



COPPE/UFRJ

**RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA APLICADA NA INSPEÇÃO DE SOLDAS DE
TUBULAÇÕES NOS LIMITES DA TÉCNICA DE PAREDE DUPLA VISTA DUPLA
(PDVD)**

Carla Alves Marinho Ferreira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientadores: João Marcos Alcoforado Rebello
Ricardo Tadeu Lopes

Rio de Janeiro
Março de 2009

RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA APLICADA NA INSPEÇÃO DE SOLDAS DE
TUBULAÇÕES NOS LIMITES DA TÉCNICA DE PAREDE DUPLA VISTA DUPLA
(PDVD)

Carla Alves Marinho Ferreira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

Aprovada por:

Prof. João Marcos Alcoforado Rebello, D.Sc

Prof. Ricardo Tadeu Lopes, D.Sc

Prof^a. Renata Antoun Simão, D.Sc

Prof. Armando Hideki Shinohara, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2009

Ferreira, Carla Alves Marinho

Radiografia Computadorizada Aplicada na Inspeção de Soldas de Tubulações nos Limites da Técnica de Parede Dupla Vista Dupla (PDVD)/Carla Alves Marinho Ferreira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XXI, 93 p.: il.; 29; 7cm.

Orientadores: João Marcos Alcoforado Rabello

Ricardo Tadeu Lopes

Dissertação (mestrado) - UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 68 - 72.

1. Radiografia Computadorizada. 2. Inspeção de Soldas. 3. Radiografia Convencional. 4. Normalização. I. Rabello, João Marcos Alcoforado et al. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título(série).

*Às minhas luzes no Infinito:
devotamente, Deus e Jesus.
Às minhas luzes na Terra:
carinhosamente, mamãe e vovó.*

Agradecimentos

A autora agradece primeiramente a Deus, e se curva humildemente diante de Sua Sabedoria, Glória e Amor Eternos.

Agradecimentos ao Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Petrobras (CENPES) pelo incentivo e permissão para a realização do trabalho.

Agradecimentos a COPPE/UFRJ, ao admirável Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, à equipe do Laboratório de Instrumentação Nuclear, por sua imensa colaboração, e ao instituto alemão BAM pelo convite para a realização da fase sanduíche da dissertação em suas dependências, em Berlim.

Agradecimentos aos colegas e amigos do SEQUI-CI Petrobras, pela constante troca de informações e corpos de prova. A Iguchi por contribuir com o laudo das radiografias.

Agradecimentos especiais aos meus orientadores João Marcos Alcoforado Rebello e Ricardo Tadeu Lopes, pela troca de idéias, incentivo, apoio e amizade.

Agradecimentos a banca examinadora, representada pelos professores Renata A. Simão e Armando H. Shinohara, os quais muito admiro e respeito.

Por fim, e não menos importante, amorosos agradecimentos a minha família, da Terra e do Infinito: Sirlei e Alice, tia Júlia, madrinha Lenil, mãe Maria, tio Meco, tia Eulália e Tinoco.

*“Que Deus não permita que eu perca o romantismo,
mesmo sabendo que as rosas não falam.
Que eu não perca o otimismo,
mesmo sabendo que o futuro que nos espera pode não ser tão alegre.
Que eu não perca a vontade de viver,
mesmo sabendo que a vida é em muitos momentos dolorosa.
Que eu não perca a vontade de ajudar as pessoas,
mesmo sabendo que muitas delas são incapazes de ver, reconhecer e retribuir esta ajuda.
Que eu não perca a garra,
mesmo sabendo que a derrota e a solidão são dois adversários perigosos.
Que eu não perca a simplicidade,
Que eu não perca a esperança,
Que eu encontre a paz.
E não perca a vontade de doar o imenso amor que existe em meu coração,
que eu caminhe buscando sempre a Luz que a tudo governa
que eu jamais esqueça que Deus me ama infinitamente...
Que um pequeno grão de alegria e esperança dentro de cada um
é capaz de mudar e transformar qualquer coisa pois:*

A VIDA É CONSTRUÍDA NOS SONHOS E CONCRETIZADA NO AMOR!”

Francisco Cândido Xavier

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA APLICADA NA INSPEÇÃO DE SOLDAS DE
TUBULAÇÕES NOS LIMITES DA TÉCNICA DE PAREDE DUPLA VISTA DUPLA
(PDVD)

Carla Alves Marinho Ferreira

Março/2009

Orientadores: João Marcos Alcoforado Rabello

Ricardo Tadeu Lopes

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Em vista dos esforços realizados na substituição da radiografia convencional na inspeção de soldas pela radiografia computadorizada, este trabalho discute a relação entre qualidade de imagem, detectabilidade e atendimento a requisitos normativos com base em experimentos realizados com dois sistemas de radiografia computadorizada e duas fontes de raios X, dentro da faixa de aplicação da técnica de Parede Dupla Vista Dupla (PDVD). Os resultados mostraram que a substituição é viável, pois atinge-se equivalência em termos de detectabilidade e qualidade de imagem, havendo ainda uma tendência geral de redução de exposição, mas é necessário atentar para a detectabilidade do sistema em uso, pois o simples atendimento aos requisitos estabelecidos pelos padrões normativos vigentes não garante equivalência com a radiografia convencional, a qual ainda apresenta qualidade de imagem superior. Cada sistema de radiografia computadorizada necessita atingir um limiar característico de relação sinal ruído para que se assegure a garantia de qualidade e detectabilidade de modo que a radiografia convencional seja substituída com segurança. Este limiar parece depender de fatores como a tensão aplicada no tubo fotomultiplicador e do uso ou não de telas de chumbo frontais.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

COMPUTED RADIOGRAPHY APPLIED TO WELDING INSPECTION OF PIPES
USING DOUBLE WALL DOUBLE IMAGE TECHNIQUE (DWDI)

Carla Alves Marinho Ferreira

March/2009

Advisors: João Marcos Alcoforado Rabello

Ricardo Tadeu Lopes

Department: Metallurgical and Materials Engineering

Due to the efforts in order to replace conventional film based radiography by computed radiography (CR) applied to weld inspection, this work discusses the compromise among image quality, detectability and normative requirements based on experiments with two computed radiography systems and two X-rays sources, under the limits of Double Wall Double Image technique (DWDI). The results showed the viability of the replacement, based on the equivalence in terms of detectability and image quality achieved, and a general tendency of exposure reduction, but it is necessary to take care of the CR system detectability, because simply fulfill standard requirements does not represent equivalence with conventional radiography, which still has better image quality. Each computed radiography system needs to reach a characteristic signal noise ratio threshold in order to guarantee safe equivalence with conventional radiography. This threshold seems to be dependent on factors like photomultiplier tube high voltage and the use or not of lead screens in front of the detector.

Sumário

Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xvii
Acrônimos	xx
Capítulo 1 - Introdução	
1.1 A Petrobras e a Implantação da Radiografia Computadorizada na Inspeção de Soldas.....	2
1.1.1. Motivações para o Procedimento Experimental Adotado no Trabalho.....	3
1.2 Organização da Dissertação de Mestrado.....	4
1.3 Conclusões.....	5
Capítulo 2 - Fundamentação Teórica	
2.1 Introdução	6

2.2 Raios X e Gama - Princípios Básicos.....	7
2.3 Radiografia Convencional como Método de END.....	8
2.4 Inspeção de Soldas.....	11
2.5 Radiografia Computadorizada – O Estado-da-Arte.....	12
2.5.1. Revisão Bibliográfica	12
2.5.2. Avaliação da Qualidade da Imagem.....	17
2.5.3. Estabilidade de Longo Prazo dos Sistemas de Radiografia Computadorizada	20
2.6 Substituição da Radiografia Convencional pela Técnica de RC na Inspeção de Soldas.....	21
2.7 Considerações Finais	25
 Capítulo 3 - Materiais e Métodos	
3.1 Metodologia de Teste	28
3.2.1. Materiais e Equipamentos	28
3.2.2. Procedimento experimental	29
3.2.3. Requisitos de Qualidade	32
 Capítulo 4 - Resultados	
4.1 Qualidade de Imagem Obtida com Radiografia Computadorizada.....	34
4.2 Detectabilidade – Radiografia Computadorizada e Radiografia Convencional.....	39

Capítulo 5 - Discussão dos Resultados.....	54
Capítulo 6 - Conclusões.....	62
Capítulo 7 – Trabalhos Futuros	67
Referências Bibliográficas.....	68
Apêndice A	73
Apêndice B	75

Lista de Figuras

Figura 2.1– Ampola de raios X	7
Figura 2.2 – Princípios da inspeção radiográfica	9
Figura 2.3– Técnica de PDVD	12
Figura 2.4 – Radiografia Computadorizada: (a) Incidência de radiação ionizante na placa e mecanismo simplificado de armazenamento da imagem latente nas “armadilhas”; (b) Estímulo laser e extração da imagem; (c) Varredura de um escâner..	13
Figura 2.5– Efeito da placa na imagem radiográfica obtida	15
Figura 2.6– Parâmetros de um escaner: (a) Diferentes tamanhos de leitor ótico; (b) Tamanho do leitor ótico e diferentes tamanhos de pixel	16
Figura 2.7 – SNR para diferentes IPs utilizadas sob as mesmas condições	20

Figura 3.1 – Imagem radiográfica apresentando os IQIs utilizados para análise: (a)IQI de fio e leitura do menor fio observado (W14); (b)Perfil linear traçado sobre o IQI de fio duplo revelando o primeiro par não resolvido ($11D - SR_b = 80\mu\text{m}$).....	33
Figura 4.1 – Evolução dos valores de SNR_N e contraste com a variação da exposição e energia da radiação X do tubo Seifert.	37
Figura 4.2 – CP1-1 posição A (tubo Seifert).....	40
Figura 4.3 – CP1-1 posição B (tubo Seifert)	40
Figura 4.4 – CP1-2 posição A (tubo Seifert).....	40
Figura 4.5 – CP1-2 posição B (tubo Seifert)	40
Figura.4.6 – CP2-1 posição A (tubo Seifert).....	41
Figura 4.7 – CP2-1 posição B (tubo Seifert)	41
Figura 4.8 – CP2-2 posição A (tubo Seifert).....	41
Figura 4.9 – CP2-2 posição B (tubo Seifert)	41
Figura 4.10 – CP3-1 posição A (tubo Seifert).....	41
Figura 4.11 – CP3-1 posição B (tubo Seifert)	41

Figura 4.12 – CP3-2 posição A (tubo Seifert).....	41
Figura 4.13 – CP3-2 posição B (tubo Seifert)	41
Figura 4.14 – CP4-1 posição A (tubo Seifert).....	42
Figura 4.15 – CP4-1 posição B (tubo Seifert)	42
Figura 4.16 – CP4-2 posição A (tubo Seifert).....	42
Figura 4.17 – CP4-2 posição B (tubo Seifert)	42
Figura 4.18 – CP5-1 posição A (tubo Seifert).....	42
Figura 4.19 – CP5-1 posição B (tubo Seifert)	42
Figura 4.20 – CP5-2 posição A (tubo Seifert).....	42
Figura 4.21 – CP5-2 posição B (tubo Seifert)	42
Figura 4.22 – CP1-1A, Dfd=750mm. (a) radiografia convencional (tubo Seifert) – 150kV, 24mA.min, D=2,4HD, contraste=W14 e $SR_b= 12D$; RC- sistema Dürr (tubo Seifert), $SR_b= 11D$: (b)120kV, 10mA.min, contraste=W14 e $SNR_N= 174$; (c) 150kV, 16mA.min, contraste=W14 e $SNR_N= 343$; RC- sistema GEIT (tubo YXlon), Dfd=900mm: (d)130kV, 15mA.min, contraste=W14, $SR_b= 11D$ e $SNR_N= 213$; (e) cassete com tela de chumbo, 130kV, 15mA.min, contraste=W14, $SR_b= 10D$ e $SNR_N= 158$	44

Figura 4.23– CP1-2A, Dfd=750mm. (a)radiografia convencional (tubo Seifert)- 150kV, 24mA.min, D=2,1HD, contraste W14 e $SR_b = 12D$; RC- sistema Dürr (tubo Seifert), $SR_b = 11D$: (b)130kV, 15mA.min, contraste W14 e $SNR_N = 236$; (c)150kV, 20mA.min, contraste W14 e $SNR_N = 353$; (d)Sistema Dürr, tubo YXlon, Dfd=1000mm, 130kV, 20mA.min, contraste W14, $SR_b = 12D$ e $SNR_N = 250$; (e)Sistema GEIT+cassete com tela de chumbo, tubo YXlon, Dfd=900mm, 130kV, 15mA.min, contraste W14, $SR_b = 10D$ e $SNR_N = 175$ 45

Figura 4.24– CP2-2A, Dfd=1000mm, tubo YXlon. (a)radiografia convencional - 150kV, 28mA.min, D=2,1HD, contraste W14 e $SR_b = 13D$; RC- sistema Dürr, $SR_b = 12D$: (b)130kV, 25mA.min, contraste W14 e $SNR_N = 244$; (c)130kV, 40mA.min, contraste W14 e $SNR_N = 308$; (d)Sistema GEIT, 130kV, 25mA.min, contraste W14, $SR_b = 10D$ e $SNR_N = 211$ 47

Figura 4.25– CP3-1A, Dfd=1000mm, tubo YXlon. (a)radiografia convencional - 175kV, 48mA.min, D=2,2HD, contraste W12 e $SR_b = 11D$; RC: (b)sistema Dürr, 210kV, 30mA.min, contraste W12, $SR_b = 12D$ e $SNR_N = 327$; (c)Sistema GEIT, 160kV, 25mA.min, contraste W12, $SR_b = 11D$ e $SNR_N = 213$. A seta vermelha mostra um artefato na imagem. 48

Figura 4.26– CP3-2B, Dfd=1000mm, tubo YXlon. (a)radiografia convencional - 175kV, 48mA.min, D=2,5HD, contraste W12 e $SR_b = 11D$; RC: (b)sistema Dürr, 210kV, 30mA.min, contraste W12, $SR_b = 12D$ e $SNR_N = 349$; (c)Sistema GEIT, 160kV, 25mA.min, contraste W11, $SR_b = 11D$ e $SNR_N = 217$ 48

Figura 4.27– CP4-1A, Dfd=1000mm, tubo YXlon. (a)radiografia convencional - 150kV, 48mA.min, D=2,1HD, contraste W15 e $SR_b = 12D$; RC: (b)sistema Dürr, 140kV, 25mA.min, contraste W14, $SR_b = 11D$ e $SNR_N = 308$; (c)Sistema GEIT, Dfd=1200mm, 140kV, 25mA.min, contraste W15, $SR_b = 10D$ e $SNR_N = 204$ 49

Figura 4.28– CP5-1B, Dfd=1000mm, tubo YXlon. (a)radiografia convencional - 150kV, 60mA.min, D=2,5HD, contraste W14 e $SR_b= 11D$; RC: (b)sistema Dürr, 150kV, 40mA.min, contraste W14, $SR_b= 12D$ e $SNR_N=299$; (c)Sistema GEIT, Dfd=1200mm, 150kV, 30mA.min, contraste W14, $SR_b= 10D$ e $SNR_N=252$ 50

Figura 5.1– Radiografias apresentadas pelas empresas prestadoras de serviço na fase 1 do projeto Petrobras: (a)CP1-1A, sistema Kodak, contraste W13, $SR_b= 10D$ e $SNR_N=85$; (b)CP1-2A, sistema Dürr, contraste 15-1T, $SR_b= 12D$ e $SNR_N=156$; e (c)CP3-1A, sistema GE, contraste W11, $SR_b= 9D$ e $SNR_N=179$ 60

Figura 5.2– Sistema GEIT – efeito do uso sobre a IP: artefatos e marcas de apagamento.CP5-2B, tubo YXlon, Dfd=1200mm, 150kV, 25mA.min, contraste W14, $SR_b=10D$ e $SNR_N=207$ 61

Lista de Tabelas

Tabela I – Sistemas de classes de filmes segundo diferentes normas e os valores correspondentes de SNR e $G2/\sigma D$ (BSI BS EN 14784).	19
Tabela II – Dimensões dos corpos de prova inspecionados	28
Tabela III – Combinações de valores de kV e exposição para todos os CPs com uso do tubo Seifert: sistema Dürr	30
Tabela IV – Combinações de valores de kV e exposição para os CPs testados com o tubo YXlon: sistemas Dürr e GEIT	31
Tabela V – Distância fonte detector (D_{fd}) de acordo com o sistema, tubo de raios X e amostra.....	31
Tabela VI – Parâmetros utilizados na radiografia convencional.....	31
Tabela VII – Requisitos de qualidade radiográfica para as imagens.....	32
Tabela VIII – Resolução básica espacial do arranjo para os sistemas utilizados	34

Tabela IX - Resolução básica espacial das imagens dos CPs (1ºpar de fios não resolvido).....	35
Tabela X – Evolução de SNR_N e contraste com exposição e kV- CP1.....	35
Tabela XI – Evolução de SNR_N e contraste com exposição e kV- CP2.....	36
Tabela XII – Evolução de SNR_N e contraste com exposição e kV- CP3	36
Tabela XIII – Evolução de SNR_N e contraste com exposição e kV- CP4.....	36
Tabela XIV – Evolução de SNR_N e contraste com exposição e kV- CP5.....	37
Tabela XV – Evolução de SNR_N e contraste com exposição e kV- sistema Dürr	38
Tabela XVI – Evolução de SNR_N e contraste com exposição e kV- sistema GEIT	38
Tabela XVII – Radiografia convencional - sensibilidade ao contraste - e comparação de valores de sensibilidade atingidos pela RC.	39
Tabela XVIII – CP1-1A – sistema Dürr e tubo Seifert: evolução da detectabilidade com o aumento da exposição e da kV. Sistema GEIT e tubo YXlon: efeito do uso de cassette com tela de chumbo.....	43
Tabela XIX – CP1-2A – sistema Dürr e tubo Seifert: evolução da detectabilidade com o aumento da exposição e da kV	46

Tabela XX – CP2-2A – sistema Dürr e tubo Seifert: evolução da detectabilidade com o aumento da exposição e da kV	46
Tabela XXI – CP4-1A – sistema Dürr e tubo Seifert: evolução da detectabilidade com o aumento da exposição e da kV	50
Tabela XXII – CP5-1B – sistema Dürr e tubo Seifert: evolução da detectabilidade com o aumento da exposição e da kV	51
Tabela XXIII – Condições mínimas para garantia de detectabilidade equivalente: sistema Dürr.....	51
Tabela XXIV– Sistema GEIT: análise da detectabilidade. Tubo YXlon	52
Tabela XXV– Sistema Dürr: otimização da radioproteção com RC. Tubo Seifert.....	52
Tabela XXVI– Sistemas Dürr e GEIT: otimização da radioproteção com RC	53

Acrônimos

END	Ensaio não Destrutivo
PDVD	Parede Dupla Vista Dupla
IQI	Indicador de Qualidade de Imagem
uT	Penumbra Total
GD	Gradiente a uma Densidade Ótica, D
σD	Granularidade ou Ruído a uma Densidade Ótica, D
CP	Corpo de prova
RC	Radiografia Computadorizada
IP	Imaging Plate
PSL	<i>Photostimulated Luminescence</i>
ST	<i>Standard Type</i>
HR	<i>High Resolution</i>
HDCR	<i>High Definition Computed Radiography</i>
SR_b	Resolução Básica Espacial
SNR	Relação Sinal Ruído
SNR_N	Relação Sinal Ruído Normalizada
I	Intensidade Linearizada do Sinal
DICONDE	<i>Digital Imaging and Communication in Nondestructive Evaluation</i>
BAM	<i>Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung</i>
RQPEND	Registro da Qualificação de Procedimento de END
Dfd	Distância fonte detector
Dfo	Distância fonte objeto

FP	Falta de Penetração
PO	Poros
PA	Porosidade Agrupada
IE	Inclusão de Escória
TR	Trinca
FF	Falta de Fusão
IT	Inclusão de Tungstênio
PE	Penetração Excessiva
MR	Mordedura na Raiz

Capítulo 1

Introdução

Com o advento da radiografia computadorizada (referida como RC ou CR, esta última do inglês *Computed Radiography*), a radiologia industrial volta a ganhar espaço devido aos benefícios proporcionados pela nova tecnologia, dentre os quais se destacam: possibilidade de redução do tempo de exposição radiográfica e da área de balizamento, obtenção direta de imagens digitais, eliminação do uso de produtos químicos e a possibilidade de reutilização dos detectores (placas de fósforo). Diante de um cenário tão favorável, a técnica vem sendo destacada como a solução de quase todos os problemas sem que ainda se conheçam plenamente suas vantagens e limitações.

A radiografia computadorizada apresenta uma série de vantagens conhecidas, mas deve ser utilizada com cuidado, pois ainda há o que evoluir em termos de qualidade de imagem obtida e detectabilidade. Os procedimentos de teste ainda se baseiam muito na experimentação, tentativas e erros, devido à falta de uma metodologia consagrada na escolha dos parâmetros como no caso da radiografia convencional.

A especificação de um sistema de radiografia computadorizada, que compreende escâner, placa de fósforo, monitor e *software* de análise, é função da finalidade à qual ele se destinará. Para os casos onde os requisitos de qualidade não são muito rigorosos, como no monitoramento da corrosão, os sistemas atualmente utilizados atendem. Para inspeção de soldas há uma série de restrições no que se refere a faixa de diâmetro e espessura inspecionáveis em função da qualidade de imagem obtida. Esse relacionamento entre

especificação de sistema e limitações na inspeção radiográfica ainda não está bem definido na literatura e experiência de laboratório e campo, sendo um fator gerador de risco à qualidade da inspeção e probabilidade de detecção de defeitos. Por estas razões, a maioria dos países membros da Comunidade Européia ainda não utiliza a radiografia computadorizada na inspeção de cordões de solda.

1.1 A Petrobras e a Implantação da Radiografia Computadorizada na Inspeção de Soldas

Desde o ano 2000 a empresa vem empregando a técnica nas inspeções de campo, mas com foco na monitoração da corrosão. Com o passar do tempo e com a experiência acumulada, pensou-se em expandir o seu emprego para a inspeção de soldas, em virtude dos ganhos que se vislumbravam com a substituição dos filmes industriais.

Alguns testes iniciais foram executados sem que resultados seguros fossem obtidos, e partiu-se então para um estudo mais aprofundado, o que estreitou o contato com diversas entidades afins, dentro e fora do país. Normas internas foram elaboradas e apreciável experiência foi sendo adquirida.

Foi a partir do ano de 2007, porém, que os maiores avanços foram sendo obtidos. A ENGENHARIA/IEABAST/IERV – Implementação de Empreendimentos para a REVAP – iniciou a condução das obras de modernização da Refinaria Henrique Lage, em São José dos Campos, e dentro do programa de inspeção de juntas soldadas a radiografia computadorizada foi vista como uma opção para a condução dos trabalhos de controle de qualidade. Dadas as limitações do método e falta de experiência acumulada, o IERV solicitou apoio ao SEQUI – Gerência de Certificação, Qualificação e Inspeção - que em parceria com o CENPES – Centro de Pesquisas da Petrobras - iniciou um trabalho de pesquisa e testes experimentais com emprego de diversos sistemas existentes no mercado, aplicados à inspeção dentro dos limites da técnica de parede dupla vista dupla (PDVD).

Por conta disto, a companhia confeccionou diversos corpos de prova soldados e contendo descontinuidades, e em seguida contactou empresas fabricantes de sistemas de RC, as quais, por sua vez, estabeleceram parcerias com empresas prestadoras de serviços de inspeção do mercado brasileiro para que se iniciassem os ensaios das amostras. Os

resultados obtidos através de cada sistema utilizado definiram quais deles estariam aptos a proceder aos serviços de campo nas obras do IERV. O projeto foi conduzido em três etapas:

1. Elaboração de procedimento em conformidade com a N-2821 e a apresentação das imagens dos primeiros 5 corpos de prova fornecidos pela Petrobras;
2. Qualificação do procedimento utilizando-se 22 *spools* de diâmetros e espessuras diferentes, fornecidos pela Petrobras, e geração do documento RQPEND - Registro da Qualificação de Procedimento de END. Esta etapa foi conduzida nas instalações das empresas prestadoras de serviço e com o testemunho da Petrobras;
3. Reprodução das condições obtidas em laboratório em condições de campo, utilizando-se os RQPENDs gerados na etapa anterior.

Como critérios normativos, foram utilizadas as normas ASME B31.3, ASME Sec V e Petrobras N-2821, BS EN 14784 parte 1, ASTM E-2445 e ASTM E-2446. Os sistemas aprovados deveriam ser capazes de atender aos requisitos destas normas dentro da faixa de diâmetro e espessura inspecionada.

Os *softwares* de análise utilizados pelas prestadoras foram os exclusivos de cada fabricante de escâner, mas as avaliações das imagens foram realizadas com uso do *software* ISee!, do BAM, o qual foi distribuído para todos os participantes.

Ao final da execução dos testes as prestadoras entregaram as imagens obtidas, arquivadas segundo a extensão própria dos *softwares* utilizados, ou no formato “intercambiável” DICONDE (dcm), e no formato TIFF para análise através do ISee!.

1.1.1. Motivações para o Procedimento Experimental Adotado no Trabalho

O projeto foi encerrado no início deste ano de 2009, após a 3º fase ter se desenrolado em condições de campo, através da inspeção das faixas de diâmetro e espessura dentro das quais cada empresa/sistema de RC pôde se capacitar.

Foram utilizadas, na primeira etapa (fase 1), fontes radioativas (Ir-192 e Se-75) e equipamentos de raios X, bem como cinco tipos de escâneres de radiografia computadorizada. Ao todo, cinco prestadoras participaram do projeto, sendo que apenas três permaneceram até a terceira fase. Nas duas fases subseqüentes apenas fontes de raios X

foram utilizadas e, por fim, somente três sistemas de RC foram testados no campo; em parte por problemas apresentados por algumas partícipes do projeto, as quais declinaram antes do encerramento.

Os resultados apresentados pelas empresas foram desfavoráveis para o uso de isótopos com diâmetro superior a 1mm, e mostraram que o fator humano, refletindo inexperiência com os sistemas, tem grande influência na qualidade final das imagens. Porém, havia ainda questões não elucidadas:

- Os requisitos normativos que nós estávamos seguindo até então garantiam detectabilidade similar entre RC e radiografia convencional?
- Como evoluíam os parâmetros de qualidade de imagem com o aumento da exposição ou energia de radiação utilizada? Será que havia mesmo otimização da proteção radiológica?
- Os limites de resolução aceitáveis impostos pela norma Petrobras e normas européias eram muito restritivos?

Para responder a estas questões, dois conjuntos de 5 corpos de prova da fase 1 (eram, ao todo, 4 conjuntos de 5 tubos soldados circunferencialmente) foram enviados às dependências do BAM para uma intensa fase de testes experimentais. Os resultados obtidos influenciaram nas decisões tomadas acerca dos procedimentos adotados na fase 3 do projeto Petrobras.

1.2 Organização da Dissertação de Mestrado

O presente trabalho apresenta uma avaliação sobre a técnica de RC aplicada à inspeção de soldas, dentro dos limites da técnica de PDVD, com base em experimentos realizados com dois sistemas de RC diferentes e dez corpos de prova soldados contendo defeitos propositalmente inseridos. Esta avaliação considerou a análise dos principais parâmetros de qualidade em uma radiografia computadorizada e a análise da detectabilidade em comparação com os resultados obtidos com radiografia convencional nas mesmas amostras e condições de teste.

No capítulo 2 apresenta-se uma breve revisão bibliográfica sobre a inspeção radiográfica convencional e sobre o estado-da-arte relativo à técnica de radiografia

computadorizada, ambas aplicadas a inspeção de soldas. Discutem-se também os obstáculos encontrados na atualidade para a efetiva substituição da radiografia convencional pela computadorizada.

Os materiais e métodos são apresentados no capítulo 3, que descreve corpos de prova, sistemas de RC utilizados e procedimentos de teste com a técnica e com a radiografia convencional.

O capítulo 4 mostra os resultados obtidos na inspeção dos corpos de prova com as duas técnicas. O capítulo 5 discute os resultados e suas implicações em termos práticos, no que se refere ao emprego da RC na inspeção de soldas em serviço ou no campo.

O capítulo 6 apresenta as conclusões finais, e o capítulo 7 sugere trabalhos futuros.

O apêndice A mostra a lista de publicações geradas até o momento pelo trabalho, e o apêndice B apresenta as imagens radiográficas que não foram colocadas no corpo da dissertação.

1.3 Conclusões

Este capítulo faz uma breve introdução à realidade atual relativa ao emprego da técnica de radiografia computadorizada na inspeção de soldas, e justifica o estudo conduzido nesta dissertação pela falta de experiência consolidada neste sentido, que se reflete na ausência de metodologias consagradas para seleção dos parâmetros de teste e de *hardware* associado.

Em seguida, apresentou-se a interação do trabalho com os esforços da Petrobras no sentido de implantar a RC no campo para inspeção de soldas. Realizou-se uma descrição sucinta da metodologia de teste adotada e mostrou-se como está organizada a dissertação e o que é discutido em cada capítulo.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

O presente capítulo descreve de forma sucinta os princípios básicos da técnica de radiografia e o modo como a mesma é aplicada à inspeção de soldas. Primeiramente são apresentados alguns conceitos sobre radiação X e gama e os fundamentos que viabilizam a radiografia como um método de ensaio não destrutivo. Apresenta-se a técnica de radiografia convencional, e dá-se importância maior a sua aplicação na inspeção de soldas, discutindo-se sobre as principais normas que padronizam o ensaio.

A seção 2.5 apresenta a técnica de radiografia computadorizada e são introduzidos os conceitos necessários ao seu entendimento. O estado-da-arte para sua aplicação na inspeção de soldas é também discutido, bem como a normalização vigente até o presente momento. Em 2.6 mostram-se os entraves existentes para a efetiva substituição plena da técnica convencional pela computadorizada, seguindo-se as considerações finais.

Referências sobre radiografia convencional e sua aplicação na inspeção de soldas podem ser encontradas em [1-8]. A técnica de radiografia computadorizada é referenciada em [9-18].

2.1 Introdução

A inspeção não destrutiva de peças e estruturas é de suma importância do ponto de vista de gerenciamento da qualidade de produto e da integridade estrutural, evitando-se a presença de defeitos que poderiam causar a falha em serviço do componente, com riscos à segurança

das pessoas, do patrimônio e/ou do meio ambiente. Neste sentido, a radiografia é uma técnica de END que possibilita a inspeção volumétrica do objeto de teste, com registro permanente de resultados, e tem sido empregada pela indústria há praticamente um século. Porém, apesar do bom desempenho, os riscos inerentes às radiações ionizantes sempre representaram um limitante a seu emprego na inspeção de componentes ou equipamentos em serviço.

Vinculada a fortes perspectivas de redução do tempo de exposição e de área de balizamento, a radiografia computadorizada surgiu como uma nova opção ao dinamismo exigido pela indústria na atualidade.

2.2 Raios X e Gama - Princípios Básicos

Quando elétrons acelerados por um campo elétrico incidem sobre um alvo, eles são rapidamente desacelerados e a maior parte de sua energia é dissipada em calor. Este choque corresponde à desaceleração de uma carga elétrica negativa, resultando em emissão de energia eletromagnética. Cerca de 2% da energia dos elétrons incidentes aparece como radiação X, inserida no espectro na faixa de 1\AA de comprimento de onda (10^{-8} a 10^{-10}mm). Os raios gama têm de natureza similar, mas sua origem é espontânea e nuclear; a faixa de comprimento de onda varia entre 1 a 10^{-4}\AA [1, 2].

Os raios X podem ser gerados dentro de uma ampola de vidro, quando um feixe de elétrons é acelerado por uma alta tensão (kV) contra um alvo de alta temperatura de fusão. Esta ampola, denominada “tubo de Coolidge”, é formada por duas partes principais: anodo e catodo (figura 2.1).

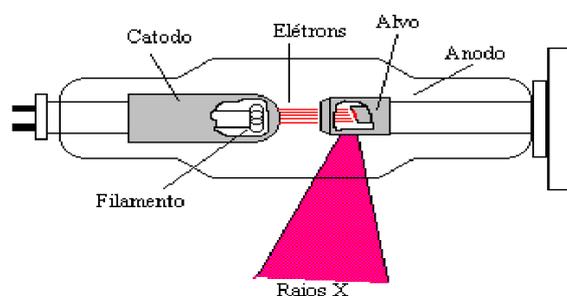


Figura 2.1– Ampola de raios X [3].

