

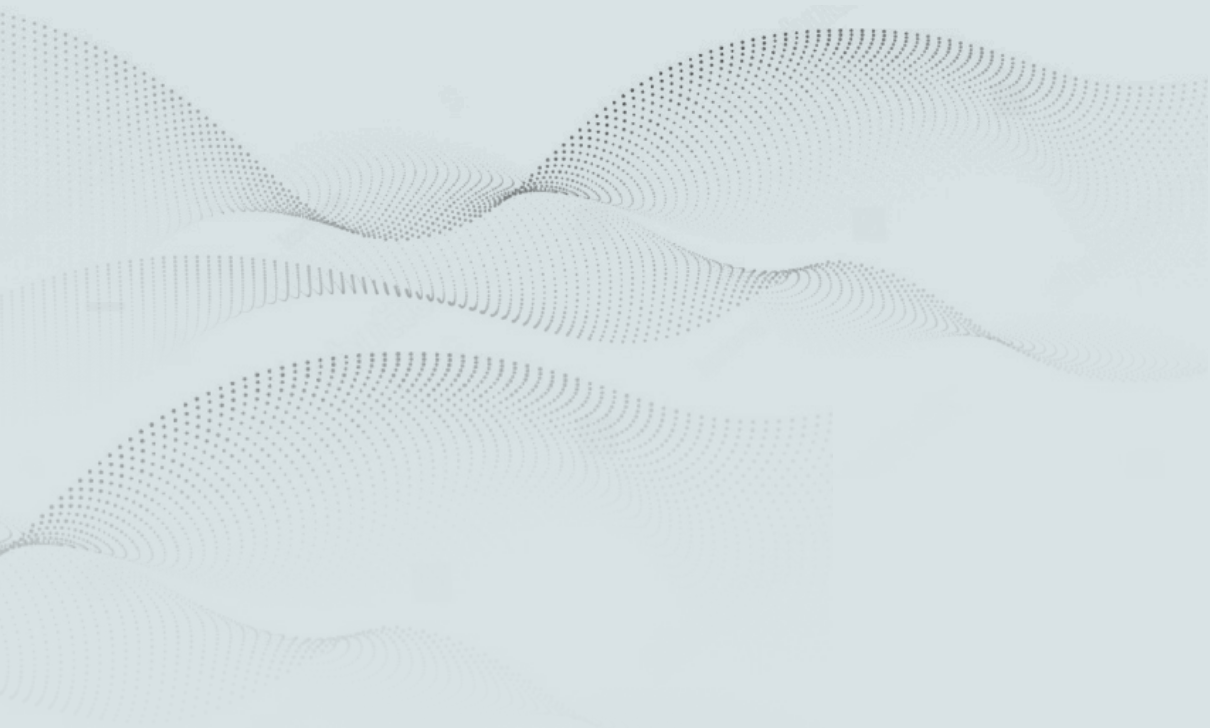


**Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares**

Denise Levy  
[Coord.]

# RADIOGRAFIA INDUSTRIAL

*Série IPEN Explica*



Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

# RADIOGRAFIA INDUSTRIAL

*Série IPEN Explica*

Denise Levy  
[Coord.]

Andrea Sanches del Pozzo • Antonio Donizetti Giuliano  
Demerval Leonildas Rodrigues • Fábio Fumio Suzuki • Gian M. A. A. Sordi  
Jan Marc Soares de Smid • João Carlos Videira José • Josilto de Aquino  
Matias Puga Sanches • Samir Luiz Somessari  
[Autores]

São Paulo- 2025

© 2025 Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares -IPEN

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS - A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. a violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do código penal.

O uso deste material está sob licença do Creative Commons nível CC-BY-NC-ND.

#### **INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**

Diretoria do IPEN

*Isolda Costa*

#### **Coordenador(a)**

*Denise Levy*

#### **Coautores**

*Andrea Sanches del Pozzo*

*Antonio Donizetti Giuliano*

*Demerval Leonildas Rodrigues*

*Fábio Fumio Suzuki*

*Gian M. A. A. Sordi*

*Jan Marc Soares de Smid*

*João Carlos Videira José*

*Josilto de Aquino*

*Matias Puga Sanches*

*Samir Luiz Somessari*

#### **Preparação de texto**

*Carlos Otávio Flexa*

#### **Revisão de normatização**

*Kádu Sena*

#### **Projeto gráfico, diagramação e capa**

*Glaucio Coelho*

#### **Imagem de capa**

capa elaborada sobre imagem

*banco Shutterstock*

Esta obra foi composta com

as famílias tipográficas

*Dosis, Ubuntu Sans Condensed e*

*Nirami*

#### Dados Internacionais de Catalogação na publicação (CIP)

R129 Radiografia industrial / coordenadora Denise Levy. – 1. ed. – São Paulo : IPEN, 2025.  
114 p. ; 23 cm

Inclui bibliografia.

ISBN 978-65-6115-129-0 (E-book)

ISBN 978-65-6115-127-6 (Livro impresso)

1. Radiografia industrial. 2. Raios gama - Aplicações industriais. 3. Raios X - Aplicações industriais. I. Levy, Denise.

F-0909252/12

CDD23: 621 . 3673

Bibliotecário - Priscila Pena Machado - CRB-7/6971



DOI: 10.61367/9786561151290

Esta obra está licenciada com uma Licença Atribuição-NãoComercial-SemDerivações 4.0 Brasil

Direitos desta edição cedidos ao  
**Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares**  
Av. Profº Lineu Prestes, 2242 Cidade Universitária  
São Paulo - SP CEP: 05508-000 Brasil



# LISTA DE FIGURAS, GRÁFICO E TABELAS

## FIGURAS

<b>Figura 1:</b>	Composição sobre a preparação de ensaio radiográfico com raios gama (gamagrafia)	14
<b>Figura 2:</b>	O poder de penetração dos diferentes tipos de radiação	25
<b>Figura 3:</b>	Curva característica do efeito reações do tecido	29
<b>Figura 4:</b>	Curva característica de um efeito estocástico	30
<b>Figura 5:</b>	Equipamentos de Proteção Individual: máscara facial, luvas de borracha, dosímetro de alerta e capacete	37
<b>Figura 6:</b>	Detetores de radiação	40
<b>Figura 7:</b>	Etiquetas de transporte radioativo	52
<b>Figuras 8 e 9:</b>	Uso de raios X para controle de bagagem em aeroportos	68
<b>Figuras 10 e 11:</b>	Preparo de serviço de gamagrafia usando fonte Iridio-192	70
<b>Figuras 12 e 13:</b>	Preparo de serviço de gamagrafia usando fonte Iridio-192	70
<b>Figura 14:</b>	Ampola de Raios x	74
<b>Figura 15:</b>	Sarcófago de Alexandre, Acervo do Museu Arqueológico de Istambul	79
<b>Figura 16:</b>	Estudos radiográficos, realizados nas peças metálicas, Musée d'Archéologie Nationale	80
<b>Figura 17:</b>	Radiografia de uma múmia do século II d.C.	81
<b>Figura 18:</b>	Parte de ritual funerário	82
<b>Figura 19:</b>	Parte de ritual funerário para enterro de um homem	82
<b>Figura 20:</b>	Obra "Conspiração de Cláudio Civilis" radiografada no Rijksmuseum	83
<b>Figuras 21 a 24:</b>	Componentes de um equipamento de gamagrafia	86-87
<b>Figura 25:</b>	Planos anatômicos	93
<b>Figura 26:</b>	Imagem do tomógrafo de 1.ª geração	96
<b>Figura 27:</b>	Imagem do tomógrafo de 3.ª geração	97
<b>Figura 28:</b>	Imagem do tomógrafo Instant Non-Scanning com a coluna de bolhas dinâmicas	97
<b>Figura 29:</b>	Imagem do Micro-CT de raios X	98
<b>Figura 30:</b>	Imagem da câmara interna do Micro-CT de raios X com amostra de rocha	99
<b>Figura 31:</b>	Visualização da amostra pela câmara interna do Micro-CT de raios X	99
<b>Figura 32:</b>	Visualização dos dados do software de análise CTAn	100
<b>Figura 33:</b>	Reconstrução 3D pelo software CTVox	100
<b>Figura 34:</b>	Equipamento para inspeção de pacotes e bagagens	107
<b>Figura 35:</b>	Imagem gerada por raios X de dupla energia.	108
<b>Figura 36:</b>	Equipamento portátil de raios X para inspeção por transmissão	109
<b>Figura 37:</b>	Equipamento portátil de raios X para inspeção por retroespalhamento	110
<b>Figura 38:</b>	Equipamento de inspeção fixo por acelerador de partículas	111
<b>Figura 39:</b>	Equipamento de inspeção móvel por acelerador de partículas	112

## TABELAS

<b>Tabela 1:</b>	Intervalos de doses e sua origem	28
<b>Tabela 2:</b>	Intervalo de dose associado com as síndromes agudas de radiação e morte dos seres humanos expostos à radiação [ICRP103]	32
<b>Tabela 3:</b>	Categorias de embalagens	52
<b>Tabela 4:</b>	Diferentes isótopos usados em gamagrafia	84

## GRÁFICO

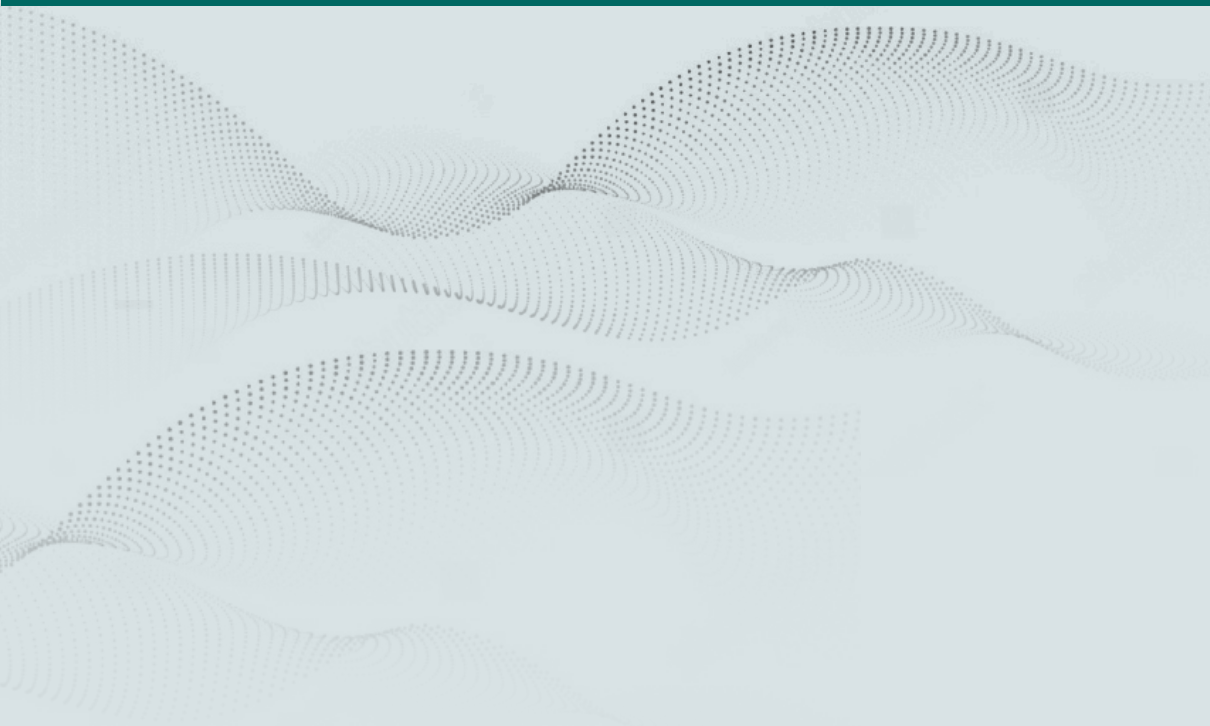
<b>Gráfico 1:</b>	Espectro típico de um detector com tecnologia EMI	106
-------------------	---	-----

# SUMÁRIO

<b>PARTE I – RADIAÇÕES: PERCEPÇÃO DE RISCO EQUIVOCADA</b>	<b>9</b>
<b>POR QUE OCORRE A RADIOFOBIA EM RELAÇÃO À RADIOGRAFIA INDUSTRIAL?</b>	<b>11</b>
<i>João Carlos Videira José • Jan Marc Soares de Smid</i>	
Por que podemos ter confiança na técnica da Radiografia Industrial?	13
O que é o Guia para Serviços Seguros de Radiografia Industrial?	15
A radiofobia pode causar mais acidentes que as aplicações seguras das radiações ionizantes!	16
Radiografia industrial para a preservação da vida, do meio ambiente e de ativos	18
Referências	20
<b>PARTE II – RADIAÇÕES: O QUE É PROTEÇÃO RADIOLÓGICA</b>	<b>21</b>
<b>DEFINIÇÕES DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA E SUAS ORGANIZAÇÕES NACIONAIS E INTERNACIONAIS</b>	<b>23</b>
<i>Gian M. A. A. Sordi</i>	
Introdução	23
Interação da radiação ionizante com o tecido humano	24
Grandezas físicas usadas em proteção radiológica para mensurar o dano biológico	33
Limites de dose para o trabalhador e para o indivíduo do público	34
Como é realizada a proteção e a segurança para satisfazer os limites anuais	36
Como ter certeza de que a proteção e a segurança continuam sendo mantidas com o transcorrer do tempo?	39
Contaminação radioativa e procedimentos de descontaminação	42
Produção de rejeitos radioativos	46
Transporte de materiais radioativos	49
Cooperação com as exigências de saúde pública, defesa civil e outras atividades	53
A energia nuclear: entender para opinar	54
Referências	56
<b>PARTE III – COLETÂNEAS [APLICAÇÕES: ALGUMAS PRÁTICAS ENVOLVENDO USO DAS RADIAÇÕES IONIZANTES]</b>	<b>59</b>
<b>RADIOLOGIA INDUSTRIAL</b>	<b>61</b>
<i>Denise Levy • Josilto de Aquino</i>	
Ensaio não destrutivo e inspeção	61
Conceitos básicos sobre radiologia industrial	62
Técnicas analíticas	63
Traçadores radioativos	63
Perfilagem de poços de petróleo	64
Medidores nucleares	66
Irradiação industrial	67
Segurança nacional	67

Radiografia industrial	69
Referências	72
<b>RADIOGRAFIA INDUSTRIAL</b>	<b>73</b>
<i>Matias Puga Sanchez</i>	
Ensaio não destrutivo e inspeção	73
Radiografia industrial	73
Conceitos sobre aparelhos emissores de raios x (e aceleradores)	74
Técnicas para obtenção de imagem	76
Segurança e proteção radiológica	77
Principais campos de atuação e aplicações	78
Radiografia de madeira esculpida	78
Radiografia em arqueologia	78
Radiografia de objetos metálicos	79
Radiografia de objetos cerâmicos	81
Radiografia de múmias	81
Radiografia em pinturas	83
Controle de qualidade de matérias primas	84
Irradiadores de feixes para calibração	84
Inspeção de bagagem / envio postal	84
Inspeção da carga de caminhões e contêineres, em aduanas etc	84
<b>GAMAGRAFIA INDUSTRIAL</b>	<b>85</b>
<i>Demerval Leonidas Rodrigues</i>	
Definição	85
Irradiadores gama $^{192}\text{Ir}$ , $^{75}\text{Se}$ e $^{60}\text{Co}$	87
Segurança e proteção radiológica	89
Transporte de materiais radioativos	89
<b>TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA</b>	<b>91</b>
<i>Andrea Sanchez del Pozzo • Antonio Donizetti Giuliano • Samir Luiz Somessari</i>	
Introdução	91
A criação da tomografia computadorizada	91
Obtenção de imagens através da tomografia computadorizada	92
Aplicações da tomografia computadorizada (TC) na indústria	101
Referências	103
<b>TECNOLOGIA DAS RADIAÇÕES PARA A SEGURANÇA PÚBLICA</b>	<b>105</b>
<i>Fábio Fumio Suzuki</i>	
Segurança pública	105
Equipamentos para inspeção de traços de explosivos e drogas	106
Equipamentos para inspeção de pacotes e bagagens	107
Equipamentos portáteis de raios X por transmissão	108
Equipamentos portáteis de raios X por retroespalhamento	109
Vans de inspeção por raios X de retroespalhamento	110
Equipamento de inspeção de cargas por acelerador de partículas	111
Equipamento de inspeção corporal	112
Referências	113

# PARTE 1





# PARTE I

## **João Carlos Videira José; Jan Marc Soares de Smid Sociedade Brasileira de Proteção Radiológica (SBPR)**

“A percepção de risco dos profissionais da radioproteção claramente difere da percepção de risco de outros profissionais de distintas áreas do conhecimento.

Esses últimos, por vezes, acabam optando por técnicas que não fazem uso das radiações ionizantes, em nome de uma pretensa segurança. Mas essa tomada de decisão equivocada pode justamente colocar em risco a segurança da instalação, ocasionando incidentes e acidentes.”



# RADIAÇÕES

## PERCEPÇÃO DE RISCO EQUIVOCADA

### Por que ocorre a Radiofobia em relação à Radiografia Industrial?

João Carlos Videira José; Jan Marc Soares de Smid

O medo da radiação ionizante no imaginário popular impacta negativamente no trabalho da proteção radiológica. O desconhecimento da população é fruto das notícias negativas que chegam: acidente radiológico de Goiânia (1987), acidentes nucleares como Chernobyl (1986) e Fukushima (2011), armas de destruição em massa, problemas de armazenagem de resíduos. A informação da mídia e das redes sociais é apresentada de forma selecionada e equivocada. Como essa é a principal fonte de informação, as informações negativas acabam gerando associações negativas. Daí o termo radiofobia. Radiofobia é o medo excessivo à radiação; um medo prejudicial para a população, porque impede o acesso aos benefícios das aplicações benéficas das radiações ionizantes.

As aplicações médicas são exemplos de aplicações positivas das radiações ionizantes. É incontestável a contribuição dos raios X em casos de fraturas no corpo humano e diagnósticos de várias doenças. Os radiofármacos, medicamentos que levam em sua composição isótopos radioativos, também são essenciais para diagnósticos e tratamentos de diversos cânceres. E há muitas outras aplicações positivas no dia a dia. A radiografia industrial, por exemplo, na inspeção de equipamentos e instalações industriais, proporciona a preservação da vida, do meio ambiente e de ativos. Muitos acidentes industriais de proporções catastróficas já foram evitados pela radiografia industrial. Porém, há a forte impressão que, na memória do público, prevalece somente o lado nefasto das radiações ionizantes.

O desconhecimento gera desconforto com a presença das radiações: um medo excessivo e precaução exagerada em relação aos trabalhos que envolvem o uso da radiação ionizante. Muitas vezes, os clientes colocam esses serviços a cargo de técnicos de segurança sem a devida informação. Quando se faz um balizamento, a presença do operador de radiografia II, certificado pela Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN), no local, é a garantia de que o ambiente está seguro. Entretanto, grande parte das vezes o receio e o medo prevalecem. O profissional de radiografia é treinado, qualificado e registrado junto àquela comissão, para fazer um cálculo justo e adequado, mas é confrontado por profissionais de outras áreas que, por desinformação e desconhecimento, sugerem outro cálculo, exagerando nas medidas de segurança que acabam, muitas vezes, inviabilizando o serviço.

A função de operador de radiografia industrial foi reconhecida recentemente pelo Conselho Nacional dos Técnicos e Tecnólogos em Radiologia (CONTER), dando mais respaldo e responsabilidade técnica à atuação dos operadores de radiografia.

A Radiografia Industrial é uma importante ferramenta de inspeção não destrutiva que pode avaliar com precisão diversas descontinuidades internas em materiais. Devido à radiofobia, os testes radiográficos muitas vezes são substituídos por outras técnicas, aparentemente concorrentes, porém, menos sensíveis, principalmente em tubulações de pequeno diâmetro que transportam fluidos em alta pressão e temperatura em plantas industriais como: refinarias de petróleo, plantas petroquímicas, fábricas de papel e celulose, entre outras. O ultrassom, por exemplo, aos olhos de muitos profissionais, parece uma técnica mais segura. Por esta razão, o ultrassom invadiu algumas searas que eram exclusivas da radiografia. Nós, autores, já presenciamos problemas de vazamentos em juntas soldadas que não foram radiografadas, dreno e vents vazavam e a verificação só poderia ser feita através da radiografia. Mas o serviço de segurança da empresa não autorizava que a radiografia fosse feita dentro da instalação. Por desinformação, muitas instalações acabam optando pelo ultrassom ao invés da radiação ionizante, em detrimento da qualidade de inspeção.

Na área médica, todos sabemos que para cada caso existe uma técnica mais eficaz, mais eficiente, mais recomendada. Se há suspeita de uma fratura, pediremos um raio X e não aceitaríamos que um médico nos encaminhasse a um ultrassom! Para acompanhamento de uma gravidez, o médico solicita exames periódicos de ultrassom e não radiografias. Cada técnica tem sua serventia e a excelência dos resultados depende da escolha da técnica em cada caso. Na área médica isso é claro para a população; a radiografia

é desejável e muito utilizada em casos que o ultrassom não seria eficiente.

No campo industrial, utilizamos a radiação ionizante para avaliar, por exemplo, tubos, juntas soldadas, peças de automóveis, aeronaves e muitas outras aplicações. Na área de instalações industriais, é preciso também conhecimento para escolher a técnica mais eficiente para o tipo de inspeção que se pretende. Os profissionais têm responsabilidade sobre sua escolha. Porque inspeções com resultados menos confiáveis podem levar a acidentes industriais de grandes proporções.

## POR QUE PODEMOS TER CONFIANÇA NA TÉCNICA DA RADIOGRAFIA INDUSTRIAL?

A ANSN emitiu normas básicas de Segurança Radiológica, notadamente as normas 3.01 – Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica e 6.04 – Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Serviços de Radiografia Industrial. As normas definem padrões de segurança, como:

- Utilizar medidores e monitores com a devida calibração;
- Certificação de calibração de medidores e monitores;
- Número de radiografias de acordo com o estipulado no Plano de Execução e no cálculo de isolamento;
- Placas de identificação de radioisótopos dos irradiadores
- Transporte de radioisótopos com sinalização adequada do veículo.

Muito trabalho foi feito para assegurar a confiança dos usuários nos prestadores de serviços de radiografia. A ANSN tem rigorosas inspeções regulatórias anuais nas empresas; inspeções surpresa nas instalações onde os serviços são executados; controle rigoroso do inventário de fontes com base no número de pessoal certificado e nos instrumentos calibrados que a empresa de serviços radiográficos possui. Há controle rigoroso da autorização para aquisição de radioisótopos com base no histórico recente da empresa executora e suspensão em casos de não conformidades.

Relativamente às empresas prestadoras de serviços de radiografia, nos últimos anos houve uma exigência de posicionamento, através de:

- Maior participação da função do Supervisor de Radioproteção (SPR);
- Reciclagem anual de todos os IOEs – Indivíduos Ocupacionalmente Expostos;
- Contratação de OIEs com ensino médio e técnico;
- Recente reconhecimento e inclusão dos OIEs: Operadores I e II no Conselho de Radiologistas do Conselho Nacional de Técnicos e Tecnólogos em Ra-



diologia (CONTER), conferindo responsabilidade, credibilidade, dignidade e ética profissional;

- Atualização constante na capacitação dos OIEs com simulados emergenciais;
- Maior qualidade técnica dos documentos de radioproteção com melhor avaliação do risco de cada operação;
- Maior suporte de contratantes diretos e clientes finais;
- Instrumentos em quantidade e facilidade de calibração em todo território nacional.

Espera-se que com todas essas ações e providências, possamos reverter no Brasil essa ressalva significativa em relação aos ensaios radiográficos, reduzindo o impacto na manutenção das plantas industriais. Um exemplo é a radiografia de drenos e respiros, importante na verificação de corrosão, que vem sendo substituída indiscriminadamente por testes de ultrassom em juntas de solda, principalmente em pequenos diâmetros. O ultrassom, que aparentemente para muitos tomadores de decisão, parece uma técnica que poderia ser concorrente, nesses casos não entrega os resultados com a mesma eficácia e eficiência. A desinformação e medos infundados acabam por dificultar e às vezes até inviabilizar a correta tomada de decisão.

**Figura 1:** Composição sobre a preparação de ensaio radiográfico com raios gama (gamagrafia).



**Fonte:** Acervo dos autores.



## O QUE É O GUIA PARA SERVIÇOS SEGUROS DE RADIOGRAFIA INDUSTRIAL?

As normas ANSN são bastante abrangentes e elaboradas com o máximo cuidado para garantir os requisitos para de proteção e segurança do trabalhador, do público e do meio ambiente. Entretanto, só são palatáveis para quem é do ramo da tecnologia nuclear, notadamente, da proteção radiológica. Profissionais de outras áreas não conseguem traduzir aqueles conceitos e valores para o seu dia a dia. Os clientes usuários encarregados de promover a liberação de serviços de radiografia industrial em plantas industriais normalmente não possuem conhecimento técnico para interpretá-los. Temos que pensar formas de combater a desinformação para que profissionais de outros ramos tenham acesso às informações das normas de segurança.

Visando à construção de melhores pontes entre os profissionais da tecnologia nuclear e esses profissionais de outras áreas, a Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos (ABENDI), através de sua Comissão de Radioproteção e Segurança Industrial (CORSEG), elaborou o Guia para Serviços Seguros de Radiografia Industrial, em complementação à norma ABNT NBR 15.909 e regulamentação ANSN. Trata-se de um “pequeno manual” bastante minucioso e quase didático, sobre contratação e fiscalização de serviços de radiografia industrial, que pode ser facilmente compreendido por engenheiros de segurança e tomadores de decisão. Essa foi uma importante ação no combate à radiofobia.

A linguagem simples permite fácil interpretação e interação com técnicos radiográficos. A introdução deixa clara a intenção do documento: garantir a segurança operacional de instalações industriais e auxiliar usuários dos serviços de radiografia industrial:

A técnica de radiografia industrial tem sido utilizada nas últimas décadas com enorme sucesso nas diversas etapas dos processos produtivos, garantindo a segurança operacional de instalações industriais. Essa segurança operacional pode ser traduzida em como se pode evitar acidentes operacionais que colocam vidas humanas e o meio ambiente em risco e inutilizam ativos produtivos, que fornecem energia e produtos essenciais ao bem-estar da sociedade.

Este documento tem a intenção de auxiliar os usuários dos serviços, sejam os responsáveis pela contratação, os beneficiários ou os profissionais de segurança do trabalho, a terem uma referência padronizada de consulta unificada e elaborada com base na legislação vigente para se ba-

lizarem na contratação e fiscalização dos serviços de radiografia industrial (Guia para Serviços Seguros de Radiografia Industrial, p. 02).

Além das normas básicas de referência,<sup>1</sup> o documento traz de forma clara e direta responsabilidades da empresa contratada e da empresa contratante, além da relação de documentação exigida. A equipe de especialistas redatora do guia apresenta e explica informações detalhadas sobre equipamentos, incluindo equipamentos de rotina, equipamentos de proteção radiológica e sinalização e equipamentos para emergências radiológicas no serviço. Além disso, são abordadas recomendações sobre equipamentos para transporte rodoviário de materiais radioativos. No quesito “Condições de Segurança Radiológica”, estão incluídas a segurança patrimonial, segurança radiológica e segurança física, em conformidade com os requisitos normativos estabelecidos pela ANSN. Finalmente, são apresentados, de forma concisa e com linguagem compreensível, os cálculos básicos de radioproteção. Nesse tópico, o leitor encontrará o procedimento para cálculos de balizamento de área restrita; fatores de uso, ocupação e redução; cálculos de balizamento diário para a execução dos ensaios radiográficos em tubulação utilizando radiação gama; e cálculos para a radiografia industrial com raios X.

## **A RADIOFOBIA PODE CAUSAR MAIS ACIDENTES QUE AS APLICAÇÕES SEGURAS DAS RADIAÇÕES IONIZANTES!**

Muitas vezes as radiações ionizantes são recebidas no ambiente laboral com desconfiança, em relação à segurança do trabalho ou à exposição ocupacional. A segurança na execução do serviço da radiografia industrial, assim como a proteção à saúde do trabalhador, do público e do meio ambiente, são asseguradas pela proteção radiológica. Mas afinal, qual a formação de um profissional da proteção radiológica?

