

# PROTEÇÃO RADIOLÓGICA INDUSTRIAL

Cesar Lúcio Molitz Allenstein ★

## 1. INTRODUÇÃO

Os trabalhos com radiações ionizantes são regulamentados a nível internacional pela "ICRP" — International Commission on Radiological Protection. No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear — "CNEN" estabelece as normas aplicáveis às atividades com radiações ionizantes.

Especificamente para a área industrial foram publicadas as Normas Básicas de Proteção Radiológica<sup>(2)</sup> através da resolução 6/73. Esta norma foi o ponto de partida na regulamentação da proteção radiológica. Em outubro de 1984, a "CNEN", através da resolução 09/84, aprovou a norma experimental para o licenciamento de instalações radioativas, NE 6,02<sup>(3)</sup>, e mais especificamente para a área industrial, a resolução 13/85 aprovou a norma experimental "Licenciamento de Instalações de Radiografia Industrial - NE 6.04<sup>(4)</sup>", em novembro de 1985. Aliada a estas, a utilização de normalização específica para o transporte de materiais radioativos conduz uma condição de plena segurança nas aplicações de radiações ionizantes na indústria.

A relação entre o custo da proteção radiológica e a dose recebida são inversamente proporcionais. Desta forma para se manterem extremamente baixos os níveis de doses absorvidas, é necessário investir muito em instrumentação e procedimentos de proteção radiológica. Para doses de até 1,0 Sv (100 Rem) a relação entre o efeito biológico e a dose absorvida é linear. A partir deste valor, esta relação passa para quadrática, ou seja efeitos biológicos serão muito mais intensos com pequenos acréscimos na dose.

Os dados disponíveis levam a crer que o custo de uma exposição acidental é alta, e varia entre um mínimo de 1000 a 25000 dólares por homem Sievert (100 Rem). Portanto, a adoção de um plano de proteção radiológica bem elaborado conduz a condições seguras de trabalho e à redução de riscos e custos desnecessários.

A gamagrafia industrial, como qualquer outra técnica, somente será adotada se for comprovadamente benéfica.

A Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) recomenda um sistema de limitação de doses, cujos itens principais são:

- a) não serão adotadas novas técnicas de trabalho com radiação ionizante sem que se esteja certo de serem benéficas;
- b) toda a exposição à radiação deve ser tão baixa quanto possível, considerando-se fatores econômicos e sociais;
- c) a dose equivalente individual não deve exceder os limites recomendados para as circunstâncias estabelecidas pela ICRP.

O controle da exposição radiológica consta da aplicação de métodos que reduzem e minimizam a dose absorvida pelos indivíduos. Os principais métodos para atingir esta finalidade podem ser resumidos em: **tempo, distância e blindagem.**

### TEMPO

Constitui a forma mais simples de reduzirmos a dose. Quanto menor o tempo de exposição, menor será a dose recebida. Naturalmente, grande importância é dada a esta variável em proteção radiológica. Assim os trabalhos com radiações serão, antecipadamente, planejados e qualquer indivíduo que entre na área irradiada, deverá compreender exatamente o que deverá fazer. Assim o treinamento, o conhecimento do plano de trabalho, será fornecido fora da área de radiação. Sempre a simulação resulta em economia de tempo e conseqüente redução de riscos. Todos os recursos disponíveis deverão ser empregados para reduzir o tempo gasto na área de radiação.

### DISTÂNCIA

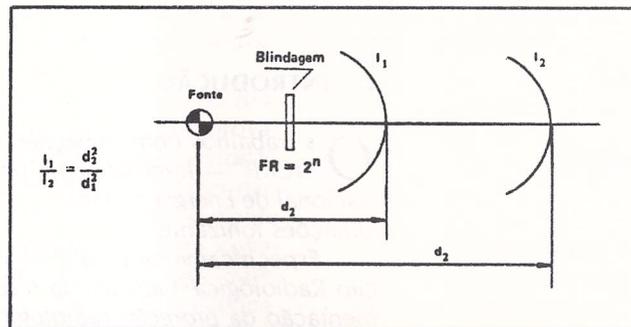
Quanto mais distante de uma fonte de radiação uma pessoa trabalhar, tanto menor será a dose recebida. Em radiografia industrial as fontes são consideradas pontuais. A intensidade de radiação está relacionada com a distância pela conhecida "Lei do Inverso do Quadrado da Distância", ou seja: "A intensidade é inversamente proporcional ao quadrado da distância". Se conhecermos o nível de radiação a um metro, podemos determinar a intensidade na distância de interesses.

Trabalho apresentado no 2º SETEM — CEFET-PR — 1986.

★ César Lúcio Molitz Allenstein, é Físico; Supervisor de Proteção Radiológica Industrial; Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais; Diretor da Engisa — Inspeção e Pesquisa Aplicada à Indústria Ltda; Professor no Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná — DPP.

## BLINDAGEM

A utilização de barreiras proporciona a absorção da radiação incidente. Cada tipo de material, para uma dada energia, possui uma espessura denominada camada semi-redutora para a qual o nível de radiação cai pela metade. O fator de redução é calculado pela metade  $FR = 2^n$  onde  $n$  é o número de camadas semi-redutoras. Assim, com a utilização de blindagens, é possível reduzir a taxa de doses para valores que proporcionem condição segura nas operações com fontes.



## 2. APLICAÇÕES DAS RADIAÇÕES IONIZANTES NA INDÚSTRIA

A utilização das radiações ionizantes tem sido intensificada nos últimos anos. Apenas para ilustrar, faremos a citação de aplicações típicas do uso de fontes radiativas nas atividades industriais.

Nas indústrias papeleiras e químicas são utilizados controladores de nível de líquidos em vasos ou cozinhadores. Uma fonte, comumente de Césio 137, emite radiação gama que é sentida num detector situado diametralmente oposto à fonte. Desta forma, quando o nível de carga subir, o feixe de radiação será interrompido acionando a instrumentação e o controle do processo. A figura 1 ilustra este conjunto.

Nas indústrias de transformação de polímeros laminados ou na própria produção do papel, o acúmulo da eletricidade estática das bobinas é evitado com a utilização de um emissor "α", por exemplo o polônio. Ainda na produção de laminados finos, papel ou plásticos, o controle de espessura deste produto, durante o processo de fabricação, pode ser feito pelo uso da radiação "β".

Outra aplicação interessante de emissor "α", está na construção de pára-raios. O Amerício, acondicionado em finas lâminas, fornece uma região altamente ionizada por partículas α, resultando maior probabilidade de descarga nestas regiões.

A esterilização de alimentos e produtos cirúrgicos é obtida pela irradiação em fontes de alta atividade. Estas fontes são, normalmente, o cobalto 60 ( $Co^{60}$ ) com atividades de 1000 a 2000 Ci (1 Ci =  $3,7 \times 10^{10}$  desintegrações por segundo). Hoje é comum a utilização de seringas descartáveis esterilizadas por radiações. O algodão para uso cirúrgico, ou até o talco infantil, são irradiados nestas fontes.

Uma dose alta de radiações aplicada em alimentos reduz o número de microorganismos para níveis extremamente baixos. Estas exposições são utilizadas em alimentos para pacientes submetidos a transplantes, reduzindo o risco de infecções.

Na agricultura, estas exposições proporcionam um aumento no tempo de armazenamento. Assim, a batata, o alho, a cebola, irradiados têm como resultado a redução da tendência ao brotamento. Frutas como a manga, o mamão, irradiados apresentam aumento considerável (30 dias) no período da maturação.

A figura 2 mostra esquematicamente o funcionamento do irradiador para esterilização.

A inspeção radiográfica tem sido intensamente utilizada no controle de qualidade de produtos metal-mecânicos. Na soldagem ou na produção de fundidos ou forjados, o ensaio radiográfico, ou a gamagrafia, tem se constituído num poderoso recurso para a detecção de descontinuidades internas; este tipo de inspeção pode utilizar raios X ou raios gama. Os primeiros foram descobertos por Roentgen e são gerados por um tubo de raios X, sendo possível regular sua energia e quantidade. Os raios gama são da mesma forma radiações eletromagnéticas emitidas da desintegração de núcleos atômicos de um dado elemento radioativo. A energia não é regulável e depende, tão somente, do tipo de isótopo utilizado.