A radiação produzida tem diferentes comprimentos de onda e poder de penetração, de acordo com o mecanismo de interação entre os elétrons do feixe e os átomos do alvo [3]. Estes mecanismos, bem como uma revisão sobre os princípios básicos da radiografia, também podem ser encontrados em KODAK [4], AGFA [5], HALMSHAW [6,7].

As ampolas, ou tubos de raios X, têm suas dimensões variando em função da tensão máxima de operação do aparelho, e podem ser classificadas em função do seu tamanho focal efetivo (tubo convencional, minifocado ou microfoco) [3]. Em geral, aparelhos de raios X não são muito aplicados em inspeções de campo devido às questões de fornecimento de energia e acesso.

Os raios gama, como já mencionado, são espontaneamente emitidos por certas substâncias radioativas através da desintegração nuclear dos átomos [4,5,6]. Ao contrário dos raios X, que são emitidos na forma de um espectro contínuo, os raios gama se caracterizam por uma série de emissões discretas em energia. Na área de ensaios não destrutivos (END) os isótopos mais utilizados são o Ir-192, Co-60 e Se-75, de acordo com a espessura que se deseja inspecionar. O Yb-169 apresenta características interessantes para inspeção de componentes de pequena espessura penetrada (inferior a 15mm, para o aço), mas sua pequena meia vida e alto custo limitam a aplicação.

2.3 Radiografia Convencional como Método de END

Na radiologia industrial, o procedimento usual para produzir uma radiografia consiste em posicionar uma fonte de radiação penetrante (raios X ou gama) em um lado da amostra a ser examinada, e um detector de radiação no lado oposto (figura 2.2). A energia da radiação deve ser escolhida de modo que uma parcela suficiente da mesma atinja o detector após atravessar o corpo de prova, segundo um tempo previamente determinado [5].

O detector utilizado armazena a imagem latente para posterior extração (como o filme radiográfico, por exemplo) ou a apresenta em tempo real (tela fluorescente, câmera CCD etc...). Na maioria das vezes, emprega-se um filme radiográfico envolto em um chassi opaco à luz [6], e neste caso a técnica é denominada de radiografia convencional.

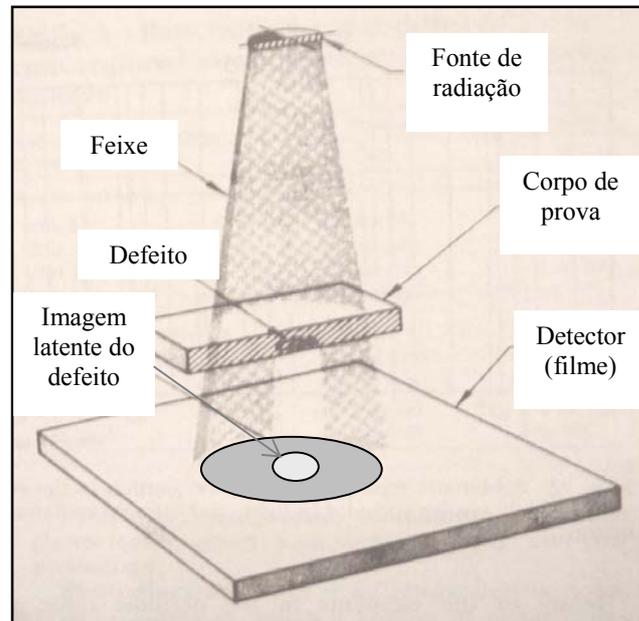


Figura 2.2 – Princípios da inspeção radiográfica [2].

A fonte de radiação é usualmente pequena (poucos milímetros ou inferior) para minimizar erros de projeção, já que a imagem radiográfica é formada por princípios geométricos, analogamente à formação de sombras com a luz visível. A penumbra na radiografia depende do tamanho da fonte e de sua distância ao filme.

Após o tempo de exposição adotado para o exame radiográfico, o filme é processado fotograficamente (com emprego de produtos químicos para revelação e fixação). A película é então colocada sobre a tela iluminada de um negatoscópio, e as diferenças na intensidade da radiação que atingiu o filme são percebidas através das variações no grau de enegrecimento (densidade ótica) da imagem [4,5]. As partes do filme que receberam mais radiação durante a exposição (regiões de menor espessura, por exemplo) aparecem mais escuras; isto é, a densidade ótica é maior. Partes onde há excesso de material (exemplificando, região do reforço de solda) aparecerão mais claras [5].

O resultado de uma inspeção radiográfica corresponde a um mapa bidimensional da atenuação da radiação penetrante, X ou gama, ao longo do volume de material analisado. E a atenuação depende de diversos fatores, como variações na composição química, na densidade no material, mudanças de geometria ou espessura, presença de descontinuidades

como trincas, poros, inclusões etc.. Através da análise destas variações é possível diagnosticar o estado de integridade de uma peça ou estrutura sem que se proceda a um método destrutivo de exame. A avaliação da radiografia é baseada na comparação de diferenças na densidade ótica com características do objeto ou com critérios de aceitação derivados de radiografias de objetos com qualidade aceitável [2].

A qualidade da imagem no filme pode ser assegurada em termos de três fatores: contraste, definição e “ruído fotográfico” [5].

Simplificadamente, o contraste poderia ser descrito como a diferença de densidade ótica entre um objeto na imagem e o fundo da mesma, como por exemplo, a percepção de um poro em um cordão de solda. O contraste é função das variações na espessura e na densidade ou composição química (número atômico) [5,8].

A definição está relacionada à penumbra na imagem. A nitidez da imagem associa-se com o grau de visualização de detalhes na radiografia, demonstrada pela percepção das bordas das estruturas. A insuficiência de detalhes ou definição é conhecida como “borramento” da imagem. Contraste e definição relacionam-se intimamente e ambos influem na detectabilidade [5].

O ruído fotográfico é função das dimensões e da distribuição dos grãos de prata do filme, e pode mascarar detalhes finos na imagem. Por esta razão, filmes de granulação fina são preferidos para inspeção quando se deseja detectar a presença de pequenas trincas [5,8]. Em detectores eletrônicos, seu equivalente seria o ruído, expresso através de uma relação sinal ruído.

O controle dos fatores descritos anteriormente relaciona-se, inclusive, com parâmetros geométricos de ensaio e com o tempo de exposição. Tal controle influencia na habilidade da radiografia mostrar detalhes em uma imagem (por exemplo, defeitos em soldas), a qual é chamada de sensibilidade radiográfica. Usualmente a sensibilidade é medida através de defeitos artificiais como fios ou furos presentes em indicadores de qualidade de imagem ou IQIs [5]. Estes IQIs são escolhidos em função de parâmetros normativos, e os dois tipos mais utilizados são os de furo e fio [6].

Há extensa literatura disponível sobre o ensaio radiográfico [1-8], onde os princípios básicos do método, técnicas de execução, parâmetros de teste, qualidade da imagem, dentre outros tópicos, são discutidos e apresentados em detalhes.

2.4 Inspeção de Soldas

O ensaio radiográfico é muito utilizado para inspecionar montagens, quanto à forma de construção, e para uma larga faixa de outras aplicações, sendo que os dois maiores campos de emprego são a inspeção de fundidos e soldados [5].

No Brasil, a inspeção de soldas de tubulações e chapas é tradicionalmente dominada pelo ensaio radiográfico. Neste ensaio são utilizados isótopos radioativos, normalmente Ir-192, e filmes radiográficos, por questões de portabilidade e custo [19].

Nos setores de petróleo e de gás, principalmente nas áreas de transporte e refino, são utilizadas as seguintes normas técnicas da *American Society of Mechanical Engineers – ASME*:

- ASME B 31.3 – *Process Piping*;
- ASME B 31.4 – *Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids*;
- ASME B 31.8 – *Gas Transmission and Distribution Piping Systems*.

Essas normas remetem ou para o código ASME Seção V – *Nondestructive Examination*, ou para a norma API 1104 – *Welding of Pipelines and Related Facilities*, o estabelecimento de requisitos mínimos para a elaboração dos procedimentos de ensaios não destrutivos. Nestas normas não há restrição quanto à utilização de raios X ou gama, desde que se obtenha, na qualificação do procedimento e depois em campo, radiografias com penumbra geométrica, densidade e sensibilidade radiográfica que cumpram com os requisitos normativos [19].

Tubos de pequeno diâmetro externo (inferiores a 3,5”) são rotineiramente inspecionados através da técnica de PDVD, onde a radiação atravessa as duas paredes do tubo formando a imagem da região mais próxima do filme, bem como da região mais próxima da fonte, devido à grande distância-fonte-filme utilizada (figura 2.3). Para cada solda, duas (posições A e B) ou três (posições A, B e C) exposições são necessárias devido ao fato das regiões onde a radiação atinge o tubo tangencialmente apresentarem densidade muito baixa, grandes distorções e baixo contraste.

Normalmente as radiografias em PDVD apresentam a imagem da solda como uma elipse.

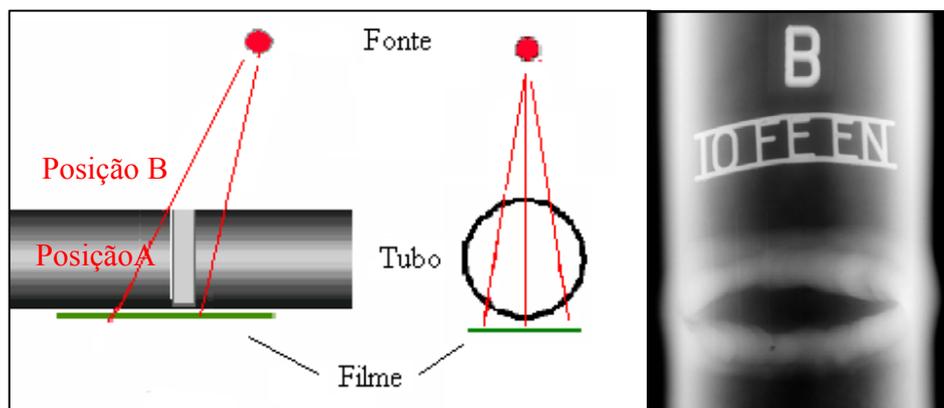


Figura 2.3– Técnica de PDVD [3].

2.5 Radiografia Computadorizada – O Estado-da-Arte

2.5.1. Revisão Bibliográfica

A radiografia computadorizada (RC), embora guarde os mesmos princípios físicos que a técnica convencional, apresenta características peculiares que precisam ser consideradas quando da sua aplicação.

Prescindindo do uso de filmes radiográficos, a técnica computadorizada se utiliza do emprego de placas de material fotoluminescente, ditas placas de fósforo ou *imaging plates* (IPs), as quais armazenam a imagem latente em sua estrutura. Simplificadamente, pode-se dizer que este armazenamento de energia, proveniente da radiação ionizante, é proporcional a dose recebida e ocorre através da excitação de elétrons e seu posterior aprisionamento em F-Centros ou armadilhas, que são pontos na estrutura do fósforo propositadamente criados durante a fabricação das placas. Quando da leitura de uma IP, irradiados por um *laser* de comprimento de onda adequado (geralmente *laser* vermelho He-Ne, na faixa de 630-680nm), os F-Centros liberam os elétrons, que acabam retornando a seus estados originais emitindo energia na forma de uma luz azul ($\approx 400\text{nm}$) [9]. Este é o mecanismo conhecido por PSL -*Photostimulated Luminescence*- ou Luminescência Fotoestimulada, através do qual torna-se possível a obtenção de imagens radiográficas com o uso de placas de fósforo como detectores.

Após a extração ponto a ponto da imagem latente, via PSL, a resposta da IP é coletada por um tubo fotomultiplicador, o qual a converte em sinais elétricos. Com a digitalização destes sinais, uma imagem digital é prontamente observada na tela de um computador. Ao final do processo de varredura, a placa deve ser submetida à luz branca intensa, de modo que sejam eliminados quaisquer resquícios de imagem, ou, em outras palavras, de modo que todos os elétrons aprisionados em F-Centros retornem a seus estados originais, de menor energia. Com isso, a placa poderá ser utilizada em uma nova exposição radiográfica.

A figura 2.4 esquematiza o mecanismo de armazenamento da imagem e da emissão fotoestimulada, além de mostrar o processo de varredura efetuado por um escâner.

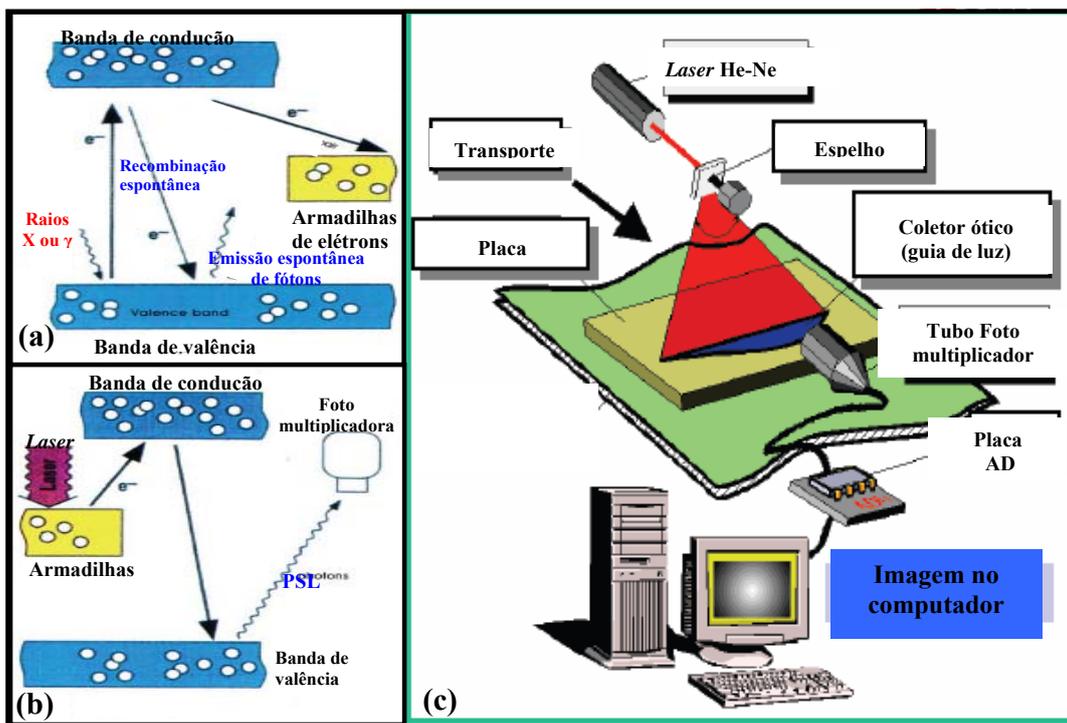


Figura 2.4 – Radiografia Computadorizada: (a) Incidência de radiação ionizante na placa e mecanismo simplificado de armazenamento da imagem latente nas “armadilhas”; (b) Estímulo laser e extração da imagem; (c) Varredura de um escâner [10].

A literatura disponibiliza uma revisão acerca do histórico e das pesquisas sobre *imaging plates* e sistemas de Radiografia Computadorizada [9-13]. Os fundamentos básicos

relacionados ao funcionamento de um sistema de radiografia computadorizada são encontrados em artigos de fabricantes e pesquisadores [12-16]. Contudo, uma descrição mais detalhada pode ser encontrada em SEIBERT [17].

Sistema de Radiografia Computadorizada

Um sistema de radiografia computadorizada é constituído por três componentes: placa de fósforo, escâner e sistema de aquisição e processamento de imagens ou *software* de análise [20].

O tipo de placa e o escâner utilizados definem a categoria de um sistema de radiografia; qualquer alteração em um destes dois componentes (emprego de outro modelo de escâner ou de placa) configura um novo sistema, diferente do original. Esta observação é importante no que se refere à qualidade das imagens obtidas.

As placas de fósforo, assim como os filmes radiográficos, apresentam distinção quanto a sua velocidade e resolução. Elas consistem de um suporte polimérico flexível que é revestido por uma camada de fósforo sensível, por sua vez coberta por uma fina camada transparente protetora. A composição química atual da camada sensitiva de praticamente todos os modelos é basicamente a mistura BaF(Br,I) dopada com íons Eu^{2+} [9,18], sendo que sua espessura e o tamanho de suas partículas funcionam como os principais diferenciadores. Placas comuns, *Standard Type* (ST), são espessas, requerendo menor tempo de exposição e gerando imagens de menor qualidade devido ao espalhamento interno da luz fotoestimulada ao longo da espessura. Placas finas são de alta qualidade, *High Resolution* (HR), devido à reduzida dispersão, mas exigem um aumento no tempo de exposição por conta da menor eficiência na absorção dos fótons da radiação incidente; como consequência, a resolução em contraste é empobrecida. Como placas de alta qualidade destacam-se as placas azuis ou *blue plates*.

A figura 2.5 mostra os resultados obtidos [18] utilizando o mesmo modelo de escâner e parâmetros radiográficos, mas variando a qualidade das placas em três tipos diferentes. As imagens referem-se a um IQI de fio duplo [21], que foi melhor resolvido pela placa do tipo azul, de alta resolução. Importante ressaltar que a placa HR azul foi 10 a 100 vezes mais lenta que a placa ST1, de acordo com as bases de comparação entre as relações sinal ruído das imagens.

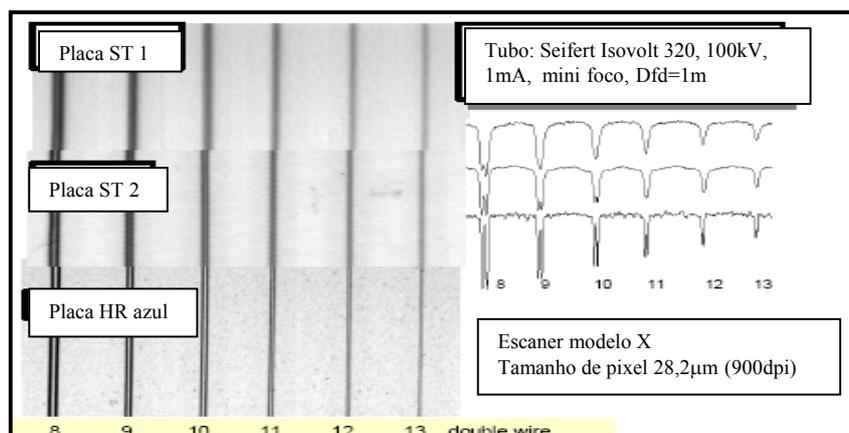


Figura 2.5– Efeito da placa na imagem radiográfica obtida [18]

Outro ponto que deve ser levado em consideração refere-se às características do escâner radiográfico, destacando-se três parâmetros relevantes: o tamanho do leitor ótico (*laser spot size*), tamanho do *pixel* do escâner e a faixa dinâmica (*range bits*). Um equipamento que apresente um leitor ótico de pequenas dimensões proporcionará melhor resolução espacial que outro que apresente um leitor maior, sob as mesmas condições. O tamanho do *pixel* (relacionado à resolução/velocidade de varredura) tem efeito análogo ao do *laser spot size*: quanto menor esta dimensão, melhor será a resolução espacial da imagem. A figura 2.6 esquematiza estes dois parâmetros e a relação entre eles. Os escâneres apresentam opções definidas de tamanho de *pixel* dentre as quais o usuário escolhe de acordo com sua necessidade.

Interessante destacar que a redução do tamanho do *pixel* aumenta o tempo de varredura, ou seja, o tempo que o escâner leva para ler uma placa, o que impacta no tempo total da inspeção radiográfica.

A faixa dinâmica do equipamento se relaciona a quantização da imagem digital, expressa no número de *bits* para resolução em níveis de cinza. Esta propriedade limita o menor detalhe resolvido na direção de incidência do feixe de radiação, representando a resolução em profundidade.

Os sistemas disponíveis de placas de fósforo e escâneres cobrem diferenças de dose de radiação até 10^3 - 10^4 ou 10^5 . Esta característica reduz o número de exposições para objetos com grandes diferenças de espessura de parede, e pode compensar os erros de

cálculo do tempo de exposição [18]. O sistema provê mais níveis de cinza que o olho humano pode distinguir o que, porém, se mostra como um benefício durante o processamento das imagens.

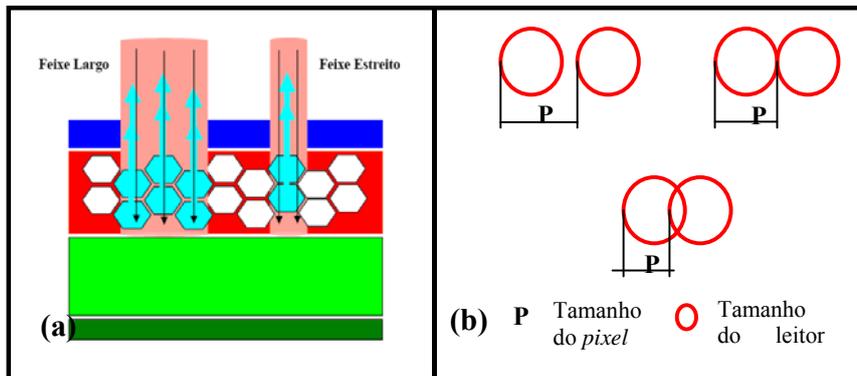


Figura 2.6– Parâmetros de um escâner: (a) Diferentes tamanhos de leitor óptico; (b) Tamanho do leitor óptico e diferentes tamanhos de pixel [22].

O sistema de aquisição e processamento de imagens é o programa utilizado como interface de comunicação entre o escâner e o usuário durante a etapa de leitura das placas, bem como, durante a análise/tratamento das imagens armazenadas no computador. Os escâneres são vendidos conjuntamente com um *software* proprietário e exclusivo do fabricante, mas existem diversos outros programas capazes de realizar o processamento de imagens digitais, como o MatLab por exemplo, porém, é importante que o usuário busque trabalhar com formatos de arquivamento, por ocasião da exportação das imagens, que não acarretem perdas de dados, de modo que a análise não seja comprometida.

Outra variável importante para um sistema de radiografia computadorizada é o monitor utilizado para a visualização e laudo das imagens radiográficas. Na norma Petrobras N-2821- Ensaio Não Destrutivo - Radiografia Computadorizada de Juntas Soldadas [23], o monitor é considerado como parte integrante do sistema de radiografia e são especificados seus requisitos mínimos: luminância de 100 cd/m^2 , resolução igual ou maior que $1280 \times 1024 \text{ pixels}$, tamanho máximo de *pixel* de $300 \mu\text{m}$ e razão para luminância exibível (luminância máxima/ luminância mínima) maior ou igual a 100:1.

2.5.2. Avaliação da Qualidade da Imagem

A avaliação da qualidade da imagem obtida com a radiografia convencional baseia-se no controle da densidade ótica e da sensibilidade radiográfica. O código de projeto do equipamento define a faixa de densidade ótica e a sensibilidade radiográfica mínima, que são verificados através do uso de densitômetros e através do uso de IQIs (indicadores de qualidade da imagem), respectivamente. No caso da radiografia computadorizada permanece a necessidade do uso destes IQIs, porém surgem parâmetros de qualidade que não podem ser negligenciados: resolução básica espacial e relação sinal ruído normalizada [20,24]. São conceitos novos que devem fazer parte da cultura daqueles que desejam trabalhar com a técnica e obter os melhores resultados a partir dela.

Resolução Básica Espacial (SR_b)

A resolução básica espacial (expressa em μm) de um sistema de radiografia computadorizada corresponde ao tamanho de *pixel* efetivo, sendo o menor detalhe resolvido perpendicularmente à direção de incidência do feixe de radiação, e pode ser medida de diferentes modos. Em comitês de normalização é recomendado usar o método do IQI de fio duplo devido a sua simplicidade [18,20,21,24]. A partir do valor total de penumbra (uT), em μm , indicada pelo IQI, obtém-se a resolução espacial:

$$SR_b = uT / 2 \quad [1]$$

A resolução espacial da RC está relacionada ao tamanho e intensidade do *laser* estimulante e à placa de fósforo. Um *laser* bem estreito estimula uma pequena área na placa de fósforo, produzindo assim um *pixel* pequeno e bem definido (vide figura 2.6). Entretanto, a resolução não depende somente da dimensão do feixe estimulante, ela depende também da placa de fósforo. A figura 2.5 mostrou como a resolução básica espacial de um sistema pôde ser melhorada através do uso de placas de fósforo de melhor qualidade.

É importante que a resolução espacial seja determinada nas duas direções da placa, X e Y, de modo que o pior valor, ou seja, o maior, represente o sistema [20].

Durante a leitura de uma placa de fósforo, a varredura é feita linha a linha, sendo que ao final de cada linha o feixe *laser* retorna a posição inicial. Como a *imaging plate* é

movimentada simultaneamente, este deslocamento é ajustado de modo que a próxima linha a ser varrida pelo *laser* inicie com um espaçamento que garanta igual amostragem nas direções X e Y da placa.

A varredura na direção paralela ao deslocamento do feixe é chamada de varredura rápida ou *fast scan*, enquanto que, aquela na direção perpendicular (ou direção de deslocamento da placa) é chamada de varredura lenta ou *slow scan*. Ambas apresentam, usualmente, valores diferentes para SR_b , sendo que os melhores resultados, ou seja, os menores valores, ocorrem para a direção de varredura lenta. Este resultado, aparentemente contraditório, origina-se do fato de a emissão fotoestimulada acontecer dentro de um certo intervalo de tempo (da ordem de alguns μs), o que pode interferir nas leituras efetuadas na direção de deslocamento do feixe, fazendo com que a leitura correspondente a um determinado ponto seja influenciada pela “resíduo” do ponto adjacente.

Relação Sinal Ruído Normalizada (SNR_N)

A intensidade linearizada do sinal (I) representa o valor numérico de um pixel na imagem, e é proporcional à dose de radiação. Este parâmetro é comumente referenciado como tom ou nível de cinza, e seu valor é igual a zero se a dose de radiação também é zero. O máximo que pode atingir corresponde ao limite do range dinâmico do escâner, sendo, por exemplo, 4096 em um equipamento de 12bits. A relação sinal ruído pode ser descrita como a razão linear entre o valor médio da intensidade do sinal sobre o desvio padrão do ruído do sinal nesta intensidade. É muito mais interessante que se trabalhe com a SNR da imagem, pois a intensidade de sinal é um parâmetro extremamente susceptível a fatores como ganho no tubo fotomultiplicador e corrente elétrica no filamento do tubo de raios X [25].

As relações sinal ruído de sistemas de filmes industriais são indiretamente dadas em algumas normas de radiografia convencional (Tabela 1). Filmes são caracterizados pelo gradiente GD (à densidade = 2) e granularidade ou ruído σD (idem), sendo que, o parâmetro mais importante para a percepção de pequenas trincas é o quociente entre o gradiente e a granularidade, $G2/\sigma D$, que pode ser usado para calcular a correspondente SNR [18]. A Tabela I mostra diferentes valores e classes de sistemas; observa-se que não há concordâncias entre países e comitês.

Tabela I – Sistemas de classes de filmes segundo diferentes normas e os valores correspondentes de SNR e $G2/\sigma D$ [20].

Classes de Sistema				Mínima razão gradiente ruído a $D=2$	Relação sinal ruído
ISO 11699-1	Europa CEN 584-1	EUA ASTM E1815-01	Japão K7627-97	D = 2 acima de D_0	D = 2 acima de D_0
				$G2/\sigma D$	SNR
T1	C1	Special	T1	300	130
	C2	I		T2	270
T2	C3		T2	180	78
	C4			150	65
T3	C5	II	T3	120	52
T4	C6	III	T4	100	43
		W-A	W-A	135	
		W-B	W-B	110	
		W-C	W-C	80	

Observa-se que os valores apresentados na Tabela I para a SNR basearam as normas europeias [20] e americana [24] na definição das classes dos sistemas de RC.

As normas existentes para radiografia com placas de fósforo requerem limites mínimos de SNR normalizada (SNR_N) para a classificação dos sistemas [20,24], e a $SNR_{média}$ medida tem de ser corrigida por [18]:

$$SNR_N = SNR_{média} \cdot 88,6 / SR_b \quad [2]$$

Isto quer dizer que, para categorização dos sistemas e análise de qualidade das imagens os valores obtidos para SNR_N deverão ser comparados aos valores de SNR da Tabela 1.

A SNR aumenta com a dose, e o operador pode controlá-la com o aumento do tempo de exposição, porém, características estruturais das placas de fósforo (ruído) limitam o máximo valor alcançado [18]. Uma última observação interessante, é que com o uso de placas de alta qualidade (HR) os valores de SNR obtidos caem, sendo compensados somente com o aumento da dose, ou exposição. Claro que este efeito prossegue até um certo ponto, havendo um momento a partir do qual o aumento da dose não compensaria.

Isso significa, de qualquer forma, aumento do tempo de exposição quando usando sistemas de alto desempenho. A figura 2.7 ilustra esta discussão.

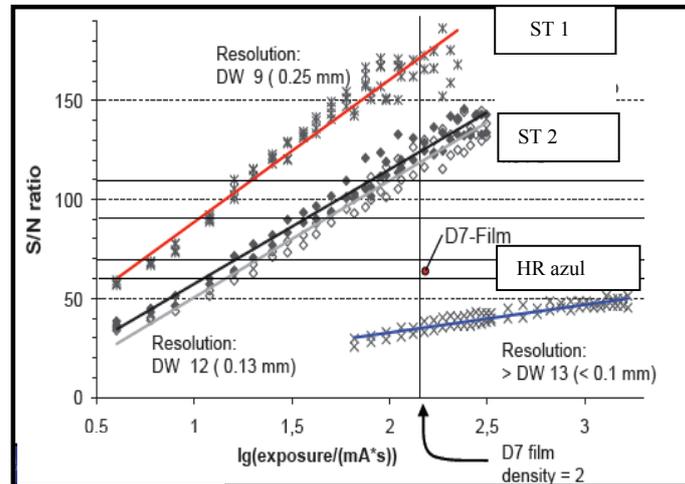


Figura 2.7 – SNR para diferentes IPs utilizadas sob as mesmas condições [18].

A SNR_N também deve ser determinada nas duas direções da placa, assim como a resolução básica espacial. A maioria dos *softwares* proprietários ainda não fornece este valor prontamente para o usuário a partir de uma determinada janela de medição aberta na tela, por exemplo, disponibilizando apenas os valores encontrados para a intensidade linearizada do sinal (I) ponto a ponto, expressos em níveis de cinza. Mas, através do conhecimento destes valores de intensidade dos *pixels* de uma específica região da imagem a SNR_N pode ser determinada [20,22,24].

2.5.3. Estabilidade de Longo Prazo dos Sistemas de Radiografia Computadorizada

Outro ponto digno de nota e bastante frisado nas normas internacionais [20,26] diz respeito à estabilidade de longo prazo dos sistemas de radiografia computadorizada. Estas normas mostram os testes que devem ser executados periodicamente para avaliar o desempenho do sistema ao longo de sua vida útil, de modo que os resultados possam validar sua qualidade ou mesmo reprová-lo. A periodicidade depende da frequência de uso e pode ser negociada

entre as partes: contratante e prestador de serviços. A norma Petrobras N-2821 recomenda que estes testes sejam realizados anualmente, exigindo ainda, sob mesmo período, a avaliação do nível de luminância do monitor utilizado para laudo.

Os parâmetros de qualidade do sistema avaliados são: função de modulação de transferência (MTF), resolução básica espacial, relação sinal ruído normalizada (SNR_N) (todos os três parâmetros avaliados nas duas direções da placa), sensibilidade ao contraste, faixa dinâmica, distorções geométricas, qualidade do feixe *laser* (“*laser beam function*”), manchas brilhantes (“*blooming*”), deslizamento no escaner (“*slipping*”) e uniformidade do *laser* (“*shading*”). Para análise destes parâmetros, recomenda-se [20,26] o uso de uma espécie de IQI ou fantoma (*Phantom*), disponível no mercado sob as seguintes dimensões: 14x17” e 8x10”.

As normas internacionais BSI BS EN 14784, ASTM 2445 e Petrobras N-2821 apresentam um formulário que deve ser preenchido reportando-se periodicamente os resultados dos testes, o qual funcionará como um certificado de validação do sistema. Claro que estes testes devem ser executados por um laboratório especializado de terceira parte, de caráter neutro. No Brasil, há apenas um laboratório capacitado, e a Petrobras tem buscado fomentar a capacitação de outras unidades pelo país.

2.6 Substituição da Radiografia Convencional pela Técnica de RC na Inspeção de Soldas

Contrariamente às primeiras expectativas, a plena substituição da radiografia convencional pela computadorizada na inspeção de soldas ainda não aconteceu; seja no Brasil, seja em outros países.

