

I. FUNDAMENTOS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA PARA ATIVIDADES INDUSTRIAIS

I.1. Fontes Radioativas Artificiais

1. Introdução

A evolução das pesquisas tecnológicas e as exigências sempre crescentes dos consumidores obrigam a elevação do nível de qualidade dos produtos metalúrgicos.

No geral estes produtores procuram cada vez mais garantir a qualidade de seus produtos no mercado competitivo.

Os principais materiais utilizados na construção de estruturas e máquinas, são: metais e suas ligas, concreto, plásticos, etc, cujas propriedades devem ser bem conhecidas por meio de ensaios. Existem um grande número de ensaios, que permitem determinar as propriedades físicas, físico-químicas, mecânicas, térmicas, etc.

Daremos ênfase neste estudo, somente a proteção radiológica ligada ao ensaio não destrutivo pelas técnicas raios gama (Gama grafia).

2. Isótopos Artificiais

2.1. Definições

- Isótopos são elementos que contêm em seu núcleo atômico, o mesmo número de prótons (tem o mesmo número atômico), porém o número de massa diferente (neutrons).

Exemplificando:

$$\begin{matrix} A \\ X \\ Z \end{matrix}$$

X = Elemento

Z = número atômico

A = número de prótons + número de
neutrons

número de neutrons = A - Z

1

${}^1_1\text{H}$ - Hidrogenio

2

${}^2_1\text{H}$ - Deuterio

3

${}^3_1\text{H}$ - Trítio

- Raios Gama, são radiações de natureza eletromagnéticas, semelhante aos raios X e possuem grande poder de penetração.

3. Fontes Radioativas Usadas em Gamagrafia Industrial.

3.1. Energia das Fontes

Os ensaios não destrutivos tornaram-se essenciais para o desenvolvimento da indústria moderna como meio de garantir melhor controle de eventuais defeitos. Entre vários métodos de ensaios não destrutivos têm sido mais utilizados os métodos radiográficos. A gamagrafia é, assim, um método de

ensaio não destrutivo que utiliza a propriedade de penetração dos raios gama para examinar o interior de materiais e conjuntos lacrados, quando não fôr possível uma inspeção visual. A simplicidade das técnicas de gamagrafia e o baixo custo das fontes radioativas e de seu equipamento auxiliar são fatos pouco conhecidos pelos industriais brasileiros. Na União Soviética, nos Estados Unidos da América, na Europa em geral e mesmo em países de nível industrial inferior ao do Brasil utiliza-se a gamagrafia em larga escala, não apenas por grandes indústrias e firmas especializadas - mas também por indústrias de pequeno e medio portes.

Os radioisótopos utilizados em gamagrafia industrial devem responder a uma série de requisitos afins com o trabalho a que se destinam. Esses requisitos prendem-se as condições de operação na indústria, à proteção radiológica, as razões técnico-econômicas, ao transporte e a facilidade de obtenção.

Trataremos a seguir apenas dos emisso
res gama usados rotineiramente nas in
dústrias para o controle de qualidade
de seus produtos.

Atualmente, existem cerca de 60 isóto
pos radioativos que foram utilizados
com relativo êxito em gamagrafia in
dustrial. No entanto, cerca de 90%
das gamagrafias industriais são fei
tas utilizando-se apenas quatro radio
isótopos: cobalto 60, irídio 192, cé
sio 137 e túlio 170. Essas fontes co
brem quase todo o intervalo que vai
desde frações de milímetros de espes
sura de ligas leves (alumínio, tita
nio) e de materiais orgânicos até cer
ca de 30 cm de aço.

Esses radioisótopos liberam em cada
desintegração certa quantidade de ener
gia, da qual uma parte aparece na for
ma de radiação eletromagnética gama.

3.1.1. Cobalto 60 (^{60}Co)

O ^{60}Co libera 2 raios gama -
com energia 2,50 Mev. Para 1
Ci ^{60}Co há a seguinte emissão

$$3,7 \times 10^{10} \frac{\text{desint.}}{\text{s}} \times 2 \frac{\text{r.gama}}{\text{desint}}$$

$$= 7,40 \times 10^{10} \frac{\text{raios gama}}{\text{s}}$$

Devido ao seu grande poder de penetração o ^{60}Co é muito utilizado para inspecionar peças de grande espessura (25 mm a 200 mm de Fe aproximadamente). Também é utilizado para inspecionar colunas, vigas de concreto armado ou protendido e outras estruturas.

A sensibilidade de detecção de defeitos razoáveis a custo razoáveis, contribuíram para a ampla difusão desta fonte radioativa.

3.1.2. Irídio 192 (^{192}Ir)

O ^{192}Ir libera 2,2 raios gamas/desint. com energia 2,80 MeV. Para 1 Ci ^{192}Ir há a seguinte emissão = $3,7 \cdot 10^{10}$

$$\frac{\text{desint}}{\text{s}} \cdot 2,2 \frac{\text{raios gamas}}{\text{desint.}} = 8,2 \cdot 10^{10} \frac{\text{raios gama}}{\text{s}}$$

$10^{10} \frac{\text{raios gama}}{\text{s}}$

A radiação do ^{192}Ir é apreciavelmente "mais mole" do que a do ^{60}Co .

Por isso é utilizada para a radiografia de secções delgadas (em aço seu alcance é de aproximadamente 1/4 "a 3").

3.1.3. Césio 137 (^{137}Cs)

O ^{137}Cs libera 0,92 raios gama de 0,66 MeV, em cada desintegração. Para 1 Ci de ^{137}Cs =

$$= 3,7 \cdot 10^{10} \frac{\text{desint.}}{\text{S}} \cdot 0,92$$

$$\frac{\text{raios gama}}{\text{desint.}} = 3,41 \times 10^{10} \frac{\text{raios gama}}{\text{S}}$$

A meia vida muito longa (30 - anos), aliada com sua moderada energia (0,66 MeV), a primeira vista, parece ser o isótopo ideal para radiografias industriais. Contudo tem desvantagens que encobrem as vantagens de sua meia vida, sendo a mais importante a baixa atividade específica.

3.1.4. Túlio 170 (^{170}Tm)

Este radioisótopo é indicado para ensaiar-se espessuras de ferro inferiores a 6 mm e materiais leves.

Contudo na fabricação de fontes de Tório é difícil de ser obtido na forma pura, e estas impurezas resultam em radiações duras em tais quantidades que mascaram as radiações moles, utilizando Tm 170.

Como já foi dito, as fontes de gamagrafia mais utilizadas pelas indústrias são de ^{60}Co , ^{192}Ir , ^{137}Cs , ^{170}Tm . Como o ^{137}Cs é produto de fissão e a fonte de gamagrafia é difícil na sua construção, a tendência atual é substituí-la pelo ^{134}Cs . Estes radioisótopos e outros menos utilizados são apresentados na tabela 1.

TABELA I

Fontes Radioativas Para Gamagrafia Industrial

Isótopo	Tipo de Radiação	Energia e Percentagem		Meia Vida		Obtenção e Forma Química Mais Comum
		Mev	%	anos	dias	
^{60}Co	β, γ	1,17 1,33	(100) (100)	5,3		^{59}Co (n, γ) ^{60}Co Cobalto metálico
^{137}Cs	β, γ, CI	0,66	(92)	28		produto de fissão SO_4Cs_2
^{192}Ir	β, γ, CI	0,61 0,60 0,46 0,32 0,31 0,30 0,20	(7) (12) (57) (85) (30) (25) (4)		74	^{191}Ir (n, γ) ^{192}Ir Ir metálico
^{170}Tm	β, γ, CI	0,084 0,052 0,010 0,002	(3) (5) (16) (16)		127	^{169}Tm (n, γ) ^{170}Tm Tm_2O_3
^{110}Ag	β, γ	0,53 0,66 0,68 0,71 0,76 0,88 0,94 1,39 1,52	(42) (99) (70) (16) (21) (78) (42) (25) (15)		270	^{109}Ag (n, γ) ^{110}Ag Ag metálica
^{75}Se	γ, CI	0,07 0,12 0,14 0,26 0,28 0,40	(58) (22) (58) (57) (26) (15)		127	^{74}Se (n, γ) ^{75}Se óxido
^{134}Cs	β, γ	0,57 0,56 0,60 0,79 1,17 1,37	(2) (22) (100) (90) (2) (3)	2,3		^{133}Cs (n, γ) ^{134}Cs Cl Cs
^{182}Ta	β, γ	0,10 0,10 0,20 1,12 1,20 1,22	(70) (50) (40) (30) (40) (30)		115	^{181}Ta (n, γ) ^{182}Ta Metálico

I.2. Interação da Radiação com a Matéria

1. Considerações Preliminares.

Os raios X e os raios gama, radiações eletromagnéticas, são fisicamente equivalentes, mas de origens diferentes. Os raios X são emitidos pelas camadas eletrônicas e os raios gama pelo núcleo atômico.

Quando estas radiações eletromagnéticas interagem com a matéria elas perdem energia pela colisão com os elétrons dos átomos que a formam.

Inicialmente, para facilidade de raciocínio, admite-se que um feixe de radiação eletromagnética, X ou gama, monoenergética, interage com um material de espessura x , contendo n átomos por centímetro cúbico. O número de partículas removidas do feixe original ao atravessar x , por unidade de espessura dx , é proporcional à intensidade do feixe e ao número de átomos por centímetro cúbico do absorvente, isto é;

$$\frac{dl}{dx} = -\sigma \cdot n \cdot l(x) \quad (1)$$

σ é a constante de proporcionalidade e interpreta-se como sendo a probabilidade que tem a radiação eletromagnética de sofrer uma interação (espalhamento ou absorção pura) com um átomo do material absorvedor. Comumente σ é designado seção de choque, por possuir dimensões de área. O sinal negativo indica que há uma redução do feixe de partículas. Integrando-se a equação (1) entre a espessura 0 e x obtém-se a equação:

$$l(x) = l_0 \cdot e^{-\sigma n x} \quad (2)$$

onde I_0 indica a intensidade da radiação antes de interagir com o material de espessura x . O número de átomos por centímetro cúbico n , pode ser expresso como:

$$n = \rho \frac{N_0}{A} \quad (3)$$

onde ρ é a densidade do material. N_0 o número de Avogrado e A o número atômico do material absorvedor. O fator exponencial da equação (2) pode ser escrito como segue.

$$-n x = -\left(\frac{N_0 \sigma}{A}\right) \rho \cdot x = -\frac{N_0 \sigma \rho}{A} \cdot x \quad (4)$$

A equação (4) define os seguintes termos:

σ = coeficiente de absorção atômico, cm^2 ;

$\frac{N_0 \sigma}{A}$ = coeficiente de absorção de massa, cm^2/grama

$\frac{N_0 \sigma}{A} \rho$ = coeficiente de absorção linear, cm^{-1} .

