



COPPE/UFRJ

**PROCEDIMENTOS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA EM APLICAÇÕES
INDUSTRIAIS DA RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA**

Josilto Oliveira de Aquino

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários a obtenção do título de Doutor em Engenharia Nuclear.

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Rio de Janeiro

Março de 2009

PROCEDIMENTOS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA EM APLICAÇÕES
INDUSTRIAIS DA RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA

Josilto Oliveira de Aquino

TESE 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 DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Aprovada por:



Prof. Ricardo Tadeu Lopes, D.Sc.



Prof. Delson Braz, D.Sc.



Prof.ª Adriana Teixeira Ramalho, D.Sc.



Prof. Marcelino José dos Anjos, D.Sc.



Prof. Joaquim Teixeira de Assis, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2009

Aquino, Josilto Oliveira de

Procedimentos de Proteção Radiológica em Aplicações Industriais da Radiografia computadorizada / Josilto Oliveira de Aquino. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XII, 69 p.: il.; 29; 7cm.

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Tese (doutorado) - UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Nuclear, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 66 - 69.

1. Proteção Radiológica 2. Aplicações Industriais 3. Radiografia Computadorizada. I. Lopes, Ricardo Tadeu. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título (série).

A minha mãe Josefa, minha esposa Eliane
e meu filho João Pedro

AGRADECIMENTOS

À Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), em especial à dra. Maria Helena Maréchal, pela oportunidade de realização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação da COPPE/UFRJ, pelos conhecimentos técnico-científicos ministrados e, em particular, ao dr. Ricardo Tadeu Lopes, orientador da tese, pelo apoio e contribuições relevantes para a realização deste trabalho.

Às instituições ARCTEST e TOPCHECK, pela constante colaboração.

À dra. Adriana T. Ramalho (IRD/CNEN), pela constante e inestimável colaboração durante as discussões e sugestões para a composição do texto.

Aos colegas da Divisão de Aplicações Industriais – DIAPI/CGMI/CNEN, pela compreensão durante o período de elaboração da tese.

Aos colegas do Serviço de Radioproteção em Instalações Radiativas – SERIR/IRD/CNEN – João Carlos Leocádio e Ronaldo D’Ávila, pela colaboração e contribuições importantes para o trabalho.

Aos profissionais Mário de Boita, Catalão e Antônio Deoclécio (ARCTEST), e Alexandre Lima (TOPCHECK), pelas discussões, colaboração e contribuições relevantes para o trabalho.

À minha mãe, Josefa, que sempre me estimulou a estudar.

À minha família, pelo incentivo e orgulho sempre demonstrado.

À minha esposa, Eliane, que sempre me estimulou para a realização do doutorado, e, principalmente, pelo amor, paciência e tolerância nesse período.

Ao meu filho João Pedro, que pacientemente dividiu o tempo com este estudo.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o êxito deste trabalho.

E, principalmente, a DEUS, porque sei que acima de todas as coisas, Ele é verdadeiramente fiel.“Posso todas as coisas naquele que me fortalece”. Filipenses 4:13.

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

PROCEDIMENTOS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA EM APLICAÇÕES
INDUSTRIAIS DA RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA

Josilto Oliveira de Aquino

Março/2009

Orientador: Ricardo Tadeu Lopes

Programa: Engenharia Nuclear

Devido às características tão especiais da radiografia industrial, tal prática é responsável por aproximadamente metade de todos os acidentes relacionados com a indústria nuclear, tanto em países desenvolvidos como nos em desenvolvimento, segundo estatística de acidentes radiológicos registrada pela Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA). Por tal motivo, segurança e proteção radiológica, em radiografia industrial, vêm recebendo cada vez mais atenção por parte dos órgãos reguladores. O objetivo global do presente trabalho foi avaliar, do ponto de vista da radioproteção, as principais vantagens da radiografia computadorizada (CR) nas aplicações da radiografia industrial. Para tanto, avaliou-se e comparou-se, através de estudos práticos, as técnicas de radiografia industrial convencional com filme radiográfico e a computadorizada (CR). Após a análise dos estudos realizados, pode-se afirmar que a radiografia computadorizada (CR) reduz significativamente as doses inerentes, refletindo em menor balizamento de áreas e custos, com conseqüente melhoria na radioproteção e na segurança radiológica.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

RADIOLOGICAL PROTECTION PROCEDURES FOR INDUSTRIAL
APPLICATIONS OF COMPUTED RADIOGRAPHY

Josilto Oliveira de Aquino

March/2009

Advisor: Ricardo Tadeu Lopes

Department: Nuclear Engineering

Due to its very particular characteristics, industrial radiography is responsible for roughly half of the relevant accidents in nuclear industry, in developed as well as in developing countries, according to the International Atomic Energy Agency (IAEA). Thus, safety and radiological protection in industrial gamma radiography have been receiving especial treatment by regulatory authorities of most Member States. The main objective of the present work was to evaluate, from the radioprotection point of view, the main advantages of computed radiography (CR) for filmless industrial radiography. In order to accomplish this, both techniques, i.e. conventional and filmless computed radiography (CR) were evaluated and compared through practical studies. After the studies performed at the present work it was concluded that computed radiography (CR) significantly reduces the inherent doses, reflecting in smaller restricted areas and costs, with consequent improvement in radiological protection and safety.

SUMÁRIO

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Objetivos.....	2
Capítulo 2 - Fundamentação Teórica	3
2.1 Ensaaios Não Destrutivos.....	3
2.2 Equipamentos Utilizados em Radiografia Industrial.....	3
2.2.1 Fontes Radioativas Para Gamagrafia Industrial	4
2.2.2 Irradiadores Utilizados em Gamagrafia Industrial	5
2.2.3 Filmes Radiográficos.....	6
2.2.4 Técnicas de Exposição Radiográfica.....	6
2.3 Radiografia Computadorizada (CR).....	9
2.4 Aplicações Industriais da Radiografia Computadorizada	12
2.5 Aferição da Qualidade da Imagem	15
2.5.1 IQI ASME e ASTM Tipo Furos.....	15
2.5.2 IQI ASTM Tipo Fios.....	16
2.5.3 IQI Conforme a Norma DIN	17
2.6 Comparação Entre as Radiografias Convencional e Digital	18
2.6.1 Equipamentos Específicos À Radiografia Computadorizada (CR).....	18
2.6.2 Preparativos Para as Radiografias	19
2.6.2.1 Radiografia Convencional	19
2.6.2.2 Radiografia Computadorizada (CR)	20
2.6.3 Identificações.....	21
2.6.4 Processamento dos Filmes.....	22
2.6.5 Laudagem de Filmes.....	22
2.6.6 Armazenamento e Guarda de Imagens	23
2.6.7 Impressão de Imagens	24
2.6.8 Vantagens Logísticas da Técnica Digital (CR)	24

2.7 Proteção radiológica	25
2.7.1 Definição	25
2.7.2 Finalidades da Proteção Radiológica.....	25
2.7.3 Princípios da Proteção Radiológica.....	25
Capítulo 3- Materiais e Métodos	27
3.1 Levantamento de Dados e Elaboração dos Inventários.....	27
3.1.1 Instalações de Radiografia Industrial no País.....	28
3.1.2 Radionuclídeos Usados em Radiografia Industrial no País.....	28
3.1.3 Empresas Prestadoras de Serviços de Radiografia Digital.....	28
3.2 Estudos na Refinaria Alberto Pasqualini – REFAP S/A	28
3.2.1 Fontes de Radiação Ionizante Utilizadas na REFAP S/A	29
3.2.1.1 Fonte de ^{75}Se	29
3.2.1.2 Fonte de ^{192}Ir	30
3.2.1.3 Equipamento de Raios X	30
3.2.2 Acessórios Convencionais Utilizados pela <i>EMPRESA A</i>	31
3.2.2.1 Acessórios para as Radiografias com ^{75}Se e ^{192}Ir na REFAP..	31
3.2.2.2 Acessórios para as Radiografias com Raios X na REFAP.....	31
3.2.3 Equipamentos e Sistemas de CR da <i>EMPRESA A</i>	32
3.2.4 Dosímetros Termoluminescentes (TLD)	32
3.2.5 Limites Anuais de Dose	35
3.2.6 Radiografias Digitais com a Fonte de ^{75}Se	36
3.2.7 Radiografias Convencionais com a Fonte de ^{75}Se	37
3.2.8 Cálculo do Balizamento de Áreas para o ^{75}Se – REFAP	39
3.2.9 Radiografias Digitais com Raios X.....	41
3.2.10 Cálculo do Balizamento de Áreas para os Raios X.....	43
3.2.11 Radiografias Digitais com ^{192}Ir – REFAP	44
3.2.12 Radiografias Convencionais com a Fonte de ^{192}Ir	45
3.2.13 Cálculo do Balizamento de Áreas para o ^{192}Ir – REFAP	47
3.3 Estudo da Aplicação de ^{169}Yb em CR Industrial.....	48
3.3.1 Equipamentos Utilizados na REPLAN.....	50
3.3.2 Arranjos Experimentais na REPLAN.....	50
Capítulo 4 - Resultados	51

4.1 Levantamento de Dados e Elaboração dos Inventários	51
4.1.1 Instalações de Radiografia Industrial no País.....	51
4.1.2 Radionuclídeos Usados em Radiografia Industrial no País.....	52
4.1.3 Empresas Prestadoras de Serviços de Radiografia Digital.....	52
4.2 Estudos na Refinaria Alberto Pasqualini – REFAP S/A	52
4.2.1 Balizamento de Áreas para o ⁷⁵ Se, Técnica Digital (REFAP)	52
4.2.2 Balizamento de Áreas para o ⁷⁵ Se, Técnica Convencional	54
4.2.3 Balizamento de Áreas para Raios X, Técnicas Digital e Convencional (REFAP)	55
4.2.4 Balizamento de Áreas para o ¹⁹² Ir, Técnica Digital (REFAP)	57
4.2.5 Balizamento de Áreas para o ¹⁹² Ir, Técnica Convencional	59
4.2.6 Resultados dos Experimentos com Dosímetros TLD	60
4.3 Resultados da Aplicação de ¹⁶⁹ Yb em CR Industrial	60
Capítulo 5 - Conclusões e Recomendações.....	63
5.1 Conclusões.....	63
5.2 Recomendações	65
Referências Bibliográficas.....	66

LISTA DE SÍMBOLOS

ALARA – “*As low as reasonably achievable*”
ASME – *American Society of Mechanical Engineers*
ASTM – *American Society for Testing and Materials*
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
CEN – *European Committee for Standardization*
CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear
CSR – Camada semiredutora
DIN – *Deutsche Institute for Normalization*
END – Ensaio Não-Destrutivo
IAEA – Agência Internacional de Energia Atômica
ICRP – *International Commission on Radiological Protection*
IOE – Indivíduo ocupacionalmente exposto
IP – *Imaging plate* (placa de imagem com fósforo)
IQI – Indicador de Qualidade da Imagem
IPEN – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IRD – Instituto de Radioproteção e Dosimetria
ISO – *International Organization for Standardization*
PD-VD – Parede dupla – vista dupla
PD-VS – Parede dupla – vista simples
PSL – Luminescência fotoestimulada
CR – Radiografia computadorizada
REFAP – Refinaria Alberto Pasqualini
REPLAN – Refinaria de Paulínia
RIA – Responsável por Instalação Aberta
SIR – Sistema de Instalações Radiativas
SMTPE – *Society of Motion Picture and Television Engineers*
SPR – Supervisor de Proteção Radiológica
TLD – Dosímetro termoluminescente

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

O uso das radiações ionizantes em medicina, indústria e pesquisa vem se desenvolvendo rapidamente no mundo. Isso ocorre tanto na área de saúde, quando é realizado um diagnóstico ou um tratamento de alguma patologia, utilizando-se práticas de radiodiagnóstico, de medicina nuclear ou de radioterapia, quanto na área de indústria, quando se objetiva um controle de qualidade de produtos industriais ou tornar um produto mais confiável para consumo, utilizando-se práticas com medidores nucleares, radiografia industrial, perfilagem de poços de petróleo, aceleradores de partículas e irradiadores de grande porte.

No Brasil, de acordo com os dados obtidos em levantamento realizado no presente trabalho junto à Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN, as aplicações das radiações ionizantes na indústria são realizadas em cerca de 1.400 instalações radiativas, as quais manuseiam aproximadamente 7.000 fontes de radiação, distribuídas nas mais diversas aplicações industriais.

Ainda de acordo com o levantamento acima citado, a prática de radiografia industrial representa 12% do total de instalações radiativas, sendo tal percentual responsável pelo uso de cerca de 430 equipamentos geradores de raios X e 300 equipamentos de gamagrafia industrial.

As instalações de radiografia industrial realizam serviços em diversas localidades, incluindo recintos blindados – *bunkers* – e operações em campo, em áreas urbanas ou em regiões remotas e desabitadas do País.

Atualmente é praticamente impossível pensar-se na atividade industrial sem a radiografia, pois esse tipo de ensaio não destrutivo – END – assegura a integridade de equipamentos tais como vasos, tubulações e outras estruturas, sendo considerada de importância vital na segurança e qualidade, tanto dos produtos quanto do meio ambiente, para trabalhadores e público em geral.

Devido às características tão especiais da radiografia industrial, tal prática é responsável por aproximadamente metade de todos os acidentes relacionados com a indústria nuclear, tanto em países desenvolvidos como nos em desenvolvimento, segundo estatística de acidentes radiológicos registrada pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 1998). Por tal motivo, segurança e proteção radiológica, em radiografia industrial, vêm recebendo cada vez mais atenção por parte dos órgãos reguladores dos países membros das Nações Unidas. Tal assunto foi tratado com ênfase em uma publicação da IAEA (1999).

A radiografia industrial pode ser realizada através de equipamentos geradores de raios X ou de irradiadores de gamagrafia, equipamentos estes que utilizam fontes radioativas de irídio-192, selênio-75, itérbio-169, cézio-137 ou cobalto-60. No Brasil, cerca de 88% dos irradiadores de gamagrafia industrial utilizam fontes de ^{192}Ir , 10% utilizam fontes de ^{75}Se e apenas 2% utilizam fontes de ^{60}Co .

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal do presente trabalho foi avaliar, do ponto de vista da proteção radiológica, as principais vantagens da radiografia computadorizada (CR) nas aplicações da radiografia industrial. Para tanto, avaliou-se e comparou-se as doses inerentes às técnicas de radiografia industrial computadorizada e convencional com filme radiográfico, utilizando-se estudos práticos e dosímetros termoluminescentes (TLD) para o registro das doses envolvidas com as respectivas técnicas. Assim, pretendeu-se contribuir para a melhoria da proteção radiológica no País, dentro da filosofia de segurança recomendada pela IAEA (1996). Para tanto, as seguintes etapas específicas foram estabelecidas:

- Fazer um levantamento das empresas prestadoras de serviços de radiografia industrial (instalações abertas e fechadas) existentes no País e das atividades das fontes radioativas utilizadas em gamagrafia industrial no País;
- Em estudo *in loco* em uma planta industrial, avaliar as doses inerentes à técnica da radiografia industrial convencional com dosímetro e as doses inerentes à técnica da radiografia industrial computadorizada (CR), comparando-as;
- Em estudo *in loco* em outra unidade industrial, avaliar a viabilidade da aplicação de itérbio-169 em radiografia computadorizada (CR).

CAPÍTULO 2

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Os ensaios não destrutivos – END – são ensaios realizados em materiais e produtos acabados ou semi-acabados, para verificar a possível existência de descontinuidades ou defeitos (PETROBRAS, 2000). Operam através de princípios físicos definidos, sem alterar as características físicas, químicas, mecânicas ou dimensionais dos materiais e produtos, e sem interferir em seu uso posterior.

Por não danificarem os itens que estão sendo objeto de inspeção, os END constituem uma das principais ferramentas de controle da qualidade de materiais e produtos. Contribuem para garantir a qualidade, prevenir acidentes, reduzir riscos à saúde humana e custos finais de fabricação, aumentando a confiabilidade da inspeção. São utilizados na fabricação, montagem, inspeção em serviço e manutenção, sendo largamente aplicados em soldas, fundidos, forjados, laminados, plásticos, concretos, entre outros, em vários setores industriais, tais como petróleo, petroquímico, nuclear, aeroespacial, siderúrgico, ferroviário, naval, eletromecânico, automotivo e de mineração.

Para se obter resultados satisfatórios e válidos, a escolha do método de ensaio apropriado deve ser considerada como questão fundamental. Para a detecção de descontinuidades ou defeitos que se localizem internamente nos materiais e produtos, são utilizados os ensaios de ultrassom e radiografia (raios X e gama).

Dentre os END, a radiografia industrial destaca-se como técnica valiosa na obtenção de informações qualitativas sobre as condições internas dos materiais e qualidade das soldas executadas.

2.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS EM RADIOGRAFIA INDUSTRIAL

Existe no mercado uma grande variedade de equipamentos para utilização em radiografia industrial. Dentre eles podemos citar os equipamentos de raios X e os equipamentos emissores de raios gama utilizados em gamagrafia industrial.

O uso de fontes de raios gama oferece algumas vantagens em relação aos equipamentos emissores de raios X, tais como não necessitar de energia elétrica; possuírem pequenas dimensões, o que permite o uso em locais inacessíveis aos aparelhos de raios X; e apresentarem baixo custo.

2.2.1 FONTES RADIOATIVAS PARA GAMAGRAFIA INDUSTRIAL

Os requisitos mínimos aplicáveis às fontes de radiação gama para radiografia industrial estão descritos no padrão ISO 2919 (1990), e satisfazem em geral aos requisitos referentes ao material radioativo sob formas especiais (IAEA, 2000).

O radioisótopo mais utilizado em gamagrafia industrial convencional no País é o ^{192}Ir . Em bem menor escala são também utilizados outros radioisótopos. No Brasil, cerca de 88% dos irradiadores de gamagrafia utilizam fontes de ^{192}Ir , 10% utilizam fontes de ^{75}Se e apenas 2% dos irradiadores de gamagrafia utilizam fontes de ^{60}Co .

A escolha do radioisótopo a ser utilizado depende das características do material a ser radiografado, conforme mostra a Tabela 2.1, e depende também da técnica empregada, se convencional ou digital.

Tabela 2.1: Radioisótopos mais utilizados em gamagrafia industrial (IAEA, 1999^a).

Radioisótopo	Energias γ (keV)	Meia-Vida	Faixa adequada de espessura de aço, objeto do ensaio (mm)
^{60}Co	1.173 e 1.332	5,3 anos	50 - 150
^{137}Cs	662	30 anos	50 - 100
^{75}Se	120 - 970	120 dias	4 - 28
^{192}Ir	200 - 1.400	74 dias	10 - 70
^{169}Yb	8 - 310	32 dias	2,5 - 15
$^{170}\text{Tm}^*$	7 - 60	128 dias	até 5

* Túlio-170, de acordo com GONZALES (2001) e PETTEN *et al.* (1999).

A alta sensibilidade das placas de imagem com fósforo para radiografia digital limitam o uso das fontes radioativas com alta atividade, comumente usadas na radiografia convencional. Paradoxalmente, isso representa maior vantagem do ponto de vista da segurança e da proteção radiológica, porque leva ao uso de fontes com baixa atividade (SERRA *et al.*, 2005). Na gamagrafia digital, as fontes mais utilizadas são as de ^{75}Se .

