B: 0 cm, 345 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram -> Negativo	76
Figura 60:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=40 cm, Distância B: 0 cm, 30 s, Original	76
Figura 61:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=40 cm, Distância B: 0 cm, 30 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram	76

Figura 62:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=40 cm, Distância B: 0 cm, 30 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram -> Negativo	77
Figura 63:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=40 cm, Distância B: 0 cm, 160 s, Original	77
Figura 64:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=40 cm, Distância B: 0 cm, 160 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram	77
Figura 65:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=40 cm, Distância B: 0 cm, 160 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram -> Negativo	78
Figura 66:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=25 cm, Distância B: 0 cm, 60 s, Original	78
Figura 67:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=25 cm, Distância B: 0 cm, 60 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram	78
Figura 68:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=25 cm, Distância B: 0 cm, 60 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram -> Negativo	79
Figura 69:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=15 cm, Distância B: 0 cm, 60 s, Original	79
Figura 70:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=15 cm, Distância B: 0 cm, 60 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram	79
Figura 71:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=15 cm, Distância B: 0 cm, 60 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram -> Negativo	80
Figura 72:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=15 cm, Distância B: 0 cm, 60 s, Original	80
Figura 73:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=15 cm, Distância B: 0 cm, 60 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram	80
Figura 74:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=15 cm, Distância B: 0 cm, 60 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram -> Negativo	81
Figura 75:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, B=20 cm, 10 s, Original -> Local Histogram	82
Figura 76:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, B=20 cm, 190 s, Original -> Local Histogram	83
Figura 77:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, B=20 cm, 345 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram	83

Figura 78:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=40 cm, B=20 cm, 30s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram	84
Figura 79:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=40 cm, B= 20 cm, 160 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram	84
Figura 80:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=25 cm, B=20 cm, 60 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram	85
Figura 81:	Radiografia da Chapa Naval 03, A=15 cm, B=20 cm, 60 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram	85
Figura 82:	Radiografia (filme convencional) da Chapa Naval 01, A=40 cm, Original	86
Figura 83:	Radiografia analógica da Chapa Naval 01, A=40 cm, manipulada com Enhance Details + Local Histogram. Observam-se inclusões de escória e porosidade.	87
Figura 84:	Radiografia analógica da Chapa Naval 02, A=40 cm, Original	87
Figura 85:	Radiografia analógica da Chapa Naval 02, A=40 cm, manipulada com Enhance Details + Local Histogram. Observam-se inclusões de escória e bolhas	87
Figura 86:	Radiografia digital das tubulações e do joelho mostrados na figura 28, elaborada no BAM, Alemanha	88
Figura 87:	Aplicação do filtro BESSEL fornecido pelo programa Isee!, na imagem radiográfica mostrada na figura 80.	89
Figura 88:	Análise de um trecho do cordão de solda da tubulação mais corroída, neste trecho o cordão está quase perfeito a não ser pelas falhas destacadas.	90
Figura 89:	Análise de outro trecho do cordão de solda da tubulação mais corroída, aqui o cordão encontra-se livre de falhas.	90
Figura 90:	Análise de outro trecho do cordão de solda da tubulação mais corroída com falha.	91
Figura 91:	Radiografia tirada da chapa naval 03. Distância A: 40 cm, Tempo: 30 s. A parte destacada será utilizada com ampliação para exames dimensionais da largura do cordão de solda.	95
Figura 92:	Análise da parte central da radiografia representada na figura 85. O cordão de solda é parcialmente uniforme, exceto nos pontos indicados.	95

Figura 93:	Radiografia tirada da chapa naval 03. Distância A: 40 cm, Tempo: 160 s. A região destacada foi ampliada para efetuar exames de defeitos e exames dimensionais detalhados.	96
Figura 94:	Detalhe do negativo da imagem radiográfica da chapa naval soldada, inicialmente sem processar a imagem	96
Figura 95:	Imagem radiográfica da chapa naval solda processada com Enhance Detail, enfatizando pequenas bolhas (porosidade) encontradas na solda	96
Figura 96:	Imagem radiográfica da chapa naval soldada, processada com Enhance Details enfatizando inclusões de escória e porosidade	97
Figura 97:	Imagem radiográfica da chapa naval soldada processada com a ferramenta MEM	97
Figura 98:	Imagem radiográfica da chapa naval soldada, processada com Enhance Details enfatizando inclusões de escória e porosidade.	97
Figura 99:	Imagem radiográfica da chapa naval soldada aplicado o controle de tons de cinza. O processamento da imagem foi feito com a ferramenta FFT	98
Figura 100:	Imagem radiográfica da chapa naval processada no software ISee!. Foi efetuada uma análise dimensional do cordão de solda.	98
Figura 101:	Detalhe da imagem radiográfica ampliada da chapa naval 03 processada com o software ISee! com análises dimensionais detalhadas.	98
Figura 102:	Radiografia tirada da chapa naval 03, distância fonte – IP (A) = 40 cm, tempo de exposição = 160 s. A linha destacada representa o percurso das medições da intensidade do acinzamento.	99
Figura 103:	Análise da continuidade da solda apresentada na figura 102. Percebe-se pela análise do gráfico que o cordão apresenta uma distribuição quase uniforme exceto pela parte destacada, correspondente à área dos três pontos analisados na Figura 92.	99

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1:	Medições da deformação angular da chapa naval 03	65
Tabela 2:	Valores Medidos Com Paquímetro em mm Valores medidos das tubulações e do joelho com um paquímetro de 0,02mm	92
Tabela 3:	Valores Medidos com o Software ISee em mm Valores obtidos através do ISee, com o método da derivada sem a correção da ampliação	93
Tabela 4:	Eficácia da Análise Quantitativa Comparativo entre os valores reais (W), [Tabela 1]. Os obtidos com a equação 1 (w_1) e com a equação 2 (w_2). Os valores destacados por (*) são os mais próximos do real.	94

SUMÁRIO

RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
SIGLAS E SÍMBOLOS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE TABELAS	XVIII
SUMÁRIO	IXX
CAPÍTULO 1.0 - INTRODUÇÃO	22
1.2 - OBJETIVOS	23
CAPÍTULO 2.0 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 - PROCESSOS DE SOLDAGEM APLICADOS NA INDÚSTRIA NAVAL	26
2.2 - DISTORÇÕES EM CHAPAS NA INDÚSTRIA NAVAL	28
2.2.1 - CAUSAS DAS DISTORÇÕES	28
2.2.2 - TIPOS DE DISTORÇÕES	29
2.2.3 - EFEITOS DAS DISTORÇÕES	30
2.3 - TENSÕES RESIDUAIS	30
2.3.1 - SURGIMENTO DE TENSÕES RESIDUAIS	33
2.3.2 - TENSÕES RESIDUAIS DE SOLDAGEM	35
2.3.2.1 - TENSÕES RESIDUAIS DEVIDO À CONTRAÇÃO NO RESFRIAMENTO	35
2.3.2.2 - TENSÕES RESIDUAIS DEVIDO AO RESFRIAMENTO SUPERFICIAL INTENSO	38
2.3.2.3 - TENSÕES RESIDUAIS DEVIDO ÀS TRANSFORMAÇÕES DE FASES	39
2.4 - EFEITOS DAS TENSÕES RESIDUAIS SOBRE AS PROPRIEDADES DA SOLDA	39
2.5 - MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM CHAPAS SOLDADAS	43

2.6 - DEFEITOS EM SOLDAS DE CHAPAS NAVAIS	43
2.6.1 - POROSIDADE	44
2.6.2 - INCLUSÃO DE ESCÓRIA	44
2.6.3 - FALTA DE FUSÃO	45
2.6.4 - FALTA DE PENETRAÇÃO	45
2.6.5 - MORDEDURA	46
2.6.6 - TRINCAS	46
2.7 - RADIOGRAFIA DE SOLDAS	47
2.7.1 - FILMES RADIOGRÁFICOS	47
2.7.2 - IMAGING PLATE	47
2.7.3 - QUALIDADE DA IMAGEM RADIOGRÁFICA	50
2.7.4 - DIGITAL DETECTOR ARRAY (DDA)	52
2.7.5 - DETECTORES DIGITAIS	54
2.7.6 - PROJECTION MAGNIFICATION	55
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E METODOLOGIA	57
3.1 - MATERIAIS	57
3.2 - METODOLOGIA DO TRABALHO	58
3.2.1 - PROCEDIMENTO PARA REALIZAÇÃO DE RADIOGRAFIAS NO BUNKER DO LABORATÓRIO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS	60
3.2.2 - PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS	60
3.2.3 - MÉTODO PARA A ANÁLISE DIMENSIONAL	61
3.2.4 - MÉTODO PARA ANÁLISE QUALITATIVA	63
3.2.5 - MÉTODO PARA OBTENÇÃO DAS IMAGENS RADIOGRÁFICAS	64
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS	64
4.1 - DEFORMAÇÃO DAS CHAPAS NAVAIS	64
4.2 - MÉTODO DE KLASSENS	67
4.3 - FUNDAMENTAÇÃO PARA ANÁLISE DIMENSIONAL	69
4.4 - RADIOGRAFIAS OBTIDAS EM LABORATÓRIO COM UTILIZAÇÃO DE IMAGING PLATES	72

4.5 - RADIOGRAFIAS OBTIDAS COM MÉTODOS CONVENCIONAIS UTILIZANDO FILMES RADIOGRÁFICOS	86
4.6 - COMPROVAÇÃO DOS MÉTODOS PARA ANÁLISE DA SOLDA RADIOGRAFADA	88
4.6.1 - COMPROVAÇÃO DO MÉTODO PARA ANÁLISE QUALITATIVA DA SOLDA RADIOGRAFADA	88
4.6.2 - COMPROVAÇÃO DO MÉTODO PARA ANÁLISE QUANTITATIVA DA SOLDA RADIOGRAFADA	89
4.7 - ANÁLISE DA SOLDA RADIOGRAFADA	94
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	100
5.1 - SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Em todos os empreendimentos humanos se faz necessário ter regras e regulamentos para melhorar de uma forma ou outra a produtividade. Com o surgimento da revolução industrial, as atividades no campo industrial ficaram mais presentes na vida dos indivíduos tanto os envolvidos com os processos de fabricação como também os usuários dos produtos destes processos.

A falta de regulamentos nas diferentes etapas de um processo de fabricação, ou a ignorância de regulamentos existentes, tem ocasionado freqüentes perdas com custos adicionais e até acidentes e outros problemas provocando sérias conseqüências tanto para os produtores como os usuários, para a população em geral e para o meio ambiente.

No caso específico das operações de soldagem de chapas navais, a realização de soldas inadequadas durante a fabricação de navios (mas também outras estruturas ou equipamentos tais como pontes, oleodutos, componentes automotivos e vasos de pressão) pode resultar em grandes perdas materiais e humanas e danos ao meio ambiente.

Os métodos de Ensaio Não Destrutivo aqui apresentados podem servir ao propósito de diminuir os prejuízos provocados por uma solda inadequada. Um dos fenômenos que surgem em praticamente todos os tipos de soldagem de materiais ferrítico são as tensões residuais, fenômeno indesejado por causar deformações nas peças soldadas, proporcionando às vezes grandes esforços e investimentos para manter o controle dimensional de determinadas peças mecânicas.

As pesquisas sobre medições de tensões residuais em chapas navais soldadas se estendem à aquisição de conhecimentos básicos sobre causas e efeitos das tensões residuais até a apresentação dos métodos para medi-las.

A radiografia computadorizada apresenta uma opção poderosa de averiguar defeitos em chapas navais soldadas. É um método freqüentemente referenciado pelos Códigos de fabricação de peças ou estruturas de responsabilidade para determinação da eficiência da base de cálculo pela engenharia. Radiografias também são freqüentemente requeridas pelas sociedades classificadoras de navios, como a DNV, BV, GL e outras.

O Brasil, especialmente Pernambuco ainda apresenta uma grande carência de recursos humanos com experiência em Engenharia Naval, tanto engenheiros profissionais como também nas instituições de ensino e pesquisa do Nordeste do país, o que justifica a escassa quantidade de trabalhos publicados sobre o tema nesta região.

Em conseqüência, existe uma forte demanda por pesquisas e conhecimentos acerca dos ensaios não-destrutivos utilizando ultrassom e radiografia na área da Engenharia Naval e Oceânica, considerando que um dos fatores mais significativos seja o estabelecimento de uma nova indústria naval em Pernambuco, com a construção do estaleiro Atlântico Sul em Ipojuca.

1.2 - OBJETIVOS

Com a descoberta de enormes quantidades de petróleo alojados no fundo do mar nos campos do Pré-Sal, o Brasil enfrenta um desafio nunca antes visto e sem precedentes no mundo inteiro: a extração de petróleo em profundidades de cerca 6000 metros, sendo 2000 metros no mar. Existem inúmeros campos de pesquisa visando facilitar a prospecção de petróleo em grandes profundidades. A logística envolve o desenvolvimento de novos navios e plataformas e melhoramentos das tecnologias envolvidas. O projeto de pesquisa aqui apresentado visa contribuir para dar maior competitividade à indústria naval brasileira pela introdução de técnicas de ensaios não destrutivos para o controle da qualidade das soldas aplicadas nas chapas navais. Os dados obtidos serão considerados na simulação computacional da resistência limite de navio tipo Suezmax, acrescentando desta forma um indicador que relaciona a integridade do navio com o processo de fabricação das chapas navais soldadas.

Um objetivo dos estudos é a verificação da existência de alguma relação entre a qualidade da solda e deformações em chapas navais soldadas. Para isto será necessário estudar tanto a origem das deformações das chapas como também a verificação da qualidade da solda aplicada.

É considerada a simulação numérica do processo de soldagem, antecipando as distorções e tensões residuais que se farão presentes na estrutura real quando fabricada. As técnicas propostas se constituem num conjunto de procedimentos que conjugam as fases de construção e projeto do navio, de forma a melhorar o controle dimensional nas etapas de fabricação dos painéis, montagem dos blocos e edificação. Este controle deverá elevar a eficiência da construção naval, tanto em termos quantitativos pela redução de custos e do tempo de fabricação quanto à qualidade do produto com repercussão na sua valorização de venda no mercado internacional.

É, portanto, de grande importância, elevar a confiabilidade da avaliação de medidas de ensaios não destrutivos em juntas soldadas. E na tecnologia naval, é de fundamental importância desenvolver técnicas de ensaios não destrutivos que sejam de alta sensibilidade, resolução e de aplicação in-loco.

Uma das principais dificuldades na fabricação de navios consiste nas deformações oriundas de soldagens de chapas. Os diferentes processos de soldagem podem gerar elevadas tensões residuais acompanhados por efeitos de deformações na chapas soldadas. O elevado custo para manter a construção dentro de padrões estabelecidos justifica um estudo sobre as origens das tensões residuais. Desde que tensões residuais de soldagem estão presentes em praticamente todas as soldas de chapas, a qualidade da solda não tem influência direta sobre a ocorrência deste fenômeno, porém uma solda de má qualidade pode agravar o enfraquecimento da união de chapas navais, gerando, por exemplo, concentrações de tensões em níveis que comprometem a estrutura.

A tecnologia de ensaios não destrutivos aplicada neste trabalho é a radiografia computadorizada. Trata-se de uma das técnicas de grande interesse pelo fato de possibilitar a revelação dos defeitos internos tais como trincas, inclusão de escória, bolhas, corrosão, integridade e qualidade de solda, através da verificação de soldas em imagens, que não são acessíveis com outras técnicas. É apresentado um estudo sistemático para identificar os parâmetros envolvidos na técnica de radiografia digital que contribuem para aquisição de imagens digitais de alta resolução, para sua aplicação na avaliação do estado da integridade

física dos cordões de solda de estruturas oceânicas, em particular painéis enrijecidos de navios.

Será apresentada uma solução para problemas relacionados à integridade e qualidade de solda em chapas navais utilizando detectores digitais de alta sensibilidade e resolução e posterior processamento dessas imagens através do software ISee!.

Visando melhorar a relação custo/benefício de chapas navais soldadas para aumentar a integridade e a vida útil dos dispositivos empregados e melhorando o controle da deposição dos cordões de solda nas estruturas navais.

Empresas prestadoras de serviços de Ensaios Não Destrutivos da região de Pernambuco atualmente se restringem a oferecer serviços de radiografias analógicas convencionais. Com a publicação deste trabalho visa-se o avanço tecnológico e o incremento de conhecimentos a respeito de tecnologias digitais no campo de radiografias, aumentando a capacidade das empresas interessadas.

O projeto de pesquisa aqui apresentado se insere nos objetivos mais abrangentes definidos pelo Ministério de Ciência e Tecnologia. Fazem parte deste estudo e integram-se dois aspectos: as deformações e a qualidade da solda em chapas navais. A Universidade Federal de Pernambuco ainda não dispõe de tecnologia e equipamentos para elaborar experimentos envolvendo medição de tensões residuais, que são a causa principal das deformações. No entanto em parte este trabalho adiantou esta questão de grande importância global. A outra parte, que está sendo apresentada aqui é referente a exames da qualidade da solda em chapas navais: Para este tipo de exames foram adquiridos recentemente equipamentos do raio-X modernos para o laboratório de materiais do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco.

A aplicação prática deste trabalho pode ser considerada imediata, uma vez que o Estaleiro Atlântico Sul (EAS) iniciou a produção de navios petroleiros e plataformas. O uso de tecnologias digitais para a obtenção de imagens de solda radiografadas diminui a radiação necessária para um centésimo da radiação liberada para a obtenção de radiografias analógicas, abrindo possibilidades mais flexíveis no planejamento do controle de qualidade com maior segurança, isto é, menor perigo de exposição à radiação para os operários diretamente ou indiretamente envolvidos.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na construção naval vem-se utilizando processos de soldagem de chapas e painéis em aços navais desde os anos 30 do século passando, substituindo a união por rebites. As vantagens das chapas soldadas comparadas á chapas rebitadas são principalmente a maior resistência da união e conseqüentemente a utilização de chapas mais finas, reduzindo o peso de navios, o custo de fabricação e os custos operacionais, já que navios mais leves de forma geral consomem menos energia na propulsão. Outra vantagem importante é o aumento da capacidade de toneladas transportadas.

A indústria naval brasileira é a mais significativa em toda America Latina. Ela tem sofrido uma queda na produção depois dos anos 80 do século passado. Praticamente foram construídos desde então apenas barcos de apoio para suprir plataformas de petróleo. Recentemente o governo federal tomou a decisão de que todas as ordens para produzir novas plataformas e navios petroleiros devem ser realizadas em contexto nacional. Com isto houve muitas mudanças dentro da indústria naval brasileira com o surgimento de novos estaleiros e a estabilização de outros, os quais estariam passando por situações críticas. [Estefen, 2009]

A demanda de grandes navios e plataformas petrolíferas estimada em 2008 era de 51 navios petroleiros com capacidade Suezmax, 8 navios gazeios, 5 navios container, 4 plataformas semi-submersíveis e 5 FPSOs (Floating Production, Storage and Offloading = unidades Flutuantes de Produção, Armazenamento e Descarga). [Portos e Navios, 2008] Além destes pode se considerar a necessidade de mais 28 unidades de perfuração devido as mais recentes descobertas de petroleo em grandes profundidades.

O Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) apoiou um grande números de projetos de pesquisa visando a demanda tecnológica no campo da exploração e produção de petróleo. Em particular este trabalho faz parte de um projeto de pesquisa, o qual visa obter novos conhecimentos no campo de soldagens, especificamente verificar os fenomenos de tensões residuais em soldagens de chapas navais, e, a relação entre tensões residuais e a qualidade da solda em questão. Este objetivo explica a necessidade de reunir novos conhecimentos à respeito das deformações que afetam chapas navais soldadas como também identificar todo tipo de fenômeno que envolve a qualidade das soldas em questão.

A união de chapas pelo processo de soldagem envolve a adição de grande quantidade de calor provocando dilatação térmica nas peças soldadas e durante o resfriamento, a contração térmica das mesmas. Com isto é gerada a zona termicamente afetada (ZTA) na qual (além de ter a estrutura cristalina do aço modificada de forma prejudicial) estes processos de soldagem provocam tensões altíssimas tanto no aquecimento como no resfriamento das peças ao ponto de superar o limite de escoamento (deformação plástica) do aço em questão. A união de chapas soldadas é, portanto menos resistente na zona termicamente afetada que as próprias chapas devido à mudança na rede cristalina do metal e às tensões residuais após soldagem, sendo que na prática é considerada a resistência de uma união soldada significativamente reduzida comparada a uma chapa não soldada.

Para alcançar uma resistência limite aceitável do material ainda se faz necessário um rígido controle de qualidade nas soldas, além de casualmente artificios de tratamentos térmicos pré- e/ou pós-soldagem e outros processos para diminuir as tensões residuais. As tensões residuais podem provocar deformações e distorções dimensionais nas chapas em questão ao

ponto de se ter a necessidade de corrigir estas deformações mecanicamente – ou seja: na martelada. Estes processos de correção das deformações até hoje são comuns e bastante frequentes nos estaleiros em todo o mundo, provocando um aumento considerável nos custos de fabricação.

È, portanto, de grande importância compreender o surgimento de tensões residuais nos processos de solda.

2.1 - PROCESSOS DE SOLDAGEM APLICADOS NA INDÚSTRIA NAVAL

Basicamente são conhecidos quatro tipos de processos distintos de soldagem em grandes estruturas:

- 1) Eletrodo revestido
- 2) Arco submerso
- 3) MIG/MAG e TIG
- 4) Soldagem vertical automatizada

O processo utilizando eletrodos revestidos é dentro deste grupo o mais econômico, contanto que o soldador tenha uma boa qualificação, pois este processo requer boa habilidade manual do operador. A união de chapas é efetuada através do aquecimento e liquefação através de um arco elétrico, de uma camada superficial da chapa e do material de adição, o qual provém da parte central do eletrodo. O revestimento do eletrodo, ao ser aquecido, evapora e fornece desta forma a atmosfera protetora. Os equipamentos utilizados neste processo consistem de um gerador especial, o suporte isolado adequadamente para segurar o eletrodo, cabos e o prendedor para fechar o circuito com a peça. Os eletrodos comumente têm comprimento entre 635 mm e 1000 mm e precisam ser trocados após o desgaste. A solda contínua de grandes chapas não é possível. Existe um grande número de diferentes tipos de eletrodos recomendados para cada caso de acordo com o material base a ser soldado.

A soldagem denominada de arco submerso consiste em um processo semi-automático ou automático, no qual um determinado granulado é posto entre as chapas por gravidade antes da própria soldagem. A consequência é uma limitação deste processo para apenas chapas que estejam em posição horizontal ou eventualmente levemente inclinada. O granulado, também denominado de fluxo, exerce a função de fornecer a atmosfera protetora, similar ao revestimento no eletrodo revestido: Uma parte do fluxo evapora pelo aquecimento do arco elétrico e estabelece a atmosfera protetora. Após colocar o fluxo nos chanfres da solda, o eletrodo é introduzido para dentro do granulado e, através de um arco elétrico é então fornecido o calor para liquefazer uma camada do material base, isto é, da chapa, do eletrodo (que dispensa neste caso qualquer revestimento) e pode ser adicionado de forma contínua, pois provém de um rolo com a quantidade de eletrodos para soldar chapas de uma só vez com dimensões de até 18 metros de comprimento [Masubuchi, 1980]. Uma das características deste processo é a submersão completa do arco dentro do fluxo – não se vê o arco, apenas o material (fluxo) derretido.

O fluxo tem a propriedade de ser isolador em temperaturas ambiente e, em altas temperaturas, quando liquefeito, demonstra ser um ótimo condutor. A qualidade da solda é muito alta, a velocidade do processo também, por causa da decomposição elevada do material do eletrodo, razões pelas quais é aplicada em grande número de casos – muito maior que o processo de eletrodo revestido.

Os processos MIG e MAG utilizam uma camada de gás protetora fornecida por uma tubulação concêntrica, na qual o eletrodo é alimentado através do centro da tubulação de forma contínua. O gás é adicionado ao redor do eletrodo. No MIG é utilizado algum gás inerte (Metal Inert Gas), comumente Argon ou Hélio.

O processo MAG utiliza como gás da atmosfera protetora o CO_2 (Metal Active Gas). A proteção através do CO_2 em alguns casos não é tão efetiva como no MIG, porém é muito mais econômica. Existem muitas máquinas que proporcionam a utilização de uma mistura de gás inerte com CO_2 . As vantagens destes processos são: flexibilidade na produção, pois pode ser operado em qualquer posição, parecido com a soldagem utilizando eletrodo revestido, porém é possível efetuar soldas contínuas em chapas e blocos de grandes dimensões.

Ambos os processos MIG e MAG utilizam eletrodos consumíveis, isto é: o eletrodo é adicionado ao material de base. Existem, porém alguns materiais como aços inoxidáveis, aços de ligas elevadas, titânio ou alumínio, nos quais a adição de material não é recomendada. Nestes casos deve ser aplicado o processo TIG, no qual é utilizado um eletrodo não consumível de tungstênio (Tungstein Inert Gas) para estabelecer o arco, produzindo desta forma uma fonte de calor elevado o suficiente para derreter o material base, mas não o eletrodo de tungstênio. Os processos MIG e MAG apresentam altas taxas de decomposição de material (de adição) enquanto que o TIG não adiciona nenhum material, limitando seu uso apenas para chapas relativamente finas [Masubuchi, 1980].

Em alguns casos, pode ser aplicado um processo de soldagem vertical automatizado. São parecido com os processos de arco submerso, neste caso denominado de processo electroslog (electro-escória) ou similar ao MIG/MAG, denominado de processo electrogás. Ambos estes processos efetuam a solda em chapas na posição vertical. São utilizados em ambos os lados das chapas retentores de cobre refrigerados à água, os quais retém o material liquefeito de adição assim como a escória respectivamente o gás protetor, e se movimentam lentamente para cima, enquanto que um ou vários eletrodos depositam, através de um arco, o material de adição. A vantagem deste tipo de processo é sua utilização em soldagem contínua em blocos, os quais apresentam bordas verticais a serem soldadas.

2.2 - DISTORÇÕES EM CHAPAS NA INDÚSTRIA NAVAL

No projeto da construção de um navio ou uma plataforma é estabelecida a geometria ideal para as peças e conjunto de peças mecânicas e estruturas. Durante a fabricação ocorrem divergências a estas geometrias, as quais são denominadas imperfeições geométricas. As imperfeições geométricas são classificadas pela sua forma e pela magnitude e são a principal causa do surgimento de cargas de colapso distintas em componentes laminares nominalmente idênticos.



Figura 1: Placas de aço com abaulamento/curvamento entre zonas rígidas longitudinais podem ser vistas claramente no casco deste navio [UNIFEI].

Conseqüentemente, os códigos de projeto procuram garantir a integridade de painéis sob compressão, associando às recomendações de projeto as tolerâncias admissíveis durante a fabricação.

2.2.1 - CAUSAS DAS DISTORÇÕES

Existem muitos fatores que podem gerar distorções, entre eles a forma como o produto é fabricado, transportado e estocado, mas o principal fator está associado ao processo de soldagem. O calor não uniforme recebido pelo material durante o processo de soldagem gera expansão térmica diferencial ao redor da solda. A baixa temperatura do material ao redor da solda reprime a sua expansão, produzindo deformações plásticas e tensões residuais. A interação das tensões residuais e deformações plásticas produzem distorções.

2.2.2 - TIPOS DE DISTORÇÕES

Masubuchi (1980) classificou as distorções em seis categorias, conforme indica a Figura 2:

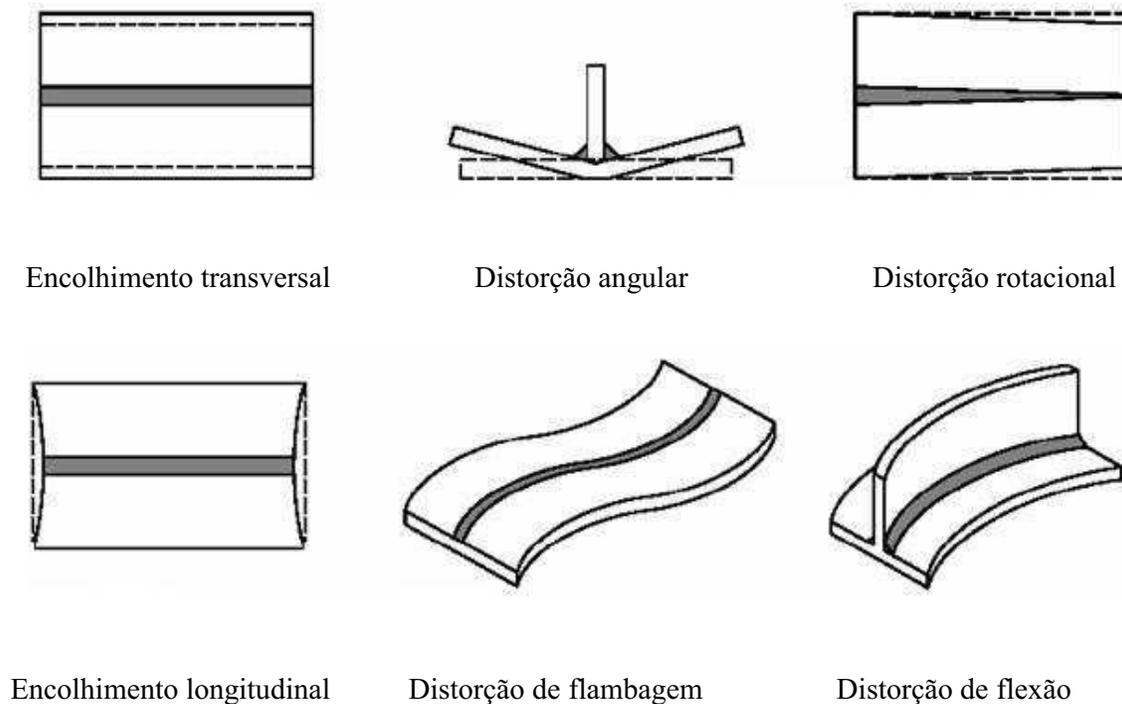


Figura 2: Tipos de distorções [Masubuchi, 1980].

A contração não-uniforme (através da espessura) produz distorção angular além da contração longitudinal e transversal. Por exemplo, numa solda de topo com chanfro em V, o primeiro passe de solda produz contração longitudinal e transversal e rotação. O segundo passe causa a rotação das chapas usando o primeiro depósito de solda como um ponto de apoio. Conseqüentemente, a soldagem equilibrada numa junta de topo com chanfro duplo V pode ser usada para produzir contração uniforme e prevenir distorção angular.