Resultam, assim :

$$\mu = \rho \frac{N_0 \sigma}{A} \text{ coeficiente de absorção linear} \quad (5)$$

$$\mu' = \frac{\mu}{\rho} = \frac{N_0 \sigma}{A} \text{ coeficiente de absorção de massa} \quad (6)$$

A radiação eletromagnética pode interagir com a matéria segundo um dos três processos seguintes : efeito fotolétrico, efeito Compton e formação de pares ou pela soma dos três. Deste modo o coeficiente de absorção atômico total pode ser considerado como sendo:

$$\sigma = \sigma_{\text{fotolétrico}} + \sigma_{\text{Compton}} + \sigma_{\text{pares}} \quad (7)$$

2. Efeito Fotelétrico

O efeito fotelétrico é o fenômeno pelo qual a radiação eletromagnética incidente, X ou gama, animada de energia E_0 , interage com um elétron orbital transferindo-lhe toda a sua energia. Dependendo do valor da energia E_0 , o elétron pode ser deslocado para outra camada ou removido do átomo, produzindo o fenômeno de ionização. Neste caso, a energia cinética do elétron removido é igual a diferença entre a energia da radiação eletromagnética incidente e a energia de ligação do elétron ao átomo. Como a radiação incidente, gama ou X, é geralmente polienergética, a interação pode ocorrer com elétrons de qualquer camada do átomo. Quando a energia da radiação incidente se aproxima da energia de ligação do elétron ao átomo observa-se um aumento brusco no fenômeno de absorção. A energia na qual esta situação ocorre com elétrons da camada K é denominada descontinuidade de absorção K e representa a situação onde a energia do elétron removido da camada K é aproximadamente igual a zero. O aumento da energia da radiação incidente faz com que a absorção se torne inversamente proporcional à terceira potência desta energia ou diretamente proporcional a λ^3 . O coeficiente de absorção fotelétrica de um átomo pode ser considerado como a soma das contribuições da absorção provocada por elétrons das camadas K.L.M. etc. A figura 1 (a) indica uma representação esquemática da interação fotelétrica entre uma radiação gama ou X e um elétron orbital. A figura 1(b) mostra a variação do coeficiente de absorção linear em função do comprimento de onda da

radiação incidente, onde $\lambda_K, \lambda_L, \lambda_M$ referem-se às descontinuidades de absorção.

3. Efeito Compton

Quando a energia da radiação incidente, gama ou X, é superior a que provoca a descontinuidade de absorção K, a principal contribuição para a absorção desta radiação passa a ser o efeito Compton. Na realidade não se verifica uma absorção verdadeira, pois a radiação eletromagnética incidente ao se chocar com elétron orbital sofre apenas um desvio de trajetória (figura 2(a)). Ao contrário do efeito fotoelétrico, a radiação incidente fornece apenas uma fração de sua energia ao elétron que é suficiente para removê-lo da camada eletrônica a qual pertence.

A análise do efeito Compton mostra que a energia da radiação, após a colisão com o elétron, é menor do que sua energia inicial, isto é, ocorre um espalhamento incoerente. Levando em conta as leis de conservação da energia, quantidade de movimento e a teoria ondulatória de Planck, Compton mostrou que a diferença entre a energia da radiação eletromagnética, antes e, depois da colisão, é função apenas do ângulo de espalhamento, não dependendo da natureza do meio espalhador.

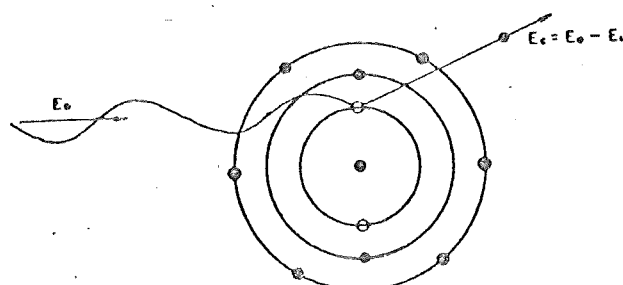
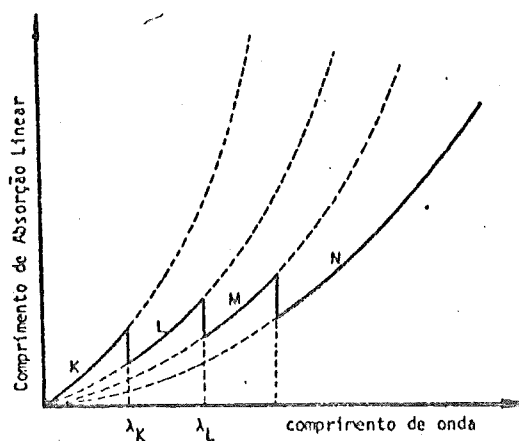


Figura 1(a) - Representação Esquemática da Interação da Radiação Eletromagnética com Um Elétron Orbital (Efeito Fotoelétrico).



Energia da Radiação X.

Figura 1(b) - Variação do Coeficiente de Absorção Linear de Um Material em Função da Energia ou do Comprimento de Onda da Radiação.

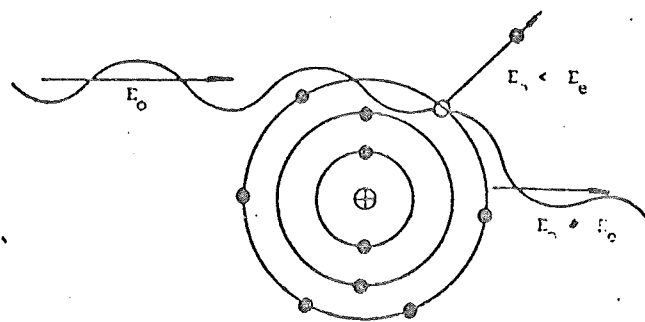
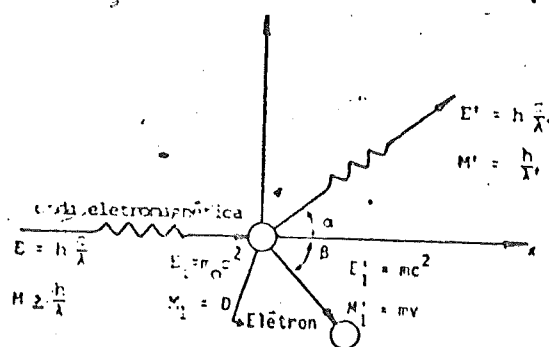


Figura 2(a) - Espalhamento Compton pelo qual a Radiação Eletromagnética Incidente Remove um Elétron Orbital Sofrendo um Desvio em Relação à sua Trajetória Inicial.



Conservação da Energia $\frac{hc}{\lambda} + m_0 c^2 = \frac{hc}{\lambda'} + mc^2$

Conservação da Quantidade de Movimento $\frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'} \cos \alpha + mv \cos \beta$ (eixo x);

$0 = \frac{h}{\lambda'} \sin \alpha - mv \sin \beta$ (eixo y)

$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \alpha)$

Figura 2(b) - Representação Matemática do Espalhamento Compton.

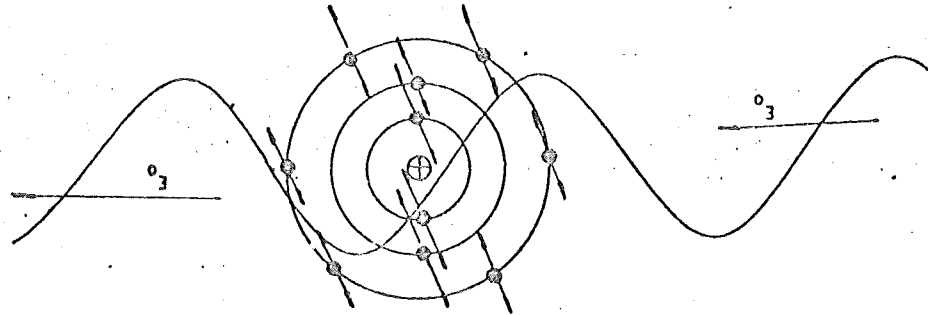


Figura 3(a) - Espalhamento Coerente de uma Radiação Eletromagnética X ou Gama, sem que Haja Perda de Energia.

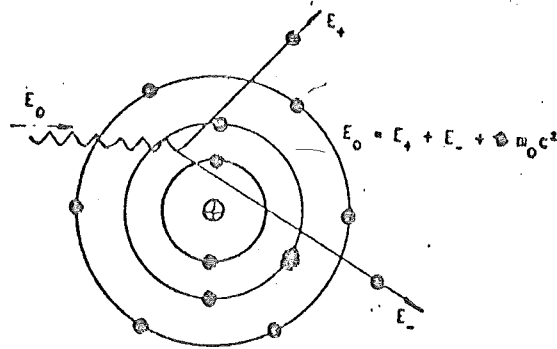


Figura 3(b) - Produção de um Par Elétron - Pôsitron a Partir de uma Radiação Eletromagnética X ou Gama.

A equação Final

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda' = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos \Phi) \quad (8)$$

obtida a partir da representação de dados; da figura 2(b) faz ver que aumentando o ângulo de espalhamento, diminui o valor da diferença entre os comprimentos de onda da radiação incidente antes e depois da colisão.