2.2.2 IRRADIADORES UTILIZADOS EM GAMAGRAFIA INDUSTRIAL

Os irradiadores de gamagrafia industrial necessitam dos respectivos acessórios: comandos, cabos e mangueiras. A grande maioria dos irradiadores para gamagrafia industrial em uso no País são classificados como portáteis panorâmicos. Esta última característica refere-se aos irradiadores cuja fonte é mecanicamente projetada para fora da blindagem, no momento da exposição (AQUINO, 2003).

Na Fig. 2.1 encontram-se ilustrados – agrupados pelos quatro fabricantes – os modelos de irradiadores de ^{192}Ir utilizados no País, principalmente pelas empresas prestadoras de serviços em gamagrafia industrial. Os modelos *Sentinel série 880* podem armazenar também fontes de selênio e itérbio, e o modelo *Gammamat SE* armazena somente fontes de selênio, também utilizadas em gamagrafia industrial.



FIG. 2.1 - Exemplos dos modelos dos quatro fabricantes de irradiadores portáteis panorâmicos de gamagrafia industrial existentes no Brasil.

2.2.3 FILMES RADIOGRÁFICOS

Os filmes industriais são classificados como do tipo I ou II, segundo a norma E747 da ASTM (2004), ou como do tipo T2 ou T3, segundo a norma ISO 5579 (1998), conforme especificado no Quadro 2.1.

Quadro 2.1: Tipos de filmes radiográficos.

Norma		Fabricante	Tipo de filme	Características
ASTM E747	ISO 5579			
Tipo I	Tipo T2	<i>Kodak</i>	M5/T200/MX125	Baixa velocidade; contraste muito alto; granulação muito fina.
		<i>Foma</i>	R4/R5	
		<i>Fuji</i>	50/80	
		<i>Agfa</i>	D4/D5	
Tipo II	Tipo T3	<i>Kodak</i>	AA400	Média velocidade; contraste alto; Granulação fina.
		<i>Foma</i>	R7	
		<i>Fuji</i>	100	
		<i>Agfa</i>	D7	

2.2.4 TÉCNICAS DE EXPOSIÇÃO RADIOGRÁFICA

As disposições e arranjos geométricos entre a fonte de radiação, a peça sob inspeção e o filme devem seguir algumas técnicas, de modo que permitam uma imagem radiográfica de fácil interpretação e localização das descontinuidades.

A técnica PS-VS – parede simples - vista simples – é a técnica radiográfica em que a radiação atravessa apenas uma das paredes do tubo, proporcionando, para efeito de análise, a imagem da parede próxima à tela.

Quanto ao tipo de exposição, pode ocorrer de duas maneiras:

- Exposição múltipla: é aquela em que mais de uma tela é exposta por vez à fonte de radiação. A exposição panorâmica é um tipo de exposição múltipla. A Figura 2.2 ilustra esta técnica.
- Exposição simples: é aquela em que apenas uma tela é exposta por vez à fonte de radiação. A Figura 2.3 ilustra esta técnica.

Exposição Múltipla do tipo Panorâmica – PS-VS-P

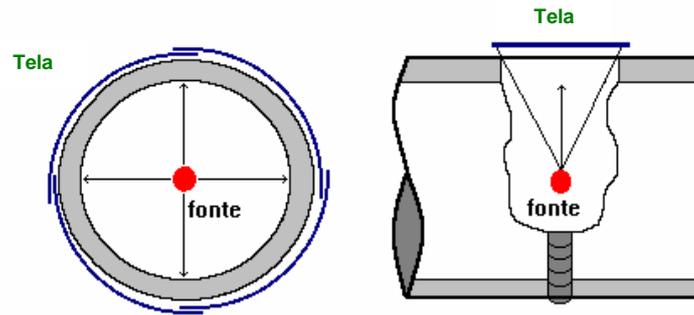


FIG. 2.2 – Exposição múltipla do tipo panorâmica – PS-VS.

Exposição Simples – PS-VS

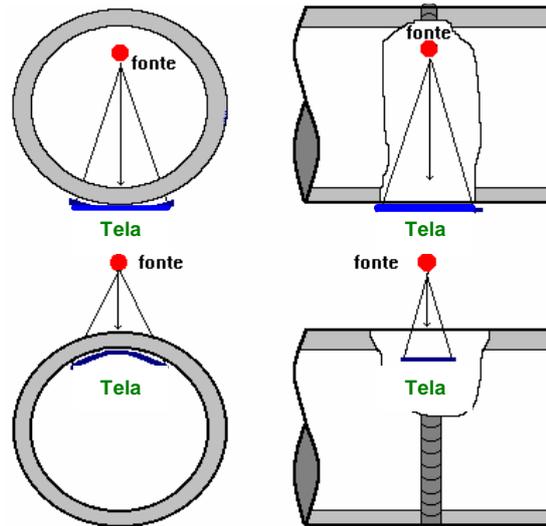


FIG. 2.3 – Exposição simples – PS-VS.

Na técnica PD-VS (parede dupla - vista simples) o feixe de radiação atravessa duas paredes da peça, mas projeta no filme somente a seção da peça que está próxima ao filme. Frequentemente essa técnica é utilizada em inspeções de juntas soldadas que não possuam acesso interno, tais como tubulações com diâmetro maior que 3 ½". A Figura 2.4 ilustra esta técnica.

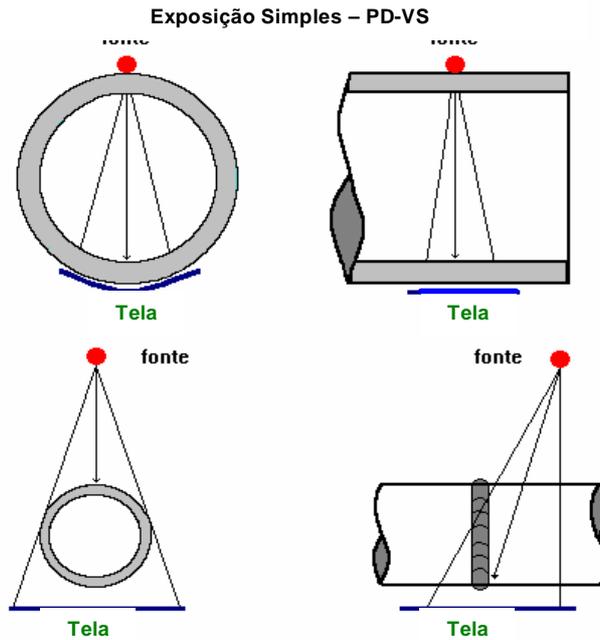


FIG. 2.4 – Exposição simples – PD-VS – “bico colado” e “com distância”.

Na técnica PD-VD (parede dupla - vista dupla) o feixe de radiação também atravessa duas espessuras da peça. Porém, projeta no filme as duas imagens da peça, as quais serão objeto de interesse. É freqüentemente utilizada em inspeções de juntas soldadas em tubulações com diâmetro menor que 3 ½”. A Figura 2.5 ilustra ambas as técnicas.

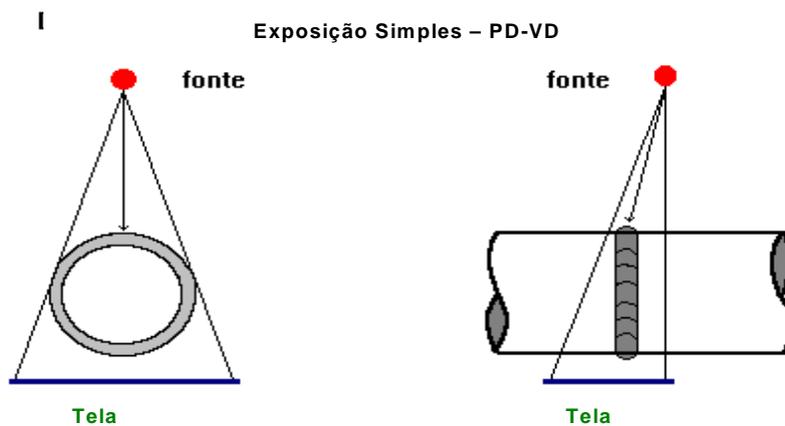


FIG. 2.5 – Exposição simples – PD-VD.

2.3 RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA (CR)

Os sistemas de radiografia computadorizada – CR – consistem na radiografia digital sem a utilização dos tradicionais filmes radiográficos, os quais exigem, antes da utilização, uma preparação com identificações, e, posteriormente, processamento químico para a revelação. Denominados *filmless radiography* em inglês, inicialmente os sistemas de radiografia computadorizada – CR – desenvolveram-se na área médica, há cerca de 20 anos. Até o presente momento, entretanto, a CR não foi capaz de substituir inteiramente a radiografia convencional em todas as aplicações, embora aplicações adicionais venham tornando-se factíveis.

A radiografia computadorizada (CR) pode ser realizada através de dois métodos:

(a) Tempo real (método direto): Utilizam-se de placas de semicondutores conectadas diretamente a computadores;

(b) Tempo próximo (método indireto): Utilizam-se de sensores (placas ou telas) de partículas de compostos de fósforo, as quais são ativadas através da radiação ionizante. Tais partículas posteriormente são excitadas por um feixe de *laser*, emitindo luz, a qual é captada em um dispositivo fotomultiplicador leitor de imagem (escâner), gerando uma imagem digital que é exposta em uma tela de computador.

O segundo método é mais econômico e prático do ponto de vista operacional, e vem sendo cada vez mais utilizado nos países do primeiro mundo com níveis satisfatórios de qualidade, atendendo a critérios técnicos específicos (EWERT, 2002).

Os sistemas CR por tempo próximo utilizam placas de imagem com fósforo fotoestimulável – placas IP (*imaging plates*) – que absorvem grande parcela da energia dos fótons de radiações ionizantes. Dessa forma, as placas IP são receptores de imagem digital.

Uma imagem digital consiste de uma matriz na qual a cada elemento – ou *pixel* (*picture element*) – é atribuído um valor numérico que corresponde a uma determinada tonalidade de cinza, do branco ao preto. A escala de cinza é determinada em função do número máximo de *bits* que podem ser armazenados em um *pixel*: 8 *bits* resulta 255 tonalidades ($2^8 - 1$); 16 *bits*, 4.095 tonalidades ($2^{12} - 1$).

A escala de cinza determina o grau de contraste que pode ser obtido nas imagens. O tamanho da matriz, ou seja, o número total de *pixels*, geralmente depende da aplicação e da capacidade do sistema que forma a imagem. O tamanho de cada *pixel* é de extrema importância para a qualidade da imagem. Todas as estruturas dentro de uma determinada área coberta por um *pixel* são representadas por um único valor. Assim, quanto menor a área do *pixel* e maior o tamanho da matriz, melhor a qualidade da imagem.

Os sistemas disponíveis de placas de imagem com fósforo (placas IP) – bem como os correspondentes escâneres a laser para a leitura digital das imagens – distinguem diferenças na dose de radiação que equivalem a mais níveis de cinza do que o olho humano é capaz de distinguir.

Tal ocorre principalmente devido à alta sensibilidade da CR, que acarreta menores tempos de exposição, e também devido ao processamento e análise digitais. Estão sendo desenvolvidos padrões que definem os limites para as aplicações da CR, os quais dependem das propriedades da instrumentação utilizada (CEN 2001^a).

O procedimento de exposição nos sistemas CR é análogo ao utilizado para os filmes radiográficos. A placa de imagem com fósforo – placa IP – é acondicionada em um chassi e, após a exposição, é colocada em uma unidade especial de leitura, que é um escâner a laser, que produz uma imagem digital sem a necessidade de processamentos adicionais, tais como a revelação do filme. No escâner a laser, para a conversão dos sinais analógicos em digitais, a placa IP é varrida por um feixe de raios laser que estimula a emissão de luz. Um tubo fotomultiplicador produz os sinais eletrônicos que, então, são digitalizados e expostos na tela de um computador. Para processamento da imagem, os sistemas CR são integrados com um sistema de arquivamento e comunicação de imagens.

Após a leitura, a placa IP é exposta à luz, no escâner, para que seja removida toda a energia residual. Após apagar-se opticamente a imagem virtual, a mesma placa IP pode ser reciclada mais de mil vezes, conforme ilustra a Fig 2.6.

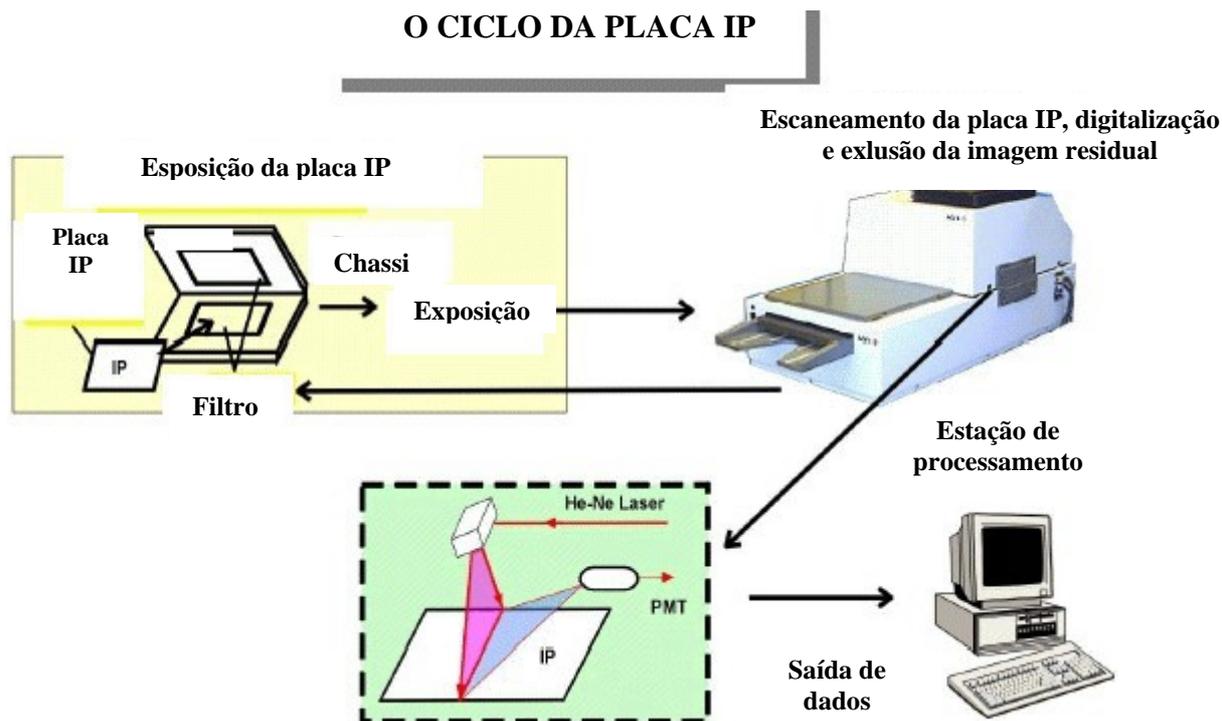


FIG. 2.6 - Ciclo de obtenção de imagens digitais na CR. As placas de imagem podem ser expostas, lidas e apagadas diversas vezes (EWERT, 2002).

Uma placa de fósforo – placa IP – consiste de um polímero de suporte flexível, coberto com uma camada sensível. A superfície é coberta com uma fina camada protetora transparente. A camada sensível das placas IP dos sistemas mais comuns de CR consiste de uma mistura de BaFBr dotada com Eu^{2+} . Fótons de raios X ou gama iniciam transições de elétrons na matriz do cristal. Os elétrons são excitados da banda de valência para a banda de condução (EWERT, 2002), na transição de Eu^{2+} para Eu^{3+} . Os elétrons da banda condutora são aprisionados em armadilhas em locais vazios da matriz de Br, denominados centros F. Os elétrons irão retornar para a banda de valência após a excitação por luz visível. Esse processo é descrito como luminescência foto-estimulada (PSL), o qual é basicamente a capacidade que possuem certos materiais de absorver energia e liberarem-na sob a forma de luz. Os sistemas CR usados produzem PSL na faixa de cerca de 400 nm (azul), sob excitação pela luz na faixa de 600-700 nm (vermelha).

As vantagens da tecnologia IP são (EWERT, 2002): alta linearidade; alta faixa dinâmica ($>10^5$); alta sensibilidade; reutilização de cerca de 1.000 ciclos; ausência de processo de revelação em câmara escura; e possibilidade de processamento digital da imagem.

As desvantagens da tecnologia IP são (EWERT, 2002): resolução espacial limitada; alta sensibilidade na faixa de baixa energia; e sensibilidade à radiação de espalhamento.

2.4 APLICAÇÕES INDUSTRIAIS DA RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA

Há mais de 100 anos que a radiografia industrial baseia-se na utilização de filmes radiográficos. No Brasil, no ano de 2000 foram iniciadas pesquisas para a adaptação dos sistemas de CR para a indústria (JOSÉ *et al.*, 2002), buscando inicialmente atender às exigências de plantas de processo, principalmente refinarias de petróleo e indústrias petroquímicas. Após o desenvolvimento inicial, a técnica passou a ser utilizada comercialmente no início de 2001, em avaliações de integridade de tubulações em refinarias e plantas petroquímicas.

Devido aos bons resultados técnicos apresentados com relação à detecção de descontinuidades, a radiografia computadorizada (CR) apresenta-se como uma alternativa racional para a inspeção de componentes de tubulações, principalmente juntas soldadas. As principais aplicações da CR são a verificação de estados físicos, tais como corrosão, erosão e perdas de espessura (JOSÉ *et al.*, 2002).

A Fig. 2.7 mostra a principal vantagem da CR. Ambas as imagens foram produzidas por exposições similares, nas mesmas condições. Apresentam-se diferentes apenas em relação aos ajustes de contraste e brilho. Nenhuma outra forma de processamento da imagem foi aplicada. Essa característica da técnica CR reduz o número de exposições de objetos com elevada diferença de espessura das paredes, e compensa os tempos de exposição erroneamente calculados. O número dos chamados “testes de exposição” também pode ser diminuído, e eventualmente suprimido (EWERT, 2002).