Vários fatores têm contribuição direta sobre esta realidade, citando-se em primeiro lugar a mudança de cultura imposta pela técnica, seja pela introdução de novos parâmetros de avaliação de qualidade de imagem (SR_b e SNR_N), seja pela presença de novos componentes, como os escâneres de radiografia. Escâneres com diferentes especificações técnicas (tamanho de foco *laser*, tamanhos de *pixel* disponíveis) e parâmetros de controle específicos (como o ganho do tubo fotomultiplicador a ser adotado), interagirão de forma diferente com as placas de fósforo utilizadas como detectores, e seus efeitos combinados se

expressarão, principalmente, em termos de qualidade de imagem. Soma-se ainda o fato de que o parâmetro resolução básica espacial tem sido o maior ponto de controvérsias entre os grupos envolvidos na implantação da RC na inspeção de soldas, como se discutirá mais adiante. A resolução atingida pelos filmes ainda supera àquela obtida pelos melhores sistemas de RC.

Outro fator importante é a falta de experiência com a técnica nesta aplicação específica, uma vez que foi a monitoração da corrosão o maior impulsionador da RC no Brasil e no mundo. Existem pouquíssimas publicações existentes sobre radiografia computadorizada na inspeção de soldas, enquanto que para monitoração da corrosão e medição de espessura as referências são inúmeras. Ainda não há uma metodologia consagrada para a escolha de tempos de exposição, sendo que os procedimentos de teste continuam muito baseados na experimentação, tentativas e erros.

Podem-se citar ainda as limitações normativas e conflitos oriundos a partir dos requisitos de norma.

Ainda no campo da radiografia convencional, infelizmente os valores de penumbra geométrica não são de concordância mundial. Padrões europeus a definem como uma função da espessura da parede para duas classes (padrão A e alta qualidade B), enquanto que padrões ASTM e ASME requerem valores moderados de penumbra, especialmente em uma faixa inferior de espessuras de parede [18]. Adicionalmente, as normas para radiografia computadorizada foram publicadas a partir de 2005, já havendo alguns pontos dissonantes. A RC foi introduzida no código ASME Seção V Edição de 2004, por meio da adenda de verão de 2005 (*2005 Summer Addenda*) e posteriormente como apêndice mandatório nº VIII (*Radiography Using Phosphor Imaging Plate*). Este apêndice mandatório apenas faz exigências quanto ao controle da sensibilidade com o uso de IQIs, o que, de acordo com a experiência da Petrobras, já se observou insuficiente para a obtenção de radiografias de qualidade em soldas. Paralelamente, algumas comissões do próprio ASME ainda não permitem a utilização da RC, como por exemplo, o ASME B31.3. A norma API 1104, referenciada pelas normas ASME B31.4 e 31.8, também não cita a radiografia computadorizada [19].

As normas européias EN-14784 partes 1 e 2, bem como a norte americana ASTM-2446, fazem exigências quanto aos valores de relação sinal ruído e resolução básica espacial, além do uso de IQIs de contraste e fio duplo conjuntamente.

Como conclusão geral destes requisitos baseados em normas, o usuário deveria definir a mínima SNR_N requerida (vide Tabela I) e o valor de SR_b adequado. Detectores digitais devem ter a mesma ou melhor SNR_N que os sistemas com filme. A SR_b requerida pode ser derivada dos requisitos de penumbra geométrica (ug) de padrões como EN 444, EN 1435, ISO 5579, E 1032 e E 1742 [27,28,29,30,31]. A norma Petrobras N-2821 adota valores limites de SR_b baseados nas exigências para Classe A (técnica básica) da norma EN-14784-2. Seja como for, os IQIs de fio duplo tornam-se imprescindíveis nos trabalhos com RC, ao menos nesta fase atual de implantação, na medida em que permitem a avaliação da resolução espacial do sistema, e os IQIs de contraste (penetrômetros de fios ou furos) também devem ser utilizados para garantir a obtenção de um contraste adequado na imagem.

Para monitoração da corrosão os requisitos de qualidade não são muito rigorosos, não havendo ainda normas internacionais que versem sobre este tema, e no Brasil, aparentemente apenas a Petrobras desenvolveu uma norma específica, a N-2820 – Ensaio Não Destrutivo - Radiografia Computadorizada para Detecção de Corrosão. Nesta norma, as exigências referem-se à penumbra geométrica admissível e à saturação em níveis de cinza nas extremidades das placas, onde a intensidade não deve ultrapassar 90% do limite da faixa dinâmica do escâner. Por exemplo, para 12bits (4096 níveis de cinza) o limite seria de 3686 níveis. Em relação à SNR_N , foi visto que um valor mínimo de 50 ou 80, a depender da técnica utilizada, geraria imagens de qualidade satisfatória [32].

Ainda no que se refere à monitoração da corrosão, os escâneres para radiografia industrial disponíveis no mercado, em conjunto com as placas usuais, atendem perfeitamente aos requisitos necessários para medição de espessura. A experiência compartilhada entre a Petrobras e empresas européias, mostrou que, ótimos resultados (probabilidade de detecção superior a 95%) foram obtidos com um tamanho de *pixel* e de leitor ótico de 100 μ m, o que poderia indicar estes valores como recomendáveis.

Em termos de faixa dinâmica do equipamento, o valor reportado como ideal é de, no mínimo, 12 bits; seja qual for a aplicação. A grande maioria dos escâneres atende a esta exigência, havendo, ainda, modelos de 16bits disponíveis.

Especificamente para inspeção de soldas, no entanto, ainda há dúvidas no que se refere ao limite de resolução básica espacial aceitável para cada caso. De acordo com a metodologia européia, este limite varia com a energia da fonte de radiação e com a espessura penetrada. Levando-se em consideração apenas os requisitos normativos e a relação da SR_b com tamanho de foco e *pixel* de escâner, sabe-se que a configuração necessária para atingir a qualidade requerida em todas as situações de diâmetros e espessuras é aquela onde o *spot size* é igual ou inferior a $12,5\mu\text{m}$ e o tamanho de *pixel* igual ou inferior a $30\mu\text{m}$ [10,18,33]. Poucos sistemas de radiografia computadorizada existentes no mercado, no entanto, satisfazem a estas exigências de SR_b , o que no primeiro momento apresentou-se como uma forte limitação relativa à adequação da técnica na inspeção de soldas. Porém, destaca-se que os valores de resolução referenciados nestas normas, até então, não haviam sido avaliados experimentalmente. Não havia sido feito qualquer trabalho relacionando o atendimento aos requisitos normativos à detectabilidade atingida por um sistema de RC, em comparação com a técnica convencional executada sob as mesmas condições. Somam-se ainda os interesses comerciais de fornecedores de equipamentos e prestadores de serviço, os quais pressionam pelo emprego da RC na inspeção de soldas sem o devido conhecimento da técnica e de suas limitações.

Outro problema se refere à fonte de radiação empregada. Quando são utilizados isótopos, devido ao problema da resolução espacial, uma primeira boa indicação para os contratantes de serviços de radiografia seria que fontes com diâmetro maior que 1mm não deveriam ser utilizadas para inspeção de soldas com a técnica computadorizada, sob a pena de se perder qualidade nos resultados; a não ser para espessuras superiores a 40mm, ou quando a distância fonte detector compense as perdas inerentes. Esta observação é baseada na experiência da companhia no trabalho com empresas prestadoras de serviço. O impacto no mercado nacional é que as fontes disponíveis no país, que são de Ir-192, têm maior diâmetro efetivo que 1mm. Esta foi a postura adotada pelo Petrobras em caráter de segurança e confiabilidade de resultados, não tendo sido realizado qualquer estudo experimental mais aprofundado sobre a questão. No entanto, os resultados apresentados

pelas empresas prestadoras de serviço com emprego de isótopos com diâmetro maior que o recomendado foram extremamente insatisfatórios, tanto em termos de qualidade de imagem obtida quanto em termos detectabilidade [34].

Como placas de alta qualidade destacam-se as placas azuis como as mais adequadas para inspeção de soldas, em conjunto com escâneres de pequeno tamanho de foco *laser*, caracterizando sistemas de RC de alta definição [18,33]. Para monitoração da corrosão não há restrições, sendo que, obviamente, a qualidade das placas interferirá na qualidade dos resultados; no entanto, placas padrão atendem perfeitamente. Ressalta-se que, com o uso de sistemas de radiografia computadorizada de alta definição pode-se proceder à inspeção de solda, mas com um tempo de exposição similar ou mesmo um tempo de inspeção superior àquele gasto com radiografia convencional [10,18,33].

Patel [35] afirma que existem diversos fatores que afetam a qualidade da radiografia computadorizada, por isso, sugere uma validação por meio da comparação das imagens digitais com as radiografias convencionais. Este argumento foi levado em consideração na elaboração da norma Petrobras N-2821, e baseou uma parte do trabalho aqui desenvolvido.

Todos estes fatores levaram ao conservadorismo, por parte do usuário final, e ao estabelecimento de uma cultura de incertezas e dúvidas sobre a substituição dos filmes convencionais por placas de fósforo. Face às limitações ainda existentes, a maioria dos países membros da Comunidade Européia ainda não usa radiografia computadorizada na inspeção de cordões de solda [33]. Isto se deve ao pequeno número de modelos de escâner que satisfazem às condições necessárias segundo as normas européias. Atualmente, desenvolve-se através do BAM - *Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung* – um projeto para substituição da radiografia convencional pela computadorizada na inspeção de soldas, fortemente influenciado pelo projeto ora desenvolvido pela Petrobras.

2.7 Considerações Finais

O objetivo deste capítulo foi apresentar uma breve introdução à técnica de radiografia computadorizada e ao contexto que serviu de motivador para a realização deste trabalho. Inicialmente foram apresentados conceitos fundamentais sobre radiação X e gama, radiografia convencional enquanto técnica de END e seu emprego consagrado na inspeção

de soldas. Os assuntos foram abordados gradualmente até que finalmente foi apresentada a técnica de RC e as limitações que ainda impedem sua plena utilização como substituta da inspeção de solda através de filmes industriais. Pode-se considerar o caráter do presente capítulo como introdutor de informações importantes ao entendimento do que será apresentado nos capítulos que se seguem.

Por fim, destacam-se novamente os pontos mais relevantes:

- O ensaio radiográfico é muito utilizado para inspecionar montagens, quanto à forma de construção, e para uma larga faixa de outras aplicações, sendo que os dois maiores campos de emprego são a inspeção de fundidos e soldados;
- Tubulações na faixa de pequeno diâmetro (inferior a 3,5") são usualmente inspecionadas através de radiografia, técnica de PDVD (parede dupla vista dupla), pois nestes casos o método torna-se mais competitivo e vantajoso relativamente ao ultra-som;
- A indústria tem interesse em substituir a radiografia convencional pela computadorizada em muitas aplicações, em vista da possibilidade de otimização da proteção radiológica e das facilidades possibilitadas para extração e tratamento de imagens;
- A radiografia computadorizada é uma técnica que apresenta uma série de vantagens conhecidas mas que deve ser utilizada com cuidado, pois ainda há o que evoluir em termos de qualidade de imagem obtida e de elucidação de algumas questões relativas ao atendimento a requisitos normativos e detectabilidade. Os procedimentos de teste ainda se baseiam muito na experimentação, tentativas e erros, devido à falta de uma metodologia consagrada na escolha dos parâmetros como no caso da radiografia convencional;
- O apêndice mandatório do ASME V, o qual trata sobre a técnica computadorizada, faz apenas exigências quanto ao controle da sensibilidade com o uso de IQIs, o que se mostrou insuficiente para a obtenção de radiografias de qualidade em soldas;
- As normas européias EN-14784 partes 1 e 2, bem como a norte americana ASTM-2446, fazem exigências quanto aos valores de relação sinal ruído normalizada (SNR_N) e resolução básica espacial, além do uso de IQIs. Poucos sistemas de radiografia computadorizada satisfazem a estas exigências normativas de adequação a inspeção de soldas, o que acarretou dúvidas e discussões, motivadas por interesses diversificados, a respeito do rigor de tais requisitos;

- A Petrobras elaborou uma norma interna sobre radiografia computadorizada em soldas, N-2821, que se baseia fortemente nas normas européias e ASTM, assim como na experiência adquirida pela empresa até o momento;
- À medida que o tamanho do leitor ótico de um escâner aumenta haverá restrições de atendimento aos requisitos, no que se refere a limitações na faixa de diâmetro e espessura inspecionáveis. Esse relacionamento entre especificação de equipamento e limitações na inspeção radiográfica ainda não está bem definido na literatura e experiência de laboratório e campo, sendo um fator gerador de risco à qualidade da inspeção. Também não há informações consolidadas sobre a influência de tais parâmetros na detectabilidade atingida pelo sistema, em comparação com a radiografia convencional executada sob as mesmas condições de teste;
- A utilização de isótopos como fonte de radiação para inspeção de soldas com a técnica computadorizada tem sido limitada a tamanho de fontes de no máximo 1mm de diâmetro, a menos que a espessura penetrada seja superior a 40mm, ou que a distância fonte detector compense as perdas inerentes. O impacto no mercado nacional é que as fontes disponíveis no país, que são de Ir-192, têm maior diâmetro efetivo que 1mm. Os resultados apresentados pelas empresas prestadoras de serviço com emprego de isótopos de uso tradicional no campo não tem sido satisfatórios;
- Com o uso de sistemas de radiografia computadorizada de alta definição (escâner e placa de fósforo de alta qualidade) o tempo de exposição é similar ou mesmo o tempo de inspeção é superior àquele gasto com radiografia convencional;
- Face às limitações ainda existentes, a maioria dos países membros da Comunidade Européia ainda não usa a radiografia computadorizada na inspeção de cordões de solda;
- É importante que os prestadores de serviços busquem, através de laboratório capacitado e neutro, realizar uma avaliação periódica do seu sistema de radiografia computadorizada, de modo a validar sua utilização no campo. Igualmente importante que esta avaliação seja exigida pelos contratantes de serviços.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

Este capítulo descreve os corpos de prova e sistemas de radiografia computadorizada que foram utilizados neste trabalho, bem como os procedimentos de teste com RC e radiografia convencional.

3.1 Metodologia de Teste

3.2.1. Materiais e Equipamentos

Foram realizados testes de laboratório com amostras de tubos de aço soldados, segundo as dimensões indicadas na Tabela II. Eram dois conjuntos de cinco corpos de prova, os quais apresentavam defeitos propositalmente inseridos durante o processo de soldagem.

Tabela II – Dimensões dos corpos de prova inspecionados

Corpo de Prova	Diâmetro nominal (in)	Diâmetro externo (mm)	Espessura (mm)
CP1	1,5	48,5	5,08
CP2	2	60,3	5,54
CP3			11,07
CP4	3	88,9	5,49
CP5			7,62

Os sistemas de RC utilizados foram:

- Sistema Dürr: Escâner HDCR 35, exibindo tamanho de foco *laser* de 12,5 μ m e de *pixel* de 20 μ m e faixa dinâmica de 16bits, em conjunto com as novas *blue* IPs (3,5 x 12 in). O ganho da fotomultiplicadora escolhido foi de 620V, em função deste valor proporcionar os melhores resultados para o sistema [36]. $SR_b = 40\mu$ m;
- Sistema GEIT: CR^X Tower, com tamanho de foco e de pixel de 50 μ m e faixa dinâmica de 12bits, com placas IPS (14x17 in) em cassete rígido. O ganho escolhido foi baixo (*low* – 500V) em função das recomendações do fabricante. $SR_b = 100\mu$ m;

Como fontes de radiação, empregaram-se dois tubos de raios X: Seifert 320kV ISOVOLT, de 3,5mm de tamanho focal, e YXLON 225kV, de 1,0mm de foco.

Os corpos de prova também foram inspecionados com a técnica de radiografia convencional, de modo a se realizar a comparação entre as imagens obtidas com a radiografia computadorizada. Os filmes utilizados foram do tipo D4 (CPs 1, 2 e 4) e D7 (CPs 3 e 5) Agfa Structurix Pb VACUPAC, e a revelação tomou 8 minutos, sendo realizada com uso do sistema de processamento de filmes Agfa NDT Si Eco. Os filmes radiográficos foram laudados, pela autora e por um profissional certificado, segundo as condições prescritas na norma Petrobras para radiografia convencional (N-1595) e, posteriormente, foram digitalizados através do escâner Array 2905HD, com tamanho de pixel de 50 μ m e resolução digital de 12bits.

Os filmes foram visualizados com emprego de negatoscópio Wilnos, tipo 200802-1660 (para densidades óticas de até 3,4HD), enquanto que os valores de densidade ótica foram medidos com densitômetro LCD 201 Wilnos, tipo 231002, ambos calibrados em 18/07/2008.

3.2.2. Procedimento experimental

Com o tubo Seifert somente o sistema Dürr foi utilizado, tomando-se imagens a partir de diversas combinações de valores de kV e exposição, para todos os corpos de prova, de acordo com o que apresenta a Tabela III.

Tabela III – Combinações de valores de kV e exposição para todos os CPs com uso do tubo Seifert: sistema Dürr

Exposição (mA.min)	Voltagem (kV)						
	120	130	140	150	160	180	210
5	CP1			CPs:1- 2-4-5	CPs:1- 2-4-5	---	---
10	CPs:1- 2	CPs:1- 2-4	CPs:1- 2-4-5		todos	todos	CP3
15							
20							
25							
30							
35							
40				CPs:1- 2-4-5	CPs:4- 5	---	---

Com o tubo YXlon ambos os sistemas de RC foram utilizados, mas somente as amostras apresentando os defeitos mais relevantes foram inspecionadas. Para o sistema GEIT, utilizou-se ainda, somente na inspeção do CP1, um cassete contendo tela de chumbo frontal, de 0,25mm de espessura, a fim de analisar seus efeitos na imagem obtida. A Tabela IV mostra as combinações de valores de kV e exposição executadas com o tubo YXlon.

Para realizar a avaliação segundo os critérios de qualidade mais rigorosos, os valores de distância fonte detector foram tomados com base na Classe B (técnica avançada) da norma ISO 17636 [37]. Para o tubo YXlon, os valores adotados se aproximaram da distância padrão de 1000mm, utilizada nos testes de qualificação de sistemas de RC, conforme preconiza a EN-14784-1. A Tabela V mostra os valores adotados em função do corpo de prova, do tubo de raios X e do sistema de RC utilizado.

A Tabela VI mostra os parâmetros adotados para a radiografia convencional. A escolha foi baseada nas cartas de exposição dos respectivos tubos. Em relação à distância fonte detector, para ambos os tubos de raios X, sempre foram adotados os mesmos valores que os utilizados com o sistema Dürr.

Tabela IV – Combinações de valores de kV e exposição para os CPs testados com o tubo YXlon: sistemas Dürr e GEIT

Exposição (mA.min)	Voltagem (kV)						
	130	140	150	160	180	190	210
15	<i>CP1</i>	---	---	---	---	---	---
20	CP1	---	---	---	---	---	---
25	CP2	CP4	CP5	<i>CP3</i>	---	---	---
30	---	---	<i>CP5</i>	CP3	CP3	CP3	CP3
35	CP1	CP4	---	---	---	---	---
40	CP2	---	CP5	CP3	CP3	CP3	---
50	---	---	---	CP3	CP3	---	---

Nota: grifo em itálico – apenas sistema GEIT, grifo em negrito – apenas sistema Dürr e a combinação de ambos, itálico e negrito, indica que aquela combinação kV-exposição foi testada para os dois sistemas

Tabela V – Distância fonte detector (Dfd) de acordo com o sistema, tubo de raios X e amostra

Corpo de Prova	Seifert – sistema Dürr		YXlon		
	Dfo* ISO17636 Classe B (mm)	Dfd (mm)	Dfo* ISO17636 Classe B (mm)	Dfd (mm)	
				Sistema Dürr	Sistema GEIT
CP1	700	750	200	1000	900
CP2	800	750	240		1000
CP3		900			1000
CP4	1050	1400	300		1200
CP5					1200

*Dfo – distância fonte objeto

Tabela VI – Parâmetros utilizados na radiografia convencional

Corpo de Prova	Seifert		YXlon	
	kV	mA.min	kV	mA.min
CP1	150	24	150	48
CP2		28		
CP3	210	14	175	
CP4	180	40	150	60
CP5		28		

Para todas as amostras, e com ambas as técnicas de radiografia, foram tomadas duas imagens, em posições defasadas de 90°, de acordo com o usual da prática de PDVD.

3.2.3. Requisitos de Qualidade

A Tabela VII mostra os requisitos de qualidade exigidos para as amostras com base nas normas EN14784-2 (SR_b), Petrobras N-2821 (SNR_N), ASME V e ISO17636 (contraste).

Tabela VII – Requisitos de qualidade radiográfica para as imagens

CP	Contraste - Fio Essencial (DIN)			SR_b		SNR_N
	ASME V	ISO17636		(1° par não resolvido)		
		Classe A	Classe B	Classe A	Classe B	
CP1	W12	W13	W14	12D	>13D	>70
CP2	W12	W13	W14	12D	>13D	
CP3	W10	W11	W13	11D	13D	>60
CP4	W12	W13	W14	12D	>13D	>70
CP5	W11	W12	W13	11D	13D	>60

Nota: W significando *wire*, fio em inglês, indica o fio cuja leitura é requerida

IQIs de fio, segundo a EN426-1 [38], foram empregados para avaliar contraste, tendo sido posicionados, igualmente, sempre do lado fonte. A sensibilidade radiográfica foi verificada pela análise visual do arame essencial na imagem, sem aplicação de filtros, admitindo-se como visível o fio que apresentava 10 mm do seu comprimento bem discerníveis área de interesse da radiografia. A figura 3.1(a) mostra uma imagem de um destes IQIs na radiografia e exemplifica indicando o menor fio observado. Para a medição da SR_b das imagens foi utilizado o IQI de fio duplo, sempre do lado fonte, e o método do perfil linear. Considerou-se como não resolvido o primeiro par cujo vale entre dois picos era inferior a 20% [20], conforme exemplifica a figura 3.1(b). Para filmes, os pares de fios foram lidos com auxílio de lentes. Na determinação da SNR_N adotou-se o valor de SR_b emitido no certificado do respectivo sistema de RC (vide equação 2). Este valor corresponde a maior resolução do sistema, dentre as direções de varredura lenta e rápida, reportada pelo BAM em seus testes de qualificação, e foram citados no subitem 3.2.1. O *software* de análise utilizado foi o executável ISee!, o qual apresenta uma ferramenta gráfica que possibilita a medição da SNR_N através da abertura de uma janela sobre a imagem. A dimensão adotada para esta janela (20x55 pontos) baseou-se nos requisitos das

normas adotadas, as quais preconizam um mínimo de 1100 pontos em uma área de medição. Por fim, a sensibilidade radiográfica foi verificada pela análise visual do arame essencial na imagem, sem aplicação de filtros, admitindo-se como visível o fio que apresentava 10 mm do seu comprimento bem discerníveis área de interesse da radiografia.

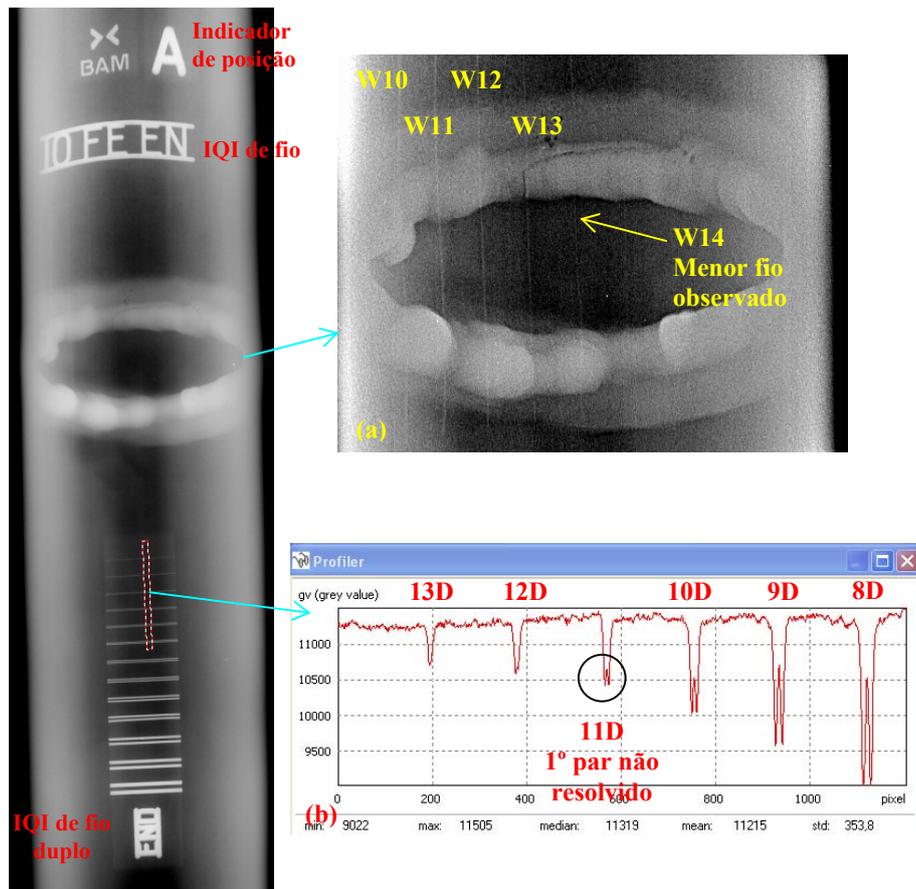


Figura 3.1 – Imagem radiográfica apresentando os IQIs utilizados para análise: (a)IQI de fio e leitura do menor fio observado (W14); (b)Perfil linear traçado sobre o IQI de fio duplo revelando o primeiro par não resolvido (11D – $SR_b = 80\mu\text{m}$).

Capítulo 4

Resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos através de todos os experimentos realizados com os corpos de prova, sistemas de RC e radiografia convencional, conforme descrito no capítulo anterior.

4.1 Qualidade de Imagem Obtida com Radiografia Computadorizada

A Tabela VIII mostra os valores de resolução básica espacial atingidos pelos sistemas utilizados. Note-se que se referem somente à resolução do arranjo montado.

Tabela VIII – Resolução básica espacial do arranjo para os sistemas utilizados

Sistema+fonte	Distância fonte detector - Dfd (mm)	SR _b (primeiro par não resolvido)
Filme D4+ Seifert	todas	>13D
Filme D7+ Seifert		
Filme D4+ YXlon		
Filme D7+ YXlon		
HDCR+IP blue+ Seifert	750 (CP1 e 2)	12D
	900 (CP3)	13D
	1400 (CP4 e 5)	>13D
HDCR+IP blue+ YXlon	1000	>13D
CR ^X Tower+IPS+YXlon	900 (CP1)	11D
	1000 (CP2 e 3)	
	1200 (CP4 e 5)	

A Tabela IX mostra agora os valores de resolução encontrados durante a inspeção das amostras com o IQI de fio duplo posicionado no lado fonte, perpendicularmente a direção de varredura do feixe laser do escâner.

Tabela IX - Resolução básica espacial das imagens dos CPs (1ºpar de fios não resolvido)

Amostra	Sistema+fonte				
	Filme D4 ou D7+ Seifert	HDCR +IP blue+ Seifert	Filme D4 ou D7+ YXlon	HDCR+IP blue+ YXlon	CR ^X Tower+ IPS+YXlon
CP1	12D(filme D4)	11D	13D(filme D4)	12D	11D –10D*
CP2	11D(filme D4)	10D	13D(filme D4)	12D	10D
CP3	11D (filme D7)	11D	11D (filme D7)	12D	11D –10D
CP4	12D(filme D4)	11D	12D(filme D4)	12D-11D	10D
CP5	11D(filme D7)	11D	11D(filme D4)	11D	10D

*resolução atingida com emprego do cassete com tela de chumbo

As Tabelas X a XIV mostram a evolução nos valores de SNR_N e nas leituras do fio essencial (representadas pela letra *W* – *wire*) com a variação da energia da fonte e da exposição, com uso do tubo Seifert, para os CPs 1 a 5, respectivamente. Dentro da codificação de cores adotada, a cor amarela significa atendimento somente a requisitos de ASME, verde expressa o atendimento aos requisitos da norma ISO, Classe A, azul significa, ISO, Classe B (vide Tabela VII) e vermelho, saturação da IP. A figura 4.1 sintetiza o exposto pelas referidas Tabelas.

Tabela X – Evolução de SNR_N e contraste com exposição e kV- CP1

kV	Exposição (mA.min)						
	5	10	15	20	25	35	40
120	140- W 13	171- W14	214- W14	244- W14	244- W14	-----	318- W14
130	163- W13	204- W14	237- W14	252- W14	309- W14	-----	346- W14
140	183- W13	261- W14	304- W14	339- W14	341- W14	399- W14	-----
150	221- W14	306- W14	345- W14	353- W14	366- W14	449- W14	-----
160	237- W14	337- W14	358- W14	419- W14	420- W14		

Tabela XI – Evolução de SNR_N e contraste com exposição e kV- CP2

kV	Exposição (mA.min)							
	5	10	15	20	25	30	35	40
120	-----	144-W14	182-W14	208-W14	-----	232-W14	-----	-----
130	-----	177-W14	235-W14	263-W14	-----	-----	-----	316-W14
140	-----	239-W14	273-W14	279-W14	-----	-----	329-W14	-----
150	217-W13	291-W14	308-W14	346-W14	-----	-----	399-W14	-----
160	217-W14	297-W14	359-W14	-----	389-W14	-----	-----	-----

Tabela XII – Evolução de SNR_N e contraste com exposição e kV- CP3

kV	Exposição (mA.min)				
	10	15	20	25	30
150	-----	-----	147-W10	-----	207-W10
160	-----	172-W10	198-W10	-----	224-W10
180	-----	213-W11	251-W11	-----	302-W11
210	245-W11	285-W11	323-W11	-----	341-W11

Tabela XIII – Evolução de SNR_N e contraste com exposição e kV- CP4

kV	Exposição (mA.min)						
	5	10	15	20	25	30	40
130	-----	117-W13	138-W13	164-W14	178-W14	198-W14	230-W15
140	-----	137-W13	168-W14	188-W14	227-W14	241-W14	255-W14
150	140-W13	172-W14	198-W14	259-W14	244-W14	-----	288-W15
160	139-W14	194-W14	252-W14	256-W14	-----	304-W14	335-W14

Tabela XIV – Evolução de SNR_N e contraste com exposição e kV- CP5

kV	Exposição (mA.min)					
	5	10	15	25	30	40
140	-----	88,5-W12	113-W13	157-W13	151-W13	188-W13
150	78,2-W12	111-W13	141-W13	166-W13	191-W13	221-W13
160	94-W12	127-W13	167-W13	204-W13	210-W13	248-W13

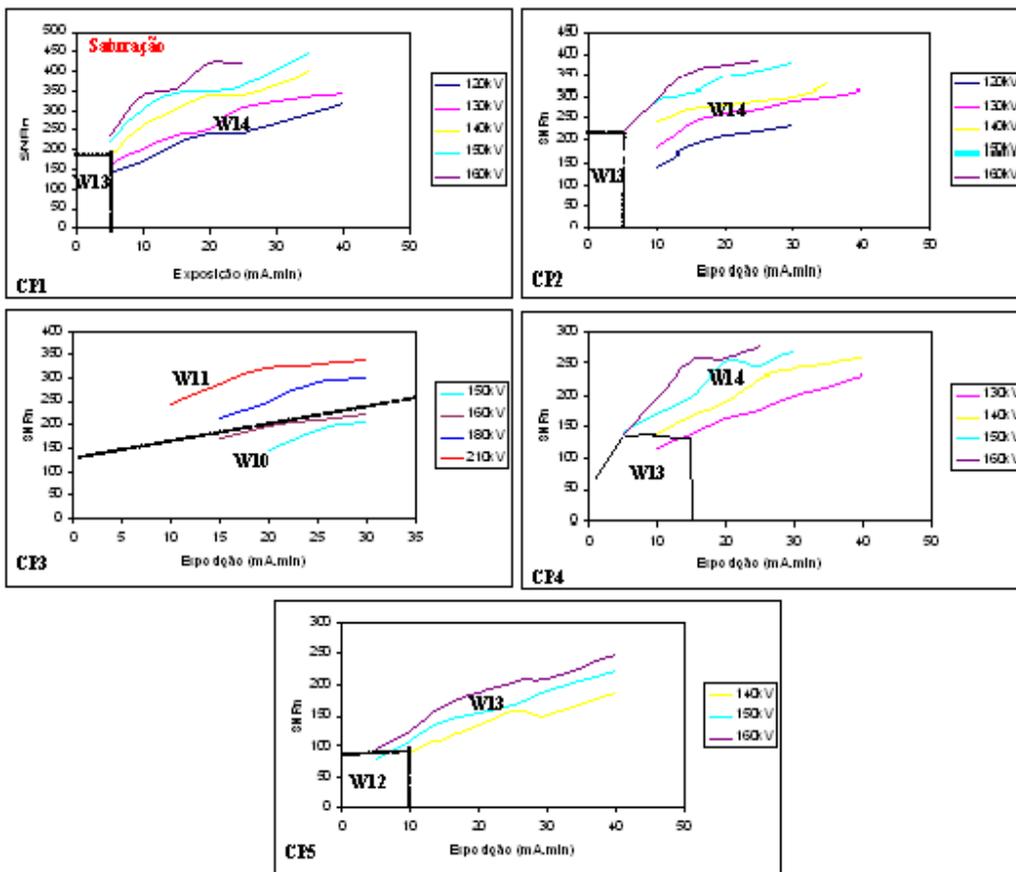


Figura 4.1 – Evolução dos valores de SNR_N e contraste com a variação da exposição e energia da radiação X do tubo Seifert.