4 . Espalhamento Coerente

Quando a radiação gama ou X interage com o átomo do material absorvente e não sofre perda de energia, diz-se que houve um espalhamento coerente. Este fenômeno é conhecido com o nome de Processo Rayleigh e se verifica somente quando a energia da radiação incidente é bem inferior à energia de ligação do elétron ao átomo. Quando o átomo absorve a radiação incidente, seus elétrons entram em oscilação e atuam como uma fonte comum provocando a emissão de uma radiação eletromagnética de mesma frequência que a incidente (figura 3(a)). A contribuição deste fenômeno no mecanismo de absorção total não é superior a 20%.

5. Produção de Pares.

Radiações X ou gama de energia superior a 1,02 MeV são absorvidas pela matéria em um processo pelo qual o foton incidente é convertido, dentro do campo elétrico do núcleo, em um par elétron pósitron, (figura 3(b)). Este fenômeno é conhecido com o nome de produção de pares.

I.3. Unidades Usadas em Proteção Radiológica

1. Introdução

Como sabemos, todo o estudo técnico-científico necessita de um sistema de medidas. Portanto ao estudar os efeitos biológicos das radiações e posteriormente a proteção contra as radiações, necessitamos introduzir e esclarecer certas unidades.

Quando a radiação atravessa a matéria para produzir excitação ou ionização do meio, dependendo do meio provocará também efeito fotográfico, biológico de calor e ionização.

A quantidade de energia absorvida no material depende da qualidade e quantidade de radiação incidente.

A seguir, explicamos os diferentes tipos de unidades e seus usos.

2. Definições das Unidades

2.1. Curie (Ci) - unidade para medir a velocidade de desintegração ou atividade de de uma amostra.

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ desintegração/seg.}$$

2.2. Roentgen (R) - é uma unidade especial que mede a capacidade dos raios X ou raios gama em produzir ionização no ar. Um roentgen é a quantidade de radiação capaz de produzir $2,58 \times 10^{-4}$ coulombs de carga elétrica por quilo grama de ar seco à temperatura e pressão normais (0°C e uma atmosfera de pressão).

2.3. Rad - é uma unidade de dose absorvida por um material e é equivalente a 100 ergs de energia absorvida por grama de qualquer substância.

$$\text{Logo } 1 \text{ rad} = 100 \text{ ergs/grama} = 0,01 \text{ joules/kg}$$

2.4. Rem (Roentgen Equivalente Man)

Do ponto de vista biológico os efeitos nos vários tipos de radiações ionizantes não são os mesmos. Isto quer dizer que a mesma dose de radiação em rads, produzidas por diferentes tipos de radiação, não provocam necessariamente os mesmos efeitos biológicos. Por isso se usa o Rem como unidade de dose equivalente. Então o Rem é a unidade de dose equivalente - definido como a dose absorvida em rads multiplicadas pelo fator de qualidade.

$$\text{Rem} = \text{rad} \times \text{FQ}$$

Para o nosso caso (radiações γ , β , raios X) considera-se $\text{FQ} = 1$.

2.5. Dose Absorvida é a quantidade de energia - transferida de qualquer radiação ionizante - por grama de material.

$$D_A = \frac{\Delta E_0}{\Delta m} \quad (\text{rad})$$

2.6. Taxa de Dose Absorvida - é o incremento da dose absorvida na unidade de tempo.

$$\text{TD}_A = \frac{\Delta D_A}{\Delta t} \quad (\text{rad})$$

2.7. Exposição - é a soma de todas as cargas elétricas produzidas por íons de mesmo sinal em certo volume de ar de massa m.

$$X = \Delta Q / \Delta t \quad (\text{roentgen})$$

2.8. Taxa de Exposição - é o quociente da exposição por unidade de tempo.

$$X = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (\text{R/s ou R/h})$$

2.9. Constante Especifica da Radiação Gama é o produto do quociente do quadrado da distância (fonte-operador) pela atividade por taxa de exposição de um radionuclídeo.

$$\Gamma = \frac{\ell^2}{A} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{Ci}^{-1} \cdot \text{R} \cdot \text{h}^{-1})$$

ℓ - distância fonte -operador

A - atividade

Δx - exposição Δt - tempo

2.10. Relação entre R e Rad

$$1 \text{ R} \cong 0,93 \text{ rad} \cong 1 \text{ rad}$$

Pelas definições espostas no que diz respeito a proteção radiológica, para fins industriais, tanto podemos usar o termo Roentgen (R), ou Rem.

I.4. Riscos e Danos da Irradiação Excessiva

1. Processos físicos e químicos

O caráter nocivo da ação das radiações sobre os organismos vivos, provêm dos fenomenos físicos de ionização e excitação dos átomos, resultantes da troca de energia entre as radiações alfa, beta, gama e os raios X com a matéria. Essa ação física, que se desenvolve em um tempo curto, (10^{-1} segundos) é seguida

de fenômenos químicos (ruptura de ligação, formação de radicais livres) que determinam o aparecimento de fenômenos bioquímicos e fisiológicos,

2. Reações do Organismo

Após um lapso de tempo muito variável, os efeitos da radiação aparecem sob a forma de lesões observáveis, em nível celular ou no próprio organismo. Algumas são alterações funcionais enquanto outras são morfológicas.

3. Alterações Funcionais

As alterações funcionais manifestam-se por diminuição de atividade da substância viva: menor secreção por glândula, perda de propriedades de contração muscular, esclerose pelo tecido conjuntivo. As dores são relativamente pouco elevadas.

As alterações morfológicas atingem as células fazendo com que o protoplasma, o núcleo e os diversos componentes do citoplasma possam sofrer modificações ou provocando a morte imediata ou posterior da célula. Sob a influência das radiações ionizantes as proteínas transformam-se em substâncias estranhas ao organismo humano, na maioria das vezes tóxicas. A água, que constitui 3/4 do organismo, decompõe-se formando íons positivos, negativos e radicais ativos de grande poder de oxidação que destroem as proteínas.

4. Alterações Celulares

A ação das radiações ionizantes inibe os processos de síntese que precedem normalmente a divisão, impedindo a reprodução das células e a sua sobrevivência.

5. Efeitos Biológicos

Os efeitos biológicos das radiações dependem apenas da dose recebida, ou seja, da densidade de ionização que ocorre no tecido irradiado, independente do tipo de radiação. Em decorrência dos diferentes poderes de penetração, a ionização causada é de densidade e distribuição diferentes, provocando, em consequência, efeitos diversos.

6. Classificação dos Efeitos Biológicos

Os efeitos biológicos, em sua grande maioria, podem ser divididos em somáticos e genéticos. Somáticos são os relacionados com o indivíduo. Genéticos são os que podem alterar as gerações futuras dos indivíduos. Em sua maioria, os efeitos biológicos podem ser considerados lineares e limiares, isto é, os que são linearmente proporcionais a dose recebida e os que só aparecem após uma certa dose de radiação. Os efeitos genéticos são lineares e a maior parte dos somáticos limiares.

7. Natureza dos Efeitos

Os efeitos biológicos podem ser de natureza extremamente variada, de acordo com o órgão irradiado, a dose recebida, as condições de irradiação etc.; eles são essencialmente, p_o limorfos. Além disso, eles podem ser provo_{ca}dos por outras causas diferentes da radia_ção. Não são efeitos específicos. Esse fato é de grande importancia para o médico que - diagnostica a origem de uma doença proveni_{en}te de efeito da radiação.

8. Tempo de Latência

Entre o instante de irradiação do tecido hu_{ma}no e o aparecimento das perturbações, pas_{sa}-se um certo tempo de latência, variável no decorrer do qual se desenrolam os fenôme_{no}s físicos químicos e bioquímicos que se seguem ao processo de irradiação. Quando se recebe altíssimas doses de radiação, esse - tempo de latência pode se reduzir a alguns minutos ou horas, no que se relaciona ao - aparecimento das primeiras perturbações.

A morte pode ocorrer após alguns dias ou se_{ma}nas.

As perturbações que seguem o recebimento de "doses médias" ou as "irradiações crônicas" possuem tempo de latência longos; vários me_{se}s para a anemia; anos para a leucemia; de

zena de anos para a indução de cânceres. As estatísticas sobre a população irradiada de Hiroshima mostram uma frequência anormal de leucemia entre o 6º a 12º ano, depois das explosões provocadas por bombas atômicas.

9. Reversibilidade

Em determinados casos, os efeitos biológicos da irradiação apresentam caráter de reversibilidade, isto é, as modificações funcionais são geralmente temporárias, produzindo-se uma restauração quase completa. Na escala celular, esse fato está ligado a propriedade que tem a célula de reformar os edifícios moleculares que entram em sua estrutura. Alguns desses edifícios são por demais complexos e especializados para a célula sintetizá-lo novamente. Seu alcance determina efeitos irreversíveis. Correspondem geralmente a modificações de estrutura.

NO caso do organismo, algumas perturbações são totalmente reversíveis. Uma irradiação total pode provocar uma anemia e mesmo com a destruição de células as que foram poupadas repovoam o órgão formador do sangue, estabelecendo-se uma restauração ao nível do organismo.

Muitas lesões são apenas suscetíveis de restauração parcial. Outras, como as necroses e os cânceres, são totalmente irreversíveis.

10. Transmissão Celular

A maioria das perturbações provocadas no organismo humano, em decorrência da ação nociva da irradiação, afetam as células e o organismo mas não se transmitem para as células e organismos produzidos por divisão ou reprodução sexuada. Entretanto, deve ser considerado como particularmente grave alguns efeitos da estrutura celular, transmissíveis de célula a célula e que se manifestam pela anarquia da função reprodutora (afecções cancerosas) e, dos caracteres hereditários, levados pelas células reprodutoras que provocam anomalias na descendência proveniente do organismo irradiado (efeitos genéticos).

11. Relação entre Dose de Radiação e Efeito Biológico.

Para que determinados efeitos biológicos apareçam, é necessário receber uma dose superior a certo limite. Assim, um eritema (vascularização anormal da pele), só se manifesta sobre a palma da mão após doses variáveis, de um indivíduo para outro, mas que situam-se sempre acima de 350 Rem.