De forma similar, numa solda de filete em lado único, a contração não-uniforme produz distorção angular da perna superior. Soldas de filete em ambos os lados podem, portanto, ser usadas para controlar a distorção no filete superior, porém, devido à solda ser depositada somente em um lado da chapa (metal base), agora será produzida na chapa a distorção angular.

O envergamento (abaulamento) longitudinal nas chapas soldadas acontece quando o centro da solda não coincide com o eixo neutro da seção, de tal forma que a contração longitudinal nas soldas dobra a seção para uma forma curvada. Chapas revestidas tendem a envergar em duas direções devido à contração longitudinal e transversal do revestimento; isto produz uma forma abaulada. Abaulamento é produzido também em chaparias rígidas de reforço. As placas normalmente abaúlam para dentro entre os reforços, por causa da distorção angular nas soldas de fixação do reforço.

Em chaparias, faixas longas de tensões compressivas podem causar flambagem elástica em chapas finas, resultando em abaulamento, arqueamento ou ondulação. A distorção devido à flambagem elástica é instável: se você tentar deixar plana a chapa flambada, esta provavelmente produzirá um estalido e abaulará na direção oposta.

Torção numa seção em forma de caixa é causada pela deformação cisalhante nas juntas de canto. Esta deformação, por sua vez, é causada pela expansão térmica longitudinal desigual das extremidades adjacentes. Aumentando o número de soldas ponto para prevenir a deformação por cisalhamento freqüentemente reduz a quantidade de torção.

Para determinar o método de prevenção mais efetivo, é necessário identificar o tipo de distorção que geralmente está induzido em uma determinada estrutura. Em ordem de importância, as principais distorções presentes na construção naval e offshore são a distorção de flambagem e a distorção angular.

2.2.3 - EFEITOS DAS DISTORÇÕES

As distorções de fabricação resultam em vários problemas na construção naval e offshore. Os principais efeitos que podemos citar são: o desalinhamento de componentes estruturais, dificuldade de automação dos processos de fabricação, grande quantidade de trabalho manual, aumento de custos, redução de eficiência dos processos de fabricação, imprecisão do produto final e perda da resistência estrutural.

2.3 - TENSÕES RESIDUAIS

Tensões residuais são tensões localizadas em regiões de peças em equilíbrio que não sofrem atuação mecânica exterior, nem são restritas nem interagem com outras peças através de forças e/ou torções. São também chamadas de tensões internas e podem ser induzidas no material durante seu processamento, como por exemplo, fundição, laminação, flexão, corte à chama, forjamento, usinagem, soldagem, tratamentos térmicos, termoquímicos, tratamentos superficiais e outros.

Elas podem surgir quando o corpo é deformado plasticamente por forças exteriores, por exemplo, no caso do dobramento de uma barra ou de um tratamento superficial. Tensões residuais podem surgir em peças soldadas e/ou tratadas termicamente, devido aos elevados gradientes térmicos que causam a expansão não uniforme do material e a sua deformação plástica não uniforme. Estas tensões são freqüentemente chamadas de tensões térmicas.



Figura 3: Fotos tiradas no Estaleiro Atlântico Sul em Suape mostrando Chapas Navais com deformações provocadas por de tensões residuais oriundas do processo de soldagem

Basicamente as tensões residuais térmicas originam-se devido á complexos processos que envolvem o aquecimento das chapas, causando dilatação térmica, e de maior importância, o resfriamento subsequente, causando contração térmica. Como o material geralmente não tem como dilatar sem pressionar a matéria envolta, a mesma é pressionada ao ponto de ultrapassar o limite de escoamento.

O resfriamento subsequente termina causando a maior parte das tensões residuais propriamente ditas, sendo que devemos também considerar a composição química do material base. A velocidade de resfriamento ainda é um fator de grande influência no surgimento de tensões residuais em aços, pois esta define se a base cristalina do mesmo será do tipo ferrítica, perlítica, bainítica, austenítica ou martensítica, ou em quais proporções será a combinações destas fases cristalinas.

A figura 4 ilustra alguns exemplos de macro- e microtensões residuais originadas durante o processamento de peças mecânicas.

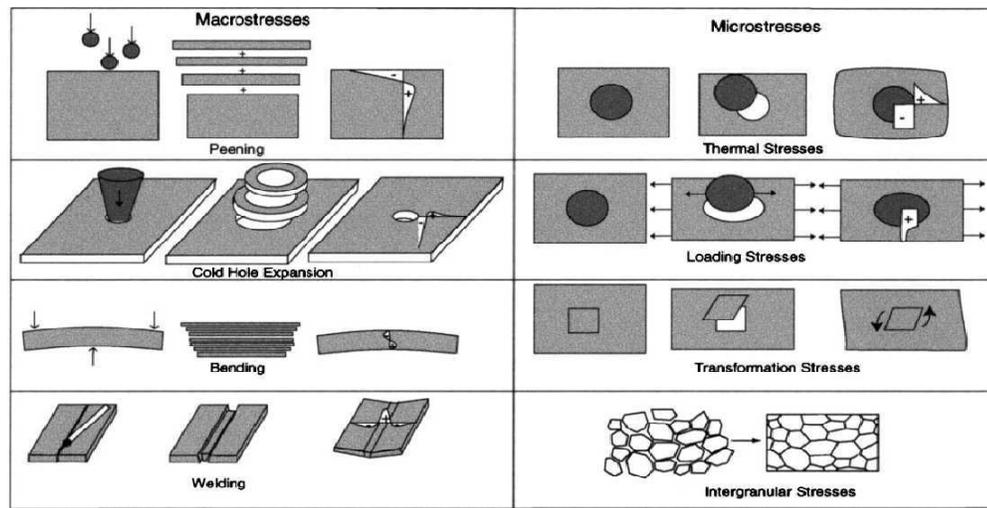


Figura 4: Exemplos de processos que causam tensões residuais [Silva C.C.].

Na prática muitos dos defeitos nas soldas como fissuras e trincas surgem após a soldagem nas zonas termicamente afetadas (ZTA) e não somente no próprio cordão de solda, devido à composição do material de adição conter elementos que atenuam os efeitos da dilatação e da contração térmica no processo de resfriamento seguinte à soldagem.

Quando aparecem defeitos no próprio cordão de solda geralmente houve algum erro processual, seja a escolha errada do material de adição (eletrodo) e/ou processos inadequados como energia alta demais, inconsistência da atmosfera protetora etc.

2.3.1 - SURGIMENTO DE TENSÕES RESIDUAIS

Na literatura sobre soldagem é frequentemente ilustrado um experimento mostrando um arranjo de três barras fixadas nas extremidades (figura 5a). Este arranjo reduz a complexidade da temática das tensões residuais provenientes da dilatação e contração térmica para apenas uma dimensão.

Quando a barra central é aquecida ela tem a tendência de aumentar o comprimento devido à dilatação térmica como mostrado na figura 5b.

No entanto ela sofrerá restrição dimensional devido às outras duas barras, as quais apresentam resistência total somada superior à da barra central. Daí ela vai sofrer uma alta tensão de compressão durante o aquecimento.

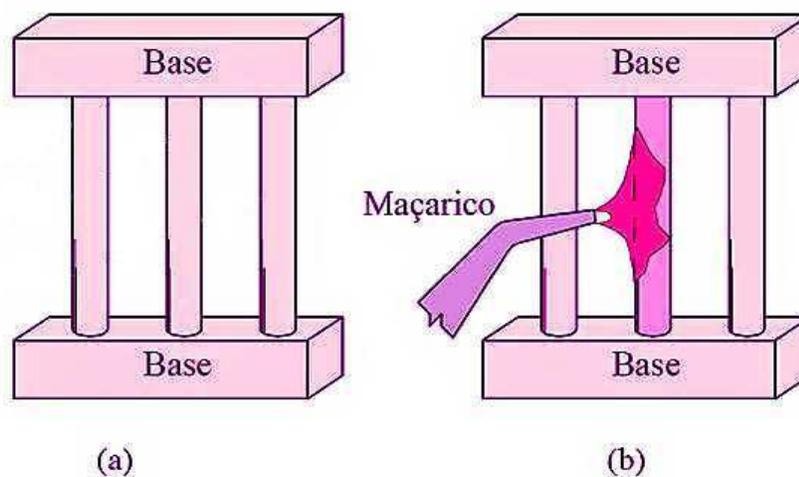


Figura 5: Arranjo de três barras fixadas nas extremidades.
 (a) sem aquecimento. (b) barra central aquecida [Modenesi 2008].

A evolução das tensões durante o aquecimento e o resfriamento subsequente é mostrada na figura 6. Ao longo do aquecimento (trecho A-B), a barra central é submetida à deformação elástica, uma vez que os níveis de tensões não são suficientes para causar deformações permanentes no material.

A barra mantém seu comprimento original, a dilatação térmica gera inicialmente apenas deformações elásticas. Quando a temperatura aumenta mais, a dilatação térmica da barra 2 se intensifica e amplia os níveis das tensões.

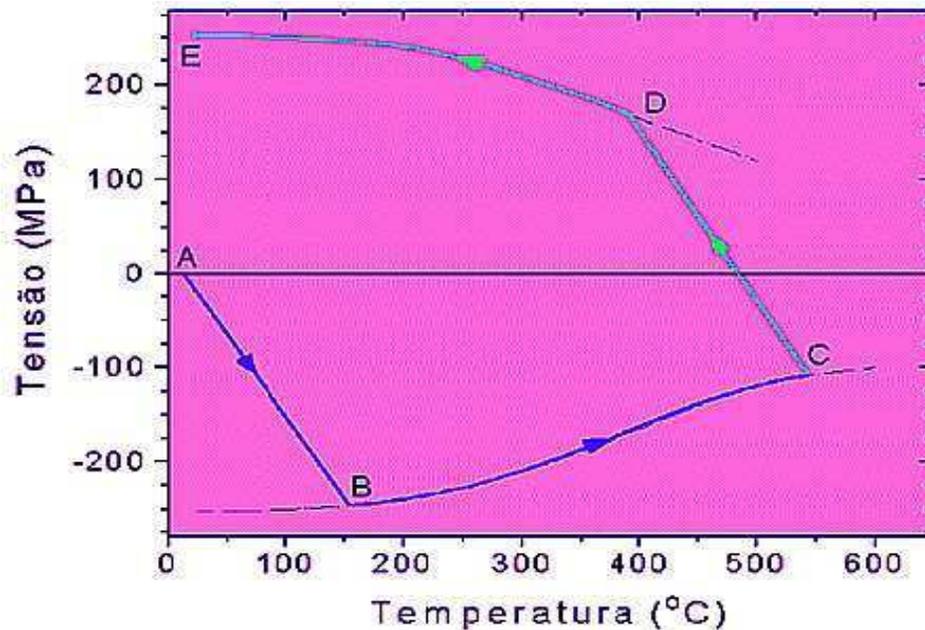


Figura 6: Ciclo térmico durante o processo de soldagem [Welding Handbook].

O aumento das temperaturas porém também causa uma mudança significativa na propriedade dos materiais especificamente em aços: a diminuição gradativa do limite de escoamento. Assim, ao atingir uma determinada elevada temperatura, a tensão se torna superior à tensão de escoamento, o material passa a experimentar deformações permanentes, ou seja: ocorre deformação plástica. Estas deformações ocorrem cada vez em níveis de tensões mais baixos (trecho B-C). Pode-se dizer, que com o aumento da temperatura até perto do ponto de fusão o limite de escoamento diminui cada vez mais e as tensões elásticas dentro da barra central diminuem na mesma relação.

Quando termina o aquecimento, inicia-se imediatamente o resfriamento (Ponto C). Neste ponto ainda permanecem tensões compressivas elásticas remanescentes, já que apenas uma parte das tensões foi transformada em deformação plástica. O resfriamento gradativo da peça é acompanhado de uma contração térmica também gradativa, causando a diminuição da tensão elástica compressiva e, mudando de sentido, as tensões na barra central tornam-se elásticas trativas, à medida que a temperatura da barra vai baixando. Ou seja: As tensões que causaram deformação elástica de compressão no ponto C vão se transformando com a diminuição gradativa da temperatura em tensões elásticas trativas até o ponto D.

Apesar de a barra central ter se deformado plasticamente (no trecho B-C) devido à expansão volumétrica, seu comprimento inicial permaneceu o mesmo desde o início do aquecimento, e com a redução da temperatura a barra central passa a ser submetida a tensões trativas (no ponto D), causadas pela restrição dimensional imposta pelas duas barras laterais, as quais estarão submetidas agora às tensões compressivas.

No ponto D, a tensão trativa é elevada até um nível de ultrapassar o limite de escoamento, que nesta temperatura ainda é menor que na temperatura ambiente. Inicia-se então outra deformação plástica, agora do tipo contração.

Com a continuada diminuição da temperatura (trecho D-E), a contração térmica é cada vez mais elevada, porém também o limite de escoamento é cada vez mais alto. Em consequência uma parte das tensões trativas adicionais provenientes da contração térmica continua durante o resfriamento é transformada em deformação plástica, outra parte é transformada em deformação elástica cada vez mais elevada, já que o limite de escoamento do material vai aumentando com a diminuição da temperatura, sempre levando em conta a restrição dimensional imposta pelas duas barras laterais.

Ao retornar para a temperatura ambiente, a barra central encontra-se submetida a um estado de tensões residuais trativas diferente do que apresentava antes do aquecimento. As barras laterais, por sua vez, estarão sendo submetidas após o resfriamento às tensões residuais compressivas, que, na soma com as tensões na barra central, equilibram o sistema.

2.3.2 - TENSÕES RESIDUAIS DE SOLDAGEM

No caso da soldagem, são considerados três fatores principais que têm influencia na formação das tensões residuais:

- 1) tensões residuais devido à contração no resfriamento (*Shrinkage residual stress*) formadas por escoamentos localizados devido ao aquecimento e resfriamento não-uniforme durante o ciclo térmico.
- 2) tensões residuais devido ao resfriamento superficial intenso (*Quenching residual stress*)
- 3) tensões residuais devido a transformações de fases (*Transformation residual stress*).

2.3.2.1 - TENSÕES RESIDUAIS DEVIDO À CONTRAÇÃO NO RESFRIAMENTO

No capítulo 2.3.1 consideramos apenas a situação unidimensional da dilatação e contração térmica. De forma generalizada para três dimensões consideramos um elemento volumétrico como base para a análise das tensões residuais devido à contração durante o resfriamento.

Durante a fase de aquecimento um determinado elemento volumétrico cúbico dentro da peça soldada sofre dilatação térmica reagindo com cada elemento vizinho de suas faces. Desta forma haverá elevadas tensões compressivas devido à dilatação térmica em todas as direções, considerando que os elementos vizinhos restrinjam a dilatação térmica do elemento volumétrico considerado. Porém o aumento da temperatura acarreta com a diminuição da tensão de escoamento e uma parte das tensões de compressão é transformada em deformação. Esta deformação se dá com maior intensidade para o lado do elemento volumétrico de temperatura mais elevada ou no caso de soldagem, para o lado do cordão da solda (figura 7), já que estes elementos volumétricos devido à temperatura mais elevada têm menos resistência (de escoamento) facilitando a deformação nesta direção.

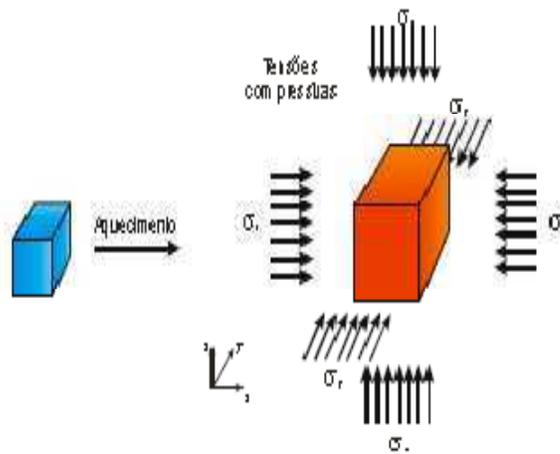


Figura 7: Elemento volumétrico durante o aquecimento [Silva C.C. 2003].

Na fase de resfriamento subsequente, ocorre uma redução de tensões compressivas devido à contração do elemento volumétrico. No entanto, como o elemento volumétrico inicialmente sofreu deformação plástica compressiva, quando volta a sua temperatura inicial seu tamanho é menor que o volume original. Com o resfriamento o elemento volumétrico é submetido às tensões trativas, devido à ação dos elementos volumétricos vizinhos que restringem a contração volumétrica do elemento.

Este fenômeno é ilustrado na figura 8 que apresenta o elemento volumétrico na condição de resfriamento e a formação de tensões trativas. Devido ao aumento do limite de escoamento em consequência da redução da temperatura, o material terá maior resistência à deformação, resultando ao final do resfriamento em tensões residuais de tração.

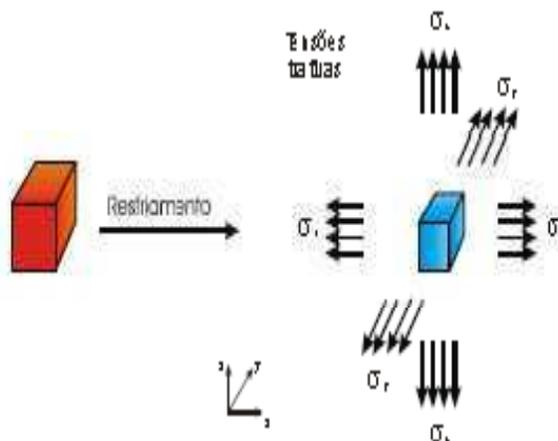


Figura 8: Elemento volumétrico durante o resfriamento [Silva C.C. 2003].

Comparando o elemento volumétrico com a barra aquecida do conjunto de três barras citada anteriormente podemos verificar uma analogia, sendo que apresentam-se condições de contornos diversos para cada direção e sentidos. Uma vez aquecida, devido o ciclo térmico de soldagem, a região mais próxima ao cordão de solda é submetida às temperaturas extremamente elevadas que resultarão em expansão volumétrica do material e redução do limite de escoamento.

Devido ao gradiente térmico, à medida que se distancia do cordão de solda, verifica-se que o nível das expansões diminui e o limite de escoamento aumenta, em relação às regiões que atingem temperaturas mais elevadas.

A figura 9 apresenta esquematicamente as variações na distribuição da temperatura e das tensões residuais durante a soldagem. A análise na seção A-A mostra que não ocorrem variações de temperatura (figura 9b) e tensões (figura 9c), uma vez que este ponto está localizado distante da poça de fusão e ainda não sofre influência do calor da soldagem.

Tomando agora a seção B-B, verifica-se um elevado gradiente térmico (figura 9b) e o surgimento de tensões (figura 9c). Observa-se no gráfico de tensões que a parte central localizada sobre o eixo x, apresenta tensão nula, uma vez que o material encontra-se no estado líquido e não sofre a ação de tensões. Na região que sofre deformação plástica verificam-se tensões compressivas, resultantes da expansão térmica do material, e na região mais afastada, na qual não ocorrem deformações plásticas, surgem tensões de tração para se contrapor as tensões compressivas e manter o estado de equilíbrio.

Com a solidificação do metal de solda, tensões residuais de tração são formadas, as quais são balanceadas pelas tensões de compressão na região de deformação plástica, como pode ser visto na figura 9c, seção C-C.

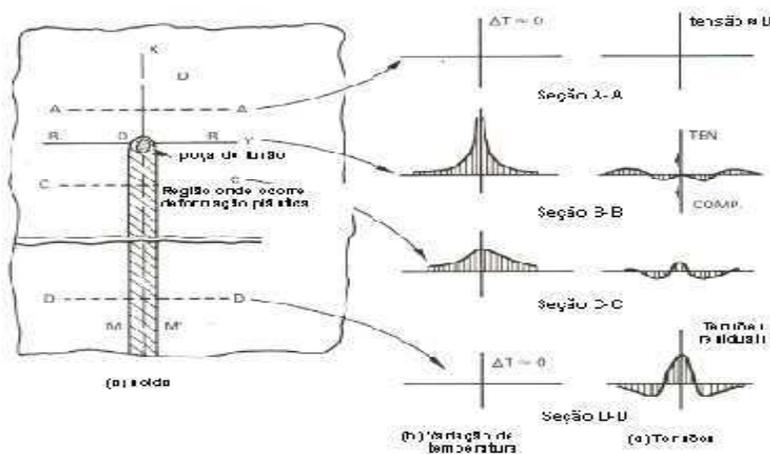


Figura 9: Distribuição de temperatura e tensões residuais [Masubuchi 1980].

Finalmente, na seção D-D, localizada a uma grande distância da fonte de calor, verifica-se uma distribuição uniforme da temperatura (figura 9b) e uma variação das tensões residuais ao longo do eixo y, com elevados níveis de tensões trativas no metal de solda e ZTA e a presença de tensões compressivas no metal de base afastado da solda.

A figura 10 apresenta a distribuição das tensões residuais de soldagem ao longo das seções transversais e longitudinais em uma junta de topo. Verifica-se que no caso da seção transversal, a distribuição de tensões segue a mesma forma da distribuição apresentada na figura 9, seção D-D.

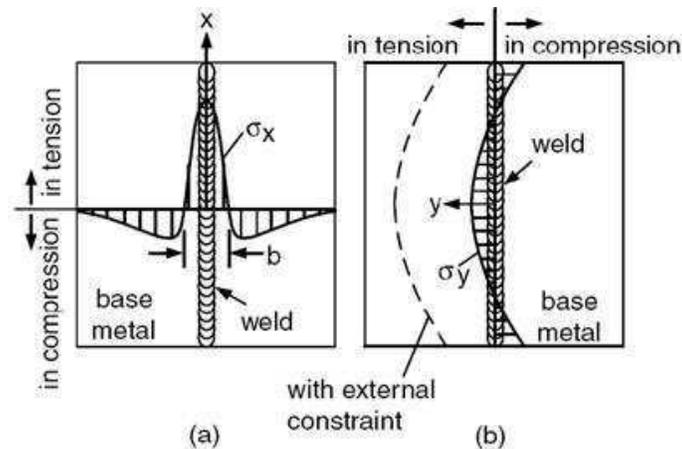


Figura 10: Distribuição das tensões residuais transversais (a) e longitudinais (b) em juntas de topo [Kou 2002].

Conforme observado na figura 10b, a distribuição de tensões residuais longitudinais (σ_y) ao longo do comprimento do cordão de solda variam de tensões de tração com baixa magnitude na porção central da solda, para tensões compressivas nas extremidades. A região central sofre uma restrição da contração térmica na direção transversal, contida pelo metal base resfriado e próximo às extremidades, equilibrando as tensões.

2.3.2.2 - TENSÕES RESIDUAIS DEVIDO AO RESFRIAMENTO SUPERFICIAL INTENSO

As tensões residuais produzidas pelo resfriamento intenso da superfície é resultado do gradiente térmico formado ao longo da espessura da junta soldada, uma vez que a superfície está em contato direto com o ar à temperatura ambiente, e esta irá trocar calor e resfriar mais rapidamente que o interior do material.

Ao resfriar, a superfície se contrai mais intensamente que o interior do material, o qual está mais aquecido. Esta contração gera tensões que causarão o escoamento localizado do material, e conseqüentemente, a formação de tensões residuais ao final do resfriamento.

As condições nas quais as tensões residuais devido ao resfriamento da superfície são mais intensas ocorrem quando a soldagem é realizada em chapas ou tubulações de grande espessura, visto que o gradiente térmico entre a superfície e o centro da peça será elevado, e que possuem baixo limite de escoamento.

Ao final do resfriamento, será verificada uma distribuição de tensões residuais compressivas na superfície e de tração no interior do material.

2.3.2.3 - TENSÕES RESIDUAIS DEVIDO ÀS TRANSFORMAÇÕES DE FASES

Outra importante fonte de tensões residuais são as transformações de fases. Nos aços, estas transformações ocorrem no estado sólido, a partir da austenita, que se transforma em diversas fases e microconstituintes tais como ferrita, perlita, bainita, martensita. As transformações podem ocorrer por dois mecanismos distintos, o difusional, no qual a transformação ocorre pelo movimento de átomos termicamente ativados, e o não-difusional, cujas fases são formadas por um mecanismo de deslizamento devido à ação de tensões cisalhantes originadas quando o material é resfriado rapidamente a partir do campo austenítico, não permitindo a decomposição da austenita em outras fases por meio de difusão atômica, ou por conformação mecânica no caso dos aços inoxidáveis austeníticos.

Os principais microconstituintes formados pelo mecanismo difusional são a ferrita, a perlita e a bainita. O segundo mecanismo é o responsável pela formação da fase martensita (Porter & Easterling, 1992).

Na soldagem, as duas regiões onde é provável a ocorrência de transformações de fase são a zona fundida (ZF) e a zona termicamente afetada (ZTA). As transformações de fase nestas regiões dependem de diversos fatores, tais como composição química, tamanho de grão, pico de temperatura atingida e velocidade de resfriamento.

O surgimento de tensões residuais devido às transformações de fase é bastante complexo. Em muitos casos, as tensões residuais estão relacionadas às variações de volume durante as transformações $\gamma \rightarrow \alpha$, mas dependendo do tipo de fase esta variação de volume não será a principal fonte de tensões residuais. Bhadeshia (2002) cita que atribuir à variação de volume a principal causa da formação de tensões residuais em transformações microestruturais é incorreto no caso da martensita e bainita. Cita ainda que a variação de forma devido à transformação tem uma componente de tensão de cisalhamento muito maior do que o termo da dilatação da fase.

Vários trabalhos evidenciam que na soldagem com simples deposição de aços que apresentam transformações de fases em baixas temperaturas, estas transformações podem reduzir as tensões residuais em regiões localizadas, como no caso da soldagem de aços baixa liga e alta resistência e aços tratáveis termicamente.

Os maiores níveis de tensões residuais à temperatura ambiente são observados quando o final da transformação da austenita ocorre em elevada temperatura. Isto ocorre por que neste caso as deformações de contração térmica não podem ser absorvidas por que a austenita já se transformou. A transformação de fase em baixa temperatura ajuda a minimizar as tensões residuais [Hirao].

2.4 - EFEITOS DAS TENSÕES RESIDUAIS SOBRE AS PROPRIEDADES DA SOLDA

As tensões residuais de soldagem podem atuar decisivamente no comportamento mecânico de componentes e estruturas, podendo ser a principal responsável pela falha dos mesmos. Isto por que, em muitos casos os níveis de tensões observados nas estruturas soldadas são da magnitude do limite de escoamento do material, a predição da influência de tensões residuais sobre a iniciação de trincas de fadiga assume que as tensões chegam a magnitude do escoamento [Hirao].

Outros autores declaram que as tensões residuais de soldagem, devido às altas velocidades de resfriamento, alcançam a magnitude do limite de escoamento, e que o máximo nível de tensão ocorre no centro da junta soldada, embora nenhum comentário específico sobre geometria de componentes ou materiais seja realizado.

A presença de elevados níveis de tensões (da magnitude do limite de escoamento) pode ocasionar a falha dos componentes de engenharia. Estas falhas estão associadas à perda de resistência, seja por rigidez insuficiente, escoamento localizado ou global, escoamento por fluência, instabilidade dimensional, formação de trincas a quente e trincas a frio, processos de fratura frágil e dúctil, fratura por fadiga, corrosão originada por tensões e desgaste superficial.

As bases cristalinas ferríticas e perlíticas proporcionam uma relação entre limite de escoamento para com o limite de resistência (ruptura) mais baixa comparada com aços com estrutura primordialmente austenítica e bainítica e a relação destes limites é mais alta nos aços martensíticos.

Quanto maior for a velocidade de resfriamento do material soldado, maior será a tendência de obter-se aço bainítico e martensítico. Estes aços ao invés de escoarem ao serem aquecidos e resfriados tendem a apresentar fissuras e trincas, que geralmente aparecem dentro de uma até duas horas após soldagem em chapas de até 50 mm de espessura.

A figura 11 mostra a variação da distribuição das tensões residuais nas áreas de chapas soldadas com a distância ao cordão de solda (direção “X”), com a distância à borda das chapas soldadas (direção “Y”) e em chapas grossas (geralmente consideradas acima de 50 mm de espessura) na direção “Z”.

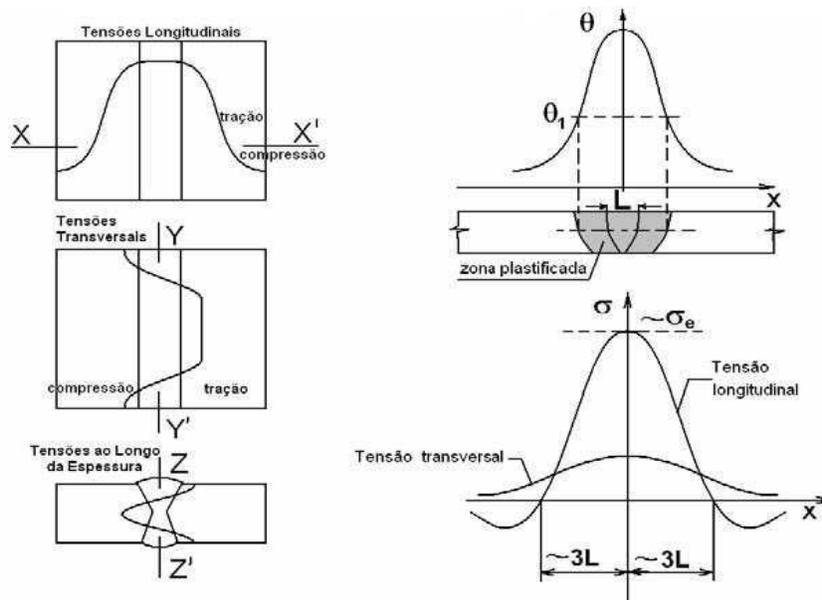


Figura 11: Distribuição de tensões residuais em peças soldadas [Gurova].

As diversas estruturas cristalinas dos aços apresentam diferentes volumes específicos. Desta forma, quando ocorre mudança de fase cristalina de aço austenítico para ferrita, perlita, bainita ou martensita, há um aumento de volume, causando uma segunda componente de tensões residuais, geralmente do tipo compressão.

Uma terceira componente causando tensões residuais são velocidades de resfriamento divergentes na superfície e no interior das peças. Este processo tende a gerar forças de compressão, primeiro no interior, pois na superfície temos a primeira contração, sendo que haverá escoamento do material nesta fase tanto na superfície (tração) como no interior (compressão).

Em seguida, com a superfície já esfriada e com volume aumentado devido ao escoamento inicial, inicia-se a contração no interior da peça, causando tensões de tração no interior e tensões de compressão na superfície da peça.