As Tabelas XV e XVI mostram a evolução nos valores de SNR_N e nas leituras do fio essencial com a variação da energia da fonte e da exposição, com uso do tubo YXlon para os sistemas Dürr e GEIT, respectivamente. A codificação de cores é a mesma das

Tabelas X a XIV. Como foram feitas poucas exposições, principalmente com uso do sistema GEIT, os resultados não apresentam uma tendência tão bem definida quanto no caso anterior, para o tubo Seifert, mas ainda assim os resultados são coerentes.

Tabela XV – Evolução de SNR_N e contraste com exposição e kV- sistema Dürr

Amostra	kV	Exposição (mA.min)					
		20	25	30	35	40	50
CP1	130	247-W14	-----	-----	307-W15	-----	-----
CP2		-----	244-W14	-----	-----	308-W14	-----
CP3	160	-----	-----	227-W12	-----	250-W12	319-W11
	180	-----	-----	260-W12	-----	296-W12	340-W12
	190	-----	-----	282-W13	-----	317-W12	-----
	210	-----	-----	338-W12	-----	-----	-----
CP4	140	-----	308-W14	-----	340-W15	-----	-----
CP5	150	-----	251-W14	-----	-----	299-W14	-----

Tabela XVI – Evolução de SNR_N e contraste com exposição e kV- sistema GEIT

Amostra	kV	Exposição (mA.min)		
		15	25	30
CP1	130	227-W14	-----	-----
CP1 *cassete com tela de chumbo		167-W14		
CP2		-----	202-W14	-----
CP3	160	-----	215-W11	-----
CP4	140	-----	204-W15	-----
CP5	150	-----	221-W14	252-W14

A Tabela XVII mostra os valores de sensibilidade ao contraste obtidos com emprego de radiografia convencional, para os tubos Seifert e YXlon. Mostra também uma comparação com a sensibilidade atingida pelos sistemas de RC. Para o sistema Dürr, com emprego do tubo Seifert, foram indicados os valores mínimos de kV e exposição nos quais a melhor sensibilidade foi atingida.

A densidade ótica média, medida no cordão de solda, para todos os filmes foi de 2,4HD. Fora do cordão a densidade média foi de 3,0HD.

Tabela XVII – Radiografia convencional - sensibilidade ao contraste - e comparação de valores de sensibilidade atingidos pela RC.

CP	Sensibilidade ao contraste				
	Filme + Seifert	RC – Sistema Dürr + Seifert	Filme + YXlon	RC – Sistema Dürr + YXlon	RC – Sistema GEIT + YXlon
CP1	W14	W14 120kV-10mA.min	W14	W14	W14
CP2	W14	W14 120kV-10mA.min	W14	W14	W14
CP3	W12	W11 180kV-15mA.min	W12	W12	W11
CP4	W14	W14 130kV-20mA.min	W15	W15	W15
CP5	W14	W13 140kV-15mA.min	W14	W14	W14

4.2 Detectabilidade – Radiografia Computadorizada e Radiografia Convencional

A segunda parte do trabalho experimental consistiu na validação dos resultados mediante a comparação entre as imagens obtidas por RC e radiografia convencional quanto à detectabilidade de defeitos. Considerou-se a imagem digital aprovada apenas quando exibisse todos os defeitos laudados nos filmes. A comparação se deu entre imagens obtidas com ambos os tubos de raios X e sistemas de RC, mantendo-se as mesmas configurações de arranjo.

As radiografias obtidas através da técnica convencional com uso do tubo Seifert, referentes às dez amostras, são apresentadas uma a uma, pelas figuras 4.2 a 4.21. Os defeitos foram indicados nestas imagens, e a codificação adotada baseia-se na norma Petrobras de terminologia de defeitos em soldas [39], na ausência de norma nacional sobre o tema. O significado dos acrônimos é apresentado no início desta dissertação.

A comparação com as imagens obtidas com RC foi feita apenas para os CPs, e respectivas posições de exposição, nos quais foram detectados os defeitos mais relevantes. Estes casos são apresentados nas figuras 4.22 a 4.28, nas quais se mostra a evolução da detectabilidade da RC com o aumento da dose e da energia de radiação. Estas mesmas amostras foram radiografadas também com emprego do tubo YXlon, e com uso dos dois sistemas de radiografia computadorizada.

Indicam-se, nas respectivas legendas das imagens comparativas, os parâmetros de radiografia, como kV, exposição e distância fonte detector, e parâmetros de qualidade, como sensibilidade ao contraste, SR_b , SNR_N e densidade ótica (convencional). Os corpos de prova de mesmo diâmetro e espessura foram referenciados como 1 e 2, e as posições de exposição como A e B.

Todas as imagens são apresentadas após aplicação de filtro passa alta para facilitar a visualização.

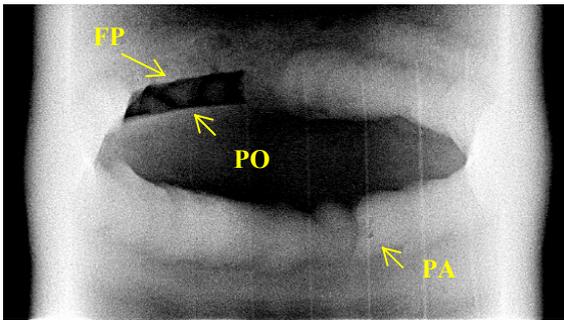


Figura 4.2 – CP1-1 posição A (tubo Seifert)

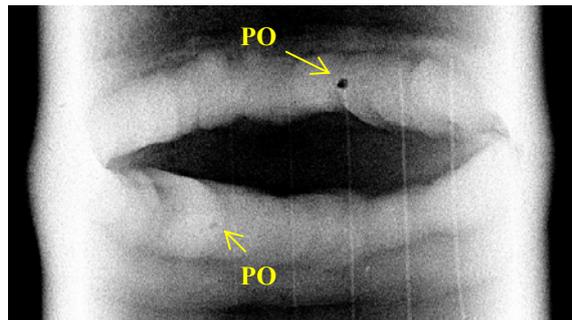


Figura 4.3 – CP1-1 posição B (tubo Seifert)

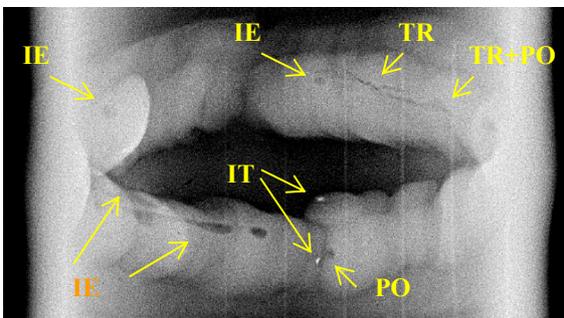


Figura 4.4 – CP1-2 posição A (tubo Seifert)

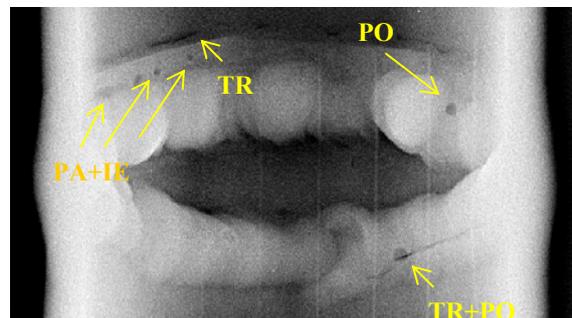


Figura 4.5 – CP1-2 posição B (tubo Seifert)

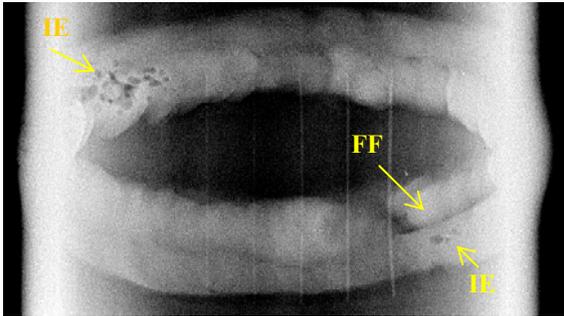


Figura 4.6 – CP2-1 posição A (tubo Seifert)

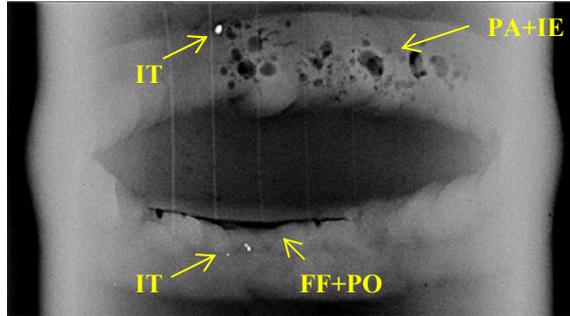


Figura 4.7 – CP2-1 posição B (tubo Seifert)

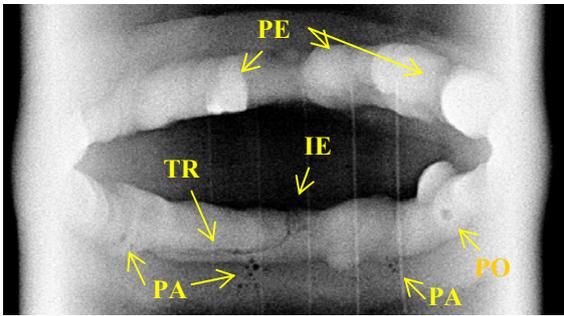


Figura 4.8 – CP2-2 posição A (tubo Seifert)

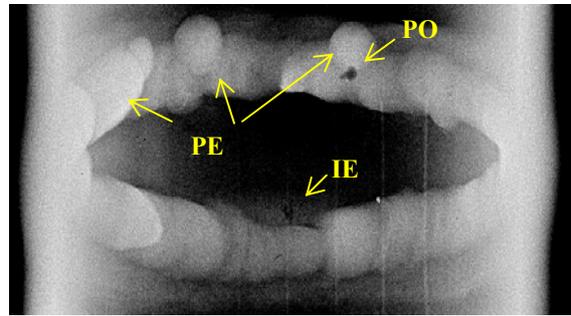


Figura 4.9 – CP2-2 posição B (tubo Seifert)

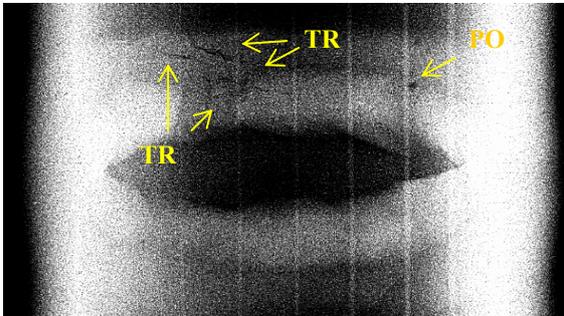


Figura 4.10 – CP3-1 posição A (tubo Seifert)

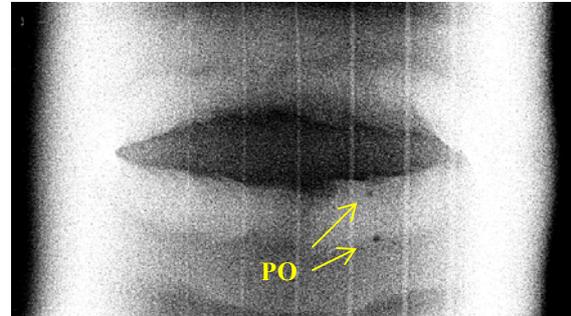


Figura 4.11 – CP3-1 posição B (tubo Seifert)

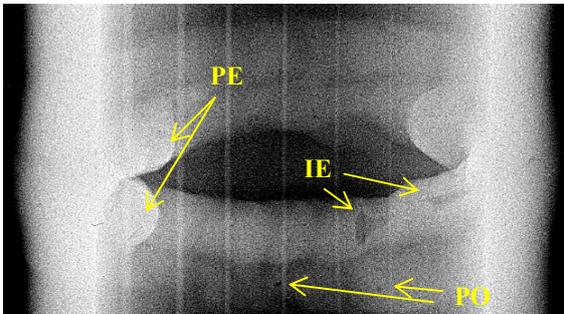


Figura 4.12 – CP3-2 posição A (tubo Seifert)

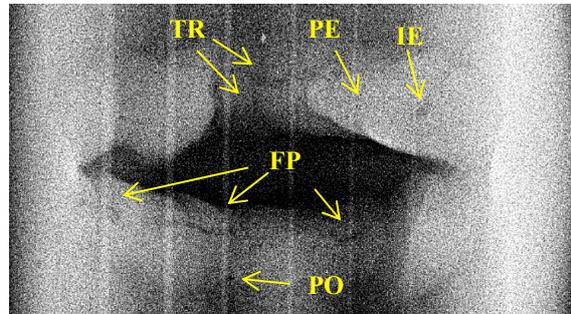


Figura 4.13 – CP3-2 posição B (tubo Seifert)

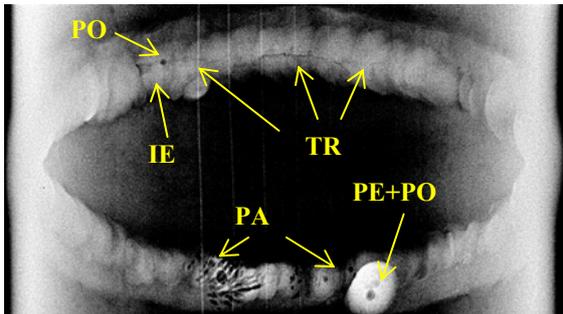


Figura 4.14 – CP4-1 posição A (tubo Seifert)

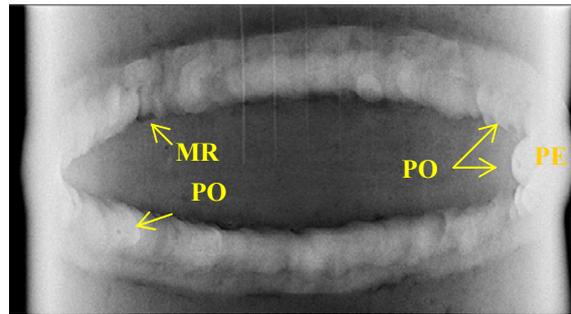


Figura 4.15 – CP4-1 posição B (tubo Seifert)

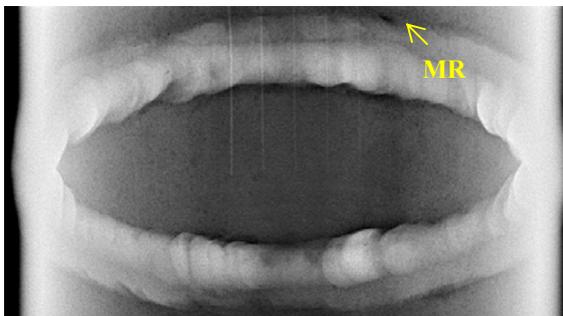


Figura 4.16 – CP4-2 posição A (tubo Seifert)

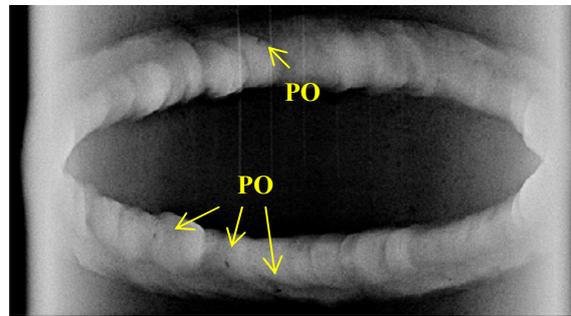


Figura 4.17 – CP4-2 posição B (tubo Seifert)

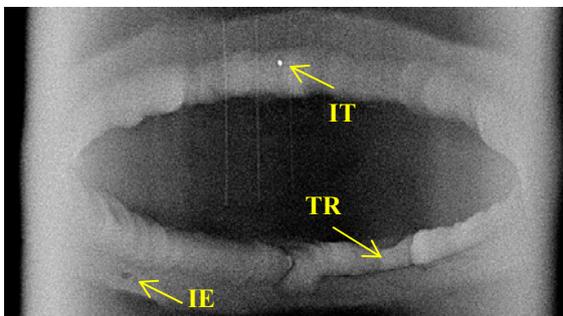


Figura 4.18 – CP5-1 posição A (tubo Seifert)

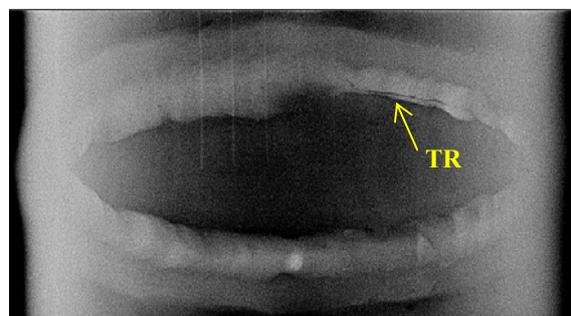


Figura 4.19 – CP5-1 posição B (tubo Seifert)

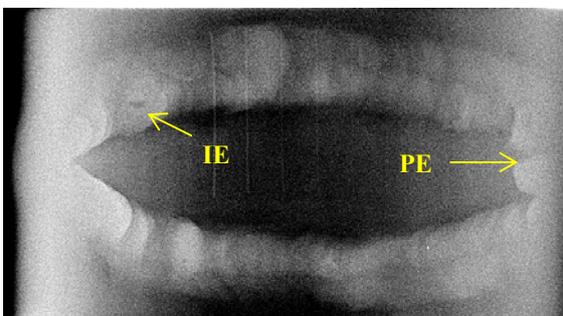


Figura 4.20 – CP5-2 posição A (tubo Seifert)

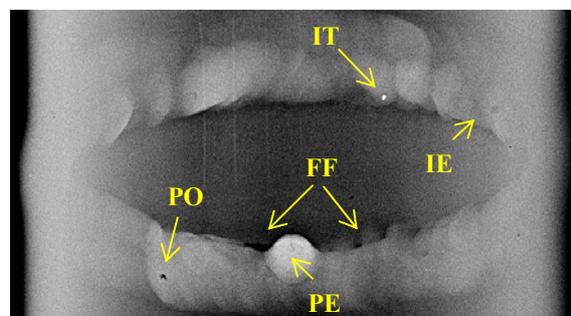


Figura 4.21 – CP5-2 posição B (tubo Seifert)

Com base nestes resultados, foram escolhidos os seguintes CPs para comparação com a RC: 1-1A, 1-2A, 2-2A, 3-1A, 3-2B, 4-1A e 5-1B. Os demais foram radiografados somente pelo sistema Dürr, com uso do tubo Seifert, mas não houve avaliação da evolução da detectabilidade com o aumento da dose ou energia de radiação.

A figura 4.22 (a) repete a figura 4.2, enquanto que 4.22(b) a (c) mostram a evolução da detectabilidade do sistema Dürr, com uso do tubo Seifert, em função da energia da radiação e da exposição. Em 4.22(c) o sistema atingiu detectabilidade equivalente. Os resultados do sistema GEIT, com tubo YXlon são mostrados em 4.22(d) e (e), onde se empregou o cassete com tela de chumbo. Note-se que neste caso, a equivalência equivalente foi atingida em (e). A Tabela XVIII mostra os resultados obtidos a partir da avaliação de todas as imagens obtidas com este corpo de prova, e destaca as condições a partir das quais a detectabilidade equivalente foi atingida para cada sistema.

Tabela XVIII – CP1-1A – sistema Dürr e tubo Seifert: evolução da detectabilidade com o aumento da exposição e da kV. Sistema GEIT e tubo YXlon: efeito do uso de cassete com tela de chumbo.

Contraste fio	SNR _N	Observações
W14	174	120kV E= 10mA.min. Sistema Dürr. Tubo Seifert. Dfd=750mm
W14	244	120kV E = 20mA.min. Sistema Dürr. Tubo Seifert. Dfd=750mm
W14	279	140kV E = 10mA.min. Sistema Dürr. Tubo Seifert. Dfd=750mm
W14	326	140kV E = 15mA.min. Sistema Dürr. Tubo Seifert. Dfd=750mm
W14	343	150kV E = 15mA.min. Sistema Dürr. Tubo Seifert. Dfd=750mm
W14	213	130kV E = 15mA.min. Sistema GEIT. Tubo YXlon. Dfd=750mm
W14	158	130kV E = 15mA.min. Sistema GEIT. Tubo YXlon. Dfd=900mm. Tela de chumbo

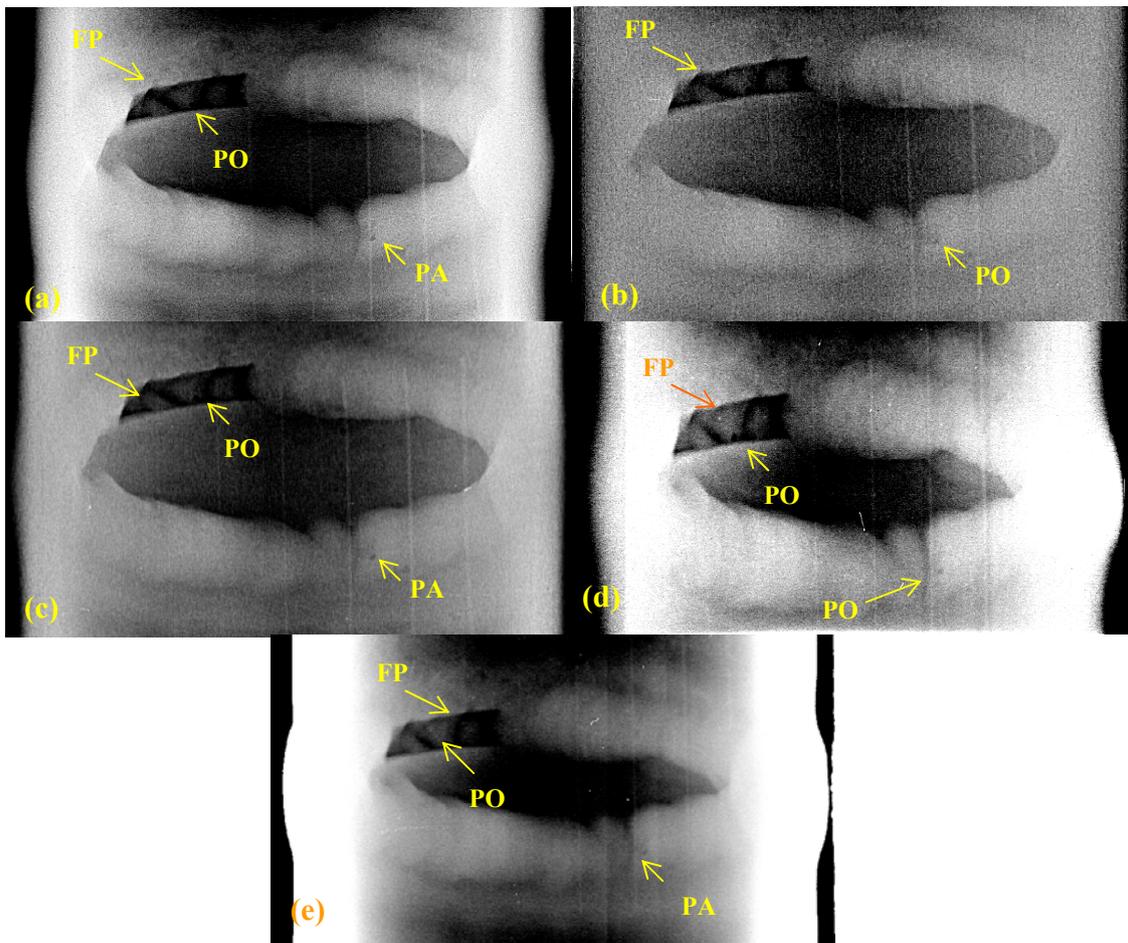


Figura 4.22 – CP1-1A, Dfd=750mm. (a) radiografia convencional (tubo Seifert) –150kV, 24mA.min, D=2,4HD, contraste=W14 e $SR_b=12D$; RC- sistema Dürr (tubo Seifert), $SR_b=11D$: (b)120kV, 10mA.min, contraste=W14 e $SNR_N=174$; (c) 150kV, 16mA.min, contraste=W14 e $SNR_N=343$; RC- sistema GEIT (tubo YXlon), Dfd=900mm: (d)130kV, 15mA.min, contraste=W14, $SR_b=11D$ e $SNR_N=213$; (e) cassete com tela de chumbo, 130kV, 15mA.min, contraste=W14, $SR_b=10D$ e $SNR_N=158$.

A figura 4.23(a) mostra a análise do CP1-2A e o resultado da inspeção com filme classe I (Agfa D4). Em 4.23(b) e (c) têm-se imagens obtidas com o sistema Dürr em duas condições diferentes de kV/exposição (tubo Seifert e mesma Dfd); em (c) atingiu-se equivalência na detectabilidade - 150kV e 20mA.min – W14 $SNR_N=353$. A imagem em 4.23(d) corresponde ao sistema Dürr para 130kV e 20mA.min, tubo YXlon; 4.23(e) mostra a imagem obtida com o sistema GEIT e emprego de cassete com tela de chumbo, onde

praticamente atingiu-se equivalência com a radiografia convencional. Tabela XIX complementa estes resultados, mostrando a evolução da detectabilidade do sistema Dürr, tubo Seifert.

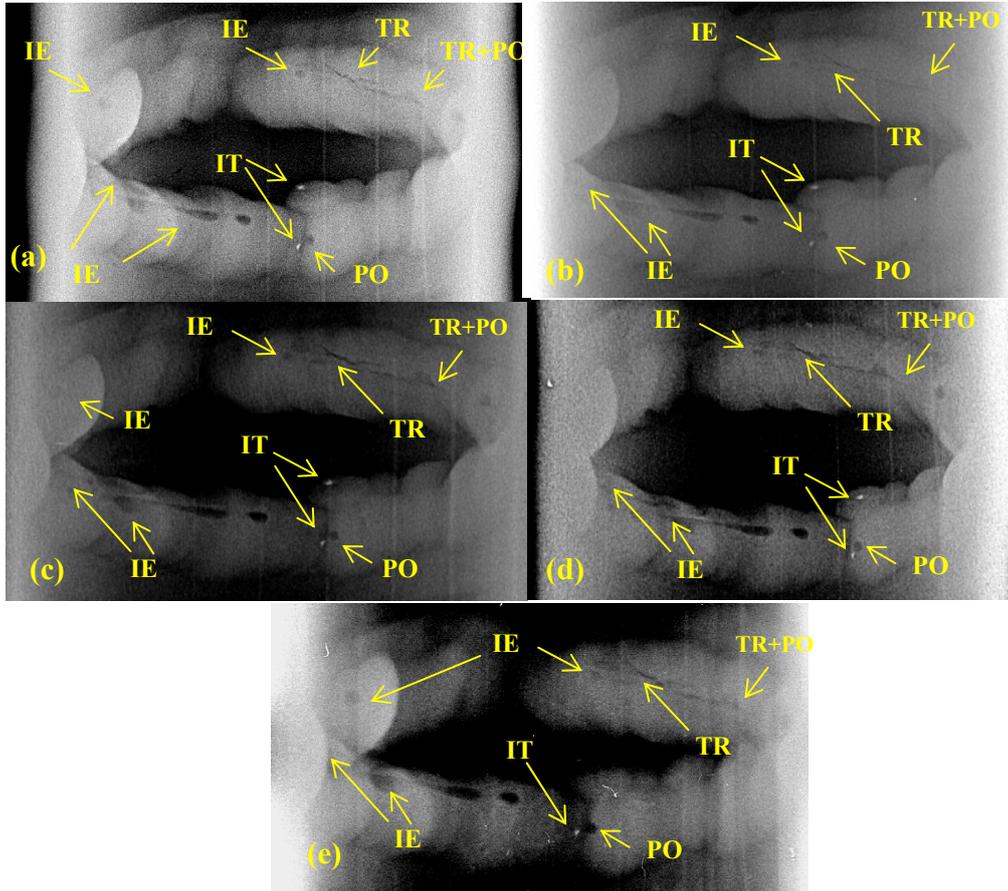


Figura 4.23– CP1-2A, Dfd=750mm. (a)radiografia convencional (tubo Seifert)- 150kV, 24mA.min, D=2,1HD, contraste W14 e $SR_b= 12D$; RC- sistema Dürr (tubo Seifert), $SR_b= 11D$: (b)130kV, 15mA.min, contraste W14 e $SNR_N=236$; (c)150kV, 20mA.min, contraste W14 e $SNR_N=353$; (d)Sistema Dürr, tubo YXlon, Dfd=1000mm, 130kV, 20mA.min, contraste W14, $SR_b= 12D$ e $SNR_N=250$; (e)Sistema GEIT+cassete com tela de chumbo, tubo YXlon, Dfd=900mm, 130kV, 15mA.min, contraste W14, $SR_b= 10D$ e $SNR_N=175$.

Tabela XIX – CP1-2A – sistema Dürr e tubo Seifert: evolução da detectabilidade com o aumento da exposição e da kV

kV	Exposição (mA.min)							
	5	10	15	20	25	35	40	80
120	144- W13	156- W13	214- W14	----	244- W14	----	314- W13	348- W14
130	158- W14	201- W14	236- W14	252- W14	309- W14	----	346- W14	----
140	----	242- W14	----	339- W14	349- W14	358- W14	----	----
150	228- W14	300- W14	346- W14	353- W14	366- W14	449- W14	----	----
160	242- W14	329- W14	358- W14	419- W14	420- W14	----	----	----

A figura 4.24 mostra as imagens obtidas, com emprego do tubo YXlon, para o CP2-2A: (a) radiografia convencional com do filme D4; (b) RC com sistema Dürr, 130kV e 25mA.min; (c) aumento da exposição para 40mA.min, e (d) RC com sistema GEIT e mesmas condições de teste e exposição de 25mA.min. Em 4.24(c) e (d) atingiu-se equivalência. A Tabela XX mostra a evolução da detectabilidade para o sistema Dürr, tubo Seifert, destacando as condições onde há equivalência com a radiografia convencional.