A irradiação total do organismo provoca morte, levando em conta uma determinada probabilidade, quando a dose recebida é superior a 300 Rem.

Para se provocar uma anemia, por diminuição do número de glóbulos vermelhos no sangue, o indivíduo deve receber uma dose de radiação superior a 100 Rem.

A existência de um limiar não significa ausência de ação nociva, na escala celular, quando a dose é inferior a esse limite. Mesmo com doses baixas existe a ionização do tecido humano, com as consequências químicas e bioquímicas.

12. Doses Baixas e Efeitos Biológicos

É praticamente impossível obter informações válidas para correlacionar as baixas doses de radiação recebidas pelas pessoas com os efeitos biológicos. Todos os malefícios que as radiações produzem no organismo, podem ser provocados por outros agentes não radioativos, impedindo que estudos estatísticos possam conduzir a resultados concretos. Entretanto, quando se estabelece uma curva que representa a frequência do efeito em função de altas doses recebidas, pode se estabelecer uma extrapolação para o caso das baixas doses.

Quando essa curva é uma reta, o fato da extrapolação cortar o eixo das abscissas (doses) na origem ou em um ponto qualquer de valor positivo, indicará ausência ou presença de dose limiar, respectivamente.

13. Doses Limiares

Admite-se que os efeitos genéticos são produzidos sem a presença de uma dose limiar. As opiniões são mais prudentes no que se refere a indução de leucemias ou de cânceres pelas radiações, pois atualmente, nenhuma observação permite afirmar com certeza, a existência ou ausência de um limiar para esses efeitos. Por outro lado, é de interesse saber se determinada lesão é provocada por efeito de radiação abaixo de determinada dose recebida. O médico chamado a se pronunciar sobre as relações causa-efeito não pode atribuí-la as radiações exceto nos casos em que a dose limiar foi atingida. Por exemplo, lesões cutâneas não podem ser atribuídas a uma dose de 20 Rem, administrada a pele. Ao contrário, quando a dose administrada ao organismo for superior a limiar e nenhuma outra causa puder ser razoavelmente suposta, então se poderá atribuir à lesão a ação das radiações ionizantes.

14. Efeitos Somáticos

Os efeitos somáticos podem se apresentar sob várias formas porque as radiações ionizantes podem atingir todos os órgãos e todas as funções do corpo humano. Alguns deles tornam-se mais críticos em decorrência da radiosensibilidade dos tecidos lesados, como por exemplo, os órgãos formadores de sangue, os pulmões, a pele, as gônadas, os tecidos ósseos etc.

15. Efeitos da Radiação sobre os Órgãos Formadores do Sangue

Considerando-se a parte uma categoria bem determinada de glóbulos brancos (linfócitos) o sangue circulante pelo organismo não é sensível a ação das radiações ionizantes. Ao contrário, os órgãos formadores do sangue são atingidos facilmente, por irradiação total ou por contaminação interna. Os órgãos considerados formadores de sangue são: a medula óssea, os gânglios linfáticos, o baço e, no embrião, o fígado, durante determinado período da vida fetal. Esses órgãos podem ser atingidos de duas maneiras, a saber:

- 1- destruição das células;
- 2- alterações no ritmo da divisão celular.

No primeiro caso segue-se uma diminuição temporária ou definitiva da formação dos glóbulos que deveriam passar regularmente para o

X

sangue circulante. Como resultado, aparece a leucopenia (diminuição do número de glóbulos brancos) e a anemia (diminuição do número de glóbulos vermelhos). No segundo caso a consequência imediata é a proliferação anormal de glóbulos brancos produzindo a leucemia.

16. Efeitos da Radiação na Pele

Ao nível da pele as radiações ionizantes só podem provocar modificações funcionais simples, como por exemplo, os eritemas. As modificações estruturais, quando aparecem, atingem a epiderme ou a derme, de modo semelhante ao provocado por queimaduras térmicas. Apenas, no caso de irradiação, essas lesões só se manifestam após certo tempo de latência. (Algumas semanas ou meses). Frequentemente ocorrem necroses comparáveis as produzidas no caso de queimaduras por ácidos. Nenhuma cicatrização será possível antes da eliminação total dos tecidos mortos. As vezes surgem cânceres cutâneos sobre a superfície da pele irradiada anteriormente, mas os períodos de latência são muito longos, geralmente da ordem de várias dezenas de anos.

17. Efeitos da Radiação nos Pulmões

As radiações ionizantes, causam danos nos tecidos alveolares, produzindo inflamações que

podem conduzir à escleroses. Às vezes aparecem, a longo prazo, cânceres, cuja origem radioativa é bem caracterizada. Por exemplo, as explorações pioneiras de urânio nas minas de Bohemia causaram numerosas vítimas de câncer no pulmão.

18. Efeitos da Radiação nos Tecidos Ósseos

Esses tecidos, quando irradiados por altas doses, podem apresentar necroses e às vezes cânceres (osteosarcomas). Registros de acidentes com radiação que afetaram os tecidos ósseos relacionam-se a operários encarregados de manipular pinturas fluorescentes, à base de radium, no início dessa atividade industrial.

19. Absorção Instantânea de Altas Doses de Radiação pelo Organismo Humano

O conjunto de sintomas sentidos por uma pessoa que recebeu alta dose de radiação, em curto intervalo de tempo, constitui o síndrome agudo de irradiação. As alterações dos tecidos formadores do sangue, das mucosas do tubo digestivo e das vias pulmonares podem provocar a morte. O mal se desenvolve por etapas: no primeiro dia surgem perturbações gerais (náuseas, fadiga, prostração, etc). Segue-se um período de aparente boa saúde, que

X

pode durar várias semanas precedendo a fase crítica. A ação nociva exercida sobre órgãos hematopoiéticos provocam uma leucopenia deixando o organismo sem defesa, ao mesmo tempo em que as lesões das mucosas provocam verdadeira invasão microbiana. A diminuição do número de plaquetas favorece a síndrome hemorrágica. A isso juntam-se as perturbações graves do metabolismo e o aumento das células mortas que o organismo deve eliminar.

20. Absorção de Baixas Doses de Radiação pelo Organismo Humano

Quando a dose absorvida é lenta e progressiva, a síndrome descrita anteriormente, não se manifesta. Outros fenômenos complexos conduzem a um envelhecimento precoce do organismo, que se manifesta, estatisticamente, por uma diminuição significativa da duração média da vida da pessoa atingida. No caso de doses baixas e contínuas esse fenômeno pode ser mascarado por flutuações estatísticas.

21. Efeitos Genéticos da Radiação

Admite-se que certas afecções ou taras, que podem surgir na descendência de um indivíduo estejam ligadas as modificações materiais que ocorrem principalmente nos cromossomos das células reprodutoras (gametas). A maioria

dos caracteres hereditários, transmitidos a um descendente, provêm dos cromossomos paternos e maternos, juntados em partes iguais. Esses cromossomos possuem gens com características bem determinadas e assim, nos casos mais simples, cada caráter do descendente é controlado, principalmente por dois gens, um do pai e outro da mãe. Causas diversas, químicas e físicas (entre elas a radiação ionizante) podem produzir rupturas ou remanejamentos cromossômicos e mutações genéticas.

A probabilidade de ocorrência de efeitos genéticos da radiação nos seres humanos aumenta linearmente com a dose recebida pelo organismo. Assim, pode-se tomar mínimo esse risco, fazendo-se um valor de dose bem baixa, para limite derivado do trabalho mensal, ao pessoal que normalmente manuseia material radioativo.

I.5. Níveis de Radiação de Materiais Licenciados

De acordo com as Normas Básicas de Proteção Radiológica (Resolução CNEN - 6/73 publicado D.O. nº 180, seção I - Parte II).

Resolve aprovar:

1. Notificação, registro e licenciamento
 - 1.1. As atividades e suas alterações previstas no paragrafo 2.1. (norma apli

cada à produção, processamento, manuseio, uso, armazenamento, transporte, eliminação de material radioativo natural ou artificial e ao uso e operação de outras fontes de radiação sob a jurisdição da Lei nº 4118 de 27 de agosto de 1962) serão procedidas de - notificação, registro e ou licenciamento, excetuando-se o exposto no paragrafo seguinte:

1.2. A CNEN poderá dispensar as exigências do paragrafo acima, para as seguintes operações:

a) Operações com substâncias radioativas, cuja atividade total seja inferior à: (para o mesmo caso):

Isótopo	Atividade μCi
^{60}Co	10
^{137}Cs	10
^{192}Ir	10
^{170}Tm	1
^{110}Ag	10
^{75}Se	10
^{134}Cs	100
^{182}Ta	10

b) Operações com substâncias radioativas cuja concentração não exceda 0,002 μCi/g ou substâncias radioativas naturais solidas em concentração que não exceda 0,01 μCi/g;

- c) O uso de aparelho aprovado pela CNEN desde que a taxa de dose em qualquer ponto externo situado a uma distância de 0,1 metro da superfície do mesmo não exceda 0,1 mrem/h, com proteção efetiva contra escape de quaisquer substâncias radioativas presentes;
- d) O uso de equipamento em que eletrons são acelerados a uma energia que não exceda 5 kev;
- e) O uso de televisores nos quais a taxa de dose em qualquer ponto facilmente acessível a 5 cm da superfície do aparelho não exceda 0,5 mrem/hora, nas condições normais de utilização.

I.6. Métodos de Controle da Irradiação de Pessoas

I.6.1. Tempo de Trabalho

I.6.2. Distância Fonte-Operador

Obs. Os itens I.6.1. e I.6.2. serão dados em aula sob a forma de problemas.

I.6.3. Blindagens

Define-se meia espessura como sendo a espessura necessária para reduzir determinada taxa de dose à metade do seu valor inicial.

Os valores aproximados que correlacionam o fator de redução de dose k , com o número n de meias espessuras, acham-se representados na tabela 2.