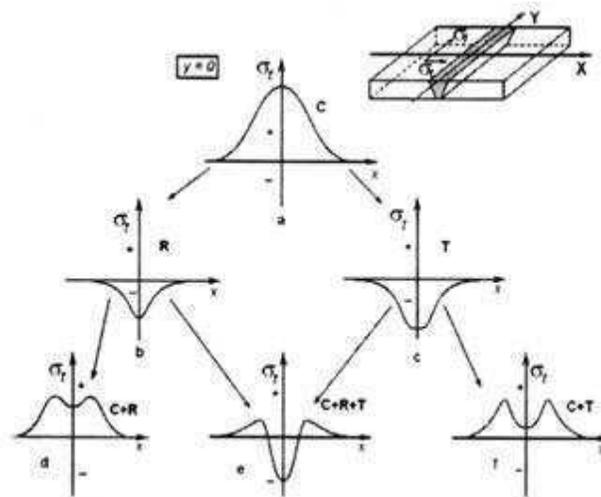


Figura 12: Representação esquemática da variação de tensões transversais (σ_1) mostrando a superposição linear dos efeitos: a) contração (C); b) resfriamento superficial mais intenso (R); c) transformação de fase (T); d) C+R; e) C+R+T; f) C+T [Gurova 2007].

A figura 12 mostra esquematicamente a coação desses três fatores: A contração devido ao resfriamento, o resfriamento superficial com velocidades superiores ao resfriamento no interior das peças e o aumento do volume devido à transformação de fase. (tensões de compressão são consideradas negativas, i.é. no eixo “Y” para baixo).

Tipicamente podemos verificar uma inversão de tensões como mostrado no caso “e” da figura 12 – junto ao cordão de solda encontramos tensões de tração e afastando-se do cordão estas tensões diminuem gradativamente e tornam-se então tensões de compressão. Com maior distancia ao cordão de solda os efeitos termoplásticos da solda vão diminuindo gradativamente e as tensões residuais praticamente não se apresentam em distancias superiores a três vezes a largura do cordão de solda, que é definida como sendo a zona termicamente afetada (ZTA).

Grande influencia sobre a grandeza das tensões residuais tem também a velocidade de resfriamento em função das dimensões das peças como mostra a figura 13:

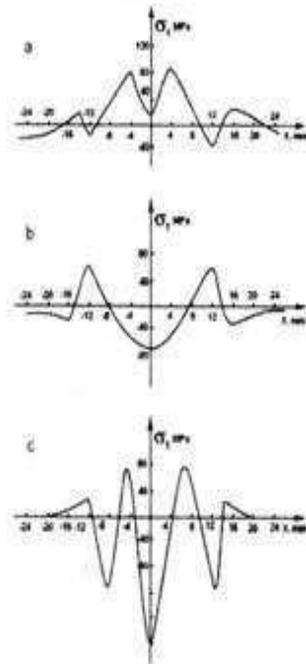


Figura 13: Tensões de solda em aço: a) espessura das placas = 2,5 mm (resfriamento no ar);
 b) espessura das placas = 10 mm (resfriamento no ar);
 c) espessura das placas = 2,5 mm (resfriamento na água) [Gurova].

Outros processos de junção de chapas por colas especiais estão sendo desenvolvidos para a construção naval, prometendo maior resistência e durabilidade que juntas soldadas, porém a produção de chapas soldadas estão prevalecendo na indústria naval até os dias de hoje.

É, portanto ainda importante para a indústria naval obter-se dados significativos sobre a qualidade da solda e as tensões residuais de chapas soldadas. Estes dados podem ser obtidos por diferentes métodos de ensaios destrutivos ou não destrutivos: a radiografia digital computadorizada de ultra-alta definição é um método não destrutivo eficaz para verificar a qualidade de uma determinada junta soldada, sendo que com este método é possível obter-se imagens do interior de soldas, mostrando possíveis defeitos nitidamente.

Comparando radiografias por filmes tradicionais ou tradicionais radiografias com imaging plates, o método também conhecido por *Project Magnification* apresenta maior resolução, maior contraste e melhor detectabilidade de micro-defeitos. Foram apresentados vários trabalhos envolvendo radiografias de chapas de alumínio e aços utilizados na indústria de máquinas em geral – no caso da indústria naval os materiais envolvidos não foram ainda submetidos á este tipo de estudo.

2.5 - MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS EM CHAPAS SOLDADAS

Existem vários métodos para medir as tensões residuais em chapas navais soldadas. Estes métodos são classificados em dois grupos:

1) Medição da tensão residual superficial

Método de Barghausen: consiste na medição de mudanças no campo magnético de materiais ferríticos, obtendo a grandeza de tensões

Método por difração de raio-X: mede a diferença do espaçamento interatômico em materiais cristalinos. A potência dos raio-X limita a leitura do espaçamento interatômico nas camadas cristalinas externas, muitas vezes apenas três ou quatro camadas.

Método com a utilização de strain gauges: é provavelmente o mais econômico. São fitas de material que são coladas ou pontuadas antes da soldagem e apresentam diferentes resistências elétricas antes e depois da deformação causada pela soldagem

Método fotográfico de radiação infravermelha: este método requer o aquecimento contínuo de uma peça examinada e, em seguida ao resfriar as regiões tensionadas resfriam com velocidades diferentes das regiões não tensionadas. A fotografia com filmes sensíveis à radiação infravermelha mostra as respectivas regiões.

2) Medição da tensão atravessando a espessura de uma peça (bulk)

Medição por nêutrons: este método é parecido com o método por difração de raio-X sendo que a potência é muito superior e atravessa peças de até vários centímetros de espessura.

Método da ressonância ultrasônica (EMAR): Foi desenvolvido no Japão pelos pesquisadores Hirao e Fukuoka. Consiste basicamente na medição da variância da velocidade do som em determinada peça tensionada.

2.6 - DEFEITOS EM SOLDAS DE CHAPAS NAVAIS

Em soldagens de peças estruturais como é o caso de chapas navais, foi observado diversos tipos de defeitos, os quais podem causar a diminuição da integridade da solda.

2.6.1 - POROSIDADE

A porosidade constitui um fenômeno de pequenas bolhas de gás inclusas no cordão de solda. Estas bolhas podem surgir ainda durante o processo de soldagem. Durante o esfriamento, a tendência é de estas minúsculas bolhas aumentarem de tamanho. A porosidade pode ocorrer de forma singular, verificando-se apenas uma bolha ou em quantidades relevantes, nestes casos classificam-se em três tipos (figura 14).

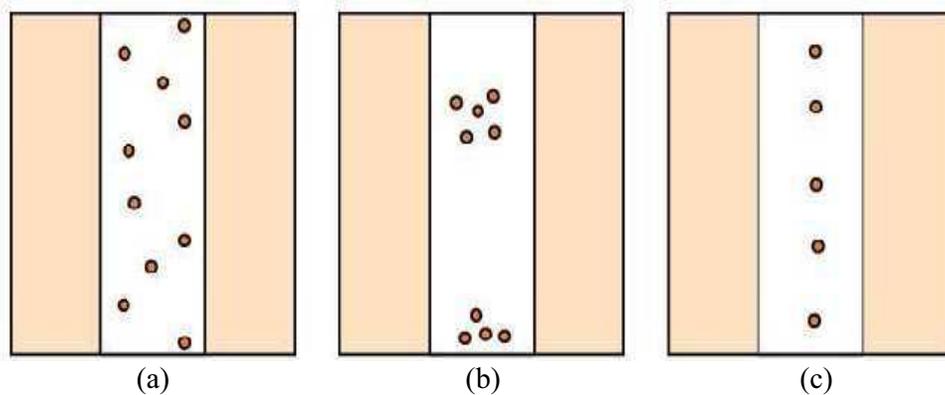


Figura 14: Esquema de distribuição de bolhas em diferentes casos de Porosidade. (a) distribuição aleatória, (b) agrupados e (c) alinhados [Modenesi 2001].

As causas para o surgimento de porosidade são: sujeira, umidade, oxidação do material base ou do eletrodo, por distúrbios na atmosfera protetora e/ou parâmetros de soldagem inadequados

2.6.2 - INCLUSÃO DE ESCÓRIA

Na prática de soldagem de chapas grossas, regularmente são executados vários passes de solda para preencher o espaço dos chanfres entre as duas chapas com material de adição. Entre cada passe, o operário tem que limpar as superfícies das escórias resultantes de toda operação de soldagem. Em alguns casos, esta limpeza não é feita de forma suficientemente eficiente, resultando a permanência de uma camada de escória na superfície entre um passe e outro.



Figura 15: Esquema de um típico exemplo de inclusão de escória entre um passe de solda e outro [Modenesi 2001].

2.6.3 - FALTA DE FUSÃO

Principalmente pelo uso de parâmetros de soldagem inadequados como, por exemplo, energia de soldagem baixa e conseqüente pouco aquecimento, pode ocorrer a falta de fusão entre o material de adição e o material base. A geometria das peças soldadas também tem influência na ocorrência deste fenômeno.

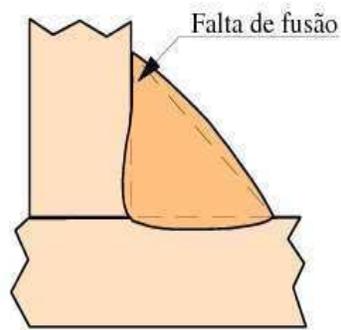


Figura 16: Esquemática do fenômeno da falta de fusão [Modenesi 2001].

A falta de fusão ainda pode se originar pela manipulação inadequada pelo operador, sujeira nas superfícies ou chanfros no material base muito fechados.

2.6.4 - FALTA DE PENETRAÇÃO

Esta falha se refere à falta de preenchimento com material de adição do campo entre os chanfros das peças (figura 17). É causado frequentemente pela manipulação inadequada do eletrodo, porém o próprio projeto também tem influência, se os chanfros tiverem projetados com ângulos muito agudos, por exemplo.

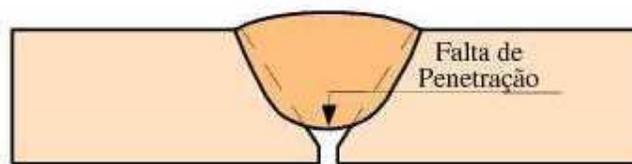


Figura 17: Desenho esquemático do fenômeno de falta de penetração [Modenesi 2001].

Em alguns casos, a utilização de energias baixas têm levado a este tipo de defeito. Existem casos especiais, onde o projeto prevê a falta de penetração proposital.

2.6.5 - MORDEDURA

Ao finalizar a soldagem de duas chapas, nos últimos passes, o operador deve assegurar o acabamento liso da superfície da solda. A mordedura provoca concentrações de tensões e deve ser evitada.

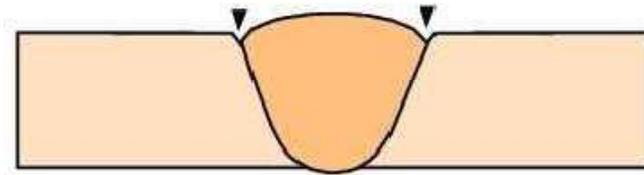


Figura 18: Esquemática de mordeduras em peças soldadas [Modenesi 2001].

Na figura 18 estão mostradas duas setas indicando o local de ocorrência de mordeduras nos passes finais. Quando ocorrem em passes intermediários, elas acarretam em falta de fusão ou inclusão de escórias. Mordeduras são causadas por manipulação inadequada do eletrodo, por velocidade excessivamente elevada de soldagem e pelo uso de parâmetros inadequados como corrente elevada ou comprimento do arco elevado.

2.6.6 - TRINCAS

A presença de trincas indica elevadas tensões residuais. São considerados os defeitos mais graves por diminuírem substancialmente a resistência da solda. Trincas geralmente aparecem após a fase de resfriamento, quando as tensões existentes ultrapassam a resistência do material, desfazendo a integridade da solda em regiões localizadas em meio da solda. Em alguns casos, as trincas aparecem já no próprio processo de soldagem ou em operações pós soldagem. É sinal também da fragilização da solda freqüentemente ocorrida após velocidades de resfriamento muito elevado.

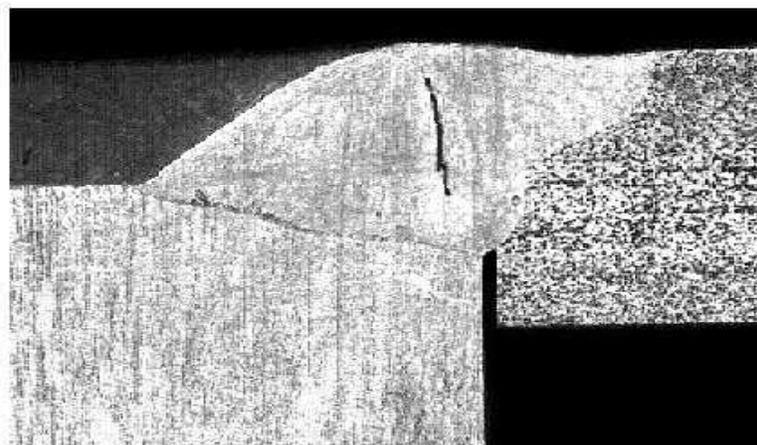


Figura 19: Foto de uma solda trincada [Modenesi 2001].

2.7 - RADIOGRAFIA DE SOLDAS

Os aspectos fundamentais envolvendo radiografias de solda de chapas navais envolvem os filmes radiográficos, Imaging Plates e detectores digitais. O principal objetivo na elaboração de radiografias é a detecção de falhas e defeitos, que por sua vez só podem ser visualizadas com imagens de boa qualidade e nitidez.

2.7.1 - FILMES RADIOGRÁFICOS

Ao considerar radiografias deve se levar em conta o tipo do filme, o qual é decisivo para quase todos os aspectos de qualidade da imagem e processamento. Os filmes convencionais são compostos de uma emulsão e uma base. A emulsão consiste em uma camada fina de gelatina, que contém disperso no seu interior, um grande número de cristais de brometo de prata. A emulsão é mantida sobre uma base que é geralmente de material celulósica. Uma característica importante dos filmes radiográficos em relação ao filmes fotográficos é que a emulsão é adicionada em ambos os lados da base.



Figura 20: Estrutura básica de um filme radiográfico.

Os cristais de brometo de prata, presentes na emulsão, quando atingidos pela radiação ou luz, tornaram-se susceptíveis para reagir com o produto químico revelador. O revelador atua sobre esses cristais promovendo a redução em prata metálica negra.

2.7.2 - IMAGING PLATE

O processo de elaboração de radiografias computadorizadas com Imaging Plates (IP) em muito se assemelha com o processo de elaboração de radiografias comuns. Constitui-se de uma fonte de raios-X, uma amostra a ser radiografada e um IP, em substituição aos filmes comuns. O IP guarda informação de acordo com a intensidade de radiação com qual estiver exposto. Essa informação é posteriormente escaneada e transformada em um arquivo digital de imagem. Essa imagem pode ser então tratada, ampliada e manipulada para melhor visualização dos detalhes do objeto radiografado.

O Imaging Plate consiste basicamente de três camadas: uma base celulósica, a camada sensível à radiação e uma camada protetora. A camada foto-estimulável contém moléculas de fósforo capazes de capturar e armazenar a energia radiográfica, à qual for exposta. A leitura do IP requer aparelhagem (scanner) especial, onde um feixe de raio laser varre a superfície do IP, liberando luz visível, de acordo com a energia contida em cada ponto do IP.

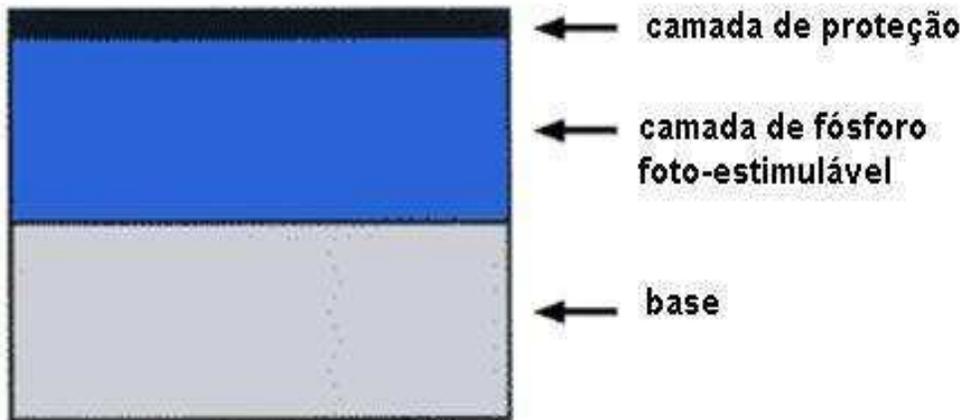


Figura21: Estrutura básica de um Imaging Plate [Fujifilm].



Figura 22: Princípio do escaneamento do Imaging Plate: Um raio laser efetua a varredura da área da imagem, liberando luminescência, à qual é capturada e arquivada pelo sistema, transformando em sua soma as informações em imagem radiográfica visível na tela do computador ou impressa [Fujifilm].

O Imaging Plate apresenta um grande avanço na tecnologia de obtenção de imagens radiográficas, quando comparado com filmes radiográficos convencionais. Em primeiro lugar deve se considerar a sensibilidade à exposição de raio-X, que é em torno de cem vezes superior ao filme.

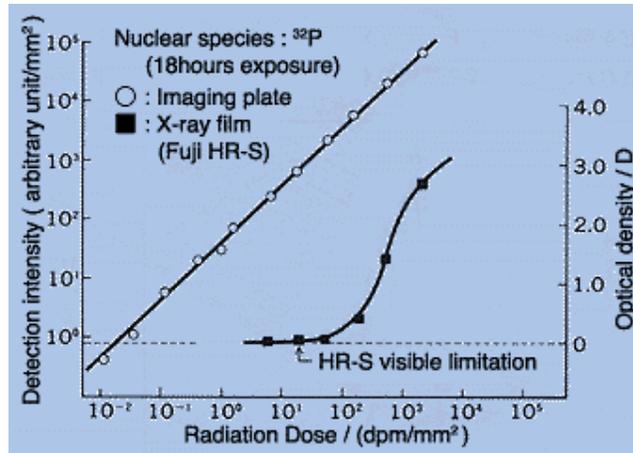


Figura 23: Comparação entre Imaging Plate e filme radiográfico convencional. Com doses mais de 100 vezes menores, o IP apresenta imagens com possibilidade de detecção de detalhes comparáveis ao filme convencional [Fujifilm].

Na figura 23 encontra-se na escala horizontal a quantidade de exposição a raio-X. A escala vertical à esquerda representa a quantidade de luminescência encontrada na placa gráfica. O escala vertical à direita representa a densidade de enegrecimento do IP respectivamente do filme convencional. A linha pontilhada horizontal representa a limitação visível isto é: a mínima densidade respectivamente enegrecimento necessário para poder fazer distinções de detalhes da imagem. Para efetuar determinadas medições é necessário acerca de dez vezes mais intensidade/enegrecimento, que a limitação visível. Esta curva é característica para as mais diversas fontes, tanto raios beta de diferentes energias, raios de elétrons, raios-X e raios gama.

Comparados com outros sensores de imagem de radiação, as principais vantagens dos Imaging Plates são:

- 1) Ultra-alta sensibilidade: dezenas de vezes mais sensíveis que o filme convencional, e casualmente até milhares de vezes, dependendo da amostra.
- 2) Faixa dinâmica ampliada: Uma ampla faixa de 10^4 até 10^5 acima da faixa de 10^2 correspondentes aos métodos fotográficos.
- 3) Excelente linearidade: A emissão de fluorescência é proporcional à exposição em todo intervalo.
- 4) Maior resolução espacial: Quando comparado com outros sistemas eletrônicos, uma maior densidade de pixel pode ser obtida para atender a finalidade do sistema embora menos livremente que em filmes
- 5) Os sinais digitais elétricos são diretamente disponíveis a partir do escaneador. A computação e o processamento ou a combinação com outros sistemas eletrônicos é fácil.

- 6) Devido ao uso de um detector integral, o IP produz menos erros de detecção, mesmo com densidades de alto fluxo, o que frequentemente acontece com detectores tipo pulso como é o caso do tubo de contagem proporcional e contadores de cintilação.
- 7) O Imaging Plate pode ser apagado e re-utilizado. Ele substitui os filmes radiográficos convencionais, visualiza a imagem radiográfica latente com alta sensibilidade através de processos digitais utilizados também nos filmes radiográficos convencionais e também faz com que seja possível quantificar a posição e intensidade de detalhes da radiografia. [Fujifilm]

A consequência na prática da construção naval é além da facilidade de obter imagens com maior qualidade, a utilização de cargas de raio-X relativamente baixas. Com isto abrem-se possibilidades de elaborar radiografias durante o expediente funcional de estaleiros. Com o uso de fontes radioativas e filmes radiográficos convencionais, a elaboração de radiografias (gamagrafia) é restrita a horários fora do expediente funcional, durante a noite ou em fins de semana, devido ao alto risco de exposição à radiação para os operários. Esta vantagem se torna imensa no caso específico da construção de plataformas de petróleo marítimas, onde as normas prescrevem o exame radiográfico de 100% das chapas soldadas devido à exposição permanente ao ambiente agressivo da água do mar.

2.7.3 - QUALIDADE DA IMAGEM RADIOGRÁFICA

Qualidade de imagem é um conceito relativo na aplicação industrial, dependendo ainda da área a qual está sendo destinada. É possível aceitar uma imagem revelada como sendo satisfatória, dependendo dos fatos em relação ao que seja pretendido com a observação da radiografia. Em determinadas aplicações existem necessidades de verificar mais detalhes. Os campos mais exigentes são a engenharia nuclear, a indústria aeroespacial, a área bélica e em pesquisas científicas – na construção de navios e plataformas as exigências são um pouco inferiores, porém permitem a utilização de qualidades de imagens consideradas ainda altas.

Existem empresas que oferecem serviços de elaboração de raio-X, os quais utilizam indicadores de qualidade de imagem (IQI) e outras não aplicam esse importante parâmetro (regido por normas internacionais), isso ocorre devido aos altos custos e o objetivo final de se obter uma imagem radiográfica.

Klaus Bavendiek indica que os parâmetros envolvendo a qualidade das imagens radiográficas são definidos em normas internacionais como a ASTM E 94 para sistemas de filme, no entanto para radiografias digitais foram adotados outros parâmetros definidos na ASTM E 1000, E 1316. Dois grupos distintos de parâmetros são utilizados:

1) os parâmetros clássicos utilizados em radiografias de filme convencional

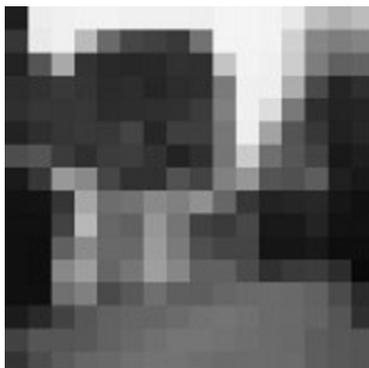
- SR_B = Resolução espacial básica (Basic spacial Resolution) - consiste na resolução geométrica em direções X e Y. Ela descreve o menor detalhe perpendicular ao raio-x que pode ser observado na imagem. É também conhecida por resolução efetiva de pixel e corresponde à metade do grau de nitidez.

- Contraste relativo - representa a razão da diferença da intensidade de enegrecimento de duas áreas adjacentes da imagem os quais representam diferentes espessuras do material para a média dos dois valores encontradas das respectivas áreas.
- Ruído relativo – o ruído relativo é obtido medindo-se a razão do desvio padrão da intensidade de enegrecimento em uma determinada área que fora exposta homogeneamente e a média desta intensidade. Um determinado detalhe só pode ser visto em uma radiografia, se o contraste deste detalhe for superior ao ruído.

1) os parâmetros na prática utilizando-se radiografias digitais

- SR_B = Resolução espacial básica (Basic Spacial Resolution) - consiste na resolução geométrica em direções X e Y. Ela descreve o menor detalhe perpendicular ao raio-x que pode ser observado na imagem. É também conhecida por resolução efetiva de pixel e corresponde à metade do grau de nitidez.
- CS = Sensibilidade de contraste – é a resolução do contraste em direção do raio-x. Ela descreve a menor variação de espessura detectável na imagem.
- SNR = Razão entre sinal e ruído (Signal to Noise Ratio) – corresponde ao inverso do ruído relativo. Desde que é uma grandeza independente do objeto testado, este parâmetro é muito útil na radiografia digital.
- CNR = Razão entre contraste e ruído (Contrast to Noise Ratio) – representa o quociente do contraste e o ruído, também o quociente do contraste relativo com o ruído relativo. Ela descreve o poder de detectar diferenças na espessura do material.
- GLR = Resolução de níveis de cinza (Grey Level Resolution) – caracteriza a quantidade de tons de cinza disponíveis para a observação e interpretação da imagem.

A figura 24 demonstra os efeitos de alguns dos parâmetros listados acima.



$SR_B = 16 \times 16$ pixel



$SR_B = 64 \times 64$ pixel



$SR_B = 256 \times 256$ pixel

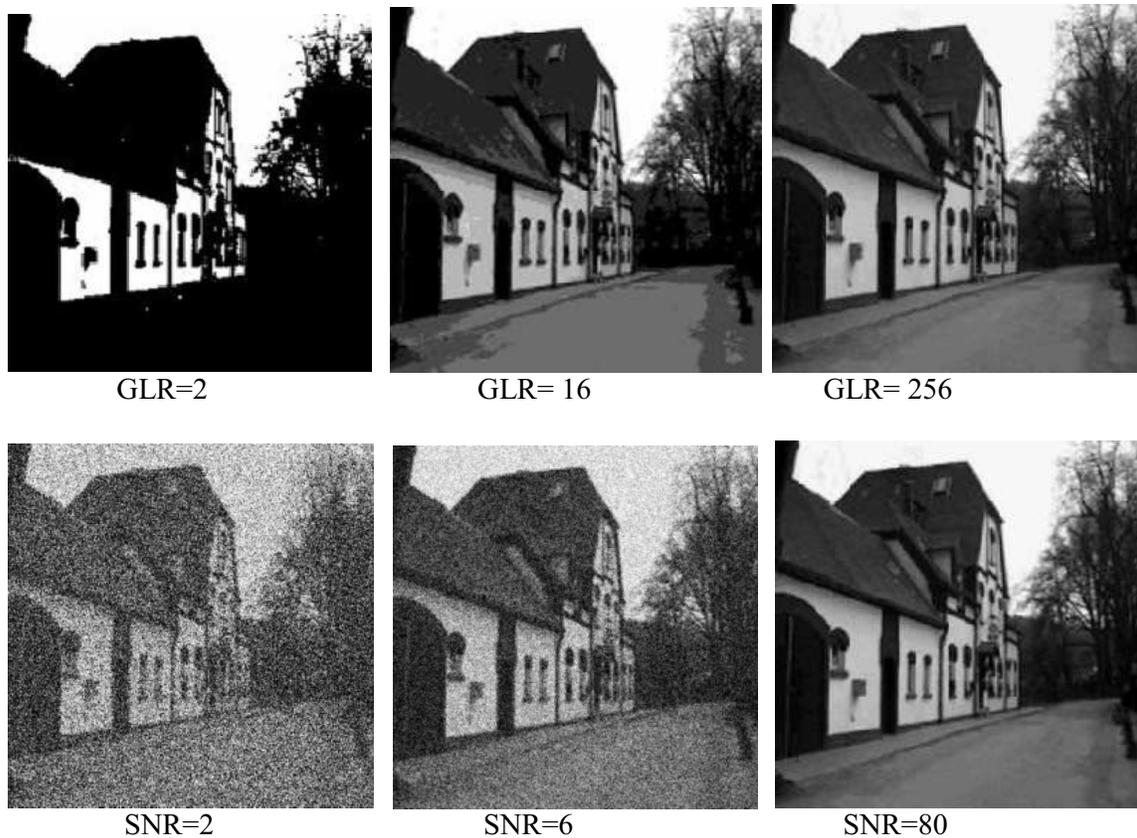


Figura 24: Exemplos de três parâmetros utilizados em radiografias digitais: SR_B (resolução espacial básica), GLR (resolução de níveis de cinza) e SNR (razão entre sinal e ruído). [Bavendiek].

2.7.4 - DIGITAL DETECTOR ARRAY (DDA)

No BAM – Bundesanstalt für Materialforschung em Berlin, Alemanha, vem sendo desenvolvido pelos pesquisadores Ewert, Zscherpel, Bavendiek e outros um método de obtenção de radiografias computacionais, que promete uma qualidade superior às radiografias convencionais utilizando filmes. Este método tem o potencial para substituir o filme de raios-X, revolucionando a técnica radiológica. São utilizados detectores de raio-X digitais em combinação com fontes de raio-X microfocais. Estes detectores permitem novas aplicações, com novos métodos eficazes e mais rápidos, pois permitem a análise de peças online, i.é. no momento em qual é feita a radiografia. O método dispensa por completo o uso de filmes e/ou scaneadores.

Estudos a respeito do método DDA comprovaram que se trata é um método econômico e rápido par inspecionar soldas, foi constatado que o sistema DDA visualiza uma falha com aproximadamente 60 por cento menor que a detectada no sistema usando filmes convencionais [Ewert].

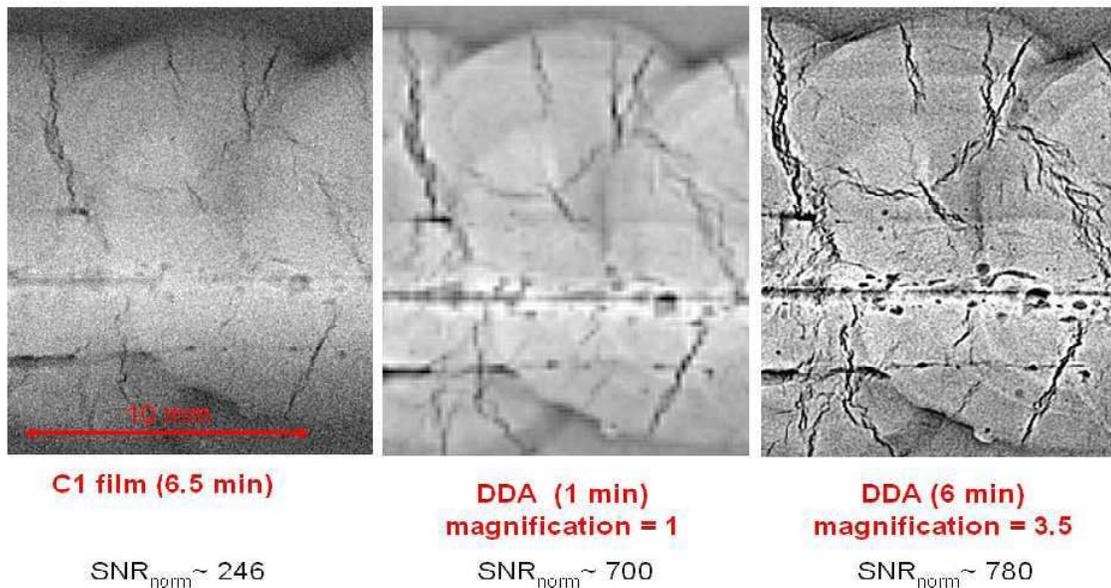


Figura 25: Comparação da qualidade de imagem do melhor filme convencional (à esquerda), radiografia computacional sem ampliação (centro) e com a ampliação de 3,5 DDA (à direita). [Ewert].