Tabela XX – CP2-2A – sistema Dürr e tubo Seifert: evolução da detectabilidade com o aumento da exposição e da kV

kV	Exposição (mA.min)					
	5	10	15	25	30	40
120	----	144- W14	182- W14	----	232- W14	----
130	----	----	----	----	----	316- W14
150	----	----	312- W14	----	----	----
160	217- W14	297- W14	359- W14	389- W14	----	----

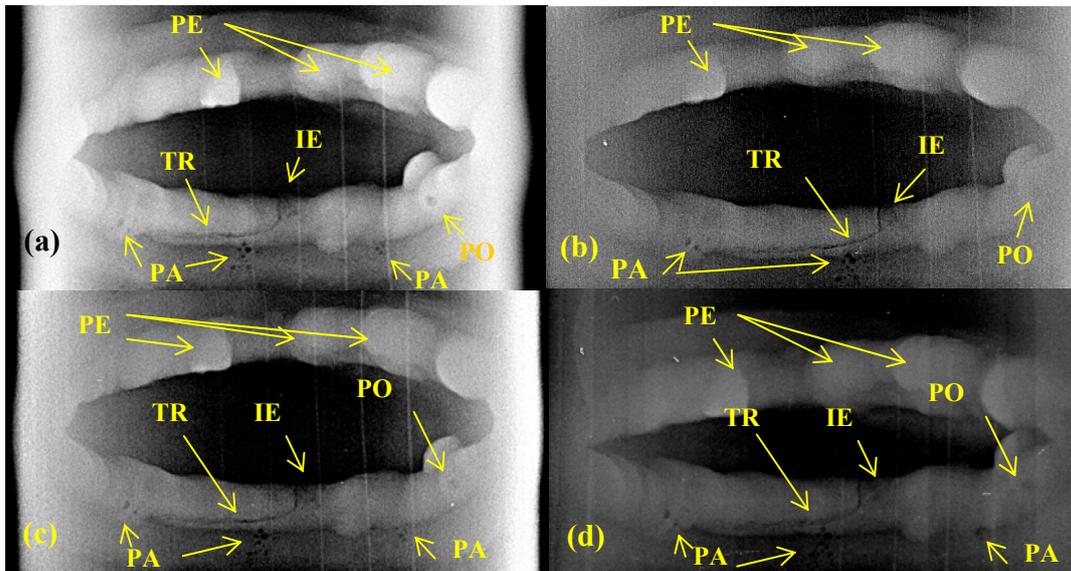


Figura 4.24– CP2-2A, Dfd=1000mm, tubo YXlon. (a)radiografia convencional - 150kV, 28mA.min, D=2,1HD, contraste W14 e $SR_b= 13D$; RC- sistema Dürr, $SR_b= 12D$: (b)130kV, 25mA.min, contraste W14 e $SNR_N=244$; (c)130kV, 40mA.min, contraste W14 e $SNR_N=308$; (d)Sistema GEIT, 130kV, 25mA.min, contraste W14, $SR_b= 10D$ e $SNR_N=211$.

A figura 4.25 mostra os resultados para o CP3-1A. Em (a) tem-se a imagem do filme D7, tubo YXlon. Em 4.25(b) e (c) têm-se os melhores resultados obtidos com os sistemas Dürr e GEIT, e os respectivos parâmetros nos quais foram atingidos; tubo e Dfd são os mesmos. A partir dos testes com este corpo de prova, começaram a aparecer artefatos nas imagens obtidas com o sistema GEIT, devido, provavelmente, ao processo específico de varredura do CR^XTower (a seta vermelha aponta para um deles). Uma outra observação é que para esta amostra não se obteve equivalência completa para nenhum dos sistemas de RC testados.

A figura 4.26 mostra (a) a radiografia convencional e (b) o melhor resultado obtido com o sistema Dürr, tubo YXlon para o CP 3-2B. O sistema GEIT foi testado apenas uma vez para este CP, com 160kV e 25mA.min de exposição, e o resultado é apresentado em 4.26(c). Novamente, como no outro CP3, não se atingiu a equivalência com a convencional.

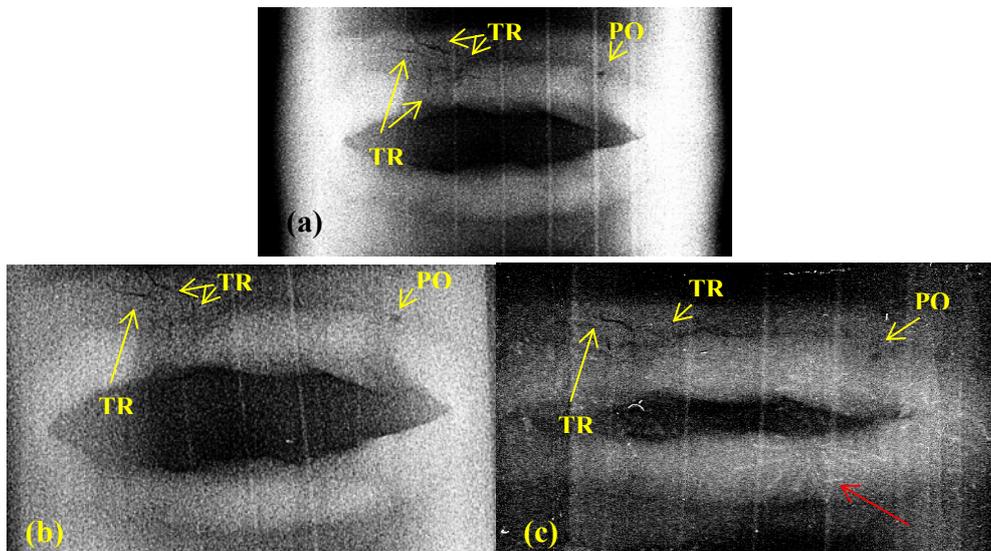


Figura 4.25– CP3-1A, Dfd=1000mm, tubo YXlon. (a)radiografia convencional - 175kV, 48mA.min, D=2,2HD, contraste W12 e $SR_b= 11D$; RC: (b)sistema Dürr, 210kV, 30mA.min, contraste W12, $SR_b= 12D$ e $SNR_N=327$; (c)Sistema GEIT, 160kV, 25mA.min, contraste W12, $SR_b= 11D$ e $SNR_N=213$. A seta vermelha mostra um artefato na imagem.

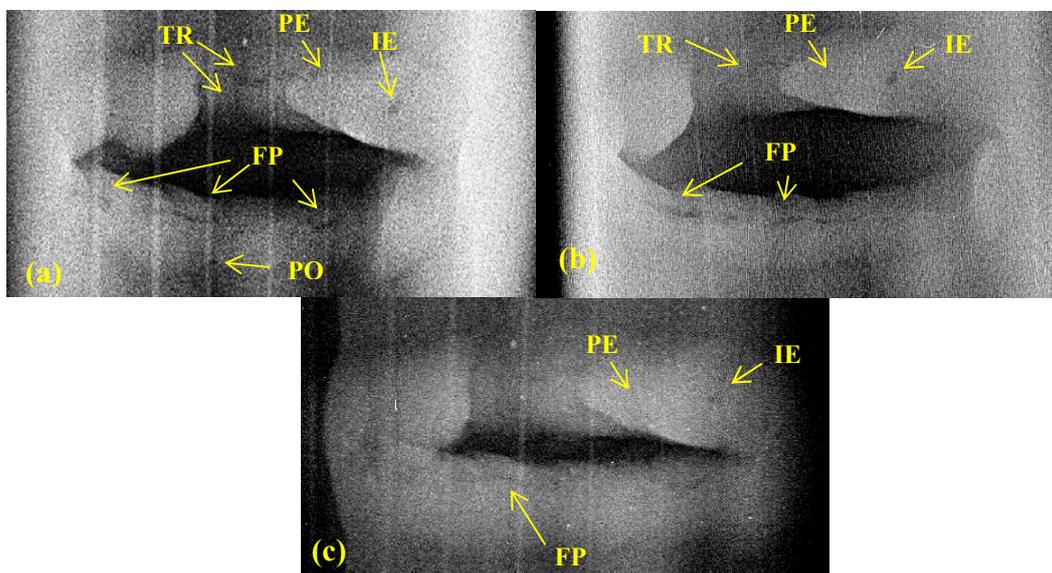


Figura 4.26– CP3-2B, Dfd=1000mm, tubo YXlon. (a)radiografia convencional - 175kV, 48mA.min, D=2,5HD, contraste W12 e $SR_b= 11D$; RC: (b)sistema Dürr, 210kV, 30mA.min, contraste W12, $SR_b= 12D$ e $SNR_N=349$; (c)Sistema GEIT, 160kV, 25mA.min, contraste W11, $SR_b= 11D$ e $SNR_N=217$.

A figura 4.27 mostra a imagem do filme D4, tubo YXlon, para o CP4-1A. Em 4.27(b) e (c) mostram-se resultados que apresentaram equivalência obtidos com os sistemas Dürr e GEIT, ambos para 140kV e 25mA.min. Neste caso, as Dfd são diferentes: 1000mm para Dürr e 1200mm para GEIT, o que também justifica as diferenças em SNR_N (308 e 204, respectivamente). A Tabela XXI mostra a evolução da detectabilidade do sistema Dürr, tubo Seifert.

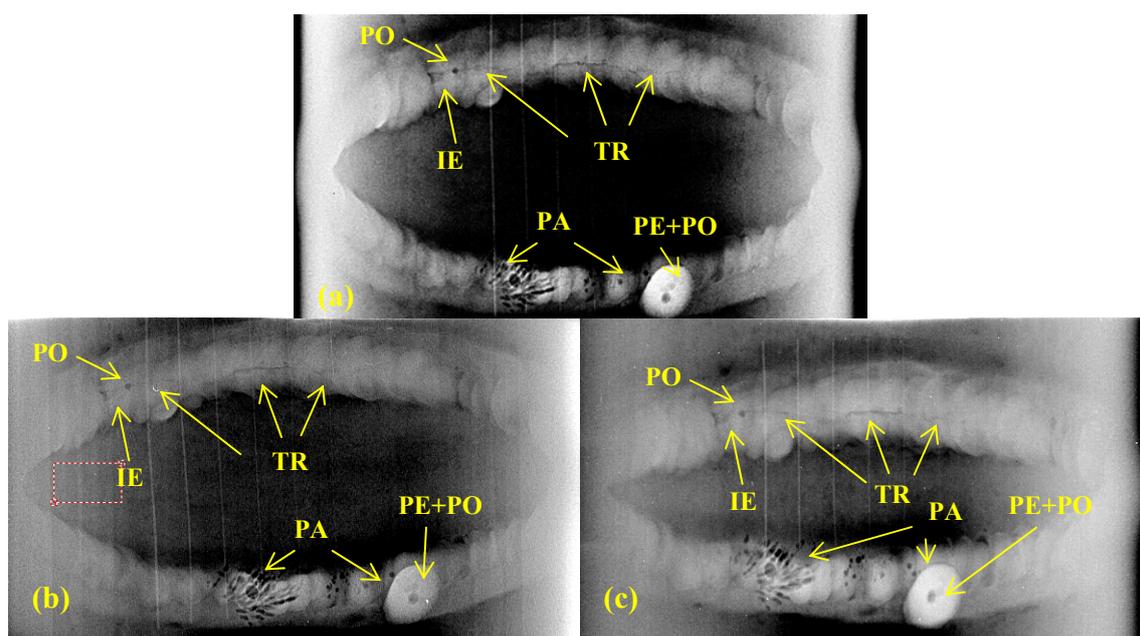


Figura 4.27– CP4-1A, Dfd=1000mm, tubo YXlon. (a)radiografia convencional - 150kV, 48mA.min, $D=2,1HD$, contraste W15 e $SR_b= 12D$; RC: (b)sistema Dürr, 140kV, 25mA.min, contraste W14, $SR_b= 11D$ e $SNR_N=308$; (c)Sistema GEIT, Dfd=1200mm, 140kV, 25mA.min, contraste W15, $SR_b= 10D$ e $SNR_N=204$.

A figura 4.28 mostra os resultados para o CP5-1B, com emprego do tubo YXlon: (a)radiografia convencional com do filme D7, (b)RC com sistema Dürr e (c)RC com sistema GEIT. Novamente percebe-se a presença de artefatos (seta vermelha). As imagens apresentadas em 4.28(b) e (c) representam condições de equivalência com os respectivos sistemas. A Tabela XXII mostra a evolução da detectabilidade com o sistema Dürr, tubo Seifert.

Tabela XXI – CP4-1A – sistema Dürr e tubo Seifert: evolução da detectabilidade com o aumento da exposição e da kV

kV	Exposição (mA.min)						
	5	10	15	20	25	30	40
130	----	117- W13	138- W13	164- W14	178- W14	198- W14	230- W15
140	----	137- W13	168- W14	188- W14	227- W14	241- W14	255- W14
150	140- W13	172- W14	198- W14	----	236- W14	----	288- W15
160	139- W14	194- W14	232- W14	256- W14	----	304- W14	335- W14

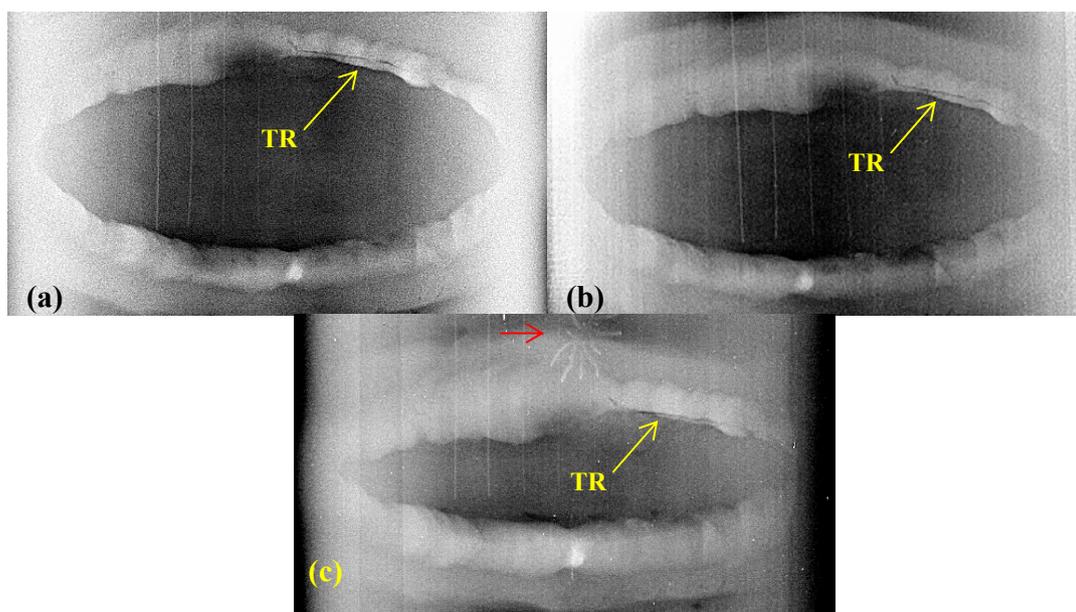


Figura 4.28– CP5-1B, Dfd=1000mm, tubo YXlon. (a)radiografia convencional - 150kV, 60mA.min, D=2,5HD, contraste W14 e $SR_b = 11D$; RC: (b) sistema Dürr, 150kV, 40mA.min, contraste W14, $SR_b = 12D$ e $SNR_N = 299$; (c) Sistema GEIT, Dfd=1200mm, 150kV, 30mA.min, contraste W14, $SR_b = 10D$ e $SNR_N = 252$.

Tabela XXII – CP5-1B – sistema Dürr e tubo Seifert:
evolução da detectabilidade com o aumento da
exposição e da kV

kV	Exposição (mA.min)			
	5	10	15	30
140	----	88,5- W12	113- W13	----
150	78,2- W12	111- W13	141- W13	199- W13
160	94- W12	127- W13	167- W13	----

Avaliação dos Limites para Detectabilidade Equivalente

A Tabela XXIII cita as condições mínimas para garantia de detectabilidade equivalente para todos os CPs testados pelo sistema Dürr. A Tabela XXIV mostra o desempenho do sistema GEIT.

Nas duas Tabelas, a coluna referente à intensidade linearizada de sinal foi obtida através da obtenção dos valores médios de I na imagem correspondente. Salienta-se mais uma vez, no entanto, que tais valores são sujeitos a alterações se o ganho do tubo fotomultiplicador ou a corrente elétrica no filamento do tubo de raios X for modificado.

Tabela XXIII – Condições mínimas para garantia de
detectabilidade equivalente: sistema Dürr.

CP	kV	Fonte/ Dfd (mm)	Exposição (mA.min)	Contraste/ SNR _N	I _{média}
1 1	140	Seifert/ 750	15	W14 / 326	19131
1 2	150		15	W14 / 343	22406
	160		15	W14 / 242	9916
2	130	YXlon/ 1000	40	W14 / 308	15395
4	140	Seifert/ 1400	40	W14 / 255	11289
	150		40	W15 / 288	15960
	160		30	W14 / 304	16307
	140	YXlon/ 1000	25	W14 / 308	15888
5	150	Seifert/ 1400	15	W13 / 141	2631
	160		10	W13 / 127	2482

Tabela XXIV– Sistema GEIT: análise da detectabilidade.

Tubo YXlon

CP	kV	Dfd (mm)/ Obs	Exposição (mA.min)	Contraste/ SNR _N	I _{média}
1	130	900/uso tela de Pb	15	W14 / 175	7439
2	130	1000	25	W14 / 211	21043
4	140	1200	25	W15 / 204	29713
5	150	1200	30	W14 / 252	24161

Otimização da Radioproteção com Radiografia Computadorizada

As Tabelas XXV e XXVI mostram a relação entre os valores de energia e exposição, necessários para garantir resultados satisfatórios, com radiografia convencional e computadorizada, empregando-se os tubos Seifert e YXlon, respectivamente. No caso do CP3 e do CP1, este último somente na Tabela XXVI, as linhas não foram preenchidas devido ao fato dos sistemas de RC não terem atingido detectabilidade equivalente com os parâmetros de teste adotados.

Note-se que, como mencionado anteriormente, a radiografia convencional trabalhou com as mesmas distâncias fonte detector que o sistema Dürr. Para o sistema GEIT os valores de exposição foram corrigidos, quando necessário, visando possibilitar a comparação com a convencional.

Tabela XXV– Sistema Dürr: otimização da radioproteção com RC

Tubo Seifert

Corpo de Prova	Convencional		Computadorizada	
	kV	mA.min	kV	mA.min
CP1	150	24	150	15
CP2	150	28	160	15
CP3	210	14	---	---
CP4	180	40	140	40
CP5	180	28	150	15

Tabela XXVI– Sistemas Dürr e GEIT: otimização da radioproteção com RC

Tubo YXlon

Corpo de Prova	Convencional		Computadorizada			
			Dürr		GEIT	
	kV	mA.min	kV	mA.min	kV	mA.min
CP1	150	48	---	---	130*	20*
CP2	150	48	130	40	130	25
CP3	175	48	---	---	---	---
CP4	150	48	140	25	140	18
CP5	150	60	150	40	150	22

*emprego de tela de chumbo

Capítulo 5

Discussão dos Resultados

Resolução Básica Espacial (SR_b)

Observou-se que os valores de resolução básica espacial dos arranjos montados atingem plenamente os requisitos da classe B para a inspeção com filmes (vide Tabela VIII). No caso da radiografia computadorizada, com uso do sistema Dürr de alta definição, estes requisitos são atingidos para o tubo de raios X de menor foco (YXlon), ou à partir de distâncias superiores a 1m no caso do tubo Seifert (3,5mm de foco). O sistema GEIT não atinge nem mesmo os requisitos de classe A, a não ser no caso dos corpos de prova de maior espessura (CPs 3 e 5), independentemente da fonte ou da distância. Isto se deve ao fato de que a resolução do CR^XTower não supera 80 μ m (par 11D) em quaisquer das duas direções de escaneamento. Melhores valores de resolução para este sistema poderiam ser obtidos apenas com emprego de fontes microfocadas e ampliação.

No caso das radiografias dos corpos de prova com RC, a Tabela XIX mostra que mesmo para o sistema Dürr, os valores de resolução são inferiores àqueles obtidos com a radiografia convencional em 1 par de fios. Apenas se comparado com filmes classe II (como o Agfa D7), o sistema atinge valores iguais. Com emprego do tubo YXlon e sistema Dürr, o desempenho foi melhor por conta do menor foco do aparelho, mas os resultados foram análogos. Destaque para o resultado com o CP3, de maior espessura penetrada, cuja

resolução de imagem, neste caso, superou o filme D7 em um par. O sistema da GEIT tendeu a uma resolução geral de $100\mu\text{m}$, apresentando resultados melhores (par 11D) em algumas imagens do CP3 e para o CP1, no caso do uso do cassete sem chumbo. Observou-se que as telas de chumbo frontais prejudicaram a SR_b do sistema em aproximadamente 1 par de fios. Este comportamento é coerente com experiências anteriores reportadas na literatura [36]. De acordo com Beckmann et al., a camada protetora das *imaging plates*, de $10\mu\text{m}$ de espessura aproximadamente, distorce o efeito intensificador das telas de chumbo. Finalmente, mesmo a técnica convencional não atingiu os requisitos de resolução para classe B para a maior parte das radiografias (vide Tabela IX).

O sistema Dürr, escâner HDCR35 e novas *blue* IPs, foi classificado como apresentando resolução básica espacial igual a $40\mu\text{m}$, e ainda assim, conforme exposto, seria equivalente a filmes classe II. Este resultado mostra que além de fatores geométricos, o ruído estrutural das IPs interfere na resolução, além de limitar os valores de SNR_N atingíveis.

Destaca-se que os valores de distância fonte detector adotados nos experimentos foram superiores ao que se observa na prática usual de campo, onde o razoável tem sido a faixa de 700mm.

Sensibilidade ao Contraste e Relação Sinal Ruído Normalizada (SNR_N)

Em relação à sensibilidade ao contraste, os requisitos de classe B foram atingidos para a RC com valores de kV e exposição inferiores àqueles da radiografia convencional. O atendimento ao ASME V foi muito mais imediato, tendo sido observadas maiores dificuldades apenas para o CP mais espesso (CP3) (vide figura 4.1 e Tabelas X a XIV). Quanto à SNR_N , os sistemas de RC utilizados superaram as exigências normativas mesmo para baixos valores de kV ou exposição. Uma observação interessante quanto a estes dois parâmetros em conjunto, foi que a SNR_N das imagens aumentou constantemente com o aumento da exposição ou kV da radiação, ao contrário da sensibilidade ao contraste, que não evoluiu da mesma forma (figura 4.1 e Tabelas X a XIV). As leituras tenderam a uma resposta constante de fios lidos, a partir de um determinado valor de exposição/kV.

As diferenças entre as fontes de radiação, neste caso, refletiram-se apenas em valores ligeiramente maiores de SNR_N nas imagens obtidas com uso do tubo YXlon, bem

como na observação de um fio a mais em termos de contraste (CPs 3,4 e 5 – vide Tabela XVII). A evolução do contraste na imagem seguiu a mesma tendência observada com o tubo de raios X Seifert (Tabelas XV e XVI).

Outra observação importante, é que os valores de sensibilidade ao contraste atingidos pela RC não superaram aqueles atingidos pelos filmes convencionais. Os experimentos mostraram que o aumento progressivo da dose não trouxe um ganho contínuo, havendo ainda o efeito do ruído estrutural das placas de fósforo, o qual limita os valores possíveis de SNR_N antes da saturação (vide Tabela X).

Detectabilidade

A avaliação das imagens foi feita com auxílio de filtros e ajustes de contraste e brilho. Não foram utilizados programas de segmentação e classificação de defeitos, assim como os mesmos não foram dimensionados para comparação. O critério baseou-se no fato de que as imagens obtidas por RC deveriam apresentar as mesmas indicações observadas nos filmes industriais utilizados. Procedeu-se então à análise visual em comparação com as radiografias convencionais.

Os resultados mostraram que os diferentes sistemas parecem exibir diferentes limiares de SNR_N para garantir equivalência com os filmes convencionais (vide Tabelas XVIII a XXII). As figuras 4.22 a 4.28 também mostram que a detectabilidade foi melhorada com aumentos de exposição/kV, evidenciando que a promessa da redução do tempo de exposição ou da área de balizamento com emprego de RC não necessariamente ocorrerá.

Apesar dos resultados terem seguido a mesma tendência quanto a um limiar comum de SNR_N para detectabilidade em cada sistema, os corpos de prova apresentam defeitos distintos em natureza, dimensões e complexidade, tendo havido, por isso, variações localizadas na equivalência de detectabilidade, mesmo para CPs de dimensões análogas (vide Tabela XXIII).

Para o arranjo radiográfico montado, o sistema HDCR35+IP*blue* Dürr apresentou um limiar de SNR_N da ordem de 300, satisfeitas certas condições de energia de radiação (kV), enquanto que para o sistema CR^XTower+IPS GEIT o limiar foi da ordem de 200. Este sistema apresentou melhor desempenho na detectabilidade que o de alta definição, por

necessitar de menor exposição/kV e menores valores de SNR_N , embora exiba os defeitos com menor nitidez, o que se deve a sua resolução espacial. Para ambos os casos, estes limiares também são relacionados ao ganho do tubo fotomultiplicador, sofrendo alterações se este valor for modificado.

O sistema GEIT apresenta resolução básica espacial de 100 e 80 μ m, a depender da direção na qual a medida é realizada. Na classificação, o valor de 100 μ m é reportado, pois os sistemas sempre são caracterizados pelo pior valor de resolução atingido. Existem outros sistemas de RC disponíveis no mercado que atingem estes mesmos valores de resolução, e são igualmente capazes de prover níveis de SNR_N satisfatórios à detecção equivalente. Em função disto, com base no desempenho do escâner CR^XTower e placas IPS, recomenda-se que para inspeção de soldas os sistemas de RC tenham resolução máxima de 100 μ m. Talvez esta resolução seja insatisfatória para a inspeção de tubos ou chapas de espessura penetrada muito fina (inferior a 5mm) ou para materiais mais leves (como alumínio), mas aplicar-se-á a maioria dos casos encontrados na indústria do petróleo na inspeção de componentes de aço.

O emprego do tubo YXlon proporcionou uma melhoria às condições de detectabilidade do sistema Dürr, por possibilitar que a detectabilidade equivalente fosse atingida em condições mais otimizadas de kV/exposição (vide Tabela XXIII), mas o limiar de SNR_N de 300 foi mantido. Esta fonte, como já mencionado, possibilitou que as imagens atingissem maiores valores de SNR_N em comparação com o tubo Seifert, e o pequeno tamanho focal, certamente, contribuiu para melhores resultados. Destaca-se aí o efeito da fonte no desempenho de sistemas de RC. Para o sistema GEIT, como foram feitas poucas exposições, não se obtiveram os valores mínimos de kV/exposição necessários, havendo apenas a confirmação ou não do atendimento face aos parâmetros utilizados. No entanto, acredita-se que o desempenho seria prejudicado se o tubo Seifert fosse utilizado com este sistema.

As amostras de maior espessura, denominadas de CPs3 (22,14mm de espessura penetrada), representaram uma limitação a RC para os dois sistemas. Embora tenham sido detectados alguns defeitos (vide figura 4.25), a qualidade de imagem não foi satisfatória, o que se observou através do excesso de ruído e da impossibilidade de se obter imagens

equivalentes com a radiografia convencional, mesmo com altos valores de energia e/ou exposição.

O corpo de prova denominado CP5-1B representou uma exceção para o sistema Dürr, devido ao fato de apresentar um único defeito relevante e de comprimento considerável. Em virtude disto, a detectabilidade foi atingida para menores valores de energia e exposição que os observados nas demais amostras ($SNR_N > 120$). Porém, mesmo este resultado mostra que os valores de SNR_N exigidos por norma (>70 , para equivalência com filme classe II) são inferiores ao necessário.

Em comunicação pessoal feita pelo Dr Uwe Ewert, foi alertado que os valores de SNR_N presentes na norma europeia deveriam ser multiplicados por um fator igual a 3, pois se referem a medições sobre o cordão de solda. Como a relação sinal ruído é medida na área de interesse do metal base, este incremento seria necessário para se garantir o atendimento às condições mínimas de qualidade. Assim sendo, os requisitos então seriam como apresentado na Tabela XXVII, a qual apresenta valores mais coerentes.

Tabela XXVII– Correção dos valores de SNR_N

Classes de Sistema				SNR
ISO 11699-1	Europa CEN 584-1	EUA ASTM E1815-01	Japão K7627-97	
T1	C1	Special	T1	390
	C2			351
T2	C3	I	T2	234
	C4			195
T3	C5	II	T3	156
T4	C6	III	T4	129

Não se observou distinção no desempenho geral dos sistemas de RC na validação, quando o filme era classe II ou I; as vantagens/pontos fracos dos sistemas se mantiveram. Também não foram observadas falsas indicações por parte da RC, e nem indicações que os filmes não houvessem detectado.

O emprego da tela frontal de chumbo prejudicou a resolução do sistema GEIT em um par de fios duplos, reduziu o valor da SNR_N atingida sob as mesmas condições de teste, mas não alterou a sensibilidade ao contraste. Como um efeito oposto, melhorou a

detectabilidade dos defeitos e garantiu a equivalência com a técnica convencional sob condições de menor exposição/kV. Porém, novamente, os defeitos não foram tão bem definidos quanto nas condições em que se tem melhor resolução.

Em relação à otimização possibilitada pelo emprego da RC, as tabelas XXV e XXVI mostraram que houve uma tendência geral de redução de energia necessária e tempo de exposição, mas, no entanto, houve condições nas quais a energia requisitada foi maior (CP2, sistema Dürr e tubo Seifert) ou não se atingiu equivalência (CP3). O sistema GEIT, por exemplo, proporcionou uma redução de exposição de até 63% em comparação com a técnica convencional (CP5). Esta otimização proporcionada pela RC também é viabilizada pela ausência de parâmetros de avaliação que realmente garantam a detectabilidade equivalente. Observou-se que os defeitos existentes, em função de sua natureza distinta, apresentam diferentes probabilidades de detecção por parte dos sistemas de RC, o que interfere nestas conclusões. A radiografia convencional, tradicionalmente, precisa atingir requisitos de contraste e densidade ótica muito bem estabelecidos, e uma consideração análoga ainda não parece se adequar a radiografia computadorizada.

Conforme mencionado no item 1.1 do capítulo 1, as amostras investigadas neste trabalho haviam sido radiografadas por empresas prestadoras de serviço durante a fase 1 do projeto Petrobras. As imagens apresentadas pelas prestadoras foram comparadas com as imagens obtidas pela radiografia convencional e esta comparação confirmou o fato de que exposições curtas, as quais são refletidas nos valores de SNR_N , não possibilitam a obtenção de resultados equivalentes em termos de detectabilidade. Ressalta-se, no entanto, que as fases 1 e 2 do projeto não contemplaram a comparação com radiografia convencional.

A figura 5.1 mostra radiografias obtidas por três dos sistemas de RC empregados no projeto: Kodak (escâner ACR2000i e IPHR), Dürr (escâner HDCR35 e IPblue) e GE (escâner CR50P e IPS). Em 5.1(a) tem-se uma imagem do CP1-1A através do sistema Kodak, com emprego de tubo Comet (foco de 1,5mm): $Dfd=760mm$, 150kV e 17,6mA.min. A imagem em 5.1(b) corresponde ao CP1-2A, gerada pelo sistema Dürr. A empresa não informou sobre o tubo de raios X utilizado, energia de radiação, exposição ou distância fonte detector. Em 5.1(c) tem-se o resultado com emprego do sistema GE para o CP3-1A: tubo Seifert Eresco (foco IEC=1mm), $Dfd=700mm$, 150kV e 20mA.min. Para os três exemplos ilustrados na figura, os valores de SNR_N foram baixos em comparação com o

que se observou nos experimentos conduzidos neste trabalho (85, 156 e 179, respectivamente). Do mesmo modo, a detectabilidade não se mostrou satisfatória, apesar de os valores de tensão adotados terem sido coerentes com aqueles que apresentaram melhor desempenho (exceto para o CP3). Isto indica que a dose deveria ser aumentada, o que se refletiria em um maior tempo de exposição.

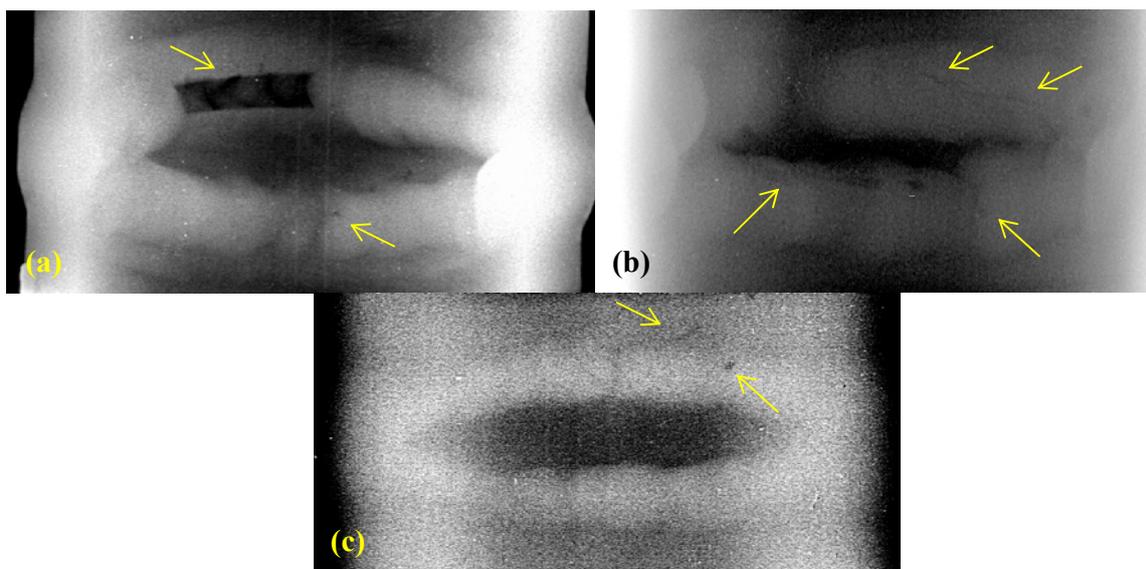


Figura 5.1– Radiografias apresentadas pelas empresas prestadoras de serviço na fase 1 do projeto Petrobras: (a)CP1-1A, sistema Kodak, contraste W13, $SR_b= 10D$ e $SNR_N=85$; (b)CP1-2A, sistema Dürr, contraste 15-1T, $SR_b= 12D$ e $SNR_N=156$; e (c)CP3-1A, sistema GE, contraste W11, $SR_b= 9D$ e $SNR_N=179$.