Os serviços de radiografia industrial contam com a importante figura profissional do Supervisor de Proteção Radiológica. Ele atua com o enfoque da segurança operacional dos serviços de radiografia, treinando, instruindo, monitorando e aperfeiçoando os operadores de radiografia.

O supervisor de proteção radiológica (SPR) passa por uma ampla formação e deve ser credenciado no processo de certificação ANSN. Além

1 ABNT NBR 7503, Transporte terrestre de produtos perigosos — Ficha de emergência — Requisitos mínimos; ABNT NBR 15071, Dispositivos auxiliares — Cones para sinalização viária; ABNT NBR 15909:2022, Serviços de radiografia industrial — Requisitos e diretrizes para execução segura

dos princípios básicos de proteção radiológica, o conteúdo programático para a formação do SPR inclui: fundamentos da física atômica e nuclear, grandezas e unidades das radiações, efeitos biológicos das radiações ionizantes, aplicações de fontes de radiação e cálculo de blindagem, dosimetria, otimização e monitoramento das radiações ionizantes, transporte seguro de materiais radioativos, gestão de rejeitos, licenciamento, controle de qualidade e preparo e resposta para emergências. Uma ampla formação que capacita o profissional a realizar cálculos justos e adequados, evitando superdimensionamentos que comprometeriam desnecessariamente a produção ou inviabilizariam o trabalho.

A percepção de risco dos profissionais da radioproteção claramente difere da percepção de risco de outros profissionais de distintas áreas do conhecimento. Esses últimos, por vezes, acabam optando por técnicas que não fazem uso das radiações ionizantes, em nome de uma pretensa segurança. Mas essa tomada de decisão equivocada pode justamente colocar em risco a segurança da instalação, ocasionando incidentes e acidentes. Abaixo, citamos alguns exemplos da vida real.

### **Exemplo 1 – Drenos e vents de tubulações**

■ Drenos e vents são linhas curtas agregadas a tubulações de condução de produtos líquidos e gasosos em planta químicas, petroquímicas e de petróleo. Os drenos e vents possuem uma válvula acoplada para justamente poderem drenar líquidos e ventilar gases das tubulações às quais estão acopladas. Como toda linha e tubulação industrial, estão sujeitas ao processo corrosivo natural. Essas linhas por possuírem isolamento térmico, são impedidas de serem inspecionadas visualmente, pois não se tem contato visual com elas. Uma alternativa que é usada com enorme sucesso, é a radiografia industrial. Ocorre que existem diversos relatos de proibição de realizar o ensaio radiográfico por desinformação, a chamada radiofobia. Essas ocorrências, que impedem a realização do ensaio radiográfico, acarretam no rompimento dessas linhas, com interrupção de produção para manutenções não programadas e de emergência, causando interrupção de fornecimento de importantes produtos.

### **Exemplo 2 – Construção de plantas de processo**

■ Algumas obras de construção e montagem de indústrias de processo como plantas, químicas, de petróleo e de papel e celulose possuem diversos equipamento e tubulações que são soldadas. Essas soldas necessitam ser inspecionadas para se avaliar a integridade mecânica delas. Por radio-

fobia, tem-se substituído indiscriminadamente a radiografia pelo ensaio de ultrassom, o que tem acarretado vazamentos indesejados e frequentes nessas plantas quando em operação, acarretando enormes prejuízos

### Exemplo 3 – Paradas de Papel e Celulose

■ Paradas operacionais são frequentes e necessárias para avaliação dos principais equipamentos de uma planta de papel e celulose. Caldeiras são o coração deste tipo de empreendimento, que além de gerar vapor são reatores químicos. As inspeções nas soldas das paredes d'água são fundamentais tanto na construção quanto na manutenção em paradas. Devido à radiofobia, o ensaio radiográfico foi substituído em quase sua totalidade pelo ensaio de ultrassom, que nestes diâmetros e área diminuta para o escaneamento acabam não sendo tão efetivos como a radiografia industrial que, além de proporcionar um resultado mais confiável, oferece à Engenharia a possibilidade de interagir com os laudistas, uma vez que a visualização das discontinuidades é muito mais simples para aqueles que não são técnicos em END. Desta maneira, as decisões de engenharia podem ser mais assertivas. Lembrando que os ensaios de ultrassom, por mais que tenham evoluído, dependem excessivamente do inspetor e são difíceis de ser compartilhados com a engenharia para um laudo mais assertivo.

Percebe-se pelos exemplos acima que, muitas vezes, pensando agir a favor da segurança, são cometidos equívocos que comprometem resultados e justamente acabam por representar um risco à segurança da estrutura. Confira agora como operações seguras de radiografia industrial contribuem para que alcancemos a qualidade de vida que almejamos no século XXI.

## RADIOGRAFIA INDUSTRIAL PARA A PRESERVAÇÃO DA VIDA, DO MEIO AMBIENTE E DE ATIVOS

São Paulo é a capital mais populosa do Brasil. A Grande São Paulo conta com mais de vinte milhões de habitantes. A via Professor Simão Faiguenboim, conhecida como Marginal Pinheiros, é uma via expressa que conecta a região de Interlagos ao Complexo Viário Heróis, de 1932, além de ser rota de acesso à Cidade Universitária e para importantes rodovias.

A Ponte do Jaguaré, inaugurada em 1974, é uma das pontes do complexo viário que cruza a Marginal Pinheiros. Sua extensão é de 628 m de comprimento e 14,30 m de largura. Em 5 de julho de 2019 a ponte sofreu um colapso estrutural e foi interditada, provocando grande congestionamento e transtorno em boa parcela dos paulistanos. Era necessária a realização de laudos estruturais, tanto para liberar a circulação parcial

de veículos, como para identificar as obras de recuperação necessárias. A radiografia para avaliação da integridade (ou danos) da estrutura da ponte teve início em 24 de junho.

Após o colapso de um segmento da ponte, os engenheiros, tanto da prefeitura de São Paulo quanto dos consultores contratados, necessitavam saber qual o estado dos cabos pós-tensados. Porém, a estrutura era muito espessa, com peças de aproximadamente 1,2 metro, para serem atravessadas, de modo a identificar a quantidade de cabos pós-tensados, assim como seu estado, com referência à perda de espessura por corrosão ou mesmo diâmetros diferentes dos estabelecidos em projeto. Em busca destas respostas, foram empreendidas várias tentativas de detecção, por diferentes métodos, inclusive por ultrassom e geo-radar, que não obtiveram sucesso.

Felizmente, fazia parte do grupo de consultores, um engenheiro com larga experiência em obras efetuadas no passado como a construção da Itaipu Binacional, Metrô e alguns elevados como o Paulo de Frontin, no Rio de Janeiro e Minhocão em São Paulo. O engenheiro lembrava-se da utilização da Radiografia Industrial para verificação de vazios nas estruturas. Os profissionais responsáveis buscaram então a mais atual técnica, desenvolvida e já largamente aplicada tanto na Argentina quanto em outros países do mundo, incluindo o Brasil. Desta forma com o auxílio da Tomografia Industrial (*slices* radiográficos) foi possível identificar com precisão o número de cabos pós-tensados, sua localização e, principalmente, onde eles estavam ancorados. Esses resultados de sucesso proporcionaram aos consultores a certeza de como deveria ser feito o reparo da estrutura, que foi “macaqueada” e, posteriormente, adicionaram pilares de sustentação adicionais àqueles de projeto, exatamente onde a Tomografia indicou a debilidade da protensão.

É importante salientar que estas estruturas “Obras de Arte” como são chamados as Pontes e Viadutos são muito antigas e via de regra não dispõem de desenhos nem “as built”. Com isto uma das principais estratégias da Engenharia Civil é a Reconstituição e, para isso, é necessário ter ferramentas que entreguem confiabilidade nas estruturas, avaliando vazios ou estruturas de cabos e vergalhões, os quais ditam a resistência mecânica, a tração e tensionamento da “Obra de Arte”.

Concomitantemente às obras neste viaduto foram realizados trabalhos, na mesma época, na ponte da rodovia Presidente Dutra, na altura do quilômetro 18. Uma estrutura com mais de setenta anos sem nenhum desenho ou projeto disponível. Graças à Tomografia, foi possível proporcionar resultados precisos, que deram condições para a reparação da estrutura com assertividade.



Cabe ressaltar que a autoridade reguladora foi ágil em ambos os projetos, liberando o Plano Específico de Radioproteção para Zona Urbana PARAE. Todo o trabalho foi executado com fonte de Cobalto-60 e em mídia digital.

Essas são histórias de sucesso, entre muitas outras, que a população precisa conhecer. O combate à desinformação é uma missão de todos. É preciso divulgar em cursos e universidades em eventos técnicos e para prestadores de serviços (especialmente em plantas industriais) e buscar continuamente novas maneiras de melhorar a transparência e a comunicação para reverter a percepção negativa do público.

## ■ REFERÊNCIAS PARA QUEM QUER SABER MAIS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT)/CEE-135 – Radiações Ionizantes – Comitê da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15909: 2010 – Diretrizes de Proteção e Segurança Radiológica para a Contratação de Serviços de Radiografia Industrial. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15909: 2022 – Serviços de Radiografia Industrial – Requisitos e Diretrizes Para a Execução Segura. Rio de Janeiro, 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN). Norma ANSN 3.01 Resolução CNEN 344/25 Julho/2025. Requisitos Básicos de Radioproteção e Segurança Radiológica de Fontes de Radiação.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN). Norma 6.04. Requisitos de Segurança e Proteção Radiológica para Serviços de Radiografia Industrial (Resolução CNEN 145/2013).

# PARTE 2



## PARTE 2

**Gian M. A. A. Sordi**

A proteção radiológica tem por objetivo fornecer um padrão adequado de proteção ao público, trabalhadores e meio ambiente, sem limitar indevidamente os benefícios das radiações ionizantes à sociedade.



# RADIAÇÕES

## O QUE É PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

### Definições de Proteção Radiológica e suas Organizações Nacionais e Internacionais

Gian M. A. A. Sordi

#### INTRODUÇÃO

O termo “Proteção Radiológica” por falta de uma expressão melhor, é quase universalmente usado para significar a proteção contra as radiações, a higiene, a segurança e o controle da radiação. Físicos, biólogos e químicos fornecem as bases técnicas para a ciência da proteção radiológica, mas muitas outras atividades auxiliares estão a elas associadas – a filosofia, a economia, as relações no trabalho, as relações públicas, os ensinamentos e a administração.

A proteção radiológica engloba no seu domínio, todo o mundo dos seres vivos. Fornece proteção adequada às pessoas que trabalham com radiação, suas famílias e à população em geral, que podem sofrer as consequências do uso indiscriminado da energia atômica ainda que indiretamente venham a se beneficiar com o seu desenvolvimento. Protege o gado, as colheitas, o solo e a produtividade contra a indevida contaminação radioativa. Resguarda as relações entre todos os seres vivos, animais e vegetais, com o seu meio ambiente desta nova influência.

O seu domínio é o nosso ambiente. Estende-se desde as profundezas do mar, passa pela hidrosfera, atmosfera, litosfera e alcança até a estratosfera.

Em resumo, usufruindo de todos os meios, oferece proteção contra os perigos potenciais da radiação e ao mesmo tempo torna possível à humanidade desfrutar dos benefícios proporcionados pelo uso pacífico da energia atômica. A base internacional é conhecida como United Nations Scientific Committee on Atomic Radiation (UNSCEAR),<sup>1</sup> órgão oficial da organi-

1 Comitê Nacional das Nações Unidas sobre os Efeitos das Radiações Atômicas das Nações Unidas.

zação das Nações Unidas (ONU). Anualmente o presidente do UNSCEAR apresenta um relatório das atividades efetuadas durante o ano. O órgão compila dados mundiais a respeito dos efeitos biológicos das radiações, publicados em revistas científicas e congressos tanto nacionais como internacionais.

A Academia de Ciências dos Estados Unidos também possui um órgão com as mesmas características, denominado Efeitos Biológicos das Radiações.<sup>2</sup> Os dados de ambos os organismos são compilados e publicados para que os países e outras organizações internacionais tomem conhecimento. Em 1928, no segundo Congresso Internacional de Radiologia, realizado em Estocolmo, foi criada a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP),<sup>3</sup> que tem a função, a partir das publicações do UNSCEAR e do BEIR, estabelecer e justificar as recomendações internacionais de proteção e segurança com relação às radiações ionizantes.

A ONU, em 1956, com a liberação para os usos pacíficos das radiações ionizantes, criou o Organismo de Energia Atômica (OIEA). No Brasil, é conhecido como Agência Internacional de Energia atômica (AIEA) que é encarregada do desenvolvimento da energia nuclear para auxiliar os países membros. A AIEA assinou um acordo com a ICRP, em que adotaria as suas recomendações, mas editaria as suas próprias publicações. A agência, em suas recomendações, não fornece os motivos que se encontram na ICRP, mas unicamente o que deve ser realizado para satisfazê-las, porém, fornece mais detalhamento do que a ICRP para serem cumpridas.

## **1 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO IONIZANTE COM O TECIDO HUMANO**

A radiação ionizante como uma série de outros agentes, podem produzir danos ao homem e ao seu meio ambiente.

### **1.1 PODER DE PENETRAÇÃO DA RADIAÇÃO – UNSCEAR**

A radiação pode ter a forma de partículas (incluindo partículas alfa, beta e nêutron) ou de ondas eletromagnéticas (raios gama e raios X), todas com diferentes quantidades de energia. As diferentes energias de emissão e tipos de partículas apresentam diferente poder de penetração e assim diferentes efeitos na matéria viva. Uma vez que as partículas alfa são compostas de dois prótons carregados positivamente e dois nêutrons, elas possuem a maior carga dentre todos os tipos de radiação. Tal carga acentuada significa que as partículas interagem em maior escala com os átomos ao redor.

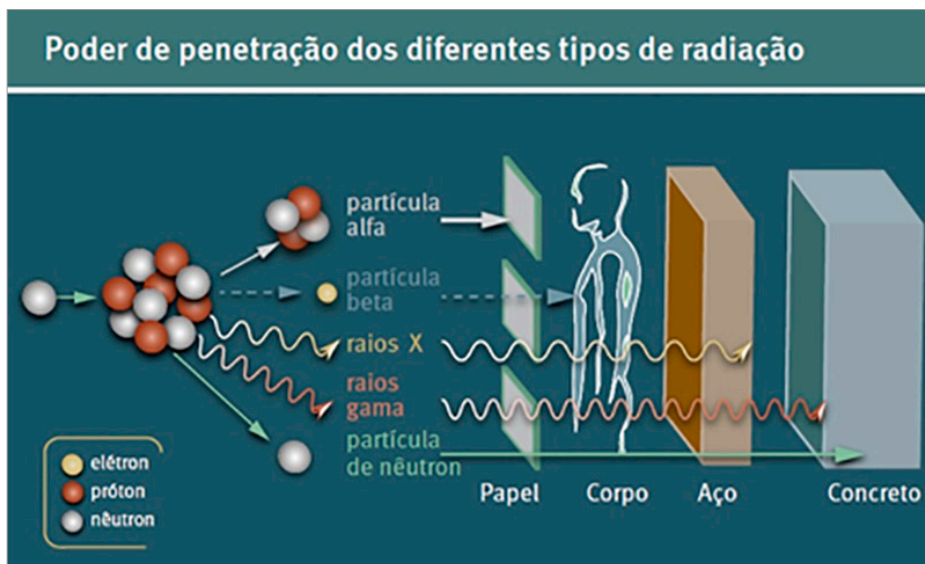
2 Biological Effects of Ionizing Radiation (BEIR).

3 International Commission on Radiological Protection (ICRP)



Essa interação reduz rapidamente a energia da partícula e, em consequência, reduz o poder de penetração. Partículas alfa podem ser bloqueadas, por exemplo, por uma folha de papel. As partículas beta, compostas de elétrons carregados negativamente, carregam menos carga e são, portanto, mais penetrantes que as partículas alfa. As partículas beta podem atravessar um ou dois centímetros de tecido vivo. Os raios gama e os raios X, por serem radiações eletromagnéticas como a luz solar, mas, com muito mais energia são extremamente penetrantes e podem atravessar qualquer material mais denso do que uma chapa de aço. Nêutrons produzidos artificialmente são emitidos de um núcleo instável como resultado de uma fissão atômica ou uma fusão nuclear. Os nêutrons também podem ocorrer naturalmente como componente da radiação cósmica. Por serem partículas eletricamente neutras, os nêutrons possuem um alto poder de penetração quando interagem com um material ou tecido. Na realidade os nêutrons são uma fusão de um próton e um elétron e quando se encontram livres fora do núcleo atômico eles se desintegram em um próton e um elétron com meia vida de 10 minutos. Na figura 2 é ilustrado o poder de penetração dos diferentes tipos de radiação e diferentes barreiras para a sua absorção.

**Figura 2:** O poder de penetração dos diferentes tipos de radiação<sup>4</sup>



Fonte: UNSCEAR, [s.d.].

4 Radiation: effects and sources, United Nations Environment Programme, 2016 ISBN: 978-92-807-3517-8 , p. 9.

## 1.2 HISTÓRICO DOS EFEITOS BIOLÓGICOS DAS RADIAÇÕES

As primeiras referências de efeitos danosos no homem surgiram no século XVI – câncer de pulmão em trabalhadores de minas subterrâneas na Alemanha. Muito antes da descoberta da radioatividade. A seguir é apresentado um histórico desde o aparecimento dos efeitos biológicos e acontecimentos ao longo dos anos.

1895:	Descoberta do raio X – Roentgen trabalhava com as radiações provenientes da ampola de Crookes– platinocianeto de bário (material fluorescente); morreu de câncer no intestino, em 1923.
1900:	Casos de lesão por raios X foram relatados na literatura. Pierre Curie descreve as lesões no antebraço de Marie Curie. Ela morreu de uma doença no sangue em 1934.
1902:	Primeiro caso de indução de câncer por radiação ionizante relatado na literatura.
1903:	Provou-se que a radiação ionizante produzia variação na composição sanguínea.
1910:	Relatos de câncer de pele em pessoas constantemente expostas ao raio X
1922:	Aproximadamente 100 médicos haviam morrido devido do uso indiscriminado dos raios X
1945:	Explosões atômicas de Hiroshima e Nagasaki, Japão
1986:	Acidente nuclear de Chernobyl, Ucrânia–Rússia
1987:	Acidente radioativo de Goiânia, Brasil
2011:	Acidente nuclear de Fukushima, Japão.

## 1.3 EFEITOS BIOLÓGICOS DAS RADIAÇÕES IONIZANTES

Os efeitos biológicos provocados pelas radiações ionizantes são resultantes principalmente da transferência de energia delas com os átomos e moléculas do corpo. O organismo humano é uma estrutura extremamente complexa cuja menor unidade com funções próprias é a célula. As células são constituídas de moléculas e estas por átomos. Os átomos do nosso corpo estão unidos formando algumas moléculas muito pequenas como a molécula da água e outras muito grandes como a molécula do ácido desoxirribonucleico, ADN. Esses átomos estão unidos por forças elétricas. Quando uma partícula ionizante arranca um elétron de um dos átomos de uma molécula do nosso corpo, pode causar sua desestabilização que resul-

ta em quebra da molécula. Várias formas de atuação da radiação no corpo humano são descritas a seguir.

#### 1.4 MECANISMOS DE AÇÃO DAS RADIAÇÕES

A sequência dos estágios é a seguinte:

- **Estágio físico** – Consiste na ionização de um átomo resultante da troca de energia entre a radiação e a matéria, ocorre entre 10 e 15 segundos;
- **Estágio físico-químico** – Consiste na ruptura de ligações químicas das moléculas e formação de radicais livres com duração de aproximadamente 10,6 segundos
- **Estágio químico** – Quando os fragmentos da molécula se ligam a outras moléculas, com duração de poucos segundos;
- **Estágio Bioquímico e fisiológico (biológico)** – Dependendo do órgão atingido teremos o aparecimento desses efeitos; aparecem após um intervalo de tempo variável e podem ocorrer nas células ou, de modo mais complexo, no organismo provocando alterações morfológicas ou funcionais dos órgãos.

Os mecanismos de ação podem ser de dois tipos:

- **Mecanismo direto** – Quando a radiação interage diretamente com as moléculas importantes, como as de ADN, podendo causar desde mutação genética até morte celular;
- **Mecanismo indireto** – Quando a radiação quebra a molécula da água, formando assim radicais livres que podem atacar outras moléculas importantes. Esse mecanismo é importante, uma vez que nosso corpo é composto por mais de 70 % de água.

#### 1.5 CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS EFEITOS BIOLÓGICOS DAS RADIAÇÕES

**1 Especificidade** – Os efeitos biológicos conhecidos como decorrentes de exposição à radiação ionizante podem ser provocados por outras causas, isto é, não são característicos ou específicos dessas radiações. Outros agentes físicos, químicos ou biológicos podem causar os mesmos efeitos. Portanto, a radiação não provoca nenhuma enfermidade que não seja conhecida pelo homem desde da descoberta e uso da energia nuclear.

**2 Tempo de latência** – Período de tempo entre o momento da irradiação e o aparecimento de um dano clinicamente detectável. Exemplo: após a irradiação de Hiroshima e Nagasaki (1945), observou-se uma frequência anormal de leucemia num período de seis a doze anos após as explosões, voltando ao normal vinte e cinco anos após o ocorrido.

**3 Reversibilidade** – Em certos casos os efeitos apresentam caráter de reversibilidade, dependendo da dose recebida, da taxa de dose e do órgão atingido

**4 Transmissibilidade** – A maior parte das alterações causadas no organismo humano pelas radiações ionizantes não são transmissíveis a outras células ou outros organismos. São transmissíveis aquelas alterações que ocorrem no patrimônio hereditário das células germinativas e, nesse caso, os efeitos poderão aparecer nos descendentes do indivíduo irradiado.

**5 Dose limiar** – Dose mínima necessária para que certos efeitos ocorram. Alguns efeitos não apresentam dose limiar.

**6 Radiossensibilidade** – Nem todas as células, tecidos, órgãos ou organismos respondem igualmente à mesma dose de radiação.

## 1.6 NATUREZA DOS EFEITOS BIOLÓGICOS

O UNSCEAR coleta dados mundiais relativos à dose de radiação natural e ambiental, para descobrir, da forma mais confiável possível, efeitos associados a diferentes níveis de exposição à radiação. As fontes de informação sobre os efeitos da radiação em humanos e no meio ambiente, em sua maioria, advêm de estudos epidemiológicos em grupos populacionais expostos à radiação, como dos sobreviventes das bombas atômicas de Hiroshima e Nagasaki, acidente na usina de Chernobyl, estudos em animais e células, investigações clínicas e outros. Lembrando que a exposição à radiação depende do tipo de radiação, do tempo de exposição e da quantidade de energia depositada no material. Os intervalos de doses utilizados pelo UNSCEAR estão ilustrados na tabela 1, a seguir:

**Tabela 1:** Intervalos de doses e sua origem

Intervalo de doses		
Dose elevada	> 1 Gy	Acidentes graves de radiação (p. ex.: bombeiros no acidente de Chernobyl)
Dose moderada	100 mGy - 1 Gy	Trabalhadores em operação de recuperação após o acidente de Chernobyl
Dose pequena	10 mGy - 100 mGy	Múltiplas tomografias computadorizadas (TC)
Dose muito pequena	< do que 10 mGy	Radiografia convencional (isto é, sem TC)

**Fonte:** UNSCEAR, [s.d.].

Quanto à natureza, os efeitos podem ser classificados em efeitos reações do tecido (antigamente conhecido como efeitos determinísticos) e efeitos estocásticos.

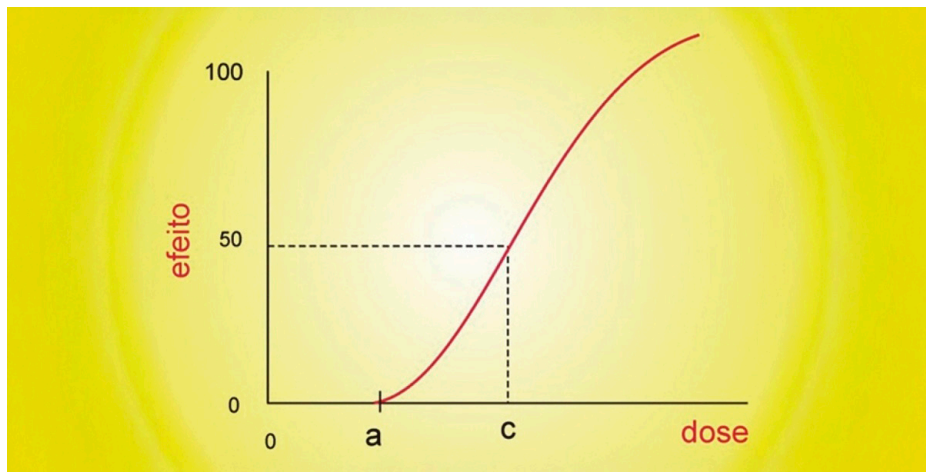
## 1.7 REAÇÕES DO TECIDO

Os efeitos reações do tecido resultam de dose elevada e apresentam dose limiar, cujo valor depende do tipo de radiação e do tecido irradiado. Um dos principais efeitos é a morte celular: se poucas células morrerem, o efeito pode nem ser detectado, mas se um número muito grande de células de um órgão morrer, seu funcionamento pode ser prejudicado. Nessas reações, quanto maior a dose mais grave é o efeito. Um exemplo é a queimadura que pode ser desde um leve avermelhamento até a formação de bolhas enormes. Até recentemente acreditava-se que as reações do tecido eram efeitos que surgiam pouco tempo após a exposição. Os estudos epidemiológicos dos sobreviventes das bombas atômicas no Japão mostraram evidências de que há efeitos bastante tardios que resultam de danos nos tecidos. Em resumo podemos concluir sobre os efeitos reações do tecido:

- Resultam de dose elevada;
- Apresentam dose limiar;
- A gravidade do efeito é diretamente proporcional à dose.

Quanto maior a dose, mais grave é o efeito. Na figura 3 é ilustrada a curva característica do efeito reações no tecido.

**Figura 3:** Curva característica do efeito reações do tecido



Fonte: Acervo dos autores.

A existência de um limiar não significa que não houve ação, mesmo para doses pequenas ocorrem fenômenos físicos, químicos e biológicos, mas os efeitos não aparecem, ou por restauração das células ou por substituição delas.

## 1.8 EFEITOS ESTOCÁSTICOS

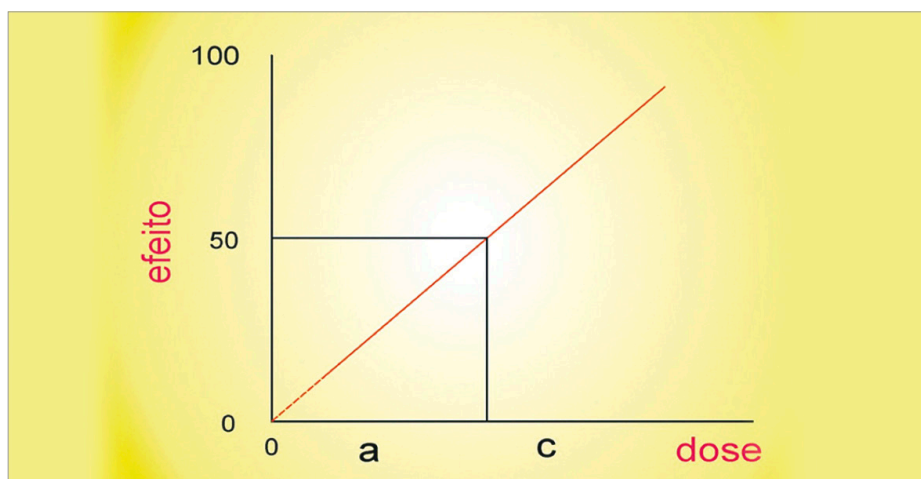
São alterações que surgem em células normais, sendo os principais efeitos o câncer e o efeito hereditário. As recomendações de proteção radiológica consideram que esse tipo de efeito pode ser induzido por qualquer dose, inclusive aquela provocada pela radiação natural; são sempre tardios e a gravidade do efeito não depende da dose, mas a probabilidade de sua ocorrência aumenta com a dose. Inicialmente consideravam como efeitos estocásticos além dos cânceres o encurtamento do período de vida e os efeitos hereditários que se manifestariam nos descendentes da pessoa irradiada. Com o passar do tempo verificou-se que os resultados sobre encurtamento da vida foram inconclusivos e, portanto, esta hipótese foi rejeitada.