A tecnologia DDA consiste na utilização de sensores digitais os quais reagem em tempo real à radiação (figuras 26 e 27). Os sensores estão conectados a um computador, permitindo ao usuário verificar as imagens de peças radiografadas imediatamente – o tempo de ensaio é reduzido, quando comparado com radiografias com filme tradicional ou utilizando Imaging Plates, já que estes métodos requerem um tempo considerável para obter as imagens – no caso do filme tradicional é necessário revelar o filme, secar etc. – no caso do Imaging Plate o mesmo deve ser transportado até o scanner, também o tempo de escaneamento é considerável.

A principal razão para a vantagem do sistema digital é uma taxa de detecção muito superior devido ao maior índice de níveis de contraste, possibilitando a detecção de pequenas variações na espessura da peça e conseqüentemente a possibilidade de detectar falhas menores. O aumento do SNR no sistema DDA comparado ao filme convencional permite até mesmo sem aumento (Projection Magnification) uma melhor detectabilidade de trincas.

Um DDA com resolução espacial SR_B de 0,2 mm oferece mais nitidez que um filme que tem um SR_B inferior a 0,05 mm. Utilizando um aumento de 3.5 (Projection Magnification) então podem ser observados muito mais detalhes no DDA comparado ao filme. Em filmes convencionais há uma limitação devido à limitação da densidade óptica $D =$ cerca 4.7. Além disto existe também a limitação de uma dosagem de raio-X máxima. Filmes não podem ser lidos (escaneados) com densidades ópticas acima de $D=5$. Comparado com radiografia computacional existem apenas a limitação dos ruídos estruturais. Até agora, o SNR_{Norm} máximo encontrado em medições foi abaixo de $300\mu m$ [Ewert].

A utilização de uma fonte radiográfica microfocal, com dimensões abaixo de 0.1 mm, também têm contribuído para o aumento da nitidez das radiografias. No entanto esta tecnologia só pode ser aplicada ao uso de Imaging Plates ou detectores digitais, já que as fontes microfocais ainda não apresentam nível de radiação elevada o suficiente para ser usada em filmes tradicionais.

2.7.5 - DETECTORES DIGITAIS

Os detectores digitais classificam-se basicamente em duas categorias:

- 1) Detectores que convertem os raios-X através de um dispositivo denominado de scintilizador em luz visível, transformando-a em sinal elétrico por uma rede de silicone amorfa posicionada diretamente atrás do scintilizador. O sinal elétrico é amplificado, digitalizado, processado e enviado a um monitor de alta resolução.
- 2) Detectores que convertem os raio-X de forma direta em sinais elétricos. Esta classe de detectores digitais apresenta resolução um pouco superior àqueles utilizando scintilizadores, porém tem custo muito mais elevado.



Figura 26: Esquema da construção de um detector digital utilizando camada de scintilizadores [<http://www.gehealthcare.com/usen/xr/cardiovascular/products/innova4100image.html> acesso em 15.03.2010].

A capacidade de visualização deste sistema é muito superior às radiografias obtidas por filmes convencionais, além de ser on-line, isto, a imagem radiográfica é elaborada no mesmo momento, sem procedimentos intermediários tais como desenvolver filme e/ou digitalização. Os sistemas de detectores digitais permitem maior rapidez e eficiência no exame radiográfico de peças, podendo a imagem obtida ser aprimorada imediatamente por técnicas de pós-processamento como, por exemplo, o programa Isee!.



Figura 27: Foto de um detector digital
 [<<http://www.securitydefense.com/paxscan4030R.htm>> acesso em 15.03.2010].

2.7.6 - PROJECTION MAGNIFICATION

A teoria da técnica denominada “Projection Magnification” consiste no distanciamento do filme, Imaging Plate ou do detector digital do objeto examinado. O raio-X se propaga como qualquer onda eletromagnética, a fonte do raio-X geralmente produz um feixe, o qual forma um cone, visto de lado (ou de cima) do conjunto experimental.

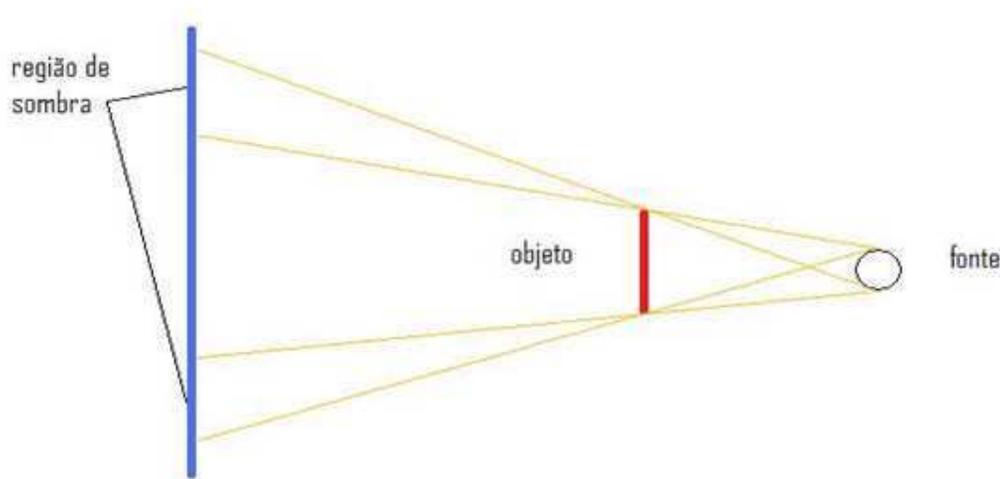


Figura 28: Visualização do conceito da técnica “Projection Magnification” com uma fonte relativamente grande.

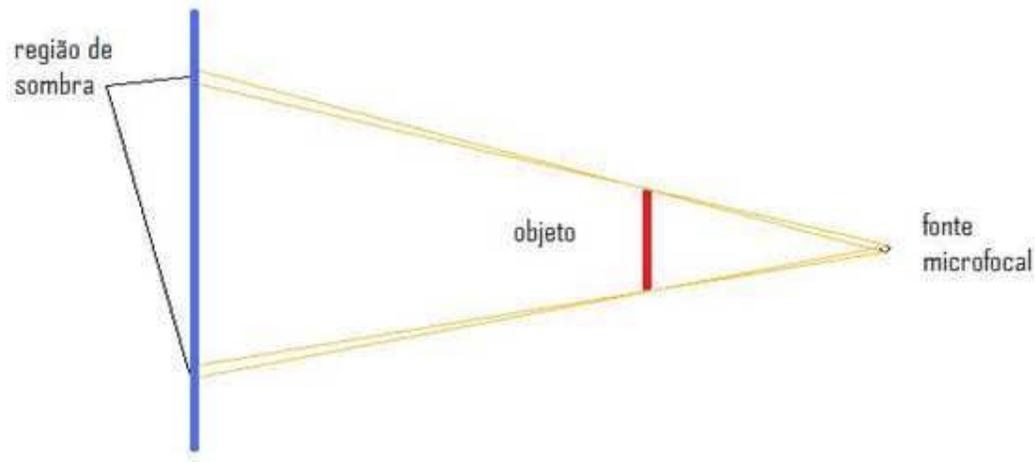


Figura 29: Visualização do conceito da técnica “Projection Magnification” com uma fonte microfocal.

As figuras 28 e 29 mostram dois diferentes casos: na figura 28 é utilizada uma fonte comum. Esta fonte com dimensões em torno de décimos de milímetros gera uma região de sombra relativamente grande, acarretando em perda de nitidez da imagem. A figura 29 mostra em contrapartida o efeito da utilização de uma fonte microfocal com dimensões entre 5 e 20 micrômetros: a área exposta à sombra é substancialmente menor, a qualidade da imagem é muito superior. As fontes microfocais geralmente apresentam potências inferiores causando a necessidade de tempos de exposição maiores e isto, por sua vez tende a aumentar os ruídos.

Existem outros fatores que ainda têm influencia na qualidade da imagem utilizando este método, como a resolução do filme respectivamente do Imaging Plate ou tamanho do pixel do detector digital. Blakely mostra, que para determinada resolução de um filme (IP respectivamente detector digital) e determinada dimensão da fonte existe uma relação ideal da distância do objeto ao filme e do objeto à fonte para obter-se uma considerável melhora da qualidade da radiografia:

$$a = f \frac{b}{(p+f)} \quad [\text{Blakely 2005}]$$

(1)

Onde

a é a distância do fonte ao objeto radiografado

b é a distância da fonte até o filme, Imaging Plate ou detector digital

f é o tamanho do foco da fonte e

p é a resolução respectivamente o tamanho do pixel

Percebe-se, que na prática uma fonte de tamanho convencional oferece por um lado um aumento significativo da imagem, o que resultaria em melhoramento da imagem, por outro lado a região sombreada desfaz esta vantagem e pode até no total diminuir a qualidade final da radiografia. Devido este aspecto vêm sendo desenvolvidos fontes de raio-X cada vez menores chegando ao tamanho de focos micrométricos (microfocal), favorecendo a Projection Magnification.

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E METODOLOGIA

Todos os materiais utilizados para a execução dos experimentos pesquisados assim como os equipamentos, software e laboratórios foram cedidos pelo Laboratório de Materiais do Centro de Tecnologia e Geociências. A metodologia dos experimentos segue o padrão científico para a repetibilidade dos dados obtidos.

3.1 - MATERIAIS

Chapa naval (Peça 03) de 500 mm X 500 mm com 19 mm de espessura unida por solda (figura 40), a chapa naval 03 foi obtida de uma chapa naval originalmente soldada em um Gabarito (figura 30).

Para a comprovação do método utilizado neste trabalho foi utilizado

- Um segmento de tubulação unido por solda, apresentando um bom estado de conservação e diâmetro externo de 114,85 mm; 4,45 mm de espessura; e 200 mm de comprimento. (peça 1, figura 31),
- Um segmento de tubulação unido por solda, apresentando alto grau de corrosão e diâmetro externo de 114,52 mm; 3,31 mm de espessura; e 200 mm de comprimento. (peça 2, figura 31),
- Um joelho de 90° usado em sistemas de alta pressão apresentando um bom estado de conservação com diâmetro externo de 64,15 mm; e 7,99 mm de espessura (peça 3, figura 31).



Figura 30: Amostra original da chapa naval presa em gabarito. Posteriormente foram recortadas três partes desta chapa. Foto tirada no laboratório da COPPE/Rio de Janeiro.

O projeto de pesquisa inclui também o estudo de diminuição de tensões residuais, verificando-se vários métodos de soldagem de chapas navais presas em gabarito (figuras 30 e

38). Após soltas do gabarito, as chapas ficaram deformadas devido às tensões residuais oriundas do processo de soldagem.

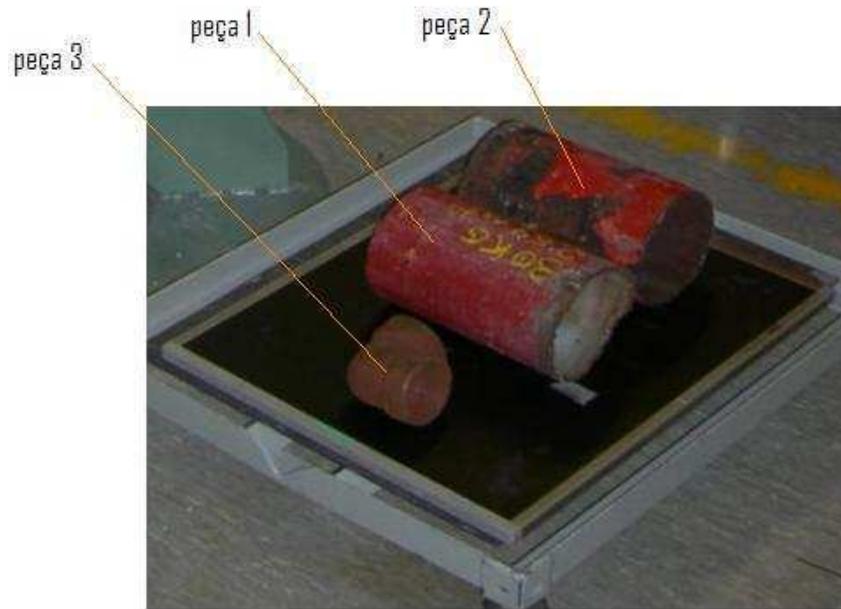


Figura 31: Joelho e os dois segmentos de tubulação usados na comprovação dos métodos da análise dimensional.

3.2 - METODOLOGIA DO TRABALHO

Na aquisição das imagens foram utilizados filmes IP (Imaging Plate), e um scanner laser modelo Cyclone da Perkin Elmer. A fonte de raios-x de 120 kV - 1 mA, foco de 0,8 mm, com uma angulação de até 60° na vertical. A versão do MATLAB © foi a 7.0 Release 14, o software ISee! © V1. 9.0 e o software comercial o Cyclone (obtenção e tratamento inicial de imagem).

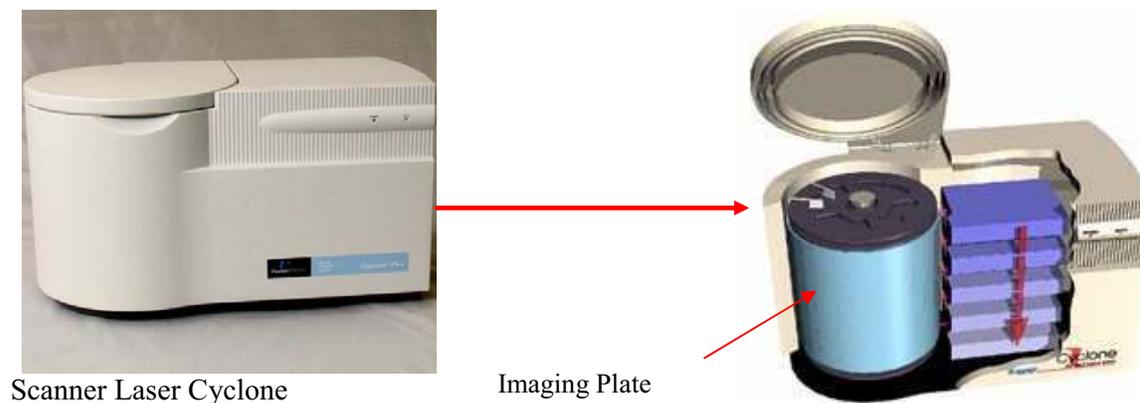


Figura 32: Scanner Laser Cyclone utilizado para efetuar a leitura do Imaging Plate.



Figura 33: Fonte de raios-X utilizada, com 120 kV - 1 mA, foco de 0,8mm e uma angulação de até 60° na vertical.

A fonte de raio-X utilizada (figura 33) tinha como capacidade máxima indicada pelo fabricante ao início da elaboração das radiografias sendo a radiografia em chapas de até 15 mm. Posteriormente este valor foi alterado. As chapas radiografadas em laboratório apresentam uma espessura de 19 mm, significativamente mais elevada que a indicação do fabricante. Mesmo assim podemos considerar as radiografias tiradas em laboratório sendo de ótima qualidade: A utilização do IP, que é muito mais sensível que o tradicional filme radiográfico, compensou mais que o necessário para a obtenção das imagens. Foram utilizados basicamente dois tipos de arranjos experimentais, com o IP encostado na chapa e outro com o IP afastado (figura 34).

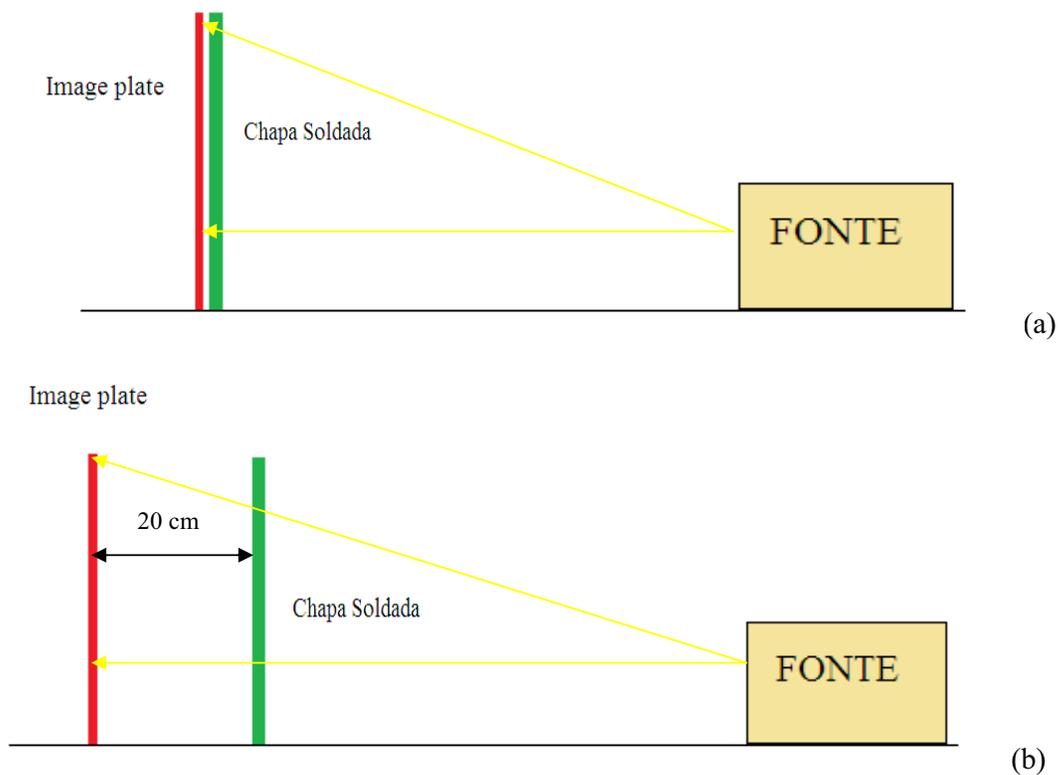


Figura 34: Desenhos esquemáticos das duas estruturas de ensaio utilizados na obtenção das radiografias.

As imagens mostradas adiante apresentam porosidade e inclusão de escória, que podem comprometer a resistência mecânica, ocasionando casualmente a quebra do cordão de solda.

Mesmo trincas superficiais podem não ser visíveis devido ao acúmulo de sujeira sobre a superfície da solda impedindo sua visualização por simples inspeção visual.

A soldagem tem por definição obter a união de duas ou mais peças, assegurando, na junta soldada, a continuidade de propriedades físicas, químicas e metalúrgicas. A sua aplicação atinge desde pequenos componentes eletrônicos até grandes estruturas e equipamentos, como por exemplo: pontes, navios, tubulações. As imagens foram processadas com o programa Isee!.

Para radiografar as chapas foram montadas duas estruturas. Na primeira estrutura, o IP foi colocado junto à chapa soldada e a fonte ficou afastada com diversas distâncias. Na segunda estrutura, não apenas a fonte ficou separada da chapa soldada, mas também o IP (figura 34).

3.2.1 - PROCEDIMENTO PARA REALIZAÇÃO DE RADIOGRAFIAS NO BUNKER DO LABORATÓRIO DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

O procedimento a nível técnico para a realização de radiografias é constituído basicamente de oito passos:

1. Ligar o scanner e o computador
2. Estabelecer comunicação entre o scanner e o computador
3. Posicionar a fonte, a amostra e o IP
4. Configurar a fonte
5. Acionar a fonte
6. Escanear o IP
7. Apagar o IP
8. Desligar o scanner e o computador

Considera-se o arquivamento dos dados obtidos com nomes relevantes.

3.2.2 - PROCESSAMENTO DE IMAGENS DIGITAIS

Dentre as variâncias no processo de radiografia industrial, a que tem apresentado grande desenvolvimento em termos tecnológicos e científicos (artigos, teses de mestrado e doutorado) é a radiografia industrial computadorizada. Nesta dissertação os métodos, resultados e discussões a respeito do trabalho realizado no laboratório de ensaios não destrutivos foram relativos à radiografia computadorizada.

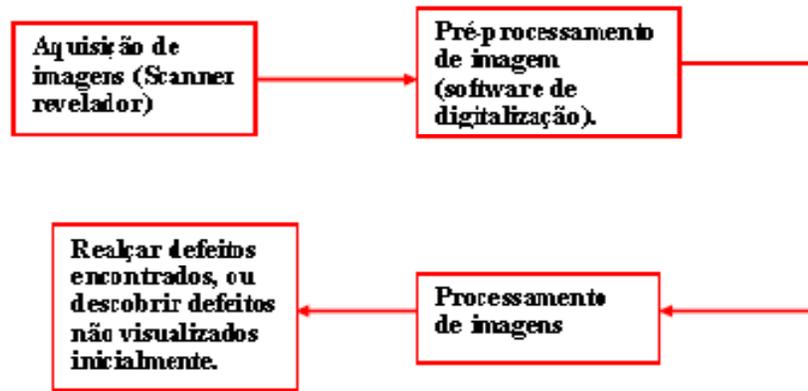


Figura 35: Diagrama de um procedimento de aquisição e processamento de imagens.

3.2.3 - MÉTODO PARA A ANÁLISE DIMENSIONAL

A análise dimensional, também chamada de análise quantitativa, pois pode se quantificar as dimensões de determinados fenômenos como falhas e descontinuidades, focaliza a obtenção de dados a respeito do tamanho dos fenômenos presentes em determinadas radiografias. O processo da obtenção das dimensões envolve o fator da ampliação: Toda imagem radiografada possui uma ampliação. Conforme mostrado na figura 36, para se realizar uma medição de forma mais precisa, faz-se necessário considerar o fator de ampliação k .

Para amenizar o efeito da ampliação mostrado na figura 36 e obter uma medida mais próxima da verdadeira, faz-se uso da equação:

$$w = r - \frac{(f-R) \left(\frac{r}{\sqrt{(f-R)^2 - r^2}} - \frac{w'}{f} \right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{r}{\sqrt{(f-R)^2 - r^2}} - \frac{w'}{f} \right)^2}} \quad [\text{Shinohara 2002}] \quad (2)$$

Onde:

R é a distância do filme ao centro da tubulação

f é a distância entre a fonte e o filme

r é o raio externo da tubulação

w' é o valor fornecido pelo Isee!

w é o valor real da medida

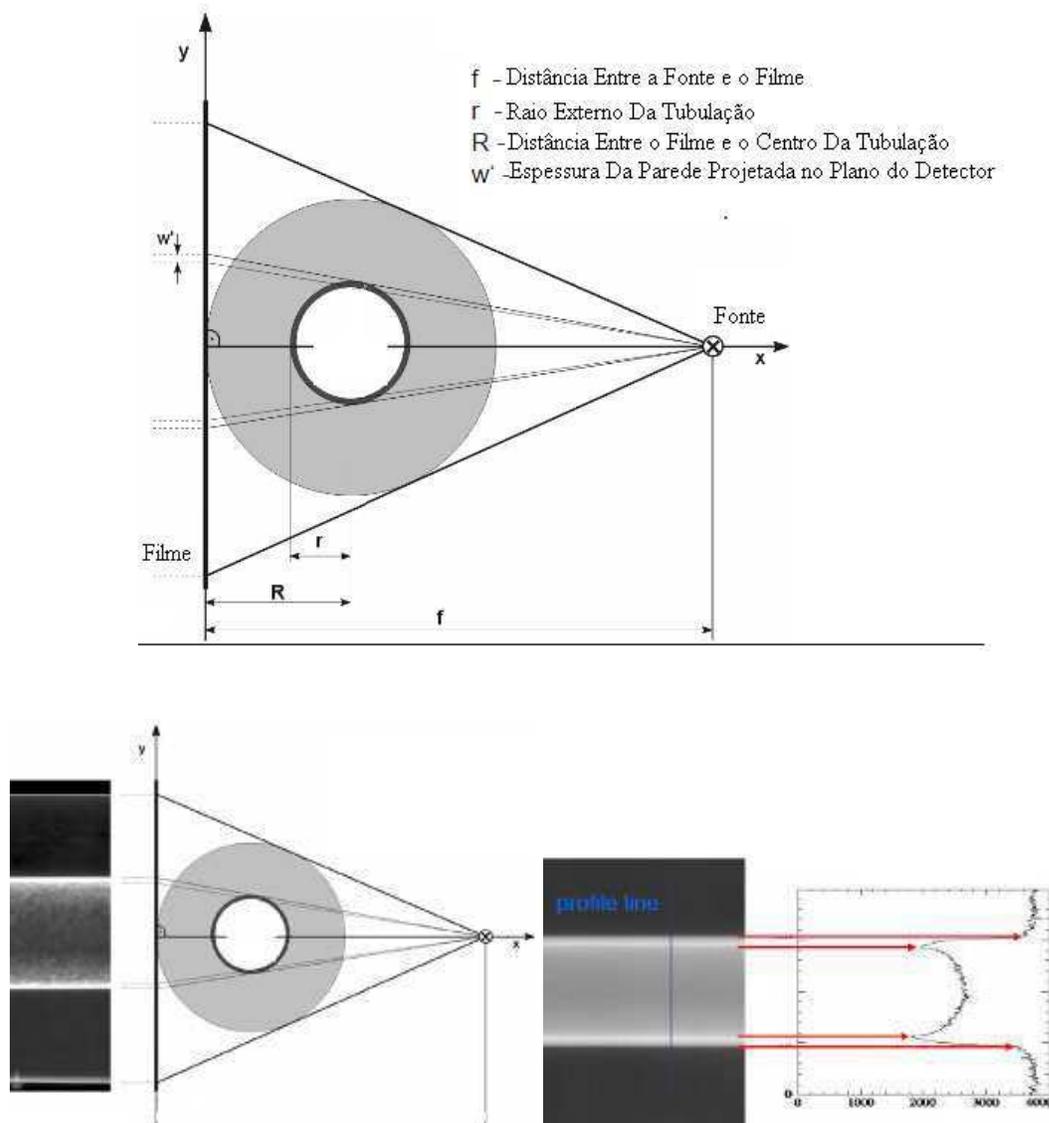


Figura 36: Acima: Esquema demonstrando a influência da ampliação em uma imagem radiográfica comparando a medida real; abaixo a direita: gráfico gerado pela ferramenta Profiler; abaixo a esquerda: identificação de seus elementos em uma imagem radiografada. O exemplo mostra o arranjo de um tubo com uma grossa camada de material de isolamento. [Zscherpel].

Para efeitos simplificados, denomina-se:

$$w'/f = a; (f - R) = b; r/\sqrt{(b^2 - r^2)} = c; \quad (3)$$

Assim pode-se escrever:

$$w = r - [b(c - a) / \sqrt{1 + (c - a)^2}] \quad (4)$$

Porém para efeitos práticos esta equação pode ser simplificada para equação:

$$w = (1 - R/f)w' \quad (5)$$

Verifica-se que o erro decorrente da simplificação da equação 4 é inferior a 1% quando a distância entre o filme e o foco da fonte radiativa é pelo menos seis vezes maior ao diâmetro da tubulação

O fator de ampliação é definido por:

$$k = (1 - R/f) \quad (6)$$

Ele é constante para cada Radiografia. Daí pode-se escrever:

$$w = kw' \quad (7)$$

3.2.4 - MÉTODO PARA ANÁLISE QUALITATIVA

Para se analisar a integridade dos cordões de solda, por intermédio da radiografia digital, pode-se fazer uso dos diversos filtros oferecidos pelo software e também da ferramenta Profiler. Desta forma os defeitos são detectados pela simples análise da imagem ou do gráfico apresentado.

Ao se traçar uma reta com a ferramenta Profiler na radiografia examinada em uma região onde não há defeitos no cordão de solda obtém-se um gráfico mais contínuo de que em uma região onde há defeitos (ver figuras 88, 89 e 90).

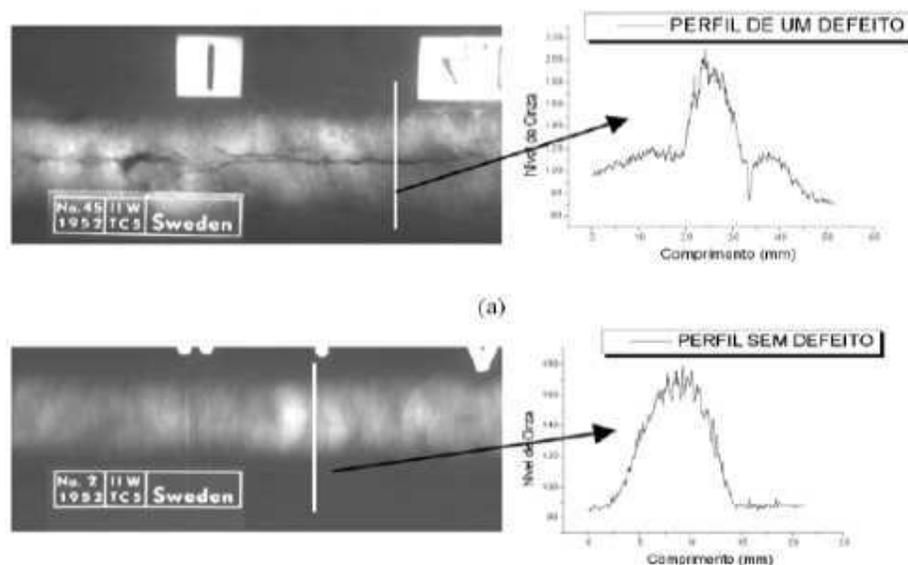


Figura 37: Detecção de defeitos em cordões de solda através da análise dos tons de cinza [Ewert].

3.2.5 - MÉTODO PARA OBTENÇÃO DAS IMAGENS RADIOGRÁFICAS

A Chapa naval foi radiografada no Laboratório de Ensaios não Destrutivos (DEMEC - UFPE) usando uma fonte de 120KV e uma corrente de 1mA com um Imaging Plate Super Sensitive, longo.