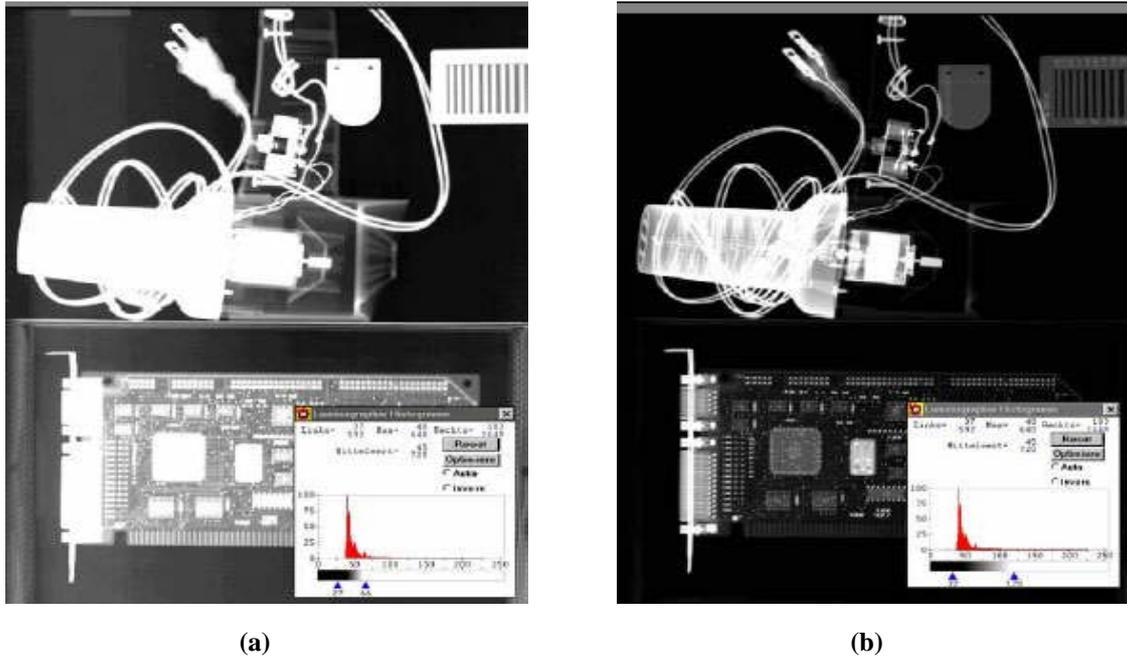


FIG. 2.7 - Radiografia de um aparelho elétrico (secador-de-cabelos) por CR.
 Esquerda (a): O histograma mostra o ajuste de contraste e brilho, otimizado para plásticos.
 Direita (b): O ajuste foi otimizado para metais.

As novas possibilidades de aplicações da CR incorporam o risco de mau uso da tecnologia. Para limitar esse risco e evitar uma queda na probabilidade de detecção das discontinuidades, são necessários padrões com recomendações especiais. Tais padrões vêm sendo desenvolvidos em diversos países. Trabalhos pioneiros foram desenvolvidos nos EUA pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 2005^a; 2005^b) e na Europa pelo *European Committee for Standardization* (CEN 2001^a).

O padrão mais detalhado e restritivo foi elaborado pelo CEN (2001^b). Ele define uma série de requisitos mínimos para a aplicação da CR, para torná-la comparável à radiografia convencional com filme, quando esta última for realizada correspondendo ao padrão da *International Organization for Standardization* – ISO 5579 (1998). A idéia principal da publicação do CEN (2001^b) é a aplicação de Indicadores de Qualidade da Imagem (IQI, ver Seção 2.5). A padronização para a qualificação dos sistemas está sob desenvolvimento conjunto pela ASTM e pelo CEN. Os padrões objetivam fazer com que a CR seja comparável à radiografia convencional.

Uma aplicação típica da tecnologia CR é a inspeção radiográfica da corrosão. A Fig. 2.8 apresenta um exemplo típico (EWERT, 2002). A tubulação possui isolamento térmico, e este é coberto com um envelope de alumínio. A inspeção radiográfica pode ser realizada sem que o isolamento seja removido. Isso representa uma vantagem considerável em relação aos outros métodos conhecidos. A inspeção radiográfica de corrosão em tubulação e a avaliação da espessura da parede é, especialmente em indústrias químicas, uma das grandes técnicas de ensaios não destrutivos – END – para manutenção preventiva.

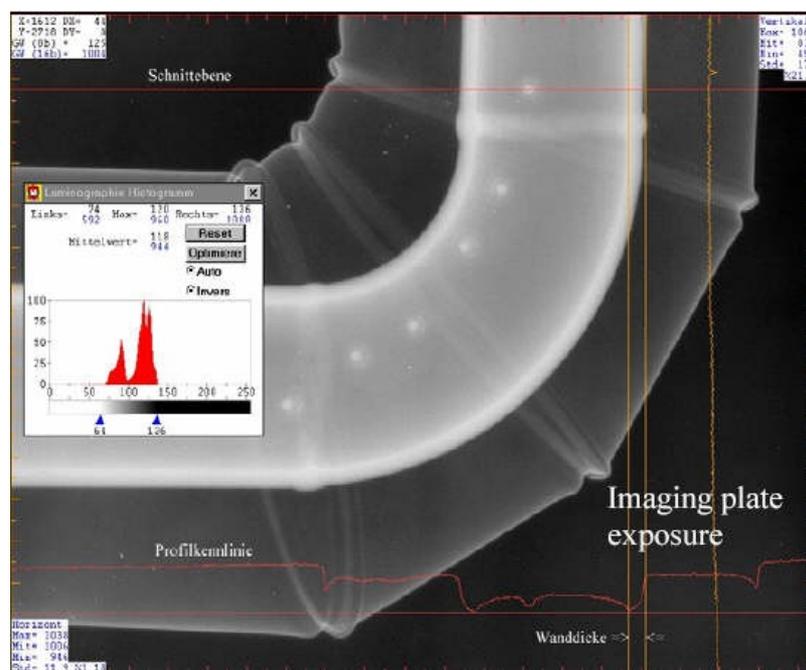


FIG. 2.8 - Radiografia computadorizada (CR) de uma tubulação com isolamento. A espessura da parede pode ser medida e não se observa corrosão (EWERT, 2002).

Existem diferentes sistemas de CR, e similarmente à radiografia convencional, o sistema apropriado deve ser escolhido de acordo com a aplicação específica. Embora os fabricantes possam deixar a impressão de que podem oferecer um sistema universal para todas as aplicações, tal fato não é correto.

A técnica CR pode ser aplicada com 5-10% do tempo de exposição da radiografia convencional com filme, dependendo do contraste e da resolução espacial requeridos.

Por exemplo, a aplicação do sistema filme/¹⁹²Ir, a qual requer duas horas de tempo de exposição, em muitos casos não é aceitável. Em contrapartida, placas de imagem IP espessas podem ser expostas em apenas cerca de 10 minutos, que é um tempo aceitável.

A discutida vantagem de menores tempos de exposição para as placas IP em comparação com o filme radiográfico aplica-se somente à inspeção de objetos com paredes espessas, e na faixa de energia de raios X acima de 300 kV, e para o ¹⁹²Ir. A CR com placas IP de alta resolução pode necessitar do mesmo tempo que as aplicações de radiografia convencional com filme, mas apresentam a vantagem da digitalização imediata da imagem. As placas IP de alta resolução podem ser utilizadas para aplicações com energias baixas e inspeção em soldas (EWERT, 2002).

2.5 AFERIÇÃO DA QUALIDADE DA IMAGEM

Para que se possa julgar a qualidade da imagem de uma certa radiografia são empregadas pequenas peças chamadas Indicadores de Qualidade de Imagem (IQI), colocadas sobre o objeto radiografado. Os IQI são também chamados “*penetrômetros*”.

O IQI é uma pequena peça construída com um material radiograficamente similar ao do material da peça ensaiada, com uma forma geometricamente simples, e que contém algumas variações de forma bem definidas, tais como furos ou entalhes. O tipo ou norma de fabricação do IQI deve ser aquela que o projeto de construção do equipamento a ser radiografado requerer, ou mesmo especificações contratuais.

2.5.1 IQI ASME E ASTM TIPO FUROS

Os IQI norte-americanos mais comuns consistem em uma fina placa de metal contendo três furos com diâmetros calibrados. Os IQI adotados pelas normas ASME, Section V SE-1025 (2006) ou ASTM E-1025 (2005^c) possuem três furos, cujos diâmetros são 4T, 2T e 1T, onde “T” corresponde à espessura do IQI. Nesses IQI, a sensibilidade é igual a 2% da espessura da peça a ser radiografada.

Para avaliar a técnica radiográfica empregada, faz-se a leitura do menor furo visto na radiografia. As classes de inspeção mais rigorosas são aquelas que requerem a visualização do menor furo do IQI. Dessa forma, é possível se determinar o nível de inspeção, ou seja, o nível mínimo de qualidade especificado para o ensaio.

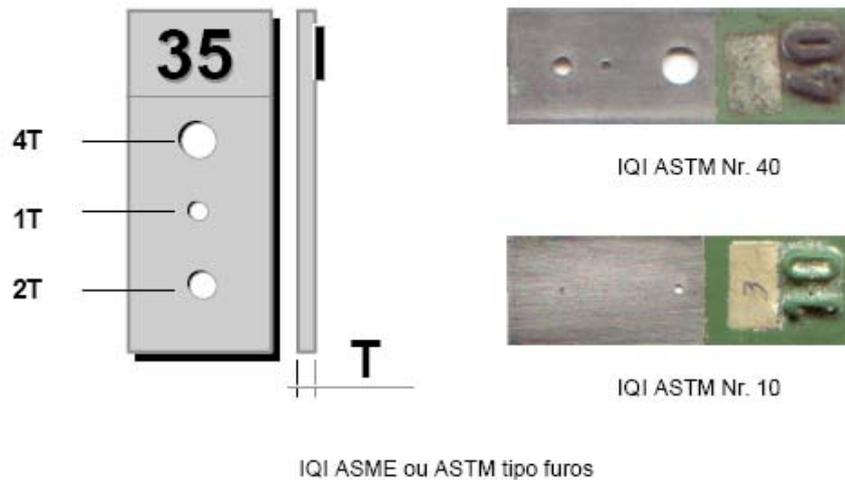


FIG 2.9 - Exemplo de IQIs tipo furos.

O nível de inspeção é indicado por dois números. O primeiro representa a espessura percentual do IQI; o segundo, o diâmetro do furo, que deverá ser visível na radiografia.

Os IQI tipo furos devem ser colocados sobre a peça ensaiada, com a face voltada para a fonte de radiação, de modo que o plano do mesmo seja normal ao feixe de radiação. Quando a inspeção for feita em soldas, o IQI deve ser colocado no metal de base, paralelo à solda, e à distância mínima de 3 mm. No caso de inspeção de solda, é importante lembrar que a seleção do IQI inclui o reforço, de ambos os lados da chapa. Portanto, para igualar a espessura sob o IQI à espessura da solda, deverão ser colocados calços sob o IQI, confeccionados com material radiograficamente similar ao do material inspecionado. Para efeito de determinação da área de interesse, não devem ser considerados os anéis ou tiras de cobre-junta, caso existam.

2.5.2 IQI ASTM TIPO FIOS

A norma ASTM E747 (2004) descreve um tipo de IQI denominado tipo fios, o qual se trata de um conjunto de cinco fios de material similar ao do material a ser radiografado, com diâmetros diferentes, desde o mais fino até o mais grosso. São selados em um envelope plástico transparente, contendo identificações e informações sobre o IQI.



FIG 2.10 - Exemplo de IQIs tipo fios.

O IQI deve ser colocado sobre a área de interesse. No caso de soldas, os fios devem estar aproximadamente perpendiculares ao cordão de solda. A seleção do IQI deve ser feita com base na espessura a ser radiografada, verificando qual o fio essencial que deverá ser visualizado na radiografia.

2.5.3 IQI CONFORME A NORMA DIN

O IQI fabricado conforme a norma DIN 54109 do *Deutsche Institute for Normalization* (DIN, 1989) é constituído por sete arames, dispostos paralelamente, e cujo material é radiograficamente similar ao material ensaiado.

A relação entre o diâmetro do arame e seu número respectivo é descrito na referida norma. Os arames foram divididos em três grupos, a saber: 1 a 7, 6 a 12 e 10 a 16. Quanto maior o número, menor o diâmetro, o que determina os níveis de qualidade.

Cada IQI caracteriza-se por conter as seguintes informações: símbolo DIN; o número 62, o qual indica o ano de produção desse tipo de IQI; a abreviatura do material do arame (por exemplo, Fe); o número do arame mais grosso (1, 6 ou 10); o símbolo da norma ISO; e o número do arame mais fino (7, 12 ou 16).

O IQI DIN deve ser colocado sobre a solda ou área de interesse, com o fio essencial na mesma direção do eixo principal de radiação, para garantir a maior sensibilidade possível. Em geral, a projeção do fio essencial mais fino requer técnicas apuradas, como filme mais sensível de granulação muito fina e distância fonte-filme maior. Sempre que possível, o IQI deve ser colocado sobre a solda de forma que os arames estejam perpendiculares à linha da solda, e de forma que a imagem dele apareça na zona central da radiografia. O número da qualidade de imagem é o número do arame mais fino visível na radiografia. O número requerido é definido para cada faixa de espessura de material. A classe de qualidade de imagem é função do rigor com que a inspeção deve ser feita, e deve ser especificado pelo fabricante, código ou projeto do equipamento.

2.6 COMPARAÇÃO ENTRE AS RADIOGRAFIAS CONVENCIONAL E DIGITAL

2.6.1 EQUIPAMENTOS ESPECÍFICOS À RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA (CR)

Além dos equipamentos comuns a ambas as técnicas, descritos anteriormente na seção 2.2, os equipamentos abaixo são específicos à técnica CR, e encontram-se ilustrados nas Figs. 2.11 e 2.12:

- Microcomputador com gravador de mídia (CD), monitor de vídeo e impressora;
- Escâner a laser e leitor ótico, portátil, para o processamento das imagens.

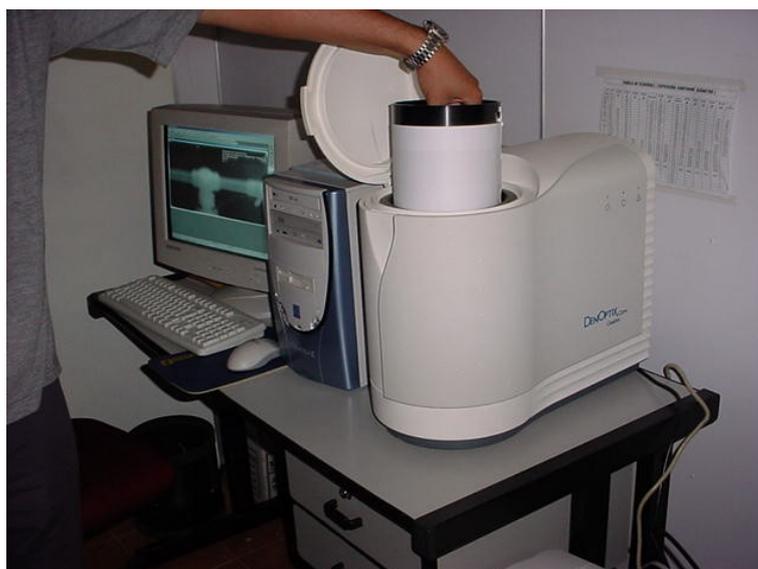


FIG. 2.11 - Equipamentos específicos à técnica de radiografia computadorizada (CR): microcomputador com monitor e escâner a laser com carrossel, portátil.

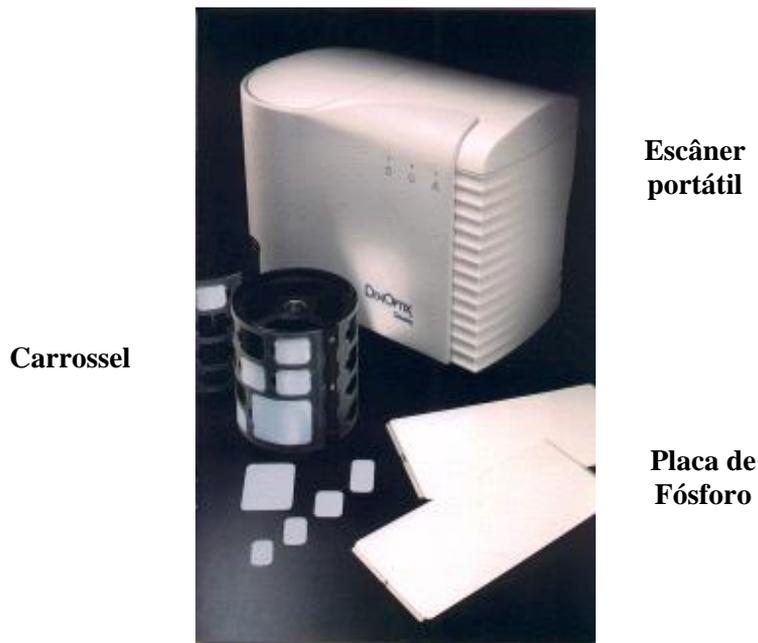


FIG. 2.12 - Escâner a laser portátil, de mesa, para radiografia computadorizada (CR).

2.6.2 PREPARATIVOS PARA AS RADIOGRAFIAS

2.6.2.1 RADIOGRAFIA CONVENCIONAL

Para a radiografia convencional, necessita-se preparar os filmes radiográficos na seqüência descrita a seguir, e ilustrada na Fig. 2.13:

- (a) Escolher o *écran* de chumbo e limpá-lo;
- (b) Preencher a etiqueta e colar ao *écran* de sal;
- (c) Colar a etiqueta, junto com *écran* de sal, ao *écran* de chumbo;
- (d) Levar o *écran* para câmara escura, e montá-lo com o filme;
- (e) Colocar o *écran* e o filme em um chassi; (f) Identificar o chassi, pelo lado externo, com a etiqueta.

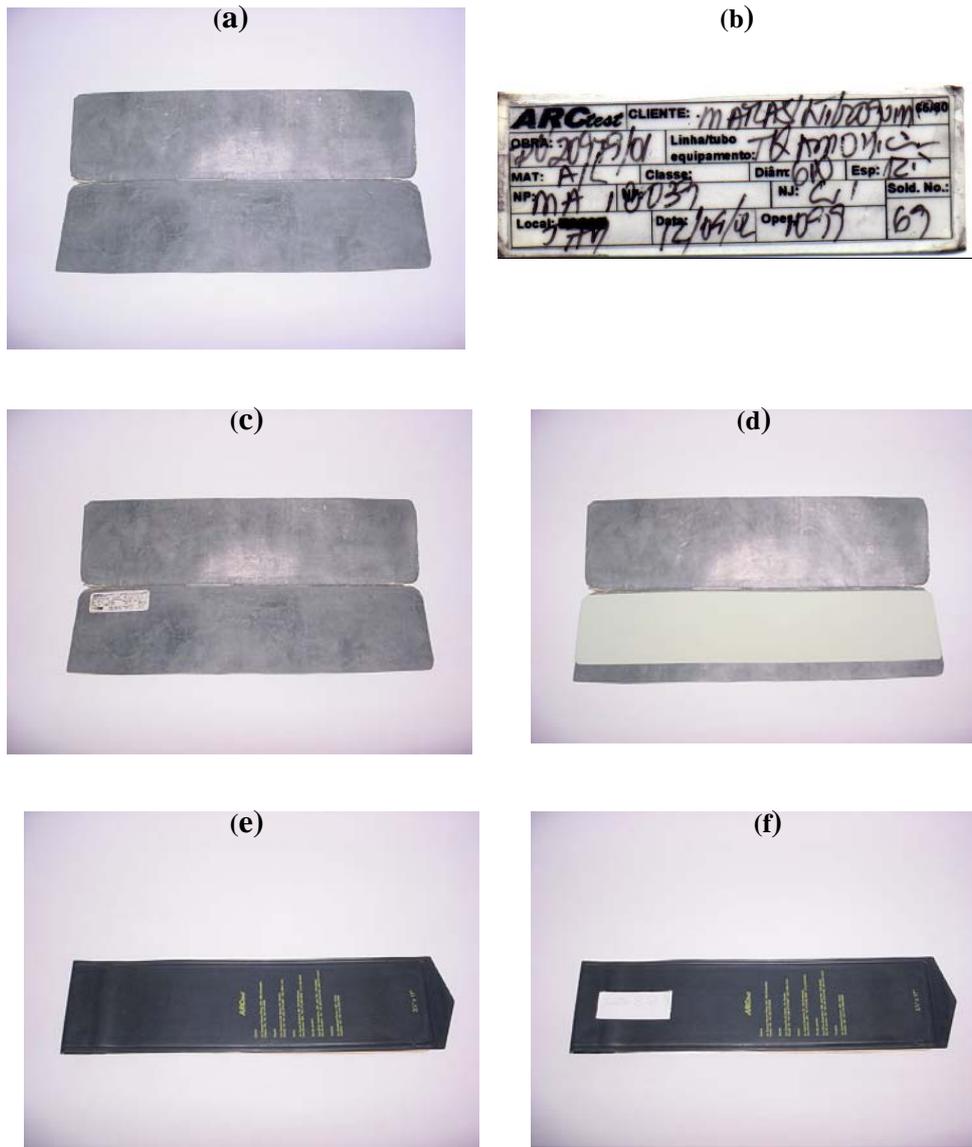


FIG. 2.13 - Preparação dos filmes radiográficos para a radiografia convencional.