Os efeitos hereditários ocorrem nas células sexuais do indivíduo irradiado e podem ser repassadas aos descendentes. Não foram observados até a presente data efeitos hereditários em populações expostas, somente em animais de laboratório. Em resumo podemos concluir que os efeitos estocásticos:

- Não apresentam dose limiar;
- Podem se manifestar no indivíduo irradiado ou no seu descendente, dependendo da célula atingida;
- A probabilidade de ocorrência é diretamente proporcional à dose.

Na figura 4 é apresentada a curva característica do efeito estocástico.

**Figura 4:** Curva característica de um efeito estocástico



Fonte: Acervo dos autores.

Com base na observação de sua ocorrência, os efeitos na saúde advindos da exposição à radiação podem ser classificados ainda como efeitos imediatos à saúde e efeitos tardios.

## 1.9 EFEITOS IMEDIATOS À SAÚDE

Os efeitos imediatos à saúde são causados pela morte/dano extensivos sobre a célula. Os exemplos são queimaduras na pele, perda de cabelo e diminuição da fertilidade. Estes efeitos à saúde são caracterizados por um limiar relativamente grande que deve ser excedido por um curto período de irradiação antes que os efeitos ocorram. A gravidade do efeito aumenta com o aumento da dose após o limiar ser excedido. Geralmente, doses agudas maiores que 50 Gy danificam o sistema nervoso central de tal forma que a morte ocorre em poucos dias. Mesmo para doses inferiores a 8 Gy, as pessoas apresentam sintomas de enfermidade causada por radiação, também conhecida como síndrome aguda da radiação. Os sintomas podem incluir náusea; vômitos; diarreia; cólicas intestinais; salivação; desidratação; fadiga; apatia; letargia; sudorese; febre; dor de cabeça e pressão baixa. O termo aguda refere-se a problemas médicos que ocorrem imediatamente após a exposição, em vez daqueles que se desenvolvem após um período prolongado. Contudo, as vítimas podem sobreviver no início, morrendo por um problema gastrointestinal, uma ou duas semanas depois. Doses menores podem não provocar danos gastrointestinais, mas ainda causam a morte após alguns meses, principalmente por danos produzidos na medula óssea. Mesmo doses menores irão retardar o início de enfermidades e produzirão menos sintomas graves. Cerca de metade daqueles que recebem doses de 2 Gy sofrem com vômitos cerca de três horas após a exposição, mas isso é raro com doses abaixo de 1 Gy.

### SÍNDROME AGUDA DA RADIAÇÃO

No caso do organismo inteiro receber uma dose elevada de radiação num curto espaço de tempo, os efeitos podem se manifestar em um período de horas ou dias, o que leva a um quadro clínico denominado Síndrome Aguda de Radiação.

Essa síndrome varia com a dose. A relação dose-sobrevivência frequentemente é descrita por seu ponto médio, a LD50, isto é, a dose que é letal para metade dos indivíduos expostos. No caso da dose ser recebida num tempo mais prolongado será necessário uma maior dose total no corpo inteiro para que estes efeitos ocorram. Por exemplo, se a taxa de dose é de aproximadamente 0,2 Gy por hora, o valor da dose letal que



mata 50 % do indivíduo irradiado, LD50, pode ser aumentado em até 50 %. Se a dose for liberada durante um mês, a LD50/60 pode ser dobrada. Em taxas dose de radiação pequena (crônica), existe a evidência de que uma síndrome da radiação crônica afeta em particular os sistemas hematopoético, imunológico e neural. As doses limiares para a depressão do sistema imunológico é de pelo menos 0,3 – 0,5 Gy por ano. Não há evidências de ocorrer reações graves na maior parte dos tecidos do corpo de indivíduos adultos ou crianças após receber doses anuais abaixo de 0,1 Gy, durante muitos anos. A medula óssea eritropoética, as células reprodutoras, e o cristalino dos olhos apresentam as maiores sensibilidades. Estimativas de doses que podem causar a morte em diferentes intervalos de tempo são apresentadas na tabela 2. Estas doses são elevadas recebidas em curto espaço de tempo.

**Tabela 2:** Intervalo de dose associado com as síndromes agudas de radiação e morte dos seres humanos expostos à radiação [ICRP103]

Dose absorvida no corpo inteiroa (Gy)	Principal efeito contribuindo para a morte	Tempo para a morte após a exposição (dias)
3-5	Dano na medula óssea (LD50/60)	30-60
5-15	Dano no trato gastrointestinal	7-20
5-15	Dano nos pulmões e rins	60-150
>15	Dano no sistema nervoso	< 5 depende da dose

**Fonte:** Publicação 103 da ICRP (Comissão Internacional de Proteção Radiológica)

a → Alguns dados sobre intervalos de dose incluem considerações de resultados de irradiações parciais do corpo.

## 1.10 EFEITOS TARDIOS À SAÚDE

Os efeitos tardios ocorrem um longo tempo após a exposição. Em geral, a maioria dos efeitos tardios à saúde são também efeitos estatísticos, isto é, para os quais a probabilidade de ocorrência depende da dose de radiação recebida. Supõe-se que estes efeitos à saúde sejam causados por modificações no material genético da célula após a exposição. Exemplos de efeitos tardios são tumores sólidos e leucemia ocorrendo em pessoas expostas à radiação. A frequência com que estes efeitos ocorrem em uma população parece aumentar com doses elevadas. A gravidade independe da dose, mas do órgão irradiado (UNSCEAR, s.d.).

## **2 GRANDEZAS FÍSICAS USADAS EM PROTEÇÃO RADIOLÓGICA PARA MENSURAR O DANO BIOLÓGICO**

As grandezas e unidades mais importantes para a proteção radiológica e a segurança são definidas pela Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU), pela Internacional Commission on Radiological Protection (ICRP) e adotadas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, que no Brasil é a autoridade nacional que regulamenta e fiscaliza o uso das radiações ionizantes. Essas grandezas físicas procuram prever a enfermidade que os diferentes tipos e energias das radiações ionizantes podem provocar no indivíduo. Examinaremos unicamente as principais delas.

### **2.1 EXPOSIÇÃO (X)**

A grandeza física Exposição é a mais antiga, definida pela primeira vez em 1925, no primeiro Congresso de Radiologia Médica, quando foi fundado o ICRU. Ela define o número de ionizações produzidas no ar, ou seja, a energia das radiações eletromagnéticas absorvidas pelo ar, portanto, só engloba as radiações X e gama, que na época eram usadas pela classe médica. As demais ainda não tinham utilidade para uso em humanos. Ainda que os organismos internacionais recomendem que não seja mais usada, a maioria dos nossos instrumentos não mede a dose diretamente no corpo humano, mas a medem no ar e, portanto, contra a vontade dos organismos internacionais persiste.

### **2.2 DOSE ABSORVIDA (D)**

A dose absorvida (D), só foi definida em 1953, pela ICRU. Ela fornece a energia absorvida por qualquer material e por qualquer tipo e energia de radiação ionizante; entre os materiais pode ser o tecido humano. Se a primeira radiação X foi descoberta em 1895, por que só em 1953 foi definida a energia absorvida em qualquer material? A resposta é simples: para a energia absorvida no ar conseguimos construir medidores desde 1925, mas a energia absorvida em um líquido ou sólido e ainda mais complexo no tecido humano, como medi-la? Esta dificuldade só foi resolvida em 1953, com a teoria de Bragg-Gray. Gray desenvolveu o medidor baseado nesta teoria, conhecida como teoria da cavidade. Ainda no ano de 1953 foi definida pela primeira vez a dose equivalente.

### **2.3 DOSE EQUIVALENTE (HT)**

Grandeza física que mede a equivalência entre doses absorvidas de diferentes radiações que produzem o mesmo efeito biológico. A dose absorvi-

da (D) é multiplicada pelo fator de radiação (WR) que leva em consideração a maneira como diferentes tipos de radiação causam danos biológicos em um tecido ou órgão. O fator de ponderação WR, é tabelado para o tipo e energia da radiação incidente no corpo (ex.: partícula  $\alpha$  WR = 20; raios gama WR = 1).

## 2.4 DOSE EFETIVA (E)

A dose efetiva considera a gravidade no corpo do indivíduo pela irradiação de cada um dos tecidos do corpo. Neste caso, ela é determinada pela multiplicação da dose absorvida (D) por um fator de ponderação do tecido ou órgão, WT, que leva em conta a sua radiosensibilidade e a gravidade ao indivíduo exposto à radiação ionizante (ex.: fígado WT = 0,05; estômago WT = 0,12).

## 2.5 DOSE COLETIVA

A dose coletiva é definida como a somatória de todas as doses efetivas individuais ou de um grupo de pessoas expostas à radiação. Como os danos biológicos se originam no indivíduo, a dose coletiva não possui significado médico ou biológico.

# 3 LIMITES DE DOSE PARA O TRABALHADOR E PARA O INDIVÍDUO DO PÚBLICO

Uma vez examinados os efeitos biológicos no ser humano e as grandezas físicas que podem mensurá-los, deve-se determinar os limites de dose no corpo que o indivíduo pode receber para que não cause transtornos durante toda a vida.

Para um melhor entendimento deste assunto é necessário compreender o histórico da sua evolução, pelo menos a partir de 1958, quando a ICRP, em sua publicação número 1 elaborou as suas recomendações.

Na época, a maior preocupação era com relação aos efeitos hereditários que se poderiam propagar por toda a população. Os radioprotetionistas perguntaram aos geneticistas da época qual seria a percentagem de dano provocado pela radiação natural no nosso patrimônio genético normal. Os geneticistas responderam que o dano estaria entre 2 % e 20 % dos danos que os indivíduos normalmente carregam.

Na época a dose média advinda da exposição às fontes naturais sobre o globo terrestre era considerada ser de 1 mSv por ano. Outro fator considerado é que a vida média dos indivíduos por geração fosse de trinta anos, ou seja, que em média aos trinta anos de idade o indivíduo se tornaria pai, aos sessenta anos avô e aos noventa anos bisavô. Neste caso

a dose média anual de radiação por geração seria 1 mSv multiplicado por trinta anos, isto é, 30 mSv por geração.

Partindo destes valores a ICRP impôs para a população como um todo um limite de 50 mSv/geração ou 1,67 mSv/ano.

Para quem trabalha com radiação, consideraram-se somente os efeitos somáticos, isto é aqueles que se manifestam no próprio indivíduo. A ICRP fixou os limites para os efeitos funcionais (atualmente denominados reações do tecido), em 0,5 Sv/ano considerando a dose limiar para os órgãos hematopoéticos (os mais sensíveis) de 1,0 Sv/ano. Para os efeitos aleatórios fixou 50 mSv/ano, mas com uma dose acumulada nos cinquenta anos de vida do trabalhador de 1,0 Sv.

Foi limitada também a dose anual de um terceiro grupo que é aquele que vive nas imediações das instalações nucleares, grupo homogêneo que recebe a maior dose de radiação, ou seja, o maior dano biológico. É um grupo em número bem maior do que o trabalhador, mas muito menor do que a população como um todo, portanto, dever-se-ia estabelecer um valor intermediário em 1,67 mSv/ano para a população e 50 mSv/ano para o trabalhador. Foi fixado um limite de dose de 5 mSv/ano.

Na primeira reformulação dos limites de dose anuais, iniciada em 1973, e concluída em 1978, foi eliminado o encurtamento da vida, uma vez que nunca foi evidenciado e constatado que os cânceres não eram completamente aleatórios, mas obedecia à teoria da probabilidade e da estatística. Ainda, os grupos críticos que receberam dose até aquela data em condições normais de trabalho nunca ultrapassaram de 1 mSv/ano e, portanto, o limite de dose anual para a população como um todo de 1,67 mSv/ano, nunca seria alcançado. Como as pessoas representativas que receberam as maiores doses não ultrapassaram 1 mSv, em 1985, a ICRP resolveu diminuir a dose para 1 mSv/ano para indivíduo do público.

Atualmente a proteção radiológica se baseia em três princípios:

■ **Princípio da Justificação** – Qualquer exposição à radiação deve ser justificada de modo que o benefício supere qualquer malefício à saúde;

■ **Princípio da otimização da proteção** – A proteção radiológica deve ser otimizada de forma que a magnitude das doses individuais, o número de pessoas expostas e a probabilidade de ocorrência de exposições mantenham-se tão baixas quanto possa ser razoavelmente exequível, tendo em conta os fatores econômicos e sociais;

■ **Princípio da Limitação de doses** – Os atuais limites de dose anuais da ANSN são estabelecidos pela norma ANSN 3.01 e correspondem aos limites internacionais da ICRP (1996) e da AIEA (2016). A exposição normal dos

indivíduos deve ser restringida de tal modo que nem a dose efetiva nem a dose equivalente nos órgãos ou tecidos de interesse, causadas pela possível combinação de exposições originadas por práticas autorizadas, excedam o limite de dose especificado pela norma ANSN 3.01, salvo em circunstâncias especiais, autorizadas pela ANSN. Esses limites de dose não se aplicam às exposições médicas.

## **4 COMO É REALIZADA A PROTEÇÃO E A SEGURANÇA PARA SATISFAZER OS LIMITES ANUAIS**

Já que vimos os danos biológicos que a radiação ionizante pode provocar, e as grandezas físicas são capazes de mensurá-los, cabe agora perguntar o que deve ser realizado para se obedecerem aos princípios básicos de proteção radiológica e os seus limites anuais?

É evidente que devem ser realizados esforços para diminuir as doses no ambiente das instalações nucleares e radiativas assim como suas vizinhanças. E como isto pode ser realizado?

Antes de responder a esta pergunta cabe esclarecer o porquê no capítulo são utilizadas as duas palavras proteção e segurança. A princípio podem parecer sinônimos, mas para os especialistas em proteção radiológica elas têm diferentes significados. O termo proteção radiológica se refere à segurança em condições normais de trabalho e a segurança se refere à proteção em condições anormais de trabalho, isto é, quando houver um desvio da normalidade. Esta anormalidade pode até envolver incidentes e acidentes. Consideramos como incidente quando a anormalidade ultrapassa os limites anuais do trabalhador dentro dos limites da instalação nuclear ou radiativa, e consideramos como acidentes quando envolver o público circunvizinho da instalação e são ultrapassados os limites anuais para o público.

Com o exposto, cabe mais uma pergunta, por que esta diferença de proteção e segurança entre o trabalho em condições normais e anormais? A resposta é simples, os dois sistemas de proteção são completamente diferentes o que pode levar a sérios problemas, mencionados a seguir: Iniciamos com a proteção, que é realizada por meio de controles diferentes: 1) controle da fonte de radiação da instalação, 2) controle do ambiente, de áreas, isto é, o percurso da radiação a partir da fonte até alcançar o indivíduo e 3) controle do próprio indivíduo. Estes controles podem ser realizados de maneira diferente.

O indivíduo pode ser protegido diminuindo ao mínimo o tempo de permanência dele próximo à fonte de radiação ou ainda pelo uso de equipamentos de proteção individual (EPI).

A proteção radiológica recomenda que o uso de EPI seja utilizado em último caso e no menor tempo possível, pois o trabalhador deve exercer sua tarefa livre, sem dificuldades com o uso do EPI. Na figura 5 são ilustrados alguns dos EPI que podem ser utilizados pelo trabalhador.

**Figura 5:** Equipamentos de Proteção Individual: máscara facial, luvas de borracha, dosímetro de alerta e capacete



Fonte: Acervo dos autores.

Um segundo sistema de proteção é fornecido pela distância entre a fonte e o indivíduo, mas este sistema é considerado primordial para distâncias de até um metro.

Sabemos que para blindar (absorver) a radiação alfa basta uma folha de papel e se ela incidir sobre a pele do indivíduo não ultrapassa a camada da epiderme, que é considerada praticamente insensível à radiação.

A radiação beta também é facilmente absorvida em espessuras pequenas de elementos químicos com número atômico pequeno, como o alumínio. Já a radiação eletromagnética ou radiação gama consegue ultrapassar todos os elementos principais, inclusive os de número atômico elevado ou densidade elevada, como o chumbo, o tungstênio ou a platina, entre outros. Esta radiação eletromagnética perde sua intensidade com o inverso do quadrado da distância, exemplificando temos:

Se a um centímetro de distância eu tiver uma intensidade  $I = x$ , a cem centímetros eu terei uma intensidade  $I = x/100^2 = I/10000$ , isto é, a intensidade ( $I$ ) diminuiu um fator de 10000, mas quando eu passo dos 100 cm = 1 m para 4 m a intensidade diminui de  $1/4^2 = 16$ , isto é, um fator de somente 16. Trabalhar a um metro de distância é fácil, pois se considera que o braço do homem-referência possui setenta centímetros de comprimento, utilizando mais uma garra ou pinça de trinta centímetros de comprimento alcança um metro. No caso, trabalhar a quatro metros da fonte torna-se difícil.

A proteção do ambiente é mais difícil e pode ser realizada absorvendo algum tipo de radiação ou alterando as trajetórias da radiação até alcançar o indivíduo.

Quando um destes sistemas de proteção ou a combinação deles não é suficiente para absorver a radiação adequadamente a única solução é o uso de blindagem, atenuação da radiação, isto é, interpor materiais absorvedores de radiação entre a fonte e o indivíduo, como por ex.: anteparos de concreto, chumbo, aço etc.

Como se mencionou, o problema encontra-se na radiação eletromagnética, raios X e gama. Neste caso, de uma maneira simples, temos o que se convencionou chamar de camada semi-redutora, CSR e camada décimo-redutora, CDR.

A CSR é a espessura de qualquer material absorvedor da radiação que reduz a sua intensidade à metade daquela que incide sobre ele. Esta espessura depende do próprio material absorvedor e da energia da radiação eletromagnética. Exemplificando, se tivermos uma intensidade de radiação eletromagnética de 1024 raios, com uma CSR ela diminui pela metade,  $1024/2 = 512$  raios, com mais uma camada semi-redutora teremos uma intensidade de  $512/2 = 256$  e com uma terceira CSR  $256/2 = 128$ , e assim por diante.

Com a CDR teremos a redução de um fator 10 em vez de 2 na intensidade, a cada uma delas.

Veremos agora a proteção relacionada à segurança, isto é aquela usada em condições anormais de trabalho, ou seja, desvio da normalidade envolvendo incidentes e acidentes.

A proteção neste caso é realizada por sistemas que se convencionam chamar de defesa em profundidade, isto é, interpondo barreiras múltiplas em diferentes distâncias entre a fonte de radiação e os indivíduos. Como exemplo citamos o reator nuclear IEA-R1, do Instituto de Pesquisas Ener-

géticas e Nucleares (IPEN). O reator propriamente dito é o núcleo do reator e está mergulhado em uma piscina, que fornece a primeira proteção; a piscina está dentro de um vaso de concreto com superfície interna de aço, constituindo a segunda proteção. O vaso de contenção encontra-se no prédio do reator; terceira proteção; mais distante do prédio encontra-se a portaria que dá acesso ao prédio, quarta proteção e por fim a portaria geral da entrada para o IPEN, a quinta proteção em profundidade.

Nas instalações nucleares e radiativas em caso de uma situação real ou potencial de incidente/acidente radiológico ou nuclear em uma de suas instalações cabe ao serviço de Radioproteção confeccionar o Plano de Emergência Radiológica (PER), que tem como objetivo coordenar e integrar as ações a ser tomadas visando o retorno à normalidade, após as situações de incidente e ou acidente.

Os incidentes/acidentes ocorrem por falha de instrumentação ou falha humana e no ato quem estava presente era o trabalhador. Também quem tem conhecimento dos possíveis incidentes e acidentes é o próprio trabalhador e, portanto, os dois grupos deveriam trabalhar em conjunto na confecção do PER.

## **5 COMO TER CERTEZA DE QUE A PROTEÇÃO E A SEGURANÇA CONTINUAM SENDO MANTIDAS COM O TRANSCORRER DO TEMPO?**

Para ter certeza que proteção e a segurança em relação à radiação ionizante continuam sendo mantidas com o transcorrer do tempo devemos fazer as medições, conhecidas como monitoramentos da radiação ionizante.

Para os trabalhadores, isto é, os indivíduos que prestam serviços em presença da radiação ionizante existem dois tipos de monitoramento conhecidos como monitoramento do local de trabalho e monitoramento individual.

### **5.1 O MONITORAMENTO DO LOCAL DE TRABALHO**

Tem um caráter preventivo, uma vez que ele pode ser avaliado antes que o trabalhador venha a receber a dose e, portanto, podem ser tomadas medidas corretivas de proteção antes da execução das tarefas pelo trabalhador.

### **5.2 O MONITORAMENTO INDIVIDUAL**

A medição é no próprio indivíduo, tem caráter confirmatório, pois confirma as doses previstas pelo monitoramento do local de trabalho. Em outras palavras, podemos dizer que o monitoramento individual estima a dose de radiação do trabalhador após ele a ter recebido ou sido exposto.



Tanto o monitoramento do local de trabalho como o monitoramento individual foram divididos em três, quanto a sua função:

1. Monitoramento de rotina;
2. Monitoramento relacionado com a tarefa;
3. Monitoramento especial.

### MONITORAMENTO TEM FUNÇÃO DE ROTINA

Quando, no caso do monitoramento do local de trabalho, avalia a dose que será recebida pelos trabalhadores que permanecem na área ou quando se quer mostrar que as condições de proteção não foram alteradas com o transcorrer do tempo. No caso do monitoramento individual, a função de rotina estima a dose dos trabalhadores. Atualmente como dosímetros individuais para a irradiação externa são utilizados os dosímetros termoluminescentes de sulfato de cálcio com ativadores de disprósio,  $\text{CaSO}_4(\text{Dy})$ , e do tipo fluoreto de lítio,  $\text{LiF}$ .

Para a dose interna, isto é, aquela provocada pela incorporação de qualquer radioisótopo é utilizado o detector de corpo inteiro ou detectores parciais de órgãos, por exemplo, detector de tireóide ou ainda por meio da análise de excretas (amostras de urina ou fezes) e em casos de acidentes para a irradiação externa a análise citogenética, entre outros.

Para o monitoramento de área e de superfície são utilizados dosímetros portáteis, móveis e fixos, geralmente com detectores do tipo, câmara de ionização, proporcionais e contador Geiger-Muller, GM. Na figura 6 são apresentados alguns desses detectores de radiação.

**Figura 6:** Detectores de radiação



Fonte: Acervo dos autores.

## **MONITORAMENTO RELACIONADO COM A TAREFA**

Quando se procura evitar, detectar e possibilitar as primeiras medições em desvios das situações normais de trabalho. Visa evitar que o pessoal venha a receber dose em caso de desvio da normalidade. Para o monitoramento individual são úteis, no caso, os dosímetros de alerta e para os locais de trabalho os dosímetros fixos.

Como as situações anormais de trabalho são causadas por falha de equipamento ou instrumentos ou por falhas humanas o lógico é que esta função do monitoramento seja exercida pelo pessoal de operação da instalação, daí a origem do seu nome.

Outra grande diferença no monitoramento de área com função de rotina e relacionado com a tarefa está na escolha dos locais, pontos de monitoramento. Enquanto os monitoramentos de rotina devem ser realizados nos locais de permanência do trabalhador, o monitoramento relacionado com a tarefa, as medições devem ser efetuadas nos locais que mais rapidamente detectam a anormalidade independentemente se há ou não a presença do trabalhador. Porém, a leitura das medições permanece onde se situa o trabalhador para alertá-lo de algum desvio da normalidade e dar a oportunidade de tomar as primeiras providências.

Uma vez abordado o monitoramento do trabalhador passaremos para o monitoramento do indivíduo do público. Este tipo de monitoramento só deve ser realizado se existir a possibilidade deste indivíduo receber doses superiores aos limites anuais estabelecidos na norma da ANSN 3.01, por exemplo, numa situação de acidente. Neste caso o monitoramento individual é considerado inviável pelo custo envolvido e pelo número de dosímetros que precisaria. Desta maneira, só é efetuado o monitoramento de área, com medições rotineiras, para verificar qualquer alteração na fauna, flora, na água e no ar em uma extensão em que é previsto o acidente mais grave acarretar uma dose igual ou superior aos limites anuais para a população circunvizinha da instalação que possui fontes radiações ionizantes.

## **MONITORAMENTO COM FUNÇÃO ESPECIAL**

Pode ocorrer tanto em situação normal de trabalho como em situações anormais reais, portanto, situações já ocorridas. Sua função é procurar resolver problemas tanto em situações normais como anormais e, portanto, têm objetivos e prazos bem definidos. Uma vez esclarecido o problema ou sanado a situação anormal o monitoramento especial é eliminado.

## 6 CONTAMINAÇÃO RADIOATIVA E PROCEDIMENTOS DE DESCONTAMINAÇÃO

Contaminação radioativa é definida como a presença indesejável de qualquer substância radioativa em pessoas, materiais e equipamentos, meios ou locais. A contaminação radioativa de superfície pode estar presente em pessoas, objetos, áreas de trabalho e áreas públicas. O risco de contaminação depende: da forma física do material radioativo (sólida, líquida, gasosa); da quantidade e da categoria do radionuclídeo contaminante e da facilidade com que pode ser transferido para outros locais ou pessoas. Quais os tipos de contaminação?

### 6.1 CONTAMINAÇÃO DE SUPERFÍCIE, NO LOCAL DE TRABALHO

**Contaminação Não Fixada** – (transferível, removível ou solta); definida como “contaminação possível de ser removida da superfície durante o manuseio normal”. A transferência pode se dar pelo contato de uma superfície com outra ou pela suspensão dos contaminantes no ar.

**Contaminação Fixada** – definida como “contaminação não-removível da superfície durante o manuseio normal”.

Como medidas de prevenção e controle deve-se estar cientes da necessidade de fazer: o planejamento da área de trabalho, confinamento do material radioativo, controle de acesso às áreas sujeitas à contaminação (supervisionada e controlada); conhecer os procedimentos operacionais, utilizar equipamentos de proteção, fazer o monitoramento de superfície e utilizar, sempre que necessário as técnicas de descontaminação.

### 6.2 CONTAMINAÇÃO DE PESSOAS

No caso de Contaminação externa

- Exame das mãos, pés, cabeça e roupas de trabalhadores sujeitos ao risco de contaminação externa com monitores de contaminação adequados sempre que se retirarem das áreas sujeitas a contaminações, ou sempre que houver uma suspeita de ocorrência de contaminação durante o trabalho;
- Realização ou providências para a descontaminação de trabalhadores, imediatamente após a constatação de ocorrências de contaminação;
- Não permitir a permanência de trabalhadores em áreas com contaminação, e o contato de pessoas com contaminação com outras não contaminadas;
- Liberação de sapatos, luvas e outros apetrechos, acessórios e meios usados para a proteção individual de trabalhadores contaminados, para

reutilização somente após a descontaminação deles, após a inspeção e aprovação competentes.

#### No caso de contaminação interna

O monitoramento individual e os cuidados relativos à contaminação interna devem atender aos seguintes requisitos:

- Ênfase na segurança das instalações, com vistas à minimização de liberação de material radioativo e/ou radiação;
- Cuidados para evitar a contaminação interna: Não ingerir alimentos, não ingerir bebidas e não fumar nos ambientes de laboratórios/instalação de acordo com a classificação das áreas.

### 6.3 CONTAMINAÇÃO DE MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Os principais materiais e equipamentos que se contaminam são aqueles usados em laboratórios químicos como vidrarias, pinças e equipamentos em geral que não são considerados descartáveis. Porém, como materiais podemos considerar os elementos químicos da tabela periódica e seus agregados mais complexos como substâncias, ligas etc. Exemplificando, na produção do Iodo-131 utilizado na medicina são ativados mais de uma dezena de radioisótopos dele. Alguns destes radioisótopos podem ser úteis também na medicina como o Iodo-125 e o Iodo-123, mas muitos deles não têm utilidade e vão gerar rejeitos radioativos. Todos estes radioisótopos devem ser separados do Iodo-131. Esses processos químicos de separação e purificação do Iodo-131 dos demais radioisótopos podem ser considerados um método de descontaminação do Iodo-131 e os demais radioisótopos como agentes contaminantes.

### 6.4 CONTAMINAÇÃO DOS MEIOS

São considerados como meios àqueles empregados nos processos com materiais radioativos como vasilhames de contenção de transporte de um local do processo para outro etc.