A figura 3 apresenta, de forma esquemática, o aspecto do irradiador utilizado na gamagrafia industrial. As fotos 1 a 3 ilustram os detalhes construtivos do irradiador para gamagrafia.

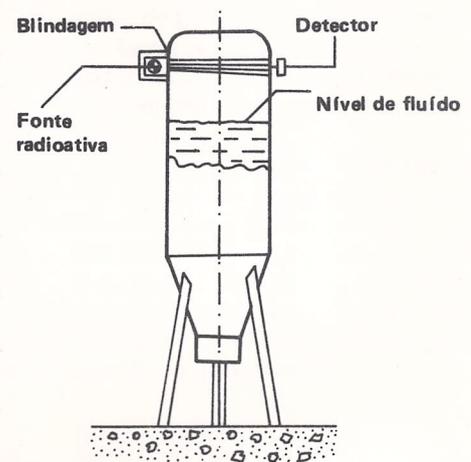


FIG. 1 — Controlador de nível

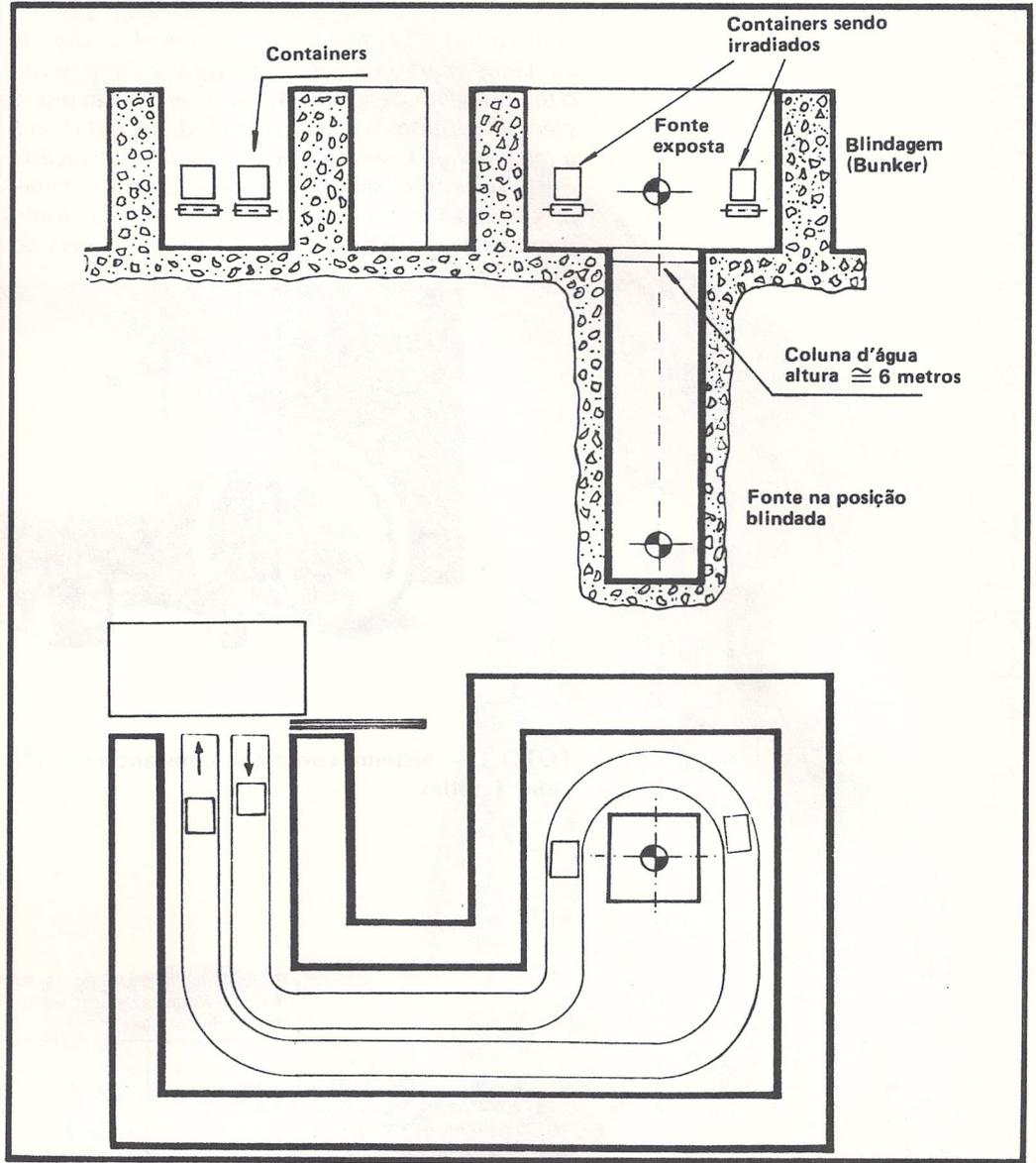


FIG. 2 — Irradiador de grande porte para esterilização de alimentos e produtos cirúrgicos.

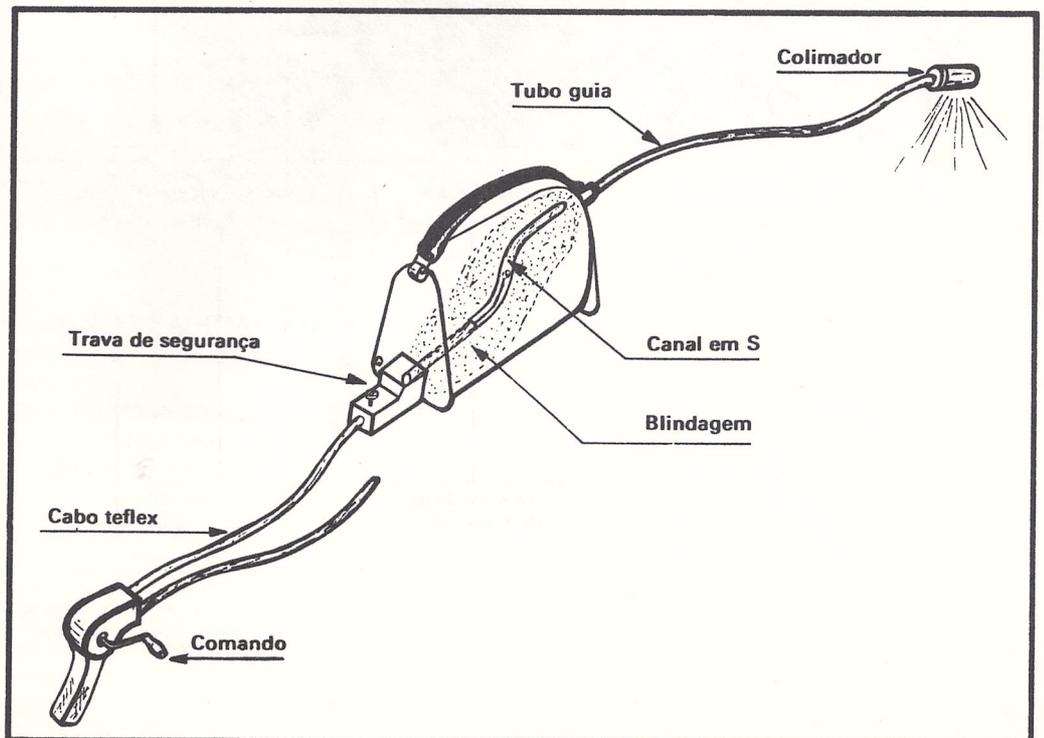


FIG. 3 — Representação esquemática de um irradiador para gamagrafia industrial.

As fontes radioativas são produzidas por ativação em reatores nucleares. Elementos, como o Iridio 191 metálico, são trefilados em forma de fios de 3 mm de diâmetro, que, seccionados em discos, são submetidos a um intenso fluxo de nêutrons num reator. Decorrido o tempo de ativação, sua massa atômica é acrescida obtendo-se a emissão radioativa do núcleo destes átomos. No caso do Iridio, é obtido o  $\text{Ir}^{192}$ . A atividade do elemento é crescente à medida que é aumentado o tempo de ativação.