2.6.2.2 RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA (CR)

Para a radiografia computadorizada, é necessário preparar a placa IP (Fig 2.14). Tal placa, a qual substitui o filme convencional, não é sensível à luz antes de ser exposta à radiação ionizante. Portanto, ela não velará se for removida do chassi antes da exposição radiográfica, como acontece com o filme convencional.

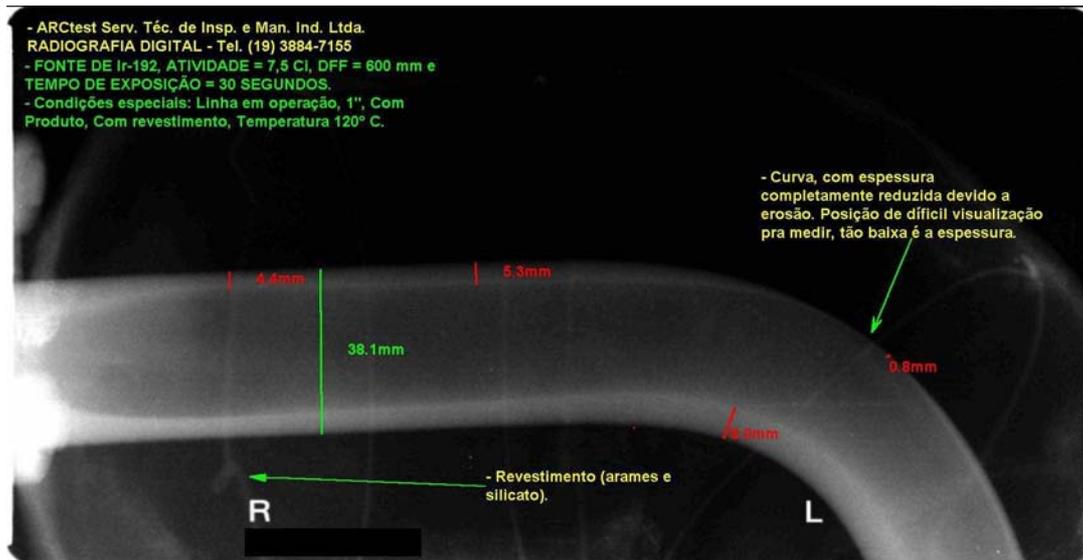


FIG. 2.16 - Exemplo de identificações na radiografia digital.

2.6.4 PROCESSAMENTO DOS FILMES RADIOGRÁFICOS

Para a radiografia convencional, necessita-se de uma câmara escura, com sala à prova de luz, climatizada, com água corrente para lavagem de filmes e luzes especiais vermelhas. O espaço físico mínimo necessário é de aproximadamente 18 m².

Para o sistema computadorizado (CR), necessita-se, para o processamento das placas IP, de escâneres portáteis. São necessários apenas dois a cinco minutos para obter-se a leitura da placa, com a imagem já na tela, completando um ciclo de processamento. A área mínima necessária para a instalação dos equipamentos é de 2,5 m², conforme o exemplo anteriormente mostrado na Fig. 2.11.

2.6.5 LAUDAGEM DE FILMES

O laudo é o parecer do perito laudista. Além da sensibilidade e experiência deste, para laudar-se um filme convencional (Fig. 2.17) necessita-se dispor dos itens relacionados abaixo:

- Acuidade visual e negatoscópio para leitura e interpretação;
- Lupas de aumento para melhor visualizar discontinuidades;
- Régua para a mensuração das discontinuidades;
- Densitômetro e fita densitométrica, para a avaliação de densidades dos filmes.



FIG. 2.17 - Exemplo de laudagem na radiografia convencional.

Para auxílio na laudagem no sistema computadorizado (CR), necessita-se das ferramentas de auxílio à interpretação de imagens contidas no *software*, tais como:

- Possibilidade de inversão de imagens, que propicia melhor visualização das possíveis discontinuidades, tais como (a) negativo para positivo; (b) baixo relevo; e (c) positivo em baixo relevo;
- Medição de tamanhos de discontinuidades: (a) lupa digital para ampliação das discontinuidades: a radiografia é ampliada somente na região de interesse, com a medição da discontinuidade; (b) caixa de ferramentas para escrita e/ou desenhos, com as seguintes possibilidades: caixas para demarcar áreas; linhas, setas indicativas, escritos e desenhos coloridos; e medição de ângulos.

2.6.6 ARMAZENAMENTO E GUARDA DE IMAGENS

O armazenamento de filmes convencionais requer grandes espaços físicos e cuidados especiais para armazená-los. Já na radiografia computadorizada (CR) as imagens são armazenadas em mídia digital (Fig. 2.18). A capacidade de armazenamento de um *compact disk* (CD), por exemplo, é de cerca de 500 imagens, o que equivale a mais de cinco caixas de filmes convencionais.



FIG. 2.18 - Armazenamento de imagens.
À esquerda, filmes radiográficos convencionais; à direita, CD utilizado na radiografia digital.

2.6.7 IMPRESSÃO DE IMAGENS

As imagens obtidas com a técnica CR podem ser impressas em impressoras comuns. Podem ser assim repassadas diretamente às frentes de trabalho, para serem efetuados os possíveis reparos, com todas as indicações de descontinuidades. As imagens geradas podem ser também enviadas via *internet*.

2.6.8 VANTAGENS LOGÍSTICAS DA TÉCNICA DIGITAL (CR)

Em resumo, a utilização da técnica CR traz diversas vantagens logísticas em relação à técnica convencional:

- Economia de espaços físicos, ao eliminar as etapas de revelação e fixação dos filmes convencionais, dispensando a câmara escura;
- Ausência de utilização de produtos químicos e do descarte de rejeitos;
- As imagens são geradas nos monitores de computadores pessoais;

- Menores tempos na obtenção de resultados, com maior produtividade em campo;
- Maior interação entre executores e usuários;
- Possibilidade de reutilização das placas de fósforo (placas IP);
- Menor tempo de exposição: as telas de fósforo são sensibilizadas com até 20 vezes menos radiação do que os filmes tipo II.

2.7 PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

2.7.1 DEFINIÇÃO

É o conjunto de medidas que visa a proteger o homem e o meio ambiente de possíveis efeitos indevidos causados pela radiação ionizante, de acordo com princípios básicos estabelecidos pela CNEN.

2.7.2 FINALIDADES DA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

- Evitar o surgimento de efeitos determinísticos mantendo as doses abaixo dos limites aplicáveis, e assegurar que se tomem todas as medidas possíveis para reduzir a indução de efeitos estocásticos;
- Proporcionar um nível adequado de proteção para as pessoas, sem limitar indevidamente as práticas benéficas nas quais ocorre exposição à radiação ionizante;
- Ajustar a realização de uma prática com o fim de maximizar o benefício líquido para o indivíduo ou para sociedade.

2.7.3 PRINCIPIOS DA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

a) Justificação: Qualquer atividade envolvendo radiação ou exposição deve ser justificada em relação a outras alternativas e produzir um benefício líquido positivo para a sociedade.

b) Otimização (ALARA - *As low as reasonably achievable*): O projeto, o planejamento do uso e a operação de instalação e de fontes de radiação devem ser feitos de modo a garantir que as exposições sejam tão reduzidas quanto razoavelmente exequível, levando-se em consideração fatores sociais e econômicos.

c) Limitação da Dose Individual: As doses individuais de indivíduos ocupacionalmente expostos e de indivíduos do público não devem exceder os limites anuais de dose equivalente estabelecidos na norma CNEN NN-3.01 (2005).

CAPÍTULO 3

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar e estudar – do ponto de vista da proteção radiológica – as vantagens e desvantagens da técnica de radiografia computadorizada (CR) em aplicações da radiografia industrial, comparando-a à técnica convencional com filme radiográfico.

Para tanto, foram planejados os seguintes objetivos específicos:

- Levantamento estatístico de todas as instalações abertas e fechadas de radiografia industrial existentes no País, dos radionuclídeos utilizados, e das respectivas atividades (item 3.1);
- Avaliação, de modo prático, em uma planta industrial, das doses inerentes à técnica da radiografia industrial digital (CR) em uma instalação, comparando-as às doses provenientes da radiografia industrial convencional com filme radiográfico (item 3.2);
- Estudo da viabilidade técnica da aplicação de novos radionuclídeos em gamagrafia industrial digital (CR), mais precisamente o estudo *in loco* em outra unidade industrial, para avaliar a viabilidade da aplicação de itérbio-169 em CR (item 3.3).

3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS E ELABORAÇÃO DOS INVENTÁRIOS

Para o desenvolvimento do presente trabalho, primeiramente foi realizado um levantamento estatístico acessando-se os dados cadastrais do banco de dados da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN-Sede), denominado Sistema de Instalações Radiativas – SIR.

No banco de dados da CNEN – o SIR – encontram-se listadas todas as indústrias usuárias de fontes radioativas no Brasil, listagem esta que discrimina a quantidade, a atividade e o tipo de fonte utilizada.

3.1.1 INSTALAÇÕES DE RADIOGRAFIA INDUSTRIAL NO PAÍS

Através do SIR, foi realizado o levantamento de todas as instalações de radiografia industrial registradas no País.

3.1.2 RADIONUCLÍDEOS USADOS EM RADIOGRAFIA INDUSTRIAL NO PAÍS

Foi também realizado, através do SIR, um levantamento da atividade das fontes radioativas utilizadas em gamagrafia industrial no País. Tal levantamento levou em consideração a técnica utilizada, isto é, se a convencional ou a digital (CR).

3.1.3 EMPRESAS PRESTADORAS DE SERVIÇOS DE RADIOGRAFIA DIGITAL

Foi realizado contato com as empresas usuárias da técnica de radiografia industrial. Constatou-se que apenas a “*Empresa A*” utiliza rotineiramente a técnica de radiografia digital (CR). A “*Empresa A*” é prestadora de serviços de radiografia industrial em instalações abertas e fechadas, em diversas localidades do País. Foi solicitado à mesma que concedesse licença formal para a realização de trabalhos conjuntos em pesquisa científica, e que permitisse o acesso às respectivas instalações. Assim, foram agendados estudos conjuntos, que constituíram-se na parte prática do presente trabalho.

3.2 ESTUDOS NA REFINARIA ALBERTO PASQUALINI – REFAP S/A

A instalação na qual foram realizados trabalhos conjuntos com a “*Empresa A*” foi a Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP S/A), localizada na Avenida Getúlio Vargas, na cidade de Canoas, RS. A Fig. 3.1 ilustra parte da instalação.



FIG. 3.1 - Vista parcial da planta da REFAP S/A.

3.2.1 FONTES DE RADIAÇÃO IONIZANTE UTILIZADAS NA REFAP S/A

Em função dos diâmetros e espessuras envolvidos no ensaio e da localização das tubulações, foram realizadas na instalação radiografias industriais com as seguintes fontes de radiação, pertencentes à “*Empresa A*”:

- Radiografias digitais com fonte de ^{75}Se , com atividade de 266,8 GBq (7,21 Ci);
- Radiografias digitais com um equipamento de raios X, potencial constante, com capacidade nominal de 160 kV, 10 mA, e abertura do feixe da ampola com $40^\circ \times 60^\circ$;
- Radiografias digitais com fonte de ^{192}Ir com 251,6 GBq (6,80 Ci).

3.2.1.1 FONTE DE ^{75}Se

Na instalação foram executadas radiografias industriais digitais com ^{75}Se em juntas soldadas em tubulações de aço-carbono, em área industrial classificada como instalação aberta, segundo a norma CNEN NN-6-04 (1988), em tubulações de 3/4” a 3” de diâmetro, em uma caldeira e em uma unidade de coogeração.

A fonte de ^{75}Se encontrava-se alojada em um irradiador *Isotopen-Technik Dr. Sauerwein*, modelo *Gammamat SE* (MDS Nordion, Canadá), com comandos do mesmo fabricante.

O uso da fonte de ^{75}Se com baixa atividade – 266,8 GBq (7,21 Ci) – visava a obter tempos de fonte exposta menores, e o maior número possível de juntas radiografadas por dia, pela técnica CR. Em consequência, haveria menos dias de exposição ao risco radiológico, tanto de indivíduos do público quanto de indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE), com menor custo econômico e social.

Para a técnica convencional, de acordo com estudos preliminares, a fonte de ^{75}Se deveria possuir atividade maior, de 2,22 TBq (60 Ci).

3.2.1.2 FONTE DE ^{192}Ir

Na instalação foram executadas radiografias industriais digitais (CR) com ^{192}Ir em juntas soldadas em tubulações de aço-carbono, em área industrial classificada como instalação aberta, segundo a norma CNEN NN-6-04 (1988), em tubulações de 3” de diâmetro, em trocadores de calor do tipo “duplo tubo”.

A fonte de ^{192}Ir possuía também baixa atividade – 251,6 GBq (6,80 Ci). Encontrava-se em um irradiador *Isotopen-Technik Dr. Sauerwein*, modelo *Gammamat TI-F* (MDS Nordion, Canadá), com comandos do mesmo fabricante.

Para a técnica convencional, de acordo com estudos preliminares, a fonte de ^{192}Ir deveria possuir atividade maior, de 925 GBq (25 Ci).

3.2.1.3 EQUIPAMENTO DE RAIOS X

Foi utilizado um aparelho de raios X com potencial constante, marca *Seifert*, com capacidade nominal de 160 kV, 10 mA, e abertura do feixe da ampola com 40° x 60°.

O gerador de raios X de potencial constante é constituído basicamente de três partes: unidade de comando; transformador e ampola. Possui circuito de *Greinacher*, em vez do circuito de *Villard* utilizado nos equipamentos convencionais. Tal circuito permite uma diminuição dos feixes de baixa energia, e a emissão máxima corresponde a 0,74 da tensão de pico aplicada, proporcionando um feixe de maior poder de penetração e menor tempo de exposição. Em função do equipamento ser montado sobre um transportador manual e a ampola do equipamento ser constituída em separado, tem-se como resultado um transporte e manuseio facilitados.

O aparelho gerador de raios X permaneceu no nível do solo, só sendo deslocada a ampola, até o nível das juntas a serem radiografadas.

Os serviços de radiografia digital utilizando o equipamento gerador de raios X foram executados em juntas soldadas de tubulações de aço carbono e inox, com diâmetros variando entre 1” e 24”, e espessuras variando entre 3,91 e 40 mm.

3.2.2 ACESSÓRIOS CONVENCIONAIS UTILIZADOS PELA “EMPRESA A”

3.2.2.1 ACESSÓRIOS PARA AS RADIOGRAFIAS COM ^{75}Se E ^{192}Ir NA REFAP

- Medidor portátil de radiação tipo *Geiger-Müller*, marca *Graetz*, com capacidade de medir taxas de exposição entre 0,1 mR/h e 1,0 R/h (1 $\mu\text{Sv/h}$ e 10 mSv/h);
- Monitores individuais com alarme (*bip* de radiação), marca *Radiatest*;
- Colimador com fator de redução FR de 99,5 x para o Se-75;
- Mangueira de bico, tipo flexível;
- Vinte placas, seis lanternas e 200 metros de cordas para sinalização;
- Abafadores de chumbo: duas placas de chumbo com 300 x 300 x 6,38 mm, utilizadas curvadas em forma de concha sobre a tubulação, no lado da placa IP, na técnica PD-VS;
- Na técnica PD-VD (duas placas IP a 90°) foi utilizado colimador de tungstênio com fator de atenuação de 99,5 x, com o feixe radioativo direcionado para o solo. As dimensões da placa de chumbo, no lado oposto ao colimador, quando necessária, eram de 810 x 810 x 2 mm, pois os tempos de fonte exposta na radiografia digital são pequenos;
- Acessórios de emergência: contêiner de resgate com fator de redução de 6 CSR (camada semiredutora); funil para acoplamento no contêiner de resgate; pinça de resgate, com comprimento de 1 m; quatro placas de chumbo com dimensões de 300 x 300 x 6,38 mm; caixa de ferramentas; cordas (200 m) e seis sinais luminosos; 20 placas de sinalização para o raio de balizamento, conforme necessário.

3.2.2.2 ACESSÓRIOS PARA AS RADIOGRAFIAS COM RAIOS X NA REFAP

- Medidor portátil de radiação tipo *Geiger-Müller*, marca *Graetz*, com capacidade de medir taxas de exposição entre 0,1 mR/h e 1,0 R/h (1 $\mu\text{Sv/h}$ e 10 mSv/h);
- Monitores individuais com alarme (*bip* de radiação), marca *Radiatest*;
- Oito placas, duas lanternas e 100 metros de cordas para sinalização;
- Placas de chumbo com espessuras variando de 0,5 a 6 mm.

3.2.3 EQUIPAMENTOS E SISTEMAS DE CR DA “EMPRESA A”

Para a obtenção de imagens digitais, foram utilizados os equipamentos da “*Empresa A*” descritos a seguir.

- *Hardware*:

- Microcomputador pessoal (PC) com micro-processador tipo Intel[®] PENTIUM III 750 Mhz, memória RAM com 128 Mb, placa de vídeo com 34 Mb;
- Monitor: dimensão de 17”, resolução 1280 x 1024 dpi, luminosidade de 350 cd/m², homogeneidade compatível com o teste de verificação de acordo com os padrões SMTPE (*Society of Motion Picture and Television Engineers*);
- Leitor ótico (aquisitor de imagem digital): fabricante Gendex[®], modelo: DenOptix[™], tipo carrossel, configuração de dispositivo laser classe I – varredura vertical;
- Telas flexíveis aquisitoras de imagens: Princípio de funcionamento: leitura a laser da fotoluminescência de sais de fósforo excitados por radiação ionizante, dimensões 75 x 150 mm / 75 x 300 mm / 150 x 300 mm, resolução de 4 linhas pares por milímetro para 150 dpi – dado do fabricante (Gendex[®] - AGFA[®]).

- *Software*: fabricante Gendex[®], tipo Vix Win, versão PRO.

3.2.4 DOSÍMETROS TERMOLUMINESCENTES (TLD)

Os dosímetros termoluminescentes do tipo TLD foram fornecidos pelo Serviço de Monitoração Externa (SEMEX) do Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD/CNEN), laboratório autorizado pela CNEN.

Nos trabalhos de campo realizados na instalação REFAP S/A, foram usados 25 monitores, cada um contendo cinco dosímetros TLD. As sensibilidades mínima e máxima dos dosímetros eram, respectivamente, 5 µGy e 50 µGy.