### 6.5 DESCONTAMINAÇÃO DE ÁREAS NORMA-ANSN 3.02

A definição de descontaminação, de acordo com a Norma ANSN 3.02, é dada como a “remoção ou redução da contaminação a níveis aceitáveis”.

Deve-se realizar, com a devida presteza, o isolamento e a descontaminação de áreas contaminadas, evitando a propagação da contaminação. A metodologia do trabalho requer a utilização de pinças, forração com papel absorvente, o monitoramento a cada trabalho e

o controle de acesso e saída de pessoas e de materiais do local. O programa de monitoramento de superfície envolve: a verificação dos níveis de contaminação nas áreas de trabalho, nos equipamentos, nas roupas de trabalho nos calçados e na pele dos trabalhadores. A avaliação da contaminação pode ser realizada pelas técnicas:

■ **Monitoramento direto** – realizado utilizando-se monitores de contaminação, geralmente portáteis, que medem as radiações emitidas pelos radionuclídeos, diretamente na superfície contaminada.

■ **Monitoramento indireto** – método complementar, geralmente é utilizado quando a geometria é inadequada ou apresenta interferência de outras fontes de radiação que impedem o monitoramento direto.

A avaliação da contaminação pode ser realizada pela análise de esfregaços de superfícies contaminadas. A medida da contaminação é obtida utilizando-se contadores apropriados, dependendo do radionuclídeo presente.

## 6.6 PRINCÍPIOS DE DESCONTAMINAÇÃO

O procedimento para descontaminar uma superfície depende das características (química, física e radioquímica) da contaminação radioativa e da superfície contaminada (material base e acabamento superficial). Os métodos de descontaminação de superfície podem ser por processos físicos, químicos ou, geralmente, por aqueles que envolvem a combinação de ambos.

■ **Nos processos físicos** a metodologia empregada pode ser por fricção, abrasão, sucção/aspiração e por ultrassom.

■ **Nos processos químicos** a técnica pode ser utilizada por via úmida/imersão.

- Solução descontaminante em contato com a superfície contaminada (removem o contaminante da superfície)
- Retirar o contaminante radioativo da superfície e mantê-lo na solução, de maneira a não danificar demasiadamente a superfície (compostos solúveis e estáveis na solução).

**Tipos de reagentes utilizados:**

- **Uso de Complexantes** (quelantes): citratos solúveis e EDTA, ácido etilénico (ácido acético);
- **Uso de reagentes tensoativos** são componentes básicos dos detergentes, presentes no sabão com a função de remover as substâncias graxas ou oleosas;

- **Uso de ácidos (superfícies metálicas)** com a finalidade de solubilizar o contaminante e remover uma fina camada da superfície, muitas vezes formada por óxido. As concentrações dos ácidos devem ser adequadas, pois pode ocorrer a liberação de gases e vapores nocivos. Exemplos: ácidos nítrico, clorídrico e sulfúrico oxálico e cítrico.

#### Uso de solventes orgânicos

Uso de bases ou álcalis (ex., hidróxido de sódio) na remoção de tintas e de camadas gordurosas. A eficiência de descontaminação vai depender do tipo de reagente e da concentração da solução, do método empregado, da temperatura, do pH da solução e do tempo de contato ou condições de agitação.

### 6.7 DESCONTAMINAÇÃO DE PESSOAS -NORMA ANSN 3.02

**Hábito de rotina** – As pessoas que trabalham com materiais radioativos devem lavar e monitorar as partes expostas do corpo, principalmente as mãos.

**Contaminação Externa** – “contaminação na superfície da pele, cabelos e vestimenta de pessoas”. Quando houver suspeita de contaminação externa é recomendado investigar a história ocupacional – antecedente de contato acidental durante trabalho com fontes abertas; fazer a identificação por detectores existentes na saída das áreas e realizar a confirmação e quantificação utilizando-se detectores especificamente aplicáveis.

#### Objetivos do tratamento descontaminante

- Remover o radionuclídeo para reduzir a taxa de dose e evitar sua incorporação,
- Melhorar a exatidão de contagem utilizando por ex., o contador de corpo inteiro, quando se requer estimar a dose interna do radionuclídeo contaminante.

Se existir uma lesão que coloque em risco a vida, levar a pessoa contaminada imediatamente ao Serviço médico, sem tentar a descontaminação. A decisão final deve ser adotada pelo profissional médico.

A descontaminação de pessoas engloba ainda procedimentos específicos para a pele, face, olhos, cabelos, descontaminação de vestimentas de trabalho. O processo de descontaminação aplica-se também a áreas de trabalho, descontaminação de peças e utensílios.

### 6.8 DESCONTAMINAÇÃO DE MATERIAIS E EQUIPAMENTOS E DOS MEIOS.

Os procedimentos de descontaminação, geralmente são realizados em laboratórios de serviço de radioproteção e são utilizados procedimentos



análogos à descontaminação de superfície. Somente o procedimento de separação isotópica, como por exemplo, do lodo é realizado pela própria equipe da produção de radioisótopo de interesse por processos químicos e/ou metalúrgicos.

## **7** PRODUÇÃO DE REJEITOS RADIOATIVOS

### **7.1** REJEITOS RADIOATIVOS

Rejeitos radioativos são materiais radioativos para os quais não se prevê nenhuma utilização presente ou futura. Os rejeitos radioativos são originários de vários processos, oriundos das diversas aplicações como industrial, médica e de pesquisa da energia nuclear em todo o território nacional. Os rejeitos gerados advêm de fontes de radioterapia exauridas (radioatividade abaixo da recomendada para uso em tratamentos); materiais contaminados em tarefas com fontes radioativas abertas; materiais radioativos utilizados para pesquisa e não reutilizáveis, materiais contaminados na operação de centrais nucleares, como os filtros que mantêm a água do reator purificada para seu uso normal; para-raios radioativos fora de uso; materiais produzidos na indústria de combustíveis nucleares, desde a mineração à produção do elemento combustível. A tudo isto, se somam os rejeitos produzidos nos procedimentos de descontaminação tratados no capítulo anterior.

Por conterem radionuclídeos e outros poluentes, os rejeitos oferecem risco à saúde, ao patrimônio público e privado, impactam o meio ambiente e afetam a segurança pública. Por isso requerem cuidados especiais tanto na sua geração quanto no manuseio, coleta, tratamento, acondicionamento, armazenamento, transporte e deposição definitiva.

Os valores de concentração de radionuclídeos e sua forma física e química geram grande variedade de opções para o gerenciamento dos rejeitos e sua destinação.

Alguns rejeitos radioativos podem atingir níveis de inocuidade que permitem sua liberação como rejeitos normais. Isso irá depender do tipo de radionuclídeos que contém, da forma física em que se encontram da concentração existente desses radionuclídeos no material e da meia-vida. As condições para a chamada dispensa estão estabelecidas em Norma da ANSN e devem ser rigorosamente obedecidas. Os rejeitos radioativos, quando não atingirem valores que possam ser dispensados, devem ser armazenados de forma segura, de forma a não afetar os indivíduos ocupacionalmente expostos, os indivíduos do público ou o meio ambiente.

O recolhimento e armazenamento de rejeitos radioativos é, de acordo com a Lei n.º 10.308/2001, uma atividade de responsabilidade legal exclusiva da CNEN que atende às instalações que geram rejeitos radioativos que necessitam de destinação apropriada. Os rejeitos radioativos são recolhidos e armazenados em depósitos intermediários existentes em unidades técnico-científicas da CNEN. Além disso, a CNEN realiza o controle institucional de Depósito Final de Abadia de Goiás, onde estão armazenados definitivamente os rejeitos gerados em decorrência do acidente com Cs-137 em Goiânia.

## 7.2 TRATAMENTO DE REJEITOS RADIOATIVOS

Consiste em um conjunto de ações para a redução do volume, o condicionamento físico e químico do rejeito, visando aumentar a segurança, compatibilizá-lo com os critérios de dispensa ou de aceitação para deposição, e reduzir os custos das etapas posteriores da gerência de rejeitos radioativos.

Os principais processos utilizados para tratamento de **rejeitos radioativos sólidos** são: compactação, incineração, descontaminação; acondicionamento; e encapsulamento.

Os principais processos utilizados para tratamento de **rejeitos líquidos** são: precipitação química; troca-iônica; e evaporação.

Os principais processos utilizados para tratamento de **rejeitos gasosos** são: filtração; e lavagem.

Qualquer processo de tratamento de rejeitos radioativos está sujeito à aprovação prévia da ANSN (Norma ANSN 8.01, 2014).

Os rejeitos radioativos, depois de tratados e imobilizados, precisam ser devidamente caracterizados quanto à homogeneidade, permeabilidade, lixiviabilidade, resistência mecânica, resistência à radiação, resistência ao ataque químico, resistência ao ataque microbiano, resistência ao fogo e algumas outras propriedades de interesse nas etapas subsequentes da gerência dos rejeitos, principalmente a disposição final.

## 7.3 REJEITOS RADIOATIVOS E DEPÓSITOS DE REJEITOS

As condições para a denominada dispensa ou não dos rejeitos estão estabelecidas em Normas da ANSN e devem ser rigorosamente obedecidas. São elas: ANSN 8.01 *Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio* (Resolução ANSN 343/25), ANSN 8.02 *Licenciamento de Depósitos de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação* (Resolução 168/14), ANSN 6.06 *Seleção e Escolha de Locais para Depósitos de Rejeitos Radioativos* (Resolução CNEN

014/89) e ANSN 6.09 *Critérios de Aceitação para Deposição de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação* (Resolução CNEN 012/02).

Na legislação brasileira existem três tipos de depósito para rejeitos radioativos: o inicial é junto à instalação geradora do rejeito, e fica sob sua responsabilidade; o intermediário, sob responsabilidade da CNEN, onde ficam os rejeitos que aguardam sua destinação definitiva; o depósito final, também sob responsabilidade da CNEN, para onde devem ser destinados os rejeitos para **deposição definitiva**. Além desses, pode ser definido o **depósito provisório**, destinado a guardar temporariamente os rejeitos gerados por ocasião de um incidente ou acidente radiológico ou nuclear. O manuseio e armazenamento de rejeitos são definidos pelo Plano de Gerenciamento de Rejeitos da Instalação que deve ser aprovado pela ANSN.

Os depósitos definitivos no solo são de três tipos, a saber: 1) vala ou profundidade rasa, 2) profundidade intermediária e 3) grande profundidade. Não é qualquer terreno baldio ou distante de habitações que satisfaz para o sepultamento de rejeitos radioativos sólidos, mas deve ser bem escolhido.

Mostraremos isto por meio de um exemplo e também as implicações que se originam em consequência de seus pressupostos. O exemplo foi escolhido em virtude das celeumas e da politicagem que ele provocou e continua provocando. São os rejeitos de grande atividade e meia vida longa, produzidos pelos reatores de potência nuclear geradores de energia elétrica. Estes grandes reatores que produzem por volta ou até mais do que 1,5 mW/hora produzem três metros cúbicos de rejeitos por ano, que por tratamento são vitrificados. Os primeiros reatores de potência possuíam uma vida média de funcionamento de trinta anos que após a reforma foi prolongado para quarenta anos e atualmente os novos reatores possuem uma vida média de setenta anos. Considerando estes últimos reatores teremos  $3 \times 70 = 210$  metros cúbicos de rejeitos vitrificados. Este grande volume de rejeitos que engloba a atual vida média de um reator ocupa uma sala de 10 m de comprimento por 7 m de largura e 3 m de altura, isto é,  $10 \times 7 \times 3 = 210 \text{ m}^3$ .

Na Alemanha, até recentemente este rejeito era colocado em minas de sal profundas. São famosas as minas de sal de Esse, atualmente lotadas de rejeito. Cabe a pergunta, porque foram escolhidas minas de sal exauridas e não outro tipo de mina, como as de ferro, cobre, alumínio etc.?

A resposta é simples, na mina de sal não penetra água, se não o sal seria liquefeito na própria mina por causa de sua solubilidade. Este tipo de solo não aquífero evita um grave problema de que a água local poderia penetrar ainda mais no solo até alcançar uma corrente submersa de água e carregar consigo o rejeito radioativo.

Uma segunda pergunta que nós faríamos é se daqui a algumas centenas de anos seria mantida a mesma tecnologia atual, sem nenhum progresso?

Achamos muito difícil dar uma resposta afirmativa a esta pergunta, uma vez que a tecnologia está se desenvolvendo e progredindo a olhos vistos. Provavelmente daqui a algumas centenas de anos terão novas tecnologias e talvez toda a tecnologia atual já tenha sido sepultada e esquecida.

## **8 TRANSPORTE DE MATERIAIS RADIOATIVOS**

Com a liberação de energia nuclear para usos pacíficos na década de 1950, sabia-se que haveria uma grande multiplicação de instalações produtoras de fontes de radiação ionizante geradas por materiais radiativos naturais e artificiais ou equipamentos produtores de radiação como aceleradores, máquinas de raios X, etc.

É evidente que estes materiais e equipamentos devem ser transportados desde a fonte produtora até o local de seu uso por todas as vias e meios possíveis. Este transporte pode ser por via terrestre, área e marítima. A via terrestre pode ainda ser realizada por ferrovias ou autoestradas. Desta maneira estes materiais e equipamentos produtores de radiação deveriam ser transportados por estes meios em segurança, uma vez que estão classificados na categoria sete de materiais perigosos.

Em virtude disto deveriam ser desenvolvidos diferentes tipos de volume para o transporte em segurança utilizando as rotas e os meios já disponíveis para os outros materiais e realizados pelos transportadores já existentes para os demais materiais.

Dentro do possível, deveria ser feito sem a necessidade de exigir grandes especializações por parte dos trabalhadores, mas com a certeza que o material ou equipamento emissor de radiação está sendo transportado em segurança e com a menor possibilidade de ocorrer um acidente com a consequente exposição e/ou contaminação provocada pelo material radioativo transportado.

É evidente que estes diferentes tipos de volumes devem ser conhecidos por todos, desde os seus fabricantes, o indivíduo que coloca o material radioativo nos volumes, transportadores, receptores e usuários, bem como os órgãos reguladores e fiscalizadores como as categorias envolvidas, bombeiros, polícia rodoviária, polícia militar etc.

Além do fato de conhecer o tipo de volume e, portanto, os seus valores de taxa de dose externa e a atividade do material radioativo a ser transportado, devemos conhecer os tipos de etiqueta colocada na parte externa do volume com todas essas informações para que o indivíduo tome as devidas precauções. Informamos que para o transporte terrestre existem também etiquetas para o veículo transportador.

## 8.1 TIPOS DE VOLUMES

Os tipos de volumes utilizados para o transporte de material radioativo são os seguintes:

- Volume Exceptivo,
- Volume Industrial, Tipo I
- Volume Industrial, Tipo II
- Volume Industrial, Tipo III
- Volume Tipo A
- Volume Tipo B(U)
- Volume Tipo B(M)
- Volume Tipo C

A seguir daremos uma definição ou noção para cada uma delas, de maneira a serem diferenciadas entre si.

**Volume Exceptivo** – é aquele que contém uma quantidade de material radioativo com atividade tão pequena que não se justifica satisfazer as publicações nacionais e internacionais da AIEA referente aos regulamentos para o transporte seguro de materiais radioativos. Os valores destas atividades estão especificados nestes regulamentos.

Já os volumes, Tipo industrial, I, II e III possuem as exigências realmente dos volumes usados nas atividades industriais que tenham esta classificação. No campo das radiações ionizantes as atividades que eles podem conter são pequenas, de maneira tal que mesmo em casos de anormalidades não oferecem maiores riscos aos indivíduos encarregados no transporte seguro.

**Volume industrial tipo I** – tem um limite de atividade menor que o volume Tipo II e esta menor que a embalagem Tipo III. Os demais volumes, Tipo A, B(U), B(M) e C incorporam atividades que em caso de acidentes graves precisam de uma intervenção da proteção radiológica e de outras organizações governamentais como a defesa civil, polícia etc.

**Volumes do Tipo B(U) e B(M)** – podem transportar qualquer atividade acima do limite da embalagem Tipo A.

A distinção entre o volume Tipo B(U) e B(M) é que para o transporte da Tipo B(U) deve ser aprovado tanto pelo expedidor como pelo país receptor. O (U) vem de unilateral, isto é, a aprovação unilateral. O volume B(M) significa aprovação multilateral, isto é, deve ser aprovado por todos os países que transita. Disto resulta, como podemos ver que todos os países

podem fazer os próprios regulamentos, mas não podem alterar muito os regulamentos da AIEA para inviabilizar o transporte de volumes vindo de outros países com enorme prejuízo para si próprio. Os volumes Tipo C, em virtude das características do material transportado necessitam de especificações especiais que se somam àquelas dos volumes Tipo A, B(U) B(M).

## 8.2 ETIQUETAS PARA VOLUMES DE MATERIAIS RADIATIVOS

As etiquetas são obrigatórias para os volumes Tipo A, B(U) e B(M) e C. Nas etiquetas além das informações já dadas como tipo de radioisótopo, atividade, forma química e física contém o que se convencionou chamar índice de transporte, calculado da seguinte maneira:

- Determina-se o valor máximo da radiação em taxas de dose, unidades de milisievert por hora (mSv/h) a um metro de distância das superfícies da embalagem. O valor determinado é multiplicado por 100 e o número resultante é o índice de transporte;
- O valor assim determinado deve ser arredondado até a primeira casa decimal (por exemplo: 1,13 que arredondando fica 1,2) a não ser o valor obtido de 0,05 ou menor, deve ser considerado zero.

Existem três categorias de etiquetas assim denominadas: I Branca, II amarela e III Amarela.

A não ser como uso exclusivo o índice de transporte de qualquer embalagem não pode exceder 10.

*Uso exclusivo significa uso único, por um simples expedidor, por um meio de transporte ou um grande container de carga com relação ao carregamento e descarregamento, inicial, intermediário e final que é conduzido de acordo com as diretrizes do expedidor e do destinatário.*

Entende-se por meio de transporte:

- Por rodovia ou ferrovia, qualquer veículo, vagão, trem etc.;
- Por água, qualquer navio, um porão, compartimento ou área do convés;
- Por ar, qualquer aeronave.

Sob uso exclusivo o valor máximo da radiação em qualquer ponto sobre as superfícies externas do volume não deve exceder 10 mSv/h. Estas etiquetas devem obedecer às condições especificadas na Tabela 3 a seguir.

**Tabela 3:** Categorias de etiquetas

Condições		
Índice de transporte	Valor máximo de radiação em qualquer ponto da superfície externa	Categoria
0a	Até 0,005 mSv/h	I-Branca
> 0 até que 1a	> 0,005 mSv/h até 0,5 mSv/h	II Amarela
> 1 até 10	> 0,5 mSv/h até 2 mSv/h	III Amarela
> 10	> 2 mSv/h até 10 mSv/h	III Amarela

**Fonte:** Elaborado pelo autores.

a Se o índice de transporte, IT, não for superior a 0,05 o valor encostado é zero.

b Também pode ser transportado sob uso exclusivo.

Para cada transporte, devem ser considerados tanto o IT como o valor da radiação na superfície da embalagem para determinar a categoria adequada. Quando o IT satisfaz as condições de uma categoria, mas o valor da taxa de radiação na superfície satisfaz as condições para uma categoria diferente, a embalagem deve ser identificada com a maior categoria.

Para este propósito, a categoria I-Branca é considerada ser a menor categoria. As etiquetas além dos dados já reportados devem conter o número das Nações Unidas, precedido da sigla “UN”. O número das Nações Unidas encontra-se em tabela das publicações relativas ao transporte de material radioativo da publicação da AIEA e da ANSN.

Na figura seguinte são apresentados os três tipos de etiquetas (rótulos) e suas categorias: I Branca, II amarela e III Amarela, sugeridas pela AIEA e exigidas pela ANSN.

**Figura 7:** Etiquetas de transporte radioativo

**Fonte:** Acervo dos autores.



## 9 COOPERAÇÃO COM AS EXIGÊNCIAS DE SAÚDE PÚBLICA, DEFESA CIVIL E OUTRAS ATIVIDADES

O especialista em proteção radiológica, dado o seu treinamento altamente especializado, tem responsabilidade perante a sua comunidade que vai além do simples desempenho de seus deveres técnicos dentro dos limites de sua instalação ou laboratório.

---

➡ **Segurança pública** – Cabe à proteção radiológica estabelecer uma colaboração com os órgãos de defesa civil, como bombeiros, polícias, ANSN, entre outros, caso seja previsível a sua necessidade. Em caso de incidentes e acidentes a ANSN sempre deve ser acionada, pois ela e seus Institutos têm uma equipe de emergência para atendimento vinte e quatro horas por dia e todos os dias da semana.

---

➡ **Saúde pública** – Colaboração junto às autoridades sanitárias da comunidade, cidade, estado ou país. Há a preocupação com os efeitos de muitas espécies de agentes de poluição. Entretanto, a respeito dos efeitos dos efluentes radioativos no tocante a saúde da comunidade, muitas autoridades sanitárias nada sabem sobre o assunto. Um dos mais importantes serviços que o especialista em proteção radiológica pode render a sua comunidade é o de manter uma estreita colaboração com o oficial da saúde pública e discutir do modo mais completo possível as questões relativas à proteção radiológica.

---

➡ **Elaboração de leis, normas e resoluções** – O especialista de proteção radiológica pode colaborar participando de normas relacionadas com as radiações ionizantes de múltiplos órgãos governamentais, ministérios e secretarias interessados nas radiações ionizantes, como a título de exemplo, ministérios da saúde, economia e suas secretarias, além das agências como IBAMA, etc.

---

➡ **Poder judiciário** – O especialista em proteção radiológica pode atuar como testemunha de uma ou as duas partes litigiosas, geralmente por motivos de insalubridade ou periculosidade a ser devida por trabalho em presença da radiação ionizante de acordo com as normas regulamentadoras 5 e 15 do ministério do trabalho (NR-5 e NR-15). Outras vezes, por seu conhecimento técnico-científico pode ser convidado como perito do juiz.

---

➡ **Agências reguladoras** – A título de exemplo, citamos um grande problema que a população enfrenta: as recusas e demoras nos portos e aeroportos para o transporte de fontes radioativas para fins médicos. Por incrível que pareça o comandante de uma aeronave ou embarcação pode recusar o transporte de materiais que ele considere que põe em risco o meio de transporte ou os passageiros e a tripulação. Seria desejável e necessária uma possível colaboração junto à Agência Nacional de Aviação Civil, ANAC, agência reguladora federal cuja responsabilidade é normatizar e supervisionar a atividade de aviação civil. São necessárias providências para informar a todos os envolvidos (de companhias aéreas a comandantes) que estes radioisótopos são medicamentos que salvam vidas humanas e não apresentam riscos algum ao transportador. Apenas prejudica o paciente que espera pelo diagnóstico ou pelo tratamento.

---

Outra questão em relação ao transporte dos materiais radioativos são conflitos de horários do transporte entre estados ou entre municípios, sempre prejudicando o paciente. Várias vezes os especialistas em proteção radiológica se dirigem à câmara estadual ou à câmara de vereadores para resolver estes tipos de problemas ou para instituírem normas de proteção e segurança.

## **10 A ENERGIA NUCLEAR: ENTENDER PARA OPINAR**

A este respeito a primeira pergunta que nos ocorre é: por que devemos ensinar tais conhecimentos para toda uma nação, quando esta atividade humana afetaria unicamente os seus trabalhadores e as populações circunvizinhas à instalação nuclear? A resposta a esta pergunta é simples. Os que são contrários aos usos benéficos da energia nuclear, o são por motivos econômicos de concorrência, ou por falta de conhecimento técnico-científico e passam ser persuadidos por aqueles que possuem maior poder de convencimento, que são contra a energia nuclear e abraçam a propaganda contrária das grandes potências.

Vamos mostrar, por meio de exemplo, que com o conhecimento adquirido, por meio deste livro, os cidadãos não serão ludibriados.

Como primeiro exemplo, citaremos a potência elétrica nuclear da França. A produção de energia elétrica naquele país, de origem nuclear é de 76 % do total da energia consumida. Quando começaram as instalações nucleares, em virtude da grande propaganda adversa dos Estados Unidos, Rússia e Grã-Bretanha, a população mostrou-se contrária a estas instalações. Como vimos, em instalações de potência elétrica de origem nuclear é obrigatório o monitoramento ambiental da fauna e flora, principalmente aquela de fornecimento de alimentos para a raça humana, água e ar, em uma extensão que vai da usina nuclear até uma dose previsível de  $1 \text{ mSv a}^{-1}$  para um acidente nuclear de consequências mais graves. Isto vinha sendo feito regularmente pelos servidores das instalações. Estas primeiras instalações eram enfileiradas de norte a sul da França, no sopé das montanhas dos Alpes.

O que ocorreu é que os municípios circunvizinhos à área monitorada reclamaram que eles não haviam sido incluídos nestes monitoramentos e um comitê de vereadores se dirigiu à instalação nuclear pertinente, para discutir o assunto. Concluindo, a equipe da instalação mostrou que seria um gasto financeiro inútil, o que encareceria a produção da energia elétrica gerada. O comitê, entretanto, informou que a população estava temerosa com a instalação e solicitava que fossem feitas as medidas em seus municípios, para se sentir mais protegida. O resultado foi que o monitoramento ambiental foi estendido até Marselha.

Entretanto, todas estas medições são inúteis e muito dispendiosas, uma vez que, além de aumentar os laboratórios de medida, também houve a necessidade de aumentar o pessoal técnico da instalação. Assim, o governo decidiu reverter todos estes gastos no ensino da população quanto às vantagens do desenvolvimento do parque nuclear no país.

Resultado: a população constatou que as instalações nucleares eram colocadas em vilas de pequena habitação populacional, e que próximo a elas os benefícios e desenvolvimento foram imensos: estradas asfaltadas; mais e melhores escolas, pois emergiu a necessidade de técnicos de níveis médio e superior para operacionalizá-las; vantagens da qualidade de vida, incluindo o alimentar e o lazer e consequentemente atraindo mais pessoas para as pequenas vilas, que se tornaram cidades. Em virtude destes resultados, quando o governo resolve construir uma nova instalação, os pequenos municípios digladiam-se para que sejam escolhidos.

Agora vamos fornecer alguns exemplos relativos aos acidentes nucleares. Começamos com o acidente de Three Miles Island (USA). O governo evacuou todas as mulheres grávidas e crianças das redondezas. Os resultados técnicos do acidente é que a pessoa representativa recebeu uma dose de 0,4 mSv, inferior ao limite do público que, como sabemos é de 1 mSv<sup>a-1</sup>. Já pensaram no custo envolvido nessa realocação de parte da população sem necessidade, além do trauma com a separação de pais e filhos? Na mesma época, a Companhia Fulbrite fechou algumas fábricas despedindo três mil servidores. Dez anos depois uma enquete revelou que as demissões ainda eram lembradas pela população e o acidente nuclear não.

Passemos agora ao acidente de Chernobyl. Praticamente evacuaram uma grande população, desnecessariamente, o que não ocorreria se tivessem respeitado o limite técnico dos indivíduos do público. Imaginem o custo gigantesco que tiveram e os transtornos da população que teve de abandonar os seus lares, empregos e outros afazeres para se deslocarem para um ambiente desconhecido e recomeçar uma vida nova, encarados inclusive, como intrusos pela população local.

O acidente de Chernobyl e o de Three Miles Island são bons motivos para o conhecimento fornecido pela disciplina de energia nuclear, pois deste capítulo, vocês leitores têm condições de refutar o realojamento para outros locais, se os limites de dose técnico-científicos forem respeitados.

Como último exemplo, lembramos o acidente ocorrido no Brasil, na cidade de Goiânia, em 1987. Lá também, contrariamente ao que está reportado na publicação da Agência Internacional de Energia Nuclear as descontaminações efetuadas reduziram as doses àquelas naturais de fundo,

gerando uma enorme quantidade de rejeitos radioativos a um custo vultoso o que poderia ter sido evitado. Novamente, se os limites anuais para o público fossem respeitados, os rejeitos radioativos teriam sido inferiores a um décimo daquele produzido e o dinheiro gasto, poderia ser revertido para outras atividades benéficas e necessárias à sociedade. Por falta de conhecimento e temor da radiação, a população incentivou a redução ao valor da radiação natural de fundo. Com os conhecimentos resultantes desta disciplina, esperamos que a população não desperdice tanta verba.

Passemos agora às atividades normais corriqueiras de nossa vida humana.