Estas fontes são acondicionadas em containers e manipulados em capelas com braços mecânicos. Nestas capelas são montadas as fontes nos porta-fontes e acondicionadas nos próprios irradiadores (Foto 1) ou em containers de transporte.

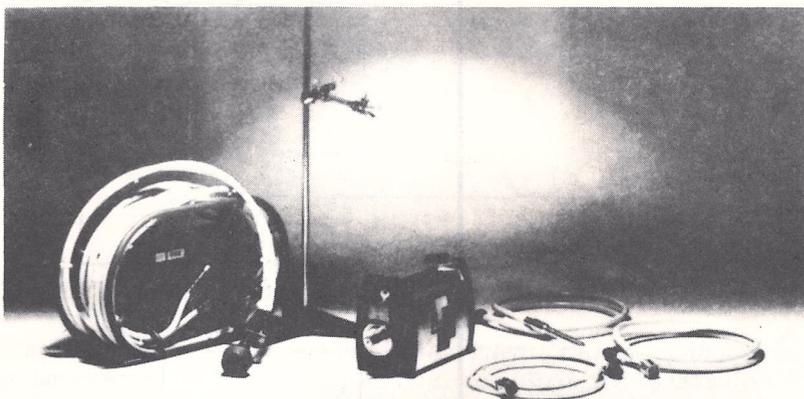


FOTO 1 — Sistema completo, constando de tubo guia, irradiador, tripé e comando com cabo Teleflex.

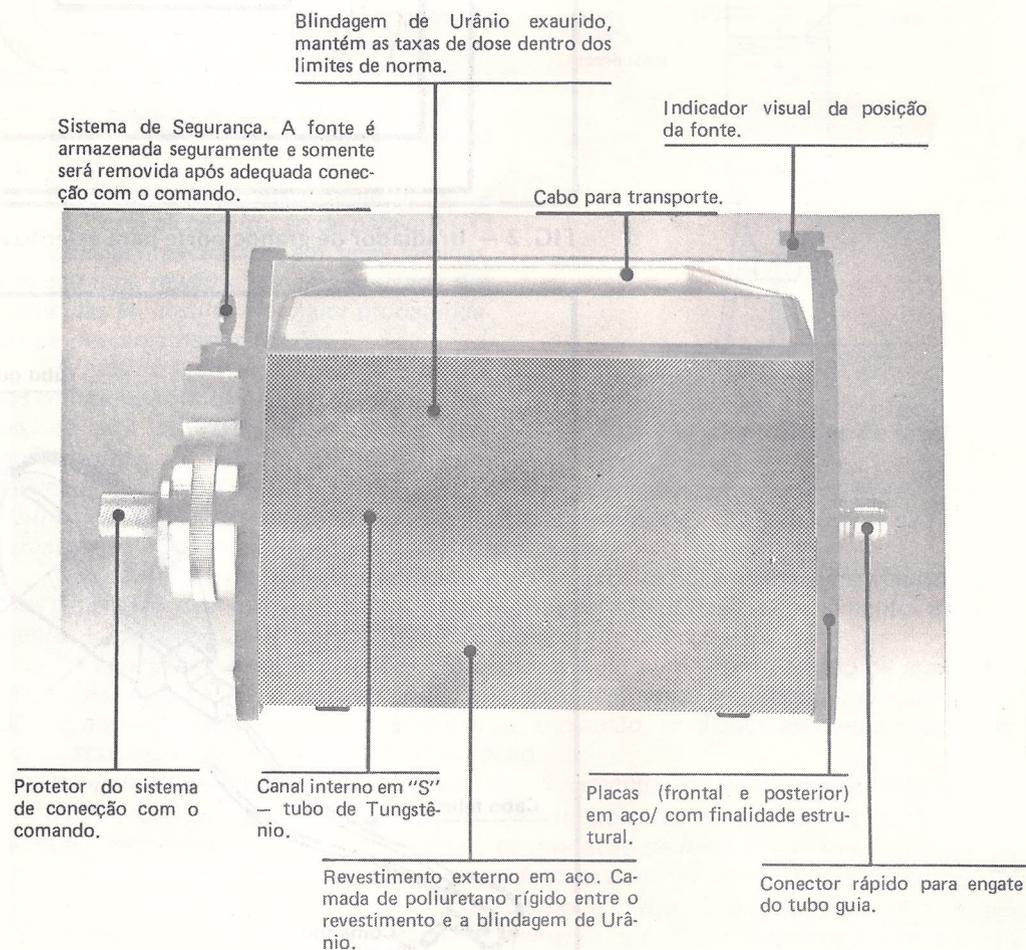


FOTO 2 — Irradiador - capacidade 100 Ci.

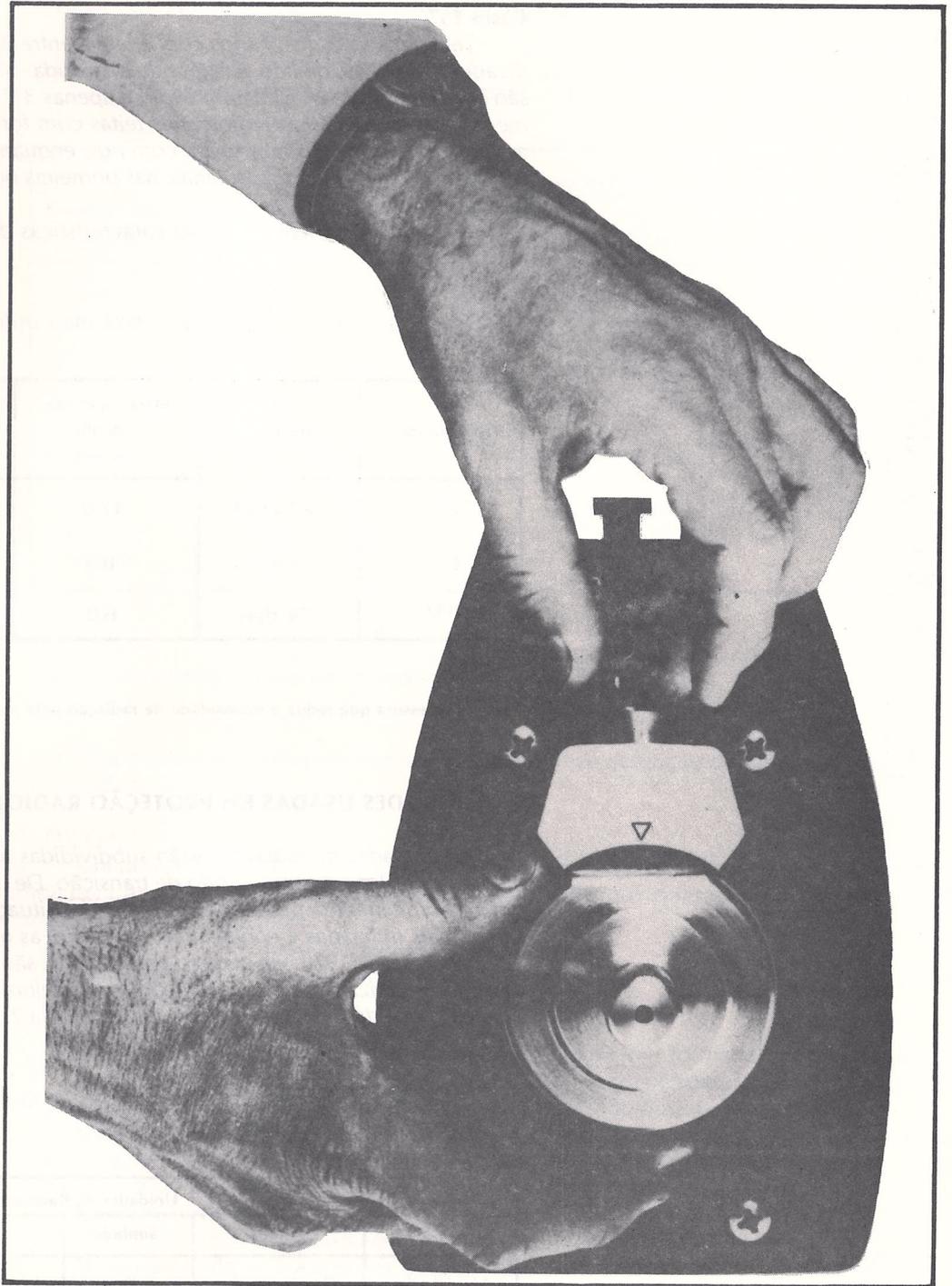


FOTO 3 — Sistema de Segurança — não permite que a fonte seja movimentada sem estar corretamente conectada.