TABELA 2

Número de Meias Espessuras Para Cálculo de Blindagens

Fator de Redução k	Número de Meias-Espessuras	Fator de Redução k	Número de Meias-Espessuras
2	1	64	6
4	2	125	7
8	3	250	8
16	4	500	9
32	5	1000	10

Para valores superiores a 1000, essa regularidade se repete. Por exemplo, para $k=2000=2 \times 1000$ o número de meias espessuras será:

$$n = 1 + 10 = 11$$

Para $k=500\ 000=500 \times 1000$, $n=9+10=19$

Para $k=1000\ 000=1000 \times 1000$, $n=10+10=20$

O número de meias espessuras n pode ser calculado pela expressão genérica,

$$2^n = k$$

Exemplo. Supondo-se que seja necessário reduzir 30.000 vezes a intensidade

da radiação gama, emitida por uma fonte de ^{60}Co , qual deve ser a espessura da blindagem de chumbo para tal propósito?

$$k = 30\ 000 = 30 \times 1000$$

$$n = 5 + 10 = 15$$

Como a meia espessura do chumbo, para energia do ^{60}Co é 1,3 cm, a blindagem será:

$$15 \times 1,3 = 19,5 \text{ cm}$$

A tabela 3 indica o valor das meias-espessuras para as fontes da gamagrafia mais utilizadas na indústria.

TABELA 3

Valores das Meias-Espessuras para Chumbo e Concreto Utilizando Diversas Fontes de Gamagrafia

Natureza da Fonte	Energia Máxima keV	Meia Espessura em Milim.	
		CHUMBO	CONCRETO
^{170}Tm	84	0,25	8
^{192}Ir	600	5,3	36
^{137}Cs	660	5,5	34
^{60}Co	1330	13,0	55

I.7. Procedimento de Emergência

Quando uma fonte radioativa se desprender acidentalmente do cabo de comando, durante um ensaio radiográfico deve-se proceder da maneira seguinte:

1. isolar a área onde está a fonte, utilizando-se dos instrumentos de levantamento radiométrico;
2. planejar todas as etapas da operação de recuperação, levando em conta as ferramentas disponíveis para o manuseio do material radioativo, a dose já recebida pelos operadores, o tempo provável que será gasto na operação de recuperação, a blindagem para armazenamento, o rodízio dos técnicos e as implicações locais;
3. dependendo da atividade envolvida, não se deve aproximar muito o instrumento de levantamento radiométrico (no caso de se usar contadores tipo Geiger-Muller) da fonte, para evitar a saturação e indicação falsa de exposição a radiação. Observar atentamente as leituras do instrumento de levantamento radiométrico;
4. providenciar para que as pessoas envolvidas na recuperação da fonte, utilizem filmes dosimétricos de pulso;
5. após a recuperação da fonte, fazer um relatório escrito e comunicar imediatamente com o Supervisor da Segurança Radiológica, que por sua vez, relatará o acontecido a CNEN;
6. dependendo da dose recebida pelos participantes (caso ela seja superior a duas vezes o máximo a duas vezes o máximo anual permissível), submetê-los a controle médico especial;

7. transcrever para as "fichas dosimétricas pessoais", todas as etapas e todos os fatos ocorridos durante a recuperação da fonte, levando em conta a participação de cada operador;
8. para verificar se a fonte se desprende ou não do cabo de comando, durante um ensaio radiográfico e ficou presa no interior desse cabo de comando, monitorar o irradiador, sempre em um mesmo local, toda vez que a fonte for recolhida e comparar as exposições registradas pelo instrumento de levantamento radiométrico. Toda vez que a fonte voltar para sua correta posição no interior do irradiador, o instrumento de levantamento radiométrico registrará uma indicação constante, desprezando-se o efeito da influência do decaimento radioativo.

II. INSTRUMENTOS PARA LEVANTAMENTO RADIOMÉTRICO

Materiais radioativos são usados em larga escala, tornando-se necessário medidas da radiação nas mais variadas circunstâncias. Grande parte destas necessidades são os levantamentos e monitorações de campos de radiação para avaliar os riscos pessoais. Não é fácil medir a dose ou a energia absorvida no tecido, a qual resulta de uma exposição de uma dada quantidade de radiação. Entretanto, pode-se medir a energia cedida para materiais diferentes do tecido e com ajuda dos limites permissíveis, calcular a dose. A necessidade de tais medidas trouxe o desenvolvimento do instrumental.

A maior parte do instrumental em Proteção Radiológica é portátil, operados à bateria e são usados para medir radiação ou contaminação radioativa necessária onde os indivíduos podem ser expostos. Dosímetro de bolso e câmeras de bolso são feitos para medir a exposição recebida pela pessoa. O uso do termo dosímetro, pode originar confusão, pois estes instrumentos geralmente medem exposição e não dose.

Os instrumentos e os dosímetros são considerados medidores de exposição e o termo dose é reservado para medidas que dão essencialmente a energia cedida ao tecido.

Existe no mercado, uma centena de instrumentos à disposição e constantemente estão sendo desenvolvidos novos instrumentos (A Comissão de Energia Atômica dos Estados Unidos tem um catálogo de instrumentos de radiação que provavelmente é a mais completa lista de componentes, instrumentos e acessórios, mas infelizmente não está disponível ao público em geral). Muitos dos instrumentos tem a mesma finalidade, mas cada um tem uma característica própria.

Embora todos estes instrumentos usem os princípios básicos de medida de radiação, dosimetria e circuito eletrônico, existe a preferência pessoal por um ou outro instrumento.

II.1. Características Gerais

Peso leve e tamanho pequeno são essenciais para os instrumentos usados nos levantamentos, especialmente se eles são transportados por um tempo longo. A maioria deles tem o peso nominal 2,5 - 5,0 Kg. Dosímetros e câmeras de bolso são

pequenos e leves, geralmente do tamanho de uma caneta tinteiro.

Devido serem portáteis, devem ser física e eletricamente resistentes, capazes de sofrerem choques e vibrações e permanecerem com funcionamento assegurado.

A vida da bateria deve ser tão longa quanto possível e o circuito relativamente insensível à mudanças de tensão.

Quando existe uma escolha é preferível um circuito que "Fails Safe", isto é, um circuito que dá uma super estimação da intensidade de radiação quando a bateria está fraca. Característica "Fail Fast" é também útil em algumas aplicações onde é melhor para o instrumento um bloqueio completo de operação do que dar leituras suspeitas. Um modo de obter esta característica é o uso de baterias de filamento de mercúrio que mantêm a voltagem relativamente constante durante seu período de vida útil e depois cai rapidamente.

O efeito da temperatura, unidade e mudança de pressão no ar, devem ser minimizados. As técnicas pelas quais estes efeitos podem ser minimizados inclui o uso de câmeras seladas, agentes desidratantes e componentes especiais para os circuitos.

II.1.1. Precisão Prática

Sob condições restritas de laboratório as quais geralmente são reproduzidas, rapidamente é alcançada uma precisão de poucos por cento, e de fato, muitos instrumentos de levantamento são usados como dispositivos de laboratório. Mas não se encontra a mesma precisão, sob uma ampla variedade de condições do campo de radiação, sem aumento do custo e diminuição da simplicidade do instrumento. Uma precisão de 10% seria o ideal para projetos destes instrumentos e 25% de precisão é geralmente aceito. Os fabricantes dos instrumentos, fornecem sua precisão, mas antes de colocá-los em uso, devem ser verificados. Quando a precisão é pobre, deve-se introduzir fatores de segurança nas exposições permitidas.

II.1.2. Semelhanças dos Circuitos

Todo o instrumental e dosímetros de bolso, dependem da produção de ionização provocada pela radiação que está sendo medida. Partículas carregadas produzem ionização direta e as não carregadas por processos indiretos. O detetor deve ser escolhido de acordo com o tipo e intensidade da radiação a ser detetada, mas ele também deve ser sensível a outros tipos de radiação.

Em princípio, não há diferença nos circuitos usados para medir uma dada carga elétrica, corrente ou pulso produzido pela radiação inicial.

II.2. Instrumentos e Dosímetros para Raios X e γ

II.2.1. Tipo Câmera de Ionização

Se o roentgen é definido como a medida de carga elétrica liberada num certo volume padrão de ar, a câmera de ionização é o tipo de instrumento que dá a medida mais simplificada. O instrumento ideal é aquele que consiste de uma câmera com volume conhecido, paredes equivalente ao ar e um sistema de medida de carga ou corrente que dá a leitura diretamente em roentgen ou roentgen por unidade de tempo.

Ná construção das câmeras entram muitos fatores que impedem-nas de serem ideais, tais como: uso de materiais que não são equivalentes ao ar, eletrodos metálicos, involucros que absorvem radiações de baixa energia, etc.

Atualmente estão sendo empregados certos tipos de plásticos, tais como lucite ou buquelite que melhoram a construção das câmeras.

II.2.1.1. Dosímetros e Câmeras de Bolso

Dosímetro de bolso tem o tamanho de uma caneta tinteiro e consiste de uma

câmera de ionização com volume coletor de 2cm^3 , um pequeno eletroscópio de fibras de quartzo em que uma delas é fixa e é o próprio coletor, e um pequeno sistema de lentes.

Antes de colocar do dosímetro em uso, deve zerá-lo, isto é, com auxílio de uma bateria especial, carrega-se as lâminas do eletroscópio de modo que a fibra móvel apareça sobre o zero de escala.

Quando a radiação produz ions na câmara, aqueles de sinais contrários aos que se encontram no eletroscópio chegam até eles e há uma neutralização de cargas, fazendo com que as lâminas se fechem. Como somente uma delas é móvel, este vai se deslocando sobre a escala. Esta escala geralmente está calibrada em roentgen ou miliroentgen de exposição total. Estas escalas geralmente são de 100 a 200 mr. Um dosímetro que tem 2 cm^3 de volume e uma capacidade de cerca de $3\mu\text{f}$, a uma exposição de 200 mr implica uma coleção de carga de aproximadamente 10^{-10} coulomb.

A resistência do elétrodo isolante e do capacitor, se usado devem ser extremamente altas para evitar que fugas de carga produzem uma leitura.

A câmera de bolso consiste também de uma câmera de ionização, mas neste, a leitura é feita num dispositivo - preparado para leitura de cargas, o qual contém um eletroscópio e uma fonte de voltagem.