Manuseabilidade

Como observações específicas de cada sistema, as placas azuis da Dürr mostraram-se muito sensíveis ao manuseio, tendo apresentado vários arranhões após poucas exposições. As placas IPS apresentaram problemas de apagamento, logo no início dos testes, tendo criado a necessidade de várias novas tentativas, devido ao efeito fantasma de imagens remanescentes. O escaneamento também gerou artefatos nas placas, os quais prejudicaram a análise em determinadas circunstâncias, podendo mesmo inutilizar rapidamente o detector. A figura 5.2 é apresentada para mostrar este efeito.

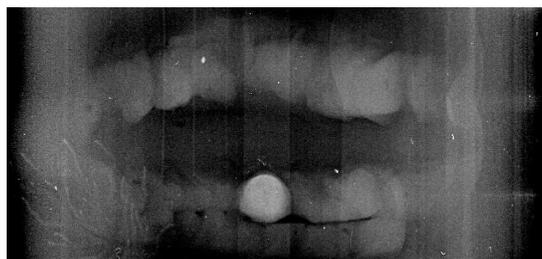


Figura 5.2– Sistema GEIT – efeito do uso sobre a IP: artefatos e marcas de apagamento. CP5-2B, tubo YXlon, Dfd=1200mm, 150kV, 25mA.min, contraste W14, $SR_b=10D$ e $SNR_N=207$.

Curvas de Exposição

A Tabela XXIII apresenta uma tentativa em se estabelecer os valores mínimos dos parâmetros de teste para que se obtenha detectabilidade equivalente para o sistema Dürr, com emprego do tubo Seifert. Porém, o exame das Tabelas XIX, XX, XXI e XXII revela que não foram exploradas todas as combinações viáveis de kV/exposição. Em vista das observações colhidas neste trabalho, conclui-se que as curvas deveriam ser traçadas considerando-se o atendimento às condições de detectabilidade equivalente.

Os CPs 1, 2 e 4 representam praticamente a mesma espessura penetrada (aproximadamente 10mm), enquanto que os CPs 3 e 5 representam valores maiores (22 e 15mm, respectivamente). Não se atingiu detectabilidade equivalente com o CP3, mesmo para valores elevados de energia, ao passo que as amostras CP5 apresentam defeitos de mais fácil detecção, possibilitando mais rapidamente a equivalência com a radiografia convencional. Por conta destes fatores, o traçado de curvas de exposição teria um aspecto bastante especulativo e, ainda, sem comprovação experimental. Devido à falta de exposições suficientes com o tubo YXlon, seja para o sistema Dürr, seja para o sistema GEIT, o levantamento de curvas de exposição também foi impossibilitado.

A indicação geral dada pelos resultados, mostrou que para uma faixa de espessura penetrada de aproximadamente 10mm, o mínimo valor de energia a ser adotado corresponderia a 140kV. Para espessuras acima de 20mm, a técnica de RC não seria recomendada para inspeção por PDVD.

Capítulo 6

Conclusões

Foram testados dois sistemas de radiografia computadorizada (RC): Dürr HDCR 35 com as novas placas azuis deste fabricante e CR^XTower e placas IPS da GEIT, na inspeção de tubos através da técnica de parede dupla vista dupla (PDVD). O efeito da fonte de radiação foi avaliado através do emprego de dois tubos de raios X: Seifert (foco de 3,5mm) e YXlon (foco de 1mm). Também foram feitos testes com emprego de cassetes com tela frontal de chumbo, no caso do sistema GEIT, para avaliar seus efeitos sobre as imagens obtidas.

As amostras testadas estão inseridas no projeto Petrobras de implantação da técnica de radiografia computadorizada na inspeção de soldas nas obras da empresa. Elas haviam sido previamente radiografadas por empresas prestadoras de serviço, utilizando sistemas de RC diferentes daqueles testados neste trabalho.

Os objetivos deste trabalho consistiram em analisar a qualidade das imagens em função de variações na energia de radiação e exposição, bem como comparar a detectabilidade dos sistemas de radiografia computadorizada com a dos filmes industriais na radiografia convencional.

A análise da qualidade das imagens baseou-se nos requisitos normativos vigentes na atualidade, expressos através das normas EN-14784 partes 1 e 2, ASTM 2446 e Petrobras N-2821. Os parâmetros avaliados foram resolução básica espacial (SR_b), sensibilidade ao contraste e relação sinal ruído normalizada (SNR_N).

O sistema Dürr, classificado como apresentando resolução básica espacial igual a $40\mu\text{m}$, mostrou-se equivalente a filmes classe II, não atendendo aos requisitos impostos pela normalização européia para inspeção de soldas (Classe B). O sistema GEIT, por apresentar o melhor valor de resolução igual a $80\mu\text{m}$, falha inclusive nos requisitos de Classe A, os quais são os adotados pela norma Petrobras. No entanto, mesmo a técnica convencional não atingiu os requisitos de resolução para classe B para a maior parte das radiografias, a não ser quando este parâmetro foi medido somente em relação ao arranjo, sem corpos de prova entre a fonte e o detector.

O emprego do tubo YXlon melhorou a resolução espacial em um par de fios duplos, seja para a radiografia convencional, seja para a computadorizada, mas o comportamento geral foi o mesmo descrito anteriormente.

Em relação à sensibilidade ao contraste, os requisitos mais rigorosos foram atingidos para a RC com valores de energia e exposição inferiores àqueles da radiografia convencional. Quanto à SNR_N , os sistemas de RC utilizados superaram as exigências normativas mesmo para baixos valores de energia ou exposição. Uma observação interessante quanto a estes dois parâmetros em conjunto, foi que a SNR_N das imagens aumentou constantemente com o aumento da exposição ou energia da radiação, ao contrário da sensibilidade ao contraste, que não evoluiu da mesma forma. As leituras tenderam a uma resposta constante de fios lidos, a partir de um determinado valor de exposição/kV.

As diferenças entre as fontes de radiação, neste caso, refletiram-se apenas em valores ligeiramente maiores de SNR_N nas imagens obtidas com uso do tubo YXlon, bem como na observação de um fio a mais em termos de contraste.

Outra ponto importante, é que os valores de sensibilidade ao contraste atingidos pela RC não superaram aqueles atingidos pelos filmes convencionais. Os experimentos mostraram que o aumento progressivo da dose não trouxe um ganho contínuo, havendo ainda o efeito do ruído estrutural das placas de fósforo, o qual limita os valores possíveis de SNR_N antes da saturação. Acredita-se também que este ruído, além da influência de fatores geométricos, interfira na resolução das IPs, de modo que a SR_b atingida por uma radiografia computadorizada sempre perde para a convencional por um par de fios, em filmes classe I.

No que se refere à detectabilidade de defeitos, o sistema GEIT, apesar da limitação em SR_b , obteve melhores resultados por ter atingido equivalência com a técnica convencional em condições de voltagem e exposição inferiores às do sistema Dürr. No entanto, os defeitos foram melhor resolvidos com este último, devido, obviamente, a sua melhor resolução.

O valor de SNR_N da ordem de 300 comportou-se como uma espécie de limiar de detectabilidade para o sistema Dürr, enquanto que para o sistema GEIT este valor foi da ordem de 200. Ressalta-se que estes valores são relacionados com o ganho no tubo fotomultiplicador do escâner, podendo se modificar com alterações impostas neste parâmetro. De qualquer modo, os valores mínimos de SNR_N exigidos por norma (superiores a 70 para classe I) mostram-se insuficientes para garantia da qualidade da imagem. Foi recomendado que os valores constantes nos padrões atualmente em vigor fossem aumentados por um fator igual a 3, em função de terem sido originalmente determinados para medidas executadas sobre os cordões de solda.

O emprego de telas frontais de chumbo prejudica a resolução da imagem e reduz a relação sinal ruído, mas não pareceu interferir na sensibilidade ao contraste, tendo melhorado a detectabilidade do sistema, pelo aumento do contraste na imagem, ou de outro modo, pelo aumento da relação contraste ruído.

Com base nestes resultados, poder-se-ia pensar que a resolução espacial é um parâmetro de pouca influência na detectabilidade e que os valores exigidos por norma estão muito rigorosos. De fato, a afirmação referente ao rigor normativo parece correta, mas em termos do efeito da resolução na detectabilidade não se deve desprezar o fato de que uma boa imagem digital é um compromisso entre contraste, definição e ruído. Os critérios de norma precisam ser revisados, mas não se pode abrir mão de sistemas de RC com qualidade e dedicados a prática industrial. Para inspeção de soldas com radiografia computadorizada, um valor limite de resolução aceitável para a maioria das situações encontradas na indústria do petróleo seria igual a $100\mu\text{m}$.

Espessuras penetradas superiores a 20mm representaram uma limitação na aplicação da RC na inspeção de soldas por PDVD.

Foi feita ainda uma comparação com os resultados obtidos pelas empresas contratadas do projeto Petrobras, e constatou-se que a detectabilidade equivalente não foi

atingida por conta dos baixos tempos de exposição adotados pelas empresas, embora os requisitos normativos estivessem parcial ou inteiramente satisfeitos. Isto confirmou a existência de limiares de detecção equivalente em sistemas de RC.

A detectabilidade melhorou continuamente com o aumento da dose, e a equivalência foi atingida para os valores de energia de radiação próximos àqueles utilizados para a radiografia convencional. Para os CPs de maior diâmetro ($\varnothing = 3''$) houve uma redução na energia necessária para que se atingisse detectabilidade equivalente. No que se refere à exposição, houve uma tendência geral de redução. O sistema GEIT, proporcionou uma redução de exposição de até 63% em comparação com a técnica convencional. Esta otimização proporcionada pela RC também é viabilizada pela ausência de parâmetros de avaliação que realmente garantam a detectabilidade equivalente. Observou-se que os defeitos existentes, em função de sua natureza distinta, apresentam diferentes probabilidades de detecção por parte dos sistemas de RC, o que interfere nestas conclusões. A radiografia convencional, tradicionalmente, precisa atingir requisitos de contraste e densidade ótica muito bem estabelecidos, e uma consideração análoga ainda não parece se adequar a radiografia computadorizada.

Não foi possível o levantamento de curvas de exposição para os sistemas de RC e fontes utilizados em função da maioria dos corpos de prova representarem espessuras da mesma ordem e da pequena estatística para o tubo YXlon. Os corpos de prova apresentam defeitos distintos em natureza, dimensões e complexidade, tendo havido, por isso, diferentes limiares de equivalência na detectabilidade, mesmo para CPs de dimensões análogas. Considera-se que a carta de exposição deve ser baseada em condições que garantam a detectabilidade equivalente, e não simplesmente no atendimento aos requisitos normativos

Como uma conclusão dos requisitos baseados em normas para radiografia computadorizada, constatou-se que seu simples atendimento não garante que as radiografias obtidas por este método sejam equivalentes àquelas obtidas pela técnica convencional em termos de detectabilidade. Mostrou-se que é necessário que se trabalhe com uma determinada combinação de tensão e exposição, para um dado arranjo radiográfico, a partir da qual a detectabilidade será equivalente. Esta condição parece se

revelar através de um limiar de SNR_N , o qual se mostrou característico de cada sistema de RC.

Por fim, observou-se que as radiografias obtidas com uso de filmes industriais ainda são muito melhores, em termos de resolução e contraste visual de imagem, que aquelas obtidas com RC. A nova técnica ainda necessita de aprimoramentos, o que também se reflete na fragilidade dos detectores e dificuldades que apresentam ao apagamento após um certo número de exposições.

A substituição da radiografia convencional pela radiografia computadorizada é viável, mas é necessário atentar para o cumprimento dos requisitos específicos de qualidade e detectabilidade desta técnica. Na atualidade, a radiografia convencional ainda apresenta qualidade superior à RC.

Capítulo 7

Este capítulo sugere temas para trabalhos futuros na área de pesquisas e experimentos com radiografia computadorizada:

- Estudo das condições de equivalência de detectabilidade entre as técnicas de RC e radiografia convencional para a determinação de parâmetros, de aplicação geral para todos os sistemas, capazes de expressar tal equivalência de desempenho;
- Estudo experimental da RC para testes com a técnica de PDVS (parede dupla vista simples);
- Estudos análogos aos descritos anteriormente mas com emprego de isótopos como fonte de radiação;
- Levantamento de curvas de exposição para diferentes sistemas de RC, de modo a garantir a detectabilidade equivalente com a radiografia convencional;
- Estudo sobre as relações existentes entre a tensão aplicada no tubo fotomultiplicador, intensidade linearizada do sinal, exposição e detectabilidade;
- Desenvolvimento de metodologias computacionais para a simulação de imagens radiográficas obtidas com radiografia computadorizada levando-se em consideração os efeitos do espalhamento, da atenuação e de penumbra.

Referências Bibliográficas

- [1] CULLITY, B.D.; “Elements of X-ray Diffraction”, Ed Addison-Wesley, 1959.
- [2] METALS HANDBOOK, DAVIS, J.R.; Desk Ed., 2nd Ed., ASM International, 1998.
- [3] ANDREUCCI, R.; “A Radiologia Industrial”, S.n., 2005, Disponível em: www.abende.org.br, Acesso em: 23 FEV. 2007.
- [4] KODAK – EASTMAN KODAK COMPANY, “Radiology in Modern Industry”, 4^a Ed., Rochester: Eastman Kodak Company, 1980.
- [5] AGFA-GEVAERT GROUP, “Industrial Radiography”, Ed. Birmann, 1981.
- [6] HALMSHAW, R; “Industrial Radiology - Theory and Practice”, 2^a Ed., Londres, Chapman&Hall, 1995.
- [7] HALMSHAW, R; “Industrial Radiography”, Ed Agfa NDT, Bélgica,1998.
- [8] LEITE, P., “Curso de Ensaio Não Destrutivos”, 4^a Ed., Associação Brasileira de Metais, São Paulo, 1973, p. 6.1-10.23.

- [9] TAKAHASHI, K.; “Progress in Science and Technology on Photostimulable BaFX:Eu²⁺ (X= Cl, Br, I) and Imaging Plates”, Journal of Luminescence, vol (100), pp 307-315, 2002.
- [10] ZSCHERPEL, U., EWERT, U.; “Computed Radiography”, IAEA Training Course on DIR, janeiro de 2006.
- [11] SEGGERN, VON H., “Photostimulable x-ray storage phosphors: a review of presents understanding”, Brazilian Journal of Physics, vol 29, n.2, 1999.
- [12] FUJIFILM, “Science Imaging Systems – What is Imaging Plates?”, Disponível em: <http://home.fujifilm.com/products/science/ip/index.html>, Acesso: 15 OUT. 2003.
- [13] EWERT, U., ZSCHERPEL, U. “Recent Trands in Digital Industrial Radiology”, In: National Seminar of ISNT, vol 12, pp. 1-14, 2002.
- [14] AGFA -GEVAERT GROUP, “Successfull Implementation of a Digital Radiographic System”, Disponível em : <http://ndt.agfa.com/BU/NDT/index.nsf/EN/radviewdigitalsystems.htm>, Acesso em: 02 MAR. 2003.
- [15] TAKAHASHI, K.; “Fuji Computed Radiography – Technical Review no.14 – Imaging Plate (IP)”, Disponível em: http://www.fujimed.com/sub/tech_review_14.pdf , Acesso em: 03 DEZ 2003.
- [16] DITABIS, “DITABIS Imaging Plate Tecnology for all Applications in TEM”, Disponível em: <http://www.ditabis.com>, Acesso em: 17 NOV. 2005.

[17] SEIBERT, J.A. et al; “Acceptance Testing and Quality Control of Photo Stimulable Imaging Systems”, AAPM – Report of Task Group #10, American Institute of Physics, Inc., Woodbury, NY. 1997.

[18] EWERT, U., ZSCHERPEL, U., BAVENDIEK, K.; “Replacement of Film Radiography by Digital Techniques and Enhancement of Image Quality”, In: Proceedings of NDE 2005, National Seminar of Indian Society for NDT, Kalkutta, Índia, Decembre 2005.

[19] RABELLO, J.M.B., “Utilização da Técnica de Radiografia Computadorizada na Inspeção de Soldas Circunferenciais”, In: Proceedings of IV Conferencia Panamericana de Ensayos No Destructivos - PANDT, Buenos Aires, Oct 2007.

[20] BSI BS EN 14784 - Non-Destructive Testing – Industrial Computed Radiography with Storage Phosphor Imaging Plates – Part 1: Classifications of Systems, -2: General Principles for Testing of Metallic Materials Using X-Rays and Gamma Rays, 2005.

[21] BSI EN 462-5 - Non Destructive Testing – Image quality of radiographs – Part 5: Image Quality Indicators (Duplex Wire Type), Determination of Image Unsharpness Value, 1996.

[22] MARINHO, C.A., RABELLO, J.M.B., MELLO, M.A., IGUCHI, E.T., LOPES, R.T., OLIVEIRA, D.F.; “Radiografia Computadorizada – O Estado-da-Arte”, Revista Abende, ano IV, nº 23, dezembro, 2007.

[23] NORMA PETROBRAS N-2821 – Ensaio Não Destrutivo Radiografia Computadorizada de Juntas Soldadas, 2007.

[24] ASTM 2446 - Standard Practice for Classification of Computed Radiology Systems, 2005.

[25] OLIVEIRA, D.F, SIMÕES, H.R., SILVA, A.S.S., MOREIRA, E.V., CAMARGO, J.R., LOPES, R.T., “**Influência do Ganho da Fotomultiplicadora na Qualidade de Imagem para Altas Energias em RC**”, In: Proceedings of CONAEND&IEV 2008, Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção, São Paulo, junho de 2008.

[26] ASTM 2445 - Standard Practice for Qualification and Long-Term Stability of Computed Radiology Systems, 2005.

[27] BSI EN- 444 - Non-Destructive Testing - General Principles for Radiographic Examination of Metallic Materials by X- and Gamma-Rays, 1994.

[28] BSI EN-1435 - Non-Destructive Testing of Welds Radiographic Testing of Welded Joints, 1997.

[29] ISO 5579 - Non-Destructive Testing - Radiographic Examination of Metallic Materials by X- and Gamma-Rays - Basic Rules Second Edition, 1998.

[30] ASTM E-1032 - Standard Test Method for Radiographic Examination of Weldments, 2006.

[31] ASTM E-1742 - Standard Practice for Radiographic Examination, 2006.

[32] NORMA PETROBRAS N-2820 – Ensaio Não Destrutivo Radiografia Computadorizada para Detecção de Corrosão, 2007.

[33] ZSCHERPEL, U.; Consulta pessoal ao Dr. Uwe Zscherpel, especialista em radiografia do instituto alemão BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und –Prüfung), durante a realização do curso Advanced Computed Radiography, Rio de Janeiro, março de 2007.

[34] MARINHO, C.A., RABELLO, J.M.B., MELLO, M.A., IGUCHI, E.T., LOPES, R.T., OLIVEIRA, D.F.; “Radiografia Computadorizada na Inspeção de Soldas”, In: Proceedings of CONAEND&IEV 2008, Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção, São Paulo, junho de 2008.

[35] PATEL, R.J.; “Digital Applications of Radiography”, In: Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition – MENDT, , Bahrain, 2005.

[36] BECKMANN J., RACHNY S., ZSCHERPEL U., EWERT U., “Improved Procedure for Computed Radiography – A Comparative Study on Weld Tube Sections by Film Radiography and Computed Radiography”, In: Proceedings of 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China, Oct 2008.

[37] ISO 17636 - Non-Destructive Testing of Welds -Radiographic Testing of Fusionwelded Joints, 2003.

[38] EN426-1 - Non-destructive testing. Image quality of radiographs. Part 1 : image quality indicators (wire type), determination of image quality value, 1994.

[39] NORMA PETROBRAS N-1738 – Descontinuidades em Juntas Soldadas, Fundidos, Forjados e Laminados, 2003.

Apêndice A

Publicações originadas nesta dissertação

MARINHO, C.A., LOPES, R.T., REBELLO, J.M.A.; “Film Replacement by Digital Techniques Applied to Weld Inspection”, Trabalho Submetido a Revista Materials Evaluation, em fase de avaliação.

MARINHO, C.A., LOPES, R.T., RABELO, J.M.A.; “Substituição da Radiografia Convencional por Técnicas de Radiografia Digital na Inspeção de Soldas”, Trabalho a ser Apresentado na COTEQ 2009, Conferência Internacional sobre Tecnologia de Equipamentos, maio de 2009, Salvador.

MARINHO, C.A., RABELLO, J.M.B., MELLO, M.A., IGUCHI, E.T., LOPES, R.T., OLIVEIRA, D.F.; “Radiografia Computadorizada na Inspeção de Soldas”, In: Proceedings of II CIM-Petrobras, 2º Congresso de Confiabilidade, Manutenção e Inspeção da Petrobras, julho de 2008, Rio de Janeiro.

MARINHO, C.A., RABELLO, J.M.B., MELLO, M.A., IGUCHI, E.T., LOPES, R.T., OLIVEIRA, D.F.; “Radiografia Computadorizada na Inspeção de Soldas”, In: Proceedings of CONAEND&IEV 2008, Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção, junho de 2008, São Paulo.

MARINHO, C.A., RABELLO, J.M.B., MELLO, M.A., IGUCHI, E.T., LOPES, R.T., OLIVEIRA, D.F.; “Radiografia Computadorizada – Realidades e Mitos, In: Proceedings of

COTEQ 2007, Conferência Internacional sobre Tecnologia de Equipamentos, junho de 2007, Salvador.

MARINHO, C.A., RABELLO, J.M.B., MELLO, M.A., IGUCHI, E.T., LOPES, R.T., OLIVEIRA, D.F.; “Radiografia Computadorizada – O Estado-da-Arte”, Revista Abende, ano IV, nº 23, dezembro, 2007.

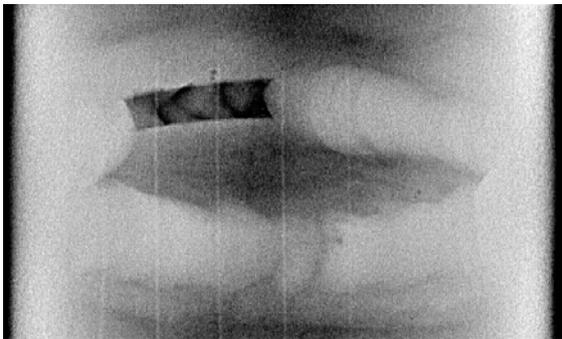
MARINHO, C.A., CAMERINI, C.S., LOPES, R.T.; “Gamma Ray Operated by Divers for Underwater Inspection”, In: Proceedings of 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China, Oct 2008.

Apêndice B

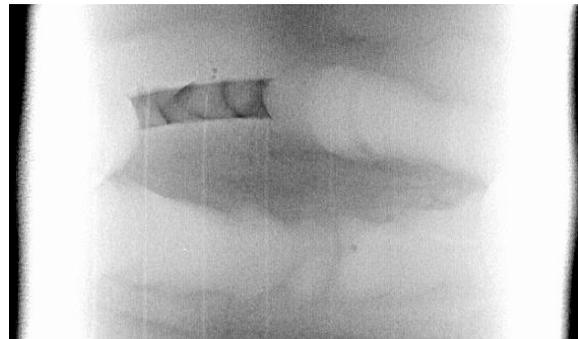
Este apêndice apresenta as imagens radiográficas, radiografias computadorizadas ou filmes escaneados, que foram referenciadas no texto e não estão inseridas no corpo da dissertação.

Corpo de prova CP1-1

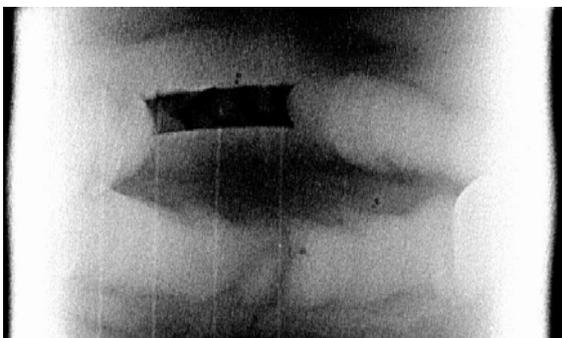
Sistema Dürr e tubo Seifert



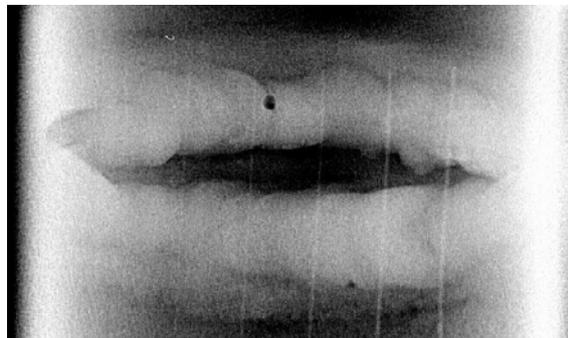
CP1-1A 120kV e 20mA.min



CP1-1A 140kV e 10mA.min



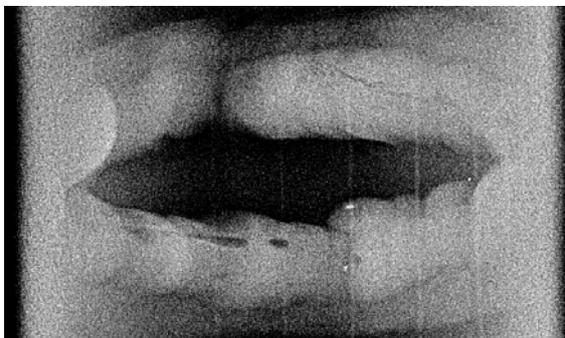
CP1-1A 140kV e 15mA.min



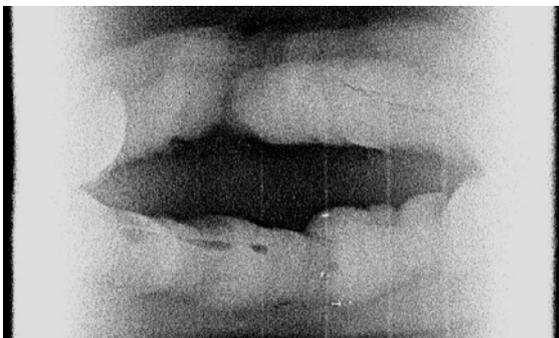
CP1-1B 140kV e 15mA.min

Corpo de prova CP1-2

Sistema Dürr e tubo Seifert



CP1-2A 120kV e 5mA.min



CP1-2A 120kV e 10mA.min



CP1-2A 120kV e 15mA.min



CP1-2A 120kV e 25mA.min



CP1-2A 120kV e 40mA.min



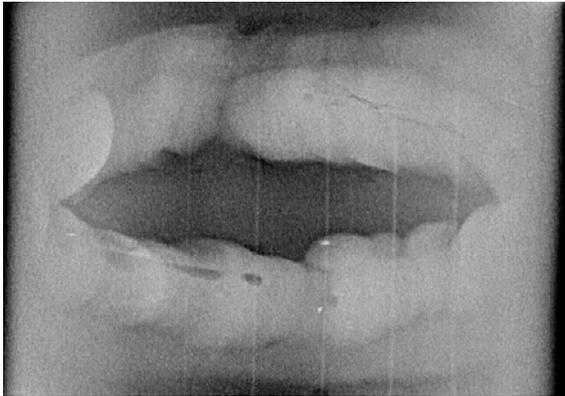
CP1-2A 120kV e 80mA.min



CP1-2A 130kV e 5mA.min



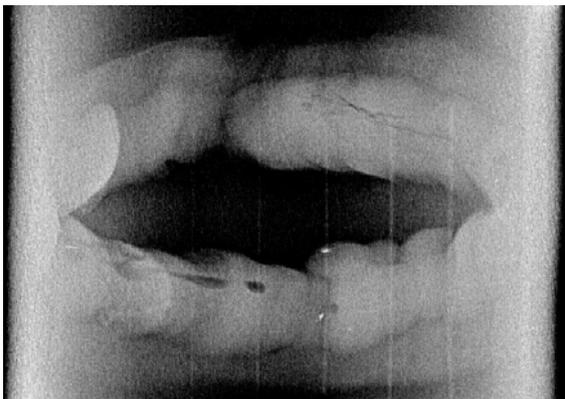
CP1-2A 130kV e 10mA.min



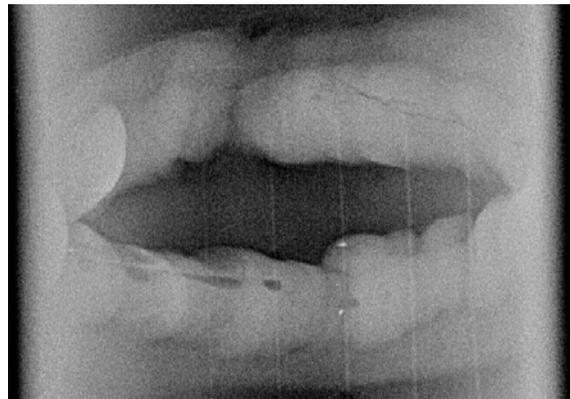
CP1-2A 130kV e 20mA.min



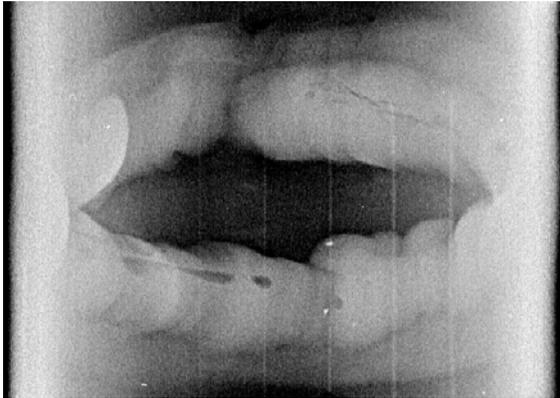
CP1-2A 130kV e 25mA.min



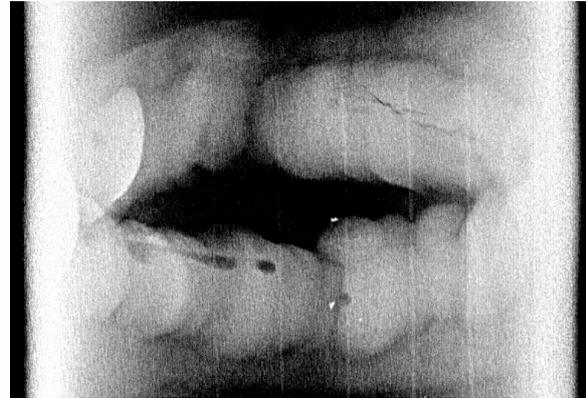
CP1-2A 130kV e 40mA.min



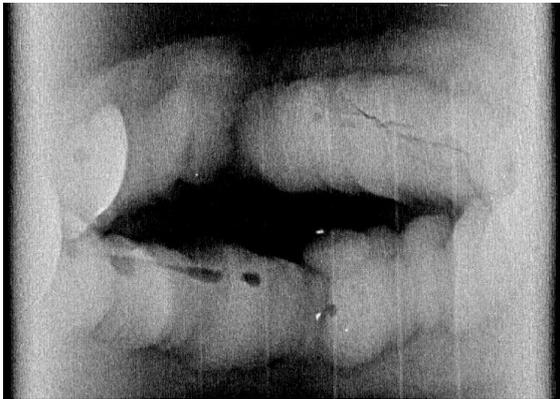
CP1-2A 140kV e 10mA.min



CP1-2A 140kV e 20mA.min



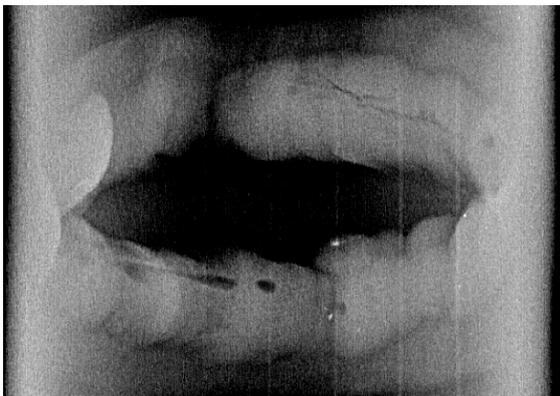
CP1-2A 140kV e 25mA.min



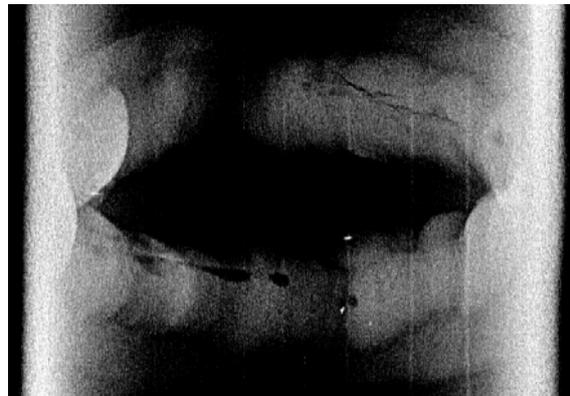
CP1-2A 140kV e 35mA.min



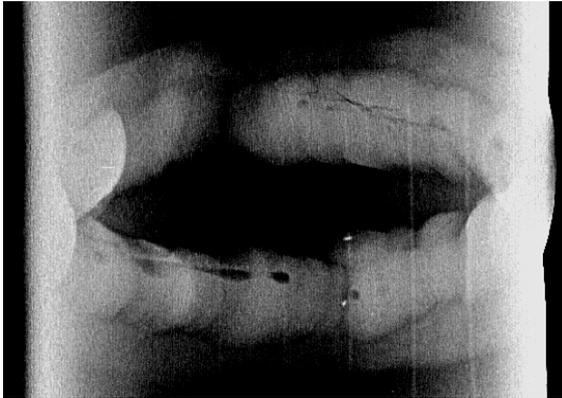
CP1-2A 150kV e 5mA.min



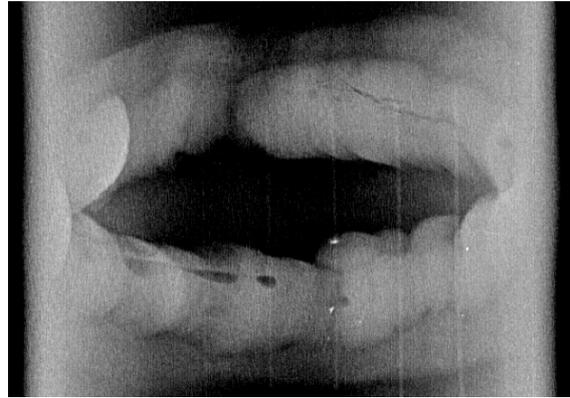
CP1-2A 150kV e 10mA.min



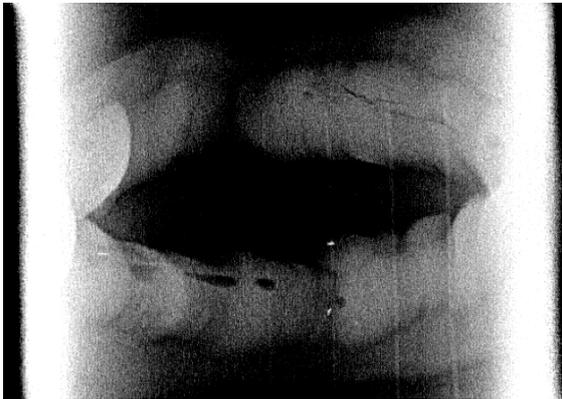
CP1-2A 150kV e 15mA.min



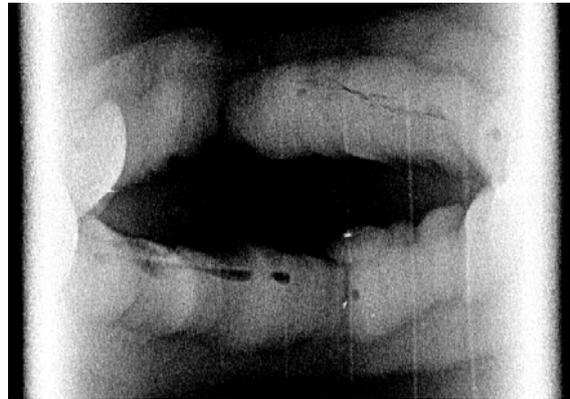
CP1-2A 150kV e 25mA.min



CP1-2A 150kV e 35mA.min



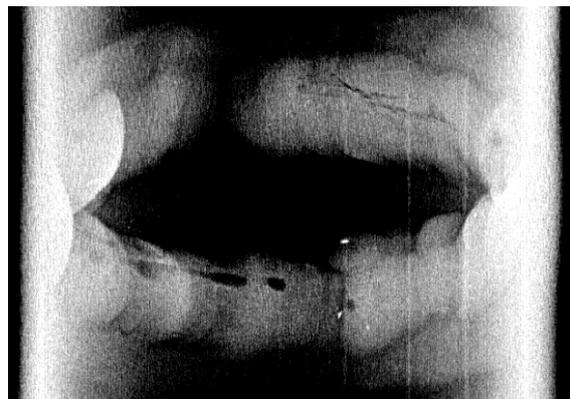
CP1-2A 160kV e 5mA.min



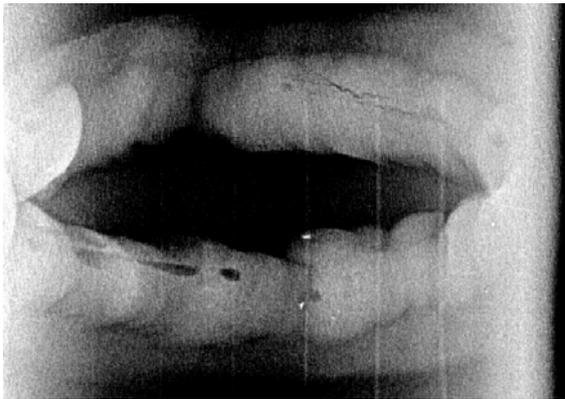
CP1-2A 160kV e 10mA.min



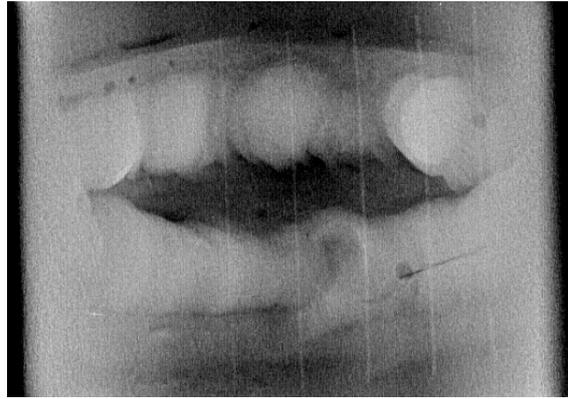
CP1-2A 160kV e 15mA.min



CP1-2A 160kV e 20mA.min



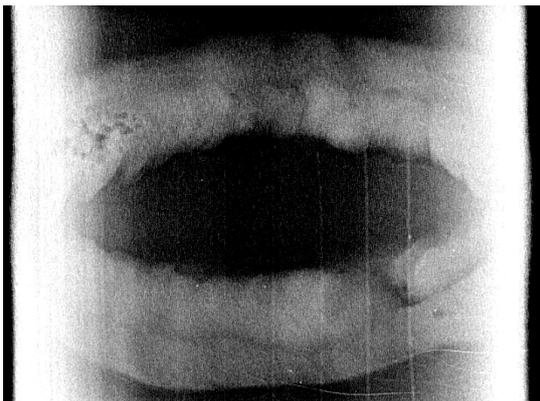
CP1-2A 160kV e 25mA.min



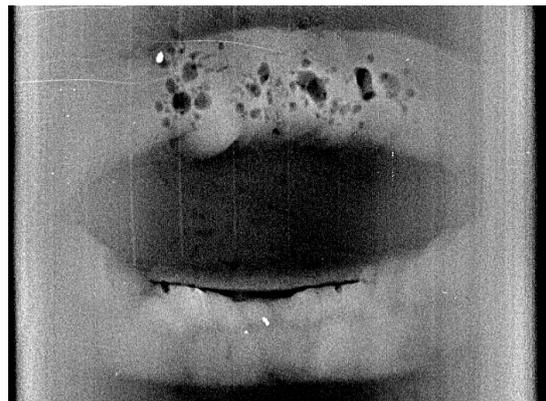
CP1-2B 120kV e 40mA.min

Corpo de prova CP2-1

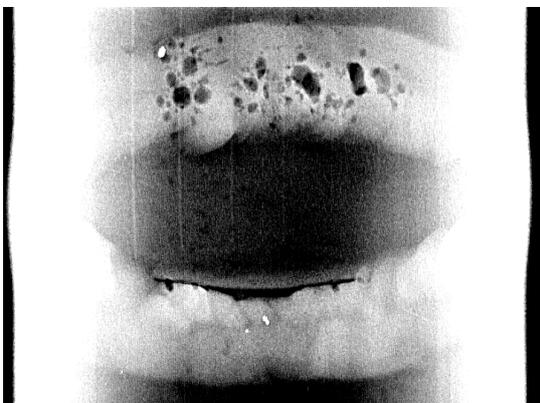
Sistema Dürr e tubo Seifert



CP2-1A 150kV e 15mA.min



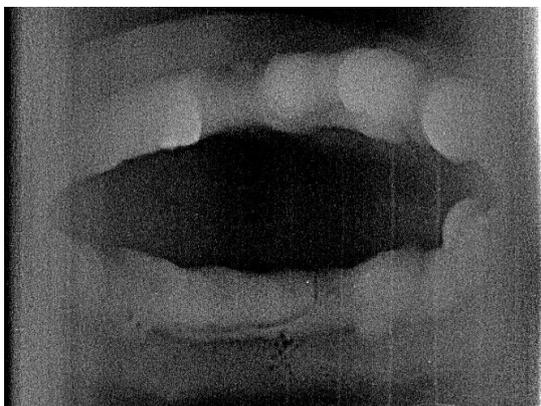
CP2-1B 120kV e 20mA.min



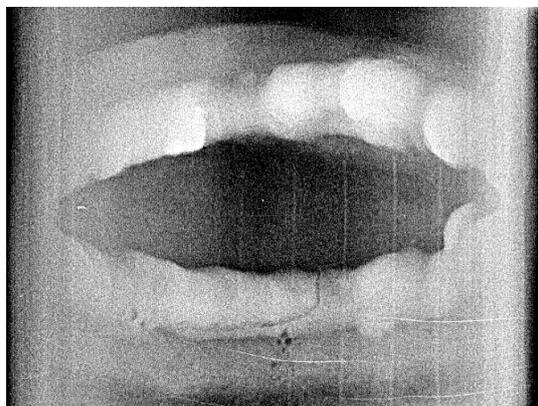
CP2-1B 150kV e 20mA.min

Corpo de prova CP2-2

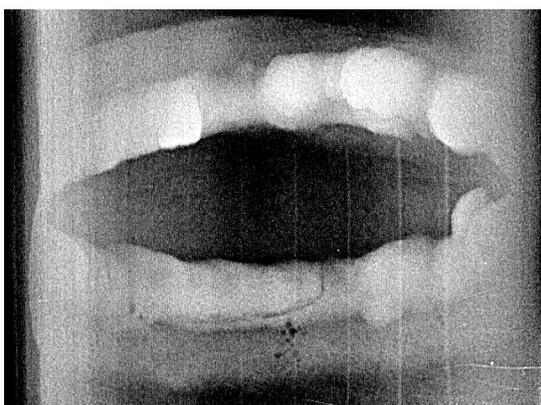
Sistema Dürr e tubo Seifert



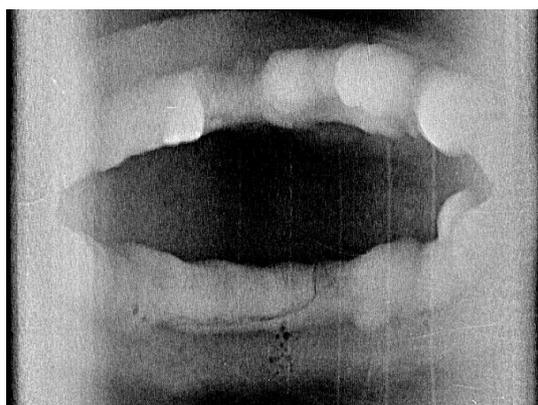
CP2-2A 120kV e 10mA.min



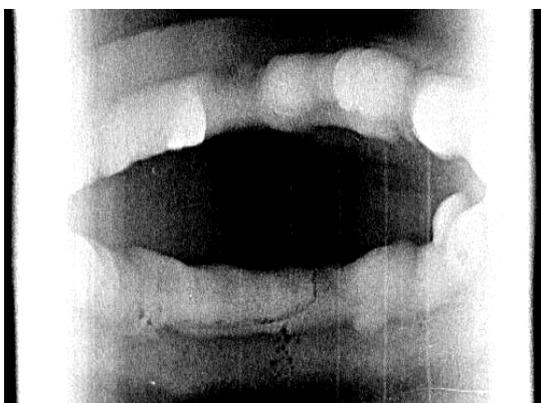
CP2-2A 120kV e 15mA.min



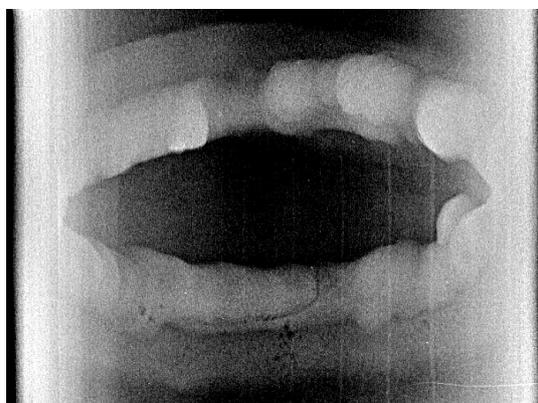
CP2-2A 120kV e 30mA.min



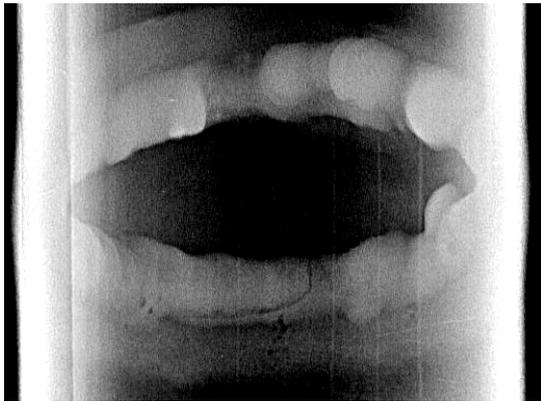
CP2-2A 130kV e 40mA.min



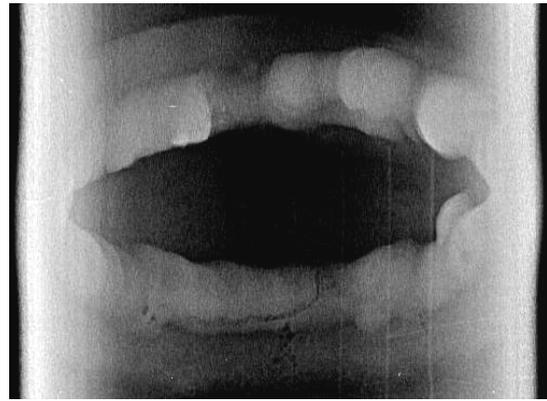
CP2-2A 150kV e 15mA.min



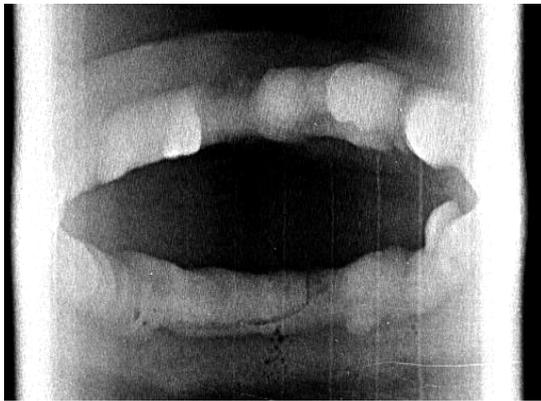
CP2-2A 160kV e 5mA.min



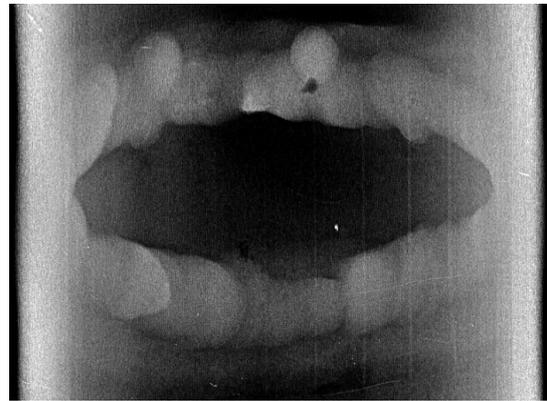
CP2-2A 160kV e 10mA.min



CP2-2A 160kV e 15mA.min



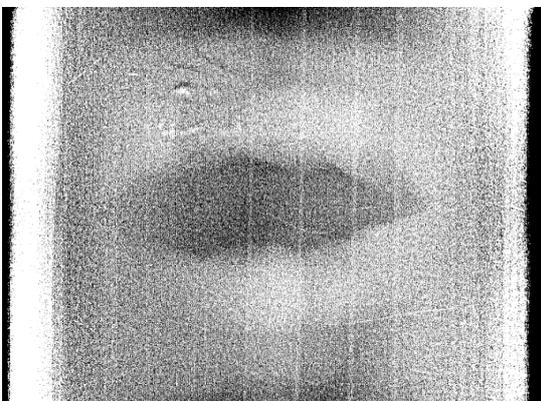
CP2-2A 160kV e 25mA.min



CP2-2B 150kV e 15mA.min

Corpo de prova CP3-1

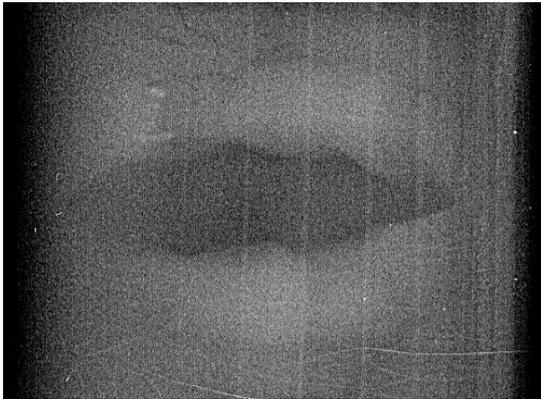
Sistema Dürr e tubo Seifert



CP3-1A 150kV e 20mA.min



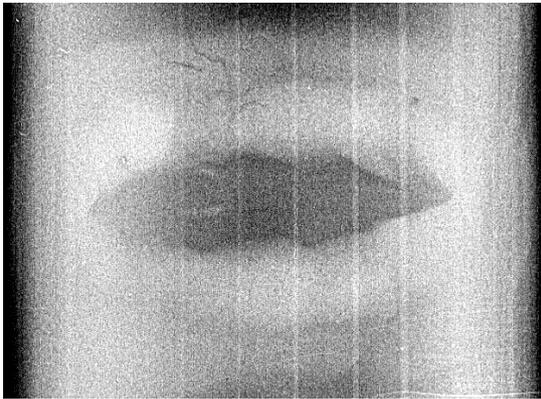
CP3-1A 160kV e 15mA.min



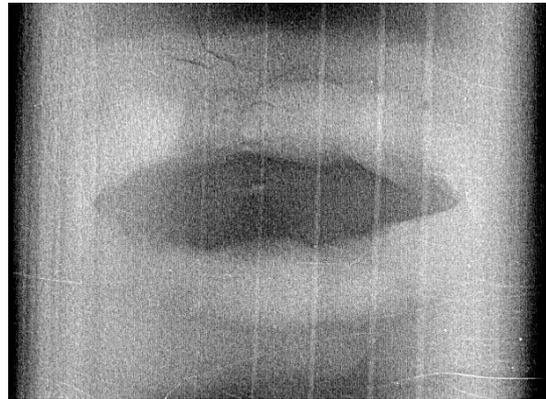
CP3-1A 160kV e 20mA.min



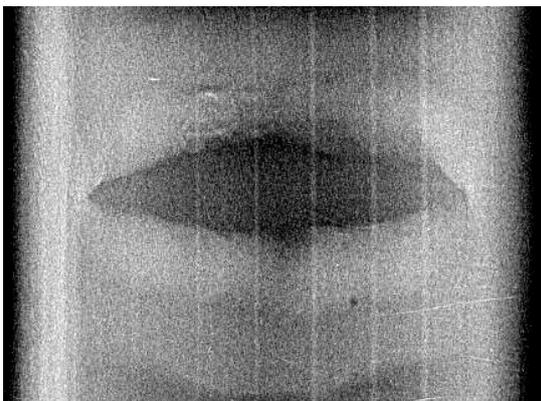
CP3-1A 160kV e 30mA.min



CP3-1A 210kV e 10mA.min



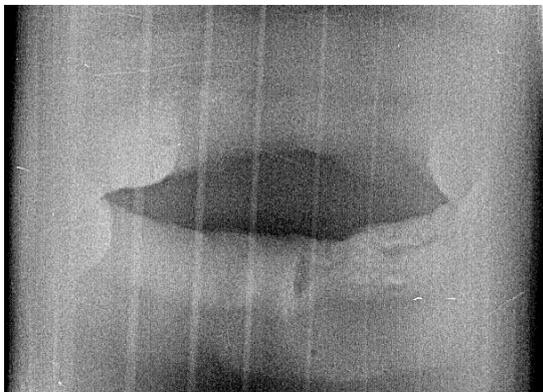
CP3-1A 210kV e 30mA.min



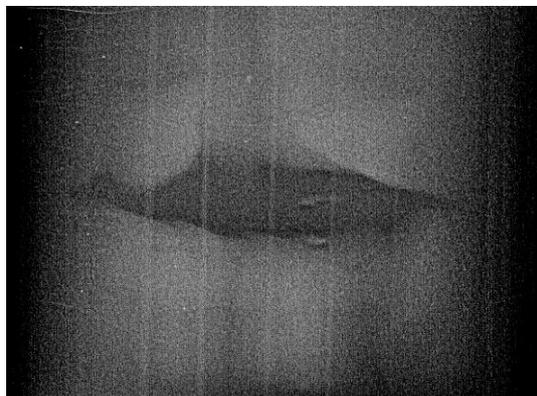
CP3-1A 210kV e 10mA.min

Corpo de prova CP3-2

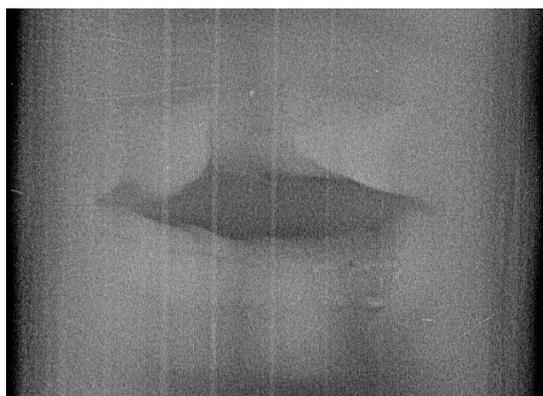
Sistema Dürr e tubo Seifert



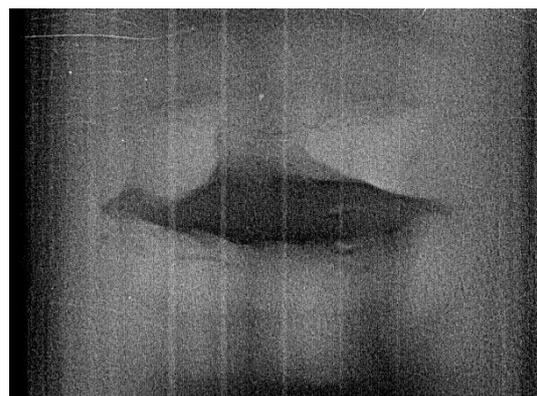
CP3-2A 210kV e 10mA.min



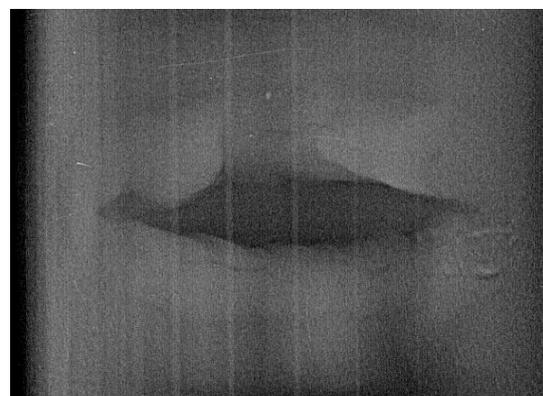
CP3-2B 150kV e 30mA.min



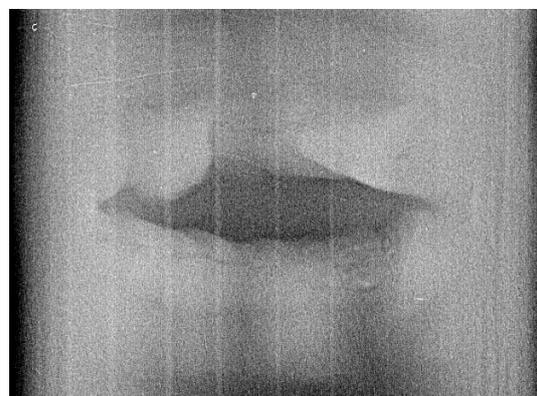
CP3-2B 180kV e 15mA.min



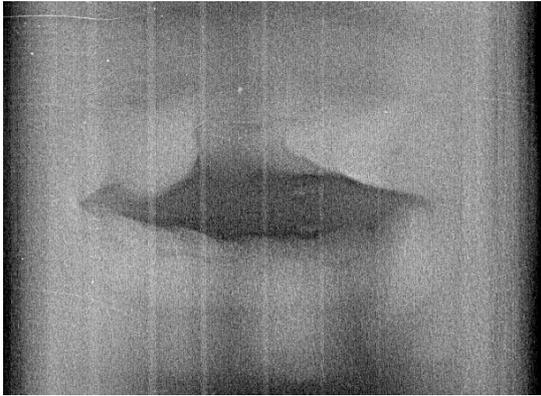
CP3-2B 180kV e 20mA.min



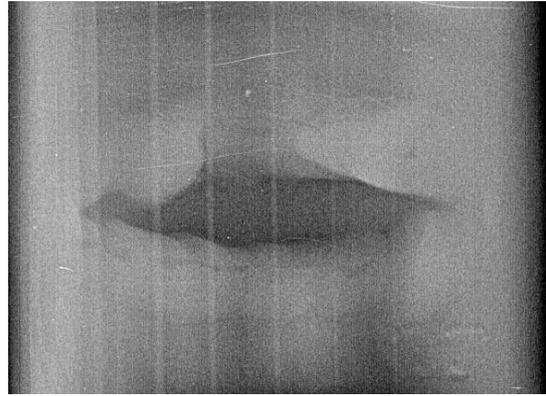
CP3-2B 180kV e 30mA.min



CP3-2B 210kV e 10mA.min



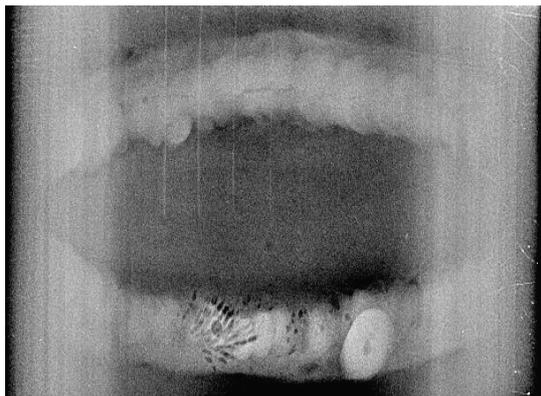
CP3-2B 210kV e 15mA.min



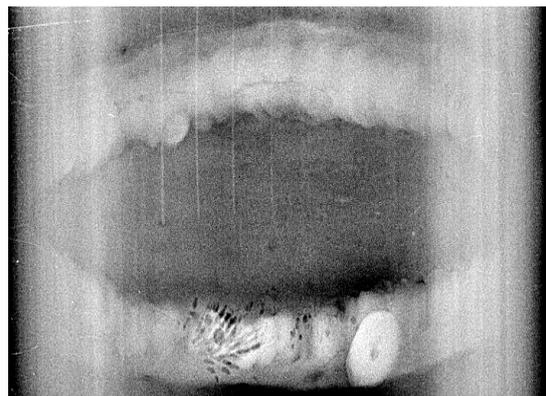
CP3-2B 210kV e 20mA.min

Corpo de prova CP4-1

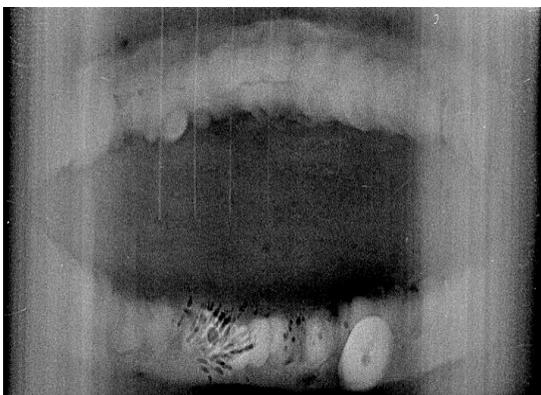
Sistema Dürr e tubo Seifert



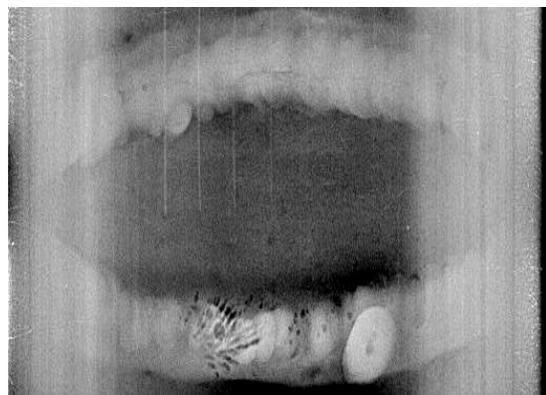
CP4-1A 130kV e 10mA.min



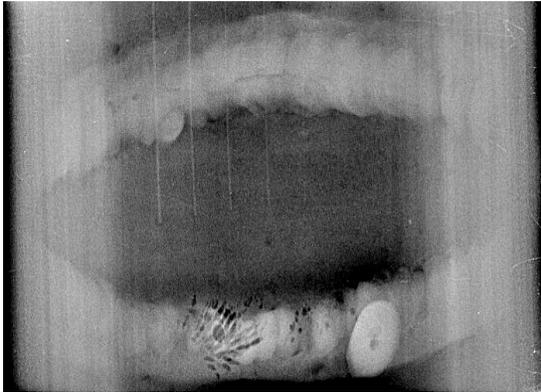
CP4-1A 130kV e 15mA.min



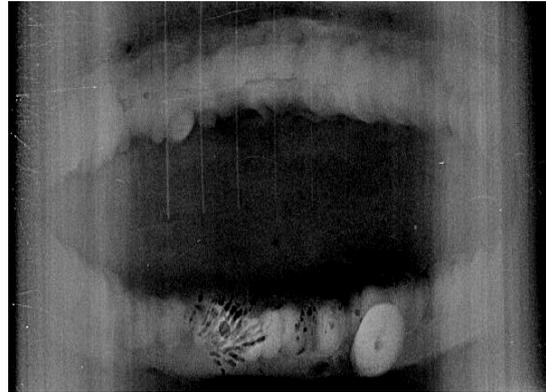
CP4-1A 130kV e 20mA.min



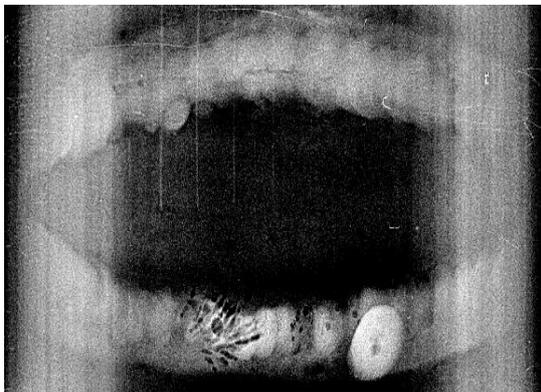
CP4-1A 130kV e 25mA.min



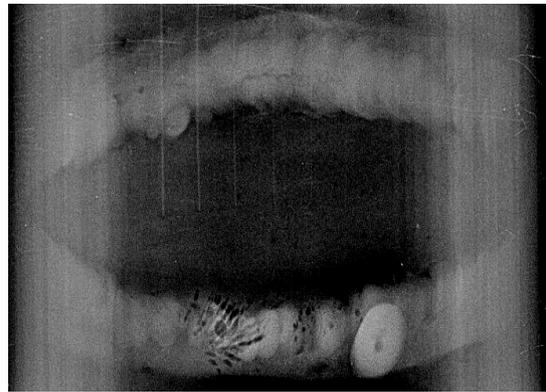
CP4-1A 130kV e 30mA.min



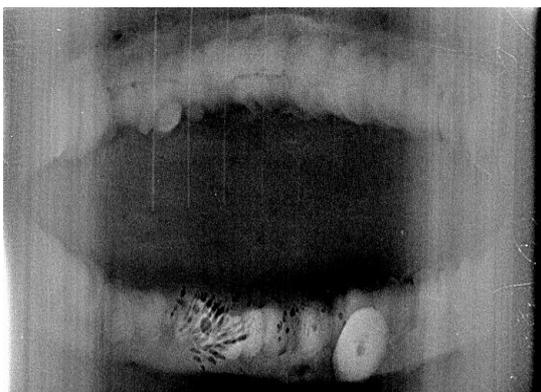
CP4-1A 130kV e 40mA.min



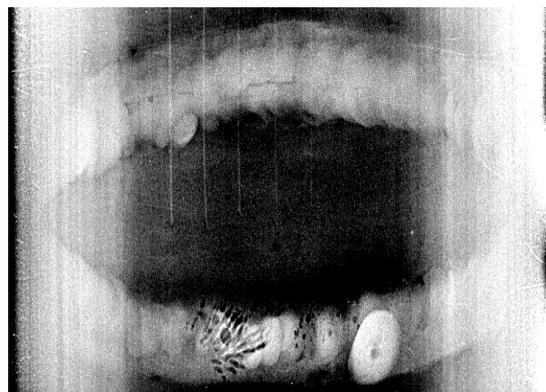
CP4-1A 140kV e 10mA.min



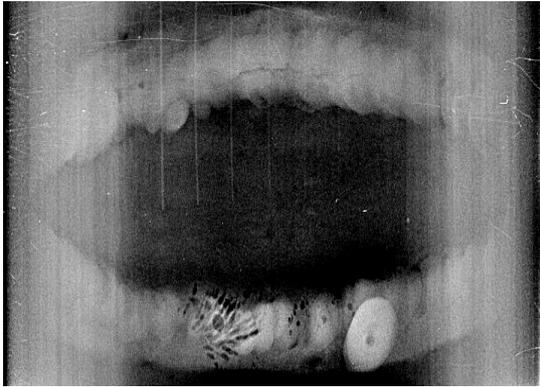
CP4-1A 140kV e 15mA.min



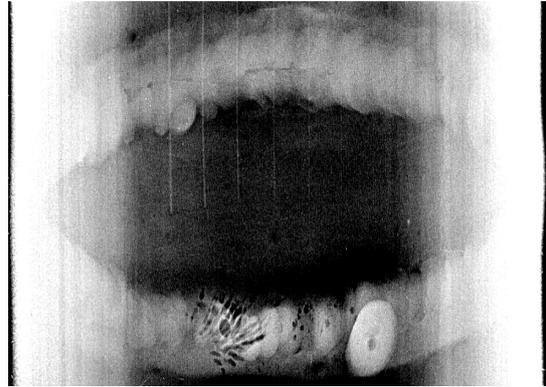
CP4-1A 140kV e 20mA.min



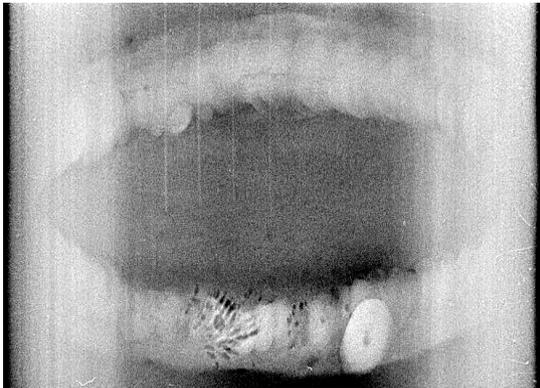
CP4-1A 140kV e 25mA.min



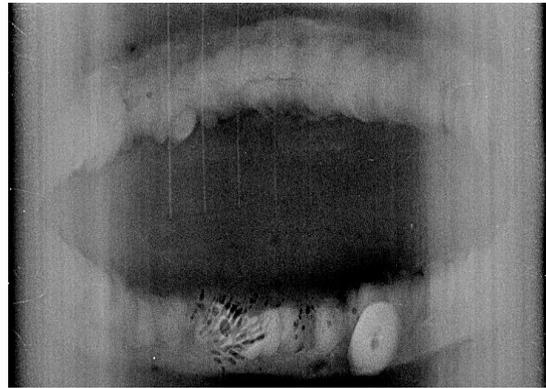
CP4-1A 140kV e 30mA.min



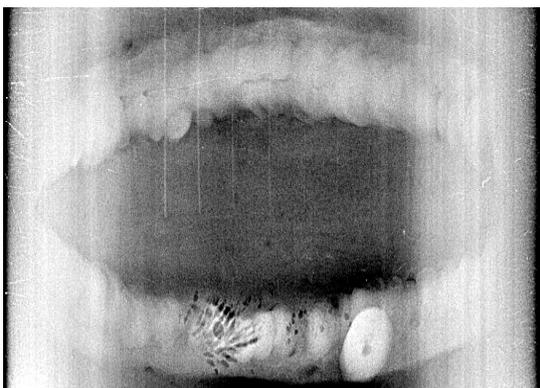
CP4-1A 140kV e 40mA.min



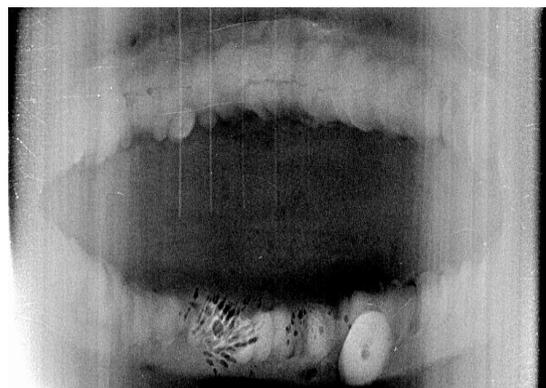
CP4-1A 150kV e 5mA.min



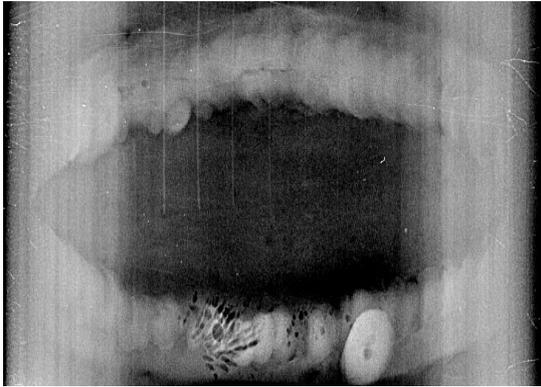
CP4-1A 150kV e 10mA.min



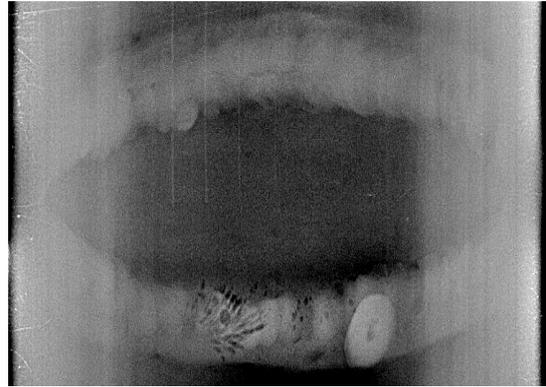
CP4-1A 150kV e 15mA.min



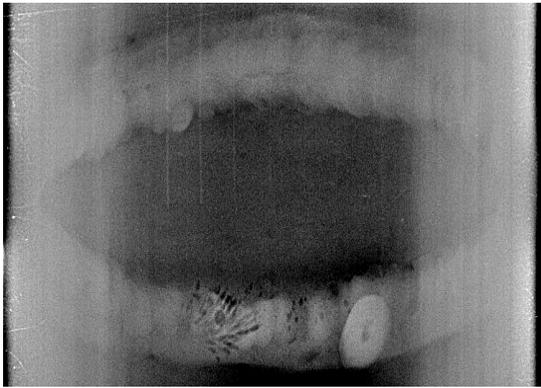
CP4-1A 150kV e 20mA.min



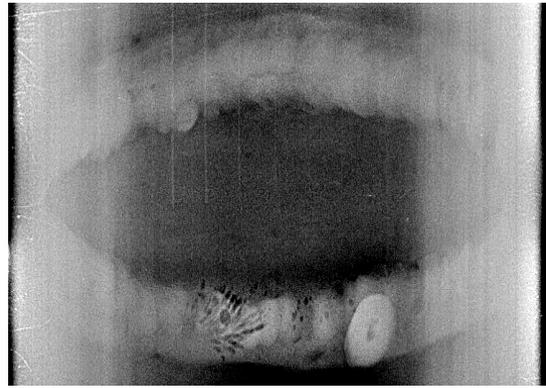
CP4-1A 150kV e 40mA.min



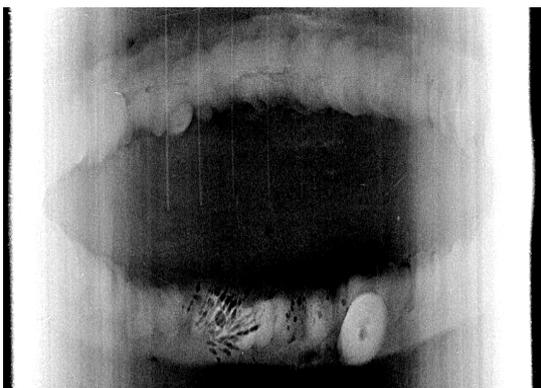
CP4-1A 160kV e 5mA.min



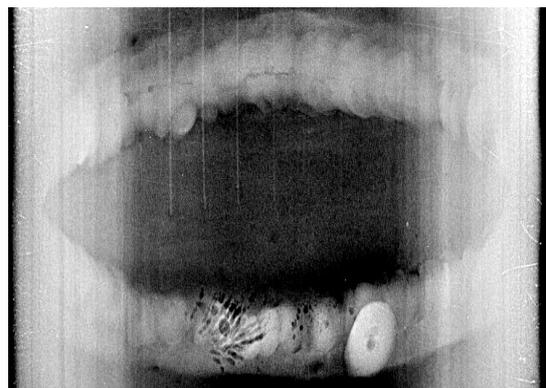
CP4-1A 160kV e 10mA.min



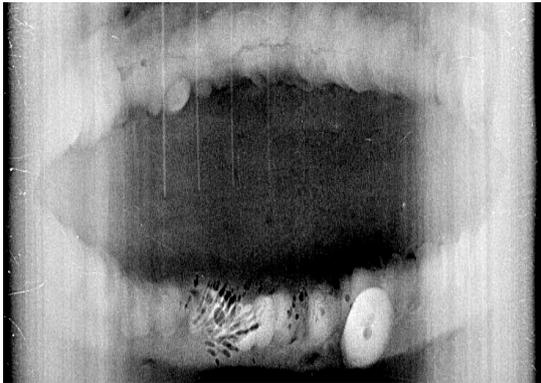
CP4-1A 160kV e 15mA.min



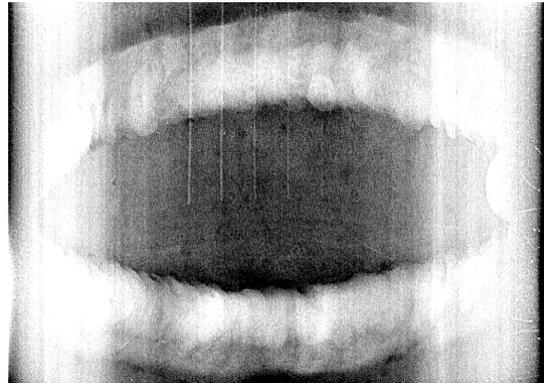
CP4-1A 160kV e 20mA.min



CP4-1A 160kV e 30mA.min



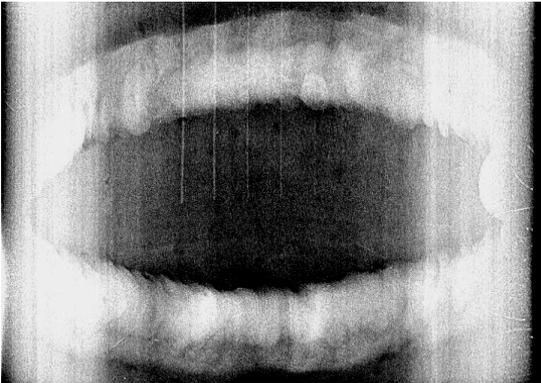
CP4-1A 160kV e 40mA.min



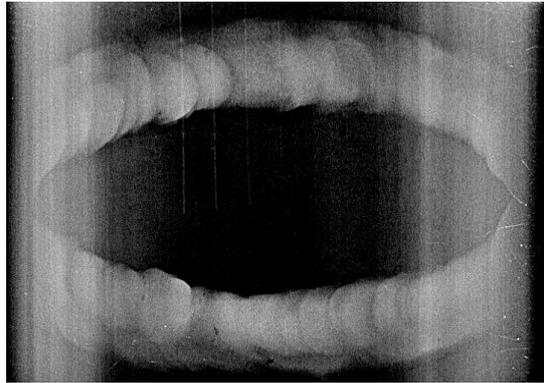
CP4-1B 150kV e 25mA.min

Corpo de prova CP4-2

Sistema Dürr e tubo Seifert



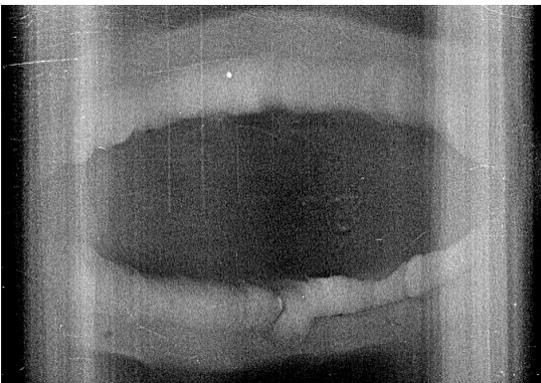
CP4-2A 150kV e 25mA.min



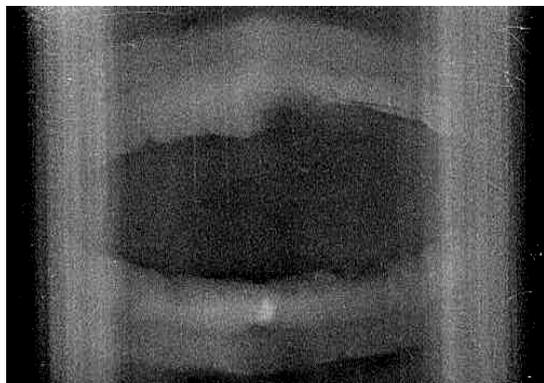
CP4-2B 150kV e 25mA.min

Corpo de prova CP5-1

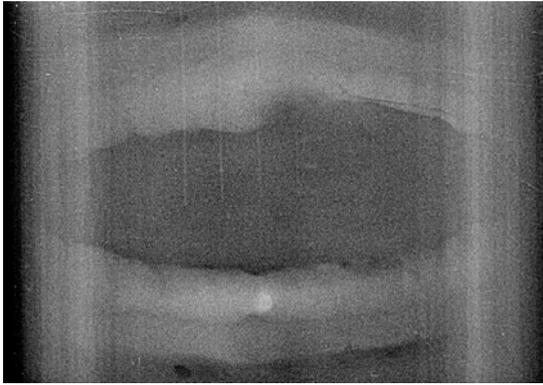
Sistema Dürr e tubo Seifert



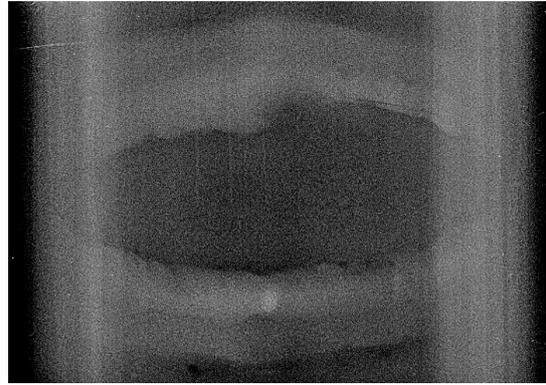
CP5-1A 150kV e 40mA.min



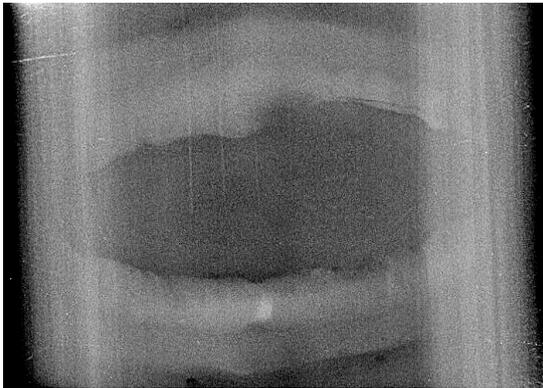
CP5-1B 140kV e 10mA.min



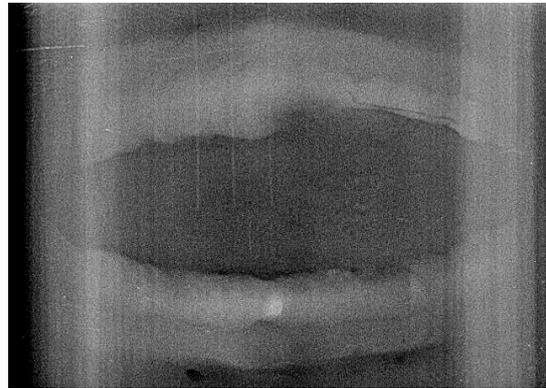
CP5-1B 140kV e 15mA.min



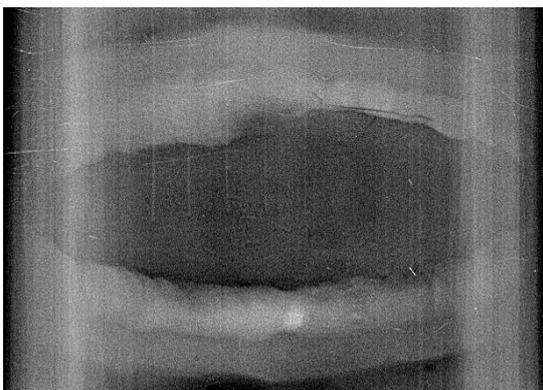
CP5-1B 150kV e 5mA.min



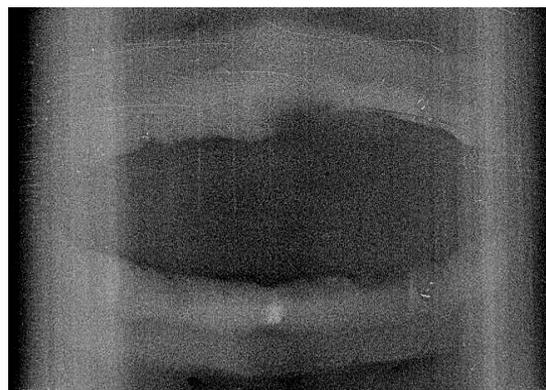
CP5-1B 150kV e 10mA.min



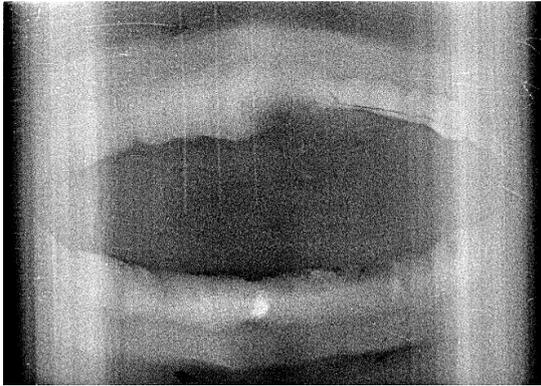
CP5-1B 150kV e 15mA.min



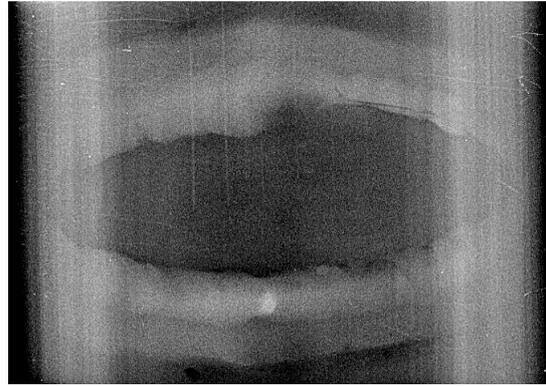
CP5-1B 150kV e 30mA.min



CP5-1B 160kV e 5mA.min



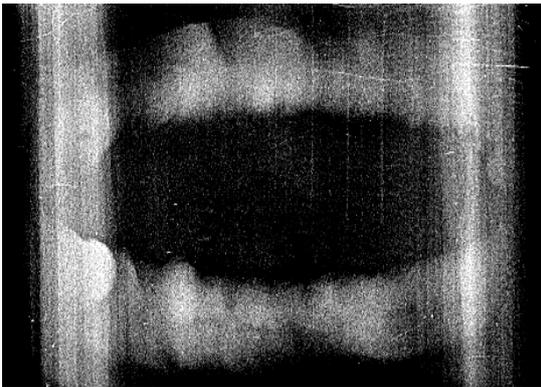
CP5-1B 160kV e 10mA.min



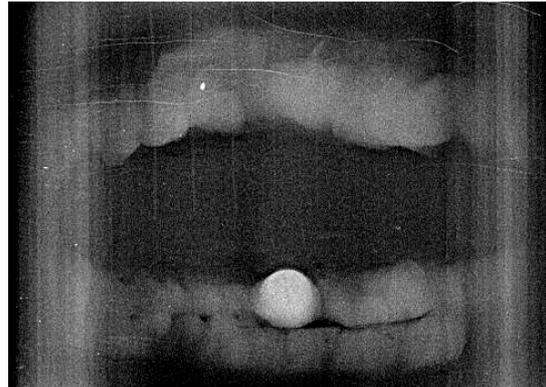
CP5-1B 160kV e 15mA.min

Corpo de prova CP5-2

Sistema Dürr e tubo Seifert



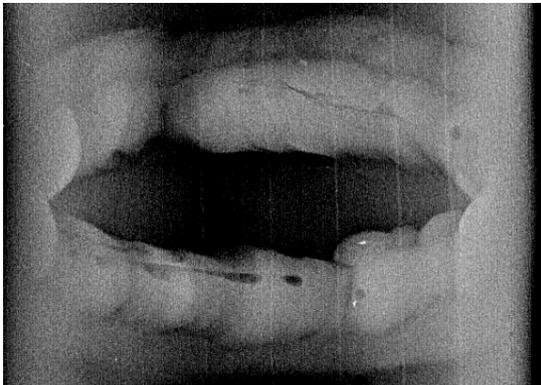
CP5-2A 150kV e 30mA.min



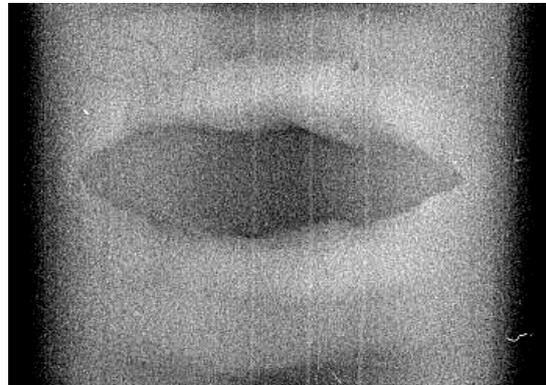
CP5-2B 150kV e 30mA.min

Corpo de prova CP1-2

Sistema Dürr e tubo YXlon



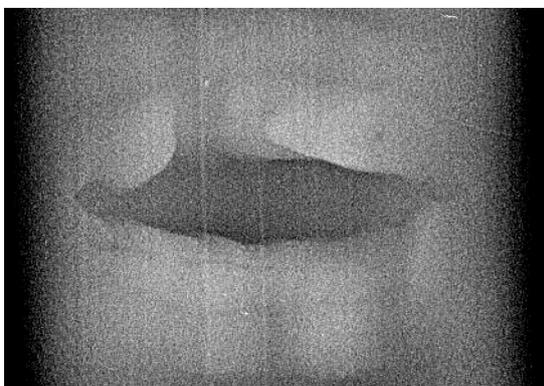
CP1-2A 130kV e 35mA.min



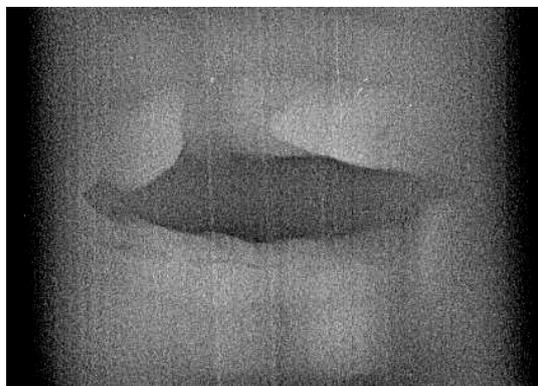
CP3-1A 160kV e 30mA.min

Corpo de prova CP3-2

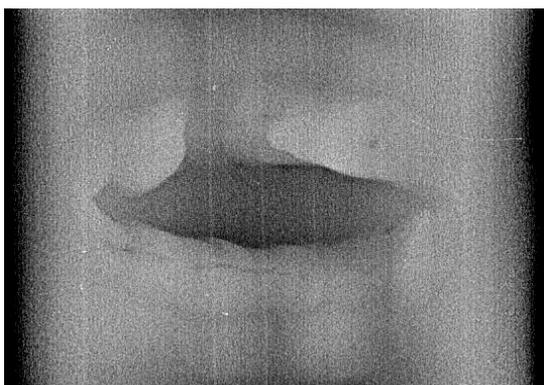
Sistema Dürr e tubo YXlon



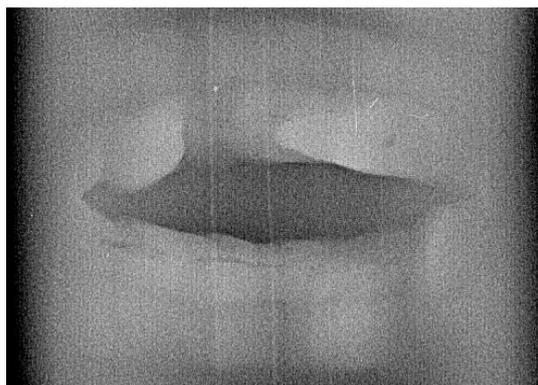
CP3-2B 160kV e 30mA.min



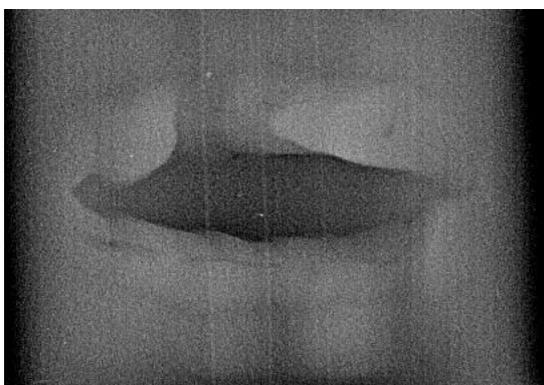
CP3-2B 160kV e 40mA.min



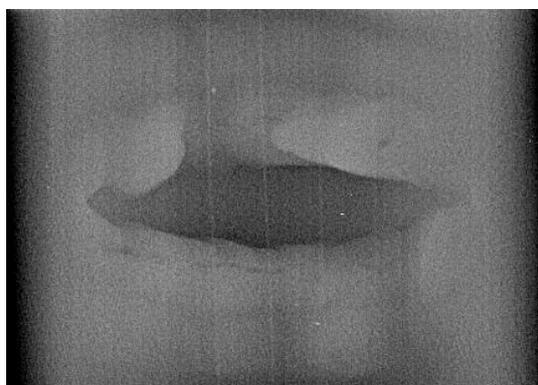
CP3-2B 180kV e 30mA.min



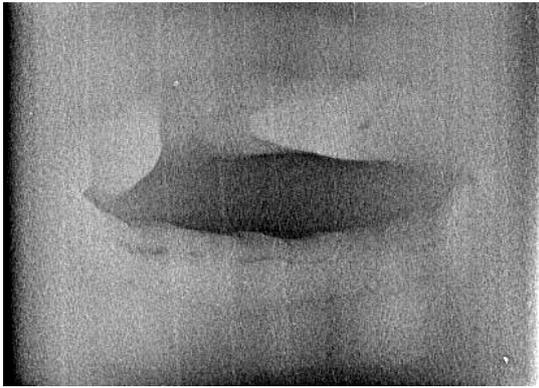
CP3-2B 180kV e 40mA.min



CP3-2B 180kV e 40mA.min



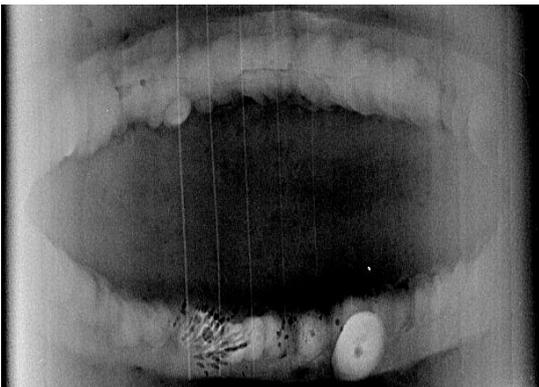
CP3-2B 190kV e 30mA.min



CP3-2B 190kV e 40mA.min

Corpo de prova CP4-1

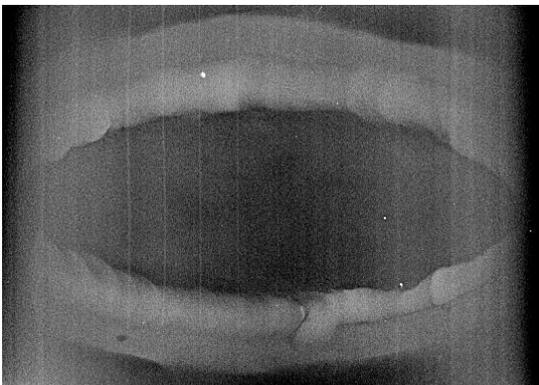
Sistema Dürr e tubo YXlon



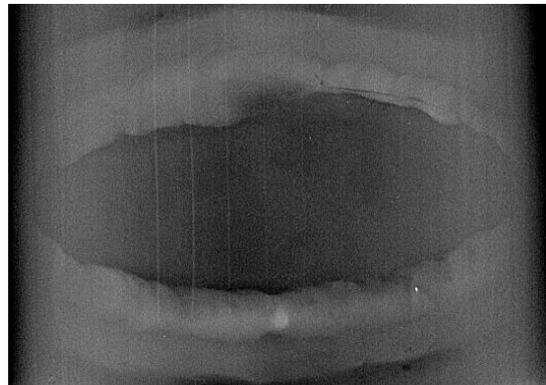
CP4-1A 140kV e 35mA.min

Corpo de prova CP5-1

Sistema Dürr e tubo YXlon



CP5-1A 150kV e 25mA.min



CP5-1B 150kV e 25mA.min