### 3. FONTES RADIOATIVAS

#### **Írídio 192**

É utilizado para inspeção de paredes com espessuras entre 6 a 76 milímetros. Proporciona energia inferior à do Cobalto -  $Co^{60}$ . Atualmente estas fontes são produzidas com atividades de até 100 Ci. A imagem radiológica é comparável a obtida por aparelhos de raios X. A portabilidade inicial dos irradiadores torna este tipo de fonte competitiva com os aparelhos de raios X. A meia vida, relativamente curta (74 dias), acarreta que, para uma fonte com atividade inicial de 100 Ci, esta seja substituída em aproximadamente 10 meses de uso.

#### **Cobalto 60**

É utilizado na inspeção de grandes secções, por exemplo fundidos de aço com espessuras entre 25 e 200 mm, ou colunas e vigas de concreto. Devido à sua grande energia, os cuidados com proteção radiológica devem ser intensificados. A interação da radiação gama do Cobalto com a matéria é sensivelmente diferente que aquela observada na radiação gama do Írídio. No cobalto, o mecanismo predominante é a formação de pares, enquanto no írídio por efeito fotoelétrico e compton. A meia vida do cobalto é de 5,3 anos.

**Césio 137**

Tem meia vida de 30 anos com energia entre 0,137 a 0,651 MeV. É muito usado nos indicadores de nível, devido esta grande meia vida. Na gamagrafia, uma fonte de igual dimensão (3 x 6 mm) tem 60 Ci para o Iridio e apenas 3 Ci para o Césio. Este fato acarreta em aumento da penumbra nas radiografias feitas com fontes de Césio. Outra desvantagem é que as fontes de Césio são fabricadas com pós, enquanto as de Iridio e Cobalto são metálicas. Muito embora sejam encapsuladas, nas primeiras ocorre maior possibilidade de contaminação radioativa.

A tabela 1 apresenta algumas características destas fontes:

TAB. 1 — Características das fontes mais utilizadas industrialmente.

Radioisótopo	Meia vida	Meia espessura * de Pb = mm	Taxa de exposição a 1 metro (R/Cih)	Espessura (alcance) aço	
				min. (mm)	máx. (mm)
Co <sup>60</sup>	5,3 anos	12,0	1,340	25	200
Cs <sup>137</sup>	30 anos	6,5	0,324	20	100
Ir <sup>192</sup>	74 dias	6,0	0,500	5	76

\* espessura que reduz a intensidade de radiação pela metade.

**4. UNIDADES USADAS EM PROTEÇÃO RADIOLÓGICA**

As unidades de radiação estão subdivididas atualmente em antigas e novas. Naturalmente, hoje vivemos um período de transição. De um lado as unidades antigas, mais difundidas, permitem uma mais fácil avaliação das situações vividas na proteção radiológica por serem mais utilizadas e conhecidas; por outro, as unidades novas, introduzidas legalmente em 3 de maio de 1978, via decreto presidencial, são unidades do sistema internacional (SI) e devem ser utilizadas em substituição às primeiras. Dentre outras unidades publicadas no Diário Oficial da União, apresentamos, na tabela 2, as de interesse em proteção radiológica.

TAB. 2 — Unidades usadas em proteção radiológica

Grandezas	Unidades de Radioatividades			Observações
	Nome	Símbolo	Definição	
Atividade	Becquerel	Bq	Atividade de um material radioativo no qual se produz uma desintegração por segundo.	
Exposição	Coulomb p/ quilograma	C/kg	Exposição de uma radiação X ou gama tal que a carga total dos íons de mesmo sinal produzidos em 1 quilograma de ar, quando todos os elétrons, liberados por fótons, são completamente detidos no ar, e de 1 Coulomb em valor absoluto.	
Dose absorvida	Gray	Gy	Dose de radiação ionizante absorvida uniformemente por uma porção de matéria à razão de 1 Joule por quilograma de sua massa.	

No SI, o curie (1 Ci = 3,7 . 10<sup>10</sup> Bq) é admitido apenas temporariamente.

A tabela 3 apresenta fatores de conversão entre as unidades antigas e novas.

TAB. 3 — Constantes para conversão entre unidades antigas e novas.

Grandeza física (símbolo)	Unidades antigas		Unidades novas		Unidade antiga	Unidade nova
	Nome (símbolo)	Valor	Nome (símbolo)	Valor		
					Vale	Vale
Atividade (A)	curie (Ci)	$3,7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$	Becquerel (Bq)	$1 \text{ s}^{-1}$	$3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$	$2,7 \times 10^{-11} \text{ Ci}$
Exposição (X)	roentgen (R)	$2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$	Coulomb/kg (C/kg)	$1 \text{ C/kg}$	$2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$	$3,88 \times 10^3 \text{ R}$
Dose absorvida (D)	rad (rad)	$10^{-2} \text{ J/kg}$	Gray (Gy)	$1 \text{ J/kg}$	$10^{-2} \text{ Gy}$	$10^2 \text{ rad}$
Equivalente a dose (H)	rem (rem)	rad. Q . N*	Sievert (Sv)	Gy. Q . N*	$10^{-2} \text{ Sv}$	$10^2 \text{ rem}$

\* Q fator de qualidade, N outros fatores modificadores.

Para melhor entendimento faremos, a seguir, breve descrição das grandezas expressas nas unidades citadas.

#### ATIVIDADE:

**Unidade antiga** — Curie - Símbolo Ci, é a medida da quantidade de radioatividade emitida por um radioisótopo. É o número de transformações nucleares que ocorrem num determinado intervalo de tempo.

$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10}$  desintegração por segundo.

**Unidade nova** — Becquerel - atividade de um material radioativo no qual se produz uma desintegração por segundo.

$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$ .

**Exposição** — A exposição é definida pelo número de íons formados no ar por unidade de massa. No ar, em média, são gastos 34 eV ( $5,4 \cdot 10^{-11}$  ergs) de energia para a produção de 1 par de íons (13,4 eV, no argônio), 30 eV nos gases ou líquidos, 3 eV nos sólidos.

**Unidade antiga** — Roentgen - Símbolo R. A exposição, cuja unidade é o R, é uma medida de quantidade de radiação absorvida pelo ar, definida a partir da ionização que os fótons (raios  $\gamma$  ou X) produzem no ar.

**Unidade nova** — Coulombs/quilograma - Símbolo C/kg. Conversão  $1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$  (A taxa de exposição é dada em unidade de exposição/hora - R/h).

**Dose absorvida** — É a medida da quantidade de radiação absorvida por unidade de massa. Também denominada "energia específica transferida", é o quociente da energia transferida pela massa M do volume considerado.

Esta grandeza é medida em:

UNIDADE ANTIGA: rad - rad (símbolo) -  $1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g} = 1/100 \text{ J/kg}$

UNIDADE NOVA: Gray - Gy (símbolo)

$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy} = 10^{-2} \text{ J.kg}^{-1}$

$1 \text{ rad}$  é aproximadamente igual à dose absorvida pelo tecido vivo macio quando exposto a  $1 \text{ R}$  de raios X de média energia (= 250 kV).

$1 \text{ R} = 96 \text{ erg/g}$  de tecido ou água

$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g} \dots 1 \text{ R} = 0,96 \text{ rad}$ .

**Dose equivalente** — Em unidades antigas, esta grandeza é medida em Rem - Roentgen equivalente man.

A dose equivalente é usada principalmente em radioproteção visto que a dose absorvida (rad) não é suficiente para caracterizar efeitos biológicos nos tecidos.

Estes efeitos biológicos serão diferentes, dependendo dos seguintes fatores principais:

- Da energia da radiação e tipo de irradiação. Radiações diferentes apresentam ionização específica diferente. Assim as ionizações específicas num mesmo meio produzidas por raios alfa, beta e gama, guardam grosseiramente a relação  $10^4 : 10^2 : 1$ .