Os dois segmentos de tubulação juntamente com o joelho (figura 31) foram radiografados no Instituto Federal de Pesquisa de Materiais (BAM) localizado na cidade de Berlim na Alemanha utilizando-se um Imaging Plate Fuji Film DinamIX Tipo ST – IV; com uma tensão de 320 KV e corrente de 5 mA; com uma distância fonte objeto: 1200 mm; e um tempo de exposição de 30 s; sobre o IP posicionou-se uma chapa de chumbo 0.25mm e após a fonte uma chapa de cobre 1.5mm para diminuir os ruídos.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS

Foram incluídos os resultados concernentes à deformação das chapas navais, comprovação dos métodos para medição dimensional em radiografias e também foram obtidos resultados diretamente em forma de radiografias elaboradas em laboratório, outro resultado consiste na confirmação de métodos para análises qualitativa e quantitativa e finalmente foram elaboradas as próprias análises relativas à solda da chapa naval 03 (figura 39).

4.1 - DEFORMAÇÃO DAS CHAPAS NAVAIS

Na COPPE foi efetuada a solda de duas chapas presas em gabarito, impedindo qualquer deformação. Antes da soldagem foram postos strain gauges para ter a possibilidade de controlar as tensões ao longo do processo. O processo de soldagem utilizado foi o MIG (Metal Inert Gas) com múltiplos passos de soldagem. (figura 38)



Figura 38: Foto da Chapa naval soldada original da qual foi recortada a chapa mostrada na figura 40, mostrando detalhes do gabarito e strain gauges fixados.

Depois do resfriamento as chapas continuaram presas por várias semanas, para garantir a uniformidade das tensões ao longo das chapas. Quando enfim foram soltas do gabarito, apresentaram imediatamente a deformação angular característica. Por causa do elevado peso, o qual dificultaria o transporte, a chapa naval foi cortada, resultando três chapas menores com dimensão de cerca 500 mm por 500 mm. Estas três amostras foram marcadas com os respectivos números 01, 02 e 03 (figura 39)



Figura 39: Fotos das chapas navais com a junta soldada das amostras 01, 02 e 03.

Foram efetuadas cinco medições do ângulo de deformação da chapa naval 03 (tabela 1). Verifica-se, que no momento da soldagem, a chapa se encontrava presa em um gabarito, impedindo assim qualquer deformação. Após o resfriamento a chapa foi libertada e demonstrou imediatamente uma deformação angular significativa. Na prática, a deformação deve ser eliminada por diversos métodos, por exemplo, através de aquecimento em regiões resultando o aniquilamento da deformação. Em chapas finas utilizadas na superestrutura de navios e plataformas, as deformações são eliminadas freqüentemente através de trabalho mecânico utilizando-se martelos.

Tabela 1: Medições da deformação angular da chapa naval 03

Primeira medição	4,25°
Segunda medição	4,32°
Terceira medição	4,38°
Quarta medição	4,43°
Quinta medição	4,31°
Média das cinco medições	4,34° ± 0,09°

A interpretação quantitativa desta deformação requer métodos matemáticos avançados utilizando elementos finitos. Os programas que possam simular a deformação em função de tensões residuais podem alcançar resultados com boa aproximação, se forem levados em consideração a análise micro estrutural da zona termicamente afetada (ZTA), seus módulos de elasticidades, os quais variam gradualmente ao longo da espessura da chapa assim como em função à distância medida paralelamente ao plano da chapa e perpendicular à solda até o centro da solda, os variados e graduais limites de escoamento do aço soldado e do material de adição durante o resfriamento da chapa soldada e a própria velocidade de resfriamento. O processo de soldagem modifica as propriedades mecânicas da solda de acordo com diversos outros parâmetros ainda, tais como energia da soldagem, tipo de processo e umidade e temperatura do ambiente. Ainda existe uma grande influencia da qualificação profissional da pessoa, que aplica a solda.

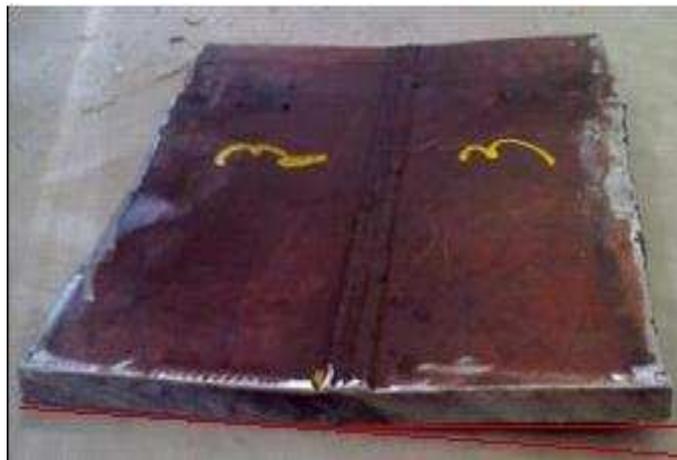


Figura 40: Chapa naval unida por solda, destacando-se a distorção angular provocada pelo processo de soldagem. Dimensões: 500 x 500 x 19 mm.

De forma geral a deformação angular de $4,34^\circ$ é bastante significativa. No caso de chapas navais esta deformação vai gerar concentrações de tensões quando tracionadas, facilitando o surgimento de trincas no lado do ângulo menor, os quais podem dar início ao rompimento da peça. Em caso de ação de forças pressionando a chapa, vai haver uma diminuição significativa da resistência à flambagem em direção ao ângulo maior da deformação.

4.2 - MÉTODO DE KLASSENS

Este método descreve uma forma de elaborar medições em radiografias, as quais estão sujeitos à falta de nitidez por causa do surgimento de uma região de sombra, dificultando a definição da localização de uma borda ou alguma descontinuidade.

Como descrito pelo manual do software Isee!, para se efetuar uma medição, devem-se tomar as seguintes providências:

- 1) Carregar a Imagem (Ctrl + O)
- 2) Colocá-la em escala 1:1 (Opcional)
- 3) Abrir a ferramenta Profiler
- 4) Calibrar o tamanho do pixel
- 5) Com o botão esquerdo do mouse, clicar na imagem e traçar uma reta perpendicular à área examinada
- 6) Na janela Profiler clicar com o botão direito no início e depois de traçar uma reta perpendicular à área examinada

Ao se clicar em (Calibrate Pixel Size) abrem-se duas janelas. Na superior, informa-se de forma direta o tamanho do Pixel (recomendado); Na janela inferior informa-se o valor de uma dimensão conhecida para que o pixel seja calibrado automaticamente (Não recomendável, pois em alguns casos surge diferença entre medições horizontais e verticais). Porém, como descrito pela norma ASTM – E2007 – 00, em seu décimo tópico, as bordas de uma imagem, de acordo com a figura 41 são de difícil localização, fato este devido ao ruído, espalhamento, etc.

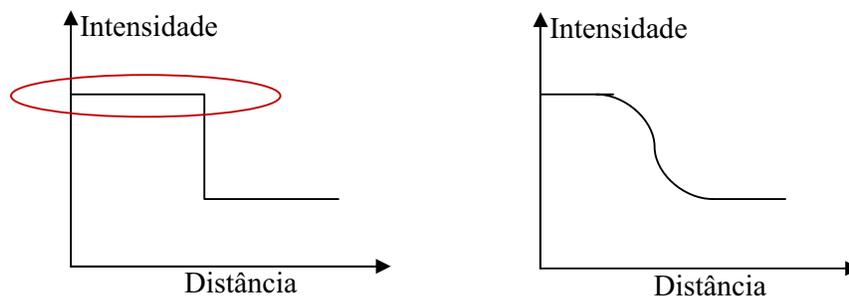


Figura 41: Representação esquemática de uma borda, sem ruído (à esquerda), e com ruído (à direita).

Para a detecção do ponto aproximado da borda, esta mesma norma sugere o uso do Método de Klasens (figura 42), onde:

- 1) Encontra-se o valor $D = 0,16 (I_{\text{máx.}} - I_{\text{mín.}})$, onde $I_{\text{máx.}}$ e $I_{\text{mín.}}$ são a intensidade máxima e mínima do gráfico, respectivamente
- 2) São traçadas duas retas paralelas ao eixo das abscissas: Reta 1 com valor de $(I_{\text{Max.}} - D)$, e Reta 2 com valor de $(I_{\text{mín.}} + D)$

- 3) Cada reta interceptará o gráfico em um único ponto (A) e (B)
- 4) Traça-se uma Reta 3 passando pelos pontos (A) e (B)
- 5) Esta nova reta interceptará o gráfico em um único ponto (C), e este ponto é a localização da borda no gráfico

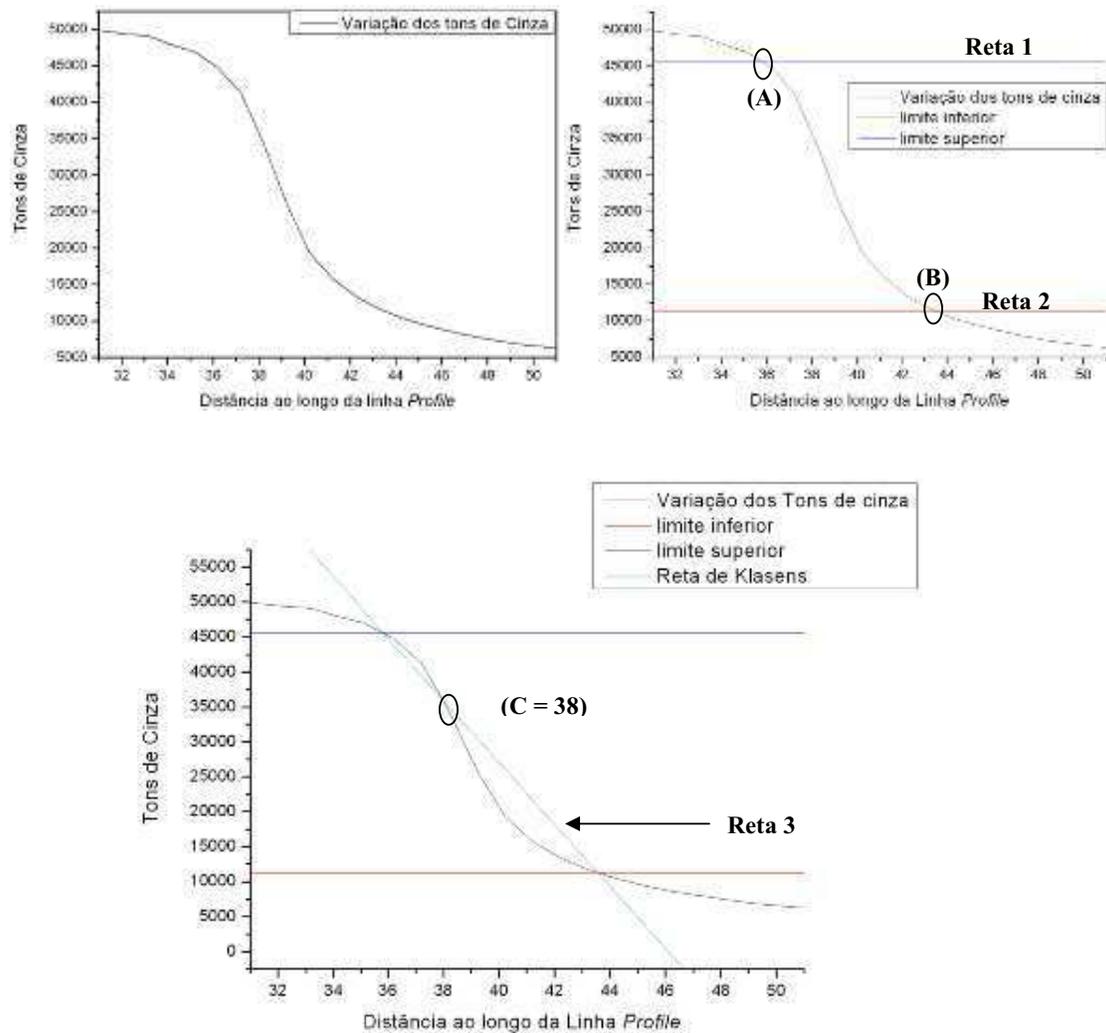


Figura 42: Aplicação do método de Klasens a uma borda. Acima á esquerda: gráfico da borda; acima á direita: determinação das retas 1 e 2 e dos pontos (A) e (B); abaixo: a conclusão do método, onde se encontra a reta 3 e o ponto (C).

4.3 - FUNDAMENTAÇÃO PARA ANÁLISE DIMENSIONAL

Um método de fácil utilização capaz de fornecer resultados próximos ao método de Klasens é o procedimento da primeira derivada fornecido pelo programa Isee! sobre a curva representando os diferentes graus de cinza ao longo de uma reta livremente definida pelo usuário em determinada radiografia (figura 43).

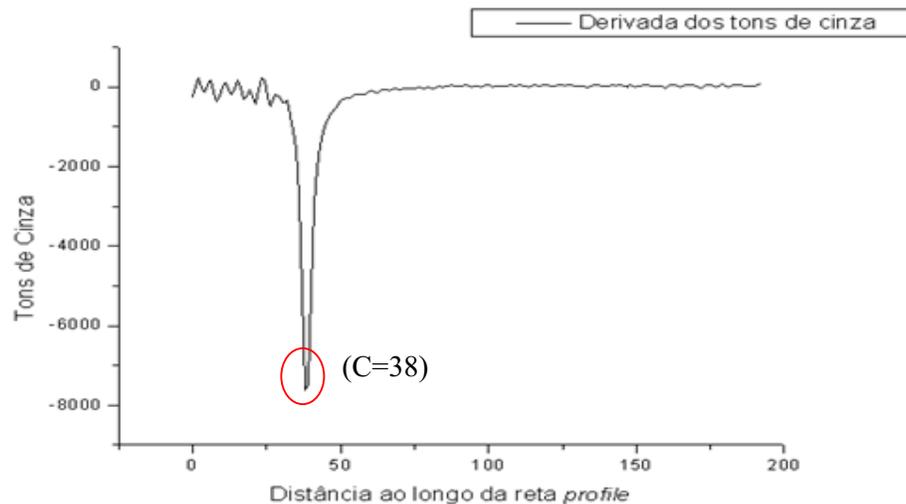


Figura 43: Aplicação da primeira derivada no gráfico apresentado na figura 46 indicando o mesmo ponto (C).

Para se fazer uso deste método deve ser seguido os passos:

- 1) Identificar no gráfico as regiões onde estão localizadas a bordas da dimensão a ser medida (figura 44)
- 2) Posicionar os delimitadores nas regiões onde se encontram as bordas da dimensão a ser medida (figura 45)
- 3) Aplicar a primeira derivada (figura 46)
- 4) Mover o marcador para o pico da derivada da(s) borda(s) desconhecida(s) (figura 47)
- 5) Verificar o resultado na imagem (figura 48)

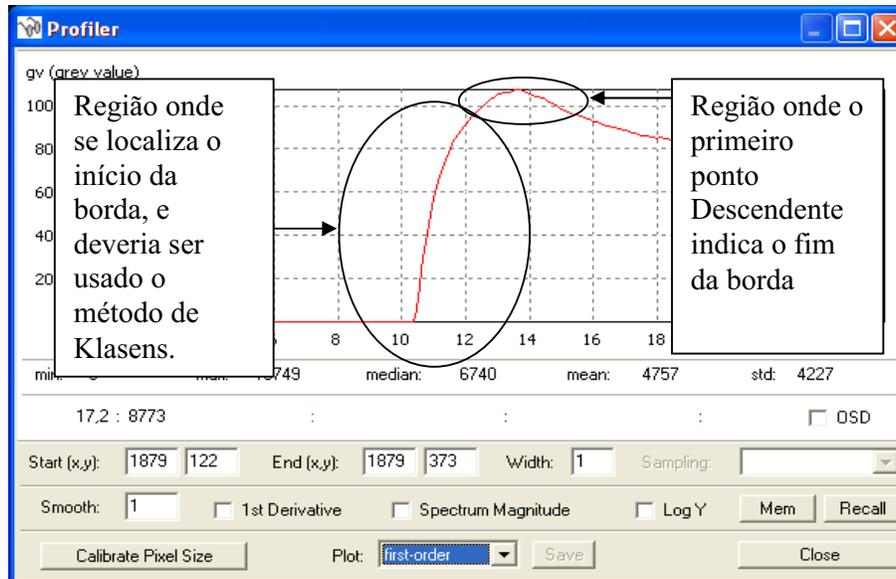


Figura 44: Após se traçar com uma reta com a ferramenta Profiler na radiografia, surge um gráfico na janela da mesma ferramenta, onde se encontra a intensidade em função da posição ao longo do comprimento da linha traçada pela ferramenta Profiler em mm. (Propositalmente traçou-se a reta em uma região de borda).

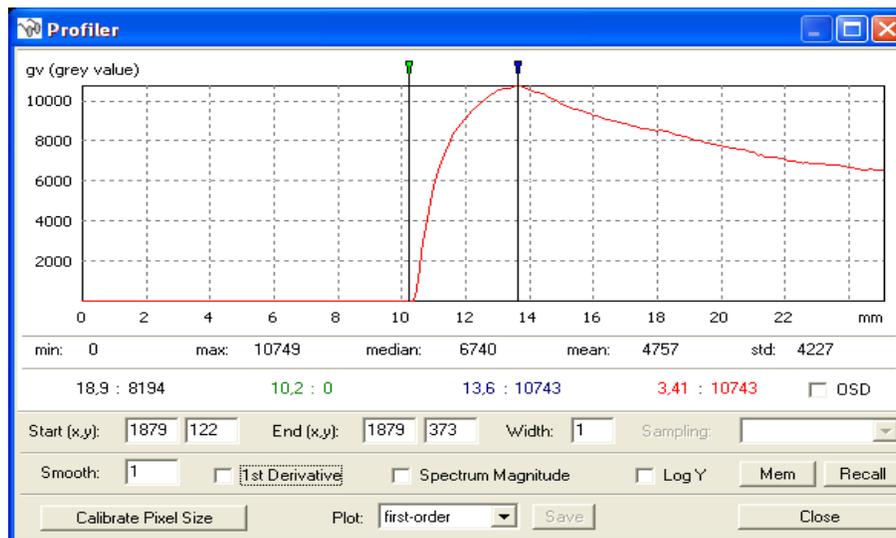


Figura 45: Posicionamento dos delimitadores. Eles devem estar localizados próximos à área examinada.

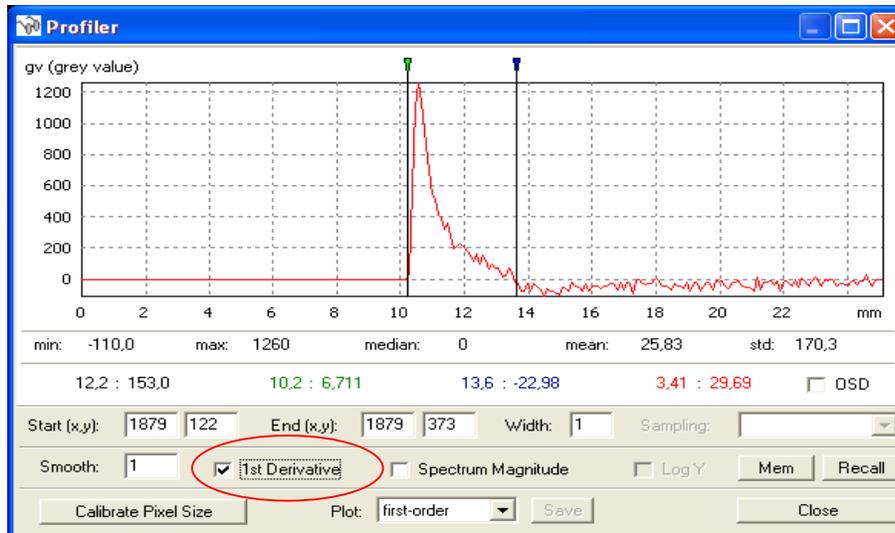


Figura 46: Aplicação da primeira derivada.

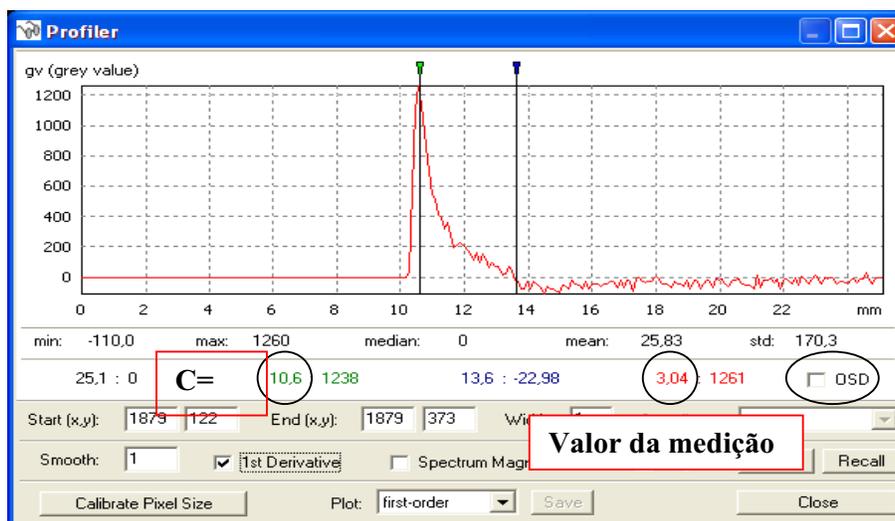


Figura 47: Reposicionamento do delimitador esquerdo para o pico indicado pela derivada, e obtenção de forma direta do valor procurado.



Figura 48: Marcando-se a opção OSD destacado na figura 47 o valor do mensurando aparece na imagem.

4.4 - RADIOGRAFIAS OBTIDAS EM LABORATÓRIO COM UTILIZAÇÃO DE IMAGING PLATES

Os parâmetros constantes para todas as radiografias obtidas no laboratório foram:

- Amostra radiografada: Chapa Naval número 03
- Fonte utilizada: iCM CP120B
- Voltagem e amperagem do tubo: 120kV e 1mA;
- Tipo de IP utilizado: Super Sensitive
- Densidade de pixels utilizada para escanear: 600dpi
- Tamanho do IP: Super Sensitive, Longo

Os parâmetros individuais para as radiografias obtidas no laboratório foram:

- Tempo de exposição
- Distância entre fonte e amostra (distância A)
- Distância entre e filme e amostra (distância B)
- Ferramenta do programa Isee! para melhoramento de imagem

O procedimento dos experimentos incluiu a elaboração de um grande número de radiografias. A distância entre a fonte e a chapa naval 03 foi variada ou o tempo de exposição, em cada uma delas. Também foram elaboradas radiografias, em quais a própria peça estudada fora afastada do Imaging Plate, de forma que se puderam observar os efeitos da técnica conhecida por Projection Magnification. Em seguida será mostrado o número completo de radiografias tiradas utilizando-se Imaging Plates.

Os conjuntos das radiografias estão listados sempre com a radiografia original obtida sem manipulações, seguida pelas imagens elaboradas utilizando algumas das ferramentas de visualização do software Isee!. Observando as figuras abaixo, é possível visualizar os resultados das manipulações de vários tipos de filtro do programa Isee! utilizados para processar as imagens. É possível verificar detalhes e falhas originadas por diversos fatores, como por exemplo: vibrações mecânicas, intempéries, manipulação incorreta do eletrodo na hora da soldagem, velocidade de soldagem inadequada.

Segue o conjunto de imagens que foram obtidas utilizando os parâmetros:

Distância A: 100 cm, Distância B: 0 cm, Tempo de exposição: 10 s

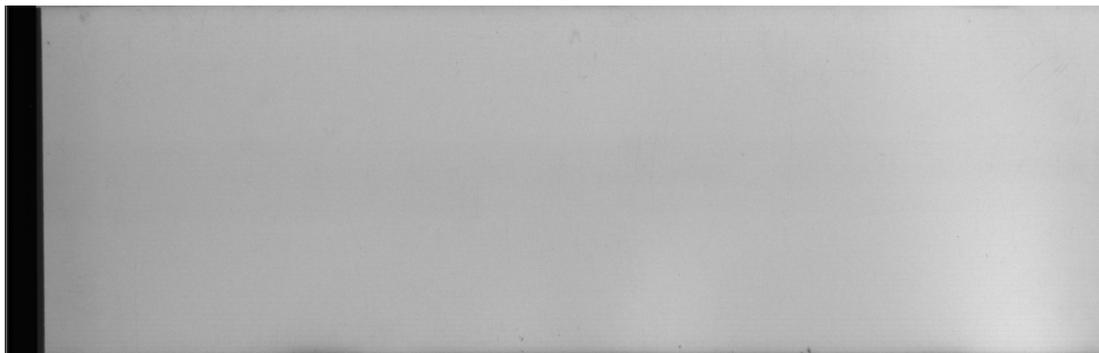


Figura 49: Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, Distância B: 0 cm, 10 s, Original

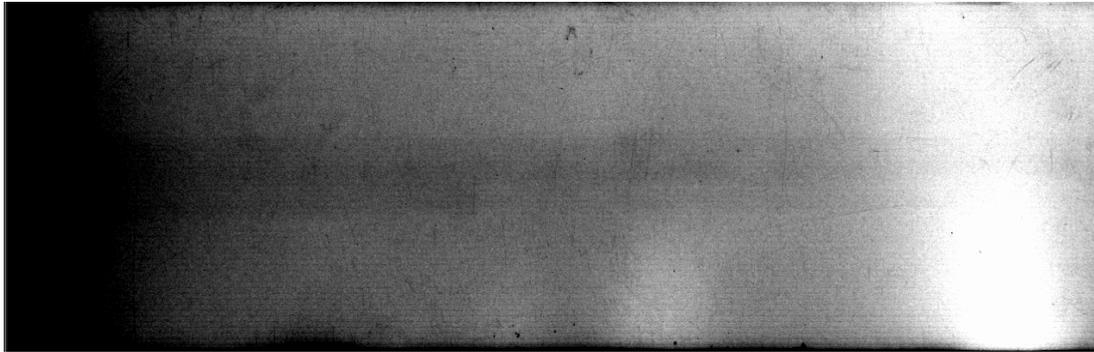


Figura 50: Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, Distância B: 0 cm, 10 s, Original -> Local Histogram

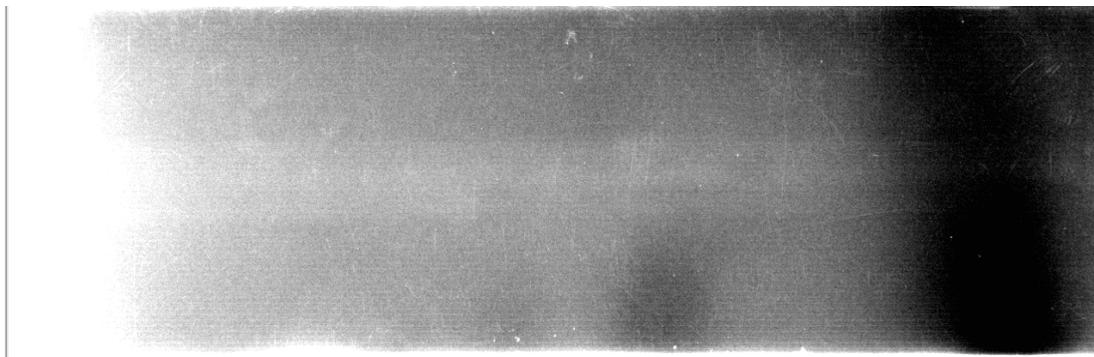


Figura 51: Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, Distância B: 0 cm, 10 s, Original -> Local Histogram -> Negativo

Comentário: A qualidade da radiografia pode ser considerada regular. O contraste obtido não satisfaz, mesmo após a manipulação com o software Isee!

Segue o conjunto de imagens que foram obtidas utilizando os parâmetros:
Distância A: 100 cm, Distância B: 0 cm, Tempo de exposição: 190 s



Figura 52: Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, Distância B: 0 cm, 190 s, Original



Figura 53: Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm , Distância B: 0 cm, 190 s, Original -> Local Histogram



Figura 54: Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, Distância B: 0 cm, 190 s, Original -> Local Histogram -> Negativo

Comentário: A qualidade da radiografia também é regular. O contraste obtido é um pouco melhor, porém não satisfaz tampouco, mesmo após a manipulação com o software Isee! As falhas são originárias de defeitos pelo desgaste mecânico do IP.

Segue o conjunto de imagens que foram obtidas utilizando os parâmetros:
Distância A: 100 cm, Distância B: 0 cm, Tempo de exposição: 345 s



Figura 55: Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, Distância B: 0 cm, 345 s, Original



Figura 56: Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, Distância B: 0 cm, 345 s, Original -> Local Histogram

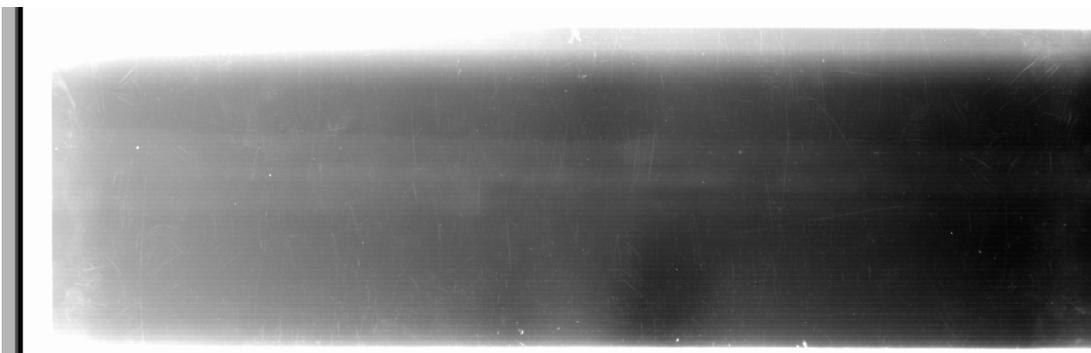


Figura 57: Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, Distância B: 0 cm, 345 s, Original -> Local Histogram -> Negativo

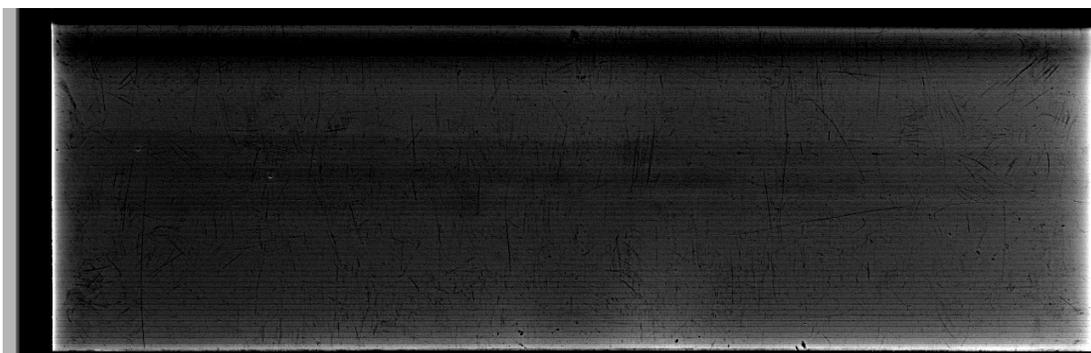


Figura 58: Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, Distância B: 0 cm, 345 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram



Figura 59: Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, Distância B: 0 cm, 345 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram -> Negativo

Comentário: Com a distância de 100 cm entre fonte e IP, a radiografia que apresenta o maior número de tons de cinza é esta, exposta por 345 s. O contraste é melhor que as radiografias que tiveram menor tempo de exposição. O contraste obtido não satisfaz, apesar da manipulação com o software Isee!

Segue o conjunto de imagens que foram obtidas utilizando os parâmetros:
Distância A: 40 cm, Distância B: 0 cm, Tempo de exposição: 30 s

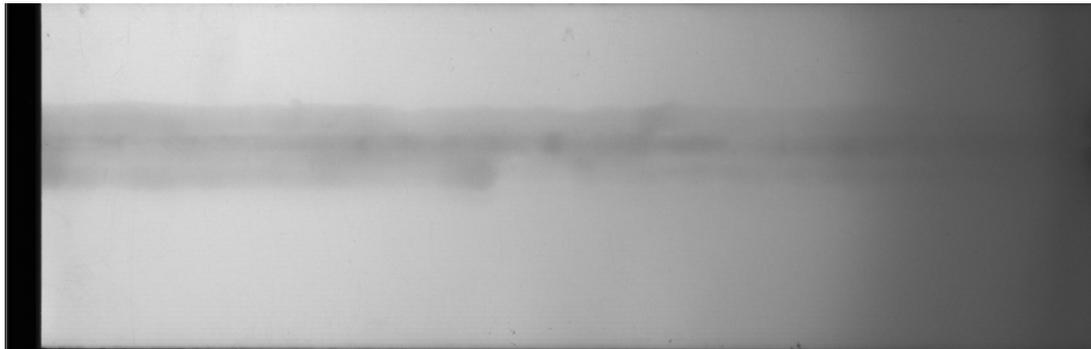


Figura 60: Radiografia da Chapa Naval 03, A=40 cm, Distância B: 0 cm, 30 s, Original

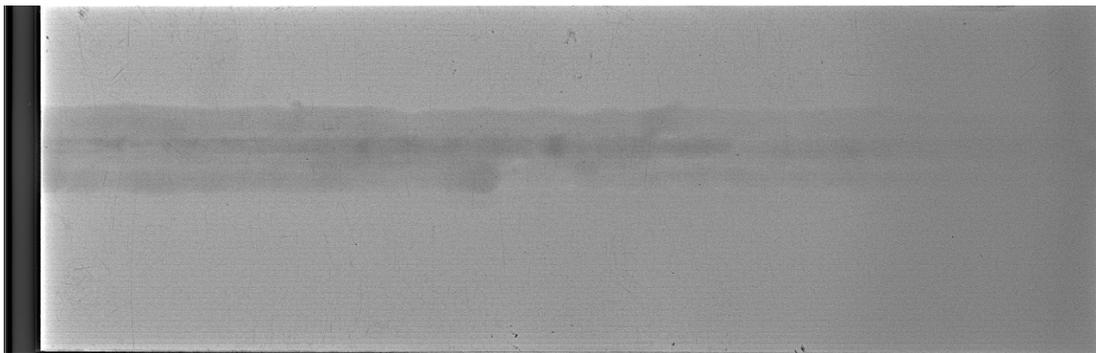


Figura 61: Radiografia da Chapa Naval 03, A=40 cm, Distância B: 0 cm, 30 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram

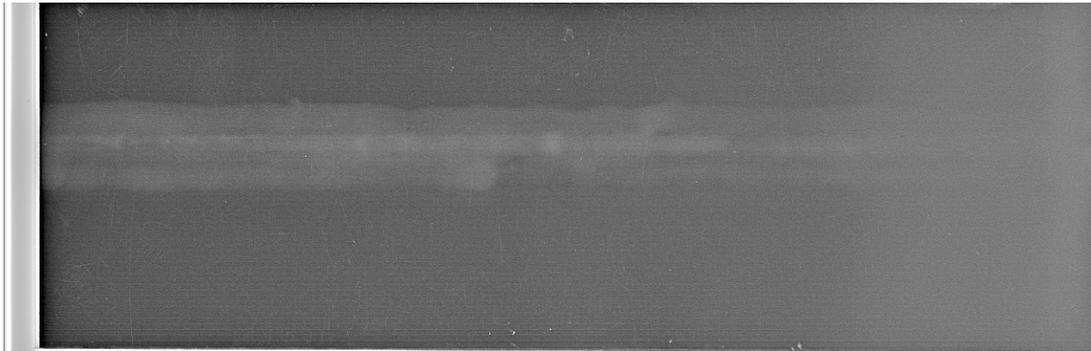


Figura 62: Radiografia da Chapa Naval 03, A=40 cm, Distância B: 0 cm, 30 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram -> Negativo

Comentário: Esta radiografia foi considerada de boa qualidade. A morfologia da solda é bem visível, é possível reconhecer diversos detalhes. Será utilizada adiante para efetuar exames de defeitos e dimensões (veja figuras 85 e 86).

Segue o conjunto de imagens que foram obtidas utilizando os parâmetros:
Distância A: 40 cm, Distância B: 0 cm, Tempo de exposição: 160 s

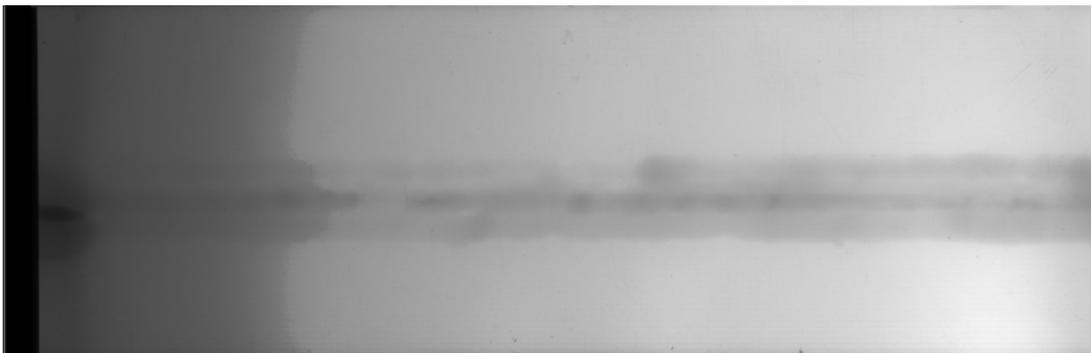


Figura 63: Radiografia da Chapa Naval 03, A=40 cm, Distância B: 0 cm, 160 s, Original

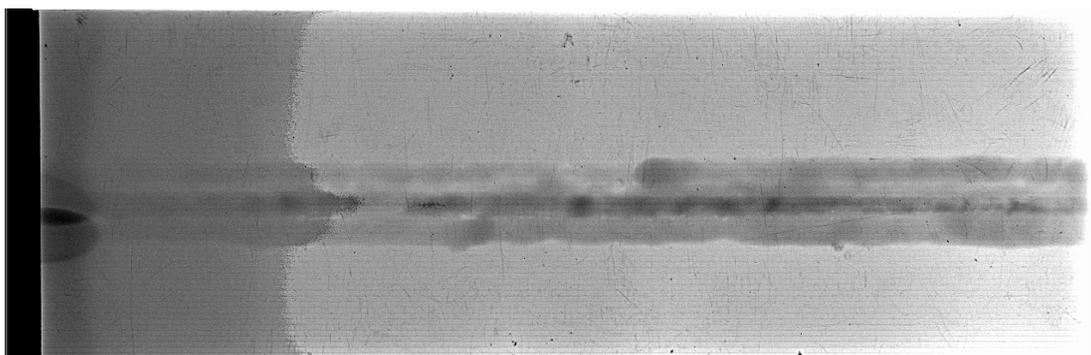


Figura 64: Radiografia da Chapa Naval 03, A=40 cm, Distância B: 0 cm, 160 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram

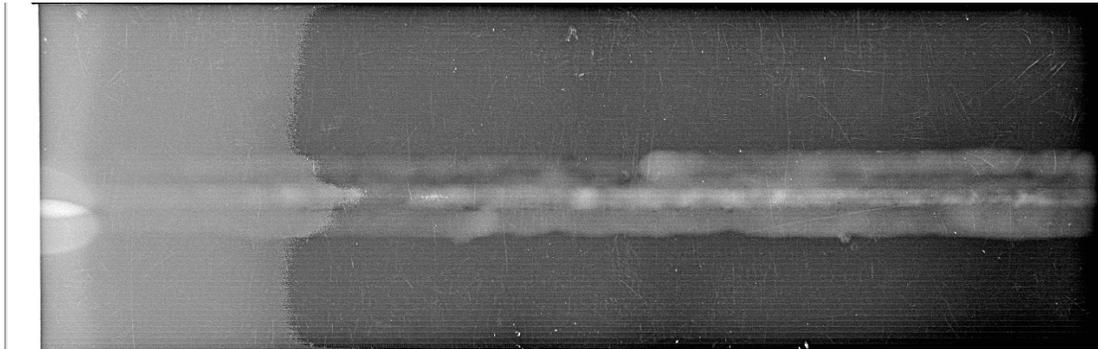


Figura 65: Radiografia da Chapa Naval 03, A=40 cm, Distância B: 0 cm, 160 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram -> Negativo

Observação: Esta radiografia mostra um efeito de refração no lado esquerdo, porém fora isto é de ótima qualidade quanto à nitidez e contraste. Também foi utilizada para diversos exames e análise de continuidade da espessura da solda, obtenção de dimensões do cordão de solda e de descontinuidades presentes na imagem radiográfica (veja figuras 87 até 96).

Segue o conjunto de imagens que foram obtidas utilizando os parâmetros:
Distância A: 25 cm, Distância B: 0 cm, Tempo de exposição: 60 s

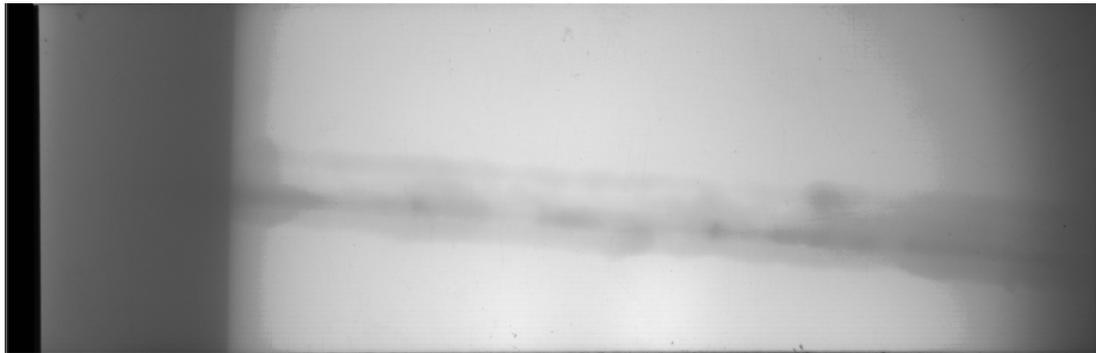


Figura 66: Radiografia da Chapa Naval 03, A=25 cm, Distância B: 0 cm, 60 s, Original

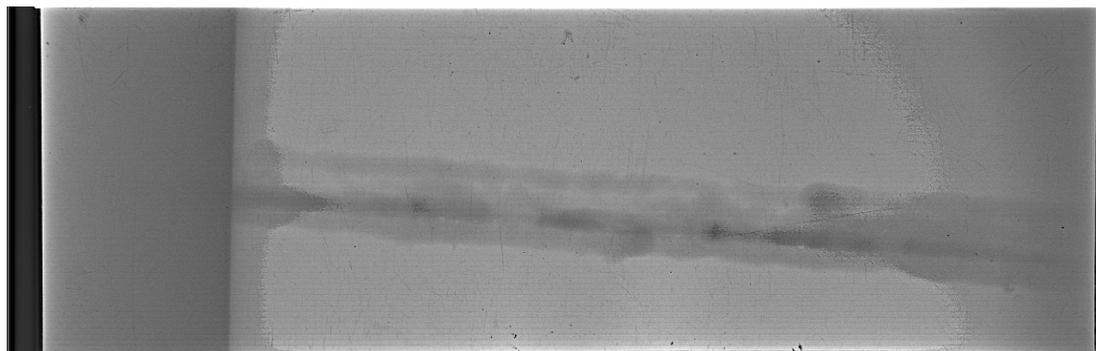


Figura 67: Radiografia da Chapa Naval 03, A=25 cm, Distância B: 0 cm, 60 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram

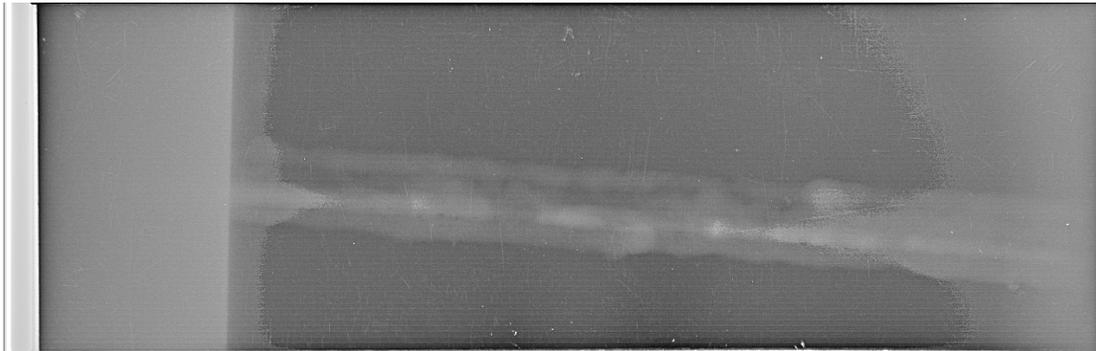


Figura 68: Radiografia da Chapa Naval 03, A=25 cm, Distância B: 0 cm, 60 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram -> Negativo

Observação: Com o IP afastado apenas 25 cm da fonte, os raios-X não alcançam mais as bordas do Imaging Plate. Apesar de ótima qualidade das áreas atingidas pelo raio-X, a imagem não mostra a totalidade da chapa e da solda.

Segue o conjunto de imagens que foram obtidas utilizando os parâmetros:
Distância A: 15 cm, Distância B: 0 cm, Tempo de exposição: 60 s



Figura 69: Radiografia da Chapa Naval 03, A=15 cm, Distância B: 0 cm, 60 s, Original

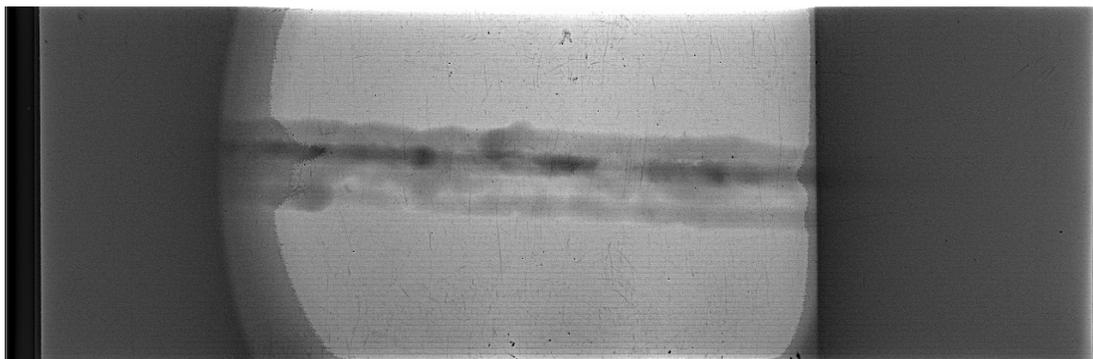


Figura 70: Radiografia da Chapa Naval 03, A=15 cm, Distância B: 0 cm, 60 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram

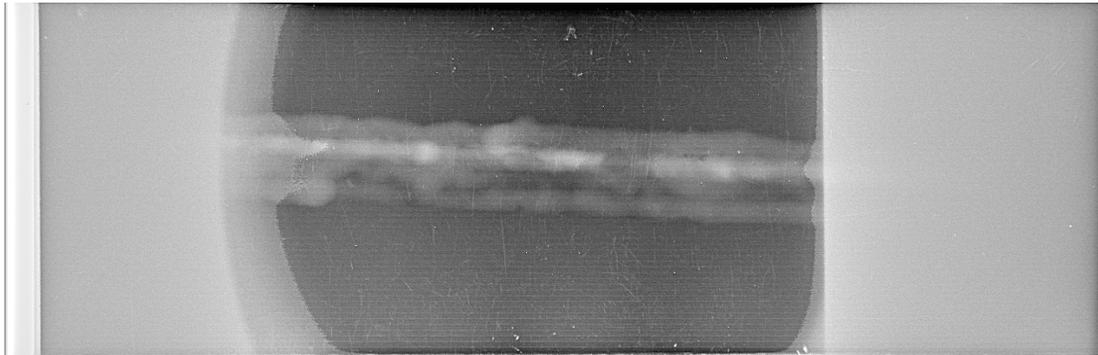


Figura 71: Radiografia da Chapa Naval 03, A=15 cm, Distância B: 0 cm, 60 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram -> Negativo

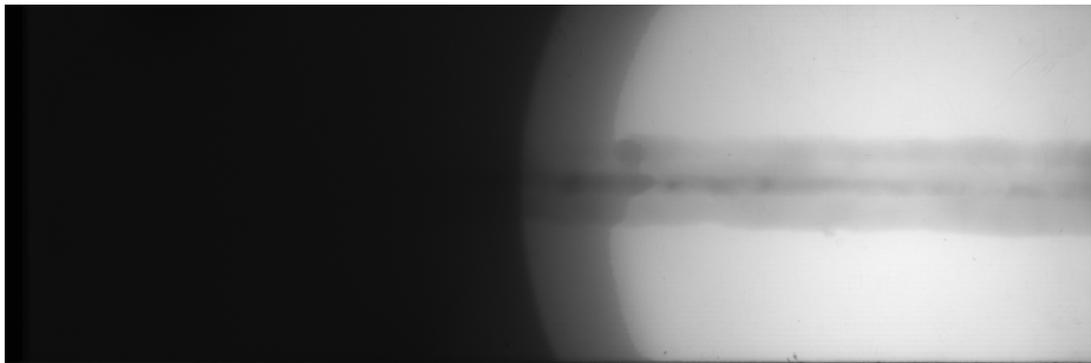


Figura 72: Radiografia da Chapa Naval 03, A=15 cm, Distância B: 0 cm, 60 s, Original

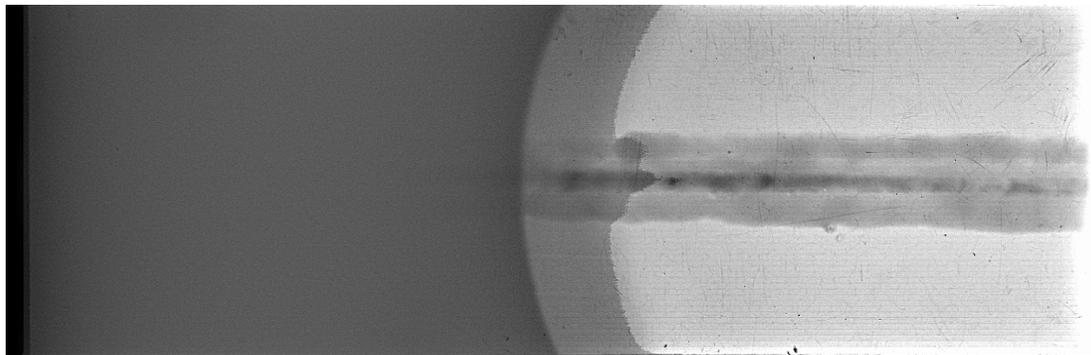


Figura 73: Radiografia da Chapa Naval 03, A=15 cm, Distância B: 0 cm, 60 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram

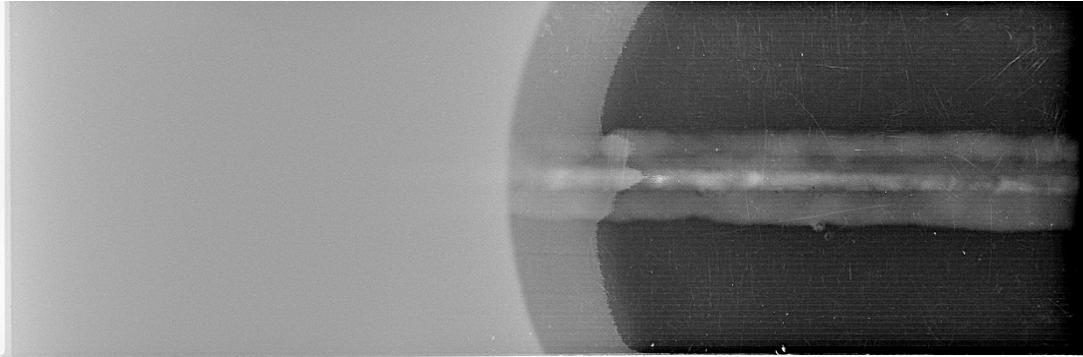


Figura 74: Radiografia da Chapa Naval 03, A=15 cm, Distância B: 0 cm, 60 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram -> Negativo

Observação: Com o IP afastado apenas 15 cm da fonte, o cone de radiação da fonte de raios-X ficou muito reduzido e não alcança a maior parte do Imaging Plate. Foi feita uma segunda radiografia para obter imagens da parte central e a parte da borda esquerda. Esta distância é boa para peças com pequenas dimensões de até 80 mm. Na parte exposta a radiografia apresenta uma qualidade boa.

As seguintes radiografias foram tiradas utilizando o método de Project Magnification, isto é: o IP foi afastado da amostra. No caso foram efetuadas radiografias consecutivas com distâncias A de 100 cm, 40 cm e 25 cm entre fonte e amostra e a distância B entre amostra e filme IP de 20 cm.

Utilizando a fórmula (1)

$$a = f \frac{b}{(p+f)} \text{ [Blakely]}$$

Para os dados do experimento no laboratório, obtém-se:

Para o caso de o IP estar afastado 120 cm da fonte:

a é a distância ideal do foco ao objeto radiografado

$$b = 1200 \text{ mm}$$

$$f = 0.8 \text{ mm}$$

$$p = 600 \text{ dpi (resolução do escaneador) corresponde à } \frac{25.4}{600} = 0.042$$

$$a = 0.8 \frac{1200}{(0.042+0.8)} = \sim 1140 \text{ mm}$$

Para o caso de o IP estar afastado 40 cm da fonte:

$$a = 0.8 \frac{600}{(0.042+0.8)} = \sim 570 \text{ mm}$$

Para o caso de o IP estar afastado 25 cm da fonte:

$$a = 0.8 \frac{450}{(0.042+0.8)} = \sim 428 \text{ mm}$$

Estes números representam as distâncias ideais do centro da espessura da chapa respectivamente da solda até a fonte para se alcançar a maior possível melhora na qualidade da radiografia. Na prática devia-se, com o equipamento à disposição colocar-se a chapa naval apenas 5 cm à frente do Imaging Plate ao distanciar o Imaging Plate da fonte em 120 cm, considerando uma ampliação da imagem de apenas ~ 5%.

Distanciando o Imaging Plate da fonte em 60 cm, mantendo a distância do objeto ao IP de 20 cm, a teoria induz, que seria ideal em vez disso colocar o objeto à apenas 2 cm do IP. Apesar de na teoria obter-se um fator de aumento de 163 %, a nitidez da radiografia diminui em maior grau. O mesmo se dá para a distância de 45 cm da fonte ao Imaging Plate. Neste caso a teoria indica, que a distância do IP ao objeto deveria ser apenas um pouco mais de 1 cm para obter-se algum aumento (neste caso insignificativo) na qualidade da radiografia.

Para comprovar esta teoria foi estabelecida uma distância de 20 cm entre IP e a chapa naval, de forma que houve um fator de aumento em torno de 105%, (A=100 cm), 163% (A=40 cm) respectivamente 180% (A=25 cm) em relação à peça examinada. Espera-se, que a qualidade da imagem radiográfica não melhore pelo aumento da sombra causada pela fonte demasiadamente grande para esta técnica de radiografias computacionais.

Segue a imagem que foi obtida utilizando os parâmetros:

Distância A: 100 cm, Distância B: 20 cm, Tempo de exposição: 10 s

s

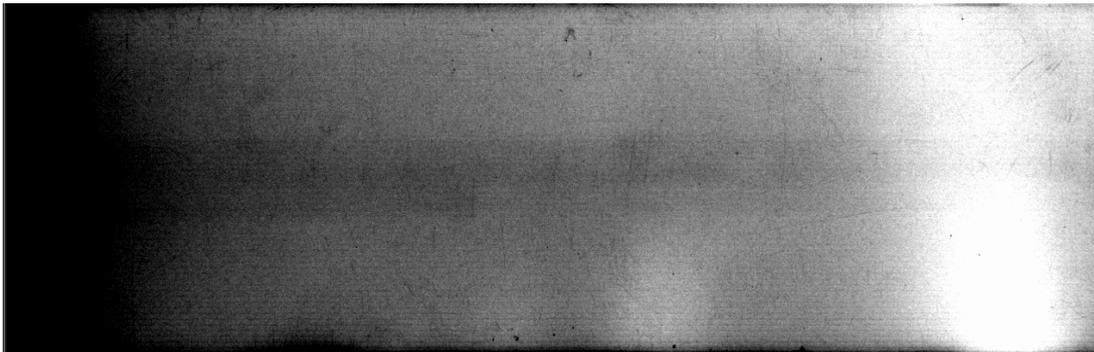


Figura 75: Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, B=20 cm 10 s, Original -> Local Histogram

Segue a imagem que foi obtida utilizando os parâmetros:

Distância A: 100 cm, Distância B: 20 cm, Tempo de exposição: 190 s

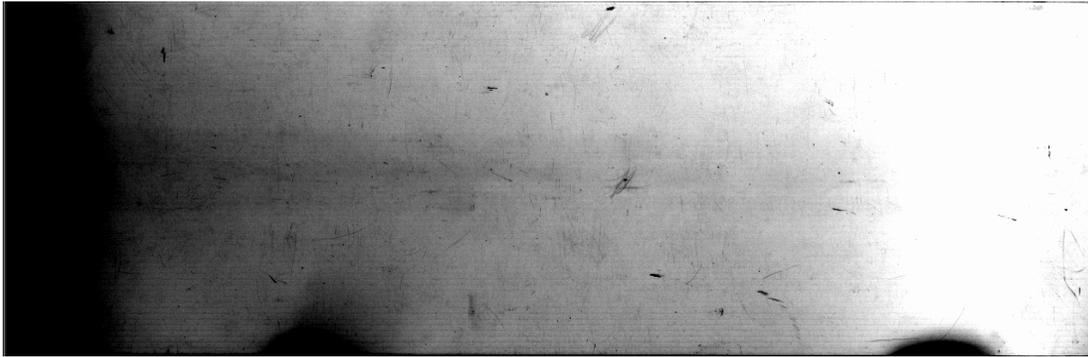


Figura 76: Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, B=20 cm, 190 s, Original -> Local Histogram

Observação: Essas radiografias apresentam graus de cinza reduzidos. A nitidez é regular com pouco contraste.

Segue a imagem que foi obtida utilizando os parâmetros:

Distância A: 100 cm, Distância B: 20 cm, Tempo de exposição: 345 s

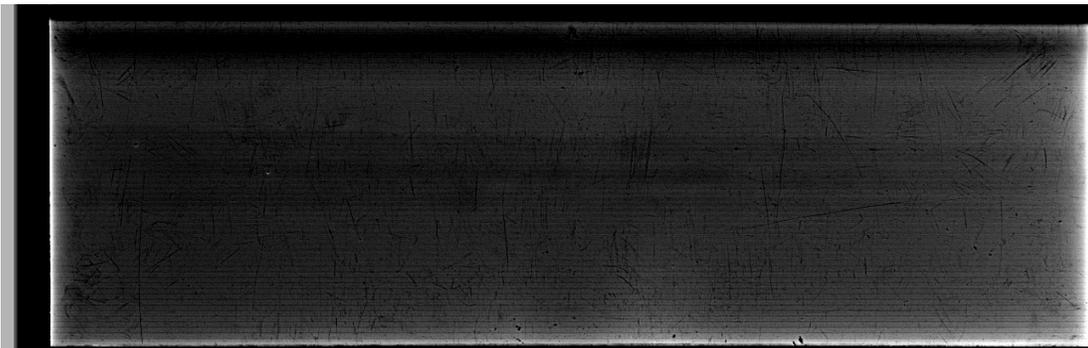


Figura 77: Radiografia da Chapa Naval 03, A=100 cm, B=20 cm, 345 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram

Observação: Com o tempo de exposição máximo, utilizando ambas as baterias de energia disponíveis no Laboratório de Materiais seqüencialmente, obteve-se uma radiografia de boa qualidade quanto ao contraste. A nitidez sofreu por causa da técnica de Projection Magnification aplicada com uma fonte milimétrica, considerada grande demais para esta técnica.

Segue a imagem que foi obtida utilizando os parâmetros:

Distância A: 40 cm, Distância B: 20 cm, Tempo de exposição: 30 s

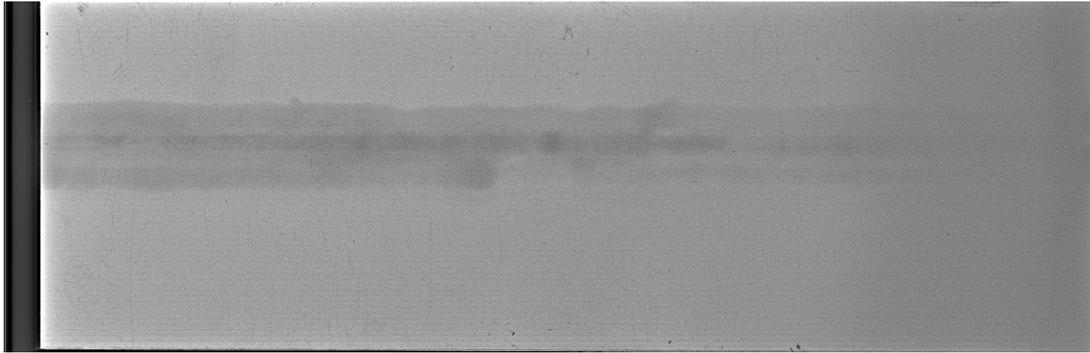


Figura 78: Radiografia da Chapa Naval 03, A=40 cm, B=20 cm, 30s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram

Segue a imagem que foi obtida utilizando os parâmetros:

Distância A: 40 cm, Distância B: 20 cm, Tempo de exposição: 160 s

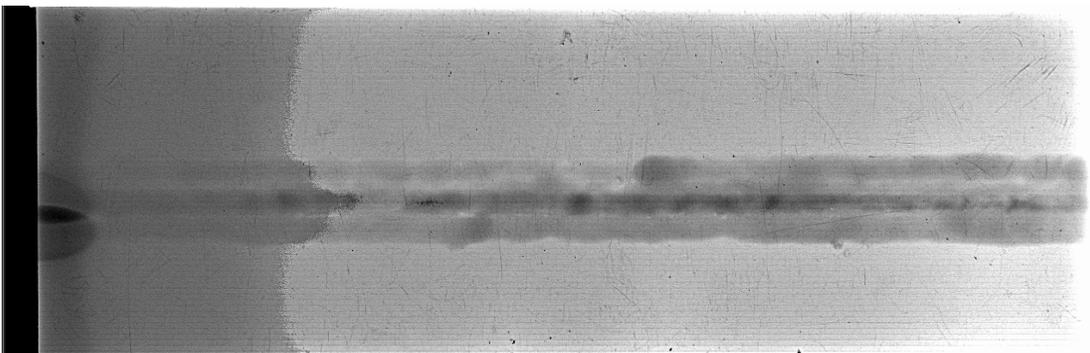


Figura 79: Radiografia da Chapa Naval 03, A=40 cm, B= 20 cm, 160 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram

Observação: A radiografia apresenta ótimo contraste, porem pobre nitidez. Definitivamente, com a distância de 20 cm entre Imaging Plate e a chapa, não se pode esperar obter radiografias de boa qualidade.

Segue a imagem que foi obtida utilizando os parâmetros:

Distância A: 25 cm, Distância B: 20 cm, Tempo de exposição: 60 s

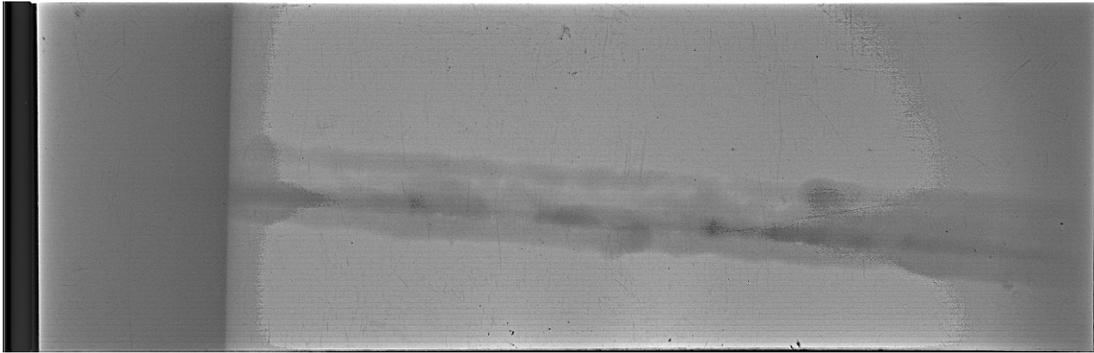


Figura 80: Radiografia da Chapa Naval 03, A=25 cm, B=20 cm, 60 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram

Segue a imagem que foi obtida utilizando os parâmetros:

Distância A: 15 cm, Distância B: 20 cm, Tempo de exposição: 60 s

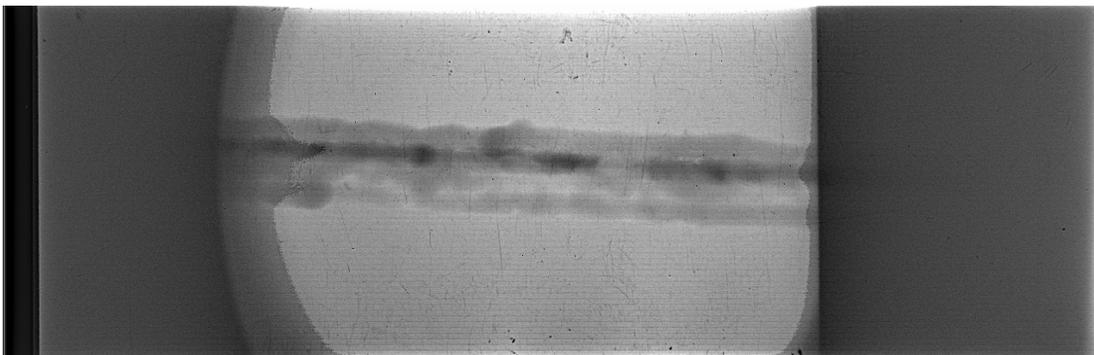


Figura 81: Radiografia da Chapa Naval 03, A=15 cm, B=20 cm, 60 s, Original -> Enhance Details -> Local Histogram

Observação: As radiografias apresentadas nas figuras 80 e 81 estão borradas. É impossível obter dados dentro de tolerâncias aceitáveis

4.5 - RADIOGRAFIAS OBTIDAS COM MÉTODOS CONVENCIONAIS UTILIZANDO FILMES RADIOGRÁFICOS

Foram obtidas radiografias analógicas tanto da chapa 01 como da chapa 02 (ver figuras 82 até 86) elaboradas por uma empresa de prestação de serviços de radiografias industriais. Observa-se a utilização de IQIs (indicadores de qualidade). As radiografias analógicas foram escaneadas e manipuladas com o software Isee!.

Desta forma apresenta-se uma possibilidade de comparar a tecnologia utilizando-se Imaging Plates e a tecnologia convencional, tendo em vista uma morfologia da solda idêntica nas chapas navais 01, 02 e 03, as quais foram recortadas de uma peça original única. Os parâmetros para a elaboração das radiografias mostradas a seguir foram:

Elemento Radioativo: Irídio 192

Ponto Focal: 2,7/0,75

Intensidade: 17 Curie

Tempo de Exposição: 5 minutos

Distancia Fonte/Filme: 600 mm

Filme: Fuji classe 2

Marca do escaneador utilizado: Epson

Modelo: perfection 4990 pro

Resolução utilizada nos escaneamentos: 800 dpi

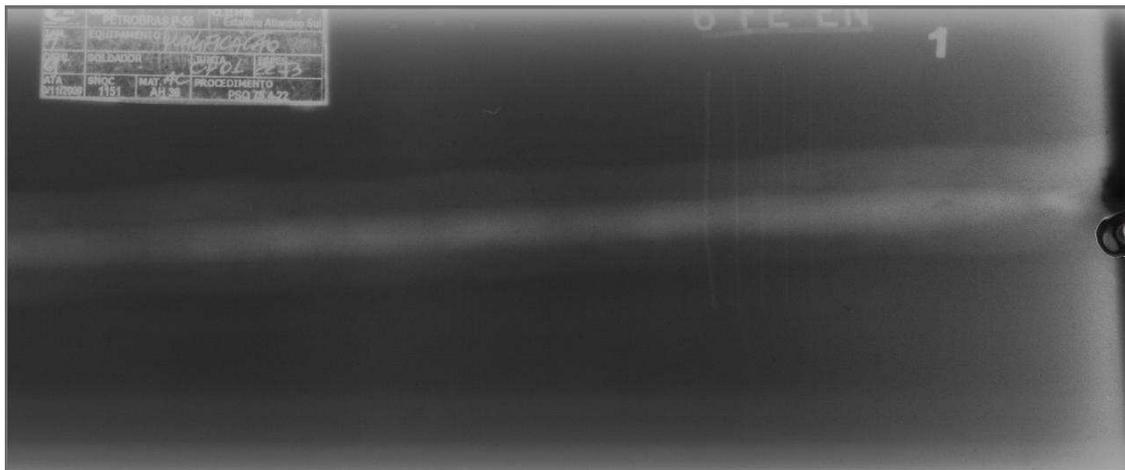


Figura 82: Radiografia (filme convencional) da Chapa Naval 01, A=60 cm, Original

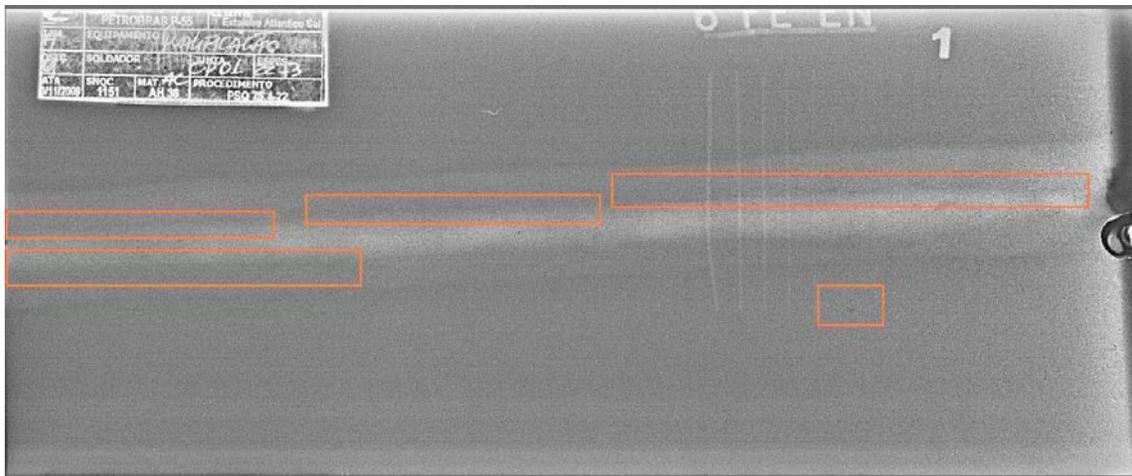


Figura 83: Radiografia analógica da Chapa Naval 01, A=60 cm, manipulada com Enhance Details + Local Histogram. Observam-se inclusões de escória e porosidade.

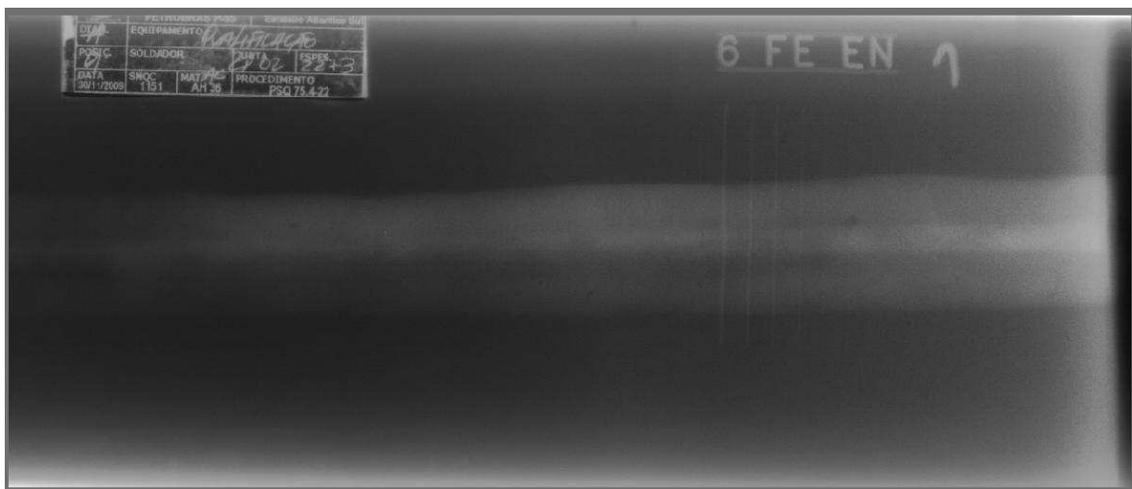


Figura 84: Radiografia analógica da Chapa Naval 02, A=60 cm, Original

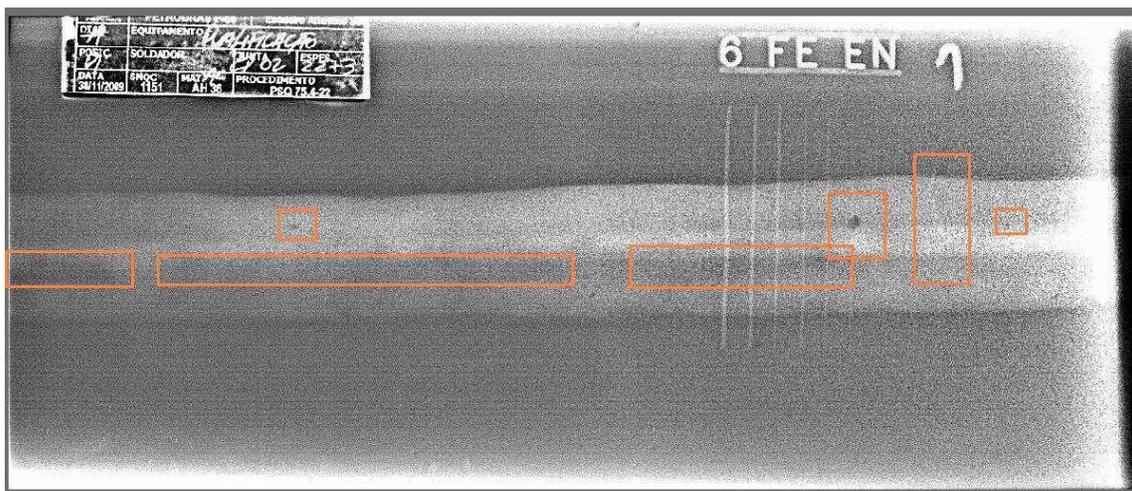


Figura 85: Radiografia analógica da Chapa Naval 02, A=60 cm, manipulada com Enhance Details + Local Histogram. Observam-se inclusões de escória e bolhas

Observação: Apesar de apresentar um bom contraste, as radiografias analógicas, mesmo manipuladas com o software Isee! após a digitalização, não apresentam a nitidez das melhores radiografias obtidas em laboratório utilizando-se o Imaging Plate.

4.6 - COMPROVAÇÃO DOS MÉTODOS PARA ANÁLISE DA SOLDA RADIOGRAFADA

Antes de iniciar as análises das radiografias da chapa naval em si, é necessário comprovar a eficácia dos métodos analíticos a serem aplicados no exame da chapa naval soldada. Uma forma de comprovar estes métodos é a aplicação dos mesmos em alguma radiografia devidamente estudada e de origem e qualidade confiável. O Laboratório de Materiais dispõe de uma radiografia digital de três peças (figura 31) elaborada no BAM – Bundesanstalt für Materialforschung de Berlin, Alemanha. Este Instituto é reconhecidamente um dos mais avançados e mais bem equipados em todo mundo. Por conveniência estabeleceu-se esta radiografia para a comprovação dos métodos de análise aplicados posteriormente às radiografias computacionais da chapa naval 03 obtidas no Laboratório de Materiais do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE.

4.6.1 - COMPROVAÇÃO DO MÉTODO PARA ANÁLISE QUALITATIVA DA SOLDA RADIOGRAFADA

Para analisar uma a imagem radiográfica qualitativamente é conveniente aplicar os filtros oferecidos pelo programa Isee!. Para a análise quantitativa incluindo a análise dimensional da largura do cordão de solda e de defeitos localizados, a aplicação da ferramenta Profiler sobre imagem editada é mais indicada.

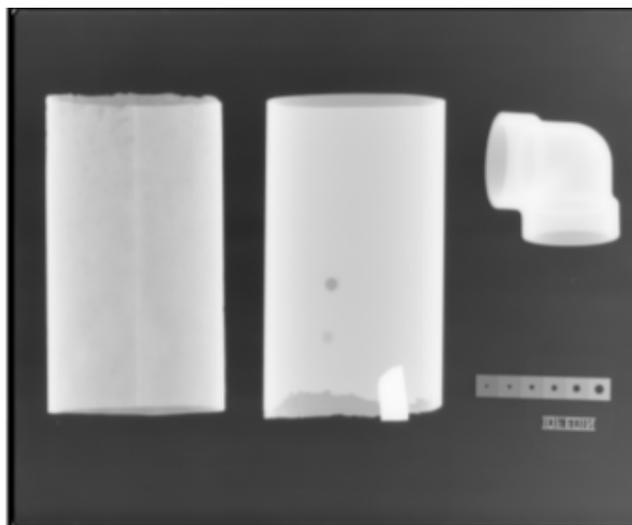


Figura 86: Radiografia digital das tubulações e do joelho mostrados na figura 31, elaborada no BAM, Alemanha

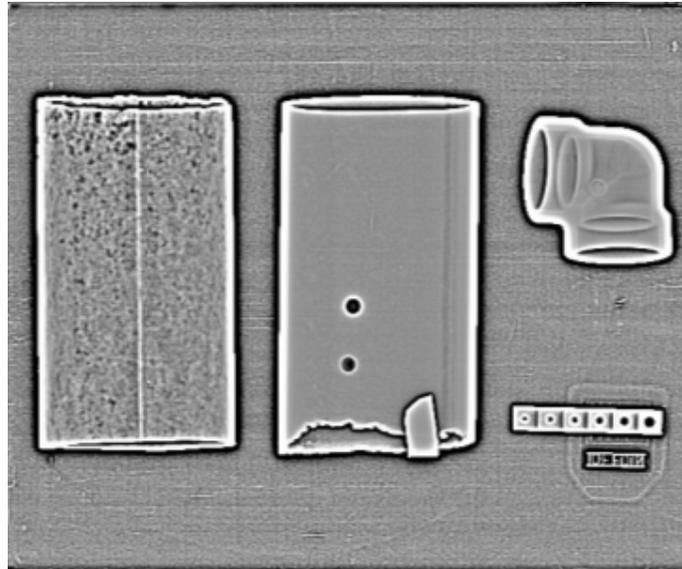


Figura 87: Aplicação do filtro BESSEL fornecido pelo programa Isee!, na imagem radiográfica mostrada na figura 80.

Analisando-se a radiografia apresentada na figura 87, pode-se distinguir a tubulação mais corroída da menos corroída, bem como se tornou mais visível os aspectos internos do joelho. Comparando a figura 81, onde fora aplicado o filtro Bessel, com a radiografia original (figura 86), verifica-se um aumento significativo da visibilidade de detalhes.

4.6.2 - COMPROVAÇÃO DO MÉTODO PARA ANÁLISE QUANTITATIVA DA SOLDA RADIOGRAFADA

O programa Isee! oferece vários poderosos instrumentos e funções para detectar a dimensão de um dado fenômeno observado em alguma radiografia. A função Profiler calcula o grau de cinza ao longo de uma reta traçada na própria imagem radiográfica, a qual o usuário pode definir livremente. Em alguns casos faz-se necessário encontrar um determinado ponto no qual possa haver uma mudança no gradiente de cinza da radiografia. Para estes casos, o Isee! oferece outro instrumento muito eficaz: Existe a possibilidade de obter-se o gráfico da primeira derivada do grau de cinza ao longo de uma reta pré-determinada, instrumento muito útil na determinação exata de, por exemplo, uma borda. Ainda constam outras funções adicionais para casos especiais. Porém para a análise do cordão de solda da chapa naval encontramos resultados imediatos aplicando apenas a função Profiler, encontrando desta forma a medida de determinada dimensão a ser encontrada.

Nestas medições deve ser levado em consideração o fator de aumento k da radiografia em relação à peça radiografada. O programa Isee! não computa a distância da peça até o filme, mas apenas a dimensão presente no mesmo.

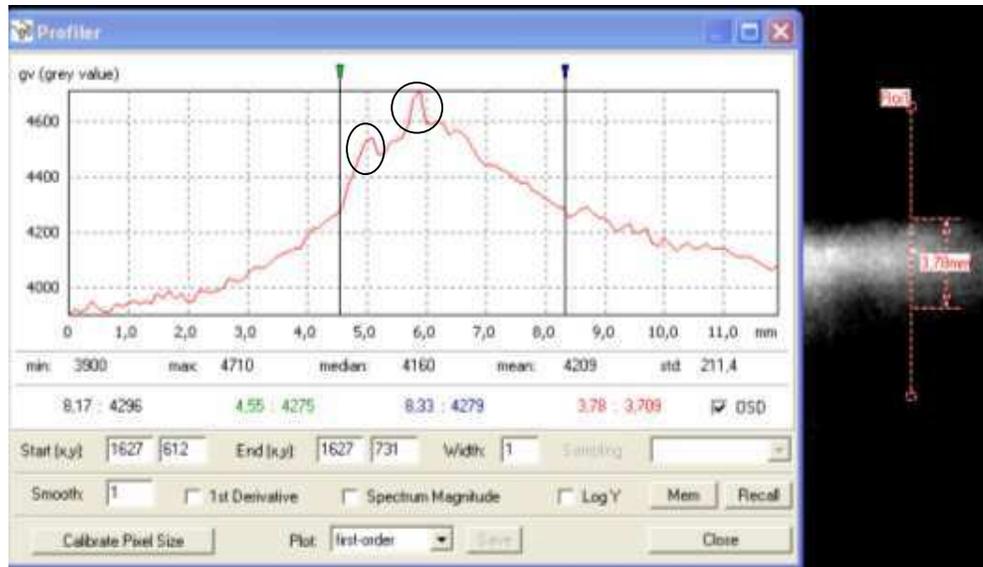


Figura 88: Análise de um trecho do cordão de solda da tubulação mais corroída, neste trecho o cordão está quase perfeito a não ser pelas falhas destacadas.

Pela análise da radiografia da tubulação mais corroída mostrada à esquerda do gráfico na figura 87, percebe-se que neste trecho do cordão de solda há um padrão amplamente contínuo com exceção do padrão das regiões destacadas. As duas falhas nestas regiões são provocadas por excesso de material. A análise do cordão desta solda com a ferramenta Profiler fornece para este trecho do cordão de solda o valor da largura da solda de $(3,78 \text{ mm} \times 0,9521) = 3,60 \text{ mm}$. O valor de $k = 0,9521$ utilizado aqui foi calculado utilizando a equação 5. As falhas destacadas apresentam dimensões de 0,46 mm e 0,37 mm respectivamente.



Figura 89: Análise de outro trecho do cordão de solda da tubulação mais corroída, aqui o cordão encontra-se livre de falhas.

A figura 89 mostra um trecho do cordão de solda livre de falhas, os diversos degraus presentes no gráfico se explicam pelo fato de o trecho em análise ser estreito causando uma maior ampliação no gráfico. O cordão apresenta uma largura de $3,61 \text{ mm} \times 0,9521 = 3,44 \text{ mm}$.

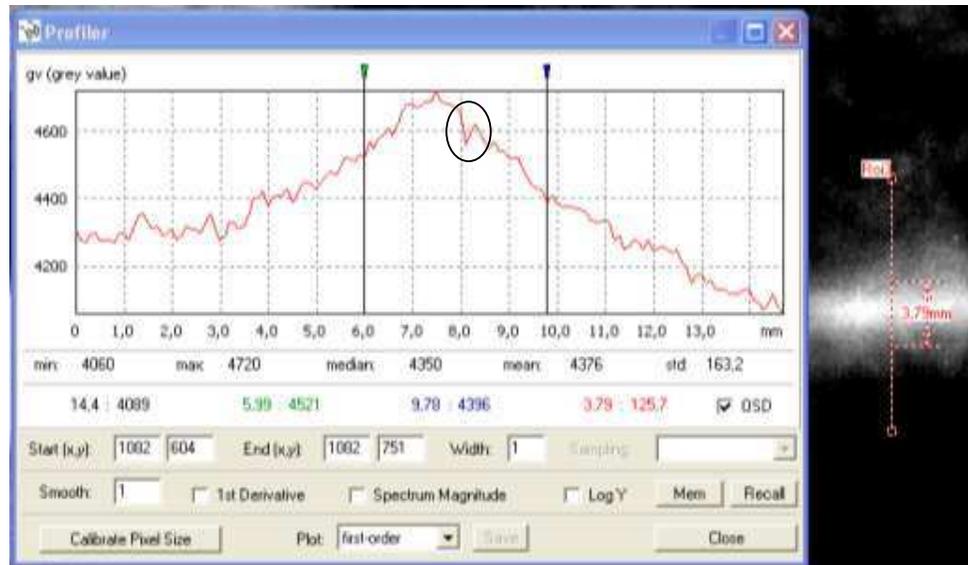


Figura 90: Análise de outro trecho do cordão de solda da tubulação mais corroída com falha destacada. As descontinuidades à direita correspondem à regiões corroídas.

A figura 90 mostra um típico caso da inclusão de uma pequena bolha inclusa (porosidade). A falha gera um pico para baixo destacado no gráfico. O cordão de solda da tubulação apresenta uma largura de $3,79 \text{ mm} \times 0,9521 = 3,61 \text{ mm}$. Um maior refinamento na análise deste gráfico fornece um valor de $0,2 \text{ mm} \times 0,9521 = 0,19 \text{ mm}$ para a largura da falha.

Para comprovação da eficácia do método da primeira derivada fornecido pelo software Isee! foram realizadas seis medidas com um paquímetro de 0,02 mm de resolução nas tubulações e no joelho. O mesmo foi feito com o programa ISee. Os resultados são mostrados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2: Valores Medidos com Paquímetro em mm.
Valores medidos das tubulações e do joelho com um paquímetro de 0,02mm

	Espessura	Diâmetro Interno	Diâmetro Externo
Joelho	8,00	48,80	64,22
	7,86	48,62	64,06
	7,78	48,54	63,80
	7,46	48,10	64,48
	8,58	48,70	64,00
	8,24	48,00	64,34
Média	7,99	48,46	64,15
Desvio Padrão	0,387952	0,330575	0,246171
Tubo menos corroído	4,40	105,20	115,00
	4,52	106,00	115,08
	4,42	106,02	114,68
	4,42	106,32	114,62
	4,60	106,18	114,82
	4,42	105,90	114,90
Média	4,45	105,94	114,85
Desvio Padrão	0,079415	0,390162	0,179221
Tubo mais corroído	3,45	107,22	114,60
	3,38	108,00	113,58
	3,24	107,56	115,00
	3,46	107,90	114,50
	3,30	107,26	114,38
	3,10	107,40	115,14
Média	3,31	107,56	114,52
Desvio Padrão	0,138046	0,328735	0,552039

Tabela 3: Valores Medidos com o Software ISee em mm
 Valores obtidos através do ISee, com o método da derivada sem a correção da ampliação

	Espessura	Diâmetro Interno	Diâmetro Externo
Joelho	7,75	50,3	66,3
	7,76	50,4	65,9
	7,67	50,8	65,6
	7,74	50,8	65,8
	7,71	50,8	65,6
	7,91	50,6	65,6
Média	7,76	50,5	65,8
Desvio Padrão	0,081894	0,22286	0,275681
Tubo menos corroído	4,45	112	121
	4,62	112	121
	4,62	112	121
	4,28	112	121
	4,69	112	121
	4,57	112	121
Média	4,54	112	121
Desvio Padrão	0,149588	0	0
Tubo mais corroído	3,38	114	121
	3,20	114	121
	3,18	114	121
	3,29	114	121
	3,18	114	121
	3,29	114	121
Média	3,24	114	121
Desvio Padrão	0,080416	0	0

Observação: O programa Isee! apresenta uma limitação de três casas decimais na medição de qualquer comprimento. Peças grandes como os tubos não podem ser medidos com acuracidade apropriada.

Para se comparar a viabilidade do uso da equação 6 em detrimento da equação 2, e ainda a confiabilidade das medidas apresentadas pelo software Isee!, aplicaram-se as equações utilizando os valores médios das tabelas 1 e 2, resultando nos valores mostrados na tabela 4:

Tabela 4: Eficácia da Análise Quantitativa
Comparativo entre os valores reais (W), [Tabela 2]. Os obtidos com a equação 2 (w_1) e com a equação 5 (w_2). Os valores destacados por (*) são os mais próximos do real.

	W (mm)	w_1 (mm)	w_2 (mm)	$W - w_1$ (mm)	$W - w_2$ (mm)	$w_1 - w_2$ (mm)
Peça 1						
Espessura	4,45	4,27	4,32	0,18	0,13*	-0,05
D. Externo	114,85	115	115,18	-0,15*	-0,33	-0,18
D. Interno	105,94	106,46	106,62	-0,52*	-0,68	-0,16
Peça 2						
Espessura	3,31	3,31	3,08	0,00*	0,23	0,23
D. Externo	114,52	115,02	115,20	-0,5*	-0,68	-0,18
D. Interno	107,56	108,41	108,54	-0,85*	-0,98	-0,13
Peça 3						
Espessura	7,99	7,31	7,55	0,68	0,44*	-0,24
D. Externo	64,15	63,71	64,03	0,44	0,12*	-0,32
D. Interno	48,46	49,10	49,14	0,64*	-0,68	-0,04

A tabela 4 demonstra um resultado esperado, os valores obtidos pela equação 2 estão em sua maioria mais próximos do real, contudo os valores obtidos pela equação 5 embora mais distantes do real não apresentam um caráter totalmente descartável, pois a diferença entre w_1 e w_2 não ultrapassa 0,5 mm sobre as dimensões medidas.

Comparando os resultados obtidos com o programa Isee! com dados obtidos com paquímetro pode-se concluir, que a eficácia dos métodos de análise oferecidos pelo programa é de alta precisão e qualificados e pela simplicidade e proximidade dos resultados, conclui-se, que a equação 5 pode ser utilizada na análise das imagens radiográficas da chapa naval.

4.7 - ANÁLISE DA SOLDA RADIOGRAFADA

Em seguida serão aplicados os métodos apresentados no capítulo anterior na avaliação das radiografias do cordão de solda da chapa naval 03. Uma das radiografias, que se destaca pela boa qualidade é aquela em que foram aplicados os seguintes parâmetros: voltagem de 120kV, corrente de 1mA, tempo de exposição de 30 segundos e distância de 40 cm, fonte-amostra (distância A). O IP Super Sensitive ficou encostado na chapa (distância B=0), o filme foi escaneado com resolução de 600dpi (figuras 60, 61, 62, 91, 92).

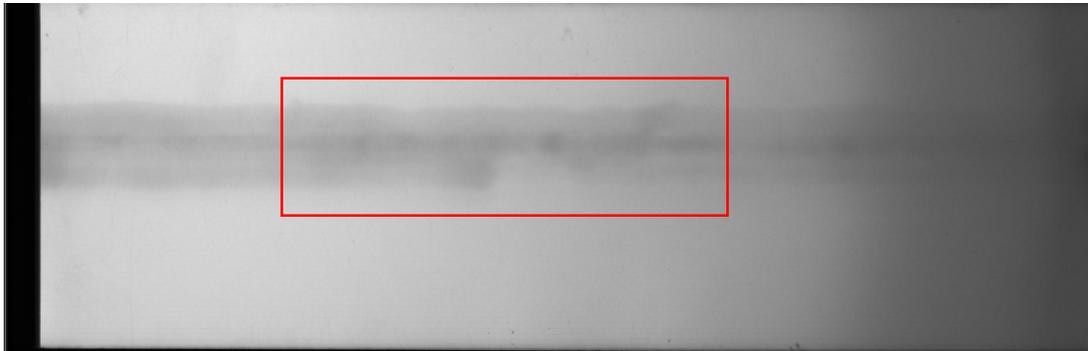


Figura 91: Radiografia tirada da chapa naval 03. Distância A: 40 cm, Tempo: 30 s. A parte destacada será utilizada com ampliação para exames dimensionais da largura do cordão de solda.

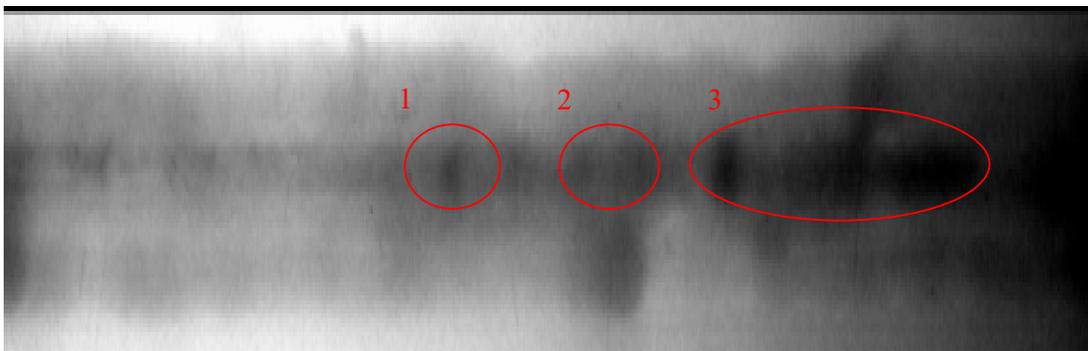


Figura 92: Análise da parte central da radiografia representada na figura 85. O cordão de solda é parcialmente uniforme, exceto nos pontos indicados.

Analisando-se o cordão de solda da figura 86 percebe-se uma estrutura com diversas variações na quantidade de material depositado, com destaque para os três pontos assinalados. Para esta imagem obtém-se um valor de ampliação $k = 0,9763$. Este valor se dá por causa da espessura da chapa de 19 mm. O centro da chapa ficou afastado 9,5 mm do Imaging Plate. A largura da solda encontrada é,

na área 1 = 1,10 mm
na área 2 = 2,14 mm
na área 3 encontra-se um comprimento de 11,72 mm e largura de 1,34 mm.

Outra radiografia, também de boa qualidade é aquela em que foram aplicados os seguintes parâmetros: voltagem de 120kV e corrente de 1mA o tempo de 160 segundos e distância de 40 cm, fonte-amostra (distância A). O IP ficou encostado na chapa (distância B=0), o filme foi escaneado com resolução de 600dpi. Esta radiografia serviu para a elaboração de uma série de manipulações para melhor visualização de defeitos e análises dimensionais (figuras 63, 64, 65, 93 até 102).

A Figura 93 mostra a imagem radiográfica sem tratamento da imagem, a figura 94 mostra um detalhe ampliado e negativo da figura 93. As figuras 95 até 102 mostram imagens radiográficas após a manipulação e análise da mesma radiografia. Desta forma foi possível observar o cordão de solda com maior nitidez. Algumas discontinuidades foram documentadas, foram encontrados porosidade (bolhas) e inclusões de escória.



Figura 93: Radiografia tirada da chapa naval 03. Distância A: 40 cm, Tempo: 160 s. A região destacada foi ampliada para efetuar exames de defeitos e exames dimensionais detalhados.

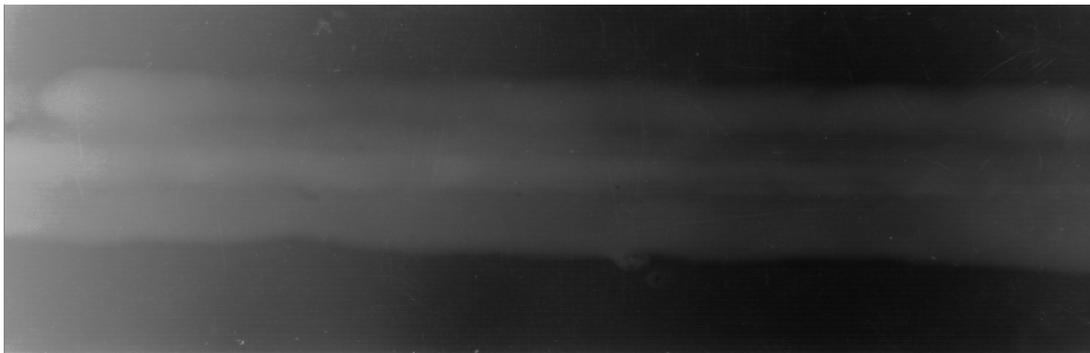


Figura 94: Detalhe do negativo da imagem radiográfica da chapa naval soldada, inicialmente sem processar a imagem

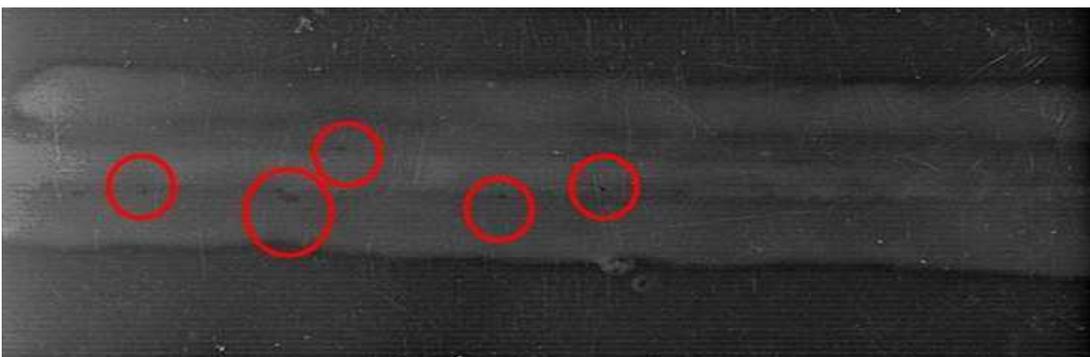


Figura 95: Imagem radiográfica da chapa naval solda processada com Enhance Detail, enfatizando pequenas bolhas (porosidade) encontradas na solda

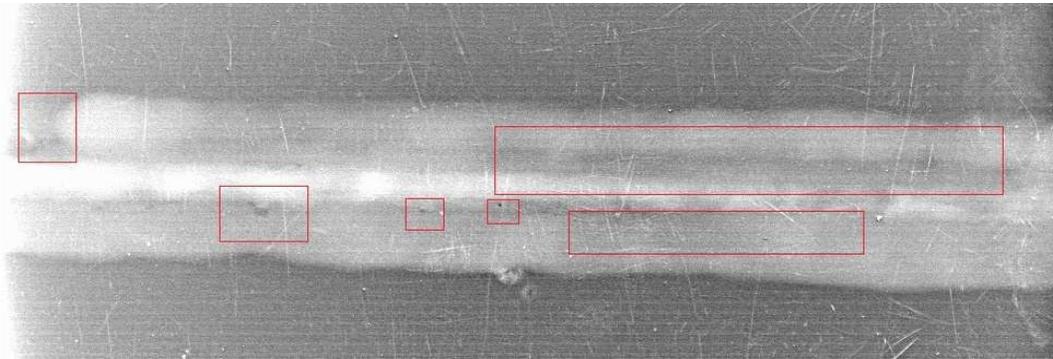


Figura 96: Imagem radiográfica da chapa naval soldada, processada com Enhance Details enfatizando inclusões de escória e porosidade.

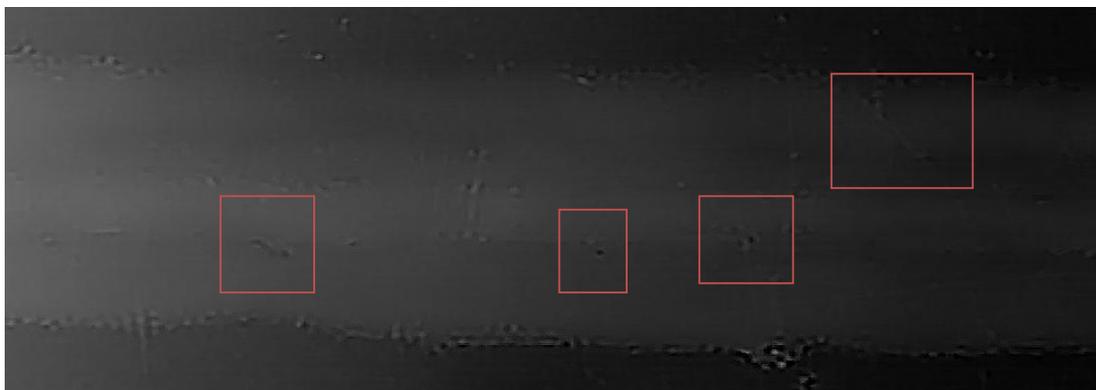


Figura 97: Imagem radiográfica da chapa naval soldada processada com a ferramenta MEM

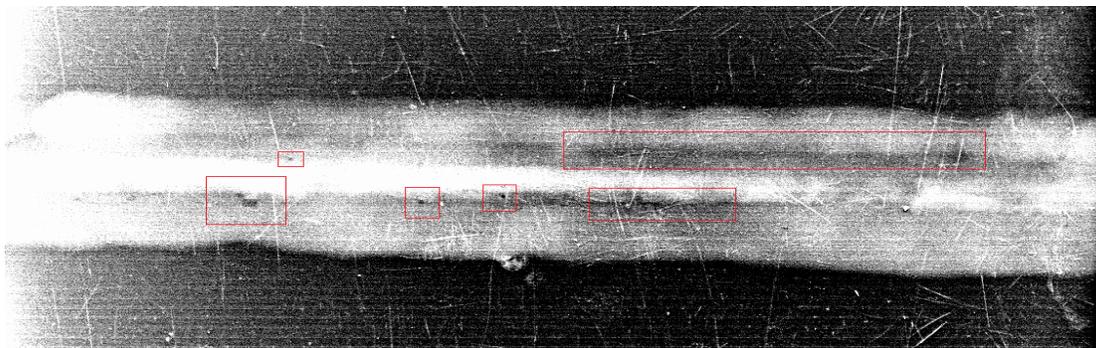


Figura 98: Imagem radiográfica da chapa naval soldada, processada com Enhance Details enfatizando inclusões de escória e porosidade.

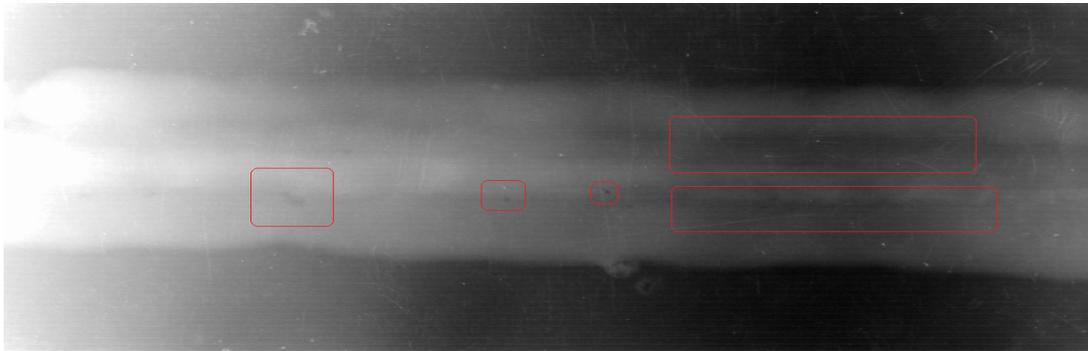


Figura 99: Imagem radiográfica da chapa naval soldada aplicado o controle de tons de cinza. O processamento da imagem foi feito com a ferramenta FFT

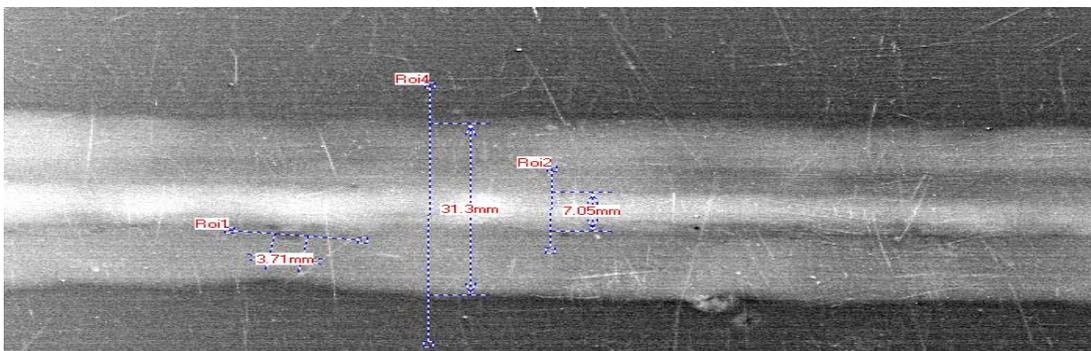


Figura 100: Imagem radiográfica da chapa naval processada no software ISee!. Foi efetuada uma análise dimensional do cordão de solda.

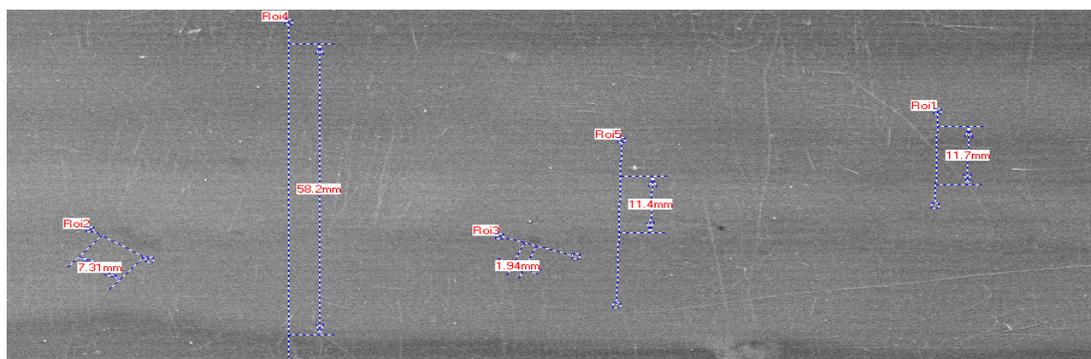


Figura 101: Detalhe da imagem radiográfica ampliada da chapa naval 03 processada com o software ISee! com análises dimensionais detalhadas.

Na figura 100 foi efetuado o dimensionamento do próprio cordão de solda. A precisão das medidas é limitada pelo próprio programa Isee! em três casas decimais. Pela ausência de indicadores de qualidade de imagem é impossível determinar com certeza a acuracidade das medidas, mas podemos afirmar que a precisão corresponde aproximadamente 0,2 mm

encontrado nas medições mostradas na tabela 4, onde se encontra nas linhas correspondentes diferenças de medições das espessuras de um joelho e dois tubos (figura 31). Desta forma, na medição da espessura de 4,45 mm, a diferença para o valor real se situa na faixa entre 0,13 e 0,18 mm (tabela 4). A medição da espessura de 3,31 mm resultou em variância de até 0,23 mm (tabela 4). Por mera observação visual da radiografia convencional do joelho e dos dois tubos elaborada no BAM, na Alemanha (figura 86), é possível verificar, que a qualidade desta radiografia equivale a das radiografias digitais das chapas navais que foram examinadas detalhadamente nesta dissertação. Assim pode-se apenas afirmar, que falhas com 0,4 mm ou maior podem ser reconhecidas nas radiografias das chapas navais, elaboradas com os métodos aplicados no laboratório. A utilização de indicadores de qualidade é a única forma de comprovar com exatidão a resolução espacial efetiva das radiografias digitais. Este dispositivo não estava disposto no laboratório durante o período da elaboração das radiografias digitais.

A figura 101 mostra o dimensionamento de algumas das irregularidades encontradas. Nas regiões apresentando porosidade, a seção útil da solda é reduzida e são gerados concentradores de tensões. A resistência da solda é diminuída.

Em seguida será efetuado o controle da continuidade ao longo do cordão de solda. Para este exame a radiografia utilizada foi:

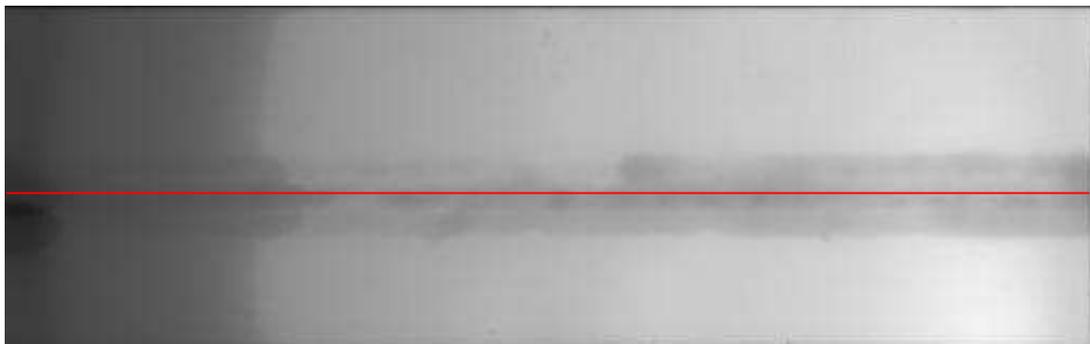


Figura 102: Radiografia tirada da chapa naval 03, distância fonte – IP (A) = 40 cm, tempo de exposição = 160 s. A linha destacada representa o percurso das medições da intensidade do acinzamento.

A ferramenta do software Isee! denominada Profiler foi utilizada para determinar o grau de cinza ao longo do cordão de solda. Esta ferramenta indica, se há alguma descontinuidade na espessura da solda. Falhas como bolhas e trincas podem ser detectadas desta forma. Na figura 102 é representada a linha da medição do grau de cinza, na figura 103 é mostrado o gráfico correspondente à resposta do software para esta linha.



Figura 103: Análise da continuidade da solda apresentada na figura 102. Percebe-se pela análise do gráfico que o cordão apresenta uma distribuição quase uniforme exceto pela parte destacada, correspondente à área dos três pontos analisados na Figura 92.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

Constatou-se que, com programas relativamente simples e leve como o Isee!, Matlab e outros como, por exemplo, Origin, podem ser localizados e identificados defeitos em cordões de solda, bem como quantificá-los desde que sejam tomadas as devidas precauções.

Assim comprovou-se que é possível analisar e dimensionar imagens radiográficas para determinar a integridade de cordões de solda com instrumentos e métodos relativamente simples.

De forma geral, a solda da chapa naval examinada é de boa qualidade. Para a aplicação na indústria naval ela se encontra dentro das tolerâncias estabelecidas pelas normas comumente utilizadas, como por exemplo, a ASME VIII, a API 1104 ou a AWS.

O resultado que causou bastante otimismo foi o fato de se ter conseguido obter radiografias de ótima qualidade nas chapas navais com espessura de 19 mm aos quais devem ainda ser adicionado um acréscimo de solda, resultando uma espessura na solda de mais de 20 mm, utilizando um equipamento, isto é uma fonte de raio-X de relativamente baixa potência.

Notável foi o fato, de ao iniciar a obtenção de radiografias no laboratório utilizando o Imaging Plate, a informação do fabricante da fonte indicava a utilização da mesma para radiografar chapas de aço de no máximo de 15 mm de espessura, quando a chapa naval examinada apresentaria uma espessura de 19 mm mais alguns milímetros no próprio cordão de solda. Isto só foi possível pelo uso do Imaging Plate, ao invés de filme radiográficos tradicionais, já que o Imaging Plate mostra uma sensibilidade mais de 100 vezes superior ao filme tradicional.

Já a tentativa de utilizar a técnica conhecida por Project Magnification, na qual o filme é afastado do objeto para alcançar um efeito ampliador, não teve sucesso, no sentido de obter maior nitidez em radiografias. As radiografias nas quais o IP ficou encostado na chapa naval demonstram uma boa nitidez na imagem radiográfica. As radiografias nas quais o IP ficou afastado da chapa naval obtêm-se uma ampliação da imagem. Porém tendo em vista que a fonte tem um diâmetro de 0,8 mm, a nitidez diminuiu em relação às radiografias com o IP encostado na chapa radiografada. Este fato não surpreendeu, já que esta tecnologia de ampliação de imagem conhecida como Project Magnification requer uma fonte microfocal com diâmetros de 0,01 mm ou menos, muito menor que a utilizada em laboratório (0,8 mm).

Os extensos estudos a respeito de tensões residuais não revelaram nenhuma correlação direta entre a qualidade da solda propriamente dita, isto é, se existem inclusões de escória e porosidade ou não no surgimento de tensões residuais e distorções em chapas navais soldadas. Não foram revelados fatores decisivos para eliminar tensões residuais das chapas navais unidas por soldagem, fatores os quais possam ser visualizados através da radiografia computacional, com a tecnologia à disposição do Laboratório de Materiais do Centro de Tecnologia de Geociências da Universidade Federal de Pernambuco.

A pergunta a respeito da existência de uma relação entre as tensões residuais e a qualidade de uma determinada solda em chapas navais não pôde ser respondida nesta dissertação. Para isto serão necessárias pesquisas a respeito das tensões residuais, novos métodos para medição deverão ser desenvolvidos e os parâmetros precisam ser ampliados, envolvendo vários tipos de soldagem, energias aplicadas na soldagem e chapas navais de diferentes espessuras.

Os métodos de obtenção imagens de raio-X digitais podem ser aplicados a curto prazo para a análise da união de chapas navais soldadas no Estaleiro Atlântico Sul. Não há necessidade de elaborar as radiografias fora do expediente normal de serviço – devido à taxa de radiação reduzida para cerca um centésimo quando comparado à radiografia convencional (gamagrafia), a elaboração de radiografias digitais pode ser efetuada durante o expediente de trabalho e com equipamento de proteção radiológico de baixo custo sem expor os operários à radiação. A qualidade das radiografias digitais são superiores às radiografias analógicas pelo uso de fontes de menores dimensões, gerando menores regiões de sombra e maior nitidez.

5.1 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Os estudos e as pesquisas concernentes à obtenção de radiografias devem ser estendidos. O equipamento do laboratório recebeu recentemente um painel digital para obter radiografias digitais on-line. Este campo fornece um grande número de vantagens, frente que o processamento de Imaging Plates é relativamente estendido e moroso.

No campo de ultrasonografias estão sendo levadas adiante as pesquisas com a elaboração e manufatura de transdutores capazes de gerar ondas transversais cisalhantes. Com este tipo de transdutor, por sua vez, capacitamos os pesquisadores para a elaboração e o estabelecimento de uma tecnologia inédita no Brasil para obter dados a respeito de tensões residuais em chapas navais.

Também devem ser incluídos estudos na prática no campo, especificamente devem ser elaborados ensaios de radiografias no Estaleiro Atlântico Sul, após determinação dos principais parâmetros para obtenção de radiografia de qualidade.

A utilização de ICIs (Indicadores de Qualidade da Imagem) deve ser acrescentada em estudos envolvendo radiografias. Desta forma será possível obter informações mais objetivas a respeito da nitidez e do contraste de determinadas radiografias.

A fonte neste estudo consiste em uma tecnologia convencional, à qual é limitada quanto à resolução e a nitidez das radiografias obtidas. Com a aquisição futura de uma fonte de raios-X microfocal para explorar a potencialidade, devem ser ampliados os ensaios incluindo o método de “Project Magnification”, visando detectar falhas na soldagem de dimensão micrométrica. A combinação de uma fonte microfocal com um detector digital aumenta ainda mais a potencialidade da qualidade de radiografias a serem elaboradas no Laboratório de Materiais da Universidade Federal de Pernambuco.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL DIOGO, ESTEFEN SEGEN, **Distorções de fabricação na construção naval e offshore**, 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Salvador 2004

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, **Standard guide for computed radiology (photostimulable luminescence (psl) method)**, USA 2007

AMERICAN WELDING SOCIETY, **Welding Handbook: Welding science and technology v. 1**, 2002

ANDRINO MARCILIO HADDAD, CAETANO SIDNEY FELIX, SANTOS JUNIOR AUTELIANO ANTUNES, **Avaliação das tensões em chapas de alumínio 7050 utilizando o efeito acustoelástico**, 6ª COTEQ – Conferência sobre Tecnologia de equipamentos, Bahia 2002

BAM – BUNDESANSTALT FÜR MATERIALFORSCHUNG, **User manual for measuring program Isee!, version 1.7.**, Alemanha 2007

BAVENDIEK K., HEIKE U., MEADE W.D., Zscherpel U., EWRT U., **New Digital Radiography Procedure Exceeds Film Sensitivity considerably in Aerospace Applications**, ECNDT, 2006

BHADESHIA H.K.D.H., **Materials Science & Metallurgy, Cap. 2-4**, 1983

BLAKELY BRUCE, SPARTIOTIS KONSTANTIN, **Digital Radiography for the Inspection of Small Defects**, World Centre for Materials Joining Technology, TWI Ltd. 2005

CAETANO SIDNEY FELIX, ANDRINO MARCILIO HADDAD, SANTOS JUNIOR AUTELIANO ANTUNES, TREVISAN ROSEANA DA EXALTAÇÃO, **Determinação da direção de laminação em aços api 51-x70 utilizando ondas ultra-sônicas cisalhantes**, 6ª COTEQ – Conferência sobre Tecnologia de equipamentos, Bahia 2002

CAETANO SIDNEY FELIX, ANDRINO MARCILIO HADDAD, SANTOS JUNIOR AUTELIANO ANTUNES, TREVISAN ROSEANA DA EXALTAÇÃO, **Aplicação da acustoelasticidade para avaliação de tensões em soldas em aço api 51 x65**, PANNDT – Conferência Pan-Americana de Ensaios Não Destrutivos 2003

ESTEFEN SEGEN, GUROVA TATIANA, CASTELLO XAVIER, LEONTIEV ANATOLI, **Análise de evolução do estado das tensões residuais de soldagem**, Conferência de tecnologia de soldagem e inspeção, Rio de Janeiro 2008

ESTEFEN SEGEN e outros, **Materials and fabrication technology**, 17th International Ship and Offshore Structures Congress, Korea 2009

EUROPEAN STANDARD. EN 1435: **Non-destructive examination of welds-radiographic examination of welded joints**

EWERT UWE, **Codes and standards in digital industrial radiology**, India 2007

EWERT UWE, **Progress in digital industrial radiology**, India 2007

FUJIFILM, **Computed radiography for NDT**

GUROVA TETYANA, QUARANTA FRANCISCO, ESTEFEN SEGEN, **Monitoramento do estado das tensões residuais durante a fabricação de navios**, Laboratório de tecnologia submarina, COPPE/UFRJ 2007

HIRAO M., OGI H., FUKUOKA H., **Resonance Emat system for acoustoelastic stress measurement in sheet metals**, Cap. 10, 1993

HIRAO M., OGI H., FUKUOKA H., **Emats for science and industry**, 1994

KEHOE A., PARKER G. A., **Image processing for industrial radiographic inspection: image enhancement**, British Journal of NDT 1990; Vol.32

KOU S., **Welding Metallurgy**, 2002

LIAO T W, TANG K., **Automated extraction of welds from digitized radiographic images based on mlp neural networks**, Applied Artificial Intelligence 1997. vol.11

LIAO T W, LI Y., **An automated radiographic NDT system for weld inspection: part II – flaw detection**, NDT&E International 1998

MASUBUCHI KOICHI, **Analysis of welded structures – residual stresses, distortion, and their consequences**, Cap. 1-5, USA 1980

MODENESI PAULO J., **Efeitos mecânicos do ciclo térmico**, Apostila, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008

MODENESI PAULO J., **Descontinuidades e Inspeção em Juntas Soldas**, Universidade Federal de Minas Gerais, 2001

MURAKAMI K., **Image processing for non-destructive testing**, Welding International, 1990

PADUA GERMANO, DA SILVA ROMEU, LAVOURAS RAQUEL, REBELLO JOÃO, CALÓBA LUIZ, **Extração do cordão de solda e detecção de defeitos em radiografias usando redes neurais**, PANNDT- Pan-American Conference for Nondestructive Testing, Rio de Janeiro 2003

PORTER DAVID, EASTERLING KENNETH, **Phase transformations in metals and alloys**, 1992

SHINOHARA ARMANDO HIDEKI, ACIOLI EDMUNDO, KHOURY HELEN JAMIL, **Avaliação da técnica de radiografia digital em gamagrafia**, COTEQ, 6., 2002, Salvador

SILVA CLEITON CARVALHO, **Avaliação das tensões residuais de soldagem em tubulações de pequeno diâmetro usadas em refinaria de petróleo**, Cap. 3, Universidade Federal do Ceará, 2007

SILVA ROMEU RICARDO, **Reconhecimento de padrões de defeitos de soldagem em radiografias industriais**, Rio de Janeiro, 2003

UNIFEI – UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, **Distorção – Tipos e Causas**, <<http://www.iem.unifei.edu.br/professores/edmilson/Distortion33.pdf>>, acesso em 02-11-2009

VIDEIRA JOSÉ JOÃO CARLOS, HILTON SERGIO B. MILANI, OLIVEIRA PAES ALMIR, **Inspeção de juntas soldadas através de radiografia computadorizada como ferramenta de avaliação de engenharia**, PANNDT- Pan-American Conference for Nondestructive Testing, Rio de Janeiro 2003

ZEEMANN ANNELIESE, **Tensões residuais de soldagem**, <www.infosolda.com.br>, acesso em 25-07-2009

ZSCHERPEL UWE, EWERT UWE, **Computed radiography**, India 2007

ZSCHERPEL UWE, EWERT UWE, BAVENDIEK KLAUS, **Possibilities and limits of digital industrial radiology: the new high contrast sensitivity technique - examples and system theoretical analysis**, International Symposium on Digital industrial Radiology and Computed Tomography, 2007, Lyon, France

ZSCHERPEL U., ALEKSEYCHUK O., BÄR S., **Corrosion and wall thickness measurement**, 2007. <<http://www.ndt.net/article/imagingNDE2007/Zscherpel2.pdf>> Acesso em 15 de agosto 2009