Um dos monitores era o monitor controle, não utilizado em experimentos práticos, e que somente acompanhava os demais em todo o trajeto percorrido.

Para cada um dos três tipos de radiação (^{75}Se , ^{192}Ir ou raios X) utilizou-se oito monitores, conforme exemplifica a Fig. 3.2.



FIG. 3.2 – Vinte e cinco monitores, cada um contendo cinco dosímetros TLD, utilizados nos experimentos na REFAP S/A.

Os dosímetros TLD foram utilizados para a medida e registro das doses envolvidas com a técnica de CR. Foram colocados nos raios de balizamento, posicionados a 1 metro de altura, de acordo com os esquemas das Figuras 3.3, 3.4 e 3.5.

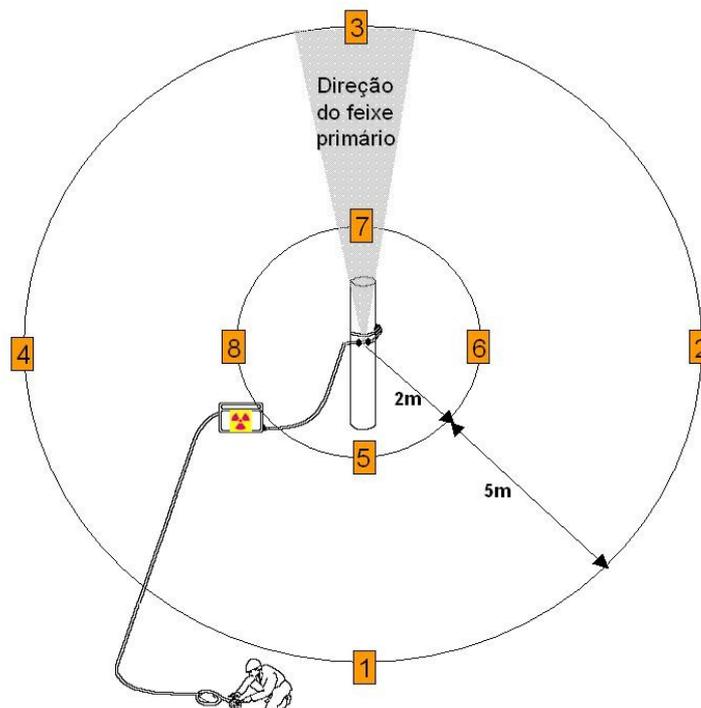


FIG. 3.3 - Localização dos monitores, cada um contendo cinco dosímetros TLD, utilizados nos experimentos com ^{75}Se , técnica CR, na REFAP S/A.

Para o ^{75}Se , os monitores de 1 a 4 foram posicionados a 7 metros de distância da fonte, enquanto que os monitores de 5 a 8 foram posicionados a 2 metros de distância da fonte. Os monitores 3 e 7 estavam na direção do feixe primário. Havia colimador, com o objetivo de reduzir a dose, mas não foi colocada placa de chumbo (abafador). Em ensaios rotineiros são utilizadas tais blindagens adicionais, com o objetivo de reduzir o isolamento de área e risco máximo. O ensaio foi realizado após as 22 horas.

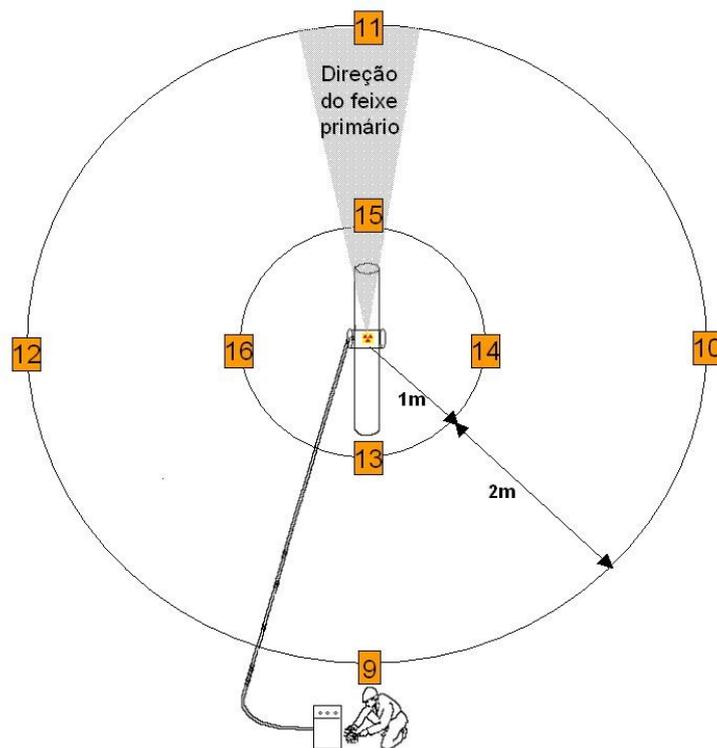


FIG. 3.4 - Localização dos monitores, cada um contendo cinco dosímetros TLD, utilizados nos experimentos com raios X, técnica CR, na REFAP S/A.

Para os raios X, os monitores de 9 a 12 foram posicionados a 3 metros de distância da fonte de radiação, enquanto que os monitores de 13 a 16 foram posicionados a 1 metro de distância da fonte de radiação. Os monitores 11 e 15 estavam na direção do feixe primário, mas havia placa de chumbo (abafador), com o objetivo de reduzir a dose, uma vez que o ensaio foi realizado às 16 horas, quando havia muitos Indivíduos do Público próximos ao local.

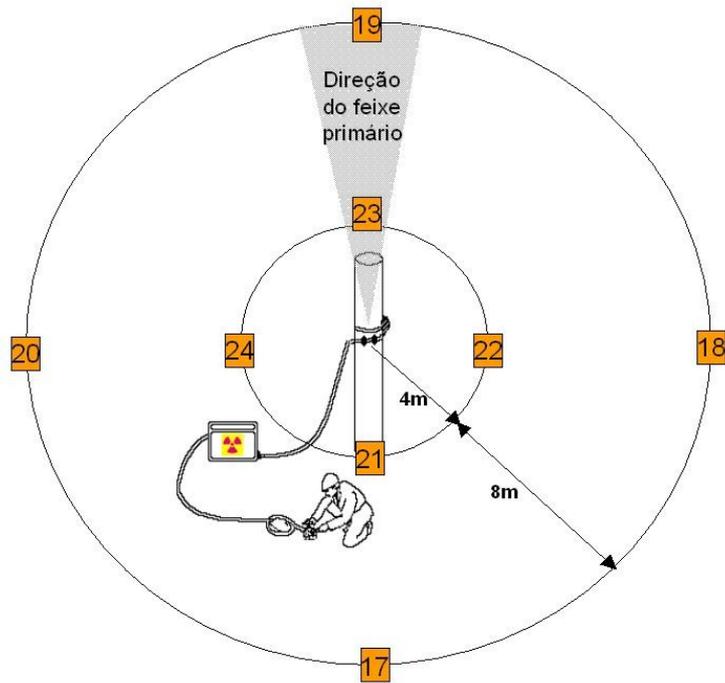


FIG. 3.5 - Localização dos monitores, cada um contendo cinco dosímetros TLD, utilizados nos experimentos com ^{192}Ir , técnica CR, na REFAP S/A.

Para o ^{192}Ir , os monitores de 17 a 20 foram posicionados a 12 metros de distância da fonte, enquanto que os monitores de 21 a 24 foram posicionados a 4 metros de distância da fonte. Os monitores 19 e 23 estavam na direção do feixe primário. Havia colimador, com o objetivo de reduzir a dose, mas não foi colocada placa de chumbo (abafador). Em ensaios rotineiros são utilizadas tais blindagens adicionais, com o objetivo de reduzir o isolamento de área e risco máximo. O ensaio foi realizado após as 23 horas.

3.2.5 LIMITES ANUAIS DE DOSE

As radiografias industriais realizadas na instalação (REFAP S/A) foram planejadas de modo que as doses individuais não excedessem os limites primários definidos na Norma CNEN NN-3.01 (2005), ou seja:

- Para indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE): 20 mSv/ano, com média ponderada em 5 anos consecutivos, desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano.
- Para indivíduos do público: 1 mSv/ano.

Para garantir que os limites anuais especificados acima não seriam excedidos, foram deduzidos os limites derivados diários destacados a seguir, que foram utilizados nos cálculos dos balizamentos utilizados durante os procedimentos, e que definiam as áreas controlada e livre:

- Para indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE): o limite derivado é 0,08 mSv/dia ou 0,01 mSv/hora.
- Para indivíduos do público: o limite derivado é 0,004 mSv/dia.

3.2.6 RADIOGRAFIAS DIGITAIS COM A FONTE DE SELÊNIO-75

Como havia tubulações de diversos diâmetros e espessuras, na Tabela 3.1 estão relacionados alguns dados, como por exemplo o tempo de fonte exposta por filme e a técnica utilizada para a radiografia digital com a fonte de ⁷⁵Se com atividade de 266,8 GBq (7,21 Ci).

Tabela 3.1: Parâmetros para a fonte de ⁷⁵Se com atividade de 266,8 GBq (7,21 Ci*).

φ externo (")	Espessura (mm)	Tempo de exposição por placa (min)	DDF ^a mínima (mm)	Nº total de placas por junta	Tempo de exposição por junta (h)	Técnica radiográfica digital	Tipo de placa
3/4"	3,91	1,46	700	2	0,050	PD-VD	Fósforo
1"	4,54	1,54	700	2	0,051	PD-VD	Fósforo
1 1/2"	5,08	1,63	700	2	0,054	PD-VD	Fósforo
2"	5,54	0,08	150	4	0,005	PD-VS	Fósforo
2 1/2"	7,01	0,09	150	4	0,006	PD-VS	Fósforo
3"	7,62	0,10	150	4	0,007	PD-VS	Fósforo

^a DDF = distância fonte-placa IP.

* Para efeito de cálculo, a atividade da fonte de ⁷⁵Se considerada corresponde a 40% da atividade da fonte de ¹⁹²Ir, devido à diferença do gamão entre os radioisótopos.

Os valores de tempo de exposição, por placa, foram calculados pela Equação 3.1 (JOSÉ *et al.*, 2002):

$$T = \frac{d^2 \cdot FE}{A} \cdot S \quad (3.1)$$

onde: T = tempo de fonte exposta (min); d = distância fonte - placa (pol); FE = fator de exposição, em função da Tabela 3.2 (tempo de exposição); A = atividade da fonte (Ci); S = sensibilidade da placa de fósforo. Em função de resultados práticos obtidos pela Empresa A, para o ⁷⁵Se foi utilizado S = 0,05 nas técnicas PD-VD e PD-VS.

A Tabela 3.2 é fornecida pela *Kodak*. Refere-se aos parâmetros de tempo de exposição para fontes de ^{192}Ir . Para obter o tempo de exposição para outros radioisótopos, utiliza-se a mesma Tabela; entretanto, deve-se considerar a diferença entre o gamão do radioisótopo utilizado e o gamão do ^{192}Ir .

Tabela 3.2: Parâmetros de tempo para exposição com fonte de ^{192}Ir e densidade 2.2.
(Esp = espessura, por parede).

Esp	Fator de exposição						
1	0,0747	26	0,3030	51	1,2293	76	4,9865
2	0,0790	27	0,3205	52	1,3001	77	5,2738
3	0,0835	28	0,3390	53	1,3750	78	5,5776
4	0,0883	29	0,3585	54	1,4543	79	5,8989
5	0,0934	30	0,3791	55	1,5380	80	6,2388
6	0,0988	31	0,4010	56	1,6266	81	6,5982
7	0,1045	32	0,4241	57	1,7204	82	6,9783
8	0,1105	33	0,4485	58	1,8195	83	7,3803
9	0,1169	34	0,4744	59	1,9243	84	7,8055
10	0,1236	35	0,5017	60	2,0351	85	8,2551
11	0,1308	36	0,5306	61	2,1524	86	8,7307
12	0,1383	37	0,5612	62	2,2764	87	9,2337
13	0,1463	38	0,5935	63	2,4075	88	9,7656
14	0,1547	39	0,6277	64	2,5462	89	10,328
15	0,1636	40	0,6639	65	2,6929	90	10,923
16	0,1731	41	0,7021	66	2,8480	91	11,552
17	0,1830	42	0,7426	67	3,0121	92	12,218
18	0,1936	43	0,7853	68	3,1856	93	12,921
19	0,2047	44	0,8306	69	3,3692	94	13,666
20	0,2165	45	0,8784	70	3,5633	95	14,453
21	0,2290	46	0,9290	71	3,7685	96	15,286
22	0,2422	47	0,9826	72	3,9856	97	16,166
23	0,2562	48	1,0392	73	4,2153	98	17,098
24	0,2709	49	1,0990	74	4,4581	99	18,083
25	0,2865	50	1,1624	75	4,7149		

3.2.7 RADIOGRAFIAS CONVENCIONAIS COM A FONTE DE SELÊNIO-75

Na Tabela 3.3 encontram-se os dados para radiografia convencional com a fonte de ^{75}Se com atividade de 266,8 GBq (7,21 Ci).

Tabela 3.3: Parâmetros para a fonte de ^{75}Se com atividade de 266,8 GBq (7,21 Ci*).

ϕ externo (")	Espessura (mm)	Tempo de exposição por filme (min)	DDF ^a mínima (mm)	Nº total de filmes por junta	Tempo de exposição por junta (h)	Técnica radiográfica convencional	Tipo de filme ^b
3/4"	3,91	87	700	2	2,9	PD-VD	tipo I
1"	4,54	92	700	2	3,1	PD-VD	tipo I
1 1/2"	5,08	98	700	2	3,3	PD-VD	tipo I
2"	5,54	4,8	150	4	0,32	PD-VS	tipo I
2 1/2"	7,01	5,6	150	4	0,37	PD-VS	tipo I
3"	7,62	5,9	150	4	0,39	PD-VS	tipo I

* Para efeito de cálculo, a atividade da fonte de ^{75}Se considerada corresponde a 40% da atividade da fonte de ^{192}Ir , devido à diferença do gamão entre os radioisótopos.

^a DDF = distância fonte-filme;

^b O filme tipo I é um filme lento, mas é o ideal para a espessura do material a ser radiografado. A sensibilidade é três vezes maior do que a do filme tipo II.

Os valores de tempo de exposição da Tabela 3.3, por filme, também foram calculados através da Equação 3.1, dada anteriormente, onde: T = tempo de fonte exposta (min); d = distância fonte-filme (pol); FE = fator de exposição, em função da Tabela 3.2; A = atividade da fonte (Ci); S = sensibilidade do filme radiográfico. Para ambas as técnicas (PD-VD ou PD-VS), o valor de S é 3. Tal valor de sensibilidade refere-se ao filme lento (tipo I), que é o filme ideal para materiais com espessura de até 9,5 mm. Se utilizássemos filmes rápidos (tipo II), teríamos tempos de exposição menores; entretanto, não alcançaríamos a qualidade de radiografia requerida.

Através da Tabela 3.3, podemos observar que o tempo de fonte exposta por filme aumentou consideravelmente em relação à técnica CR, já que, para atingir a sensibilidade radiográfica do filme, torna-se necessária uma maior exposição. O acréscimo de tempo corresponde a 60 vezes o tempo da técnica CR.

Concluiu-se, então, que a utilização, na radiografia convencional, da mesma fonte de ^{75}Se com atividade de 266,8 GBq (7,21 Ci) tornaria o serviço significativamente improdutivo e, portanto, financeiramente inviável.

Para aumentar a produtividade do serviço a ser executado, é necessário utilizar uma fonte de ^{75}Se com maior atividade, reduzindo assim o tempo de fonte exposta necessária para sensibilizar o filme na radiografia convencional.

Na Tabela 3.4 temos os dados para radiografia convencional, utilizando uma fonte de ^{75}Se com atividade de 2,22 TBq (60 Ci).

Tabela 3.4: Parâmetros para a fonte de ^{75}Se com atividade de 2,22 TBq (60 Ci*).

ϕ externo (")	Espessura (mm)	Tempo de exposição por filme (min)	DDF ^a mínima (mm)	Nº total de filmes por junta	Tempo de exposição por junta (h)	Técnica radiográfica convencional	Tipo de filme ^b
3/4"	3,91	10,49	700	2	0,35	PD-VD	tipo I
1"	4,54	11,10	700	2	0,37	PD-VD	tipo I
1 1/2"	5,08	11,73	700	2	0,39	PD-VD	tipo I
2"	5,54	0,57	150	4	0,04	PD-VS	tipo I
2 1/2"	7,01	0,67	150	4	0,04	PD-VS	tipo I
3"	7,62	0,71	150	4	0,05	PD-VS	tipo I

* Para efeito de cálculo, a atividade da fonte de ^{75}Se corresponde a 40% da atividade da fonte de ^{192}Ir , devido à diferença do gamão entre os radioisótopos.

^a DDF = distância fonte-filme;

^b Filme tipo I, que é um filme lento, mas é o filme ideal para a espessura do material a ser radiografado. A sensibilidade é três vezes maior do que a do filme tipo II.

Para a fonte de ^{75}Se com maior atividade (Tabela 3.4), observa-se que o acréscimo de tempo de fonte exposta, em relação à técnica CR (Tabela 3.1), é de aproximadamente sete vezes, demonstrando que apesar da fonte possuir uma atividade maior (2,22 GBq \cong 60 Ci), ainda assim a produtividade será menor do que na técnica CR, que utiliza fontes com atividades bem menores.

3.2.8 CÁLCULO DO BALIZAMENTO DE ÁREAS PARA O ^{75}SE – REFAP

O balizamento, o qual delimita as áreas classificadas, foi elaborado através de cálculos teóricos, os quais foram confirmados e registrados através de monitorações de área. Posteriormente, também foi utilizada a leitura dos dosímetros TLD, posicionados conforme descrito na Seção 3.2.4, utilizados na técnica CR.

A confirmação e validação, através das monitorações de área, deu-se da seguinte forma:

- Foram efetuadas duas medidas com o monitor *Geiger-Müller* no mesmo local do balizamento (d_1 e d_2), sendo uma atenuada pelo colimador e a outra atenuada pelo tubo de aço;

- O valor dessas leituras (M) deveria ser igual ou menor que a dose máxima diária para indivíduos do público (0,004 mSv/dia = 0,4 mrem/dia), dividida pelo número de horas (t) de fonte exposta no dia.

Assim,

$$M \leq \frac{0,4}{t} \quad (3.2)$$

Os cálculos diários de balizamento para a execução dos ensaios radiográficos em tubulações eram realizados através das seguintes equações:

Na técnica PD-VS (parede dupla – vista simples):

$$d_1 = \sqrt{\frac{\Gamma \cdot A \cdot t}{0,4 \cdot FR_{colimador}}} \quad (3.3)$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{\Gamma \cdot A \cdot t}{0,4 \cdot FR_{tubo} \cdot FR_{abafador}}} \quad (3.4)$$

Na técnica PD-VD (parede dupla – vista dupla):

$$d_1 = \sqrt{\frac{\Gamma \cdot A \cdot t}{0,4 \cdot FR_{colimador}}} \quad (3.5)$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{\Gamma \cdot A \cdot t}{0,4 \cdot FR_{abafador}}} \quad (3.6)$$

onde: d = distância mínima para o balizamento (m); Γ = constante específica da fonte ($^{75}\text{Se} = 203 \text{ mR}\cdot\text{m}^2/\text{h}\cdot\text{Ci}$); A = atividade da fonte (Ci); t = tempo de fonte exposta por dia (h); H = dose derivada diária para indivíduo do público = 0,4 mrem (0,004 mSv); FR_{tubo} = fator de redução devido à dupla parede do tubo de aço; $FR_{colimador}$ = fator de redução devido ao colimador (99,5 x); $FR_{abafador}$ = fator de redução devido ao abafador de chumbo.

FR é calculado pela seguinte expressão:

$$FR = e^{\mu X} \quad (3.7)$$

3.2.9 RADIOGRAFIAS DIGITAIS COM RAIOS X

As Tabelas 3.5 e 3.6 mostram as características técnicas das juntas radiografadas com raios X na REFAP.

Tabela 3.5: Características técnicas das juntas radiografadas com raios X.

Φ externo (")	Espessura (mm)	DFE mínima (mm) ^a	Placas ou filmes por junta	Técnica radiográfica	Tempo de exposição por junta
$1 \leq \Phi \leq 3 \frac{1}{2}$	$3,5 \leq E \leq 6,4$	700	2	PD-VD - elipse	Deve-se calcular através do gráfico do aparelho de raios X (Figura 3.6). Para CR o tempo é 10 x menor.
$1 \leq \Phi \leq 3 \frac{1}{2}$	$6,4 < E \leq 9,5$	700			
$1 \leq \Phi \leq 3 \frac{1}{2}$	$3,5 \leq E \leq 6,4$	700	3	PD-VD - sobreposta	
$1 \leq \Phi \leq 3 \frac{1}{2}$	$6,4 < E \leq 9,5$	700			
$2 \leq \Phi \leq 3 \frac{1}{2}$	$3,5 \leq E \leq 6,4$	130	5	PD-VS	
$2 \leq \Phi \leq 3 \frac{1}{2}$	$6,4 < E \leq 9,5$	130			
$2 \frac{1}{2} \leq \Phi \leq 3 \frac{1}{2}$	$9,5 < E \leq 12,7$	130			
De 4 a 24	$3,5 \leq E \leq 6,4$	225	Ver Tabela 3.6		
	$6,4 < E \leq 9,5$	225			
	$9,5 < E \leq 12,7$	225			
	$12,7 < E \leq 19,0$	225			
	$19,0 < E \leq 25,4$	250			
	$25,4 < E \leq 33,5$	250			

^aDFE = distância fonte-placa IP ou fonte-filme.

Tabela 3.6: Placas IP ou filmes por juntas radiografadas com raios X.

Diâmetro externo (polegadas)	Quantidade de placas IP ou filmes por junta
$4 \leq \phi \leq 8 \frac{1}{2}$	5
$8 \frac{1}{2} < \phi \leq 12$	4
$12 < \phi \leq 14$	5
$14 < \phi \leq 18$	6
$18 < \phi \leq 22$	7
$22 < \phi \leq 24$	8

O tempo de exposição por junta é estimado através do gráfico da Fig. 3.6, referente ao aparelho gerador de raios X marca *Seifert* com potencial constante. O tempo é função da kV e da mA. Para CR o tempo é 10 vezes menor.

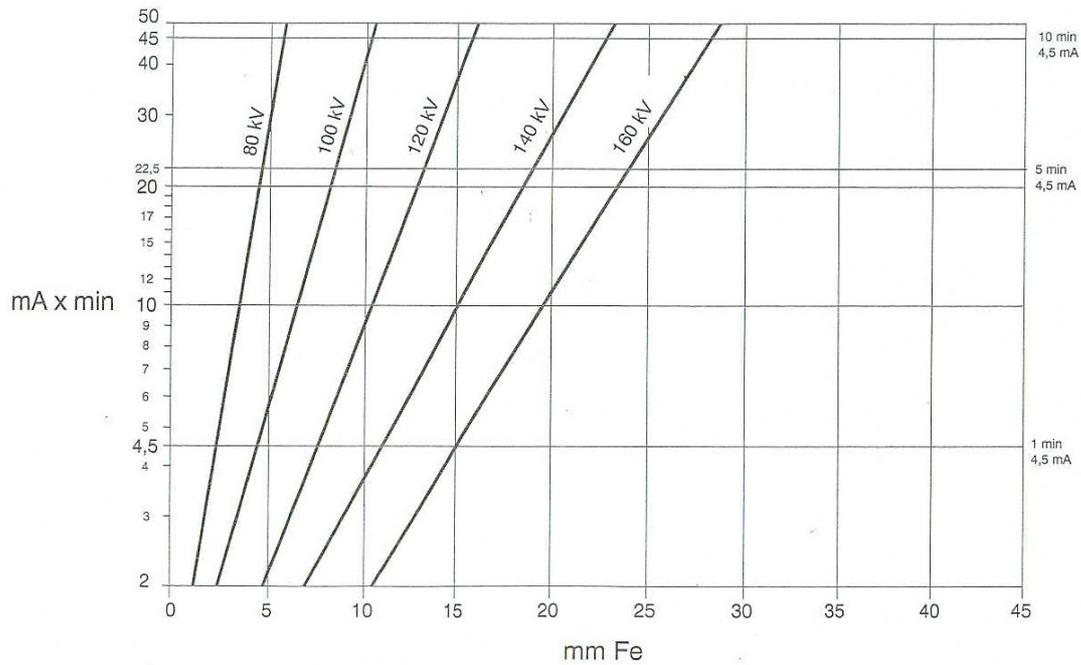


FIG. 3.6 - Gráfico para o equipamento gerador de raios X *Seifert*.
Dados válidos somente com a remoção do disco de proteção de Al e sem o filtro de Cu.

As Figs. 3.7 e 3.8 ilustram as técnicas PD-VD e PD-VS com raios X, respectivamente.



FIG. 3.7 - Exemplo de arranjo para a técnica radiográfica PD-VD.



FIG. 3.8 - Exemplo de arranjo para a técnica radiográfica PD-VS.

3.2.10 CÁLCULO DO BALIZAMENTO DE ÁREAS PARA OS RAIOS X

Abaixo se encontra a expressão matemática utilizada para o cálculo do isolamento de áreas para a execução dos ensaios radiográficos com raios X.

$$d_1 = \sqrt{\frac{mA \cdot K \cdot t \cdot U \cdot T}{X \cdot 2^{E/m}}} \quad (3.8)$$

onde: d_1 = distância estimada (m); mA = corrente do tubo; X = exposição limite para indivíduos do público (0,05 mR/h ou 0,40 mR/d) ou sua proporção pelo número de juntas efetuadas por dia, ou seja, 0,40/número de juntas radiografadas; K = taxa de exposição em mR/h a 1 m (ver Tabela 3.7); E = espessura da chapa, tubo, placa de Pb, como blindagem (mm); m = camada de semi-transmissão (mm, ver Tabela 3.8); t = tempo total de exposição (h); U = fator de uso do aparelho = 1; T = fator de ocupação = 1.

Às vezes considera-se o fator de uso do aparelho (U) igual a 1/2 ou 1/3 para a técnica PD-VD (parede dupla – vista dupla) elipse ou sobreposta, e 1/4 ou 1/n para a técnica PD-VS (parede dupla – vista simples), em função das diversas direções para as quais a ampola de

raios X é direcionada. O denominador do fator de uso é igual ao número de exposições por junta.

Considerou-se sempre o fator de ocupação T igual a 1, porque os trabalhos de radiografia digital foram realizados no mesmo turno em que indivíduos do público realizavam outras atividades na REFAP S/A.

Tabela 3.7: Taxa de exposição em função da tensão (kV).

Tensão (kV)	Exposição (mR/h a 1 m por mA)
100	400
120	500
140	750
160	1,075
180	1,475
200	1,925
250	2,750
300	3,375

Tabela 3.8: Camada de semitransmissão (mm) para aço, alumínio e chumbo, em função da tensão do equipamento gerador de raios X (kV).

Tensão (kV)	100	120	140	160	180	200	250	300
mm de aço	0,40	0,45	0,53	0,65	0,85	1,00	1,60	2,60
mm de alumínio	16,30	18,00	20,00	21,00	22,00	23,50	26,60	28,30
mm de chumbo	0,27	0,28	0,30	0,32	0,46	0,52	0,88	1,47

3.2.11 RADIOGRAFIAS DIGITAIS COM IRÍDIO-192 - REFAP

Como havia tubulações de diversos diâmetros e espessuras, na Tabela 3.9 estão relacionados alguns dados, como por exemplo o tempo de fonte exposta por filme e a técnica utilizada para a radiografia digital com a fonte de ^{192}Ir com atividade de 251,6 GBq (6,80 Ci), para a medição de espessura de corrosão.

Tabela 3.9: Parâmetros para a fonte de ^{192}Ir com atividade de 251,6 GBq (6,80 Ci).

ϕ externo (")	Espessura (mm)	Tempo de exposição por placa (min)	DFF ^a mínima (mm)	Nº total de placas por junta	Tempo de exposição por junta (h)	Técnica radiográfica digital	Tipo de placa
3/4"	3,91	0,62	700	2	0,021	PD-VD	Fósforo
1"	4,54	0,65	700	2	0,022	PD-VD	Fósforo
1 1/2"	5,08	0,69	700	2	0,023	PD-VD	Fósforo
2"	5,54	0,03	150	4	0,002	PD-VS	Fósforo
2 1/2"	7,01	0,04	150	4	0,003	PD-VS	Fósforo
3"	7,62	0,04	150	4	0,003	PD-VS	Fósforo

^a DFF = distância fonte-placa IP.

Os valores de tempo de exposição, por placa, surgiram da Equação 3.9:

$$T = \frac{d^2 \cdot FE}{A} \cdot S \quad (3.9)$$

onde: T = tempo de fonte exposta (min); d = distância fonte-placa (polegadas); FE = fator de exposição, em função da Tabela 3.2 (tempo de exposição); A = atividade da fonte (Ci); S = sensibilidade da placa de fósforo. Em função de resultados práticos obtidos pela *Empresa A*, para o ^{192}Ir foi utilizado o valor S = 0,05 para as técnicas PD-VS e PD-VD.

3.2.12 RADIOGRAFIAS CONVENCIONAIS COM A FONTE DE IRIDIO-192

Na Tabela 3.10 encontram-se os dados para radiografia convencional com a fonte de ^{192}Ir com atividade de 251,6 GBq (6,80 Ci).

Tabela 3.10: Parâmetros para a fonte de ^{192}Ir e com atividade de 251,6 GBq (6,80 Ci).

ϕ externo (")	Espessura (mm)	Tempo de exposição por filme (min)	DFF ^a mínima (mm)	Nº total de filmes por junta	Tempo de exposição por junta (h)	Técnica radiográfica convencional	Tipo de filme ^b
3/4"	3,91	37,03	700	2	1,234	PD-VD	tipo I
1"	4,54	39,17	700	2	1,306	PD-VD	tipo I
1 1/2"	5,08	41,42	700	2	1,381	PD-VD	tipo I
2"	5,54	2,01	150	4	0,134	PD-VS	tipo I
2 1/2"	7,01	2,38	150	4	0,159	PD-VS	tipo I
3"	7,62	2,52	150	4	0,168	PD-VS	tipo I

^a DFF = distância fonte-filme; ^b O filme tipo I é um filme lento, mas é o ideal para a espessura do material a ser radiografado. A sensibilidade é três vezes maior do que a do filme tipo II.

Os valores de tempo de exposição da Tabela 3.10, por filme, surgiram também da Equação 3.9, dada acima, onde: T = tempo de fonte exposta (min); d = distância fonte-filme (pol); FE = fator de exposição, em função da Tabela 3.2; A = atividade da fonte (Ci); S = sensibilidade do filme radiográfico para o Ir-192. Para ambas as técnicas (PD-VD ou PD-VS), o valor de S é 3. Tal valor de sensibilidade refere-se ao filme lento (tipo I), que é o filme ideal para a espessura do material a ser radiografado. Se utilizássemos filmes rápidos (tipo II), teríamos tempos de exposição menores; entretanto, não alcançaríamos a qualidade de radiografia requerida.

Através da Tabela 3.10, podemos observar que o tempo de fonte exposta por filme aumentou consideravelmente em relação à técnica CR, já que, para atingir a sensibilidade radiográfica do filme, torna-se necessária uma maior exposição. O acréscimo de tempo corresponde a 60 vezes o tempo da técnica CR.

Concluiu-se, então, que a utilização, na radiografia convencional, da mesma fonte de ^{192}Ir com atividade de 251,6 GBq (6,80 Ci) tornaria o serviço significativamente improdutivo e, portanto, financeiramente inviável.

Para aumentar a produtividade do serviço a ser executado, é necessário utilizar uma fonte de ^{192}Ir com maior atividade, reduzindo assim o tempo de fonte exposta necessária para sensibilizar o filme na radiografia convencional.

Na Tabela 3.11 temos os dados para radiografia convencional, utilizando uma fonte de ^{192}Ir com atividade de 925 GBq (25 Ci).

Tabela 3.11: Parâmetros para a fonte de ^{192}Ir com atividade de 925 GBq (25 Ci).

ϕ externo (")	Espessura (mm)	Tempo de exposição por filme (min)	DFF ^a mínima (mm)	Nº total de filmes por junta	Tempo de exposição por junta (h)	Técnica radiográfica convencional	Tipo de filme ^b
3/4"	3,91	10,07	700	2	0,336	PD-VD	tipo I
1"	4,54	10,65	700	2	0,355	PD-VD	tipo I
1 1/2"	5,08	11,26	700	2	0,375	PD-VD	tipo I
2"	5,54	0,55	150	4	0,036	PD-VS	tipo I
2 1/2"	7,01	0,65	150	4	0,043	PD-VS	tipo I
3"	7,62	0,68	150	4	0,046	PD-VS	tipo I

^a DFF = distância fonte-filme;

^b Filme tipo I, que é um filme lento, mas é o filme ideal para a espessura do material a ser radiografado. A sensibilidade é três vezes maior do que a do filme tipo II.

Para a fonte de ^{192}Ir com maior atividade (Tabela 3.11), observa-se que o acréscimo de tempo de fonte exposta, em relação à técnica CR (Tabela 3.9), é de aproximadamente dezesseis vezes, demonstrando que apesar da fonte possuir uma atividade maior (925 GBq (25 Ci)), ainda assim a produtividade será menor do que na técnica CR, que utiliza fontes com atividades bem menores.

3.2.13 CÁLCULO DO BALIZAMENTO DE ÁREAS PARA O IRÍDIO-192 - REFAP

O balizamento, o qual delimita as áreas classificadas, foi elaborado através de cálculos teóricos, os quais foram confirmados e registrados através de monitorações de área. Posteriormente, também foi utilizada a leitura dos dosímetros TLD, posicionados conforme descrito na Seção 3.2.4, utilizados na técnica CR.

A confirmação e validação, através das monitorações de área, deu-se da seguinte forma:

- Foram efetuadas duas medidas com o monitor *Geiger-Müller* no mesmo local do balizamento (d_1 e d_2), sendo uma atenuada pelo colimador e a outra atenuada pelo tubo de aço;
- O valor dessas leituras (M) deveria ser igual ou menor que a dose máxima diária para indivíduos do público (0,004 mSv/dia = 0,4 mrem/dia), dividida pelo número de horas (t) de fonte exposta no dia.

Assim,

$$M \leq \frac{0,4}{t} \quad (3.10)$$

Os cálculos diários de balizamento para a execução dos ensaios radiográficos em tubulações eram realizados através das seguintes equações:

Na técnica PD-VS (parede dupla – vista simples):

$$d_1 = \sqrt{\frac{\Gamma \cdot A \cdot t}{0,4 \cdot FR_{\text{colimador}}}} \quad (3.11)$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{\Gamma \cdot A \cdot t}{0,4 \cdot FR_{\text{tub}} \cdot FR_{\text{abafador}}}} \quad (3.12)$$

Na técnica PD-VD (parede dupla – vista dupla):

$$d_1 = \sqrt{\frac{\Gamma \cdot A \cdot t}{0,4 \cdot FR_{\text{colimador}}}} \quad (3.13)$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{\Gamma \cdot A \cdot t}{0,4 \cdot FR_{\text{abafador}}}} \quad (3.14)$$

onde: d = distância mínima para o balizamento (m); Γ = constante específica da fonte ($^{192}\text{Ir} = 486 \text{ mR}\cdot\text{m}^2/\text{h}\cdot\text{Ci}$); A = atividade da fonte (Ci); t = tempo de fonte exposta por dia (h); H = dose derivada diária para indivíduo do público = $0,4 \text{ mrem/d}$ ($0,004 \text{ mSv/d}$); FR_{tubo} = fator de redução devido à dupla parede do tubo de aço; $FR_{\text{colimador}}$ = fator de redução devido ao colimador ($20 \times$); FR_{abafador} = fator de redução devido ao abafador de chumbo.

FR é calculado pela seguinte expressão:

$$FR = e^{\mu x} \quad (3.15)$$

3.3 ESTUDO DA APLICAÇÃO DE ITÉRBIO-169 EM CR INDUSTRIAL

A alta sensibilidade das placas de imagem com fósforo para radiografia digital limitam o uso das fontes radioativas com alta atividade, comumente usadas na radiografia convencional. Paradoxalmente, isso representa maior vantagem do ponto de vista da segurança e da proteção radiológica, porque leva ao uso de fontes com baixa atividade.

Foi realizado neste trabalho um estudo conjunto com a *Empresa A* para investigar qual seria o radioisótopo adequado – e qual a atividade conveniente – a ser utilizado em radiografia digital no controle de qualidade de soldas durante paradas operacionais em uma unidade da Petrobras – a Refinaria de Paulínia (REPLAN). Cabe ressaltar que atualmente a Petrobras é uma das maiores e mais assíduas empresas contratantes de serviços de radiografia industrial em nosso País.

Uma das mudanças internas introduzidas pela Petrobras foi a redução do limite de dose para membros do público, reduzido de 1/10 para 1/50 dos limites ocupacionais. A Petrobras também limita, na gamagrafia industrial convencional, o uso de fontes radioativas em um máximo de 259 GBq (7 Ci) para ^{60}Co , 740 GBq (20 Ci) para ^{192}Ir e 1.739 GBq (47 Ci) para ^{75}Se . Tais medidas aumentaram as áreas restritas durante as operações de radiografia, o que levou a uma redução gradual de produção, com menor número de radiografias por dia de trabalho (SERRA *et al.*, 2005).

Para superar tais dificuldades, a Petrobras passou a adotar a radiografia digital usando fontes de ^{75}Se com baixa atividade, e equipamentos de raios X. Foram assim obtidos progressos relativos à segurança e à produtividade (SERRA *et al.*, 2002). Contudo, isso não foi considerado o bastante para atingir os objetivos almejados de produtividade e segurança. A produtividade foi alcançada com as fontes de ^{75}Se de baixa atividade, mas as preocupações com a segurança permaneceram, principalmente as referentes a acidentes durante o retorno da fonte para o irradiador. Embora os equipamentos de raios X sejam mais seguros, a produtividade deles é muito menor do que a de radiografias com ^{75}Se .

Para atingir as metas de produtividade e segurança, foi necessário investigar o uso de fontes radioativas mais seguras, já que equipamentos portáteis de raios X apropriados para trabalhos em campo não são tão produtivos quanto os radioisótopos. Para a escolha, dois critérios teriam que ser preenchidos: (a) o radioisótopo teria que ser capaz de atuar em radiografias em espessuras de aço de até 15 mm; e (b) o radioisótopo teria que ter energia menor que a do ^{75}Se , que varia de 120 a 970 keV (IAEA, 1999a).

De acordo com GONZALES (2001) e PETTEN *et al.* (1999), cinco opções estavam disponíveis: ^{60}Co , ^{192}Ir , ^{75}Se , ^{170}Tm e ^{169}Yb . Dentre essas, duas opções destacavam-se por causa da baixa energia intrínseca: itérbio-169 e túlio-170. Os detalhes das fontes radioativas selecionadas encontram-se na Tabela 3.12.

Tabela 3.12: Características das fontes radioativas selecionadas (PETTEN *et al.*, 1999; GIESE *et al.*, 2001).

Radioisótopo	Penetração máxima em espessuras de aço (mm)	Gamão ($\mu\text{Sv.m}^2/\text{h.GBq}$)	Meia-vida (dias)
Selênio-75	30	54,86	74
Itérbio-169	20	33,78	32
Túlio-170	5	8,11	127

O ^{169}Yb foi selecionado por causa do alcance de penetração e pela característica de possuir camada semi-redutora com valor baixo, de apenas 0,2 mm para o aço, de acordo com MASON *et al.*, 1992, e pela reconhecida qualidade intrínseca (DOWALO, 1994).

A meia-vida curta do ^{169}Yb – de 32 dias – não foi considerada desvantagem, já que a radiografia digital utilizando fontes com baixa atividade pode produzir imagens de boa qualidade. De fato, isso foi considerado um vantagem do ponto de vista da segurança radiológica, em caso de acidentes.

3.3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA REPLAN

A fonte de ^{169}Yb foi adquirida da MDS Nordium (Canadá) pela *Empresa A*. A fonte possuía apenas 74 GBq (2 Ci) e estava acondicionada em cápsula de aço inoxidável. A fonte foi carregada em um irradiador de gamagrafia industrial portátil panorâmico, modelo *Gammamat TI*, no Laboratório de Produção de Fontes Seladas do Instituto de Pesquisas Energéticas Nucleares – IPEN/CNEN.

3.3.2 ARRANJOS EXPERIMENTAIS NA REPLAN

O aparato radiográfico descrito acima foi utilizado em abril de 2005 na REPLAN, para radiografias de soldas em tubulações de aço com 9% de Cr-Mo, com diâmetro nominal de 8” e espessura de 7,92 mm. Foram utilizados dois arranjos filme/fonte: panorâmico e PD-VS (parede dupla - vista simples) em curta distância. Quanto aos padrões de qualidade da solda, foram aplicados os padrões *ASME Code Sections V e VIII*, que especificam o IQI (indicador de qualidade de imagem) mínimo requerido (SERRA *et al.*, 2005).

Duas técnicas radiográficas foram usadas: a convencional com filme radiográfico e fonte de ^{192}Ir , e a digital com placas de imagem com fósforo (IP) e fonte de ^{169}Yb .

Os ensaios de radiografia convencional foram realizados de madrugada, de 05:00 às 07:00 h. A radiografia digital foi usada durante o horário de almoço, de 12:00 às 13:00 h, e à noite, de 23:00 às 24:00 h. Os raios de balizamento e a produtividade de ambas as técnicas foram comparados.

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS

4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS E ELABORAÇÃO DOS INVENTÁRIOS

Para o desenvolvimento do presente trabalho, primeiramente foi realizado um levantamento estatístico acessando-se os dados cadastrais do banco de dados da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN-Sede), denominado Sistema de Instalações Radiativas – SIR.

4.1.1 INSTALAÇÕES DE RADIOGRAFIA INDUSTRIAL NO PAÍS

Atualmente existem 169 empresas ativas cadastradas na CNEN-Sede como usuárias de fontes de radiação ionizante na prática de radiografia industrial. Desse total, 17 são prestadoras de serviços de radiografia industrial, e as demais atuam em outros segmentos da indústria, conforme mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Empresas cadastradas na prática de radiografia industrial no País.

Segmento	Nº. de instalações	Nº. de fontes de radiação	
		Fontes radioativas	Raios X
Prestação de Serviços	17	220	106
Metalurgia	62	12	105
Automobilístico	20	0	98
Naval	1	1	12
Aviação	9	0	16
Nuclear	3	2	3
Bélico	7	0	10
Siderurgia	12	5	23
Componentes eletrônicos	38	0	63
Total	169	240	436

4.1.2 RADIONUCLÍDEOS USADOS EM RADIOGRAFIA INDUSTRIAL NO PAÍS

Na prática de gamagrafia industrial são utilizadas fontes de irídio, selênio e cobalto. Fontes de túlio e itérbio não são comumente utilizadas comercialmente, por apresentarem custo elevado.

Na gamagrafia convencional com filme radiográfico, as atividades das fontes variam de 370 GBq a 2.960 GBq (10 a 80 Ci) para o ^{192}Ir , e de 296 GBq a 2.220 GBq (8 a 60 Ci) para o ^{75}Se .

Já para a radiografia digital (CR), as atividades das fontes empregadas variam de 11,1 a 370 GBq (0,3 a 10 Ci) de ^{75}Se ; e 111 a 296 GBq (3 a 8 Ci) de ^{192}Ir .

4.1.3 EMPRESAS PRESTADORAS DE SERVIÇOS DE RADIOGRAFIA DIGITAL

Conforme mencionado no Capítulo anterior, item 3.1.3, no País, apenas a *Empresa A* presta serviços de radiografia industrial digital.

4.2 ESTUDOS NA REFINARIA ALBERTO PASQUALINI – REFAP S/A

4.2.1 BALIZAMENTO DE ÁREAS PARA O ^{75}SE , TÉCNICA DIGITAL (REFAP)

Os seguintes dados foram considerados: radioisótopo = Se-75; atividade da fonte radioativa = 267 GBq (7,21 Ci); energia do ^{75}Se = 0,30 Mev; Γ = constante específica da fonte de Se-75 = 203; μ_{Pb} = 4,04/cm; $\mu_{\text{aço}}$ = 0,833/cm; limite de dose para indivíduos do público = 1 mSv/ano (0,004 mSv/dia = 0,4 mrem/dia); limite de dose utilizado para IOE = 50 mSv/ano (0,2 mSv/dia = 20 mrem/dia).

Para o cálculo da distância de balizamento, considerou-se que ocorre uma redução do colimador em apenas uma direção. Com isso, teríamos uma distância distinta para o balizamento em cada direção. Na realização dos ensaios não foi utilizado o abafador no lado oposto ao colimador. Considerou-se assim um tubo de 1” de diâmetro; espessura da parede de 4,5 mm; atividade da fonte de 267 GBq (7,21 Ci); e colimador de tungstênio com FR = 99,5 x.

Portanto, para um tempo total de 50 segundos de fonte exposta em cada setor, estimou-se o raio de balizamento através das Equações 3.5 e 3.6 do Capítulo 3:

$$d_1 = \sqrt{\frac{203 \cdot 7,21 \cdot 50}{0,4 \cdot 3600 \cdot 99,5}} = 0,72 \text{ metros} \quad (4.1)$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{203 \cdot 7,21 \cdot 50}{0,4 \cdot 3600}} = 7,13 \text{ metros} \quad (4.2)$$

Isso demonstra que, para 50 segundos de fonte exposta, o balizamento da área controlada (área interna ao balizamento) era de 0,72 metros na direção atenuada pelo colimador, e 7,13 metros na direção não atenuada pelo colimador.

No medidor de radiação *Geiger-Müller*, o valor observado da taxa de dose não podia ultrapassar o valor calculado de M, de acordo com a Equação 3.2 do Capítulo 3:

$$M \leq \frac{0,4}{0,014} = 0,28 \text{ mSv/h} \quad (4.3)$$

Na técnica PD-VD (parede dupla – vista dupla), cada junta recebeu duas exposições. Em relação a um mesmo ponto, eram duas exposições a 90°, atenuadas pelo colimador (FR = 99,5 x), e com o cone radioativo direcionado para o solo.

Na técnica PD-VS (parede dupla – vista simples), cada junta foi radiografada com quatro exposições. Portanto, em relação a um mesmo ponto, eram duas exposições atenuadas pelo colimador (FR = 99,5 x) e duas atenuadas pela dupla parede do tubo e pela atenuação do abafador de chumbo tipo placa.

Foi utilizada a técnica em “x”, comumente usada quando se trabalha com tubulações. Em tubulações na horizontal tem-se o feixe radioativo colimado direcionado em duas exposições para o solo e duas exposições para cima, e considera-se nos cálculos duas exposições com dupla parede do tubo (acrescido de abafador de chumbo) e duas exposições com colimador. Em tubulações na vertical, tem-se a mesma situação, porém com feixe girando 360°, de 90° em 90°, em linha reta, na altura do cordão de solda.

Assim, foi construída a Tabela 4.2, que é genérica e conservativa para vários tempos de exposição em relação a várias atividades de uma fonte hipotética colimada (99,5 x) de ^{75}Se , de tal modo que a dose equivalente para indivíduos do público não exceda o limite derivado diário de 0,004 mSv/dia (0,4 mR/dia).

As distâncias da Tabela 4.2 foram as utilizadas para o balizamento físico, (considerando as atividades de ^{75}Se comumente utilizadas na técnica de CR), o qual separa a área controlada – liberada aos IOE de radiografia industrial – da área livre, liberada para indivíduos do público. As fórmulas utilizadas foram as Equações 3.3 e 3.4 do Capítulo 3, para a técnica PD-VS.

Tabela 4.2: Raios genéricos de isolamento para ^{75}Se – técnica PD-VS digital.

Tempo		Atividade da fonte de ^{75}Se			
		370 GBq (10 Ci)	259 GBq (7 Ci)	111 GBq (3 Ci)	11,1 GBq (0,3 Ci)
Horas	Minutos	Distância de isolamento (m)			
0,02	1	0,9	0,8	0,5	0,2
0,08	5	2	2	1	0,4
0,17	10	3	2	2	0,5
0,25	15	4	3	2	0,6
0,50	30	5	4	3	0,9
1,00	60	7	6	4	1,2
1,50	90	9	7	5	1,5
2,00	120	10	8	6	1,7

4.2.2 BALIZAMENTO DE ÁREAS PARA O ^{75}Se , TÉCNICA CONVENCIONAL

Seguindo a mesma metodologia de cálculos do item anterior, foi construída a Tabela 4.3, que é genérica e conservativa para vários tempos de exposição em relação a várias atividades de uma fonte hipotética colimada (99,5 x) de ^{75}Se , de tal modo que a dose equivalente para indivíduos do público não exceda o limite derivado diário de 0,004 mSv/h (0,4 mR/dia).

As distâncias da Tabela 4.3 foram as utilizadas para o balizamento físico (considerando as atividades de ^{75}Se comumente utilizadas na técnica convencional), que separa a área controlada – liberada aos IOE de radiografia industrial – da área livre, liberada para indivíduos do público. As fórmulas utilizadas foram as Equações 3.3 e 3.4, para a técnica PD-VS.

Tabela 4.3: Raios genéricos de isolamento para ^{75}Se – técnica PD-VS convencional.

Tempo		Atividade da fonte de ^{75}Se			
		2.960 GBq (80 Ci)	2.220 GBq (60 Ci)	1.480 GBq (40 Ci)	740 GBq (20 Ci)
Horas	Minutos	Distância de isolamento (m)			
0,02	1	3	2	2	1
0,08	5	6	5	4	4
0,17	10	8	7	6	5
0,25	15	10	9	7	6
0,50	30	14	12	10	7
1,00	60	20	17	14	10
1,50	90	25	21	17	12
2,00	120	29	25	20	14

4.2.3 BALIZAMENTO DE ÁREAS PARA RAIOS X, TÉCNICAS DIGITAL E CONVENCIONAL (REFAP)

Os cálculos para raios X foram realizados tomando-se duas situações como exemplos.

Exemplo 1: Raios X, técnicas digital e convencional

Como primeiro exemplo de cálculo do raio de isolamento para juntas agrupadas, considerou-se uma tubulação de 6", com espessura de 5,49 mm, pela técnica PD-VS, sem blindagem de chumbo, usando somente a blindagem da parede do tubo no qual foi efetuada a radiografia digital com raios X, e utilizando cinco placas IP.

Assim, tínhamos os seguintes dados, aplicados na Equação 3.8 do Capítulo 3: $kV = 140$; $mA = 1,5$; $X = 0,05 \text{ mR/h}$ ou $0,40 \text{ mR}$ por dia ou $0,40/n$, onde $n =$ número de exposições por dia; $E = 2 \times 5,49 = 10,98 \text{ mm}$; $m = 0,53$; $t = 5 \text{ placas} \times 12 \text{ segundos} = 60 \text{ s}$ por junta $\times 6 \text{ juntas} = 360 \text{ s} = 0,1 \text{ h}$; $U = 1/5 = 0,2$; $T = 1$; $K = 750 \text{ mR/h}$ a 1 m por mA . Portanto,

$$d_1 = \sqrt{\frac{1,5 \cdot 750 \cdot 0,1 \cdot 0,2 \cdot 1}{0,05(h) \text{ ou } 0,4(dia) \cdot 2^{10,98/0,53}}} \quad (4.4)$$

Portanto, d_1 foi igual a 0,0057 metros para o limite de dose diário, e 0,0162 metros para o limite de dose horário, para a técnica digital. Entretanto, utilizou-se o raio de isolamento de segurança teórico mínimo, que é de dois metros.

Utilizando o exemplo anterior, e mantendo os mesmos dados e condições técnicas, calculou-se o raio de isolamento para a radiografia convencional com raios X, usando

cinco filmes por junta. Como o tempo de exposição do filme radiográfico convencional é 20 vezes maior, tínhamos $t = 5 \text{ filmes} \times 4 \text{ min} = 20 \text{ min}$ por junta $\times 6 \text{ juntas} = 120 \text{ min} = 2 \text{ horas}$. Utilizando a Equação 3.11, calculou-se $d_1 = 0,025 \text{ m}$ para limite de dose diário, e $d_1 = 0,07 \text{ m}$ para limite de dose horário, para a técnica convencional.

Comparando os resultados obtidos, concluiu-se que o aumento do isolamento utilizando a radiografia convencional foi quatro vezes maior, em relação à técnica CR. A diferença torna-se ainda mais significativa quando houver um número maior de radiografias, uma vez que ocorrerão maiores tempos de fonte exposta.

Exemplo 2: Raios X, técnica convencional

Como um segundo exemplo, considerou-se uma junta radiografada pela técnica convencional, a qual possuía diâmetro de 1" e espessura de 4,5 mm. O cálculo do balizamento para uma exposição na técnica PD-VD com distância fonte-filme (DFF) de 500 mm foi também realizado através da Equação 3.11 do Capítulo 3.

Assim, tínhamos os seguintes dados: d_1 = distância estimada (m); mA = corrente do tubo; X = exposição limite para indivíduos do público = 0,05 mR/h ou 0,40 mR por dia, ou a proporção pelo número de juntas efetuadas por dia, ou seja, 0,40/número de juntas a serem radiografadas; K = taxa de exposição (mR/h) a 1 m (ver Tabela 3.7); E = espessura da chapa, tubo, placa de Pb, como blindagem (mm); m = camada de semi-transmissão (mm) (ver Tabela 3.8); t = tempo total de exposição (h); U = fator de uso do aparelho = 1; T = fator de ocupação = 1.

Em função das diversas direções para onde a ampola de raios X poderia ser direcionada, o fator de uso do aparelho (U) poderia ser $\frac{1}{2}$ ou $\frac{1}{3}$ para a técnica PD-VD elipse ou sobreposta, e $\frac{1}{4}$ ou $\frac{1}{n}$ para a técnica PD-VS. O denominador do fator de uso foi igual ao número de exposições por junta. O fator de ocupação foi considerado 1 porque os trabalhos de radiografia convencional foram realizados no mesmo turno em que indivíduos de público realizavam outras atividades.

Para o cálculo do raio de isolamento por filme, foi considerada a técnica PD-VD, com blindagem de chumbo de 2 mm de espessura. Assim, aplicando-se os dados na Equação 3.8 do Capítulo 3, tínhamos que: kV = 120; mA = 3; X = 0,05 mR/h ou 0,40 mR/d ou

0,40/n, onde n = número de exposições por dia; E = 2 mm; m = 0,28; t = 50 s por filme; U = 1; T = 1; K = 500 mR/h a 1 m por mA.

Portanto,

$$d_1 = \sqrt{\frac{3 \times 500 \times 2,78 \cdot 10^{-3} \times 1 \times 1}{0,05(h) \text{ ou } 0,4(dia) \times 2^{2/0,28}}} \quad (4.5)$$

Assim, calculou-se $d_1 = 0,28$ m para o limite de dose diário, e $d_1 = 0,77$ m para o limite de dose horário, para a técnica convencional. Porém, por conservadorismo, o isolamento de segurança teórico mínimo foi igual a dois metros.

4.2.4 BALIZAMENTO DE ÁREAS PARA O ^{192}Ir , TÉCNICA DIGITAL (REFAP)

Os seguintes dados foram considerados: radioisótopo = ^{192}Ir ; atividade da fonte radioativa = 251,6 GBq (6,80 Ci); energia do Ir-192 = 0,50 Mev; Γ = constante específica da fonte de Ir-192 = 486 (mR.m²/h.Ci); $\mu_{\text{pb}} = 4,04/\text{cm}$; $\mu_{\text{aço}} = 0,833/\text{cm}$; limite de dose para indivíduos do público = 1 mSv/ano (0,004 mSv/dia = 0,4 mrem/dia); limite de dose utilizado para IOE = 50 mSv/ano (0,2 mSv/dia = 20 mrem/dia).

Para o cálculo da distância de balizamento, considerou-se que ocorre uma redução do colimador em apenas uma direção. Com isso, teríamos uma distância distinta para o balizamento em cada direção. Na realização dos ensaios não foi utilizado o abafador no lado oposto ao colimador. Considerou-se assim um tubo de 3" de diâmetro; atividade da fonte de 251,6 GBq (6,80 Ci); e colimador de tungstênio com FR = 20 x.

Portanto, para um tempo total de dois minutos de fonte exposta em cada setor, estimou-se o raio de balizamento através das Equações 3.13 e 3.14 do Capítulo 3, explicitadas a seguir.

$$d_1 = \sqrt{\frac{486 \times 6,80 \times 2}{0,4 \times 60 \times 20}} = 3,71 \text{ metros} \quad (4.6)$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{486 \times 6,80 \times 2}{0,4 \times 60}} = 16,60 \text{ metros} \quad (4.7)$$

Isso demonstra que, para dois minutos de fonte exposta, o balizamento da área controlada, ou seja, a área interna ao balizamento, era de 3,71 metros na direção atenuada pelo colimador, e 16,60 metros na direção não atenuada pelo colimador.

No medidor de radiação *Geiger-Müller*, o valor observado da taxa de dose não podia ultrapassar o valor calculado de M , de acordo com a Equação 3.10 do Capítulo 3:

$$M \leq 0,4/0,034 = 0,12 \text{ mSv/h} \quad (4.8)$$

Na técnica PD-VD (parede dupla – vista dupla), cada junta recebeu duas exposições. Em relação a um mesmo ponto, eram duas exposições a 90°, atenuadas pelo colimador (FR = 20 x), e com o cone radioativo direcionado para o solo.

Na técnica PD-VS (parede dupla – vista simples), cada junta foi radiografada com quatro exposições. Portanto, em relação a um mesmo ponto, eram duas exposições atenuadas pelo colimador (FR = 20 x) e duas atenuadas pela dupla parede do tubo e pela atenuação do abafador de chumbo tipo placa.

Foi utilizada a técnica em “x”, comumente usada quando se trabalha com tubulações. Em tubulações na horizontal tem-se o feixe radioativo colimado direcionado em duas exposições para o solo e duas exposições para cima, e considera-se nos cálculos duas exposições com dupla parede do tubo (acrescido de abafador de chumbo) e duas exposições com colimador. Em tubulações na vertical, tem-se a mesma situação, porém com feixe girando 360°, de 90° em 90°, em linha reta, na altura do cordão de solda.

Assim, foi construída a Tabela 4.4, que é genérica e conservativa para vários tempos de exposição em relação a várias atividades de uma fonte hipotética colimada (20 x) de ^{192}Ir , de tal modo que a dose equivalente para indivíduos do público não exceda o limite derivado diário de 0,004 mSv/dia (0,4 mR/dia).

As distâncias da Tabela 4.4 foram as utilizadas para o balizamento físico (considerando as atividades de ^{192}Ir comumente utilizadas na técnica de CR), o qual separa a área controlada – liberada aos IOE de radiografia industrial – da área livre, liberada para indivíduos do público. As fórmulas utilizadas foram as Equações 3.11 e 3.12 do Capítulo 3, para a técnica PD-VS.

Tabela 4.4: Raios genéricos de isolamento para ^{192}Ir – técnica PD-VS digital.

Tempo		Atividade da fonte de ^{192}Ir			
		370 GBq (10 Ci)	259 GBq (7 Ci)	111 GBq (3 Ci)	11,1 GBq (0,3 Ci)
Horas	Minutos	Distância de isolamento (m)			
0,02	1	3	3	2	0,6
0,08	5	7	6	4	1
0,17	10	10	8	6	2
0,25	15	12	10	7	2
0,50	30	17	15	10	3
1,00	60	25	21	14	4
1,50	90	30	25	17	5
2,00	120	35	29	19	6

4.2.5 BALIZAMENTO DE ÁREAS PARA O ^{192}Ir , TÉCNICA CONVENCIONAL

Seguindo a mesma metodologia de cálculos do item anterior, foi construída a Tabela 4.5, que é genérica e conservativa para vários tempos de exposição em relação a várias atividades de uma fonte hipotética colimada (20 x) de ^{192}Ir , de tal modo que a dose equivalente para indivíduos do público não exceda o limite derivado diário de 0,004 mSv/h (0,4 mR/dia).

As distâncias da Tabela 4.5 foram as utilizadas para o balizamento físico (considerando as atividades de ^{192}Ir comumente utilizadas na técnica convencional), que separa a área controlada – liberada aos IOE de radiografia industrial – da área livre, liberada para indivíduos do público. As fórmulas utilizadas foram as Equações 3.11 e 3.12, para a técnica PD-VS.

Tabela 4.5: Raios genéricos de isolamento para ^{192}Ir – técnica PD-VS convencional.

Tempo		Atividade da fonte de ^{192}Ir			
		2.960 GBq (80 Ci)	2.220 GBq (60 Ci)	1.480 GBq (40 Ci)	925 GBq (25 Ci)
Horas	Minutos	Distância de isolamento (m)			
0,02	1	9	8	6	5
0,08	5	20	17	14	11
0,17	10	28	25	20	16
0,25	15	35	30	25	19
0,50	30	40	43	35	28
1,00	60	70	60	49	39
1,50	90	85	74	60	48
2,00	120	99	85	70	55

4.2.6 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS COM DOSÍMETROS TLD

Para a técnica de radiografia computadorizada (CR), as medidas dos monitores contendo dosímetros TLD foram menores do que o nível mínimo de detecção da técnica, que é de cerca de 5 μGy . Apenas dois pontos apresentaram *kerma* maior do que o nível de radiação de fundo (RF), a saber:

- Monitor 7: *kerma* no ar = 31 μGy (RF = 4 μGy);
- Monitor 5: *kerma* no ar = 5 μGy (RF = 4 μGy).

Tais monitores estavam posicionados a dois metros de distância da fonte de ^{75}Se , em posições diametralmente opostas, sendo que o monitor 7 estava na direção do feixe primário, conforme ilustrado na Figura 3.3, e sem a blindagem adicional (placa de chumbo), normalmente utilizada em ensaios rotineiros. Apesar disso, os valores das medidas ficaram abaixo do limite derivado para indivíduos do público.

4.3 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DE ITÉRBIO-169 EM CR INDUSTRIAL

A Tabela 4.6 mostra a comparação entre ^{192}Ir , ^{75}Se , ^{169}Yb e o equipamento gerador de raios X de potencial constante (160 kV) quanto aos raios de balizamento necessários, levando em conta os mesmos parâmetros de operação descritos abaixo.

O estudo foi realizado com ^{169}Yb em radiografia digital na REPLAN, seguindo-se os parâmetros a seguir:

- Dez juntas (6" de diâmetro e 7,9 mm de espessura);
- Técnica de exposição: PD-VS (parede dupla-vista simples);
- Fator de redução para esse tipo específico de tubulação de aço: $^{169}\text{Yb} = 7,7 \text{ x}$; $^{192}\text{Ir} = 2,7 \text{ x}$; $^{75}\text{Se} = 3,7 \text{ x}$; Raio X potencial constante 160 kV = 30.573 x;
- Fator de redução para placa de chumbo com 2,0 mm usada para colimação: $^{169}\text{Yb} = 64,9 \text{ x}$; $^{192}\text{Ir} = 1,4 \text{ x}$; $^{75}\text{Se} = 2,24 \text{ x}$; Raio X = N.A.

Tabela 4.6: Áreas de segurança radiológica (raio de balizamento).

Técnica	Fonte radioativa	Raio de balizamento	Atividade ou quilovoltagem equivalentes	Tempo de exposição
PD-VS	¹⁹² Ir	18 m	19,61 GBq (0,53 Ci)	1,81 h
PD-VS	⁷⁵ Se	9,0 m	48,10 GBq (1,3 Ci)	53 min
PD-VS	¹⁶⁹ Yb	1,6 m	75,85 GBq (2,05 Ci)	2,00 h
PD-VS	Raio X 160 kV	0,5 m	140 kV	19 min

Para se ter noção do custo-benefício da utilização de fontes de ¹⁶⁹Yb em radiografia digital, foi realizado um levantamento do custo aproximado das fontes, cujos resultados encontram-se na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Custo aproximado de fontes de gamagrafia industrial.

Radioisótopo	Atividade	Custo (R\$)
¹⁹² Ir (3x3 mm)	740 GBq (20 Ci)	3.000,00
⁷⁵ Se (1x1 mm)	222 GBq (6 Ci)	11.000,00
¹⁶⁹ Yb (1x1 mm)	148 GBq (4 Ci)	60.000,00
Raio X potencial constante	160 kV	240.000,00

Os benefícios de usar fontes de ¹⁶⁹Yb com baixa atividade ultrapassam o alto custo e a meia-vida curta do radioisótopo. Em resumo, concluiu-se que ocorrem as seguintes vantagens:

- Uma fonte de ¹⁶⁹Yb com apenas 74 GBq (2 Ci) de atividade não é considerada uma fonte perigosa, de acordo com a IAEA (2005);
- A alta taxa de produtividade obtida com o uso do ¹⁶⁹Yb, comparada com a dos raios X, supera as restrições de tempo impostas pelas refinarias e por empresas petroquímicas, que possuem agendadas paradas muito curtas, geralmente em horário de almoço ou de madrugada;
- A meia-vida curta do ¹⁶⁹Yb pode ser considerada uma vantagem, em caso de roubo, furto ou perda do irradiador ou da fonte;

- A baixa camada semi-redutora (apenas 0,2 mm para chumbo) implica menos risco durante as operações de resgate da fonte, caso esta falhe em retornar à posição de segurança no interior do irradiador;
- A fonte de ^{169}Yb é mais segura, pois apresenta energia menor;
- Raios de balizamento reduzidos permitem que outras equipes trabalhem próximo ao local de exposição. Isso minimiza o risco de indivíduos entrarem nas áreas restritas e ajuda a controlar o acesso às áreas. Em consequência, leva a menos tempo ocioso, que é quando funcionários permanecem aguardando o término das radiografias;
- A radiografia com ^{169}Yb fornece melhor qualidade da imagem, quando comparada à dos outros radioisótopos utilizados em radiografia digital. A qualidade de imagem com Yb-169 é semelhante à dos raios X com potencial constante.

Os resultados confirmaram as expectativas iniciais. A baixa atividade gama da fonte de ^{169}Yb resultou em raios de balizamento menores (Tabela 4.6).

A qualidade intrínseca do ^{169}Yb e as dimensões restritas da fonte usada – cuja massa é pequena e cujo tamanho focal é de apenas cerca de 1 mm – resultaram em boa qualidade radiográfica, sendo possível visualizar, na maioria dos casos, o Indicador de Qualidade de Imagem (IQI) específico. Quanto menor a energia, melhor o contraste para pequenas estruturas.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos no presente trabalho, chegou-se às seguintes conclusões quanto à segurança e à proteção radiológica em gamagrafia industrial computadorizada (CR):

a) Um dos pontos críticos das plantas industriais tem sido conviver com o ensaio de radiografia e/ou gamagrafia industrial, principalmente quando o ensaio tiver que ser realizado nas proximidades de setores que não podem ser evacuados, tais como salas de operadores e unidades adjacentes de operação. O problema agrava-se quando as unidades industriais encontram-se paradas para manutenção, pois o contingente de trabalhadores envolvidos com as tarefas de manutenção multiplica-se. Consequentemente, o risco do ensaio aumenta.

b) Para os cálculos do tempo de exposição da radiografia computadorizada (CR), tomou-se como base o tempo de exposição da radiografia convencional, utilizando-se filmes tipo II. O tempo é então reduzido em 20 vezes.

c) A técnica de radiografia computadorizada (CR) necessita de um tempo de exposição até 20 vezes menor do que o necessário na radiografia convencional para produzir as imagens radiográficas, além de permitir a utilização de fontes gama-emissoras de baixa atividade, ou seja, 11,1 a 370 GBq (0,3 a 10 Ci) de ^{75}Se e 111 a 296 GBq (3 a 8 Ci) de ^{192}Ir . Portanto, o raio de balizamento diminui consideravelmente.

d) A utilização, na técnica de radiografia digital (CR), de uma fonte gama com baixa atividade, baixa energia e meia-vida curta – como é o caso do ^{169}Yb – acarretaria mais segurança para a radiografia industrial, sem que haja perda da qualidade ou da produtividade.

e) Com base nos dados coletados nos experimentos com TLD, pode-se afirmar que a técnica CR reduz significativamente os raios de balizamento de áreas e custos, com consequente melhoria da proteção radiológica e da segurança.

f) A técnica CR viabiliza o trabalho em horário diurno, devido ao menor raio de isolamento requerido;

g) Para as empresas contratantes, o uso da técnica CR implica maior velocidade do serviço, redução de custos e também torna desnecessário o deslocamento de indivíduos dos postos de trabalho, pois o serviço poderá ser realizado durante o dia. Isso reflete também em menos tempo de parada para manutenção da fábrica. Facilita também o monitoramento de áreas adjacentes aos trabalhos de radiografia, por parte dos técnicos de segurança industrial.

h) A técnica CR melhora a segurança coletiva, já que os trabalhos podem passar a ser executados principalmente sob a luz diurna, o que facilita a observação do entorno da região de trabalho e diminui o risco de acidentes pessoais, inclusive radiológicos, por diminuir o cansaço da equipe de radiografia, pois a maioria dos trabalhos pode ser realizada em horários não desgastantes.

i) Para as empresas contratadas, implica maior velocidade do serviço, redução de custos, maior produtividade e lucro, mais segurança, doses menores e mais qualidade nas imagens.

j) A técnica CR elimina a necessidade de uso de produtos químicos para a revelação e a fixação de filmes radiográficos, necessários no processo de radiografia convencional. Tal supressão traz benefícios ao meio ambiente e gera melhoria no ambiente de trabalho do técnico em radiografia (laboratorista), pois o processamento de filmes expõe o trabalhador aos gases decorrentes do processo de revelação e aos produtos químicos utilizados.

l) A técnica CR suprime os tempos de revelação e fixação dos filmes, necessários na radiografia convencional. Tais processos normalmente duram entre uma e duas horas, sendo realizados após o término das radiografias no campo. São substituídos pela leitura ótica das imagens (escaneamento), normalmente realizada ao término de cada exposição, e que dura em torno de três minutos por placa.

5.2- RECOMENDAÇÕES

De acordo com os resultados obtidos no presente trabalho, podemos apresentar as seguintes recomendações:

- a) Deve-se sempre ser conservativo quando for delimitar as áreas do balizamento.
- b) Sempre que possível, deve-se utilizar colimador, bem como abafadores (placas de chumbo).
- c) Sugere-se que os Titulares, clientes e a Autoridade Reguladora atuem no sentido de contribuir para a implementação da cultura de segurança nas instalações de radiografia industrial, apoiando o uso da CR e enfocando a adoção do princípio ALARA.
- d) A radiografia industrial digital proporcionou novas aplicações para a indústria, e melhorou significativamente as aplicações já existentes. A proteção radiológica também beneficia-se com tal técnica. Entretanto, é fundamental que se consiga uma adequação dessa nova tecnologia para uma melhor relação custo/benefício, já que os detectores – principalmente as telas aquisitoras de imagens – são muito caras.
- e) Como continuação deste trabalho, sugere-se que outros estudos sejam efetuados para aprofundar os conhecimentos acerca da utilização da CR em radiografias industriais.

CAPÍTULO 6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, ASME V, SE-1025, article 2: *Mandatory appendix VI, Digital image acquisition, Display, Interpretation and Storage for Nuclear Applications – Nondestructive Testing*. 2004, 690 p, addenda, 2006.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM E747: *Standard Practice for Design, Manufacture and Material Grouping Classification of Wire Image Quality Indicators (IQI) Used for Radiology*, 2004.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM E2007-00: *Standard guide for computed radiology (Photostimulable Luminescence (PSL) Method)*, 2005^a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM E2033-99: *Standard practice for computed radiology*, 2005^b.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM E-1025: *Standard practice for design, manufacture, and material group classification of Hole-type image quality indicators (IQI) used for radiology*, 7 p, 2005^c.
- ANDREUCCI, R. *Radiologia Industrial*. Julho de 2003, disponível em www.abende.org.br. (acessado 20 dez 2004).
- AQUINO, J.O. *Avaliação das condições de segurança radiológica de irradiadores portáteis panorâmicos de gamagrafia industrial utilizados no Brasil*. Tese de M.Sc, Instituto de Radioproteção e Dosimetria, IRD/CNEN, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, CNEN NN-3.01, *Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica*, 27 p, D.O.U., Janeiro, 2005.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, CNEN NN-6.04, *Funcionamento de Serviços de Radiografia Industrial*, 35 p, D.O.U., Janeiro, 1989.

DEUTSCHE INSTITUTE FOR NORMALIZATION, DIN 54109: *Non- Destructive testing - Image quality of radiographs. Image quality classes for iron material*, 8 p, 1989.

DOWALO, J.A. *Using Ytterbium-169 for safe and economic industrial radiography*. Report prepared for the DOE (USA Department of Energy), 1994, disponível em <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/162887-1CkHng/webviewable/162887.pdf>.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) *Industrial computed radiography with phosphor imaging plates - Part 1: Classification of Systems*, 2001^a, disponível em http://www.kb.bam.de/UA-CR/norm_speicherfolien12b.html (acessado 11 jan 2006).

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN) *Industrial computed radiography with storage phosphor imaging plates - Part 2: General principles for examination of metallic materials using X-rays and gamma rays*, 2001^b, disponível em http://www.kb.bam.de/UA-CR/norm_speicherfolien11a.html (acessado 11 jan 2006).

EWERT, U. Upheaval in Industrial Radiology, *European Conference on Nondestructive Testing*, 8th ECNDT Proceedings, Barcelona (Spain), June 17-21, 2002, disponível em <http://www.ndt.net/article/ecndt02/ecndt02.htm>

GIESE, T., GRIMM, R., LADURON, C. Improved safety radiography: New equipment design, new Isotopes, *Proceedings of 5th European ALARA Network Workshop on "Industrial Radiography: Improvements in Radiation Protection"*, Rome, Italy, October 2001.

GONZALEZ, A..J. *Security of radioactive sources: The evolving new international dimensions*. IAEA Bulletin, v. 41, n. 4, 2001.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA, *International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources*, BSS, Safety Series No. 115, Vienna, 1996.

- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA, *Lessons Learned from Accidents in Industrial Radiography*, Safety Reports Series No. 7, Vienna, 1998.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA, *Radiation Safety in Industrial Radiography*, Safety Reports Series No. 13, Vienna, 1999.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA, *Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material*, 1996 edition (revised), Safety Standards Series TS-R-1 (ST-1, revised), Vienna, 2000.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, IAEA, *Categorization of Radioactive Sources*. IAEA Safety Guide RS-G-1.9, Vienna, 2005.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) standard 2919 *Sealed Radioactive Sources – General Classification*, Genebra, 1990.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) standard 5579 *Non-destructive testing - Radiographic examination of metallic materials by X- and gamma rays - Basic rules*, Genebra, 1998.
- JOSÉ, J.C.V., MILANI, H.S.B., PAES, E.A.O., DE BOITA, M. Vantagens obtidas em radioproteção quando do uso do ensaio de radiografia computadorizada – RC (digital) em plantas de processo. *III Congresso Internacional de Radioproteção industrial*. Setembro/2002, São Paulo, SP.
- MASON et al. *Ytterbium-169: Calculated physical properties of a new radiation source for brachytherapy*, Medical Phys. v.19, 1992.
- PETROBRAS, *Guia Prático em Segurança Radiológica para Contratação de Serviços de Radiografia Industrial*, Rio de Janeiro, Brasil, 24 p., 2000.
- PETTEN, J.R.C. et al. *Phase I: Current status of the inspection methodologies*. Institute for Advanced Materials, 1999.

SERRA, F.A.S. et al. *Use of radiographic digital technology in PETROBRAS refineries: REPLAN and RPBC experiences*. Proceedings of Digital Imaging, The American Society for Nondestructive Testing, 2002.

SERRA F.A.S., SOARES, S.D., AQUINO, J.O., MILANI, H., JOSÉ, J.C.V., SOUZA, L., OLIVEIRA, A.C. *Breaking paradigms: The usefulness of low activity and short life radioisotope (Yb-169) for quality control of welds in a petrochemical unit*. Proceedings of RADIO 160, 2005.

SHAW, P. et al. *Industrial radiography and the recommendations from the 2nd EAN workshop, Proceedings of 5th European ALARA Network Workshop on "Industrial Radiography: Improvements in Radiation Protection"*, Rome, Italy, October 2001.

WHEATLEY, J. *Radiation safety in industrial radiography: current work by the IAEA, Proceedings of the 5th European ALARA Network Workshop on "Industrial Radiography: Improvements in Radiation Protection"*, Rome, Italy, October 2001.