- A matéria exposta, o tipo de material irradiado, tecido ou organismo como também o estado fisiológico do organismo.

- Da radiosensibilidade do organismo.

- Do período e da capacidade de recuperação do organismo.

Estas dependências de doses e efeitos foram consideradas na definição de dose equivalente, sendo em unidades antigas definido o Rem como segue:

$$\text{Rem} = \text{rad} \cdot Q_f \cdot x \cdot DF$$

sendo:

- Qf o fator de qualidade que depende do tipo de radiação para raios  $\gamma$  ou X  $\rightarrow Q_f = 1$
- para partículas beta com  $E_{\text{max}} > 0,03 \text{ MeV} \rightarrow Q_f = 1$
- para partículas beta com  $E_{\text{max}} < 0,03 \text{ MeV} \rightarrow Q_f = 1,7$
- para nêutrons térmicos  $Q_f = 3$
- para nêutrons rápidos e partículas alfa  $Q_f = 10$

Para núcleos pesados de fissão  $Q_f = 20$ , a quantidade DF é o fator de distribuição, usado para irradiação interna por contaminação com material radioativo.

$$\text{Rem} = \text{rad} \cdot DF$$

Em unidades novas, a dose equivalente é expressa em Sievert (Sv), sendo seu valor obtido pelo produto Gray  $\cdot Q_f$ .

A unidade antiga (Rem) vale  $10^{-2} \text{ Sv}$ .

## 5. DELIMITAÇÃO DE ÁREAS

As atividades de inspeção radiográficas serão realizadas pela exposição das fontes no campo.

Entende-se por campo uma região onde a fonte é exposta e cujo acesso só é permitido a pessoas autorizadas e que não permaneçam ali durante a exposição.

No planejamento da limitação de área, devemos levar em conta itens tais como:

- tipo de equipamento;
- atividade da fonte ou kilovoltagem do aparelho de Raios X,
- locais onde serão executadas as exposições,
- tempo de exposição,
- tipo do medidor de radiação,
- materiais para o isolamento de áreas,
- uso ou não de colimadores.

O valor da taxa de exposição  $\dot{X}$  em R/h é calculado pela equação:

$$\dot{X} = \frac{\Gamma \cdot A}{d^2} \text{ em R/h}$$

Onde:

$\Gamma$  é a taxa de dose se a fonte possuir atividade de 1 Ci a 1 metro de distância.

$$\text{Para o Iridio 192, vale } 0,5 \frac{\text{R}}{\text{h}} \times \frac{\text{m}^2}{\text{Ci}}$$

A — é a atividade da fonte em Ci.

d — é a distância em metros entre a fonte e o ponto que se pretende determinar a taxa de exposição.

Em unidades novas é expressa em Coulomb/kg, sendo que:

$$1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

Para situações onde existam blindagens entre a fonte e o ponto onde se pretende calcular a taxa de exposição, deveremos considerar, na equação acima, o chamado fator de redução FR. O fator de redução pode ser calculado pelo método da camada Semi-Redutora (Espessura de um dado material que reduz pela metade a taxa de exposição) sendo expresso por:

$$\text{FR} = 2^n$$

Onde: n é o número de camadas Semi-Redutoras.

Para o Iridio 192 e para o Cobalto 60, a tabela a seguir apresenta os valores para camadas Semi-Redutoras (CSR) para o chumbo, aço e concreto.

Nuclídeo	Material		
	Chumbo CSR - cm	Aço CSR - cm	Concreto CSR - cm
Iridio 192	0,6	1,3	4,1
Cobalto 60	1,2	2,0	6,1

Assim, uma chapa de aço de 3,9 cm de espessura, usada como blindagem para fonte de Iridio, tem  $n = 3,9/1,3 = 3$ , ou seja, três camadas Semi-Redutoras com um fator de redução de oito (ou seja  $FR = 2^3 = 8$ ).

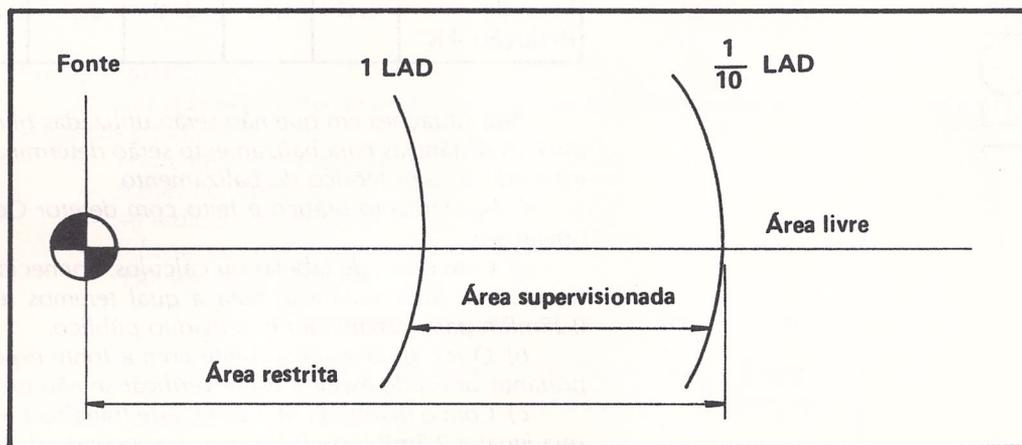
Com o uso dos valores estabelecidos das taxas de exposição permitidas (Limites ocupacionais), para cada tipo de pessoa envolvida nos trabalhos com radiação, serão calculadas as distâncias para a delimitação de área.

Os limites anuais de dose equivalente a serem considerados na delimitação de áreas são os expressos na tabela a seguir.

**Limites de dose equivalente anuais**

	Trabalhador	Indivíduo do Público
Dose equivalente efetiva	50 mSv ( 5 Rem)	10 mSv (0,5 Rem)
Dose equivalente para órgão ou tecido	500 mSv ( 50 Rem)	—
Dose equivalente para cristalino	150 mSv (150 Rem)	50 mSv (5,0 Rem)

As áreas serão delimitadas como mostra a figura a seguir.



Para doses horárias, diárias e semanais, considerando atividade de 2000 horas anuais de efetiva exposição à radiação, serão respeitados os seguintes valores:

• **Trabalhadores:**

0,025 m Sv/h	=	2,5 mRem/h – horária
0,20 m Sv/dia	=	20 mRem/dia
1,0 m Sv/semana	=	100 mRem/semana
4,0 m Sv/mês	=	400 mRem/mês

• **Indivíduo Público:** Décima parte dos valores citados anteriormente para os trabalhadores.

Considerando operações com fontes de Iridio<sup>192</sup>, na determinação das distâncias serão utilizados dois métodos:

MÉTODO "A" – Baseado no princípio de que a dose deve ser tão baixa quanto praticamente exequível.

MÉTODO "B" – Baseado na carga de trabalho da fonte.

**Descrição do Método "A":**

As distâncias para balizamento são calculadas pela seguinte equação:

$$d = \sqrt{\frac{\Gamma \cdot A}{X \cdot FR}}$$

Temos então, substituindo os limites ocupacionais, considerando o fator de qualidade igual a 1:

1 – Para trabalhadores:

$$d = \sqrt{200 \frac{A}{FR}} \text{ metros}$$

2 — Para indivíduos do público:

$$d = \sqrt{2000 \frac{A}{FR}} \text{ metros}$$

Para uso de blindagem de chumbo, quando necessário, na forma de placa ou colimados, ou chapa de aço, as tabelas a seguir apresentam os valores do fator de redução "FR" a serem utilizados no cálculo da distância.

**$I_{r^{192}}$  — FATOR DE REDUÇÃO PARA CHUMBO**

Espessura em mm	3,0	5,0	10,0	20,0	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0
Fator de Redução "FR"	1,41	1,78	3,17	10,07	32,00	101,60	322,50	102,40	3250,90

**$I_{r^{192}}$  — FATOR DE REDUÇÃO PARA AÇO**

Espessura em mm	6,5	10,0	13,0	16,0	20,0	25,0	30,0	40,0	50,0
Fator de Redução "FR"	1,41	1,70	2,00	2,35	2,90	3,79	4,95	8,43	14,38

Para situações em que não serão utilizadas blindagens o fator de redução será igual a um e as distâncias para balizamento serão determinadas pelo uso da tabela 4, com a qual é estimado o valor teórico do balizamento.