Essencialmente esta câmara consiste em um determinado volume de ar com um coletor imerso neste volume.

II.2.1.1.1. Respostas.

Existem instrumentos - que dão a resposta linear com a intensidade de exposição e outros que dão resposta não linear. Então tem-se aparelhos com escalas de leituras lineares e aparelhos com escalas de leitura logarítmicas; estes geralmente tem respostas lentas ã baixas intensidades de radiação e respostas - rápidas ã altas intensidades.

II.2.1.1.2. Sensibilidade quanto ã energia

Para raios γ ou X com energia de 250 KeV a 2 MeV, a maioria dos instrumentos tem respostas concordantes, mas abaixo de 250 KeV ocorrem diferenças entre - instrumentos do mesmo tipo, quando construídos por diferentes fabricantes.

II.2.2. Dosímetros de Filme

Os dosímetros mais utilizados são os chamados dosímetros de filme (film badge). Na Figura 3.1. é mostrado um destes dosímetros, com as diferentes partes que o constituem.

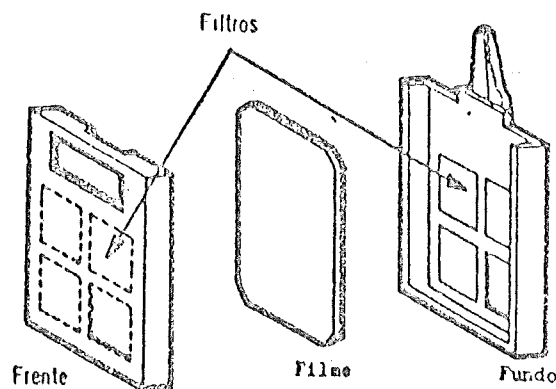


Figura 3.1. Esquema de um dosímetro de filme.

Como se observa na figura, este dosímetro é constituído por uma pequena placa de filme coberta com um material muito fino para evitar a ação da luz sobre a mesma. O filme é colocado dentro de uma armação que possui uma pequena janela. Além disso, uma parte do filme fica coberta por filtros de diferentes materiais. O material que é utilizado como filtro depende da natureza das radiações a que se expõem a pessoa que trabalha com as mesmas. Geralmente, são utilizados quatro tipos de filtros: cádmio, alumínio, cobre e chumbo.

Pelo escurecimento que é observado no filme, depois da sua revelação, é

possível determinar a exposição não só a raios X e γ , mas também aos outros tipos de radiação, pois o grau de escurecimento é uma medida da exposição recebida. Entretanto, outros fatores, tais como o calor e as substâncias químicas, podem provocar o escurecimento do filme. Se por qualquer motivo se suspeita que isto - ocorreu, deve-se notificar o serviço ou pessoal encarregado da segurança.

II.2.3.

Tipo Contador Geiger

Um instrumento de medidas, simples, sensível, é obtido com um contador Geiger. Os pulsos vindos do contador com uma pequena amplificação, já são suficientes para operar um rate meter de contagens. São encontrados vários tipos e tamanhos, alguns medindo o background e outros medindo níveis maiores que 10 r/h. Os contadores contam eventos individuais - que não são facilmente interpretados em unidades de roentgens.

Este tipo de instrumento geralmente é empregado como detetor para intensidade de radiação entre o background e os níveis facilmente mensuráveis pelas câmeras de ionização.

Um contador de aproximadamente 2 cm de diâmetro por 150 cm de comprimento com paredes de alumínio ou vidro de 30 mg/cm², dá alcances de 0,2, 2,0 e 20 mr/h plena escala.

Contadores que usam gás orgânico podem contar número de eventos da ordem de 10^8 sendo seu uso limitado, para altas intensidades de radiação. Contadores usando balogênio dão pulsos vinte a trinta vezes maiores que aqueles que usam gás orgânico.

II.3. Instrumentos e Dosímetros para Raios β

II.3.1. Tipo Ionização

Todos instrumentos para detecção de raios γ são aceitáveis para detecção de raios β desde que estes atinjam a região sensível do detetor. Um instrumento ou dosímetro para raios β deve medir energias desde 0,1 MeV até vários MeV. Para cobrir um intervalo de energia tão grande quanto possível são usadas câmeras com paredes delgadas ou então câmeras com janelas.

II.3.2. Tipo Contador Geiger

Um típico contador Geiger para medidas de β é construído com paredes de vidro ou alumínio de 30 mg/cm^2 de espessura e permitem detectar raios β de pouco menos que 0.2 MeV. Um contador com uma janela de 1 mg/cm^2 de espessura pode ser empregado para detectar partículas beta de 25 KeV. Em ambos os casos deve-se usar um protetor de $1,5 \text{ g/cm}^2$ de espessura para discriminar a radiação entre beta e gama.

Sendo essencialmente 100% a eficiência para aquelas partículas que chegam ao volume sensível, o contador Geiger é um dispositivo extremamente sensível para a detecção da presença de materiais com atividade beta.

II.3.3. Tipo Cintilação

Qualquer "fosforo" que é eficiente para medida de radiação gama é eficiente para radiação beta.

A mínima energia a ser detectada do tipo de circuito e da espessura da janela.

Existe um discriminador que seleciona os tamanhos de pulsos que representem a mínima quantidade de energia dos raios beta dissipada no "fósforo".

II.4. Instrumentos e Dosímetros para Partículas Alfa

II.4.1. Tipo Ionização

Embora a maioria das partículas alfa tenham energia de vários MeV, são difíceis de medir devido seu pequeno alcance. Dosímetros pessoais para partículas alfa não tem interesse nenhum, pois elas não penetram na camada externa da pele. Um instrumento com janela de pequena espessura ($0,5 \text{ mg/cm}^2$) e separação de 1 cm entre a superfície ativa e a janela, no mínimo perderia 50% da energia no lado externo da câmara.

Portanto, os instrumentos como dosímetro do tipo câmara de ionização não são satisfatórios.

II.4.2. Tipo Contador Geiger

Pequenos contadores com janela de mica de 1 a 2 mg/cm^2 de espessura são detectores sensíveis para monitoração de radiação alfa. O limite superior da sensibilidade é determinado pelo background de raios gama que dá contagem média de 50 a 100 c.p.m. para uma intensidade de $0,02 \text{ mr/h}$ de raios gama.

Devido à pequena área de janela ($2 \text{ a } 4 \text{ cm}^2$) seu uso é restrito para a monitorações de fontes e de pequenas áreas.

II.4.3. Tipo Proporcional

A principal característica deste tipo de instrumento é a possível discriminação de α contra β e γ . Existe uma variedade de contadores deste

tipo, mas os mais comuns são: O contador de grande área que tipicamente tem 8cm de largura a 15 cm de comprimento; e a sonda tipo caneta que tem uma janela de 1 cm de diâmetro a 10 cm de comprimento. A espessura das janelas é da ordem de 2 mg/cm^2 . Quando a voltagem está acima de 2000 volts aparece a ação proporcional, isto é, partículas α dão pulsos bem mais altos que partículas β .

A distribuição do tamanho dos pulsos permite o uso de discriminador como controle de sensibilidade enquanto mantém boa discriminação contra os pulsos β .

Nas práticas, normalmente se usa um fator de conversão de contagens por minuto para desintegrações por minuto que depende da geometria de contagem, absorção na janela e nível de discriminação.

II.4.4. Tipo Cintilação

Qualquer dos "fósforos" usados para β e γ servem para detectar partículas α . Entretanto, há vantagens em se empregar materiais como sulfeto de zinco ou sulfeto de cádmio para medida de α , devido à excelente eficiência de contagem para partículas pesadas ionizantes e com pequena resposta para partículas β .

II.5. Instrumentos e Dosímetros para Neutrons

Devido os neutrons não serem diretamente ionizantes, são usados processos intermediários que resultem em ionização, para detecção de neutrons. A secção de choque para reação de neutrons depende de energia do neutron. Isto complica a interpretação das medidas feitas com instrumentos simples e torna difícil a contração de um instrumento ideal que dê respostas aproximadamente proporcional aos dados biológicos.

II.5.1. Tipo Ionização

A maioria dos métodos para determinação de dose de neutrons é por meio das câmeras tecido-equivalente. As câmeras são construídas com um plástico equivalente ao tecido e dão suficiente precisão para a maioria dos propósitos. Infelizmente estas câmeras não são corretas para as relativas efetividades biológicas de neutrons de várias energias. Os instrumentos atuais medem exposição ou dose de neutrons de apenas um restrito intervalo de energia.

Estas câmeras são também sensíveis à radiação. Então quando se quer apenas do de neutrons de ve-se fazer uma medida com esta câmera e outra medida com uma câmera sensível somente a raios e depois por diferença sabe-se a dose devida a neutrons.

II.5.1.1. Câmara de Boro

Nas câmaras de ionização utilizando BF_3 com o gás de preenchimento, o método de corrente balanceado pode ser empregado para detecção de neutrons térmicos e neutrons lentos através da ionização provocada pela reação (n, α) do ^{10}B . Estas câmaras conseguem medir fluxos de neutrons térmicos de 10 a mais de 10^4 n/cm²-seg.

Uma pequena câmara forrada com boro e preenchida de ar é usada em detectores de neutrons lentos, em câmaras e dosímetros de bolso. São de tamanho semelhantes aqueles empregados para raios .

Também usam os mesmos dispositivos para carga.

Tais dispositivos são pouco sensíveis à radiação γ . Para se ter uma deflexão de meia escala é necessário 5 r de raios γ ao passo que uma exposição de 8 horas ao fluxo de tolerância de neutrons térmicos ($1750n/cm^2-se.$) dá a mesma deflexão.

A resposta do instrumento que usa ^{10}B depende somente da variação da secção de choque da reação (n,α) em função da energia dos neutrons, desde que a absorção de neutrons nas paredes do detector seja desprezível.

II.5.2. Tipo Proporcional

Contadores proporcionais forrados de boro ou com BF_3 proporcionam detectores sensíveis para medidas de neutrons e pouco sensíveis para radiação γ . Geralmente têm de 1 a 2 polegadas de diâmetro e de 5 a 18 polegadas de comprimento com paredes de 1/32 a 1/16 polegadas que são de aço ou metal. A voltagem de operação geralmente é da ordem de 1000 volts.

Envolvendo o contador com um moderador, permite ao instrumento responder também a neutrons rápidos. Cobrindo o contador com uma camada de polietileno de 1 polegada de espessura permite medir uma fração de neutrons de uma fonte de Ra-Be. A figura 3.2. mostra a sensibilidade de sonda em função da energia dos neutrons.

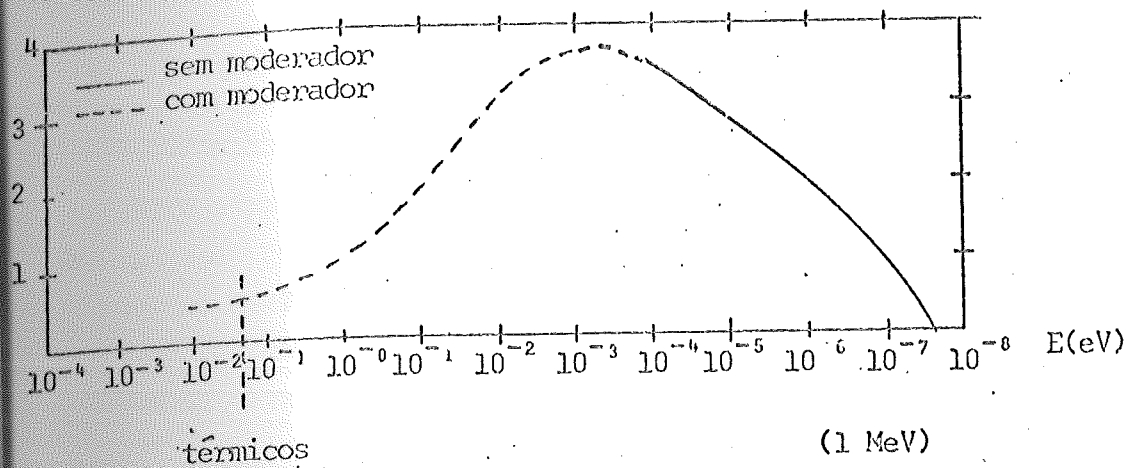


Figura 3.2. Sensibilidade de sonda em função da energia dos neutrons

Pela curva de sensibilidade observa-se que é necessário conhecer o espectro de energias dos neutrons para interpretação da leitura e que há uma perda completa da sensibilidade em altas energias de neutrons.

Um contador proporcional com um gás aproximadamente tecido-equivalente e com paredes de material hidrogenado pode ser usado para medida dos raios dos neutrons sobre um amplo intervalo de energia e ao mesmo tempo eliminando a contribuição de radiação γ .

Os contadores comerciais geralmente tem três polegadas de comprimento e duas polegadas de diâmetro e tem três escalas de 5,50 e 500m rad/h e uma escala integradora de 0,5m rad.

A resposta do contador relativa à dose de primeira colisão no tecido é aproximadamente constante entre 0,2 e 14 MeV, com um erro de 10%.

II.5.3. Tipo de Cintilação

Existem materiais cintilantes para neutrons rápidos e boro ou litio sustentando "fósforos" para neutrons térmicos.

Um instrumento do tipo cintilação para neutrons é constituído do seguinte: uma esfera de polietileno de 7 polegadas de diâmetro e 1/8 polegada de espessura e recoberta em seu interior por uma camada de sulfeto de zinco, contendo uma abertura para a fotomultiplicadora receber as cintilações.

Entre 0,2 e 20 MeV este instrumento dá uma resposta proporcional ao número de neutrons vezes a energia do espectro integrado.

III. EQUIPAMENTO RADIOGRÁFICO

Neste tipo de ensaio não destrutivo é utilizada a propriedade de penetração dos raios γ e dos raios χ , para examinar interiormente diversos materiais.

Como fontes de raios γ são utilizados isótopos radioativos, sendo que os mais usados são o Cobalto 60, Iridio 192, Césio 137 e Tântalo 170. Essas fontes cobrem todo o intervalo de espessuras que vai desde frações de milímetros de ligas leves até uns 30 cms de aço.

O raio γ de maior poder de penetração é o do Cobalto 60 de 1,25 MeV (energia média), o de menor poder de penetração é o do Tântalo 170 de 0,084 MeV.

Comparação entre raios χ e raios γ

	Energia R- γ	Equivalencia R- χ
Co-60	1.17 e 1.33 MeV	2000 kV
Ir-192	desde 0,3 até 0,6 MeV	400 kV
Cs-137	0,66 MeV	500 kV
Tm-170	0,084 MeV	100 kV

III.1. Equipamentos de telecomando-irradiadores-embalagem de fontes

Um dos recursos utilizados pelo homem para trabalhar e ao mesmo tempo enquadrar-se dentro da segurança radiológica é o manuseio a distância destes materiais. Um equipamento típico de telecomando consta de:

1. manivela;
2. cabo de comando;
3. blindagem porta-fonte (irradiador);
4. conduto de saída de fonte (ver gráfico adjunto).

As fontes de gamagrafia são mantidas no interior de uma blindagem portátil. As substâncias mais utilizadas como absorvedoras de raios γ ou χ são o Pb e U exaurido. Por meio de um sistema mecânico a fonte desliza no interior de um cabo flexível, conectado a blindagem, até as proximidades da peça que vai ser ensaiada.

O comando a distância é imprescindível para que o técnico não receba altas doses de radiação durante a execução de seu trabalho. Deve-se levar em consideração que modernamente são utilizadas fontes muito intensas, de ordem de 100-150 Ci de Ir 192.

Finalizada a operação de irradiação, isto é, a exposição radiográfica, o sistema mecânico permite recolher a fonte para o interior da blindagem.

Com referência as embalagens de fontes podemos mencionar as:

III.1.2. blindagens de transporte e de armazenamento

Os irradiadores de gamagrafia são providos de sistema de fechamento apropriado, para evitar irradiações, remoção não autorizada ou acidental de fontes.

Existem também blindagens especialmente construídas para armazenamento de fontes, em geral elas são construídas também para facilitar a troca de fontes.

V. NORMAS BÁSICAS DE SEGURANÇA DA CNEN

No anos de 1973, a CNEN aprovou as normas básicas de proteção radiológica.

Nas disposições gerais desta norma destacam-se:

IV.1. A finalidade, que diz: A presente resolução tem por objetivo fixar os princípios básicos de proteção contra os danos oriundos do uso das radiações.

A seguir vem definições de termos destinados a padronizar e esclarecer devidamente o significado dos diversos termos utilizados no campo da proteção radiológica.

IV.2. No que diz respeito ao Campo de Aplicação: a norma diz: Estas normas aplicam-se à produção, processamento, manuseio, uso, armazenamento, transporte e eliminação de material radioativo natural ou artificial, e ao uso e operação de outras fontes de radiação sob a jurisdição da lei nº 4.118 de 27 de Agosto de 1962.

Seguidamente especificou-se que estas normas aplicam-se a:

- a) trabalhadores,
- b) indivíduos do público,
- c) população como um todo.

Porém, fica esclarecido que estas normas não incluem:

- a) doses ministradas a pacientes para diagnóstico ou terapêutica;
- b) doses resultantes da radiação natural.

IV.3. O capítulo 3 desta norma trata de "Limitação de Doses Provenientes de Irradiações Controladas", e com referência as doses máximas permissíveis para trabalhadores pode-se resumir;

O operador de gamagrafia ou raios χ deve se cuidar para receber a menor dose de radiação possível.

A dose máxima permissível para o corpo inteiro, gônadas ou órgãos hematopoiéticos que um operador de gamagrafia pode receber é 5 Rem em qualquer período de 12 meses.

Em nenhum caso, a dose total acumulada pode exceder a dose máxima permissível, expressa pela fórmula $D=5 \cdot (N-18)$ onde D é expresso em Rem e N é a idade do indivíduo, em número inteiro de anos.

Porém, para o período de um trimestre é especificada a dose máxima permissível de 3 Rem, desde que nos últimos 12 meses a dose total acumulada não exceda 5 Rem.

Em princípio, admitindo-se jornadas de trabalho de 40 horas semanais, estabelece-se para as doses limites derivadas do trabalho os seguintes valores:

- a) dose limite horaria - 2,5 mRem;
- b) dose limite horaria - 100 mRem;

A dose recebida pelos órgãos mencionados na tabela I não deverá exceder os valores especificados (Obs.: a tabela não inclui gônadas, corpo inteiro e medula óssea).

TABELA I

O R G Ã O	Limite trimestral Rem	Limite anual Rem
Mãos, antebraços, pés e tornozelos	40	75
Osso, tireóide, pele do corpo inteiro (excluindo-se a pele de mãos, antebraços, pés e tornozelos)	15	30
Qualquer outro órgão isolado, excluindo-se gônadas e órgãos hematopoiéticos	8	15

IV.4. Agora, passaremos a mencionar certos "Princípios Operacionais" especificados por dita norma e aplicados aos trabalhos de Ensaio Não Destrutivos pela utilização de Raios γ e Raios χ .

IV.4.1. Exames Médicos

Antes da admissão do técnico que irá trabalhar com gamagrafia, deve-se submetê-lo a exame médico. Esse exame médico deve incluir histórico pessoal do trabalhador, abrangendo a família, seus antecedentes médicos e ocupacionais. Além disso, serão examinados os órgãos e funções considerados vulneráveis aos possíveis perigos bem como verificadas as aptidões para o desempenho de tipos particulares de trabalho. Se o candidato for portador de alguma doença correlacionada na tabela II é contraindicada a admissão.

Aos operadores de gamagrafia será providenciado exame médico (hemograma) de seis (6) em seis (6) meses. Quando o operador de gamagrafia receber em uma exposição acidental ou em uma irradiação especial planejada, dose superior a 10 Rem ele será submetido imediatamente a exames médicos especiais.

TABELA II - DOENÇAS QUE CONTRAINDICAM TRABALHO COM RADIAÇÕES IONIZANTES

Nº	DOENÇA	CONTRA INDICAÇÃO	REVERSIBILIDADE
1	Anemia secundária Anemia primária (aplástica, falciforme, etc...) Diátese hemorrágica: hemofilia; trombocitopenia essencial, etc... Linfocitopenia acentuada	sim sim sim sim	com tratamento não não não
2	Doenças dos sistemas nervoso Central ou Periférico de caráter infeccioso tóxico ou traumático; neurose, psicoses, epilepsia, Parkinson.	sim	com tratamento
3	Toxicomania	sim	não
4	Astenia pronunciada	sim	com tratamento
5	Câncer, lesões pré-cancerosas	sim	não
6	Doenças do tubo gástrico intestinal, com crises frequentes	sim	não
7	Doenças do fígado e vias biliares a) doenças crônicas do parênquima hepático b) doenças das vias biliares ou agudas do parênquima hepático	sim sim	não com tratamento
8	Infecções crônica dos rins, bexiga ou uretra litíase renal, caracterizada por severo ou moderado distúrbio funcional.	sim	não

DOENÇA	CONTRA INDICAÇÃO	REVERSIBILIDADE
Doenças <u>c</u> árdio-vasculares com sintomas de insuficiên <u>ci</u> a cardíaca; hipertensão	sim	com tratamento
Doenças pulmon res-tuberculo <u>se</u> , asma brônquica, bronquiec <u>t</u> asia, enfisema, pneumonoco <u>n</u> iose, bronquite crônica , processos supurativos	sim	com tratamento
Doenças do sistema endócrino ou metabolismo	sim	não
Doenças sexuais de caráter - hereditário (inclusive, na mulher os distúrbios menstr <u>u</u> ais persistentes).	sim	não
Doenças genitais de caráter-adquirido	sim	com tratamento
Gravidez e aleitamento	sim	não
História de doenças das ra - diações, aguda e crônica	sim	não
Problemas ortopédicos, em espe <u>ci</u> al de coluna, com limitação funcional	sim	com tratamento
Doenças crônicas das <u>v</u> ias aéreas superiores	sim	com tratamento
Doenças crônicas, inflamató - rias ou degenerativas		
a) do olho	sim	não
b) dos anexos	sim	com tratamento
Doenças da pele, de cura <u>di</u> fícil ou impossível (psoriase, micose fungoide, hiperkeratose, lupuseritematoso, etc.)	sim	não
Sífilis	sim	não

X

TABELA II - DOENÇAS QUE CONTRAINDICAM TRABALHO COM RADIAÇÕES IONIZANTES

Nº	DOENÇA	CONTRA INDICAÇÃO	REVERSIBILIDADE
21	Doença de caráter endêmico (malária, doenças de chagas, tracoma, esquistossomose, parasitoses em geral.	sim	com tratamento

IV.4.2. Precauções Gerais

IV.4.2.1. Desde o instante da sua aquisição, as fontes são da propriedade e responsabilidade do comprador. O centro expedidor fornece informações a CNEN, que registra a fonte no cadastro geral. Assim, o comprador será responsável pelo manuseio e utilização da fonte até o instante em que ela deixar de ser útil por falta de atividade ou de feito.

A partir daí, a CNEN deve recolhê-la como rejeito radioativo a pedido do interessado e dar a baixa correspondente no cadastro geral. Esse registro rígido é necessário para controlar possíveis perdas de fontes, por acidente ou roubo e assim tomar providências rápidas para evitar perigo de exposição indevida a pessoas do público ou a população.

As firmas de gamagrafia devem fazer inventário das fontes, sendo que estes assentamentos devem estar disponíveis para a fiscalização da CNEN e devem incluir o tipo, natureza, atividade, localização e finalidade do uso, data do inventário e observações que se façam necessárias.

IV.4.2.2. Armazenamento

Os irradiadores de gamagrafia e as blindagens de transporte e armazenamento são providos de sistema de fechamento apropriado. Assim devem

ser inicialmente fechadas e depois guardadas em locais confinados, de terminados pelo supervisor de segurança radiológica, para evitar violação, remoção por pessoas não autorizadas e roubo.

IV.4.2.3. Ensaio de "Fuga de Radiação" - Vazamento das Fontes

Toda fonte de gamagrafia será periodicamente inspecionada, para verificação da presença ou ausência de rupturas e consequente liberação de fragmentos de material ativado que podem contaminar o local de trabalho. O supervisor da Segurança Radiológica deve efetuar estes ensaios a cada seis (6) meses. Ao se constatar que uma fonte de gamagrafia apresenta ruptura (perdendo limalhas radioativas) o responsável da proteção radiológica deve retirar imediatamente de uso o equipamento envolvido e providenciar a sua descontaminação, reparo da fonte ou eliminação total. Deve-se elaborar um relatório especificando as providências tomadas e enviar cópia a CNEN, que deverá receber a fonte danificada como resíduo radioativo.

IV.4.2.4. Substituição das Fontes Radioativas

A substituição de qualquer fonte de gamagrafia, por falta de atividade útil ao trabalho, ou em decorrência de danos (rupturas, vazamento de material radioativo, etc), são

poderá ser efetuada pelo responsável da proteção radiológica junto a CNEN ou por pessoa de sua confiança, especificamente autorizada por escrito.

IV.4.2.5. Instrumentos para levantamentos radiométricos.

Todos os instrumentos de levantamentos radiométricos, devem ser mantidos calibrados e em condições de operação. Todo instrumento deve ser calibrado em intervalos não superiores a seis (6) meses e após cada operação de reparo ou de manutenção. Em cada frente de obra deve existir pelo menos um instrumento de levantamento radiométrico para controle de exposições a radiação e delimitação da área de segurança.

IV.4.2.6. Delimitação das Áreas de Segurança para Exposição Radiográfica.

Por meio dos instrumentos de levantamento radiométrico, deve-se delimitar uma área cujo contorno indique uma exposição de 2,5 mR/h. Toda a região externa a esse contorno corresponde a uma área segura para o pessoal, permitindo as pessoas que nela permaneçam, receber doses inferiores a 100 mR/semana de 40 horas de trabalho.

IV.4.2.7. Procedimento rotineiro

Na prática, para se efetuar um ensaio de gamagrafia, em caso de rotina, deve-se proceder da maneira seguinte:

- a) efetuar um croquis das condições de ensaio e calcular as doses de radiação;
 - b) delimitar teoricamente a área de segurança. Se necessário usar - blindagens adicionais ;
 - c) fazer o levantamento radiométrico "in situ" durante a realização do trabalho;
 - d) delimitar a área de segurança, utilizando cordas de nylon, de preferência de cor vermelha e placas contendo o símbolo de radiação com as inscrições "PERIGO MATERIAL RADIOATIVO".
- O símbolo básico de sinalização é o da Figura 1 indicativo da presença de radiação ionizante.

IV.4.2.8. Procedimento de Emergencia

O acidente mais comum em trabalhos de gamagrafia, é o desprendimento da fonte do cabo de comando, devendo-se proceder da maneira seguinte:

- a) isolar a área onde caiu a fonte valendo-se do instrumental de levantamento radiométrico;
- b) planejar todas as etapas da operação de recuperação, levando em conta as ferramentas disponíveis para o manuseio do material radioativo, a dose já recebida pelos operadores, o tempo provável que será gasto na operação de recuperação, a blindagem para armazenamento, o rodizio dos técnicos e as implicações locais;
- c) dependendo da atividade envolvida, não se deve aproximar muito o instrumento de levantamento radiométrico da fonte, isto é, no caso de se utilizar contadores do tipo Geiger-Muller, para evitar a saturação da câmara detectora e indicação falsa de exposição a radiação. Observar atentamente as leituras do instrumento de levantamento radiométrico;
- d) providenciar para que as pessoas envolvidas na recuperação de fonte utilizem filmes dosimétricos de pulso;
- e) após a recuperação da fonte, fazer um relatório escrito e comunicar-se imediatamente com o supervisor da Segurança Radiológica, que por

sua vez, relatará o acontecido a CNEN;

- f) dependendo da dose recebida pelos participantes (caso ela seja superior a duas vezes o máximo anual permissível), submetê-las a controle médico especial;
- g) transcrever para as "fichas dosimétricas pessoais", todas as etapas e todos os fatos ocorridos durante a recuperação da fonte, levando em conta a participação de cada operador;
- h) para verificar se a fonte se desprende ou não do cabo de comando durante um ensaio radiográfico e ficou presa no interior desse cabo, monitorar o irradiador sempre em um mesmo local, toda vez que a fonte for recolhida e comparar as exposições registradas pelo instrumento de levantamento radiométrico.

Toda vez que a fonte voltar para sua correta posição, no interior do irradiador, o instrumento de levantamento radiométrico registrará uma indicação constante, desprezando-se o efeito da influência do decaimento radioativo.

IV.4.2.9. Monitoração de Pessoal e Ficha Dosimétrica

Não se permite que técnicos de gammagrafia trabalhem sem dosímetro individual, fotográfico ou termoluminescente. Como em cada obra deve-se delimitar a área de segurança, deve existir

um instrumento de levantamento radiométrico. A partir do conhecimento dos níveis de radiação e da frequência de manuseio da fonte de gamagrafia, o chefe da equipe indicará um rodizio com os operadores, evitando que eles recebam exposições que levem a doses acima dos limites derivados do trabalho mensal. Não se tolerará, rotineiramente, doses de 400 mRem/mes para qualquer operador de gamagrafia.

Os filmes dosimétricos devem ser guardados todos juntos, em local adequado de acordo com instruções do supervisor da Segurança Radiológica.

No que diz respeito a Ficha Dosimétrica, cada técnico de gamagrafia possui obrigatoriamente uma ficha, de acordo com modelo definido pela CNEN, para registro das doses parciais e totais recebidas durante o desempenho de suas atividades.

Essa ficha deve ser arquivada em lugar de fácil acesso e estar sempre a disposição do interessado e do fiscal da CNEN, quando eles assim o desejarem.