Começaremos com a medicina nuclear, que é utilizada tanto em diagnóstico como em tratamento de uma grande quantidade de enfermidades, como diversos cânceres.

Sempre referente à medicina, convém ressaltar que a esterilização de material cirúrgico descartável, incluindo seringas e outros é possível graças à sua esterilização por irradiação, utilizando-se a radiação ionizante. Na falta dela voltaríamos a aferventar todo o material em água.

Outras atividades podem ser mencionadas: a preservação dos alimentos que são irradiados que, além de reduzir a níveis insignificantes microrganismos nocivos, aumenta a conservação e a validade de consumo do alimento, evitando assim o seu desperdício. Atualmente, em nosso país, que pouco usa esta técnica, são desperdiçados cerca de 30 % dos alimentos produzidos, lembrando que temos uma significativa porcentagem de subnutridos na população.

Na agricultura a radiação é amplamente usada para a diminuição de populações de insetos considerado pragas, para melhorar a qualidade dos alimentos.

Finalizando, atualmente, é difícil encontrar uma atividade humana em que a radiação não esteja envolvida, por algum motivo.

Acreditamos que com o conhecimento desta disciplina à população não se deixará ludibriar por falsos entendedores do assunto, mas que possuem um forte poder de persuasão.

## ■ REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR 5 – Comissão Interna de Prevenção de Acidentes (CIPA). *Diário Oficial da União*, Brasília (DF), 6 jul. 1978. Disponível em: <http://www.guiatrabalhista.com.br/legislacao/nr/nr5.htm>. Acesso em: 24 set. 2019.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR 15 – Atividades e Operações Insalubres. Disponível em: <http://trabalho.gov.br/seguranca-e-saude-no-trabalho/normatizacao/normas-regulamentadoras/norma-regulamentadora-n-15-atividades-e-operacoes-insalubres>. Acesso em: 24 set. 2019.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). **Radioproteção e Dosimetria: fundamentos**. 10. rev. Rio de Janeiro: 2014. Cap. 8: Gerência de rejeitos radioativos. Disponível em: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/45/073/45073465.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/073/45073465.pdf). Acesso em: 20 ago. 2019.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN). Critérios de aceitação para deposição de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação. **Diário Oficial da União**, Brasília (DF), 23 set. 2002. (Norma ANSN 6.09. Resolução CNEN 012/02).

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN). Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica. **Diário Oficial da União**, Brasília (DF), 11 mar. 2014. (Norma ANSN 3.01. Resolução CNEN 344/25).

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN). Gerência de rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação. **Diário Oficial da União**, Brasília (DF), 15 abr. 2014. (Norma ANSN 8.01. Resolução CNEN 343/25).

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN). Seleção e escolha de locais para depósitos de rejeitos radioativos. **Diário Oficial da União**, Brasília (DF), 24 jan. 1990. (Norma ANSN 6.06. Resolução CNEN 014/89).

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN). Serviços de radioproteção. **Diário Oficial da União**, Brasília (DF), 17 set. 2018. (Norma ANSN 3.02. Resolução CNEN 231 de 18 setembro de 2018).

HINE, H.; Brownell, G. L. **Radiation Dosimetry**. Nova Iorque: Academic, 1956.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Viena, 1996. (Safety Series n.º 115).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Occupational radiation protection**. Viena, 2018. (General Safety Guide, n.º GSG-7).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Radiation protection and safety of radiation Sources: international basic safety standards**. Vienna, 2014. (General Safety Requirements n.º GSR, part. 3).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Regulations for the safe transport of radioactive material**. Viena, 2018 (Specific Safety, Requirement, n.º SSR-6, rev. 1).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. IAEA Safety Standards. **Basic requirements for personnel monitoring**, Vienna, 1980 (Safety Series n. 14).

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **The management system for the safe transport of radioactive material.** Viena, 2008 (Safety Guide, n.º TS-G-1.4).

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS and MEASUREMENTS. Quantities and units in radiation protection dosimetry. **ICRU Reports**, Maryland, n. 51, 1993.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS. **Fundamental quantities and units for ionizing radiation.** Bethesda, 1998 (n. 60).

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection – 1990.** London, 1991 (ICRP Publication, n. 60).

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). **General principles of monitoring for radiation protection of workers.** London, 1982 (ICRP Publication, n. 35).

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). **General principles of monitoring for the radiation protection of workers.** London: Pergamon, 1997 (ICRP Publication, n. 75).

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.** London, 1958 (ICRP Publication, n. 1).

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.** London, 1977 (ICRP Publication, n. 26).

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (ICRP). **The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection.** Elsevier, 2007 (ICRP Publication, n. 103).

OKUNO, Emiko. Efeitos biológicos das radiações ionizantes. **Estudos avançados, [s.l.]**, v. 27, n. 77, 2013.

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION (UNSCEAR). Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (United Nations Environment Programme – UNEP). **Radiação: efeitos e fontes. [S.l.: s.n.]**, 2016. Tradução de: Radiation: doses, effects, risks.

WID, Klaus. What is Health Physics? **Health Physics Journal, [S.l.]**, v. 1, p. 56, 1958.

# PARTE 3





## PARTE 3 COLETÂNEAS

Procedimentos, metodologias e aplicações de práticas que fazem uso das radiações ionizantes na inspeção de equipamentos, procedimentos de segurança e garantia de qualidade. A presente coletânea traz conceitos de radiologia industrial, radiografia industrial com raios X, gamagrafia, tomografia industrial e aplicações da tecnologia das radiações para a segurança pública.



# APLICAÇÕES

## ALGUMAS PRÁTICAS ENVOLVENDO USO DAS RADIAÇÕES IONIZANTES

### Radiologia Industrial

Denise Levy (IPEN)  
Josilto de Aquino (ANSN)

#### **1 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO**

Os Ensaios Não-Destrutivos (END) são técnicas para a verificação da integridade de um dado material sem danificá-lo ou alterá-lo. Os END são utilizados em muitas áreas, como análise de objetos de patrimônio cultural (por exemplo análise de obras de arte, para verificação de autoria ou para auxiliar no processo de restauração), aplicações na agropecuária e aplicações na área industrial, para inspeção de materiais e equipamentos.

Em âmbito industrial, os END proporcionam informações detalhadas de estruturas internas de materiais e estruturas, revelando defeitos ou degradação de estruturas, equipamentos e componentes. Por esta razão são ferramentas essenciais para monitoramento e verificação da qualidade e integridade dos materiais nos setores petroquímico, siderúrgico, naval, militar, aviação e de papel e celulose, dentre outros. Uma grande vantagem do END é que após sua realização, não deixa traços nem modifica a peça ou componente, ou seja, não altera suas propriedades físicas, químicas ou mecânicas.

Para as aplicações industriais existem diversas técnicas de Ensaios Não Destrutivos, como por exemplo: emissão acústica, partículas magnéticas, líquidos penetrantes e estanqueidade, além do ultrassom e radiografia.

É preciso conhecer, diferenciar e identificar a técnica mais adequada para a finalidade pretendida. Você saberia qual técnica é mais apropriada para a inspeção de trincas superficiais? Avaliação de descontinuidades internas? Inspeção de soldas e juntas complexas?

## 2 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE RADIOLOGIA INDUSTRIAL

A radiologia industrial abrange diversas áreas de atuação, por exemplo:

- **Técnicas analíticas** – Envolvem o uso de radiação para realizar análises químicas e determinar a composição de materiais, sendo úteis em processos de controle de qualidade e pesquisa científica.
- **Traçadores radioativos** – Trata-se da introdução de uma substância radioativa no sistema que se deseja estudar, permitindo o acompanhamento e a análise de seu comportamento ao longo do tempo. Amplamente utilizados na indústria, na medicina, no meio ambiente e na pesquisa científica.
- **Perfilagem de petróleo** – Para avaliar as características das formações geológicas atravessadas por poços de petróleo, contribuindo para a identificação de reservatórios e o planejamento da produção.
- **Medidores nucleares** – São utilizados em aplicações industriais para realizar medições precisas de densidade, umidade, peso, vazão, nível, espessura e gramatura de materiais, sendo úteis em processos de controle e qualidade.
- **Irradiação industrial** – Trata-se da exposição de determinado produto a doses controladas de radiação ionizante com a finalidade de beneficiamento ou melhoria de um produto, visando aumentar seu potencial de comercialização no mercado.
- **Escaneamento de contêineres** – Em portos e fronteiras, a radiologia desempenha um papel fundamental na detecção de materiais ilícitos ou perigosos sem a necessidade de abrir os recipientes.
- **Radiografia industrial** – A técnica é utilizada para inspecionar a integridade de materiais e estruturas, como soldas e corrosão em equipamentos industriais, tubulações e componentes metálicos.

Essas são apenas algumas das áreas em que a radiologia industrial é amplamente aplicada, demonstrando sua importância em diversos setores industriais e de segurança.

### 3 TÉCNICAS ANALÍTICAS

A espectrometria de radiação gama é uma técnica analítica não destrutiva que permite a identificação e avaliação de concentração de elementos químicos em vários meios, como por exemplo, a concentração de potássio ou tório no solo ou a concentração de radônio nas águas. Também conhecida como espectrometria gama, é amplamente utilizada na pesquisa e academia e também para monitoramento ambiental. A técnica é utilizada no âmbito industrial como monitoramento e controle de qualidade de processos industriais, tais como atividades de mineração e produção de petróleo.

Outra técnica analítica muito utilizada no setor acadêmico e na pesquisa é a fluorescência de raios X. A técnica é empregada na geologia ou mineralogia, por exemplo, para auxiliar a correta classificação de amostras minerais, uma vez que a inspeção visual pode, por vezes, induzir até o observador mais experiente ao equívoco. A fluorescência de raios X é uma técnica não invasiva que permite análises quantitativas e qualitativas de uma ampla gama de elementos químicos de solos, rochas e minérios. Para além da academia e da pesquisa, a técnica é amplamente utilizada no setor industrial, para análises de matérias-primas, como cimento ou materiais cerâmicos, entre outros.

### 4 TRAÇADORES RADIOATIVOS

A utilização de fontes radioativas como traçadores é baseada nas propriedades únicas dos materiais radioativos. Essas substâncias emitem radiação ionizante, como raios gama ou partículas alfa e beta, que podem ser detectados e medidos com o uso de equipamentos apropriados.

A técnica compreende a introdução de uma pequena quantidade de material radioativo em um meio de estudo com o intuito de avaliar e otimizar processos industriais. Esses materiais radioativos, chamados radio-traçadores, são isótopos de meia-vida curta: Kr-85, Kr-79, Ar-41, H-3, La-140, Na-24 e Ta-182. Cuidadosas avaliações determinam qual o traçador utilizado para estudo do sistema, assim como a forma física e química mais conveniente, para que este material seja injetado no meio em questão. Uma pequena quantidade de material marcado pode proporcionar a avaliação de sistemas industriais, assim como de componentes isoladamente, a fim de identificar falhas operacionais.

Dentre as possibilidades de aplicação da técnica de traçadores radioativos podemos citar os segmentos da medicina, da agricultura e tratamentos de efluentes, por exemplo. Quanto às aplicações para a avaliação de proces-

sos e possíveis falhas em âmbito industrial, podemos citar os segmentos de óleo e gás, indústrias químicas e indústrias de alimentos, entre outras.

Na indústria, utiliza-se traçadores radioativos com a finalidade de estudar e otimizar processos. Em refinarias de petróleo, por exemplo, podem ser adicionados traçadores radioativos aos fluidos para monitorar o fluxo e a distribuição dos líquidos e identificar possíveis obstruções ou vazamentos. Em plantas de tratamento de água, os traçadores podem ser usados para acompanhar a eficiência dos processos de purificação e verificar a qualidade do abastecimento de água.

Na pesquisa científica, o uso de traçadores radioativos desempenha um papel importante. Na área da geologia, por exemplo, os cientistas podem utilizar traçadores radioativos para estudar a circulação de águas subterrâneas, a migração de elementos químicos e a idade de formações geológicas.

É importante ressaltar que o uso de fontes radioativas como traçadores requer “precauções de segurança” adequadas. Os profissionais que trabalham com essas substâncias devem seguir protocolos rigorosos para minimizar a exposição à radiação e garantir a proteção tanto dos indivíduos envolvidos quanto do meio ambiente. As práticas de manuseio e descarte de materiais radioativos são regulamentadas por agências governamentais e organismos internacionais, como a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA).

Em resumo, o uso de fontes radioativas como traçadores é uma técnica valiosa em várias áreas, permitindo o estudo e o acompanhamento de processos e sistemas complexos. Desde o monitoramento de fluxos industriais até o diagnóstico médico e a pesquisa científica, essa técnica contribui para uma melhor compreensão e controle de diversas aplicações, sempre com a devida atenção aos aspectos de segurança radiológica.

## **5 PERFILAGEM DE POÇOS DE PETRÓLEO**

A perfilagem de poços de petróleo é uma técnica essencial na indústria de exploração e produção de petróleo. Ela envolve a obtenção de informações detalhadas sobre as características do subsolo, como a composição das rochas, a presença de fluidos e a geometria do poço. Para tanto, é progressivamente introduzida na perfuração uma sonda de medição com uma fonte radioativa, que pode ser Césio-137 ou Amerício-Berílio-241. A análise e interpretação dos gráficos resultantes ajuda a mapear o poço, identificando a localização e a quantidade, bem como a produtividade de óleo e gás.

As fontes radioativas são usadas em perfis radioativos: a fonte radioativa é inserida no poço e emite radiação. Os detectores localizados na sonda de perfilagem registram a radiação refletida ou absorvida pelas formações geológicas ao redor do poço. Essa informação é então processada para fornecer dados sobre as características do subsolo.

Os principais usos das fontes radioativas na perfilagem de poços de petróleo, são:

- **Perfilagem de densidade** – A perfilagem de densidade é realizada usando uma fonte radioativa de Césio-137, que emite radiação gama. A radiação é absorvida pelas formações geológicas circundantes, e o detector registra a quantidade de radiação transmitida de volta à sonda. Com base na atenuação da radiação, é possível determinar a densidade das formações, o que ajuda a identificar diferentes tipos de rochas e avaliar a porosidade.
- **Perfilagem de porosidade** – A porosidade é uma propriedade crucial das formações rochosas, pois indica a quantidade de espaço vazio (poros) presente. A perfilagem de porosidade é realizada usando uma fonte radioativa de Césio-137, que emite radiação gama. A radiação é espalhada e absorvida pelas formações, e o detector registra a quantidade de radiação dispersa. Com base nessa dispersão, é possível determinar a porosidade da rocha, que é fundamental para estimar o volume de fluidos (petróleo, gás ou água) que a formação pode conter.
- **Detecção de fluidos** – As fontes radioativas também são usadas para detectar a presença de fluidos, como petróleo, gás ou água, em formações geológicas. A radiação emitida pela fonte radioativa de Americio-Berílio-241 interage de forma diferente com os diferentes fluidos presentes. A partir das leituras do detector, é possível identificar a presença de fluidos e determinar sua saturação dentro das formações.

Importante destacar que o uso de fontes radioativas na perfilagem de poços de petróleo requer um controle rigoroso e seguro da radiação. As fontes radioativas são encapsuladas em dispositivos de proteção e manuseadas por operadores treinados de acordo com as regulamentações de segurança radiológica. Além disso, são observados procedimentos de descarte adequado das fontes radioativas quando não forem mais utilizadas.

A perfilagem de poços com o uso de fontes radioativas desempenha um papel fundamental na caracterização do subsolo, ajudando as empresas de petróleo e gás a tomar decisões informadas sobre a viabilidade e produtivi-



dade dos poços. Essa técnica fornece dados importantes para a avaliação de reservatórios e o planejamento eficiente da produção de hidrocarbonetos.

## 6 MEDIDORES NUCLEARES

Os medidores nucleares são dispositivos utilizados em diversas aplicações industriais para realizar medições precisas e não invasivas. Esses medidores são compostos por uma fonte radioativa e um detector, que trabalham em conjunto para fornecer informações sobre propriedades específicas de materiais ou processos.

A fonte radioativa utilizada nos medidores nucleares é geralmente um isótopo radioativo duplamente encapsulado. Isótopos comuns na utilização desta técnica são o Césio-137, o Amerício-241, o Cobalto-60, o Kriptônio-85 e o Estrôncio-90. Essas fontes emitem radiação ionizante que penetram no material a ser medido. Há muitos tipos de medidores com aplicações em diversas áreas, dentre elas: setor alimentício, bebidas, cimenteiras, concreto, embalagens, fertilizantes, metalúrgico, mineração, papel e celulose, petrolífero e petroquímico e siderúrgica.

Os medidores nucleares são aplicados em diversas áreas, tais como:

- **Densidade e umidade de materiais** – Medidores nucleares são usados para medir a densidade e a umidade de materiais como solo, agregados, asfalto, concreto e minérios. A radiação emitida pela fonte radioativa é absorvida pelos materiais, e a quantidade de radiação detectada pelo detector está relacionada à densidade ou umidade do material.
- **Espessura de materiais** – Medidores nucleares também são usados para medir a espessura de materiais, como filmes plásticos, folhas metálicas, papel e revestimentos. A radiação é emitida pela fonte radioativa e atravessa o material, sendo atenuada de acordo com a espessura. O detector registra a quantidade de radiação transmitida, permitindo a determinação da espessura.
- **Nível de líquidos e interfaces** – Em aplicações industriais, os medidores nucleares são utilizados para medir o nível de líquidos em tanques e recipientes, bem como para detectar interfaces entre diferentes líquidos. Para tanto, são associadas fontes radioativas a um detector que, por atenuação ou espalhamento da radiação, registra se um dado material está efetivamente presente no nível desejado. Em outras palavras, a radiação emitida pela fonte radioativa penetra no líquido e é detectada pelo detector. Assim, a quantidade de radiação absorvida pelo líquido fornece informações sobre o nível ou a interface.



## 7 IRRADIAÇÃO INDUSTRIAL

A irradiação industrial permite o uso das radiações ionizantes para tratamento e melhoria de produtos. Dependendo do produto a ser irradiado e da finalidade almejada, podem ser utilizados fontes, como o Cobalto-60, ou elétrons de alta energia, gerados em aceleradores de partículas. Confira alguns produtos que podem se beneficiar da irradiação e suas diferentes finalidades:

- esterilização de artigos médicos-hospitalares (como seringas descartáveis, agulhas, frascos, luvas e materiais cirúrgicos);
- desinfestação de patrimônio cultural, como livros, documentos e obras de arte;
- tratamento de efluentes industriais e lixo hospitalar;
- reticulação de polímeros;
- polimerização de compósitos;
- beneficiamento de gemas (pedras preciosas ou semipreciosas irradiadas para alterar sua coloração, aumentando seu valor de mercado).

Outra importante aplicação da irradiação industrial, ainda pouco conhecida pela população, é a irradiação de alimentos, com a finalidade de eliminar insetos e parasitas ou reduzir a carga microbiana, sem prejuízo das propriedades sensoriais ou nutricionais. O processo torna o alimento mais seguro para o consumidor e aumenta o tempo de prateleira dos produtos alimentícios, contribuindo a um só tempo para a promoção da saúde e o combate ao desperdício.

## 8 SEGURANÇA NACIONAL

### 8.1 INSPEÇÃO DE CARGAS E CONTÊINERES

A inspeção de cargas e contêineres é essencial nas estradas, fronteiras e portos, para identificar e coibir a circulação de materiais ilícitos, armas e drogas, bem como contrabando internacional. Para esse tipo de inspeção, são utilizados aceleradores lineares de alta energia.

### 8.2 RAIOS X PARA BAGAGENS EM AEROPORTOS

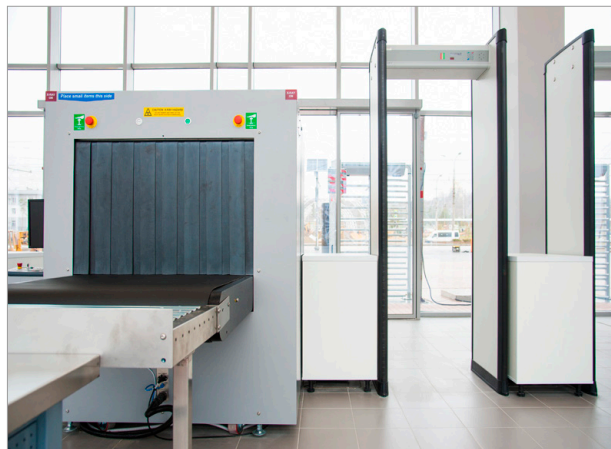
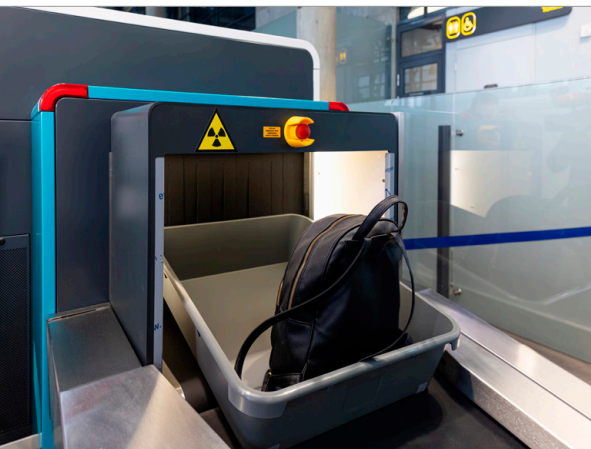
O uso de raios X é uma prática bastante conhecida para garantir a segurança da população em locais de grandes concentrações de pessoas. Nos aeroportos os raios X são utilizados em equipamentos para inspeção de bagagens, conhecidos como *scanners* de bagagem de raios X, com o

intuito de prevenir a entrada de materiais considerados perigosos a bordo das aeronaves.

Eles são utilizados tanto no terminal de passageiros quanto nos terminais de cargas, para inspeção das bagagens e volumes. Os equipamentos de raios X de bagagens podem identificar materiais orgânicos e inorgânicos, possibilitando detectar possíveis ameaças e contrabando. Sua principal finalidade é salvar vidas.

Os *scanners* de bagagens nos aeroportos são projetados para emitir uma quantidade mínima de radiação ionizante, garantindo a segurança dos passageiros e funcionários. Os operadores desses equipamentos são treinados para operá-los corretamente e seguir as diretrizes de segurança radiológica.

**Figuras 8 e 9:** Uso de raios X para controle de bagagem em aeroportos



Fonte: AdobeStock.

### 8.3 BODYSCAN EM AEROPORTOS E PRESÍDIOS

O *bodyscan* com raios X é utilizado em diferentes contextos, incluindo aeroportos e presídios, com o objetivo de prevenir a entrada de objetos proibidos ou perigosos, tais como armas e drogas escondidas no corpo. Os *scanners* de segurança de corpo emitem raios X de baixa dose para gerar imagens do corpo do passageiro, permitindo que os agentes identifiquem visualmente qualquer objeto suspeito. Os *scanners* utilizados nos aeroportos são projetados para garantir a privacidade dos passageiros, exibindo imagens esquemáticas do corpo e adotando medidas para proteger a confidencialidade dos dados.

Nos presídios, o *bodyscan* com raios X é utilizado como uma medida de segurança para impedir a entrada de itens ilícitos no ambiente prisional. Esses *scanners* são usados durante os procedimentos de revista de visitantes, funcionários e até mesmo de detentos. A finalidade é detectar a presença de drogas, armas, celulares e outros objetos proibidos que possam colocar em risco a segurança e a ordem interna das instituições prisionais. Essa medida auxilia na prevenção do tráfico de drogas, na redução da violência e no controle do contrabando dentro das prisões.

Em qualquer contexto, o uso do *bodyscan* com raios X é regulamentado e supervisionado pelas autoridades competentes. Existem normas e diretrizes específicas para garantir a segurança e a privacidade das pessoas submetidas ao processo de escaneamento. É importante destacar que o uso do *bodyscan* com raios X deve ser equilibrado com a consideração dos direitos individuais, incluindo a privacidade. As autoridades responsáveis devem garantir que os procedimentos sejam realizados de forma respeitosa, transparente e de acordo com as leis e regulamentações aplicáveis, protegendo os direitos dos indivíduos enquanto mantêm a segurança e a ordem nessas áreas sensíveis.

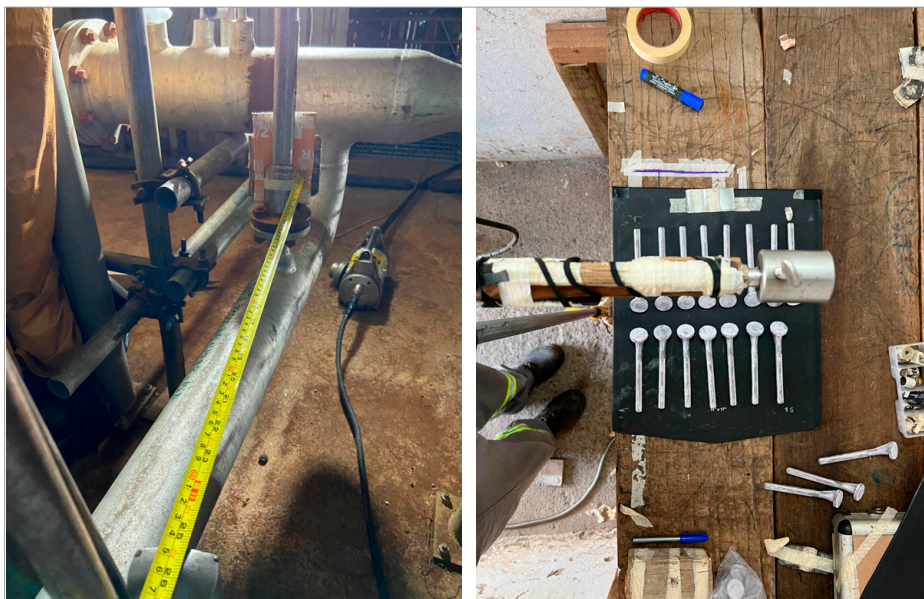
## **9 RADIOGRAFIA INDUSTRIAL**

A radiografia industrial é uma técnica amplamente utilizada para inspeção não destrutiva de materiais em diversos setores, como manufatura, construção, petróleo e gás e indústria nuclear. Duas fontes de radiação comumente empregadas nessa aplicação são a gamagrafia e os raios X.

### **9.1 GAMAGRAFIA**

A gamagrafia é uma técnica que utiliza fontes radioativas emissoras de raios gama, como o Irídio-192, o Selênio-75 e o Cobalto-60. Uma película radiográfica sensível é colocada do outro lado do objeto, e os raios gama que a atravessam produzem uma imagem latente na película. A película é posteriormente revelada e processada, revelando uma imagem do interior do material, permitindo a detecção de defeitos, como trincas, corrosão, soldas defeituosas e inclusões não metálicas. A gamagrafia tem várias vantagens na radiografia industrial, incluindo a capacidade de inspecionar materiais de diferentes espessuras e densidades, além de ser eficaz em ambientes hostis, como alta temperatura, pressão e umidade. No entanto, a gamagrafia requer medidas de segurança rigorosas, pois envolve o manuseio de fontes radioativas. As figuras 10 a 13, a seguir, mostram o preparo para um serviço de gamagrafia usando fonte Irídio-192.

**Figuras 10 e 11:** Preparo de serviço de gamagrafia usando fonte Iridio-192.



Fonte: Acervo dos autores.

**Figuras 12 e 13:** Preparo de serviço de gamagrafia usando fonte Iridio-192.



Fonte: Acervo dos autores.

## 9.2 RAIOS X

A radiografia industrial com raios X utiliza geradores de raios X que produzem radiação de alta energia. Os geradores de raios X consistem em um tubo de raios X, que emite raios X quando uma corrente elétrica é aplicada, e um detector de imagem. Ao realizar a radiografia industrial com raios X, o objeto a ser inspecionado é colocado entre o gerador de raios X e o detector de imagem. A radiação de raios X atravessa o objeto e atinge o detector de imagem, que registra as variações de intensidade da radiação. Essas variações são processadas e resultam em uma imagem radiográfica que revela a presença de defeitos, como trincas, inclusões e variações de espessura. A radiografia com raios X é amplamente utilizada na indústria devido à sua capacidade de inspecionar materiais de diferentes densidades e espessuras, além de oferecer uma alta resolução de imagem. Os raios X também são utilizados em equipamentos portáteis, facilitando a inspeção de objetos de grandes dimensões. A radiografia industrial com raios X requer precauções de segurança, como a utilização de barreiras de proteção e protocolos de controle de radiação para garantir a segurança dos operadores e do público.

## 9.3 APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

A escolha entre gamagrafia e raios X depende das características do objeto a ser inspecionado, dos requisitos de resolução e das condições ambientais em que a inspeção será realizada.

Ambas as técnicas, gamagrafia e radiografia com raios X, são essenciais na inspeção de materiais na indústria, permitindo a detecção precoce de defeitos e a garantia da qualidade dos produtos fabricados.

Nos capítulos seguintes deste livro você conhecerá o detalhamento das principais técnicas e aplicações: radiografia industrial com raios X, gamagrafia e tomografia industrial, além das aplicações da radiologia industrial para a segurança da população.



## REFERÊNCIAS

CENTRO DE TECNOLOGIA DAS RADIAÇÕES (CETER-IPEN). Disponível em: <https://www.ipen.br>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIO NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO. Disponível em: <https://www.abendi.org.br>.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Guia para atendimento de Requisitos de Radioproteção e Segurança Radiológica no uso de Equipamentos de Inspeção Corporal. Versão 2.0. Rio de Janeiro: [s.n.], 2023.

UNIFICAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA (UNIPRORAD). Programas de Monitoramento. Filosofia e Técnica para Monitoramento do Trabalhador. Disponível em: <https://uniprorad.com.br/monitoramento/>.

# Radiografia Industrial

Matias Puga Sanches (IPEN)

## 1 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS

Os Ensaaios Não Destrutivos (E.N.D.) consistem em certas provas que são realizadas em peças, objetos ou componentes com a finalidade de verificar a qualidade ou o seu estado, sem causar danos a elas ou inutilizá-las como consequência do ensaio.

Em geral, os E.N.D. servem para medir, caracterizar e mostrar descon- tinuidades superficiais e subsuperficiais nos materiais, sendo suas carac- terísticas principais:

- Medir de forma indireta o que não pode ser medido de outra forma.
- Permitir, em muitos casos e depois do ajuste, caracterizar o estado e a natureza dos materiais, detectando variações locais de alguma pro- priedade física intrínseca do material.
- Mostrar a presença de heterogeneidades, estabelecer seu tamanho, forma, situação e natureza e, de acordo com critérios de aceitação es- tabelecidos pela engenharia de projeto e apontados numa especifica- ção, determinar o estado daquilo que está sendo submetido ao ensaio.

Todos esses ensaios estão baseados em princípios físicos e pela sua aplicação são obtidos os resultados necessários para estabelecer um diag- nóstico do estado da qualidade do objeto inspecionado.

## 2 RADIOGRAFIA INDUSTRIAL

Esta técnica utiliza fontes de radiação, geralmente raios X, para obter radiografias, que são imagens fotográficas que tem por finalidade, basean- do-se na propriedade que as mesmas fontes de radiação têm de atra- vessar os objetos opacos à luz e de serem absorvidas em maior ou menor proporção, segundo a natureza e espessura dos materiais atravessados, obter imagem o mais nítida dos defeitos que possam existir no objeto exa- minado.

Diferente da radiação gama, os raios X são produzidos por um siste- ma gerador de raios X. Estes sistemas incluem comumente um cabeçote tubo de raios X, um gerador de alta tensão, e um painel de controle.



### 3 CONCEITOS SOBRE APARELHOS EMISSORES DE RAIOS X (E ACELERADORES)

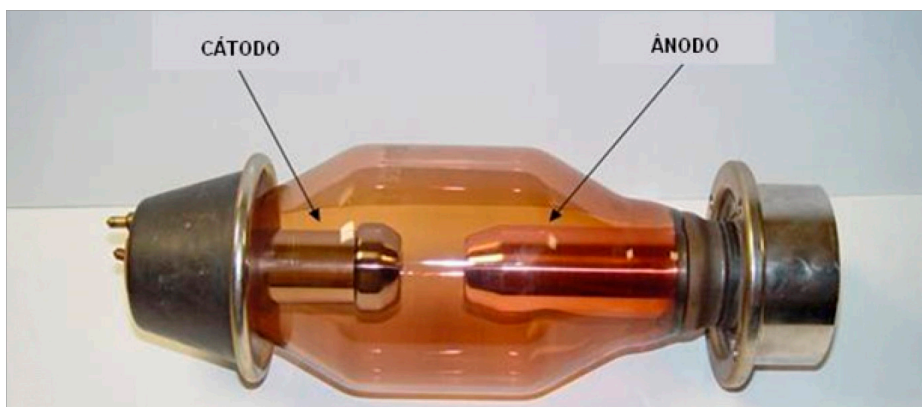
#### 3.1 EQUIPAMENTOS DE RAIOS X

Um equipamento de raios X, consta, basicamente de um tubo ou válvula de raios X, onde a radiação é produzida por um fenômeno físico chamado radiação de frenamento (Bremsstrahlung). No tubo de raios X, que se constitui de uma cápsula de vidro ou cerâmica, fechada a vácuo, é colocada uma fonte de elétrons e um alvo em que os elétrons possam colidir. Entre ambos deve ser gerada uma diferença de potencial que acelera os elétrons desde o cátodo (filamento onde elétrons são produzidos) até o ânodo ou anticátodo, onde os elétrons colidem para transmitir a energia cinética, que adquiriram ao serem acelerados pela diferença de potencial, para os elétrons da nuvem eletrônica dos átomos do material do anticátodo, produzindo o espectro característico.

É produzida a transformação de energia em calor e raios X. Para dissipar o calor,<sup>1</sup> o anticátodo é fabricado com materiais de alto ponto de fusão, que são colocados em blocos de cobre para dissipar a temperatura que neles é produzida.

Os blocos de cobre, por sua vez, são projetados de forma que possam circular por seu interior um líquido refrigerante conectado a um circuito recirculado-resfriador exterior.

**Figura 14:** Ampola de Raios x.



Fonte: Acervo dos autores.

1 99 % da energia dos elétrons se transforma em calor e somente 1 % em raios X.

Na atualidade os equipamentos mais habituais existentes no mercado são:

- Portáteis de semionda ou potencial constante entre 140 e 300 kV.
- Transportáveis de potencial constante de média ou alta frequência de 100 a 300 kV.
- Fixos de potencial constante de média ou alta frequência de 60 a 450 kV.

### 3.2 DIFERENÇAS DOS ACELERADORES EM RELAÇÃO AOS EQUIPAMENTOS DE RAIOS X CONVENCIONAIS

Os aceleradores são equipamentos produtores de alta e muito alta tensão, entre os quais podem ser citados os aceleradores de Van der Graaf, aceleradores lineares e betatrons.

Estes equipamentos permitem observar radiografias com espessuras superiores a 300 mm de aço, com níveis de qualidade inalcançáveis com fontes isotópicas. O Acelerador de Van der Graaf é composto de um tubo em vácuo acoplado a um gerador eletrostático Van der Graaf. Mesmo que não exista um limite teórico para a tensão máxima que os aceleradores de Van der Graaf podem produzir, estabelece-se esse limite pela ruptura do material dielétrico, que é produzida em 10 MeV. Não obstante, o limite dos equipamentos comerciais está situado em torno de 2 MeV. Com estes equipamentos podem ser realizados os mesmos trabalhos radiográficos que com gamagrafia de  $^{60}\text{Co}$ , mas com a vantagem desta dispor de focos menores.

Embora nos últimos anos tenham sido desenvolvidos aceleradores lineares portáteis, estes são, na verdade, betatrons, que são capazes de gerar radiações no intervalo de 3 a 6 MeV, embora sejam fabricados outros de até 36 MeV. Um betatron consiste em um tubo toroidal de vidro ou metal cerâmico que é mantido em vácuo muito intenso, dotado de um canhão eletrônico e de um alvo, ambos dispostos tangencialmente.

O tubo toroidal e seus acessórios estão situados no espaço compreendido entre as peças polares de um poderoso eletroímã cuja missão consiste em criar um campo magnético de intensidade suficiente para obrigar os elétrons a descrever orbitas circulares no interior do tubo. Ajustando convenientemente a alternância do campo magnético se consegue a aceleração uniforme do feixe de elétrons até adquirir várias centenas de MeV. Quando alcançam o valor desejado, eles são lançados contra o alvo mediante um dispositivo extrator produzindo raios X de elevadíssima penetração. O limite teórico da aceleração é marcado pelo

aumento de massa dos elétrons devido ao efeito relativístico e pelo tamanho dos eletroímãs.

Os aceleradores lineares conseguem acelerar os elétrons até energias desejadas fazendo com que eles fluam por um tubo em vácuo, onde são acelerados por uma onda pulsante eletromagnética de uma frequência de 1 a 3 GHz, que os serve de guia. A velocidade da onda é controlada em uma série de câmaras ressonantes existentes no interior do tubo. Os elétrons são convenientemente acelerados num canhão eletrônico, que são produzidos num filamento convencional e, na sequência, são introduzidos no tubo, onde vão sofrendo sucessivas acelerações de aproximadamente 1000 keV a cada 25 cm. Assim alcançam o anticátodo, na outra extremidade do tubo com energias da ordem de vários MeV. Em radiografia industrial são utilizados aceleradores de 6, 8, 16 e 24 MeV.

Devido ao limite que estabelece o regulamento de instalações radiativas existe uma divisão entre os equipamentos geradores de raios X com potencial inferior e superior a 600 kV.

## **4 TÉCNICAS PARA OBTENÇÃO DE IMAGEM**

Vários métodos diferentes de obtenção de imagem são disponibilizados para apresentar a imagem final na radiografia industrial:

- Filme Radiográfico;
- Radiografia em Tempo Real;
- Tomografia Computadorizada (CT);
- Radiografia Digital (DR);
- Radiografia Computadorizada (CR).

Em geral a imagem é registrada em suporte radiográfico (película) ainda que já estejam se fazendo ensaios, com resultados positivos, em suportes digitais, o que permite a economia de material sensível e a transferência da imagem latente para suportes informatizados e de armazenamento massivo de informação.

Uma das formas mais novas de imagem radiográfica é a Radiografia Digital, que não necessita filme. A imagem da radiografia digital é capturada tanto por uma tela de fósforo especial, como em painéis planos contendo sensores microeletrônicos. Não necessita sala escura para processamento de filme e a imagem capturada pode ser melhorada por digitalização para aumentar os detalhes. As imagens também são facilmente arquivadas (guardadas) na forma digital.

Existe um grande número de formas de imagem radiográfica digital, as quais incluem:

- Radiografia Computadorizada (CR);
- Radiografia em Tempo Real (RTR);
- Radiografia com Imagem Direta (DR);
- Tomografia Computadorizada.

## **5 SEGURANÇA E PROTEÇÃO RADIOLÓGICA**

O que nos interessa analisar são os riscos de irradiação com equipamentos de raios X e as causas que conduzem a esses riscos, desde o ponto de vista operacional. Em termos gerais, no trabalho com radiações ionizantes, o risco é ficar exposto total ou parcialmente a elas, numa situação imprevista ou inadvertida. As primeiras, constituem os acidentes e as segundas são as que mediante uma regulamentação apropriada para o uso dos equipamentos podem ser reduzidas ao mínimo possível. Os cenários que podem ser levados em conta são os habituais de trabalho com equipamentos radiográficos.

Quanto aos fatores de segurança, os equipamentos de raios X apresentam vantagens notáveis em relação aos de gamagrafia, uma vez que:

- Em geral, além do risco inerente à forma com que é produzida e interrompida a emissão das radiações, que torna potencialmente menos perigosos os equipamentos de raios X frente a uma fonte de radiação gama, também existe uma diferença notável quanto aos meios com que podem ser protegidos os trabalhadores e o público uma em relação à outra devido a menor energia da radiação X em relação à radiação gama.
- Ao contrário, as taxas de doses emitidas nas proximidades da janela do tubo de raios X podem ser muito maiores às emitidas por uma fonte de gamagrafia na mesma distância, devido aos componentes de baixa energia que emite um tubo de raios X de baixa filtração inerente (janela de berílio). O resultado é que o dano que será produzido por estas fontes nas pessoas será diferente, produzindo além dos danos internos, outros superficiais (dermatoses, queimaduras etc.) de maior envergadura.

## **6** PRINCIPAIS CAMPOS DE ATUAÇÃO E APLICAÇÕES

### **6.1** RESTAURAÇÃO, PERÍCIA DE OBRAS DE ARTE

Através da imagem radiográfica, os restauradores obtêm uma informação muito precisa sobre o estado da obra, que lhes permite estabelecer o tipo de intervenção mais aconselhável a ser aplicada. Também é obtida informação que permitirá sua catalogação para arqueólogos, pesquisadores e historiadores, com o que em muitos casos poderá ser determinada, inclusive, a autoria da obra chegando até a época em que foi pintada comparando as imagens obtidas com informação documental contrastada.

## **7** RADIOGRAFIA DE MADEIRA ESCULPIDA

Mediante a análise radiográfica pode ser determinada a integridade da peça; as partes constituintes do conjunto; suas uniões; a classe da madeira, sua antiguidade e se existem peças falsas, mais modernas.

Também podem ser descobertos os motivos decorativos ocultos por revestimentos, sujeiras acumuladas ou outros recobrimentos posteriores.

## **8** RADIOGRAFIA EM ARQUEOLOGIA

Mediante radiografias pode ser comprovado o estado de conservação de objetos arqueológicos. Uma aplicação importante é poder examinar o conteúdo de urnas funerárias sem a necessidade de intervir fisicamente nelas (método não invasivo).

Estas urnas, típicas do período neolítico, eram objetos de barro onde eram introduzidos os cadáveres incinerados junto com seus objetos pessoais. Com o passar dos séculos, o conjunto geralmente encontra-se quase petrificado sendo muito difícil a sua separação para identificar o conteúdo.

Mediante a realização de radiografias em diferentes direções pode ser estabelecido estereograficamente o conteúdo com grande precisão, chegando-se a identificar a totalidade dos objetos guardados em seu interior, dando, portanto, não somente resultados qualitativos, mas também quantitativos.

A figura 15 mostra o sarcófago de Alexandre, Museu Arqueológico de Istambul. Com tratamentos químicos e técnicas de radiografia computadorizada, os pesquisadores descobriram as cores originais que compunham cada área do sarcófago nas figuras esculpidas em pedra, hoje quase sem cor.

**Figura 15:** Sarcófago de Alexandre, Acervo do Museu Arqueológico de Istambul.



Fonte: Foto de Denise Levy.

## **9 RADIOGRAFIA DE OBJETOS METÁLICOS**

Em Arqueologia é de uma utilidade excepcional para comprovar o estado de conservação de objetos e utensílios metálicos. Permite observar detalhes de decorações subjacentes, comprovar o estado do núcleo metálico e do processo mineralizador, detectar fissuras, microfissuras e revelar reparações anteriores. A figura 16, a seguir, mostra estudos radiográficos que foram realizados nas peças metálicas em exposição no Musée d'Archéologie Nationale, em Saint-Germain-en-Laye (Paris).



**Figura 16:** Estudos radiográficos, realizados nas peças metálicas.



Fonte: Foto de Denise Levy.



## 10 RADIOGRAFIA DE OBJETOS CERÂMICOS

Novamente aqui nos encontramos com um material de baixa absorção, onde, com técnicas de baixa tensão podemos comprovar a integridade do objeto, ou evidenciar desfigurações reparadas e dissimuladas por restaurações anteriores, invisíveis a olho nu.

## 11 RADIOGRAFIA DE MÚMIAS

Técnica de relevante importância no campo da Arqueologia, tem permitido estudar múmias antes e depois de retirá-las dos sarcófagos, sem causar efeitos prejudiciais a elas, obtendo dados fundamentais para determinar o sexo da pessoa, radiografando a zona da pélvis, ou determinar a presença de amuletos, objetos de valor, realizados em metais preciosos etc.

A figura 17 mostra uma múmia e sua radiografia em exposição no British Museum: radiografia de Cleópatra, uma jovem mulher de 17 anos, da família de Cornelius Pollius, de Tebas. Século II d.C.

**Figura 17:** Radiografia de uma múmia do século II d.C.

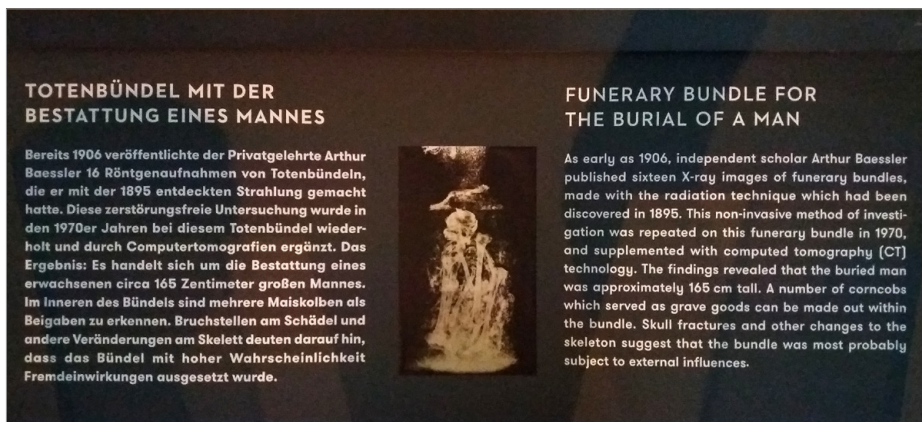


**Fonte:** Foto de Denise Levy.

As figuras 18 e 19 mostram parte do ritual funerário para o enterro de um homem. A múmia é originária do Peru, Chuquitanta, e data do período entre

900 e 1470 d.C. A foto foi tirada na Exposição Humboldt Forum – exploring interactive exhibition – Museu Ethnologisches – Dtaatliche Museen zu Berlin.

**Figura 18:** Parte de ritual funerário



Fonte: Foto de Denise Levy.

**Figura 19:** Parte de ritual funerário para enterro de um homem



Fonte: Foto de Denise Levy.

## 12 RADIOGRAFIA EM PINTURAS

Não por havê-la deixado em último lugar, deixa de ser com muito, o campo onde mais profundamente vem sendo empregada a radiografia. Mediante esta técnica podem ser analisados todos os estratos, desde a última camada de pintura ou verniz até a base ou suporte, independentemente de que este seja de madeira, tela ou outro material. Destaca as condições em que se encontram e suas características. A figura 20 traz a conspiração de Cláudio Civilis, obra radiografada no Rijksmuseum, em Amsterdam.

**Figura 20:** Obra “Conspiração de Cláudio Civilis” radiografada no Rijksmuseum



Fonte: Foto de Eli Sanchez-Magner

### **13 CONTROLE DE QUALIDADE DE MATÉRIAS PRIMAS**

Trata-se também de técnicas no campo de aplicação das baixas tensões. Em alguns casos, são controladas matérias primas propriamente ditas e em outros, produtos elaborados em etapas intermediárias de produção.

### **14 IRRADIADORES DE FEIXES PARA CALIBRAÇÃO**

A aplicação consiste em emitir, desde um irradiador ou dispositivo adequado, portátil ou fixo, feixes de radiação de intensidade e energia conhecidas para a verificação ou calibração de equipamentos de medida de radiações.

### **15 INSPEÇÃO DE BAGAGEM / ENVIO POSTAL**

É outra aplicação dos equipamentos de raios X. Permite detectar armas, explosivos, etc. Amplamente utilizada em aeroportos, estações de trem, entradas de edifícios públicos, etc., ultimamente tem sido multiplicada a sua utilização como resposta aos ataques terroristas.

### **16 INSPEÇÃO DA CARGA DE CAMINHÕES E CONTÊINERES, EM ADUANAS ETC.**

É a técnica anterior feita em grande escala. Quando o objeto a ser inspecionado não pode ser manuseado (caso de caminhões completos, contêineres ou vagões de trem), existem instalações móveis ou fixas que são capazes de observar o interior dos citados veículos, mediante técnicas radiográficas ou radioscópias em tempo real.



# Gamagrafia industrial

Demerval Leonidas Rodrigues (IPEN)

## 1 DEFINIÇÃO

### 1.1 EQUIPAMENTO DE GAMAGRAFIA E FONTE RADIOATIVA

A Gamagrafia Industrial é uma das técnicas mais difundidas entre as aplicações técnicas nucleares na indústria, pois não utiliza energia elétrica e possui modelos portáteis de fácil locomoção. Essa técnica utiliza fontes radioativas emissoras de raios gama, em especial, os radio-nuclídeos de  $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{75}\text{Se}$  e  $^{60}\text{Co}$  para detectar possíveis discontinuidades em materiais metálicos que possam impactar na integridade física dos equipamentos fabricados em indústrias, tais como automotivas, navais, siderúrgicas, aviação e plataformas de petróleo. O equipamento de gamagrafia é um dos múltiplos nomes que recebe o irradiador. A terminologia anglo-saxã também o denomina projetor (em realidade projeta os feixes de radiação ou a fonte radioativa para o lado externo) e em termos gerais é denominado contêiner gamagráfico. Este nome faz referência quanto a missão do equipamento que é de conter o material radioativo com o qual é realizada a gamagrafia ou radiografia com isótopos radioativos.

Em essência um equipamento de gamagrafia é composto de:

- Material radioativo
- Contêiner de armazenamento
- Sistema de telecomando
- Tubos ou mangueiras de condução da fonte.

O material radioativo, ou fonte radioativa, se encontra confinado numa cápsula, geralmente de aço inoxidável, hermeticamente fechada, mediante soldagem, para evitar qualquer possível saída de material radioativo para o lado externo. Ao longo da história, os equipamentos de gamagrafia sofreram alterações importantes no projeto e na construção, forçando os fabricantes a cumprir com maiores exigências de segurança, blindagem, peso e confiabilidade operacional.

A maior parte dos equipamentos utilizados é composta por modelos que empregam a filosofia em duas variantes diferentes, com tubo na forma de “S” ou com tubo na forma de “U”.

## 1.2 FUNCIONAMENTO DE UM IRRADIADOR DE GAMAGRAFIA

Os componentes de um equipamento de gamagrafia são:

1. Contêiner de armazenamento ou irradiador de gamagrafia.
2. Fonte radioativa alojada no porta fontes, em seu interior.
3. Sistema de telecomando, com seus conectores para acoplar o cabo projetor ao irradiador e as mangueiras por onde desloca o cabo ao próprio irradiador e sistema de manivela para provocar a retirada e retração do cabo porta fontes.
4. Tubos guias ou mangueiras de condução da fonte com seus conectores para conectá-las ao irradiador e ao topo ou ponto focal onde se situa a fonte durante a exposição.
5. Colimadores.
6. Sistemas de posicionamento.

As figuras 21 a 24 mostram os componentes de um equipamento de gamagrafia. As fotos a seguir foram tiradas no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN).

**Figuras 21, 22, 23 e 24:** Componentes de um equipamento de gamagrafia.





Fonte: Acervo dos autores.

## 2 IRRADIADORES GAMA $^{192}\text{Ir}$ , $^{75}\text{Se}$ E $^{60}\text{Co}$

### 2.1 APLICAÇÕES DOS DIFERENTES ISÓTOPOS DISPONÍVEIS

Dentro da gamagrafia industrial vem sendo utilizados os isótopos da tabela dos quais, o  $^{75}\text{Se}$  é o que foi incorporado mais recentemente. Se forem observados os intervalos de energias que são mencionados na tabela, pode-se entender que dependendo do tipo de material, espessura e qualidade exigida devem ser escolhido um ou outro.

**Tabela 4:** Diferentes isótopos usados em gamagrafia

Radionuclídeo	Atividade máxima disponível	Meia vida física	E(MeV)
Co-60	120 Ci	5,26 anos	1,17 – 1,33
Cs-137	50 Ci	30 anos	0,66
Ir-192	150 Ci	74 dias	0,206 – 0,612
Se-75	80 Ci	120 dias	0,66 – 0,401
Yb-169	5 Ci	32 dias	0,063 – 0,308
Tm-170	50 Ci	127 dias	0,052 – 0,084

Fonte: Elaboração autor.

As características a serem levadas em conta para determinar qual isótopo é o mais apropriado para o tipo de trabalho a ser realizado, além da espessura e material a ser radiografado são as seguintes:

- **Atividade:** Este parâmetro mede a quantidade de radiação que a fonte radioativa emite.
- **Meia Vida Física:** A meia-vida física mede o tempo em que uma fonte tem reduzida à metade a sua atividade, é um fator a ser levado em conta tanto do ponto de vista técnico como econômico.



- **Qualidade da Radiação:** Por convenção este conceito está associado à energia que os fótons gama possuem. São perfeitamente determinadas uma vez que devem ser as transições entre níveis energéticos definidos.
- **Espectro energético (cromatismo):** O cromatismo de uma fonte radioativa é dado pelo número de linhas espectrais que possui. Cada linha espectral tem como origem uma transição ou salto energético que ocorre no núcleo do elemento radioativo.
- **Constante gama:** Esta constante denominada com o símbolo “Γ”, fornece uma medida do rendimento radioativo da fonte, ou seja, da quantidade de radiação (que chamaremos dose) que é produzida por uma atividade da fonte.

### ESCOLHA DA FONTE DE RADIAÇÃO:

Levando em conta todas estas características, pode ser mencionado que as aplicações mais habituais dos diferentes isótopos na gamagrafia são:

- $^{75}\text{Se}$ : As atividades das fontes, mesmo sendo similares às das fontes de  $^{192}\text{Ir}$ , produzem taxas 2,5 vezes mais baixas que estas. A maior cromaticidade do  $^{75}\text{Se}$  compensa parcialmente esta limitação fazendo que na prática os tempos de exposição para atividades iguais sejam de 2 a 2,2 vezes maiores para o  $^{75}\text{Se}$ .
- $^{192}\text{Ir}$ : É a fonte mais amplamente utilizada, principalmente por empresas de END que prestam serviços a terceiros. Coincidem nelas uma boa cromaticidade, atividades específicas altas que permitem tamanhos reduzidos e, portanto boa nitidez, e preço ajustado com sua meia-vida.
- $^{60}\text{Co}$ : Devido à alta energia de suas duas linhas espectrais, permite a radiografia de grandes espessuras. Resulta ser rentável se tiver uso contínuo, a pesar de seu preço muito mais alto que o do restante das fontes de gamagrafia.
- $^{169}\text{Yb}$ : Isótopo de muito baixa energia o que o limita a pequenas espessuras. Também não é fornecido com atividades altas. O preço é muito elevado. Estes fatores o tem deixado de lado, sendo substituído paulatinamente por fontes de pequenas dimensões de  $^{192}\text{Ir}$  ou de  $^{75}\text{Se}$ , que possuem meias vidas e atividades específicas mais altas.
- $^{170}\text{Tm}$ : Limitações e aplicações muito similares às do  $^{169}\text{Yb}$ . O Túlio-170 possui pelo menos a vantagem de possuir uma meia-vida maior. O preço, como para o  $^{169}\text{Yb}$ , é muito mais alto que para os outros isótopos e a disponibilidade é cada vez mais limitada.

## 3 SEGURANÇA E PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

### 3.1 TRABALHO NO CAMPO

Também denominado *in situ* uma vez que o equipamento e operários são deslocados para o lugar onde deve ser realizado o trabalho de radiografia que pode ser uma oficina, uma obra, um gasoduto, um barco, etc.

### 3.2 TRABALHO EM BUNKER

Em geral da própria instalação radiativa da empresa que realiza o trabalho de radiografia. É evidente que os riscos serão sempre maiores no trabalho em campo, por isso é neles que devem ser praticadas as melhores medidas de proteção.

Em geral, além do risco inerente à forma com que é produzida e interrompida a emissão das radiações, os equipamentos de raios X se comparados a uma fonte de radiação gama, têm um grau de periculosidade baixo. Existe uma diferença notável quanto aos meios para a proteção dos trabalhadores e do público, devido a menor energia da radiação X em relação à radiação gama ( $^{192}\text{Ir}$ ,  $^{60}\text{Co}$  e  $^{75}\text{Se}$ ).

No caso em que fosse necessário realizar uma gamagrafia numa pequena distância da anterior, mas que seja necessário movimentar o irradiador de gamagrafia, a transferência sempre seria feita com o anel selector na posição de segurança ou, na sua falta, desconectando previamente o telecomando. Não deverá ser movimentado o irradiador de gamagrafia através do telecomando ou das mangueiras.

E se a operação tiver de ser realizada em áreas ocupadas ou com áreas anexas ocupadas por pessoas, serão escolhidos momentos do dia em que a ocupação seja mínima, estando o operador devidamente auxiliado por pessoa capacitada, preferencialmente com licença e conhecimentos para o controle de equipamentos e material radioativo, que poderá ser indicada pela entidade cliente, para o controle de acesso às áreas de exposição, para a realização de notificações ou avisos necessários em caso de acidente, permitindo que o operador permaneça junto ao equipamento.

## 4 TRANSPORTE DE MATERIAIS RADIOATIVOS

### 4.1 REQUISITOS APLICÁVEIS AO TRANSPORTE DE EQUIPAMENTOS DE GAMAGRAFIA

Além das normas da ANSN aplicáveis às instalações radiativas, deve ser levado em conta o estabelecido no regulamento da Agência Nacional

de Transporte Terrestre (ANTT), pelo menos no que diz respeito:

1. Aos requisitos que tem que ser cumprido pelo condutor do veículo.
2. Aos requisitos tanto do equipamento a ser colocado no veículo quanto da sua sinalização e das características das etiquetas de sinalização.
3. Aos requisitos que são aplicados ao material radioativo, da instalação, em geral, no caso da atividade da gamagrafia com material radioativo encapsulado sob forma especial e aos volumes tipo A e B(U).
4. Aos requisitos relativos ao supervisionamento durante o estacionamento dos veículos.
5. Ao relativo às pessoas que podem viajar no veículo que transporta material radioativo.

Quanto à atribuição de responsabilidade é estabelecido que a movimentação dos equipamentos radioativos do depósito para o lugar de trabalho ou de um lugar de trabalho para outro seja realizada sob a custódia do operador que irá utilizá-los ou, excepcionalmente, do supervisor correspondente, a fim de impedir a manipulação por pessoas não autorizadas. Ademais:

- o operador será responsável por esta movimentação de modo que ela cumpra com o estabelecido no regulamento para transporte de material radioativo.
- Os veículos deverão estar estacionados em condições adequadas de segurança e com acesso controlado, recorrendo, sempre que possível, a estacionamentos vigiados, permanecendo os equipamentos radioativos devidamente vigiados.
- Não é permitido o transporte de outras pessoas, além dos condutores do veículo que transporta material radioativo, classe 7, tal como se regulamenta a ANSN e a ANTT.

# Tomografia Computadorizada

Andrea Sanchez del Pozzo (IPEN)

Antonio Donizetti Giuliano (IPEN)

Samir Luiz Somessari (IPEN)

## INTRODUÇÃO

O Centro de Tecnologia das Radiações (CETER), sediado no IPEN/CNEN, em consonância com suas atribuições, tem desenvolvido pesquisas de vanguarda na área de tomógrafos industriais. O centro alcançou marcos significativos ao desenvolver três tipos distintos de tomógrafos de 1.<sup>a</sup>, 3.<sup>a</sup> e 4.<sup>a</sup> gerações, utilizando fontes de radiação gama. Esses avanços têm sido aplicados com sucesso na análise de rochas reservatório em pesquisas de prospecção de petróleo. O sucesso do desenvolvimento dos tomógrafos foi resultado dos esforços incansáveis dos pesquisadores Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Margarida Mizue Hamada (1955–2023) e Prof. Dr. Carlos Henrique de Mesquita (1945–2024).

Além disso, por meio de uma colaboração de pesquisa estabelecida com a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), o CETER adquiriu um Microtomógrafo de raios X, ampliando suas capacidades para estudar essas rochas. Destaca-se que o Microtomógrafo de raios X também oferece possibilidades inovadoras para análises em outras áreas, como tecidos animais, enxertos ósseos, polímeros e diversas aplicações práticas que demandam reconstrução de imagem com qualidade.

Por meio dessas iniciativas, o CETER reafirma seu compromisso com a excelência científica e o avanço tecnológico, buscando contribuir para soluções inovadoras e impactantes em diversas áreas do conhecimento.

## 1 A CRIAÇÃO DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

Desde a descoberta dos Raios X, em 1895, pelo físico alemão Wilhelm Conrad Roentgen (1845–1923), a tecnologia utilizando a radiação avançou rapidamente, principalmente na área da medicina diagnóstica. Esta descoberta revolucionária não só transformou a prática médica, mas também teve um impacto significativo em diversos campos da ciência. Roentgen foi agraciado com o Prêmio Nobel em 1901, reconhecimento merecido mesmo que o trabalho não tenha sido sua principal área de interesse (Portal Educação, 2024).

Logo após a divulgação da descoberta, diversos cientistas exploraram novas aplicações dos Raios X, resultando em avanços notáveis na medicina.

Surgiu então uma nova especialidade médica, a Radiologia. Entre as principais aplicações pioneiras, destacam-se:

- Em 1896, Thomas Alva Edison (1847–1931) inventou o Fluoroscópio portátil.
- Em 1900, foi desenvolvido o aparelho de radiografia portátil, baseado no Fluoroscópio.
- Em 1904, foi criado o aparelho de radiografia móvel para ambulâncias por Marie Curie (1867–1934).
- Em 1918, Walter Dandy (1866–1946) introduziu a Ventriculografia, ao perceber que a injeção de ar nos ventrículos cerebrais melhorava significativamente as imagens de radiografia.
- Em 1927, Antônio Egas Moniz (1847–1955) desenvolveu a Arteriografia, ao injetar iodeto de sódio nas artérias carótidas, melhorando a visualização de aneurismas e derrames.
- Em 1930, surgiu o conceito inicial de Tomógrafo Linear, conhecido como Planigrafia, desenvolvido por Zieldses des Plantes (1902–1993), permitindo a obtenção de imagens em diferentes planos.
- Em 1931, Alessandro Vallebona (1899–1987) criou a Tomografia Axial, capaz de girar em torno do paciente.
- Em 1972, diante da dificuldade de manipular várias imagens tomográficas, foi desenvolvido um sistema computacional para processamento, originando a Tomografia Axial Computadorizada, concebida por Godfrey Newbold Hounsfield (1919–2004). Este avanço é a base dos equipamentos de Tomografia Computacional em diversas áreas, tanto na saúde quanto na indústria.

## 2 OBTENÇÃO DE IMAGENS ATRAVÉS DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

A palavra tomografia tem origem na combinação de duas palavras gregas, "tomos", que significa fatias, e "graphein", que significa escrever. Inicialmente denominada de CAT SCAN (*Computadorized Axial Tomography Scanner*), depois X-ray CT (*X-ray Computed Tomography*) e, finalmente, CT (*Computed Tomography*) ou, em português, TC (Tomografia Computadorizada).

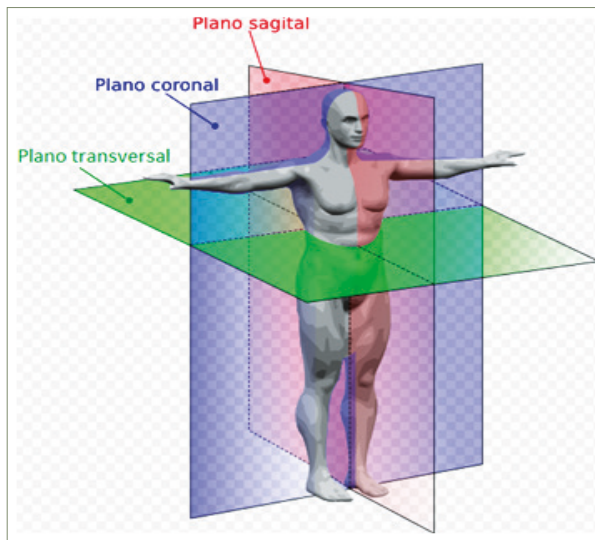
O princípio da TC envolve a geração de múltiplas imagens bidimensionais (2D) de diferentes orientações através da absorção de raios X por um objeto em questão. Estas imagens são então processadas por sistemas computacionais e transformadas em imagens tridimensionais (3D), contendo informações completas sobre as características externas e internas do objeto. Embora capaz de visualizar diversas estruturas, a TC é ideal para examinar compostos com alto número atômico (SUN *et al.* 2012).

A TC é amplamente utilizada na área da saúde, tanto para o diagnóstico de doenças quanto para o planejamento de radioterapia, permitindo acompanhar a evolução de cânceres e sua resposta ao tratamento. Suas principais aplicações incluem o estudo do sistema nervoso central e periférico, sistema digestório e sistema musculoesquelético. Com os avanços tecnológicos, surgiram equipamentos de TC com multi-detecores (*multi-slices*), possibilitando estudos funcionais de perfusão, vasculares, morfológicos e funcionais do coração, artérias, entre outros.

A tomografia computadorizada de varredura industrial, conhecida como *industrial CT scanning*, desempenha um papel fundamental na detecção de falhas em materiais, vazios, rachaduras e medições de dimensões internas. Sem essa tecnologia, essas tarefas seriam viáveis apenas por meio da desmontagem de objetos ou, em casos extremos, por meio de testes destrutivos. Com os contínuos avanços na tecnologia de software, as medições internas tornam-se ainda mais precisas, facilitando a verificação da conformidade com as especificações do projeto e a pesquisa de diversos materiais.

A TC pode capturar imagens de diferentes planos, como demonstrado na Figura 25 a seguir.

**Figura 25:** Planos anatômicos



Fonte: Wikipedia, 2024.

- O plano sagital é um plano paralelo à *linha mediana*. Divide o corpo ou objeto nas porções esquerda e direita.

- O plano frontal ou coronal divide o corpo ou objeto nas porções anterior (frente) e posterior (costas).
- O plano transversal divide o corpo, ou objeto nas porções cranial (superior) e caudal (inferior).

A TC utiliza um tubo gerador de raios X que emite radiação enquanto, em geral, se move em torno do objeto (Mourão, 2017). Essa radiação atravessa o objeto, sendo parte dela absorvida de forma variada dependendo do tipo de tecido ou material atravessado, enquanto o restante é captado por múltiplos detectores posicionados na direção oposta ao gerador de raios X. Múltiplas medições são obtidas pelos detectores e utilizadas para formar as imagens tomográficas. Os dados coletados são convertidos em sinais digitais de cada fatia do volume irradiado e enviados para um computador. Cada fatia é então dividida em pequenas unidades de volume chamadas "voxels". Quando o feixe de radiação passa por um voxel, parte de sua intensidade é atenuada de acordo com o material pelo qual ele se propaga, seguindo essencialmente a equação:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

**Onde:** I – Intensidade do feixe que sai do objeto

$I_0$  – Intensidade do feixe incidente

$\mu$  - coeficiente de atenuação linear

x – espessura do material

Com  $I_0$  sendo um valor conhecido, representando a intensidade do feixe de entrada, a intensidade do feixe que atravessa a fileira de voxels (I) e é captada pelo detector pode ser determinada. Com essas informações, é possível calcular a fração do feixe absorvida pelo voxel, o que está associado ao coeficiente de atenuação linear ( $\mu$ ) do material. Esse coeficiente representa a quantidade de absorção dos raios X por um determinado material. Cada valor de absorção é associado a um padrão de escurecimento da imagem em tons de cinza, variando do preto ao branco.

O próximo passo é converter o valor de atenuação de cada voxel na construção de uma imagem 2D que representa a fatia irradiada. Cada elemento dessa imagem digital é chamado de pixel. O tom de cinza de cada pixel depende do valor de atenuação do voxel correspondente. Assim, quanto maior o coeficiente de atenuação do voxel, maior será a absorção da radiação, resultando em tons mais claros na imagem. Por outro lado, quanto me-



nor o coeficiente de atenuação, menos absorção ocorre, resultando em tons mais escuros na imagem. Portanto, a imagem tomográfica é um mapa em escala de cinza que está diretamente relacionado à capacidade de absorção de cada material. Podemos dizer que a imagem formada pelo tomógrafo é uma representação das características de absorção do objeto.

A qualidade da imagem produzida pela tomografia computadorizada (TC) depende de uma série de parâmetros, incluindo:

- A qualidade dos raios X, que se refere à capacidade de penetração do feixe;
- O tipo e o número de detectores utilizados;
- A velocidade das medições realizadas;
- Os algoritmos empregados para determinar as atenuações individuais;
- Os algoritmos de reconstrução de imagens, entre outros.

Após a obtenção da imagem tomográfica, são utilizados *softwares* especializados para sua reconstrução, permitindo a visualização de cada fatia do objeto. Esses *softwares* permitem a correção de possíveis defeitos causados por influência de materiais metálicos ao redor do objeto, artefatos em forma de anel decorrentes de calibração dos detectores, ruídos dos detectores, endurecimento do feixe de raios X devido ao uso de filtros, entre outros fatores.

Uma vez corrigidas, as imagens podem ser processadas por outros *softwares* para transformar pixels em voxels e criar uma representação tridimensional (3D) do objeto, levando em conta todas as informações obtidas pelo tomógrafo. Essas imagens podem ser manipuladas, analisadas e recortadas de acordo com as necessidades do usuário final.

## 2.1 GERAÇÕES DE TCS

A Tomografia Computadorizada (TC) tem evoluído consideravelmente desde sua concepção no início da década de 1970. Ao longo dos anos, ocorreram diversas melhorias nas técnicas de aquisição de imagem, aprimoramentos de software, redução significativa no tempo de obtenção de imagens e desenvolvimento de algoritmos para análise das mesmas. Esses avanços tornaram os equipamentos de TC altamente confiáveis tanto na área médica quanto na industrial. No Centro de Tecnologia das Radiações (CETER), dispomos de equipamentos representativos das 1.<sup>a</sup>, 3.<sup>a</sup> e 4.<sup>a</sup> gerações da TC, permitindo-nos acompanhar de perto o desenvolvimento dessa tecnologia (Mourão, 2017; Velo, 2018).

### 1.ª GERAÇÃO

Conjunto formado por uma fonte e um detector em posições opostas que se move de um em um grau, até percorrer  $180^\circ$  em posições paralelas. Feixe estreito tipo *pencil beam*. Objeto permanece parado no centro do equipamento. Apresenta boa colimação e pouco ruído. Tempo gasto para varrer um único plano de corte é cerca de 4 a 5 min tempo considerado longo para imagens de pacientes que necessitam ficar imóveis. Qualidade de imagem ruim, poucos pixels para reconstrução e *softwares* iniciais com pouca qualidade. A TC do CETER de 1ª geração tem uma fonte e um detector em posições opostas que permanecem fixos. Nesse equipamento a amostra gira de um em um grau até completar  $180^\circ$  (Figura 26).

**Figura 26:** Imagem do tomógrafo de 1.ª geração



**Fonte:** Andrea Sanchez del Pozzo, s.d.

### 3.ª GERAÇÃO

Foram desenvolvidos no final da década de 1970. O conjunto é formado por uma fonte conectada a um arco de detectores em posição oposta, que gira em torno do objeto  $360^\circ$  (Figura 27). Tempo de aquisição de imagem de cerca de 3 a 10 s. Melhora real na qualidade de reconstrução de imagem.

**Figura 27:** Imagem do tomógrafo de 3.<sup>a</sup> geração



Fonte: Andrea Sanchez del Pozzo, s.d.

#### 4.<sup>a</sup> GERAÇÃO

Formado por um anel fixo de detectores que cobre os 360° do equipamento. Somente a fonte gira e possui feixe delgado em forma de leque. Diminuição na produção de artefatos causados pela movimentação mecânica da fonte mais detectores.

O tomógrafo *Instant Non-Scanning*, é semelhante ao tomógrafo de quarta geração, em que os detectores estão fixos ao redor do objeto, contudo as fontes estão fixas (Figura 28). No centro do equipamento existe uma coluna por onde passa um fluido que é analisado pelo TC, principal inovação deste equipamento.

**Figura 28:** Imagem do tomógrafo *Instant Non-Scanning* com a coluna de bolhas dinâmicas.



Fonte: Velo, 2018.

## 2.2 MICRO CT

O Microtomógrafo de raios X SkyScan-1275 (Figuras 29 e 30) (Bruker do Brasil, 2017), é um equipamento comprado com apoio da IAEA para auxiliar no desenvolvimento do projeto de pesquisa de rochas reservatório para prospecção de petróleo. É um sistema de laboratório de mesa com possibilidade de geração de imagens e reconstrução 3D da microestrutura interna para diferentes tipos de objetos sem que exista a necessidade de destruição da amostra. Pode ser utilizada, também, para análise de tecidos biológicos, e todo o tipo de amostra ex-vivo.

Consiste na combinação de um *scanner* Micro-CT e um computador com *software* de controle do sistema, reconstrução e *software* de análise. O *scanner* contém uma fonte de raios X de microfoco com fonte de alimentação de alta tensão, um raio X bidimensional e um manipulador de objetos de precisão. O manipulador de objetos realiza o posicionamento da amostra sob comandos do operador através de *software* de controle e permite alterar a ampliação da imagem movendo o objeto entre a fonte de raios X e o detector. Ele também gira o objeto durante a digitalização para adquirir múltiplas visualizações angulares, que serão utilizadas para reconstrução tomográfica 3D. O equipamento possui uma série de *softwares* que permitem a manipulação e correção das imagens, construir vídeos entre outros (Figuras 31 e 32).

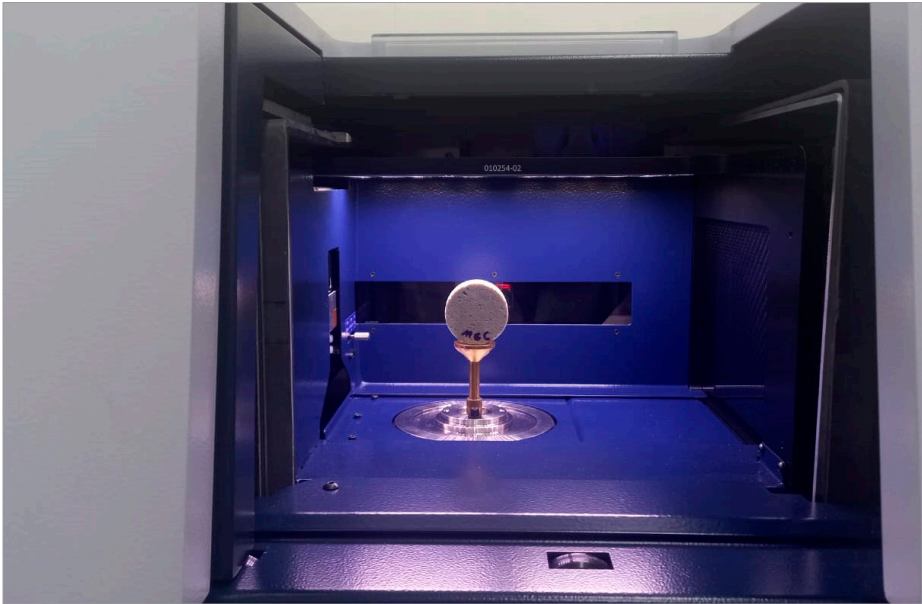
**Figura 29:** Imagem do Micro-CT de raios X



Fonte: Andrea Sanchez del Pozzo, s.d.



**Figura 30:** Imagem da câmara interna do Micro-CT de raios X com amostra de rocha



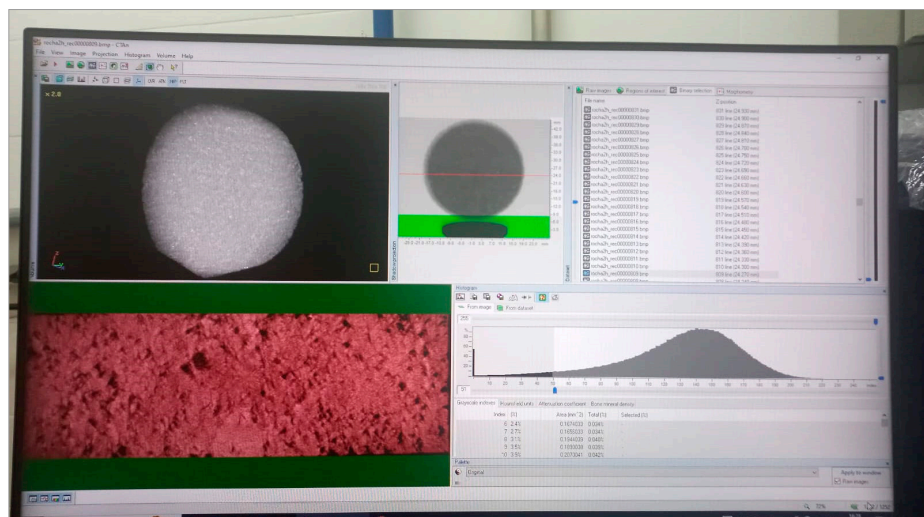
Fonte: Andrea Sanchez del Pozzo, s.d.

**Figura 31:** Visualização da amostra pela câmera interna do Micro-CT de raios X



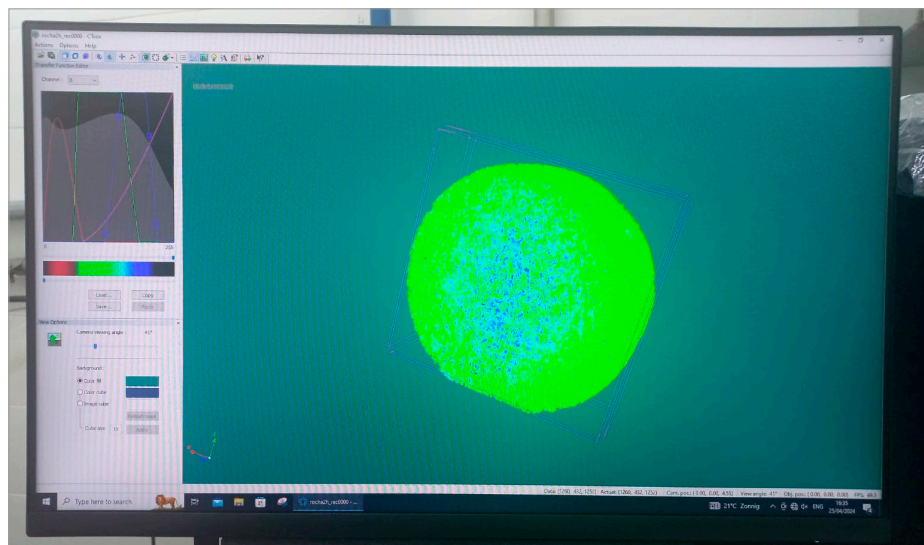
Fonte: Andrea Sanchez del Pozzo, s.d.

**Figura 32:** Visualização dos dados do software de análise CTAn



Fonte: Andrea Sanchez del Pozzo, s.d.

**Figura 33:** Reconstrução 3D pelo software CTVox



Fonte: Andrea Sanchez del Pozzo, s.d.

### 3 APLICAÇÕES DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA (TC) NA INDÚSTRIA

A TC, utilizando feixes de raios X ou de radiação gama, tem se mostrado uma excelente ferramenta para a promoção de respostas eficientes – e efetivas – para as questões cotidianas da indústria uma vez que, essa técnica, proporciona uma análise não invasiva do objeto (Tetzner, 2008), ou seja, não lhe causa danos ou quaisquer outros efeitos que possam inviabilizar a sua utilização após o mesmo ser submetido à técnica de análise.

Da mesma forma, como a TC permite a avaliação do interior de componentes e equipamentos da produção industrial — por meio das imagens tridimensionais, do interior dos objetos, geradas pela ferramenta — sem, necessariamente, interromper o seu processo de produção, a torna muito interessante para esse setor (Frade & Camargo, 2016; Tetzner, 2008).

Nesse sentido, os setores mais diversos da indústria têm buscado utilizar a ferramenta, dentre as quais podemos citar: a agroindústria, a indústria de construção civil, aquela médica e à associada a análise de rochas.

Na agroindústria, por exemplo, a TC tem sido utilizada para a identificação de processos de compactação e adensamento do solo que, podem afetar: (i) a dinâmica de percolação da água e dos solutos; (ii) a distribuição do sistema radicular das plantas; e, (iii) a porosidade total desses solos, além do tamanho e continuidade dos poros (Fante Junior *et al.*, 2002).

A importância desse estudo, para a sociedade, está no fato que um solo compactado ou adensado não propicia a lixiviação dos fluidos. Como consequência, as raízes das plantas não receberão a quantidade de água necessária para o seu desenvolvimento e crescimento o que, em última análise, provocará a diminuição da oferta de alimentos e aumento do seu custo.

Já na indústria de construção civil, a TC mostrou-se muito eficiente na quantificação da redução de vazios provocada pelo colapso do solo (Naime *et al.* 1997). O colapso do solo está associado, diretamente, ao problema do afundamento de edificações — tecnicamente chamado de recalque, ou seja, o solo colapsa em consequência da infiltração de água em grande quantidade.

Esse afundamento causa muitos danos a sociedade seja em termos econômicos, ambientais como aqueles sociais que, em alguns casos específicos, pode levar a perdas de vidas. Segundo (Naime *et al.*, 1997) há casos em que o colapso atinge um metro de profundidade. Nesse sentido o entendimento do mecanismo de compressão destes solos, bem como da região afetada pela variação de tensões que lhes foi imposta deverá permitir um



domínio das técnicas construtivas da região e a possibilidade de previsão do comportamento do recalque (afundamento) das obras ali edificadas.

Já na Área Médica a Tomografia Computadorizada (TC) tornou-se indispensável em alguns exames diagnósticos (Frade & Camargo, 2016). Segundo Maciel e Pinhal (2015) o advento da TC foi determinante para a Medicina Moderna sendo um meio importante e, muitas vezes, decisivo para o diagnóstico de patologias por meio das imagens obtidas. Entre os exames realizados com fins diagnósticos, utilizando-se a TC, é possível destacar as aquisições de imagens de crânio, tórax, abdômen e pelve, entre outros.

Segundo Bicalho (2010 *apud* Frade & Camargo, 2016) a principal vantagem da TC é que ela permite o estudo de "cortes" ou secções transversais do corpo humano vivo, ao contrário do que é dado pela radiologia convencional, que consiste na representação de todas as estruturas do corpo sobrepostas.

Dessa forma, obtêm-se uma imagem em que a percepção espacial é mais nítida, e apresenta maior distinção entre dois tecidos permitindo distinguir diferenças de densidade da ordem 0,5 % entre tecidos, ao passo que na radiologia convencional este limiar situa-se nos 5 %. Nesse sentido, a TC torna possível a detecção ou o estudo de anomalias que não seriam visualizadas em radiografias comuns, ou por meio de métodos invasivos.

No que tange a utilização da TC para a análise de rochas, Tetzner (2008), afirma, em um estudo desenvolvido junto ao Instituto de Pesquisas em Energia Nuclear (IPEN), que a técnica se mostrou capaz de reconhecer o conteúdo interno de uma amostra — desde que se utilize um equipamento com fonte e detectores de radiação adequados — sendo inclusive indicada para estudar a morfologia interna de pedras e rochas, uma vez que, tanto a TC com raios X como aquela com radiação gama, são compatíveis para este tipo de material, o que, em última análise, abre a possibilidade de sua utilização para diversos ensaios industriais.

Dentro das possíveis utilizações industriais, associadas a análise de rochas e pedras (em particular, dos reservatórios de carbonato e arenito) por meio da TC, está a avaliação precisa da porosidade e da distribuição do tamanho dos poros desses materiais. A importância desse conhecimento está associada ao fato de que, essas características, afetam diretamente as propriedades macroscópicas do fluxo de um fluido multifásico — como por exemplo, os hidrocarbonetos (Ramos *et al.* 2019).

Nesse sentido, essa informação torna-se extremamente relevante, uma vez que, os reservatórios de carbonato e arenito abrigam mais de 50 % das reservas mundiais de hidrocarbonetos, desempenhando assim, um papel muito importante na indústria do petróleo (Ramos *et al.* 2019).

Dentro desse contexto, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), em parceria com o Instituto de Pesquisas em Energia Nuclear (IPEN), dentro do Programa de Gestões Estratégicas de Desenvolvimento, está desenvolvendo o projeto chamado “Utilização da tecnologia de tomografia de processos industriais para aumentar a eficiência no processo de produção de petróleo e controle de qualidade dos seus produtos”.

A importância desse projeto pode ser mensurada pelo fato de que, segundo o Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (2024), apenas cerca de 10 % do petróleo, armazenado em um reservatório natural, é normalmente extraído durante a recuperação primária — técnica em que a pressão natural do reservatório ou a própria gravidade conduzem o petróleo para o poço, combinada com técnicas de elevação artificial (como bombas) que trazem o petróleo para a superfície.

Segundo ainda o Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (2024), as técnicas de recuperação secundária conseguem estender a vida produtiva de um campo — geralmente injetando água ou gás para deslocar o petróleo e levá-lo a um poço de produção — resultando na recuperação de, aproximadamente, 20 a 40 % do petróleo armazenado no local.

Assim, o desenvolvimento desse projeto permitirá — além fomentar e fortalecer a infraestrutura de pesquisa, desenvolvimento e inovação (P&D&I) da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) — fortalecer a posição do órgão como referência para a promoção e o desenvolvimento da ciência e tecnologia nuclear no Brasil.

## REFERÊNCIAS

BRUKER DO BRASIL. *SkyScan 1275 – User Manual v. 1.2*. Belgium: Bruker MicroCT, 2017.

FANTE JUNIOR, L. *et al.* Tomografia computadorizada na avaliação da densidade de um solo do semiárido brasileiro. *Física do Solo. Rev. Bras. Ciênc. Solo*, v. 26, n. 4, dez. 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000400001>.

FRADE, Luiz Felipe; CAMARGO, Stephany de Barros. *Conceitos e aplicações de tomografia industrial*. 2016. Trabalho técnico – Departamento de Pesquisa e Pós-graduação e Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté. Taubaté (SP), 2016. Disponível em: <http://repositorio.unitau.br/jspui/handle/20.500.11874/184>. Acesso em: 21 jan. 2022.

MACIEL, Marcelo Tadeu; PINHAL Junior, Paulo (2015). A importância da tomografia computadorizada em diagnósticos clínicos. *In: MOSTRA DE TRABALHOS*

ACADÊMICOS, 9.; JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 3. **Anais [...]**. Santos (SP) 2015. Disponível em: <http://revista.unilus.edu.br/index.php/ruep/article/view/546/u2016v13n30e546>. Acesso em: 27 out. 2021.

MOURÃO, Arnaldo Prata. **Tomografia Computadorizada: tecnologias e aplicações**. 2. ed. São Caetano do Sul (SP): Difusão, 2017.

NAIME, João de Mendonça; CONCIANI, Wilson; SOARES, Márcio Miranda; CRUVINEL, Paulo Estevão; CRESTANA, Sílvio. Tomografia computadorizada aplicada ao estudo dos solos colapsáveis. **Comunicado Técnico**, n. 17, p.1-5, dezembro, 1997. (Centro Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento de Instrumentação Agropecuária – CNPDIA). ISSN 1413-6244.

PORTAL EDUCAÇÃO. Curso de Tomografia Computadorizada. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/slideshow/tomografia-computadorizada-01/36765700>. Acesso em: 24 abr. 2024.

RAMOS, G. J. *et al.* Evaluation of the conventional and synchrotron X-ray tomography applied to heterogeneous oil reservoir rocks. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 3A (suppl.), 2019. DOI: 10.15392/bjrs.v7i3A.844. Disponível em: <https://www.bjrs.org.br/revista/index.php/REVISTA/article/view/844>. Acesso em: 22 abr. 2024.

SUN, W.; BROWN, S. B.; LEACH, R. K. An overview of industrial X-ray computed tomography. **NPL Report ENG**, [s.l.], n. 32, jan. 2012.

TETZNER, Guaraciaba de Campos. **Aplicação da tomografia computadorizada industrial na análise de rochas**. 2008. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear – Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008. DOI: 10.11606/D.85.2008.tde-17082009-121032. Acesso em: 16 abr. 2024.

UNITED STATES OF AMERICA. Department of Energy. Office of Fossil Energy and Carbon Management. **Enhanced Oil Recovery**. [S.l.: s.n.], 2024. Disponível em: <https://www.energy.gov/fecm/enhanced-oil-recovery>.

VELO, Alexandre França. **Análise da aplicação de diferentes algoritmos de reconstrução de imagens tomográficas de objetos industriais**. Tese (Doutorado em Análise da aplicação de diferentes algoritmos de reconstrução de imagens tomográficas de objetos industriais) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2018.

WIKIPEDIA. Plano sagital. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Plano\\_sagital](https://pt.wikipedia.org/wiki/Plano_sagital). Acesso em: 24 abr. 2024.

# Tecnologia das radiações para a segurança pública

Fábio Fumio Suzuki (IPEN)

## 1 SEGURANÇA PÚBLICA

A segurança pública é um conceito bastante amplo, que envolve áreas como saúde, justiça e assistência social, abrangendo tanto aspectos preventivos quanto repressivos para a preservação da ordem pública, a proteção dos cidadãos e a garantia do respeito às leis em uma sociedade.

No Brasil, a segurança pública é direito e responsabilidade de todos, mas também é um dever do Estado, que exerce esse dever por meio de órgãos de segurança pública, a saber: polícia federal, polícia rodoviária federal, polícia ferroviária federal, polícias civis, polícias militares e corpos de bombeiros militares, polícias penais federal, estaduais e distrital (Brasil, 1988). Cabe esclarecer que, com relação à polícia ferroviária federal, apesar de constar como integrante da segurança pública na Constituição Federal, atualmente ainda não existe lei específica que regula a sua criação.

Esses diversos órgãos de segurança pública exercem o poder de polícia para, por exemplo, apurar infrações contra a ordem política e social ou em detrimento de bens, serviços e interesses do Estado, prevenir e reprimir o tráfico ilícito de entorpecentes e drogas afins, o contrabando e o descaminho, garantir a segurança de estabelecimentos penais bem como de grandes eventos, tudo isso sem prejuízo da ação de outros órgãos públicos nas respectivas áreas de competência, como a fazendária ou do controle das radiações ionizantes.

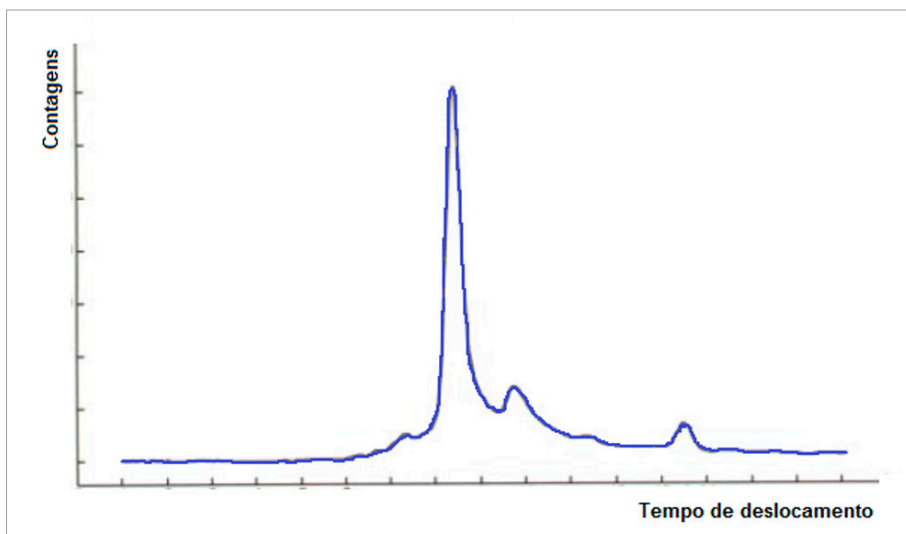
Além disso, por também serem órgãos públicos, os órgãos de segurança pública devem atender ao princípio constitucional da eficiência, que orienta a Administração Pública a tomar suas decisões baseada no interesse da coletividade, adotando mudanças e inovações que satisfaçam o interesse público e que respeitem a legalidade. Nesse compasso, a tecnologia das radiações tem tido um papel importante, trazendo inovações para várias áreas da segurança pública, como a detecção de quantidades traço de explosivos ou drogas e a inspeção de pacotes, bagagens, cargas, veículos ou mesmo pessoas.

## 1 EQUIPAMENTOS PARA INSPEÇÃO DE TRAÇOS DE EXPLOSIVOS E DROGAS

Equipamentos que utilizam a técnica de espectrometria de mobilidade iônica (EMI) são amplamente utilizados para a detecção de traços de explosivos e drogas ilícitas, principalmente em portos e aeroportos (Fatah, 2000).

Nesse tipo de inspeção as superfícies dos objetos ou pessoas são amostradas com, por exemplo, um esfregaço. Essa amostra é introduzida no equipamento, onde é aquecida para gerar vapores das substâncias orgânicas presentes. As moléculas orgânicas são ionizadas por uma fonte radioativa, comumente de Ni-63, e os íons formados são conduzidos por um campo elétrico contra um fluxo de gás neutro através de um duto. A velocidade média dos íons nesse duto depende de suas cargas, massa e tamanho, de forma que os íons das distintas substâncias presentes levam tempos diferentes para chegar ao final do duto, onde há um detector que os registra. Esse processo leva à formação de um espectro característico das substâncias presentes na amostra (gráfico 1).

**Gráfico 1:** Espectro típico de um detector com tecnologia EMI



Fonte: Elaborado pelo autor.

O espectro formado é então comparado a uma biblioteca de espectros de substâncias ilícitas, de forma a identificar a presença de explosivos ou drogas na amostra.

### 3 EQUIPAMENTOS PARA INSPEÇÃO DE PACOTES E BAGAGENS

São equipamentos com fins de segurança que empregam tubos de raios X para inspeção por imagem de bagagens, pacotes e demais objetos, e que possuem intertravamentos ou outros recursos de segurança para impedir o acesso interno às áreas do equipamento onde ocorre a irradiação (CNEN, 2023a).

A tecnologia básica utilizada nesse tipo de equipamento é a transmissão de um feixe monoenergético de raios X através dos objetos a serem inspecionados de forma que detectores de radiação posicionados no lado oposto medem a intensidade dos raios X, formando uma imagem em escalas de cinza. Esse tipo de tecnologia tem as vantagens de permitir uma alta velocidade de deslocamento dos objetos, resultando em baixa exposição dos mesmos, além do equipamento ter um custo moderado. Por outro lado, essa tecnologia tem dificuldade para distinguir entre seções espessas de materiais de baixa densidade e seções finas de materiais de alta densidade, de forma que a interpretação da imagem para identificação do conteúdo inspecionado é prejudicada.

Para fazer frente a essa limitação, a tecnologia de raios X de dupla energia, que foi inicialmente desenvolvida para uso médico na diferenciação entre tecidos, foi adaptada para uso nos equipamentos de segurança (figura 34). Os equipamentos com essa tecnologia utilizam dois níveis de energia distintos, sendo um de baixa energia, que operam em torno de 50 a 80 kV, e outro de alta energia, que operam acima de 100 kV. (Khan *et al.*, 2020).

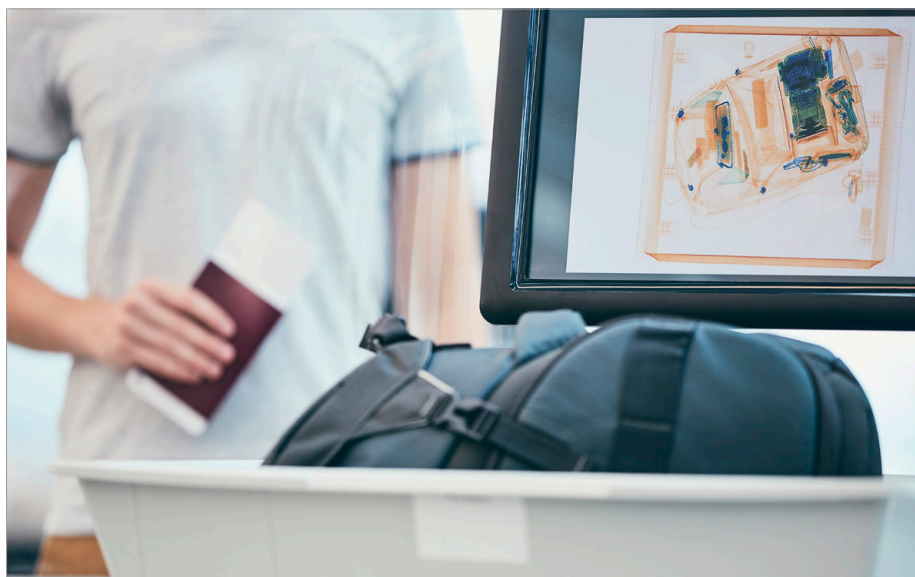
**Figura 34:** Equipamento para inspeção de pacotes e bagagens



Fonte: Banco imagem AdobeStock [legalmente adquirido pela organizadora do livro].

Os contrastes na imagem do feixe de alta energia dependerão mais fortemente da densidade do objeto, enquanto que as imagens geradas pelo feixe de baixa energia terão influência também da espessura do objeto. Dessa forma, as áreas de material denso ficarão escuras tanto nas imagens de raios X de baixa energia quanto nas de alta energia, e as áreas de elementos leves serão mais escuras apenas nas imagens de raios X de baixa energia. Utilizando-se um algoritmo adequado para combinar as imagens geradas pelas diferentes energias, torna-se possível identificar elementos leves como carbono, nitrogênio e oxigênio, permitindo gerar uma terceira imagem onde esses elementos podem ser diferenciados por outra cor, facilitando a interpretação pelo operador do equipamento (figura 35).

**Figura 35:** Imagem gerada por raios X de dupla energia.



Fonte: Banco imagem AdobeStock [legalmente adquirido pela organizadora do livro].

## **4 EQUIPAMENTOS PORTÁTEIS DE RAIOS X POR TRANSMISSÃO**

Os equipamentos portáteis de raios X para inspeção por transmissão são utilizados para fins de segurança com a finalidade de examinar objetos suspeitos sem a necessidade de removê-los para outro local. Eles se diferenciam dos equipamentos para inspeção de bagagens porque não possuem uma câmara de irradiação fechada, de forma que o dispositivo



produz um feixe de raios X aberto e, para que possa ser adequadamente operado, uma área de isolamento precisa ser estabelecida ao redor do objeto que está sendo examinado.

Esses equipamentos consistem de um gerador portátil de raios X e um sistema de imagem colocado atrás do objeto a ser inspecionado. Os geradores de raios X são operados em modo pulsado trabalham com tensões de até 300 kV (IAEA, 2020).

**Figura 36:** Equipamento portátil de raios X para inspeção por transmissão



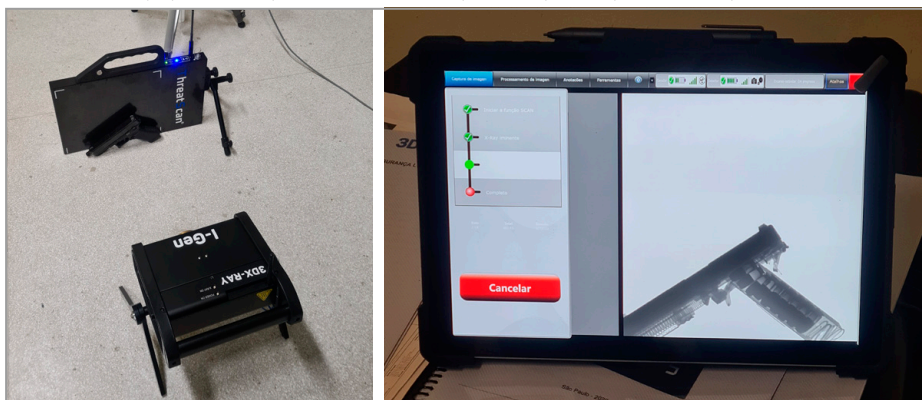
Fonte: Acervo do autor. Fotos de Fábio Suzuki.

## **5 EQUIPAMENTOS PORTÁTEIS DE RAIOS X POR RETROESPALHAMENTO**

Dispositivos portáteis de inspeção por retroespalhamento são usados em segurança com a finalidade de detectar de elementos de baixo número atômico associados a explosivos e narcóticos. Esses dispositivos geralmente são operados com uma tensão de 70 kV e produzem um feixe de raios X de baixa energia e baixa taxa de dose, gerando uma imagem do objeto digitalizado a partir dos raios X retroespalhados (IAEA, 2020).

No Brasil, a comercialização desse tipo de equipamento é restrita a órgãos de segurança pública, incluindo os de inteligência. Como as unidades são portáteis e produzem um feixe aberto, uma área de isolamento adequada na frente do dispositivo deve ser providenciada. Além disso, o equipamento deve contar com uma blindagem inerente adequada para garantir que os requisitos de exposições ocupacionais sejam atendidos (CNEN, 2020).

**Figura 37:** Equipamento portátil de raios X para inspeção por retroespalhamento



**Fonte:** Banco imagem AdobeStock [legalmente adquirido pela organizadora do livro].

## 6 VANS DE INSPEÇÃO POR RAIOS X DE RETROESPALHAMENTO

São vans ou veículos similares em que são instalados equipamentos de raios X de inspeção por retroespalhamento, com tensões de operação da ordem de 200 kV, de forma a permitir o exame de cargas de contêineres, vagões ou mesmo de outros veículos. Como essa tecnologia permite a discriminação de substâncias de baixa densidade, é capaz de detectar explosivos, narcóticos, itens agrícolas ou mesmo pessoas.

No Brasil, como o uso desse tipo de equipamento pode resultar na irradiação de pessoas, seja o condutor do veículo inspecionado ou mesmo indivíduos que estejam inadvertidamente junto à carga, o uso das vans de inspeção por retroespalhamento somente é considerado justificado e restrito aos seguintes órgãos: Polícia Federal, Polícia Rodoviária Federal e Polícia Militar Estadual (CNEN, 2023b).

Além disso, o equipamento de raios X utilizado deve ser classificado como equipamento gerador de radiação de baixo risco radiológico, isto é, aquele que:

- I – a segurança radiológica pode ser amplamente garantida pelo projeto do equipamento;
- II – os procedimentos de operação são simples de seguir;
- III – os requisitos de treinamento para radioproteção e segurança das fontes radiológica são mínimos; e
- IV – a probabilidade de ocorrência de problemas relacionados à radioproteção e segurança radiológica é baixa. (ANSN, 2023c)

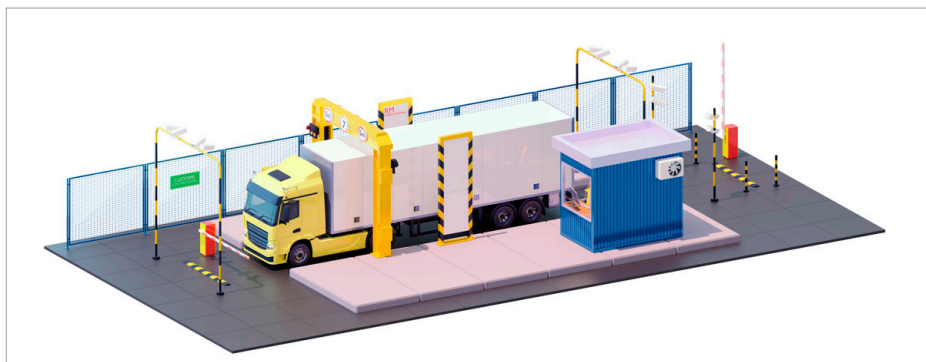
## 7 EQUIPAMENTO DE INSPEÇÃO DE CARGAS POR ACELERADOR DE PARTÍCULAS

A tensão operacional máxima de tubos de raios X está na faixa de 450 kV, o que limita o poder de penetração dos raios X gerados a menos de 100 mm de aço. Já aceleradores lineares podem operar com energias de até 9 MeV, sendo capazes de gerar raios X que podem penetrar mais de quatrocentos milímetros de aço. Assim, várias empresas passaram a desenvolver aceleradores lineares para inspeção de contêineres de carga, que tipicamente operam na faixa de 3 a 6 MeV por uma questão de desempenho e custo (IAEA, 2020). Como esses equipamentos podem gerar doses elevadas, devem possuir recursos de radioproteção e segurança radiológica que garantam que indivíduos de público e indivíduos ocupacionalmente expostos não sejam expostos a níveis de radiação inaceitáveis pela Autoridade Reguladora (CNEN, 2023d).

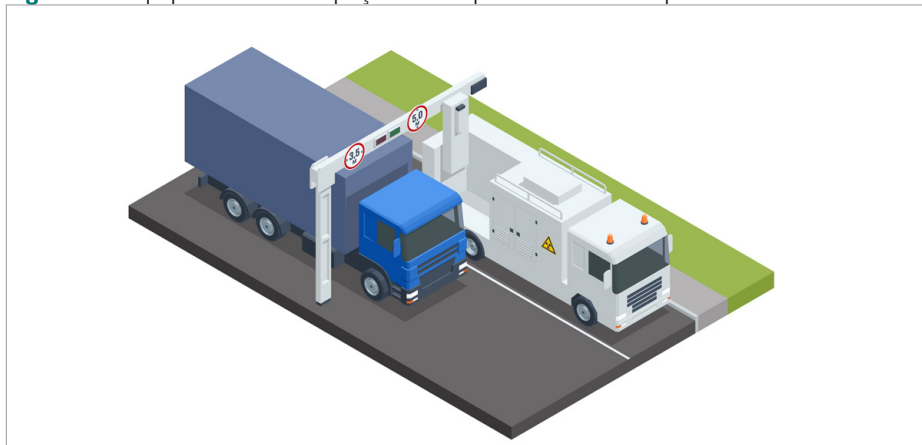
Os dispositivos que empregam aceleradores de partículas para inspeção de cargas e contêineres podem ser de dois tipos:

- Fixo: em que os equipamentos são projetados para realizar a inspeção em um determinado local de instalação. Esses equipamentos podem requerer a construção de uma infraestrutura com barreiras primária e secundária, com projeto aprovado pela autoridade reguladora (figura 38);
- Móvel: em que os equipamentos são instalados em um veículo de transporte para permitir a inspeção em locais diversos. Nesses dispositivos, a fonte de radiação faz parte integrante do veículo. Esses equipamentos, por projeto, não requerem a construção de uma infraestrutura e a área delimitada para operação é feita com barreiras móveis (figura 39).

**Figura 38:** Equipamento de inspeção fixo por acelerador de partículas



Fonte: Banco imagem AdobeStock [legalmente adquirido pela organizadora do livro].

**Figura 39:** Equipamento de inspeção móvel por acelerador de partículas

Fonte: Banco imagem AdobeStock [legalmente adquirido pela organizadora do livro].

## 8 EQUIPAMENTO DE INSPEÇÃO CORPORAL

Equipamento de inspeção corporal é definido como o dispositivo gerador de radiação de baixo risco radiológico, que emprega tubo de raios X para obtenção de imagens humanas para fins de segurança pública (CNEN, 2023e). Esses equipamentos podem ser projetados para utilizar um dos dois tipos diferentes de tecnologia, a de transmissão ou a de retroespalhamento.

Com a tecnologia de transmissão, uma imagem é obtida pela radiação que passa pelo corpo da pessoa inspecionada e a imagem exibirá objetos ocultos sobre o corpo e também aqueles ocultos dentro do corpo. As doses de dispositivos de imagem de inspeção baseados em transmissão estão normalmente na faixa de 2–5  $\mu\text{Sv}$  por varredura (IAEA, 2020).

Com a tecnologia de retroespalhamento, uma imagem é formada a partir da radiação espalhada pela superfície da pessoa que está sendo inspecionada, e tal imagem exibirá apenas objetos ocultos sobre corpo. As doses dos dispositivos de inspeção baseados em retroespalhamento são inferiores às doses dos dispositivos de inspeção baseados na transmissão; normalmente menos de 0,1  $\mu\text{Sv}$  por imagem (IAEA, 2020). As imagens de retroespalhamento incluem detalhes das características anatômicas da pessoa que está sendo inspecionada, portanto questões de privacidade também precisam ser levadas em consideração para a sua justificação e para o seu uso. No Brasil, o uso de radiação ionizante para inspeção de indivíduos para fins de segurança pública é uma circunstância excepcional que requer justificação caso a caso. O uso de equipamentos de inspeção

corporal é considerado justificado nas seguintes situações e atividades (CNEN, 2023e):

- i. Em substituição à revista vexatória ou revista invasiva em unidades prisionais para identificação de objetos e materiais ilícitos escondidos no interior de cavidades humanas.
- ii. Pela Polícia Federal em aeroportos, em substituição às imagens de radiodiagnóstico, apenas para indivíduos para os quais haja indícios de ingestão de objetos e materiais ilícitos.

Além disso, as configurações operacionais dos equipamentos de inspeção corporal devem ser definidas de maneira a otimizar a radioproteção e segurança radiológica dos indivíduos inspecionados, dos operadores e demais indivíduos de público (CNEN, 2023e).

## REFERÊNCIAS

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil (1988). *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 5 de outubro de 1988.

BRASIL. Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Guia para o licenciamento de instalações radiativas que usam dispositivos portáteis de inspeção por retroespalhamento**. [S.l.: s.n.], 2020. Versão 1.0. Disponível em: <https://appasp2019.cnen.gov.br/seguranca/orientacoes/images/cnen/documentos/drs/orientacoes/Guia-para-o-licenciamento-de-instalacoes-radiativas-de-Dispositivo-Portatil-de-Inspecao-por-Retroespalhamento.pdf>. Acesso em: 01 de maio de 2024).

BRASIL. Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Guia para o licenciamento de instalações radiativas de Inspeção de Bagagem e Contêineres do Subgrupo 7B**. [S.l.: s.n.], 2023a. Versão 2.0. Disponível em: <https://appasp2019.cnen.gov.br/seguranca/orientacoes/images/cnen/documentos/drs/orientacoes/Guia-IBC-do-Subgrupo-7B-Set2023.pdf>. Acesso em: 01 de maio de 2024.

BRASIL. Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Guia para atendimento de Requisitos de Radioproteção e Segurança Radiológica no uso de Van de Inspeção por Retroespalhamento**. [S.l.: s.n.], 2023b. Versão 2.0. Disponível em: <https://appasp2019.cnen.gov.br/seguranca/orientacoes/images/cnen/documentos/drs/orientacoes/Guia-para-atendimento-de-requisitos-de-seguranca-van-de-retroespalhamento-Out-2023.pdf>. Acesso em: 01 maio 2024.

BRASIL. Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN). **Requisitos de Radioproteção e Segurança Radiológica na Obtenção de Imagens Humanas para Fins de Segurança Pública**. Norma ANSN 6.14. [S.l.: s.n.], 2023c.

BRASIL. Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Guia para o licenciamento de instalações radiativas de Inspeção de Bagagem e Contêineres do Subgrupo 7C.** [S.l.: s.n.], 2023d. Versão 3.0. Disponível em: <https://appasp2019.cnen.gov.br/seguranca/orientacoes/images/cnen/documentos/drs/orientacoes/Guia-IBC-do-Subgrupo-7C-Set2023.pdf>. Acesso em: 01 maio 2024.

BRASIL. Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Guia para atendimento de Requisitos de Radioproteção e Segurança Radiológica no uso de Equipamentos de Inspeção Corporal.** [S.l.: s.n.], 2023e. Versão 2.0. Disponível em: <https://appasp2019.cnen.gov.br/seguranca/orientacoes/images/cnen/documentos/drs/orientacoes/Guia-para-atendimento-de-Requisitos-de-Seguranca-e-Protecao-Radiologica-no-uso-de-Equipamentos-de-Inspecao-Corporal-Out-2023.pdf>. Acesso em: 01 maio 2024.

FATAH, A. Guide for the Selection of Drug Detectors for Law Enforcement Applications. NIJ Guide 601-00. 2000. Disponível em: <https://www.ojp.gov/pdffiles1/nij/183260.pdf>. Acesso em: 01 maio 2024.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Radiation Safety of X Ray Generators and Other Radiation Sources Used for Inspection Purposes and for Non-medical Human Imaging. **Specific Safety Guide**, [s.l.], n. SSG55, Vienna, 2020.

KHAN, S. U. et al. A Review of Airport Dual Energy X-ray Baggage Inspection Techniques: image enhancement and noise reduction. **Journal of X-Ray Science and Technology**, v. 28, n. 3, p. 1-25, 2020. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/341170754\\_A\\_review\\_of\\_airport\\_dual\\_energy\\_X-ray\\_baggage\\_inspection\\_techniques\\_Image\\_enhancement\\_and\\_noise\\_reduction](https://www.researchgate.net/publication/341170754_A_review_of_airport_dual_energy_X-ray_baggage_inspection_techniques_Image_enhancement_and_noise_reduction). Acesso em: 02 maio 2024.



Este caderno foi composto com as famílias das fontes  
Dosis, Ubuntu Sans Condensed e Niramit  
Impressão: capa em cartão supremo 250g/m<sup>2</sup> e miolo em Ap 80g/m<sup>2</sup>  
Impresso no Brasil - outubro 2025