O balizamento prático é feito com detetor Geiger Mueller na seguinte seqüência de operação:

a) Com o uso de tabelas ou cálculos, conhecida a atividade da fonte, é obtido um dado teórico, uma distância, para a qual teremos respectivamente as taxas de 2,5mR/h e 0,25mR/h para trabalhador e indivíduo público.

b) O responsável pela frente com a fonte exposta coloca-se na distância teórica (Importante: antes de expor a fonte verificar se não existem pessoas na área).

c) Com o detetor G.M. ligado, este trabalhador procura um ponto onde a taxa de dose seja igual a 2,5mR/h ou 0,25mR/h dependendo do tipo de balizamento, definindo assim a distância para o balizamento.

d) Nesta distância é passada a corda de maneira circular, colocando-se as placas de sinalização ou equipamento luminoso se for o caso.

#### Descrição do Método "B":

Baseado na carga de trabalho da fonte radioativa.

Quando não for possível utilizar o método "A", anteriormente descrito, a distância para balizamento será obtida considerando-se o tempo de trabalho "t", ou tempo de efetiva exposição da fonte, assim obtido:

$$t = \frac{\text{Nº Radiografias}}{\text{Dia}} \times \frac{\text{Segundos}}{\text{Radiografia}} \times \frac{\text{Dia}}{\text{Semana}}$$

$$t = \frac{\text{Segundos}}{\text{Semana}} \quad \text{ou} \quad = \frac{\text{Horas}}{\text{Semana}}$$

Considerando os limites ocupacionais a carga de trabalho W, será:

$$W = \frac{\text{Limite de dose ocupacional (R/Semana)}}{\text{Tempo de trabalho (Horas/Semana)}}$$

Sendo W expresso em R/h:

PARA TRABALHADOR:

$$W_T = \frac{0,1 \text{ (R/Semana)}}{t \text{ Horas Semana}} = \text{(R/h)}$$

A distância é calculada por:

$$d = \sqrt{\frac{\Gamma \cdot A}{W_T}} \text{ em metros}$$

PARA INDIVÍDUO DO PÚBLICO:

$$W_{IP} = \frac{0,01 \text{ (R/Semana)}}{t \text{ (horas semana)}} = \text{(R/h)}$$

A distância é calculada por:

$$d = \sqrt{\frac{\Gamma \cdot A}{W_{IP}}} \text{ em metros}$$

**Exemplo prático:**

Efetuar o balizamento de área para uma equipe de gamagrafia que deverá operar nas seguintes condições:

- Fonte de Iridio 192 com 38 Ci;
- 5 dias por semana;
- 48 radiografias por dia;
- 8 horas por dia;
- 330 segundos por radiografia.

$$t = \frac{48 \text{ Radiografias}}{\text{Dia}} \times \frac{330 \text{ Segundos}}{\text{Radiografias}} \times \frac{5 \text{ dias}}{\text{Semana}}$$

$$t = 79.200 \frac{\text{Segundos}}{\text{Semana}}$$

$$t = 22 \text{ Horas/Semana}$$

PARA TRABALHADORES:

$$W_T = \frac{0,1 \text{ R/semana}}{22 \text{ horas/semana}} = 4,545 \times 10^{-3} \text{ R/h}$$

$$d = \sqrt{\frac{0,5 \cdot 38}{4,545 \times 10^{-3}}} = 64,65 \text{ metros}$$

PARA INDIVÍDUOS DO PÚBLICO:

$$W_T = \frac{0,01 \text{ R/Semana}}{22 \text{ horas/semana}} = 4,545 \times 10^{-4} \text{ R/h}$$

$$d = \sqrt{\frac{0,5 \cdot 38}{4,545 \times 10^{-4}}} = 204,45 \text{ metros}$$

Para o caso em que se faça uso de blindagens, o fator de redução será considerado no cálculo da distância da mesma forma que visto no método "A".

TAB. 4 — Distância em função da Taxa de Dose

TAXAS DE DOSE: Público: 0,25 mR/h — Trabalhadores: 2,5 mR (Sem atenuação do ar)

Atividade CI	Distância — (Metros)		Atividade CI	Distância — (Metros)	
	Público	Trabalhador		Público	Trabalhador
1	44,7	14,2	51	318,2	101,0
2	63,0	20,0	52	321,3	102,0
3	77,2	24,5	53	324,5	103,0
4	89,2	28,3	54	327,6	104,0
5	99,6	31,7	55	330,8	105,0
6	109,3	34,7	56	333,3	105,8
7	118,2	37,5	57	336,4	106,8
8	126,0	40,0	58	339,3	107,7
9	133,9	42,5	59	342,1	108,6
10	141,2	44,8	60	344,9	109,5
11	147,7	46,9	61	348,1	110,5
12	154,4	49,0	62	350,9	111,4
13	160,7	51,0	63	353,4	112,2
14	170,0	53,0	64	356,6	113,2
15	172,6	54,8	65	359,1	114,0
16	178,3	56,6	66	361,9	114,9
17	184,0	58,4	67	367,3	115,8
18	189,0	60,0	68	369,7	116,6
19	194,4	61,7	69	370,1	117,5
20	199,4	63,3	70	372,6	118,3
21	204,2	64,8	71	376,4	119,2
22	208,8	66,3	72	378,0	120,0
23	213,6	67,8	73	380,5	120,8
24	218,3	69,3	74	383,4	121,7
25	222,7	70,7	75	385,9	122,5
26	227,1	72,1	76	388,4	123,3
27	231,5	73,5	77	390,9	124,1
28	235,6	74,8	78	393,4	124,9
29	241,3	76,2	79	396,0	125,7
30	244,1	77,5	80	398,5	126,5
31	247,9	78,7	81	401,0	127,3
32	252,0	80,0	82	403,5	128,1
33	256,1	81,3	83	405,7	128,8
34	259,9	82,5	84	408,2	129,6
35	263,7	83,7	85	410,8	129,6
36	267,4	84,9	86	413,9	131,4
37	271,2	86,1	87	415,5	131,9
38	274,7	87,2	88	418,0	132,7
39	278,1	88,3	89	420,2	133,4
40	281,9	89,5	90	422,7	134,2
41	285,4	90,6	91	424,9	134,9
42	288,6	91,7	92	427,1	135,6
43	292,0	92,7	93	429,7	136,4
44	295,5	93,8	94	431,9	137,1
45	298,3	94,7	95	434,1	137,8
46	302,1	95,9	96	436,6	138,6
47	305,6	97,0	97	438,8	139,3
48	308,7	98,0	98	441,0	140,0
49	311,9	99,0	99	443,0	140,7
50	315,0	100,0	100	445,4	141,4

## 6. INTRODUÇÃO AO CÁLCULO DE BLINDAGEM

No cálculo de blindagens alguns fatores devem ser previamente conhecidos. O coeficiente linear de absorção  $\mu$  tem seu valor dependente da energia da radiação, e da geometria ou arranjo experimental para a qual foi medido. Normalmente os valores para  $\mu$  são medidos em geometrias colimadas como mostra a figura 4, a seguir:

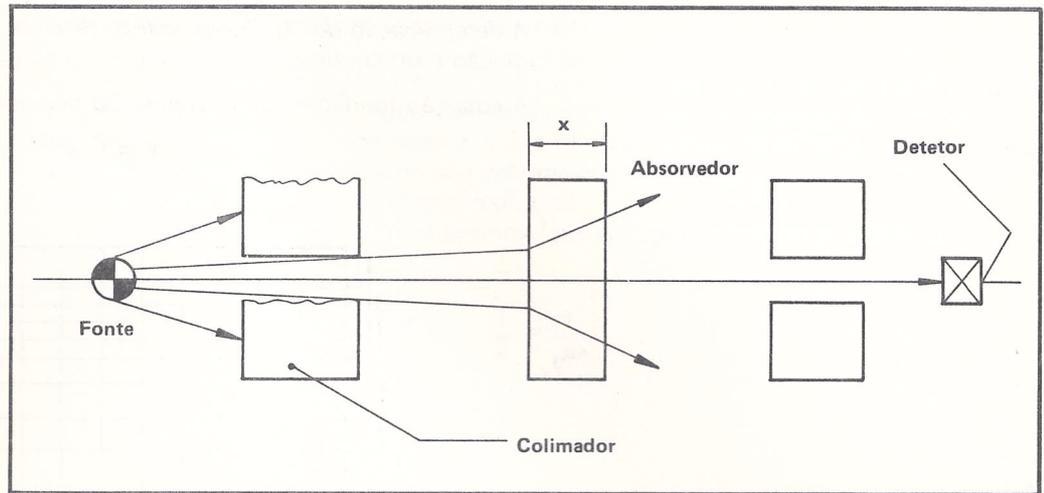


FIG. 4 – Geometria colimada

A tabela 5 apresenta os valores típicos para o coeficiente linear de absorção para os materiais. O dado inicial é a energia dos fótons incidentes. Para o Iridio 192 esta energia média é de 0,5 MeV e para o cobalto 60 aproximadamente 1,25 MeV.

TAB. 5 – Valores típicos para o coeficiente linear de absorção.

Energia do foton gama MeV	Materiais absorvedores mais comuns – (cm <sup>-1</sup> )					
	Alumínio	Chumbo	Concreto	Aço	Urânio	Tijolo
0,10	0,435	59,990	0,390	2,700	19,820	0,369
0,15	0,362	20,870	0,327	1,437	42,250	0,245
0,20	0,358	5,000	0,290	1,080	21,880	0,200
0,30	0,278	4,000	0,250	0,833	8,450	0,169
0,40	0,249	2,360	0,224	0,722	4,840	0,149
0,50	0,277	1,640	0,204	0,650	3,290	0,135
0,60	0,210	1,290	0,189	0,600	2,540	0,125
0,80	0,184	0,950	0,166	0,520	1,780	0,109
1,00	0,166	0,780	0,150	0,468	1,420	0,098
1,25	0,148	0,620	0,133	0,410	1,000	0,088
1,50	0,136	0,588	0,121	0,380	0,800	0,080

No entanto, na maioria dos casos práticos, não encontramos condições de geometria colimada. Nestes casos os cálculos para determinação da espessura da barreira são mais trabalhosos.

Para geometrias não colimadas ocorrem discrepâncias entre os resultados teóricos e experimentais na transmissão de radiação por um absorvedor. Um fator de multiplicação "B" (fator de "Build-up") é utilizado para corrigir esta discrepância. Este fator é definido como a razão da variação da taxa de exposição com geometria não colimada pela variação da taxa de exposição com geometria colimada.

$$B = \frac{\text{variação da taxa de exp. com geometria não colimada}}{\text{variação da taxa de exp. com geometria colimada}}$$

A determinação do "Build-up" é feita pelo uso das figuras 5 e 6 em função da energia da radiação e do coeficiente de relaxação " $\mu x$ " para chumbo e concreto.

A equação fundamental da atenuação fica assim modificada:

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

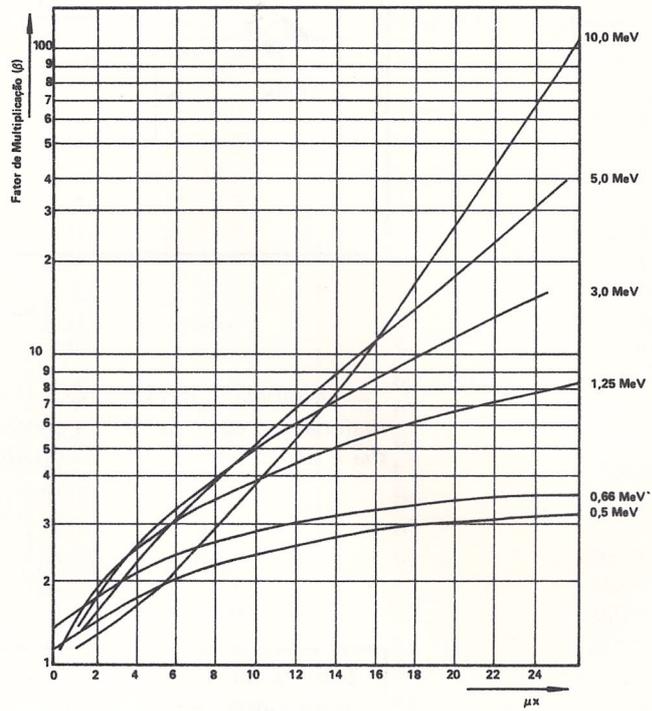


FIG. 5 — Fator de Build-up para o chumbo

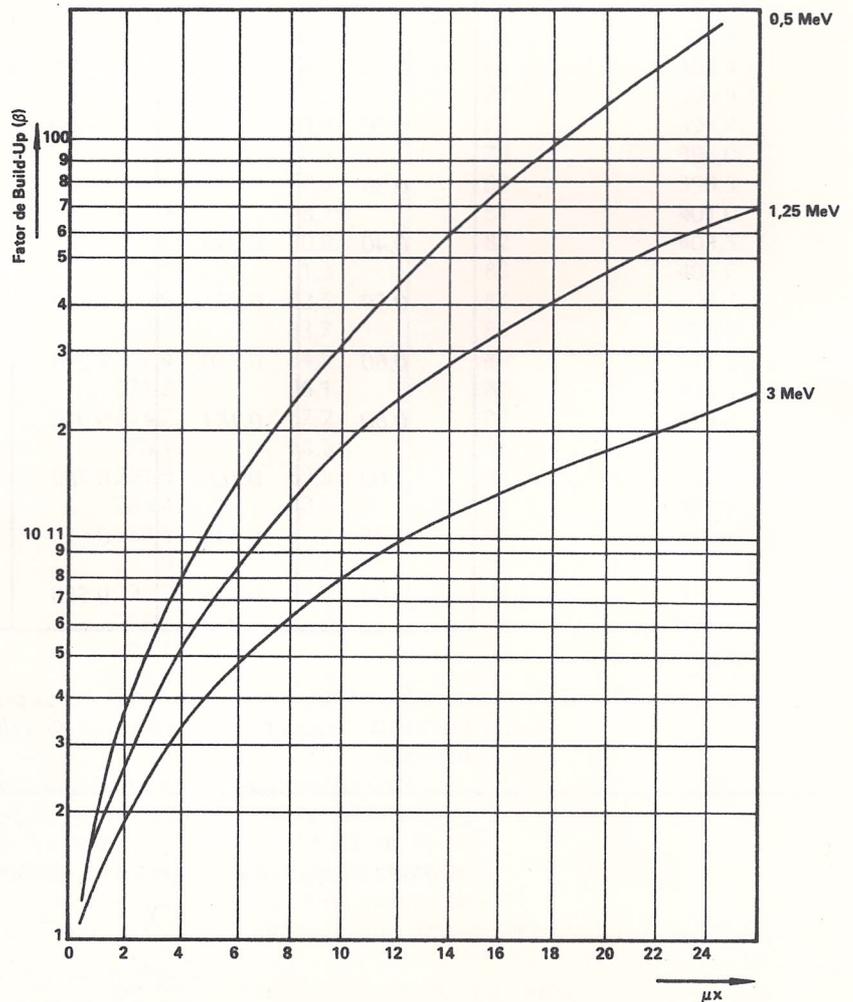


FIG. 6 — Fator de Build-up para o concreto

**Métodos para cálculo de barreiras para fontes gama:**

6.1. - Cálculo pela meia espessura (HVT) - Half-Value Thickness ou (HVL) - Half-Value Layer. É utilizado para o cálculo, rápido em obras ou situações de emergência. Está baseado na sobreposição de espessuras de material que proporcionam redução de 50% na intensidade da radiação incidente  $I_0$ . Estes valores são denominados "meias-espessuras", " $X_{1/2}$ " ou (HVT) ou (HVL) ou ainda (C.SR) - camadas semi-redutoras.

Na equação  $I = I_0 e^{-\mu x}$ , se substituirmos  $I$  por  $I_0/2$  que corresponde a 50% de absorção temos:

$$\frac{I_0}{2} = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad \therefore \quad \frac{1}{2} = \frac{1}{e^{\mu x}} \quad \therefore \quad 2 = e^{\mu x}$$

sendo  $x = x_{1/2}$ , temos: 
$$x_{1/2} = \frac{0,693}{\mu}$$

sendo:

Nº de camadas semi-redutoras	Exposição
1	$\frac{I_0}{2}$
2	$\frac{I_0}{2 \cdot 2} = \frac{I_0}{4}$
3	$\frac{I_0}{2^3}$
4	$\frac{I_0}{2^n}$

Temos que:

$\frac{I_0}{I} = 2^n$   
 $I_0$  = intensidade que chega na barreira  
 $I$  = intensidade que se pretende obter (definida em função da dose)  
 $\frac{I_0}{I}$  = fator de redução  
 $n$  = número de camadas semi-redutoras

A espessura final da blindagem  $x$  é o produto ( $n \cdot X_{1/2}$ ) ou ( $n \cdot HVT$ ). Os valores típicos de HVT ou CSR para os materiais comumente usados em blindagens (chumbo, aço, concreto) são vistos no item 5 deste trabalho.

6.2 - Cálculo considerando o fator B de "Build-up".

Este método é obrigatoriamente utilizado quando se pretende determinar espessuras de blindagens fixas, onde se requer maior cuidado, visto serem construídas em caráter mais definitivo.

a) Cálculo da barreira sem "Build-up":

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad \therefore \quad \ln \frac{I}{I_0} = -\mu x$$

donde: 
$$x = \frac{1}{\mu} \cdot \ln \frac{I_0}{I}$$

Sendo a  $x$  a espessura da barreira e  $I_0$ ;  $I$  as intensidades respectivamente incidente e emergente.

- b) Cálculo do coeficiente de relaxação  $\mu$  x.  
 c) Obtenção do fator de "Build-up" B dos gráficos (Figura 5 para o Chumbo e Figura 6 para o concreto).  
 d) Obter finalmente o valor da espessura da barreira por:

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

$$x = \left[ \frac{1}{\mu} \cdot \ln \frac{I_0}{I} + \ln B \right]$$

sendo:

$I$  - valor da taxa de exposição pretendida após passagem de radiação pela blindagem.

Para materiais cujos valores de  $\mu$  não sejam conhecidos, porém com densidade conhecida é possível obter o valor de  $\mu$  pela relação que segue:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}$$

sendo:

$\rho_1$  - densidade de um material de coeficiente de absorção  $\mu_1$ , conhecido, e

$\rho_2$  - densidade de outro material com coeficiente de absorção linear  $\mu_2$ .

## 7. CÁLCULO DE BLINDAGENS E TAXA DE EXPOSIÇÃO NA SUPERFÍCIE (Containers)

No cálculo de blindagens é fixada a intensidade de radiação na superfície, conforme as categorias e índices de transporte desejadas, sendo:

### Categoria I – Branco.

$$\dot{X} \text{ na superfície} = 0,5 \text{ mRem/h}$$

### Categoria II – Amarelo.

$$\dot{X} \text{ na superfície} = 50 \text{ mRem/h}$$

$$\dot{X} \text{ a 1,0 metro} = 1,0 \text{ mRem/h}$$

Índice de transporte = 1,0.

### Categoria III – Amarelo.

$$\dot{X} \text{ na superfície} = 200 \text{ mRem/h}$$

$$\dot{X} \text{ a 1,0 metro} = 10,0 \text{ mRem/h}$$

Índice de transporte = 10.

### ROTEIRO DE CÁLCULO:

1. Partindo de um valor inicial da camada, estimado pelo uso do método da camada semi-redutora ( $FR = 2^n$ ), estima-se a espessura do container  $x$  - calcula-se o fator de Build-Up para espessura " $x$ " estimada.

O fator de "Build-Up" é obtido em função da relaxação " $\mu x$ " para o chumbo. Ver figura 5.

2. Determina-se o Fluxo de Fótons na Superfície de Container pelo uso das equações:

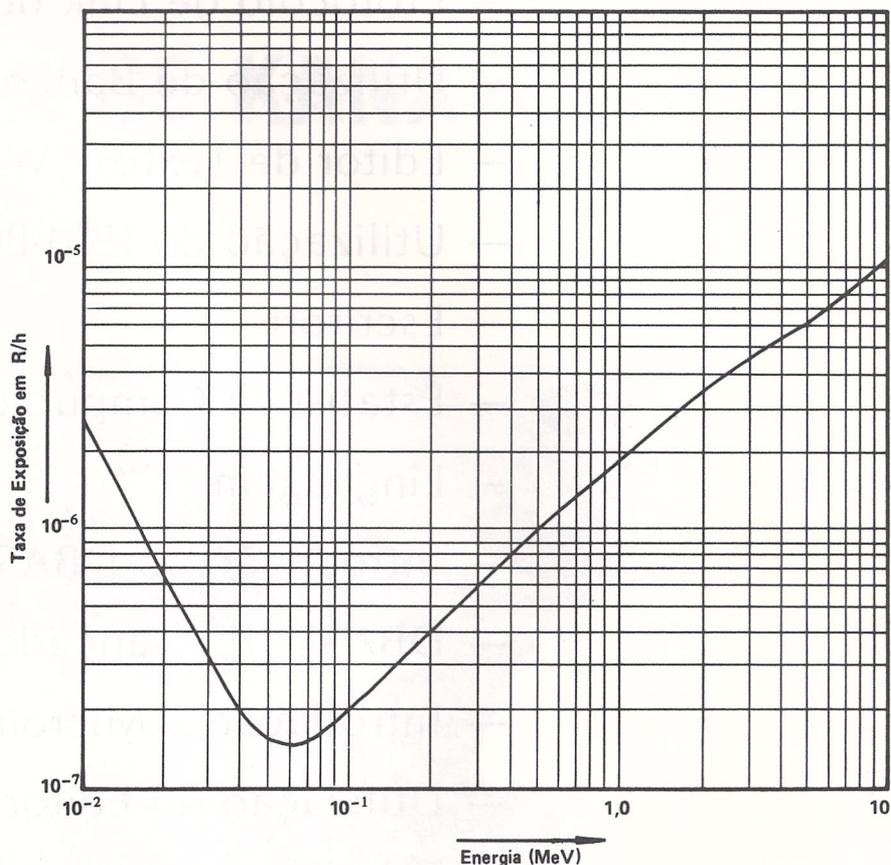
$$\phi = \phi_0 \cdot B \cdot e^{-\mu x} \text{ (em fótons gama/cm}^2 \cdot \text{seg)}$$

$$\phi = \frac{S}{4 \pi \cdot x^2}$$

$$S = 3,7 \times 10^{10} \cdot A \text{ (Ci)} \cdot n \text{ (nº fótons por desintegração)}$$

$$n \cong 2,15 \text{ para Ir}^{192} \text{ (fótons por desintegração)}$$

3. A taxa de exposição  $\dot{X}$  na superfície correspondente a este fluxo é obtida da figura 7 a seguir, que fornece a taxa de exposição em R/h para um fóton Gama/cm<sup>2</sup>.seg.



4. Pelo uso da fórmula a seguir, calcula-se a taxa de exposição na distância  $d$ .

$$\dot{X} = \frac{\dot{X}_{\text{superf.}} \cdot x^2}{(d + x^2)}$$

5. Se o valor de  $\dot{X}$  na superfície ou a 1 metro não atender as especificações, refazer o cálculo utilizando outra espessura  $x$  mais adequada.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Recommendations of the International Commission on Radiological Protection - ICRP.26 - Pergamon Press-january 17.1974.

Normas básicas de proteção radiológica CNEN - 6/73.

Norma CENEN - NE - 6.02 - out. 1984 - "Licenciamento de Instalações Radioativas".

Norma CENEN - NE - 6.04 - Licenciamento Industrial.

Material instrucional - Abende - curso de Supervisor de Proteção Radiológica - maio 1986.

Plano de Proteção Radiológica da Engisa — Inspeção e Pesquisa Aplicada à Indústria Ltda., aprovado pela Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN.