

Minicurso

CÁLCULO DE BLINDAGEM E DOSIMETRIA EM INDÚSTRIA

Prof. Luciano Santa Rita

<http://www.lucianosantarita.pro.br>

<http://facebook.com/SPR.LucianoSantaRita>

E-mail: tecnologo@lucianosantarita.pro.br

Cálculo de Blindagem e Dosimetria em Indústria

- Conteúdo programático

- Grandezas radiológicas e unidades da radiologia na indústria;
- Fatores de atenuação e condições de boa e má geometria para blindagem;
- Detectores de radiação e dosímetros pessoais;
- Fatores para um projeto de blindagem - NCRP 49.

Cálculo de Blindagem e Dosimetria em Indústria

- Bibliografia Básica

- ➔ Física e Dosimetria das Radiações - Thomaz Bitelli, 2a edição;

- Bibliografia complementar

- ➔ Notas de aula;

- ➔ Radioproteção e dosimetria: Fundamentos - Luiz Tauhata et al, <http://www.ird.gov.br>

Evolução conceitual das grandezas

- A quantificação da radiação ionizante
 - ➔ Uma das questões iniciais na utilização da radiação ionizante é como realizar uma medição de quantidades utilizando a própria radiação ou os efeitos e subprodutos de suas interações com a matéria.
- Classificação de grandezas
 - ➔ A classificação e definições usadas para as grandezas a seguir estão de acordo com ICRU* e ICRP*.

ICRU e ICRP

- A Internacional Commission on Radiation Units and Measurements, **ICRU**, fundada em 1925, cuida especialmente das grandezas básicas e das operacionais;
- A International Commission on Radiological Protection, **ICRP**, fundada em 1928, promove o desenvolvimento da radioproteção, faz recomendações voltadas para as grandezas limitantes.

Grandezas: Classificação

- de **radioatividade** — são grandezas associadas com as transformações que ocorrem em materiais radioativos: ex. Atividade (A);
- **radiométricas** — estão associadas ao campo de radiação: ex. Fluência (Φ);
- **dosimétricas** — são grandezas que definem a interação do campo de irradiação com o material: ex. Exposição (X), Kerma (K) e Dose absorvida (D);
- de **radioproteção** — são grandezas que quantificam o risco de efeitos estocásticos da irradiação no homem:
 - Limitantes — indicam o risco a saúde humana: ex. Dose equivalente (H_T), Dose efetiva (E);
 - Operacionais — levam em conta as atividades de radioproteção: ex. Equivalente de dose ambiente ($H^*(d)$), Equivalente de dose pessoal ($H_p(d)$).

Grandezas Radiológicas: Atividade

- É caracterizada pelo número desintegrações ou transformações nucleares que ocorrem em um certo intervalo de tempo, sendo proporcional ao número de átomos excitados presentes no elemento radioativo.

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad t = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln (A_0/A)$$

- A unidade no SI de atividade é o Becquerel.

→ 1 Bq = 1dps

→ *SI - Sistema Internacional de unidades.*

→ Unidade antiga Curie (Ci) → $1\text{Ci} = 37\text{GBq}$

→ Alguns múltiplos desta grandeza:

- 1 kBq (1 kilobecquerel) = 10^3 dps;
- 1 MBq (1 megabecquerel) = 10^6 dps;
- 1 GBq (1 gigabecquerel) = 10^9 dps.

Grandezas Radiológicas: Atividade

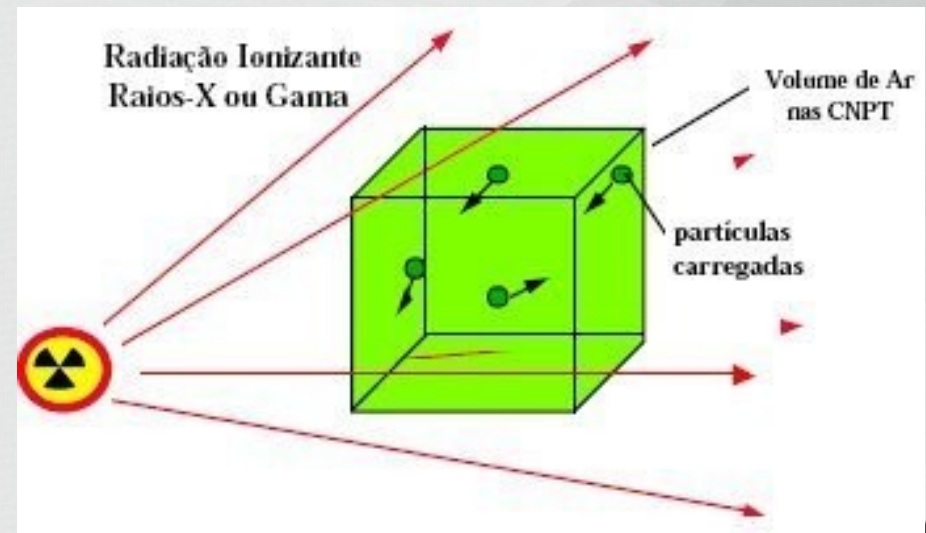
- Meia - vida ($T_{1/2}$)

- Intervalo de tempo, em que teremos no material radioativo exatamente a metade do número inicial de átomos excitados;
- Este tempo é característico de cada fonte radioativa.

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Grandezas Radiológicas: Exposição (X)

- É a soma das cargas elétricas de todos os íons de mesmo sinal (positivos ou negativos) produzidos no ar quando todos os elétrons gerados pelos fótons incidentes em uma massa são completamente freados no ar.
 - ➔ Unidade de Exposição será C/kg ou R;
 - $1R = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$.
 - ➔ Taxa de exposição;
 - $1R/h = 0,258 \text{ mC/kg.h}$.



Grandezas Radiológicas: Dose absorvida (D)

- É a energia média cedida pela radiação ionizante à matéria por unidade de massa dessa matéria;
- A unidade atual (SI) a dose absorvida é o gray (Gy):
 - $1 \text{ J} / \text{kg} = 1 \text{ gray (Gy)}$
 - *SI - Sistema Internacional de unidades.*
- Nas unidades antigas a dose era medida em rad :
 - $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$

Relação entre grandezas

- Relação entre Taxa de Dose e Atividade da fonte

$$\dot{D} = \Gamma \cdot \frac{A}{d^2}$$

- ➔ $\dot{D}$ = taxa de dose em mSv/h;
- ➔ A = atividade da fonte em GBq;
- ➔ d = distância entre fonte e ponto de medição, em metros;
- ➔ Γ = constante para taxa de dose em (mSv . m²) / (h . GBq)
 - ◆ Fonte de ¹⁹²Ir: $\Gamma = 0,13 \text{ mSv.m}^2/\text{h.GBq}$

Relação entre grandezas

- Relação entre Taxa de Dose e Exposição *

$$D_{ar} = X \cdot \frac{W_{ar}}{e}$$

- ➔ D_{ar} = dose absorvida no ar (Gy)
- ➔ X = exposição no ar (C/kg);
- ➔ W_{ar} = energia necessária para a formação de um par de íons no ar;
- ➔ e = carga do elétron;
 - $(W_{ar}/e) = 33,97 \text{ J/C}$;
- ➔ $D_{ar}(\text{rad}) = 0,876 \cdot X (\text{R})$
 - * *Em condições de equilíbrio eletrônico (CPE) e sem atenuação no ar.*

Grandezas Radiológicas: Dose Equivalente (H_T)

- É o valor médio da dose absorvida $D_{T,R}$ num tecido ou órgão T, obtido sobre todo tecido ou órgão T, devido a radiação R;

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R}$$

- A unidade atual a dose equivalente é o sievert (Sv) ;
- w_R é o fator de ponderação da radiação;
- Nas unidades antigas a dose era medida em rem :
 - $1\text{Sv} = 100 \text{ rem}$

Grandezas Radiológicas: Dose Equivalente (H_T)

- Fator de ponderação de radiação w_R

TIPO DE RADIAÇÃO E ENERGIA	w_R
Fótons de todas as energias	1
Elétrons de todas as energias	1
Nêutrons de energia E :	
$E < 10 \text{ keV}$	5
$10 \text{ keV} \leq E \leq 100 \text{ keV}$	10
$100 \text{ keV} \leq E \leq 2 \text{ MeV}$	20
$E > 20 \text{ MeV}$	10
Prótons (exceto os de retrocesso) $E > 2 \text{ MeV}$	5
Partículas alfa, fragmentos de fissão, núcleos pesados	20

Grandezas Radiológicas: Dose Efetiva (E)

- É a soma ponderada das doses equivalentes em todos os tecidos ou órgãos do corpo;

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T$$

- A unidade atual a dose efetiva é o sievert (Sv) ;
- w_T é o fator de ponderação para o tecido;
- Nas unidades antigas a dose era medida em rem :
 - $1\text{Sv} = 100 \text{ rem}$

Grandezas Radiológicas: Dose Efetiva (E)

- Fator de ponderação para tecido ou órgão w_T

TECIDO OU ÓRGÃO	w_T	
	ICRP 26	ICRP 60
Gônadas	0,25	0,20
Medula óssea (vermelha)	0,12	0,12
Cólon	-	0,12
Pulmão	0,12	0,12
Estômago	-	0,12
Bexiga	-	0,05
Mama	0,15	0,05
Fígado	-	0,05
Esôfago	-	0,05
Tireóide	0,03	0,01
Pele	-	0,01
Superfície óssea	0,03	0,01
Restantes*	0,30	0,05

Limites de dose

Limites de <i>Dose</i> Anuais [a]			
Grandeza	Órgão	<i>Indivíduo ocupacionalmente exposto</i>	<i>Indivíduo do público</i>
<i>Dose efetiva</i>	Corpo inteiro	20 mSv [b]	1 mSv [c]
<i>Dose equivalente</i>	Cristalino	150 mSv	15 mSv
	Pele [d]	500 mSv	50 mSv
	Mãos e pés	500 mSv	---

[a] Para fins de *controle administrativo* efetuado pela *CNEN*, o termo *dose* anual deve ser considerado como *dose* no ano calendário, isto é, no período decorrente de janeiro a dezembro de cada ano.

[b] Média ponderada em 5 anos consecutivos, desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano.

[c] Em circunstâncias especiais, a *CNEN* poderá autorizar um valor de *dose efetiva* de até 5 mSv em um ano, desde que a *dose efetiva* média em um período de 5 anos consecutivos, não exceda a 1 mSv por ano.

[d] Valor médio em 1 cm² de área, na região mais irradiada.

Exercícios

- 1) Com relação a unidade de atividade de uma fonte radioativa, podemos dizer:
- (a) $37\text{GBq} = 1\text{Ci}$
 - (b) $1\text{Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ d.p.s}$
 - (c) $1\text{Bq} = 1 \text{ d.p.s}$
 - (d) **Todas as alternativas estão corretas**
- 2) A dose absorvida de um órgão ou tecido exposto a $2,58 \times 10^{-2} \text{ C/kg}$ de radiação gama, será aproximadamente:
- (a) $0,01\text{Gy}$
 - (b) **1Gy**
 - (c) 1Sv
 - (d) 100R
- 3) A dose equivalente de uma pessoa exposta a $2,58 \times 10^{-2} \text{ C/kg}$ de radiação gama, será aproximadamente:
- (a) $0,01\text{Gy}$
 - (b) 1Gy
 - (c) **1Sv**
 - (d) 100R

Exercícios

- 1) Uma fonte radioativa apresenta neste momento uma atividade de 42 Ci, qual a atividade da mesma em GBq dentro de 04 meses, sendo que a meia vida é de 40 dias?
- 2) Uma equipe de trabalho operará uma fonte de Ir - 192 durante 16 meses. Sabendo que o trabalho exige uma fonte com atividade mínima de 455 GBq e que a fonte utilizada apresenta uma atividade (no início do trabalho) de 80 Ci, após quantos meses será necessário substituir a fonte ? ($T_{1/2} = 74,4$ dias)
- 3) Uma fonte de Ir-192 com atividade de 24 Ci será utilizada na realização de END para a aferição de juntas soldadas. A que distância a taxa de dose será reduzida para 1mSv/h? (Sabendo que para o Ir-192: $\Gamma = 0,13$ mSv.m²/h.GBq)
- 4) O valor de exposição medida por monitor de radiação apresenta o valor de 5mR. Qual o valor aproximado da dose absorvida em rad? Qual o valor da dose absorvida na unidade do SI?

Exercícios - Respostas

- ➔ Resposta 1: $A = A_0 \times e^{-\lambda \cdot t} \Rightarrow t_{1/2} = 0,693 / \lambda \rightarrow 0,0173$
 - $A = 1554 \times e^{-0,0173 \times 120} \Rightarrow A = 1554 \times 0,1254 \Rightarrow A = 194,87 \text{ GBq}$
- ➔ Resposta 2: $t = (1 / \lambda) \times \ln (A_0 / A_f)$ e $T_{1/2} = 0,693 / \lambda$
 - $t = (1 / 0,0093) \times \ln (2960 / 455) \Rightarrow$
 - $t = 1,8726 / 0,0093 \Rightarrow t = 201 \text{ dias} = t = 6,7 \text{ meses}$
- ➔ Resposta 3: $D = \Gamma \times A / d^2 \rightarrow 1 = 0,13 \times (24 \times 37) / d^2$
 - $d^2 = 115,44$
 - $d = 10,74 \text{ m}$
- ➔ Resposta 4: $D = 0,876 \cdot 5 \times 10^{-3} = 4,38 \text{ mrad}$
 - $D = 4,38 \times 10^{-3} \cdot 10^{-2} = 43,8 \mu\text{Gy}$

Exercícios

- 5) Suponha que uma pessoa seja exposta, homogeneamente, a um campo de raios X (energia média de 100keV) com uma exposição total de 27R, responda (unidades do SI):
- i. Qual o valor da dose absorvida? **Resposta: 236,5mGy**
 - ii. Qual o valor da dose equivalente? **Resposta: 236,5mSv**
 - iii. Qual o valor da dose efetiva? (irradiação do corpo inteiro $w_T = 1$)
- 6) Um grupo de IOE foi exposto a um campo de raios X resultando em uma dose absorvida de 2mGy. O mesmo grupo de IOE também foi exposto a uma fonte emissora de partículas alfa resultando em uma dose absorvida de 2mGy, responda (unidades do SI):
- i. Quais os valores de dose equivalente em função do campo de raios X e da fonte emissora de partícula alfa? **Resposta: RX = 2mSv e alfa = 40mSv**
 - ii. Caso os valores do item anterior forem diferentes, explique por que.

Exercícios

- 1) Uma fonte radioativa apresenta neste momento uma atividade de 52 Ci, qual a atividade da mesma em GBq dentro de 08 meses, sendo que a meia vida é de 40 dias?
- 2) Uma equipe de trabalho operará uma fonte de Se-75 durante 16 meses. Sabendo que o trabalho exige uma fonte com atividade mínima de 455 GBq e que a fonte utilizada apresenta uma atividade (no início do trabalho) de 80 Ci, após quantos meses será necessário substituir a fonte ? ($T_{1/2} = 119,78$ dias)
- 3) Uma fonte de Se-75 com atividade de 24 Ci será utilizada na realização de END para a aferição de juntas soldadas. A que distância a taxa de dose será reduzida para 1mSv/h? (Sabendo que para o Se-75: $\Gamma = 0,053$ mSv.m²/h.GBq)
- 4) O valor de exposição medida por monitor de radiação apresenta o valor de 3,7mR. Qual o valor aproximado da dose absorvida em rad? Qual o valor da dose absorvida na unidade do SI?

Exercícios

5. Qual será a taxa de dose efetiva a 5 m de distância de uma fonte de Ir-192 com atividade de 400 GBq que está sendo utilizada na realização de END em um duto?
6. Uma fonte de Ir-192 com atividade de 1250 GBq será utilizada na realização de END para a aferição de juntas soldadas. A que distância a taxa de dose será reduzida para 4 mSv / h ?
7. Qual a dose efetiva em mSv, recebida por um grupo de trabalhadores expostos durante 2 horas às radiações devido a uma fonte de Ir - 192 com 222 GBq de atividade , numa distância de 4 metros ?

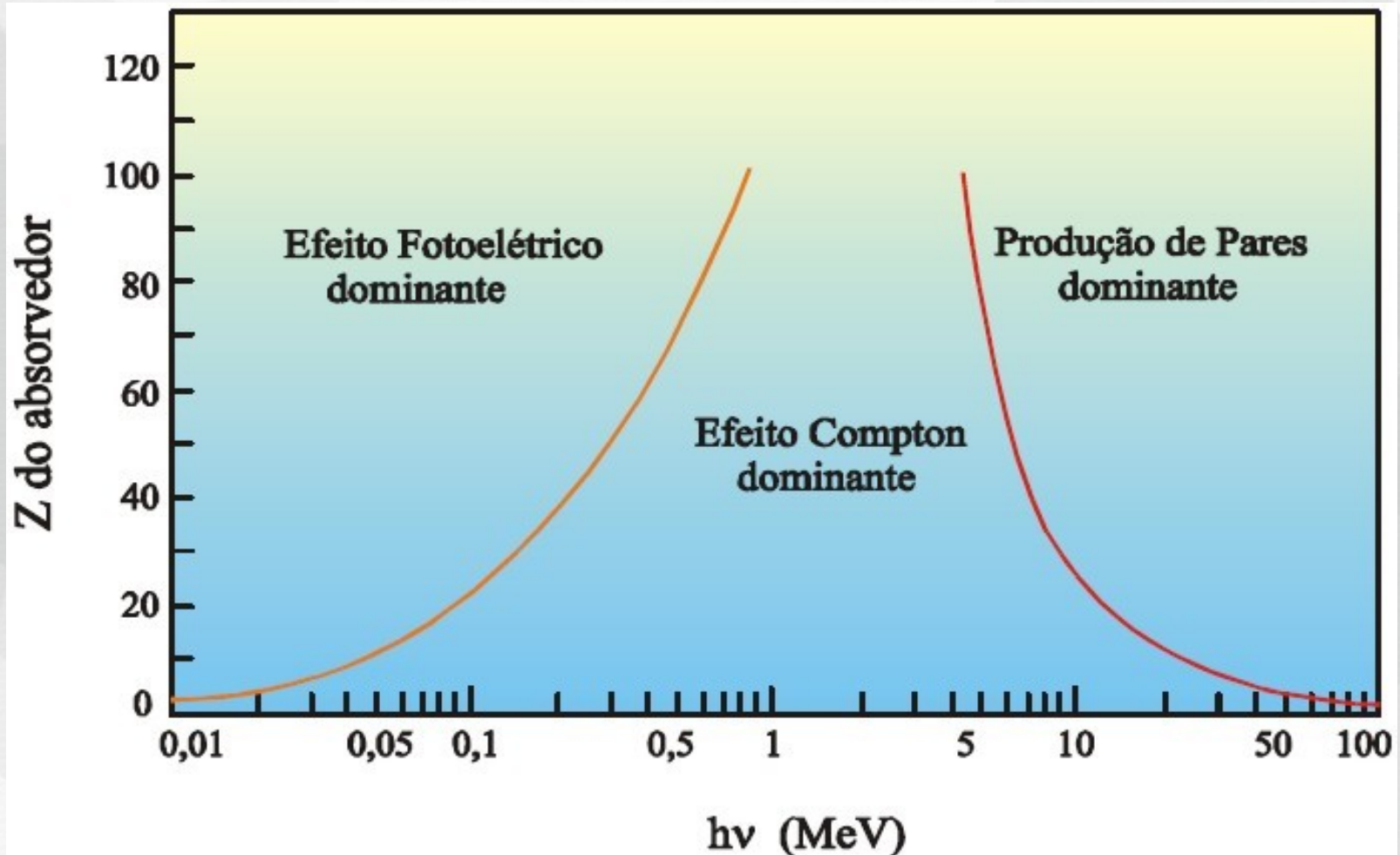
Exercícios

- 8) Suponha que uma pessoa seja exposta, homogeneamente, a um campo de raios X (energia média de 100keV) com uma exposição total de $6,97 \times 10^{-3} \text{C/kg}$, responda (unidades do SI):
- i. Qual a dose absorvida, sabendo que $(W_{\text{ar}}/e) = 33,97 \text{J/kg}$?
 - ii. Qual a dose equivalente (H_T) recebida?
 - iii. Se apenas os pulmões fossem expostos aos $6,97 \times 10^{-3} \text{C/kg}$, qual seria sua dose efetiva?

Interação da radiação eletromagnética com a matéria

- A interação da radiação X e gama com a matéria faz-se através de diversos processos físicos. Estes processos são a difusão elástica de *Rayleigh*, o efeito fotoelétrico, a difusão de *Compton* e a criação de pares elétron-pósitron, sendo que a probabilidade de ocorrência de cada um destes processos depende essencialmente da energia fóton e do tipo de material atravessado.

Interação da radiação eletromagnética com a matéria



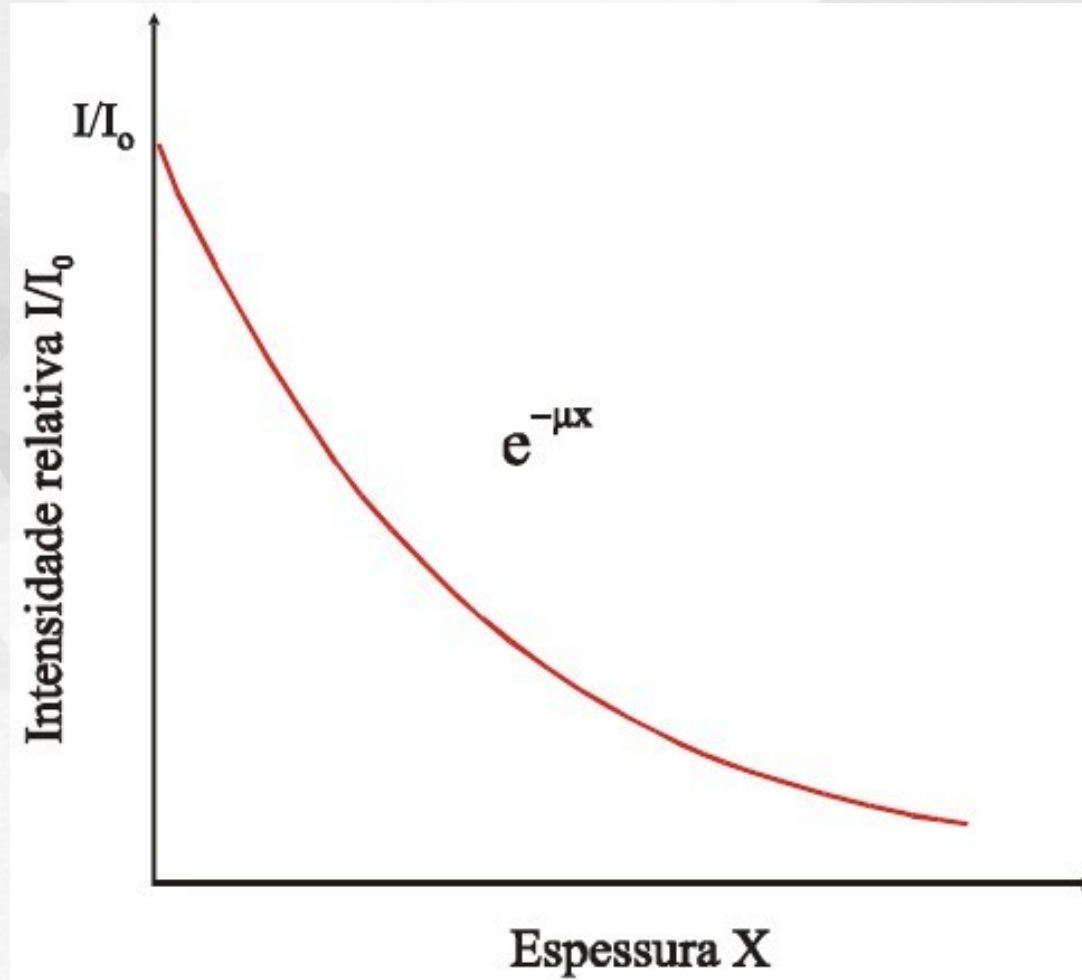
Interação da radiação eletromagnética com a matéria

- A relação entre a intensidade inicial de um feixe de fótons I_0 que atravessa um meio material segundo uma determinada direção e a intensidade I após ter atravessado uma espessura x é dada por

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

- em que μ é o coeficiente linear de atenuação total.

Interação da radiação eletromagnética com a matéria



Coeficiente de atenuação linear (μ)

- Quanto maior a espessura de um material, maior a quantidade de radiação que ela absorve, ou seja, menor a intensidade do feixe que atravessa o material;
- Como a absorção obedece a uma lei exponencial, a intensidade diminui, porém nunca se anula completamente;
- A capacidade de absorção varia de material para material. Isso se explica através de coeficiente de absorção “ μ ”, que é uma característica de cada material e representa a probabilidade, por unidade de comprimento, de que o fóton seja removido do feixe (por absorção ou espalhamento).

Coeficiente de atenuação linear (μ)

Energia (MeV)	Alumínio (cm^{-1})	Chumbo (cm^{-1})	Concreto (cm^{-1})	Aço (cm^{-1})	Urânio (cm^{-1})	Tijolo (cm^{-1})
0,102	0,444	60,2	0,390	2,700	19,82	0,369
0,150	0,362	20,87	0,327	1,437	45,25	0,245
0,200	0,358	5,00	0,29	1,08	21,88	0,200
0,300	0,278	4,00	0,25	0,833	8,45	0,169
0,409	0,247	2,43	0,224	0,720	4,84	0,149
0,500	0,227	1,64	0,204	0,65	3,29	0,135
0,600	0,210	1,29	0,189	0,600	2,54	0,125
0,800	0,184	0,95	0,166	0,52	1,78	0,109
1,022	0,165	0,772	0,150	0,460	1,42	0,098
1,250	0,148	0,620	0,133	0,410	1,00	0,088
1,500	0,136	0,588	0,121	0,380	0,800	0,080
2,000	0,177	0,504	-	-	-	-

Nota: os valores desta tabela podem variar, em função da literatura consultada.

Ir-192

Co-60

Coeficiente de atenuação linear (μ)

- Exemplo: Alumínio e Chumbo

- ➡ Chumbo ($Z = 82$ e $\rho = 11,348 \text{ g/cm}^3$)

- ➡ Alumínio ($Z = 13$ e $\rho = 2,78 \text{ g/cm}^3$),

- ➡ Para uma radiação de energia aproximadamente $0,409 \text{ MeV}$, o coeficiente “ μ ” de atenuação do chumbo é dez vezes mais elevado que a do alumínio, para esta faixa de energia;

- Mesma espessura: alumínio absorve menos que chumbo.

Camada semirredutora (CSR ou HVL)

- Um conceito importante no cálculo de blindagem é o de camada semirredutora, que corresponde à espessura necessária para reduzir a intensidade do feixe à metade do valor inicial, estando relacionada com o coeficiente de atenuação linear μ .
- Quando $I = I_0 / 2$, pode ser facilmente demonstrado que

$$CSR = \ln 2 / \mu$$

Camada décimo redutora (CDR ou TVL)

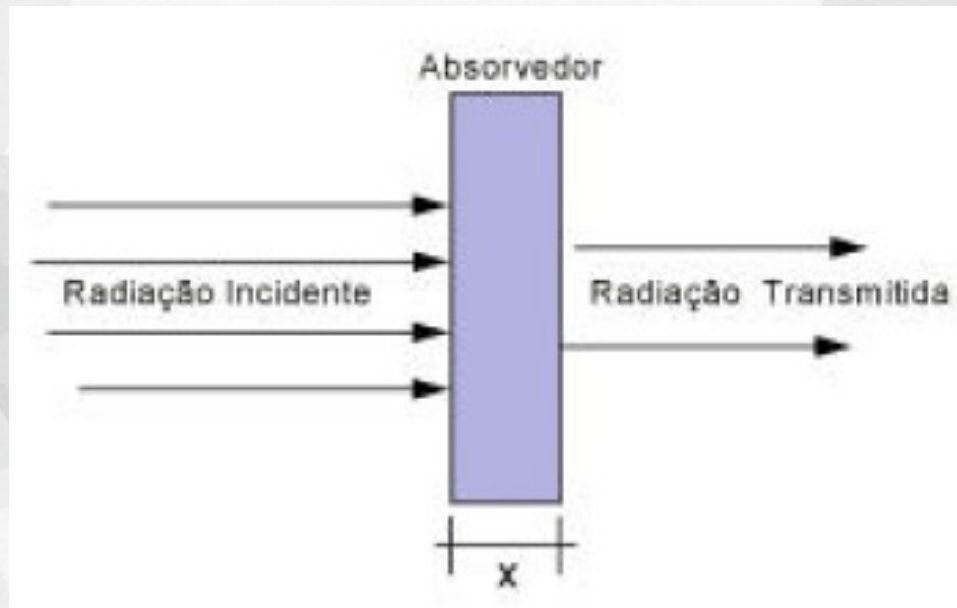
- A Camada décimo Redutora (CDR) é a espessura necessária para atenuar em 1/10 o feixe de fótons incidentes, é também muito utilizada no cálculo de espessura de blindagem.

FONTE DE RADIAÇÃO	Alumínio 2,3 g/cm ³ (cm)		Chumbo 12 g/cm ³ (cm)		Concreto 2,3 g/cm ³ (cm)		Aço 7,8 g/cm ³ (cm)	
	HVL	TVL	HVL	TVL	HVL	TVL	HVL	TVL
Raios X 100 kVp	10,24	34,00	0,026	0,087	1,65	5,42	-	-
Raios X 200 kVp	2,20	7,32	0,043	0,142	2,59	8,55	-	-
Raios X 250 kVp *	-	-	0,088	0,29	0,28	0,94	-	-
Raios X 300 kVp *	-	-	0,147	0,48	0,31	1,04	-	-
Raios X 400 kVp *	-	-	0,25	0,83	0,33	1,09	-	-
Iridio 192	3,66	12,16	0,55	1,90	4,30	14,00	1,30	4,30
Cobalto 60	5,36	17,80	1,10	4,00	6,30	20,30	2,00	6,70
Césio 137	4,17	13,85	0,65	2,20	4,90	16,30	1,60	5,40

Fonte: IAEA , Manual on Gamma Radiography , e NCRP

* valores aproximados obtidos para voltagem de pico de um tubo direcional para uso médico

Cálculo de barreiras para radiação gama



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

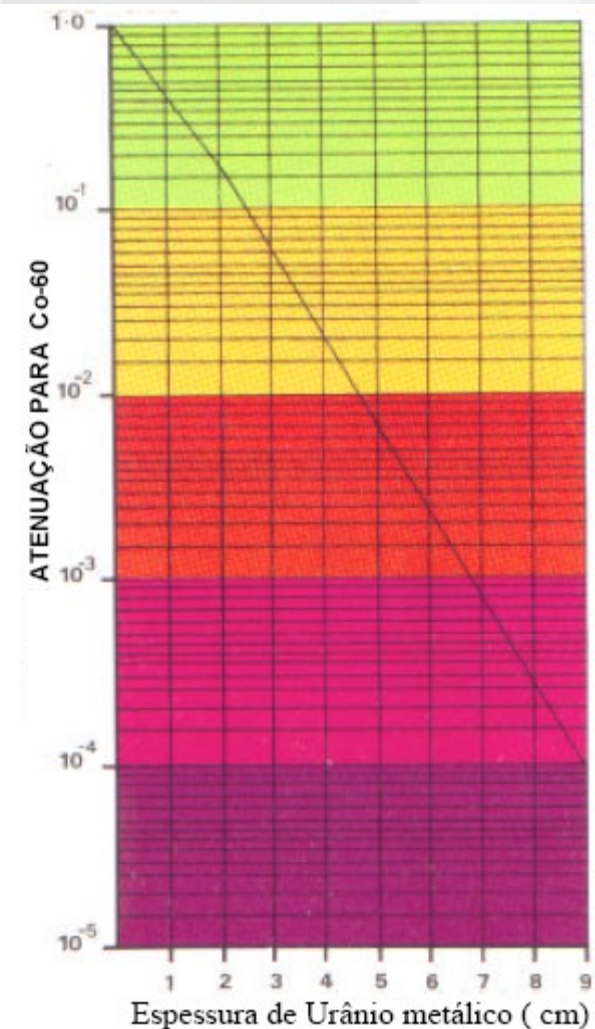
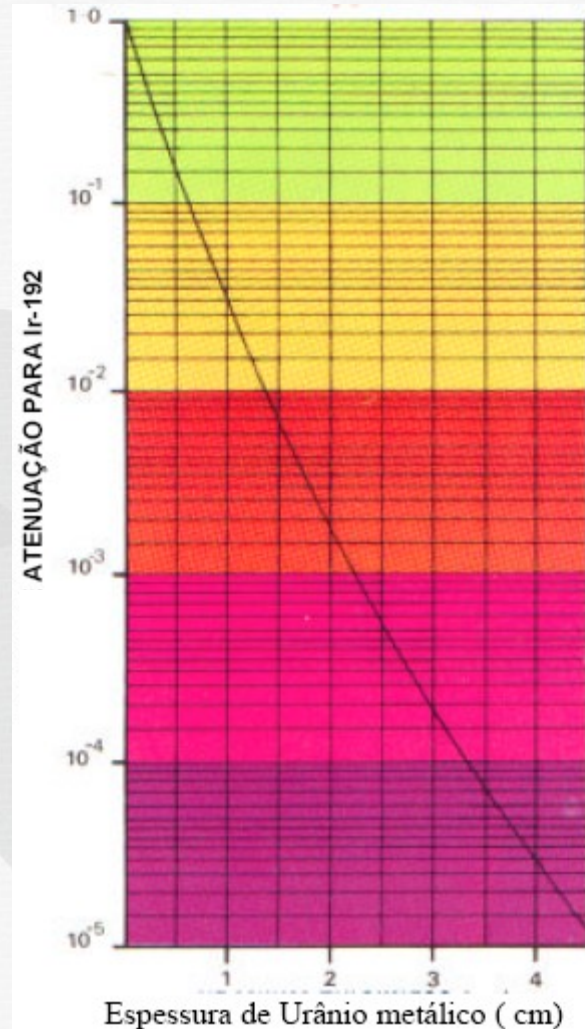
$$X = 1 / \mu \cdot \ln (I_0 / I)$$

Exercícios

- 1)Determine a espessura da barreira de concreto que deverá ser colocada a 2 m de uma fonte puntiforme de ^{192}Ir de 75 Ci de atividade para reduzir a taxa de exposição a $25 \mu\text{R/h}$. Dados $\mu = 0,224 \text{ cm}^{-1}$.
- 2)Calcule a exposição acumulada num ponto a 20 cm de uma fonte puntual de ^{131}I de atividade 15 mCi, após 2 horas. Qual será o valor da exposição se a distância for aumentada para 50 cm? Qual o valor de dose absorvida aproximada? ($\Gamma = 0,22 \text{ R.m}^2/\text{h.Ci}$)
- 3)Calcular a que distância de uma fonte de Ir-192 de 10 Ci, a taxa de dose é de $100 \mu\text{Sv/h}$. Refaça o cálculo para uma fonte de Se-75 de mesma atividade.
- 4)Calcular a espessura necessária de uma parede de concreto para proteger operários contra uma taxa de dose superior a $25\mu\text{Sv/h}$ de uma fonte de cobalto-60 de 30 Ci, situada a 3,5 metros. Dados: $\mu = 0,121 \text{ cm}^{-1}$

Fator de redução ou atenuação

- Outro parâmetro empregado para estimar a espessura do material de blindagem é o Fator de Redução ou atenuação (FR) definido pela relação: $FR = I_0 / I$.



Exercício - Gráficos

- Construa o gráfico de atenuação de um determinado material em papel semi log, a partir dos valores abaixo:

Espessura (cm)	Atenuação (FR)	I/I_0
1	5	0,200
4	50	0,020
7	200	0,005
9	500	0,002
13	1000	0,001

Fator de redução ou atenuação

- Cálculo do fator de redução (FR)

$$FR = \frac{I_0}{I} \rightarrow FR = 10^n = 2^m$$

- Onde,

- I_0 = intensidade inicial do feixe
- I = intensidade atenuada do feixe
- n = número de camadas decirredutoras (TVL)
- m = número de camadas semirredutoras (HVL)

Fator de redução ou atenuação

- Conhecendo-se um fator de redução FR, a espessura de blindagem pode ser obtida por:

$$n = \log (FR) \rightarrow x = n \cdot TVL$$

- ou

$$m = \log (FR) / \log (2) \rightarrow x = m \cdot HVL$$

- onde x é a espessura do material de blindagem.

Exercício

- Para a realização de um ensaio não destrutivo (END) com uma fonte de ^{192}Ir , é necessário a construção de uma blindagem de concreto que seja capaz de reduzir a intensidade inicial do feixe de fótons da fonte em 6 vezes. Qual a espessura de concreto necessária para a blindagem?

Exercício - Resposta

→ Resposta :

$$\rightarrow FR = I_0/I \rightarrow FR = 6$$

$$\rightarrow n = \log (FR) \rightarrow n = \log (6) \rightarrow n = 0,78$$

$$\rightarrow x = n \cdot TVL^* \rightarrow x = 0,78 \cdot 14,00 \rightarrow x = 10,92 \text{ cm}$$

** valor de TVL tabelado. Ver no slide 33.*

Fator de crescimento (Build up)

- A partir da atenuação exponencial da radiação eletromagnética por um material, pode-se supor que os fótons espalhados pelas interações são completamente removidos do feixe transmitido, na direção de incidência.
- No entanto isso só ocorre no caso de feixe colimado e com espessura fina de material absorvedor, requisitos de uma boa geometria.

(Tauhata, 2006)

Fator de crescimento (Build up)

- Em geral, uma grande parcela dos fótons espalhados reincide na direção do detector e contribui para o feixe transmitido, alterando o comportamento exponencial da atenuação do feixe.
- Essa contribuição aditiva representa efetivamente um crescimento da intensidade do feixe em relação ao valor esperado.

(Tauhata, 2006)

Fator de crescimento (Build up)

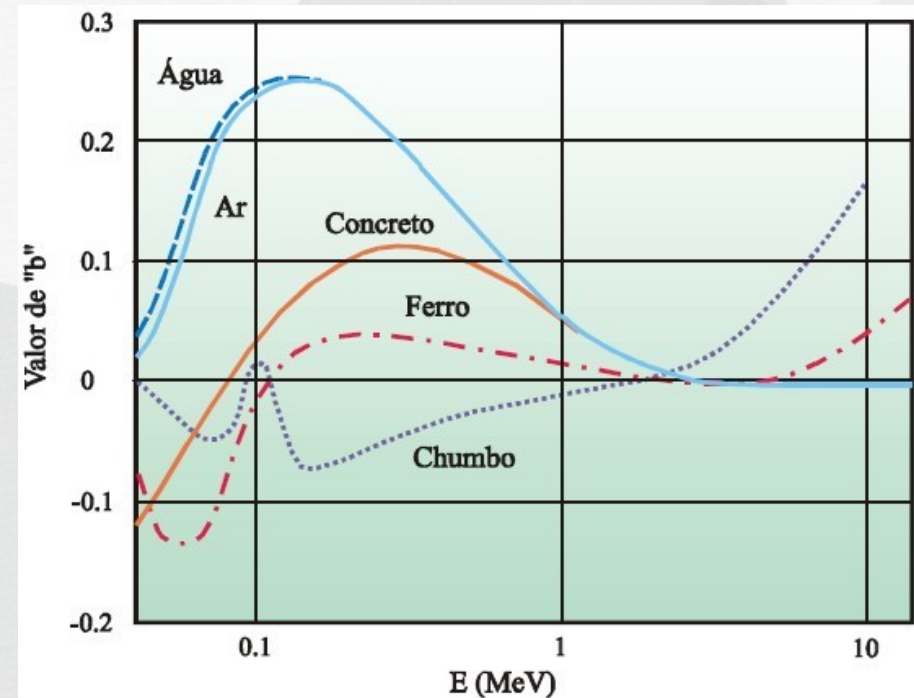
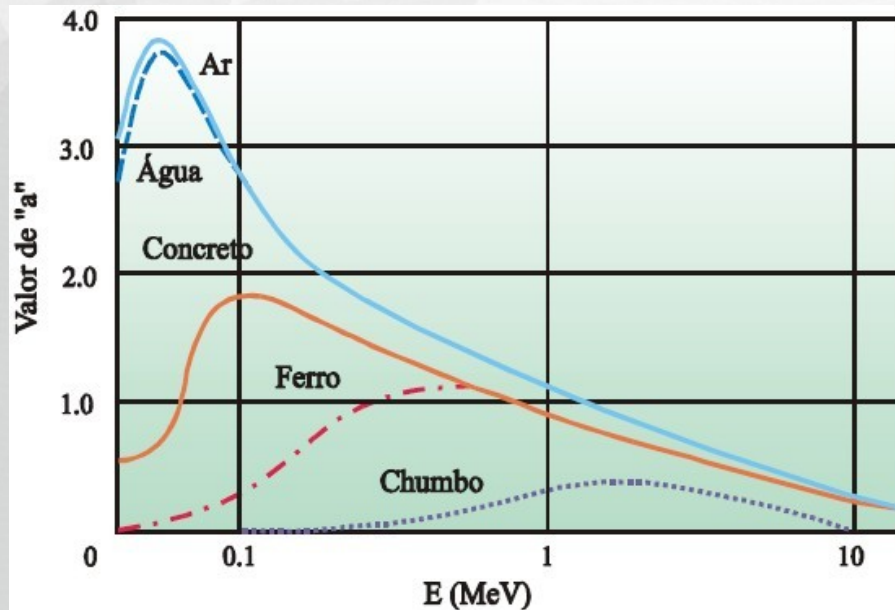
- A diferença pode ser corrigida por um fator denominado fator de crescimento (fator de build up) que depende da energia da radiação, do material de blindagem e da sua espessura. (*Tauhata, 2006*)
- A lei de atenuação pode ser escrita como:
 - ➔ $I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \cdot B(\mu x)$
 - ➔ Condição de boa geometria $\rightarrow B(\mu x) = 1$.

Cálculo de barreiras para radiação gama em condição de má geometria

- Para se calcular a espessura de barreiras em condição de “má-geometria”, deve-se, antes, determinar o fator de build-up.
- A lei de atenuação pode ser escrita como:
 - ➔ $I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \cdot B(\mu x)$;
 - ➔ $x = 1/\mu \cdot [\ln(I_0/I) + \ln(B)]$ e $x = 1/\mu \cdot [\ln(X_0/X) + \ln(B)]$
 - ➔ Onde o fator $B(\mu x)$ depende de μ e da espessura x , podendo ser estimado, com boa aproximação por fórmulas semi-empíricas como a de Berger.
 - ♦ $B(\mu x) = 1 + a\mu \cdot x \cdot e^{b\mu x}$
 - ♦ onde os parâmetros a e b são obtidos em gráficos, em função da energia da radiação e do tipo do material.

(Tauhata, 2006)

Cálculo de barreiras para radiação gama em condição de má geometria

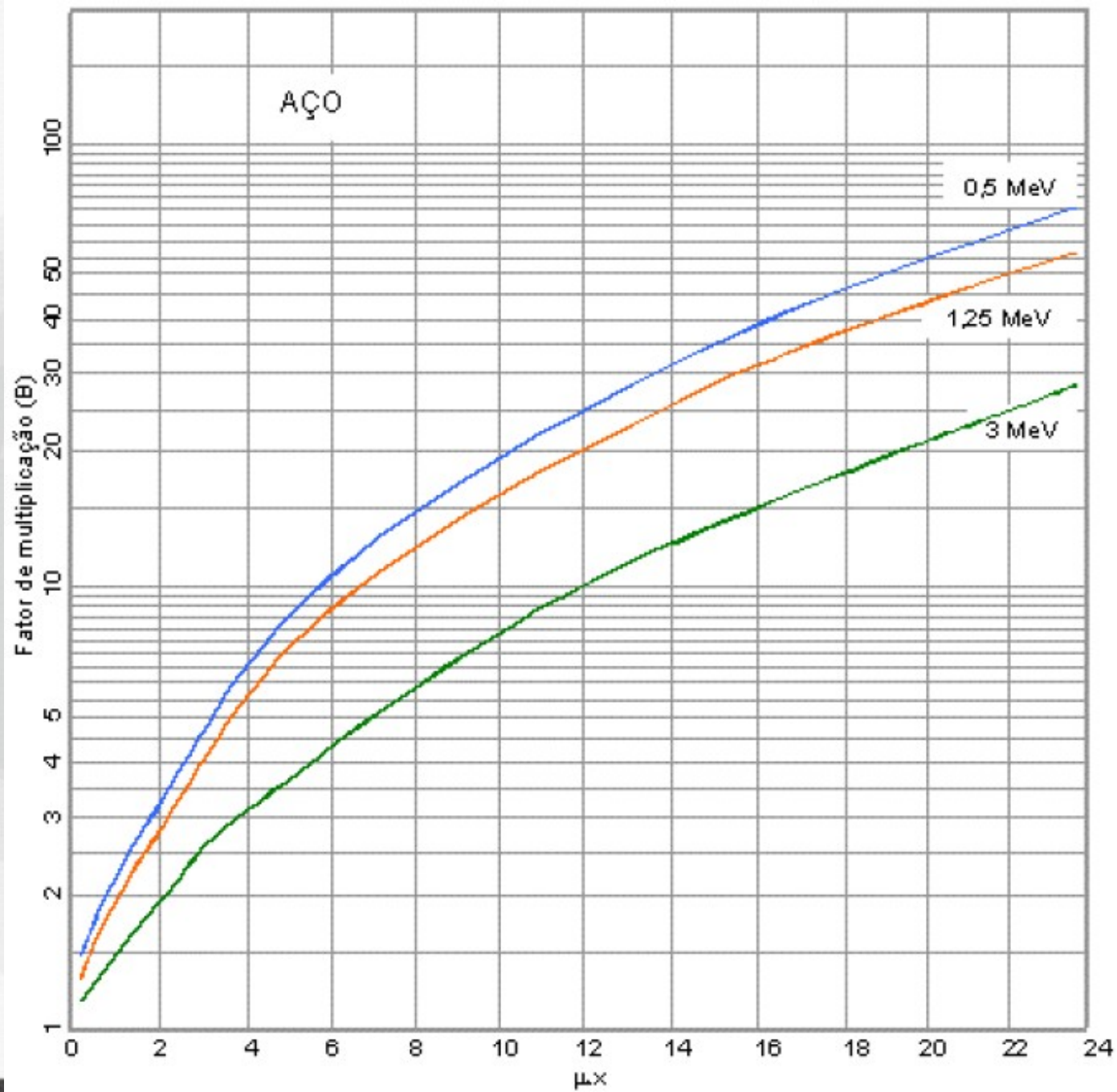


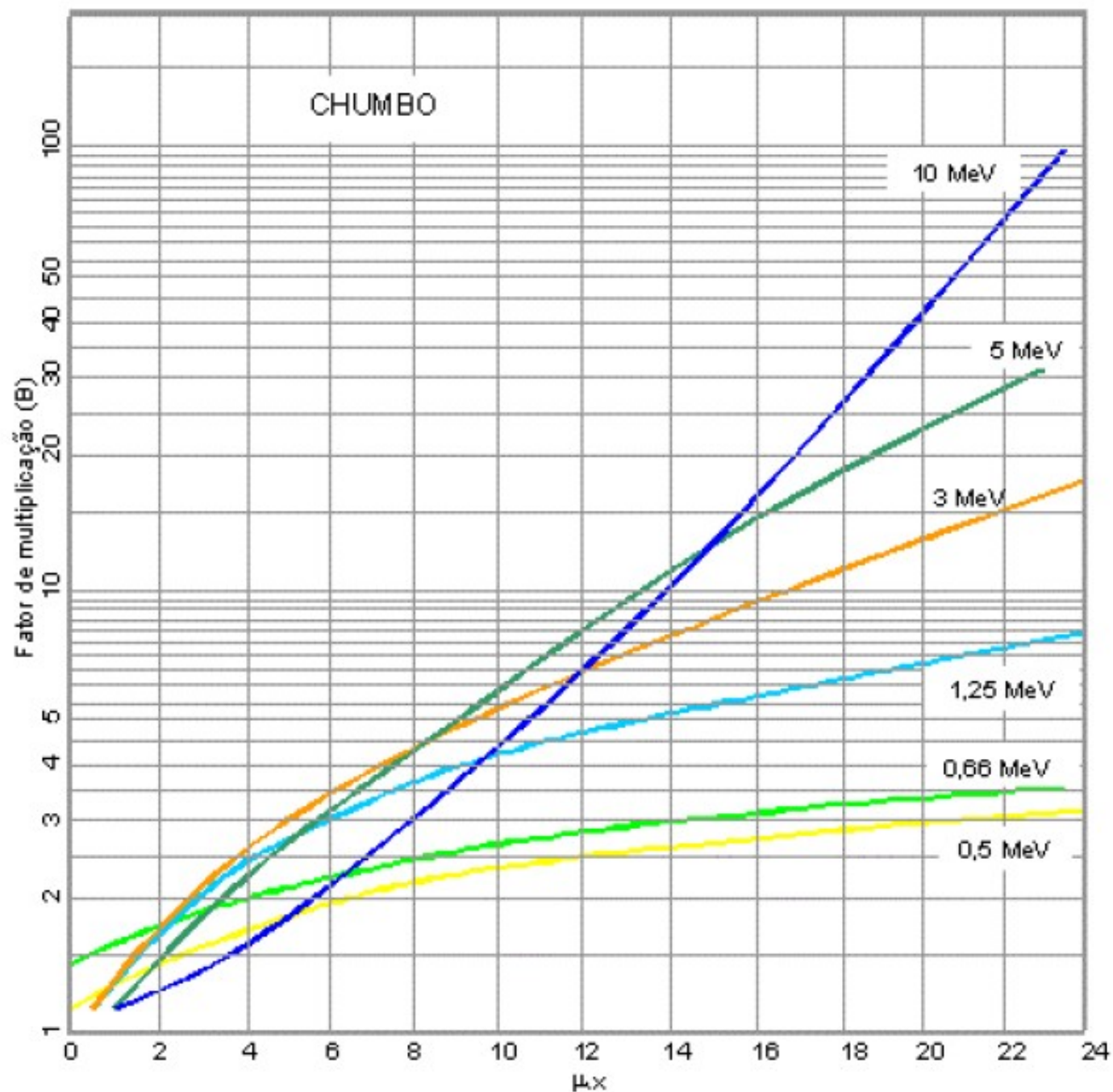
- Valores dos parâmetros "a" e "b" em função da energia da radiação da fórmula de Berger para o cálculo do fator de Build up.

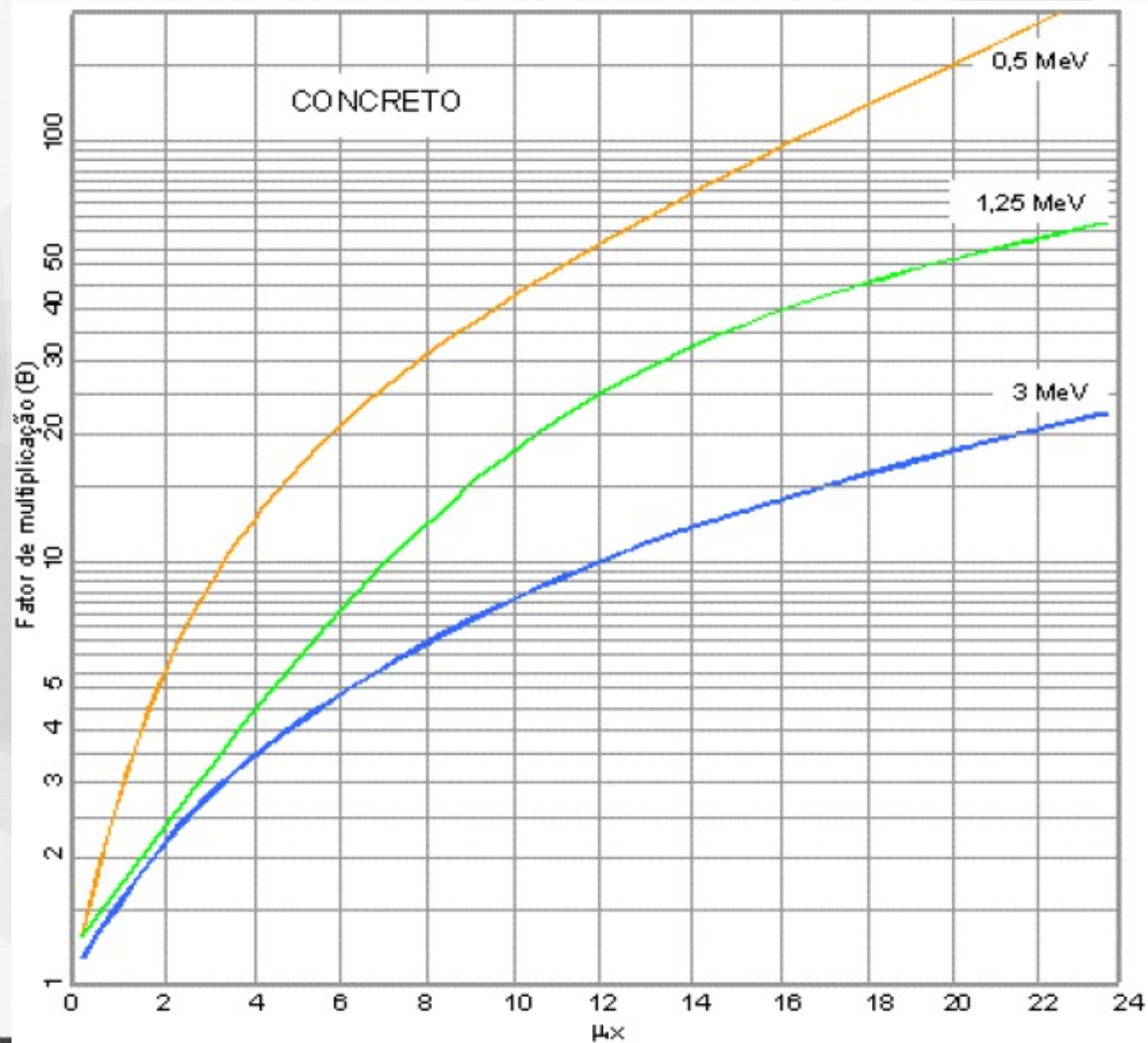
(Tauhata, 2006)

Cálculo de barreiras para radiação gama em condição de má geometria

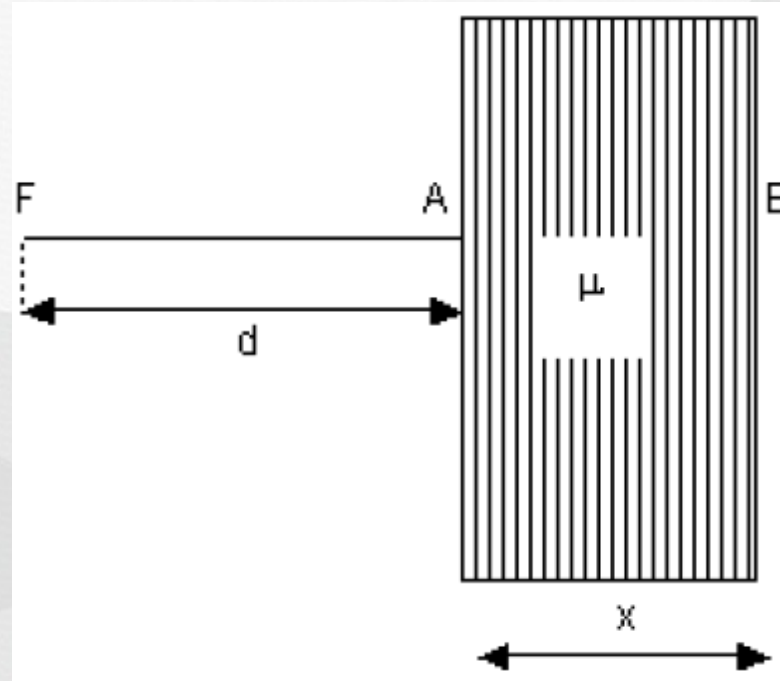
- Os próximos gráficos fornecem o valor de build-up em função de $\mu.x$, para valores de energia média do feixe de radiação e da natureza do material absorvedor.







Barreiras de espessura não desprezível



- Quando a espessura $x = AB$ da barreira não é desprezível em relação à distância $d = FA$ entre a fonte puntual F e um ponto A , deve-se acrescentar uma correção a expressão de redução da intensidade do feixe (slide 27).

Barreiras de espessura não desprezível

- Pela lei do inverso do quadrado da distância, pode-se estabelecer que:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{d^2}{(d+x)^2} \Rightarrow I = I_0 \cdot \frac{d^2}{(d+x)^2}$$

- Se se considera, porém, x como sendo a espessura de um material absorvedor ou atenuador de coeficiente μ , então a expressão anterior é acrescida do termo $e^{-\mu \cdot x}$:

$$I = I_0 \cdot \frac{d^2}{(d+x)^2} \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

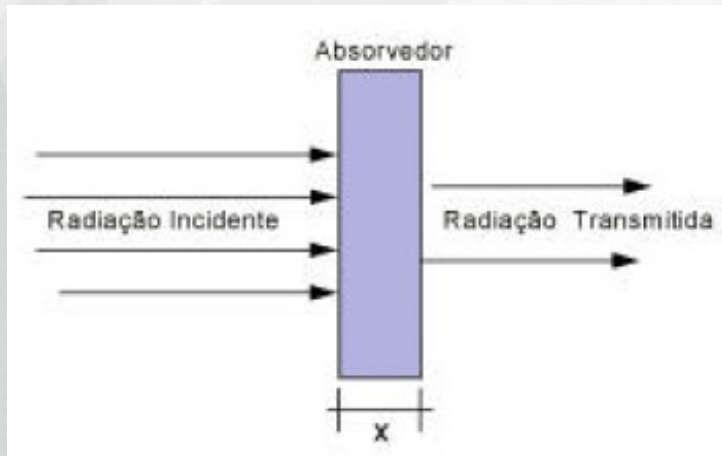
$$\frac{I}{I_0} \cdot e^{\mu \cdot x} = \left(\frac{d}{d+x} \right)^2$$

$$\frac{\dot{X}}{\dot{X}_0} \cdot e^{\mu \cdot x} = \frac{d^2}{(d+x)^2}$$

Cálculo de barreiras para radiação gama em condição de boa geometria

- Condição de uma boa geometria: Fonte puntiforme
 - ➔ Uma fonte é dita puntiforme em relação a um dado ponto de interesse se a distância entre ambos é muito maior que a maior dimensão da fonte. No caso do feixe de radiação emitido por uma fonte puntiforme ser estreito, isto é, colimado, o fator de build-up é igual à unidade ($B = 1$). Esta é, então, denominada condição de “boa-geometria”. *Se o feixe é largo, a condição é dita ser de “má-geometria”*. Neste caso, torna-se obrigatória a determinação do fator de build-up.

Cálculo de barreiras para radiação gama em condição de boa geometria



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

$$X = 1 / \mu \cdot \ln (I_0 / I)$$

- Sendo a taxa de exposição $\dot{X}$ diretamente proporcional a intensidade de radiação I:

$$x = \frac{1}{\mu} \cdot \ln \left| \frac{\dot{X}_0}{\dot{X}} \right|$$

$$\dot{X} = \Gamma \frac{A}{d^2} \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

$$\dot{X} = \dot{X}_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

$$\frac{\dot{X}_1}{\dot{X}_2} = \frac{(d_2)^2}{(d_1)^2}$$

Cálculo de barreiras para radiação gama em condição de boa geometria

- Abaixo os valores da constante de exposição (Γ) para alguns radionuclídeos:

Nuclídeo	Γ (R.m ² /h.Ci)
Iodo-131	0,22
Cs-137	0,33
Ra-226	0,83
Tc-99m	0,12
Co-60	1,32
Ir-192	0,48
Se-75	0,15

Exercícios

- 1)Determine a espessura da barreira de concreto que deverá ser colocada a 2 m de uma fonte puntiforme de ^{192}Ir de 50 Ci de atividade para reduzir a taxa de exposição a 2,5 mR/h. Dados $\mu = 0,224 \text{ cm}^{-1}$ e $B=1$.
- 2)Calcule a exposição acumulada num ponto a 20 cm de uma fonte puntual de ^{131}I de atividade 10 mCi, após 2 horas. Qual será o valor da exposição se a distância for aumentada para 50 cm? Qual o valor de dose absorvida aproximada? *Ver slide 10 e 12.*
- 3)Calcular a que distância de uma fonte de Ir-192 de 10 Ci, a taxa de exposição é de 100 mR/h. Refaça o cálculo para uma fonte de Se-75 de mesma atividade.
- 4)Calcular a espessura necessária de uma parede de concreto para proteger operários contra uma taxa de exposição superior a 2,5 mR/h de uma fonte de cobalto-60 de 30 Ci, situada a 3,5 metros. Dados: $\mu = 0,121 \text{ cm}^{-1}$

Exercícios

- 5) Determine a espessura da barreira de concreto que deverá ser colocada a 2 m de uma fonte puntiforme de ^{192}Ir de 50 Ci de atividade para reduzir a taxa de exposição a 2,5 mR/h. Dados: $\mu = 0,224\text{cm}^{-1}$; $B = 1$
- 6) Determine a espessura da barreira de concreto que deverá ser colocada a 2 m de uma fonte puntiforme de ^{75}Se de 70 Ci de atividade para reduzir a taxa de exposição a 2,5 mR/h. Dados: $\mu = 0,224\text{cm}^{-1}$; $B = 1$

** para estes dois exercícios considere que a espessura da barreira não é desprezível.
Ver slides 43 e 44*

Cálculo de barreiras para radiação gama em condição de má geometria

- Exemplo

- ➔ Determine a espessura das paredes de concreto de um bunker (casamata) para serviço de gamagrafia com uma fonte puntiforme de ^{60}Co de 30 Ci de atividade. Sabe-se que a distância mínima entre a fonte e a parede mais próxima não será menor que 3 m e que a taxa de exposição externamente ao bunker não poderá exceder a 2,5 mR/h. Dados: $\Gamma = 1,35 \text{ R.m}^2/\text{h.Ci}$; $\mu = 0,133\text{cm}^{-1}$; $E_\gamma = 1,25 \text{ MeV}$

Cálculo de barreiras para radiação gama em condição de má geometria

- Exemplo- Resposta

- ➔ $X_0 = \Gamma \cdot A/d^2 \rightarrow X_0 = 1,35 \cdot 30/3^2 \rightarrow X_0 = 4,5 \text{ R/h}$

- ➔ Espessura não corrigida:

- $x = 1/\mu \cdot \ln[X_0/X]$

- $x = (1/0,133) \cdot \ln[4,5/2,5 \times 10^{-3}]$

- $x = (1/0,133) \cdot 7,496$

- $x = 56,4 \text{ cm}$

- continua

Cálculo de barreiras para radiação gama em condição de má geometria

- Exemplo- Resposta

- ➔ 1ª correção da espessura - $B(\mu x)$:

- $\mu x = 0,133.56,4 = 7,5$
 - no gráfico slide 55 $\rightarrow B \approx 13$
 - $x = 1/\mu \cdot [\ln(X_0/X) + \ln(B)]$
 - $x = 56,4 + [(1/0,133) \cdot \ln(13)]$
 - $x = 56,4 + [(1/0,133) \cdot 2,565]$
 - $x = 56,4 + 19,3$
 - $x = 75,7 \rightarrow x \approx 76 \text{ cm}$
 - continua

Cálculo de barreiras para radiação gama em condição de má geometria

- Exemplo- Resposta

➔ 2ª correção - Espessura de blindagem não desprezível:

x (cm)	μx	B	$(X \cdot e^{\mu x}) / (X_0 \cdot B)$	$[d / (d + x)]^2$
72	9,6	17	0,437	0,657
74	9,8	18	0,557	0,643
75	10,0	19	0,644	0,640
76	10,1	19	0,712	0,637

➔ Após a 2ª correção:

➤ x = 75 cm

➤ Para o valor de B utilizar gráfico slide 55.

Atividade campo AV1

- 1) Uma fonte radioativa apresenta neste momento uma atividade de 63 Ci, qual a atividade da mesma em GBq dentro de 07 meses, sendo que a meia vida é de 55 dias?
- 2) Uma equipe de trabalho operará uma fonte de Ir - 192 durante 13 meses. Sabendo que o trabalho exige uma fonte com atividade mínima de 642 GBq e que a fonte utilizada apresenta uma atividade (no início do trabalho) de 134 Ci, após quantos meses será necessário substituir a fonte ? ($T_{1/2} = 74,4$ dias)
- 3) Uma fonte de Ir-192 com atividade de 16 Ci será utilizada na realização de END para a aferição de juntas soldadas. A que distância a taxa de dose será reduzida para 0,5mSv/h? (Sabendo que para o Ir-192: $\Gamma = 0,13 \text{ mSv.m}^2/\text{h.GBq}$)
- 4) O valor de exposição medida por monitor de radiação apresenta o valor de 2,5mR. Qual o valor aproximado da dose absorvida em rad? Qual o valor da dose absorvida na unidade do SI?
- 5) Suponha que uma pessoa seja exposta, a um campo homogêneo de raios X com uma exposição total de 7R, responda (unidades do SI):
 - i. Qual o valor da dose absorvida?
 - ii. Qual o valor da dose equivalente?
 - iii. Qual o valor da dose efetiva? (irradiação do corpo inteiro $w_T = 1$)

Atividade campo AV1

- 6) Um grupo de IOE foi exposto a um campo de raios X resultando em uma dose absorvida de 1,3mGy. O mesmo grupo de IOE também foi exposto a uma fonte emissora de partículas alfa resultando em uma dose absorvida de 1,3mGy, responda (unidades do SI):
- Quais os valores de dose equivalente em função do campo de raios X e da fonte emissora de partícula alfa?
 - Caso os valores do item anterior forem diferentes, explique por que.
- 7) Uma fonte radioativa apresenta neste momento uma atividade de 17 Ci, qual a atividade da mesma em GBq dentro de 07 meses, sendo que a meia vida é de 32 dias?
- 8) Uma equipe de trabalho operará uma fonte de Se-75 durante 12 meses. Sabendo que o trabalho exige uma fonte com atividade mínima de 235 GBq e que a fonte utilizada apresenta uma atividade (no início do trabalho) de 76 Ci, após quantos meses será necessário substituir a fonte ? ($T_{1/2} = 119,78$ dias)
- 9) Uma fonte de Se-75 com atividade de 17 Ci será utilizada na realização de END para a aferição de juntas soldadas. A que distância a taxa de dose será reduzida para 0,3mSv/h? (Sabendo que para o Se-75: $\Gamma = 0,053 \text{ mSv.m}^2/\text{h.GBq}$)
- 10) Uma fonte de Ir-192 com atividade de 1170 GBq será utilizada na realização de END para a aferição de juntas soldadas. A que distância a taxa de dose será reduzida para 3 mSv / h ?

Atividade campo AV1

- 11) Qual a dose efetiva em mSv, recebida por um grupo de trabalhadores expostos durante 15 minutos às radiações devido a uma fonte de Ir - 192 com 222 GBq de atividade, numa distância de 4 metros?
- 12) Suponha que uma pessoa seja exposta, homogeneamente, a um campo de raios X com uma exposição total de $5,16 \times 10^{-3} \text{C/kg}$, responda (unidades do SI):
- i. Qual a dose absorvida, sabendo que $(W_{\text{ar}}/e) = 33,97 \text{J/kg}$?
 - ii. Qual a dose equivalente (H_T) recebida?
 - iii. Se apenas o estômago fosse exposto aos $5,16 \times 10^{-3} \text{C/kg}$, qual seria sua dose efetiva?
- 13) Para a realização de um ensaio não destrutivo (END) com uma fonte de ^{60}Co , é necessário a construção de uma blindagem de concreto que seja capaz de reduzir a intensidade inicial do feixe de fótons da fonte em 6 vezes. Qual a espessura de concreto necessária para a blindagem?
- 14) Determine a espessura da barreira de concreto que deverá ser colocada a 1,6 m de uma fonte puntiforme de ^{60}Co de 39 Ci de atividade para reduzir a taxa de exposição a 2,5 mR/h. Dados $\mu = 0,224 \text{cm}^{-1}$ e $B=1$.

Atividade campo AV1

- 15) Calcular a espessura necessária de uma parede de concreto para proteger operários contra uma taxa de exposição superior a 2,5 mR/h de uma fonte de cobalto-60 de 19 Ci, situada a 2,7 metros. Dados: $\mu = 0,121 \text{ cm}^{-1}$
- 16) Determine a espessura da barreira de concreto que deverá ser colocada a 2 m de uma fonte puntiforme de ^{75}Se de 58 Ci de atividade para reduzir a taxa de exposição a 2,5 mR/h. Dados: $\mu = 0,224 \text{ cm}^{-1}$; $B = 1$
- 17) Determine a espessura das paredes de concreto de um bunker (casamata) para serviço de gamagrafia com uma fonte puntiforme de ^{60}Co de 120 Ci de atividade. Sabe-se que a distância mínima entre a fonte e a parede mais próxima não será menor que 2 m e que a taxa de exposição externamente ao bunker não poderá exceder a 2,5 mR/h. Dados: $\Gamma = 1,35 \text{ R.m}^2/\text{h.Ci}$; $\mu = 0,133 \text{ cm}^{-1}$; $E_\gamma = 1,25 \text{ MeV}$

Detectores de radiação ionizante

- Princípios de operação dos detectores de radiação;
- Detecção utilizando detectores à gás;
- Detecção utilizando detectores cintiladores;
- Detecção utilizando dosímetros de leitura direta e indireta;
- Calibração dos instrumentos de medição.

Detectores de radiação ionizante

- É um dispositivo que, colocado em um meio onde exista um campo de radiação, é capaz de indicar a sua presença.
- Existem diversos processos pelos quais diferentes radiações podem interagir com o meio material utilizado para medir ou indicar características dessas radiações.
- Entre esse processos os mais utilizados são os que envolvem a geração de cargas elétricas, a geração de luz, a sensibilidade de películas fotográficas, a criação de traços (buracos) no material, a geração de calor e alterações da dinâmica de certos processos químicos.
- Normalmente a detecção da radiação é obtida através do elemento ou material sensível à radiação (o detector) e um sistema que transforma esses efeitos em um valor relacionado a uma grandeza de medição dessa radiação.

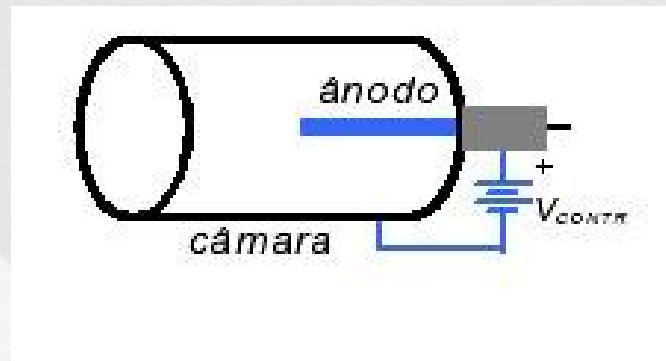
Detectores de radiação ionizante

- Propriedades de um detector

- ➔ **Repetitividade** - grau de concordância dos resultados obtidos sob as mesmas condições de medição;
- ➔ **Reprodutibilidade** - grau de concordância dos resultados obtidos em diferentes condições de medição;
- ➔ **Estabilidade** - aptidão em conservar constantes suas características de medição ao longo do tempo;
- ➔ **Precisão** - grau de concordância dos resultados entre si, normalmente expresso pelo desvio padrão em relação a média;
- ➔ **Sensibilidade** - razão entre a variação da resposta de um instrumento e a correspondente variação do estímulo;
- ➔ **Eficiência** - capacidade de converter em sinais de medição os estímulos recebidos.

Detecção utilizando detectores à gás

- Propriedades de um detector
 - Câmara metálica (cheia de gás), que faz papel do cátodo, e um fio positivamente polarizado, que serve de ânodo.
 - A radiação ionizante gera pares de íons que são coletados no filamento central e uma corrente elétrica ou pulso é gerado e medido por um circuito externo.



Regiões de operação de um detector à gás



Tipos de detectores à gás

- Câmara de ionização

- A corrente gerada é função do nº de interações com os fótons incidentes sendo influenciada pela energia da radiação incidente.

- Contador proporcional

- O sinal gerado é função do nº de interações com os fótons e partículas multiplicado por um fator constante. Existe uma proporcionalidade entre a energia da partícula incidente e o número de íons coletados.

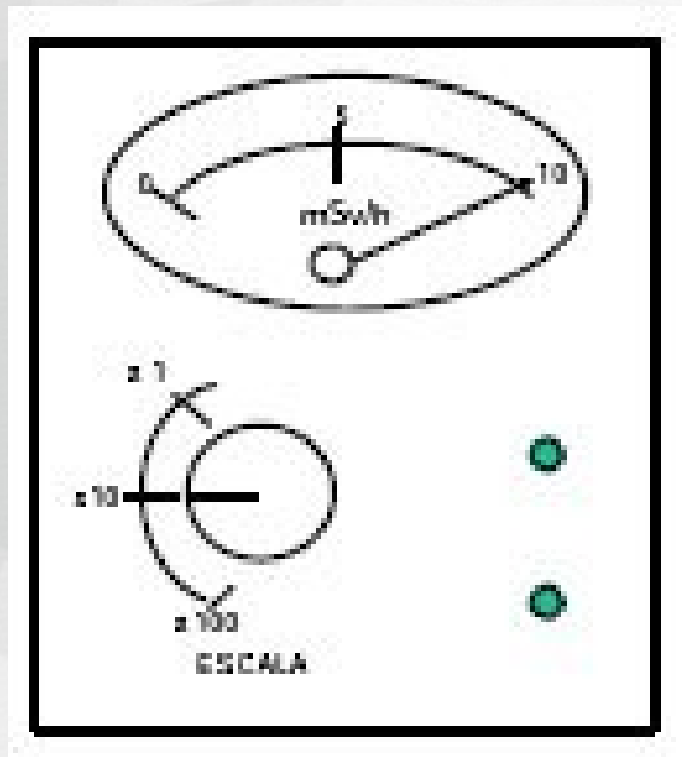
- Geiger-Müller

- O sinal de saída é função de uma avalanche de elétrons gerados a partir da interação inicial, sendo independente da mesma, não sendo possível discriminar a radiação incidente.

Detectores à gás – Tipo Geiger-Müller (GM)

- Os detectores Geiger-Müller (GM) foram introduzidos em 1928 e em função de sua simplicidade, baixo custo, e facilidade de operação e manutenção, são utilizados até hoje;
- Apesar de versáteis na detecção de diferentes tipos de radiação, não permitem a discriminação do tipo de radiação e nem de sua energia;
- São utilizados para detecção de radiação gama e raios X e também de partículas carregadas (α e β) com tanto que o detector possua janelas com material fino, permitindo a passagem destas radiações;
- Os detectores GM podem ser utilizados para estimar grandezas como dose e exposição, utilizando artifícios de instrumentação e metrologia.

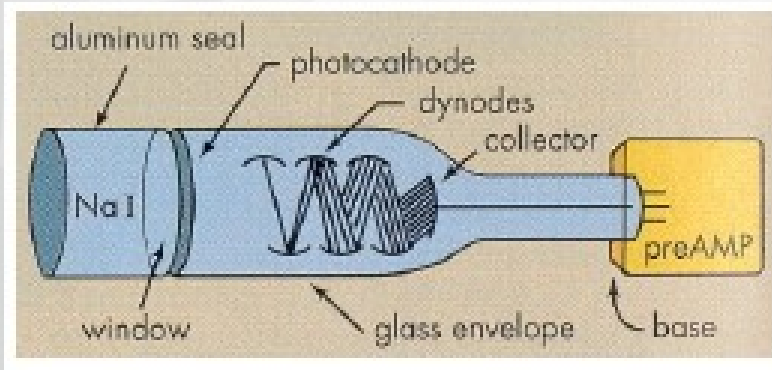
Detectores à gás – Tipo Geiger-Müller (GM)



Detecção utilizando cintiladores

- Alguns materiais emitem luz quando irradiados chamamos esta luz de cintilação.
- A medida da luz emitida por cintiladores irradiados só foi possível após a descoberta das válvulas fotomultiplicadoras, em 1947.
- Usados em conjunto, cintilador e fotomultiplicadora, o detector é capaz de medir taxas de contagens de radiação ionizante.
- Estes detectores podem ser considerados os mais eficientes na medida de raios γ e raios X em função de sua alta sensibilidade e eficiência.
- A grande vantagem do cintilador é que a luz produzida é proporcional a energia do fóton incidente e consequentemente o pulso produzido pela fotomultiplicadora, o que permite a discriminação de fótons de energias diferentes.

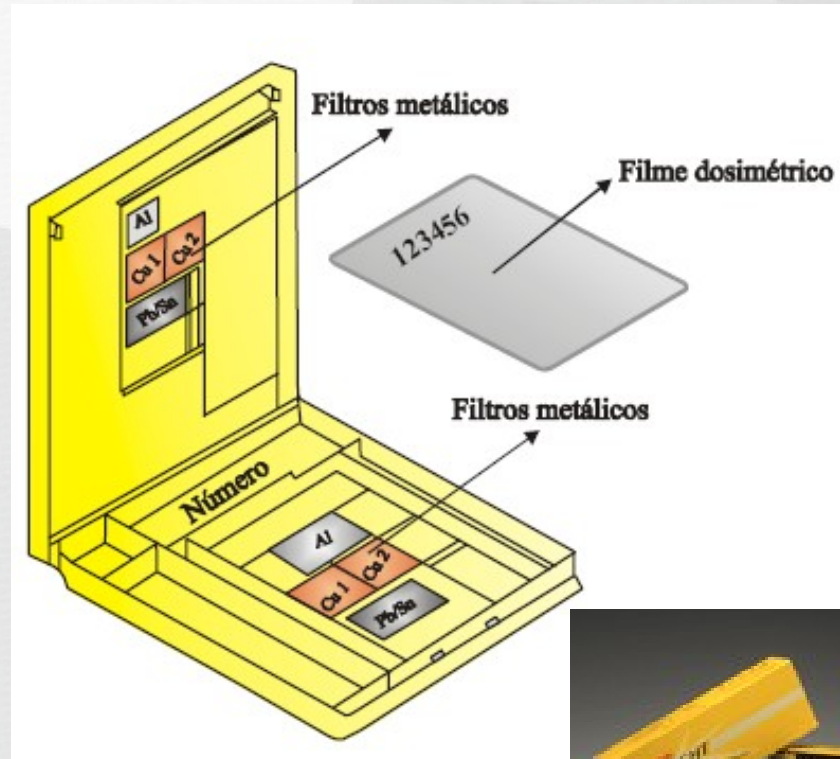
Detecção utilizando cintiladores



Detecção utilizando dosímetros

- Dosímetros são monitores de radiação que reproduzem dose efetiva ou equivalente;
- Baseiam-se em materiais que a radiação induz alterações físicas ou químicas (filme dosimétrico, TLD), que posteriormente serão medidas através de um determinado processo;
- Podem ser classificados como de leitura indireta, acumulam os efeitos da interação da radiação para posterior leitura (ex.: TLD, filmes dosimétricos) ou de leitura direta que possibilitam a visualização imediata das interações ocorridas (ex.: caneta dosimétrica e dosímetros eletrônicos).

Dosímetros de leitura indireta



Dosímetros de leitura direta



Calibração dos instrumentos de medição

- Por causa das propriedades e efeitos biológicos das radiações ionizantes, os resultados das medições das chamadas grandezas radiológicas devem ser extremamente confiáveis;
- Os detectores, principalmente os utilizados em condições de campo, sofrem alterações em seu funcionamento e devem ser calibrados com uma periodicidade, definida em norma dos órgãos reguladores, para garantir a manutenção de suas propriedades de medição;
- A calibração dos detectores é feita comparando-se suas características de medição com aparelhos padrões nacionais, sob condições rigorosamente controladas;
- Essas condições são estabelecidas nos laboratórios da rede de calibração, os quais são rastreados ao sistema internacional de metrologia.

Calibração dos instrumentos de medição

- Calibração dos instrumentos de medição das radiações ionizantes (Rio de Janeiro)

- ➔ Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD) - Laboratório de Dosimetria Padrão Secundário (IAEA, WHO 1976)

- ♦ Tipos de detectores: a gás, cintiladores* e semicondutor*

- ♦ <http://ird.gov.br>

- *pode-se desenvolver metodologias de calibração*

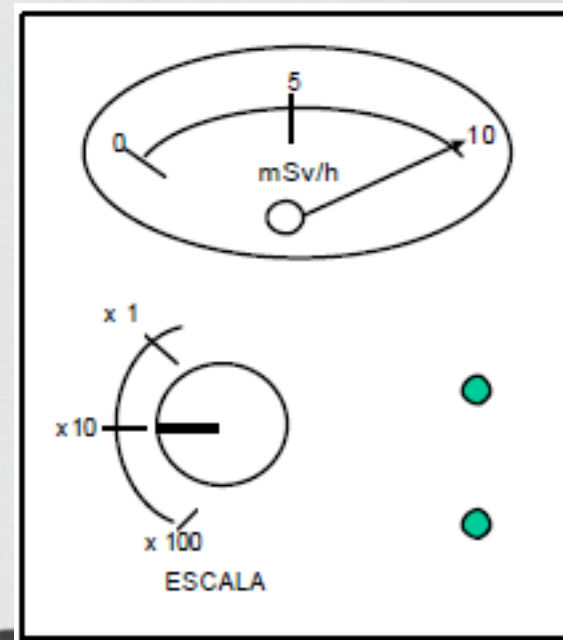
- ➔ Laboratório de Ciências Radiológicas (LCR - UERJ)

- ♦ Tipos de detectores: a gás;

- ♦ <http://www.lcr.uerj.br>

Exercícios

- 1) Durante um levantamento radiométrico o medidor de radiação apresentou a leitura conforme indicado na figura abaixo. Que procedimento o operador deverá tomar diante da resposta do detetor ?
- a) o seletor de escalas deverá ser ajustado na posição $\times 1$
 - b) o seletor de escalas deverá ser ajustado na posição $\times 10$
 - c) o seletor de escalas deverá ser ajustado na posição $\times 100$
 - d) nenhuma das anteriores.



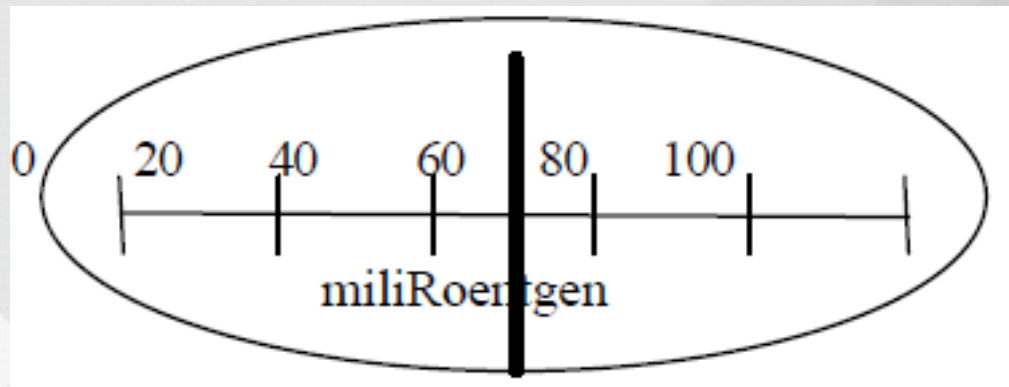
Exercícios

2) Qual a taxa de exposição indicada pelo detector da questão 01 ?

- a) 100 mSv/h.
- b) 10 mSv/h
- c) 1 mSv/h
- d) 1000 mSv/h

3) A figura abaixo representa um dosímetro de leitura direta marcando a dose recebida por um operador. Qual a dose registrada ?

- a) 70 mR/h
- b) 70 R/h
- c) 70 mR
- d) 700 mR



Exercícios

- 4) O detetor de radiação que utiliza mistura gasosa sob pressão dentro de um tubo metálico, e sua resposta não depende da energia das radiações eletromagnéticas incidentes, tampouco da pressão e temperatura, é denominado:
- a) câmara de ionização
 - b) detetor G.M
 - c) Cintilador
 - d) TLD
- 5) Uma empresa deve realizar um serviço de radiografia industrial numa área sem blindagens ou paredes de proteção, onde o nível de radiação medido na posição dos operadores é de 50 $\mu\text{Sv/h}$. Considerando as doses máximas recomendadas, para efeito de planejamento, quantas horas por mês os operadores poderão trabalhar?

Fatores para um projeto de blindagem – NCRP 49 e atualizações

- Em 1969 nos USA criou-se o *National Council on Radiation Protection and Measurements* (NCRP) que iniciou a publicação de relatórios onde foram descritas algumas recomendações específicas para a proteção de salas radiológicas.
- Estas recomendações detalhavam aspectos de construção dos ambientes, como as características das portas e cantos, bem como as formas como materiais protetores que não o chumbo deviam ser marcados, levando em consideração a energia da radiação utilizada na medição da equivalência em chumbo.
- Na década de 80 a publicação NCRP 49 tornou-se referência para os cálculos de barreiras.

Fatores para um projeto de blindagem – NCRP 49

- O NCRP 49 trata dos requisitos práticos e da metodologia para o cálculo de barreiras protetoras para salas onde ocorre a emissão de radiação para fins médicos.
- Basicamente, a metodologia apresentada neste relatório consiste em se calcular a espessura, em chumbo ou concreto, de barreiras protetoras contra a radiação primária e/ou secundária (espalhada pelo paciente e radiação de fuga) de fontes de raios X ou gama.

Fatores para um projeto de blindagem – NCRP 49 e atualizações

- Para cada ponto e parede deve-se apresentar as espessuras mínimas de blindagem para feixe primário, para fuga pelo cabeçote e para espalhamento.
- Para a porta deve-se descrever o material de blindagem e levar em conta os múltiplos espalhamentos no paciente e nas superfícies da sala.
- Descrever os diversos espalhamentos e determinar corretamente seu número, distância de cada um e percentual de atenuação para incidência angular.

Fatores para um projeto de blindagem – NCRP 49 e atualizações

- Para o teto, utilizar o mesmo procedimento empregado nas paredes.
- Geralmente o pavimento superior é área livre e a taxa de ocupação dependerá dos fins a que se destina.
- Aqui, deve-se calcular também a blindagem necessária para atenuar o feixe em regiões não diretamente sobre a sala do equipamento.
- Se não houver ocupação no pavimento superior, pode-se usar o cálculo do espalhamento de radiação no ar - “skyshine”.
- Neste caso deve-se assegurar que nenhuma região diretamente acima estará ocupada.

Fatores para um projeto de blindagem – NCRP 49 e atualizações

- Geralmente as salas blindadas são localizadas no andar térreo, sendo desnecessário calcular blindagem do piso.
- Caso haja pavimento abaixo da sala de tratamento, os cálculos são semelhantes aos de blindagem de parede e teto.
- Aqui deve-se também calcular a blindagem necessária para atenuar o feixe em regiões não diretamente sob a sala do equipamento.

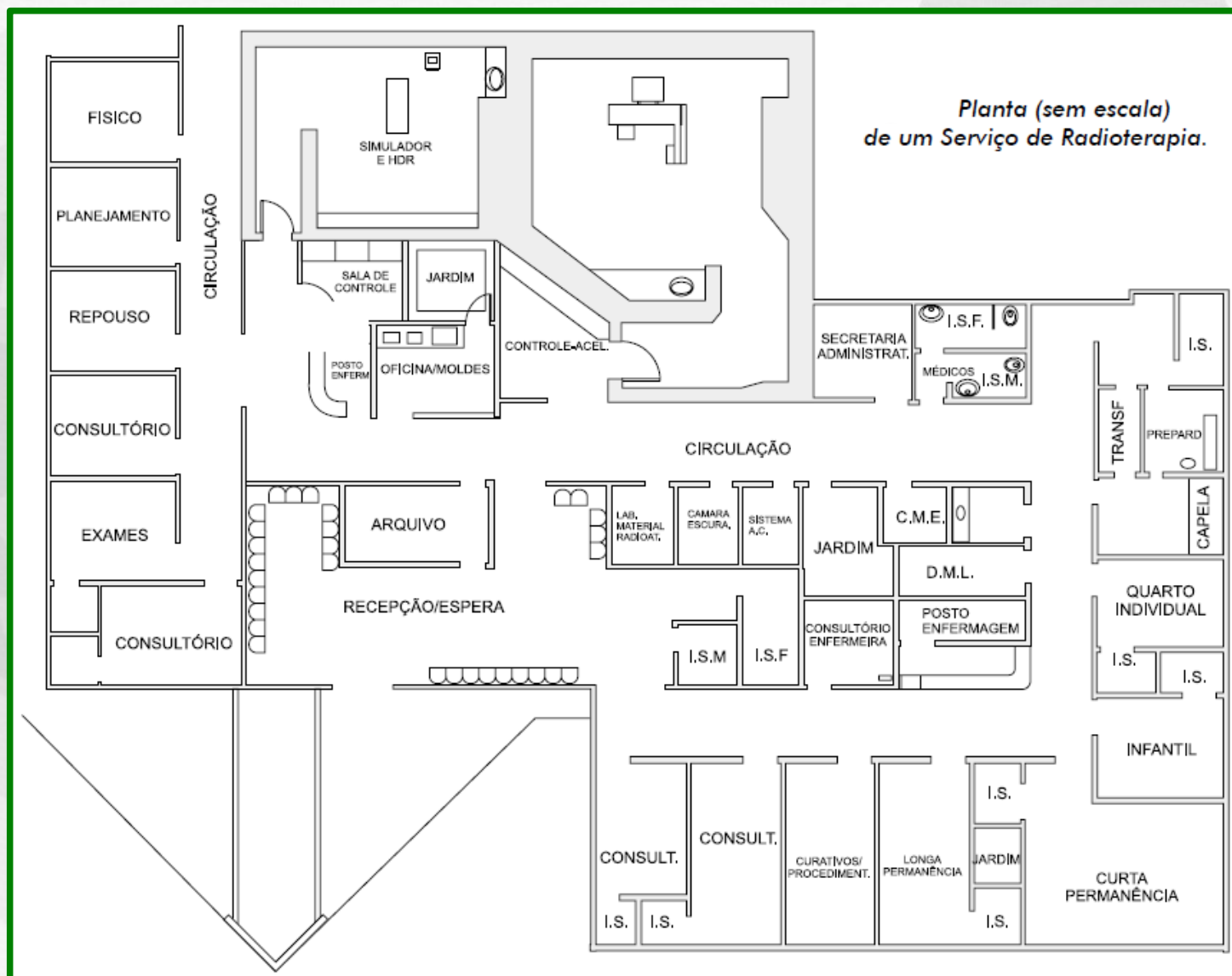
Metodologia de cálculo

- Os cálculos de blindagens convencionais para aceleradores operando até 10 MV são baseados em informações das publicações NCRP-49 e ICRP-33. Para energias maiores usamos os dados do NCRP-51 e do NCRP-79.
- Dois tipos de barreiras são consideradas: primárias e secundárias. A barreira primária é aquela irradiada pelo feixe útil e a secundária recebe somente radiação transmitida pela blindagem da máquina (fuga) e/ou espalhada pelas pessoas e superfícies do ambiente.

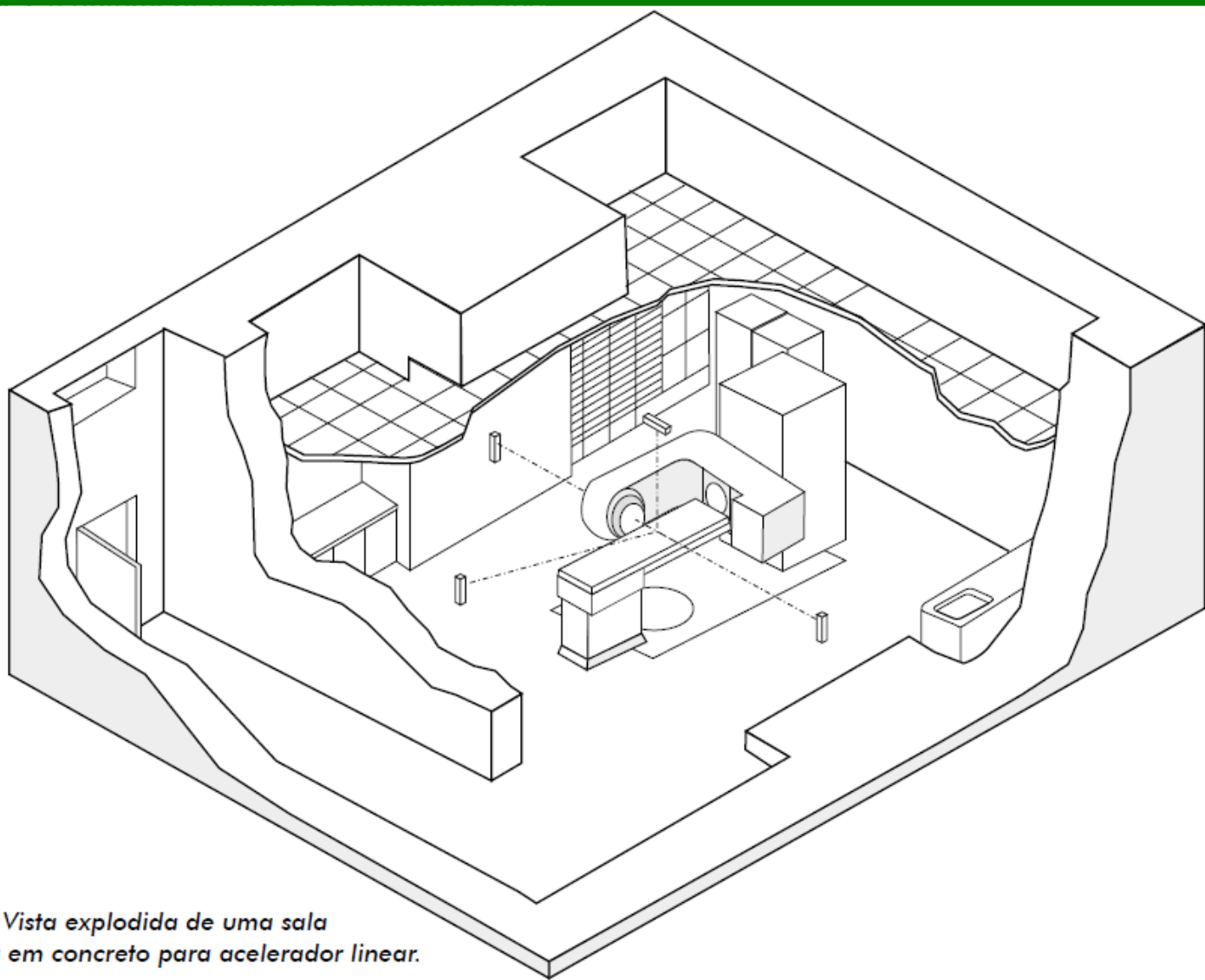
Metodologia de cálculo



Metodologia de cálculo



Metodologia de cálculo



1- Vista explodida de uma sala blindada em concreto para acelerador linear.

Metodologia de cálculo

- A radiação primária é limitada em direção pela colocação da máquina na sala e pelo campo máximo de radiação, que ditarão quais porções das paredes, teto e piso serão blindagens primárias.
- Radiação secundária é emitida em todas as direções e cobre todas as superfícies da sala de tratamento, inclusive o labirinto, se houver, e a porta.
- A **transmissão** pela **barreira primária** necessária para reduzir a intensidade do feixe ao limite autorizado em áreas externas (B_x) é dada por:

$$B_x = \frac{P(d_{\text{prim}})^2}{WUT}$$

Metodologia de cálculo

- onde

- ➔ P é o limite autorizado derivado semanal para regiões externas;
- ➔ d_{prim} é a distância em metros entre o alvo ou fonte até o ponto protegido;
W é a carga de trabalho em Sv/sem;
- ➔ U é o fator de uso e
- ➔ T o fator ocupacional.

- Depois de (B_x) , determinamos a espessura necessária para atender o limite autorizado a partir de curvas de atenuação ou de cálculos usando o número de TVLs, baseados na energia do feixe e no tipo do material empregado na blindagem.

Metodologia de cálculo

- A transmissão pela barreira necessária para reduzir a intensidade da radiação espalhada ao limite autorizado em áreas externas (B_p) é dada por:

$$B_p = \frac{P}{\alpha WT} (d_{sec})^2 (d_{esp})^2 \frac{400}{F}$$

- onde

- ➔ d_{sec} é a distância em metros da superfície espalhadora até o ponto a ser protegido;
- ➔ d_{esp} é a distância em metros do alvo até a superfície espalhadora;
- ➔ α é a razão entre a radiação espalhada e incidente (Tabela B-2 NCRP 49).
- ➔ F é a área do campo utilizado.

Metodologia de cálculo

TABLE B-2 – *Ratio, a, of scattered to incident exposure^a*

Source	Scattering Angle (from Central Ray)					
	30	45	60	90	120	135
X Rays						
50 kV ^b	0.0005	0.0002	0.00025	0.00035	0.0008	0.0010
70 kV ^b	0.00065	0.00035	0.00035	0.0005	0.0010	0.0013
100 kV ^b	0.0015	0.0012	0.0012	0.0013	0.0020	0.0022
125 kV ^b	0.0018	0.0015	0.0015	0.0015	0.0023	0.0025
150 kV ^b	0.0020	0.0016	0.0016	0.0016	0.0024	0.0026
200 kV ^b	0.0024	0.0020	0.0019	0.0019	0.0027	0.0028
250 kV ^b	0.0025	0.0021	0.0019	0.0019	0.0027	0.0028
300 kV ^b	0.0026	0.0022	0.0020	0.0019	0.0026	0.0028
4 MV ^c	—	0.0027	—	—	—	—
6 MV ^d	0.007	0.0018	0.0011	0.0006	—	0.0004
Gamma Rays						
¹³⁷ Cs ^e	0.0065	0.0050	0.0041	0.0028	—	0.0019
⁶⁰ Co ^f	0.0060	0.0036	0.0023	0.0009	—	0.0006

^a Scattered radiation measured at one meter from phantom when field area is 400 cm² at the phantom surface; incident exposure measured at center of field one meter from the source but without phantom.

Metodologia de cálculo

- A transmissão pela barreira proveniente da fuga pelo cabeçote (B_f) é dada por:

$$B_f = \frac{1000P(d_{sec})^2}{WT}$$

- onde

- ➔ o fator 1000 aparece porque a blindagem do cabeçote dos aceleradores, em geral, atenua a intensidade da radiação, no mínimo, por esse fator.
- ➔ d_{sec} é a distância em metros entre o isocentro e o ponto a ser protegido, já que a posição média da fonte de raios-X (alvo) está no isocentro.
- ➔ Para barreiras secundárias o fator de uso é sempre igual a um ($U=1$) e tanto a fuga pelo cabeçote quanto a radiação espalhada devem ser consideradas.

Metodologia de cálculo

- Grandeza e fatores utilizados no cálculo de blindagem:
 - ➔ Limites de dose (P)
 - ➔ Fator de ocupação (T)
 - ➔ Fator de uso (U)
 - ➔ Carga de trabalho (W)
 - ➔ TVL e HVL

Metodologia de cálculo

- Grandeza e fatores utilizados no cálculo de blindagem:
 - ➔ Limites de dose (P)
 - ♦ IOE (média ponderada): $P = 20\text{mSv/ano}$ ou $0,4\text{mSv/semana}$ (área controlada)
 - ♦ Indivíduo do público: $P = 1\text{mSv/ano}$ ou $0,02\text{mSv/semana}$ (área Livre)
 - ➔ Fator de ocupação (T)
 - ♦ Fator adimensional relacionado à fração de tempo que áreas vizinhas à sala de irradiação são ocupadas. Alguns valores típicos (NCRP49):
 - $T = 1$ (ocupação total): Escritórios; consultórios; lojas; residências, escolas;
 - $T = 1/2; 1/4$ (ocupação parcial): Copas, banheiros, corredores, salas de exame, estacionamentos;
 - $T = 1/16$ (ocupação eventual): Escadas, depósitos, áreas de ventilação

Metodologia de cálculo

- Grandeza e fatores utilizados no cálculo de blindagem:
 - ➔ Limites de dose (P)
 - ➔ Fator de ocupação (T)
 - ➔ Fator de uso (U)
 - ♦ Fator adimensional relacionado à fração de tempo em que o feixe útil de radiação está direcionado a uma dada direção. Na ausência de valores reais, pode-se usar:
 - Para o piso ($0^\circ \pm 20^\circ$): $U = 3/7$;
 - Para o teto ($180^\circ \pm 20^\circ$): $U = 2/7$;
 - Para a parede direita ($180^\circ \pm 20^\circ$): $U = 1/7$;
 - Parede esquerda ($270^\circ \pm 20^\circ$): $U = 1/7$.
 - ♦ *Para braquiterapia de alta taxa de dose (HDR), radiação de fuga através do cabeçote, e radiação espalhada sempre deve-se considerar $U = 1$.*

Metodologia de cálculo

- Grandeza e fatores utilizados no cálculo de blindagem:
 - ➔ Limites de dose (P)
 - ➔ Fator de ocupação (T)
 - ➔ Fator de uso (U)
 - ➔ Carga de trabalho (W)
 - ♦ Para equipamentos de raios-X operando até 4 MV, a carga de trabalho é expressa em miliamperes por minuto. Para equipamentos acima de 4 MV ou para fontes de raios gama usa-se a exposição semanal a 1 metro da fonte, expressa em Roentgens ($R \cdot m^2$) ou Gray ($Gy \cdot m^2$).

Metodologia de cálculo

- Grandeza e fatores utilizados no cálculo de blindagem:

- Carga de trabalho (W)

- ◆ Exemplo de Cálculo de W para teleterapia:

- Tipo de equipamento: acelerador linear de 6 MV
 - Número médio de pacientes por dia : 50
 - Dias de tratamento por semana: 5
 - Cada paciente: 2 campos
 - Exposição por campo (d = 1m) : 200 Rad (= 200 cGy)

- ◆ **$W = 50 \times 2 \times 200 \times 5 = 100.000 \text{ Rad/sem ou } 1000 \text{ Gy/sem a } 1 \text{ m}$**

Metodologia de cálculo

- Grandeza e fatores utilizados no cálculo de blindagem:

- ➔ Carga de trabalho (W)

- Exemplo de Cálculo de W para HDR:

- Tipo de equipamento: HDR com ^{192}Ir
 - Atividade típica: 10 Ci
 - Número médio de pacientes por dia : 5
 - Dias de tratamento por semana: 5
 - Tempo médio de irradiação por paciente : 5 minutos
 - Fator Gama do ^{192}Ir : 5 R cm²/mCi h

- $W = 5 \cdot 10000 \text{ mCi} \cdot 5 \text{ pacientes} \cdot 5 \text{ dias} \cdot (5/60 \text{ hs})/(100\text{cm})^2$

- $W = 10,4 \text{ R/sem ou } 10 \text{ cGy/sem a } 1 \text{ m.}$

Metodologia de cálculo

- Grandeza e fatores utilizados no cálculo de blindagem:
 - ➔ Limites de dose (P)
 - ➔ Fator de ocupação (T)
 - ➔ Fator de uso (U)
 - ➔ Carga de trabalho (W)
 - ➔ TVL e HVL
 - ♦ TVL (tenth-value layer) e HVL (half-value layer) são, respectivamente, as espessuras de determinado material necessárias para reduzir em 1/10 e 1/2 as taxas de dose de determinado tipo de radiação.

Metodologia de cálculo

- Grandeza e fatores utilizados no cálculo de blindagem:
 - TVL e HVL

	Chumbo (mm)		Concreto (cm)	
	HVL	TVL	HVL	TVL
1 MV	7,9	26,0	4,4	14,7
2 MV	12,5	42,0	6,4	21,0
4 MV	16,0	53,0	6,8	29,2
6 MV	16,9	56,0	10,4	34,5
8 MV	16,9	56,0	11,4	37,8
10 MV	16,6	55,0	11,9	39,6
137Cs	6,5	21,6	4,8	15,7
60Co	12,0	40,0	6,2	20,6
192Ir	6,0	20,0	4,3	14,7

Metodologia de cálculo

- Largura e comprimento da barreira primária:
 - ➔ Deve ter o tamanho do campo máximo do feixe primário, no lado externo, mais 0,3 m para cada lado (para prevenir o escape de radiação pela blindagem secundária contígua).
 - ➔ Se um feixe é projetado numa barreira a X metros de distância, a largura máxima do campo será $L_{\max} = 0,566 X$, onde X é a distância do alvo à superfície externa.
 - ➔ A largura horizontal da barreira será então dada por:
 - **$L = 0,566.X + 0,6 \text{ (m)}$**

Metodologia de cálculo: Exemplo

- Calcule a espessura necessária da barreira primária, usando concreto, para um acelerador de 6MV, sendo dados:

- $W = 1000 \text{ Gy/semana a } 1 \text{ metro}$
- $P = 2 \times 10^{-5} \text{ Sv/semana (área livre)}$
- $U = 1/7$
- $T = 1$
- $d = 7 \text{ m}$

$$B_x = \frac{P(d_{\text{prim}})^2}{WUT}$$

$$B_x = \frac{(2 \cdot 10^{-5} \times 7^2)}{(1000 \times 1/7 \times 1)} \rightarrow B_x = 6,86 \cdot 10^{-6}$$

- **Número de TVLs** = $-\log_{10}(6,9 \cdot 10^{-6}) = 5,2$
- **Espessura da barreira** = $34,5 \text{ (tabela slide 98)} \times 5,2 = 179,4 \text{ cm de concreto}$

Metodologia de cálculo: Exemplo

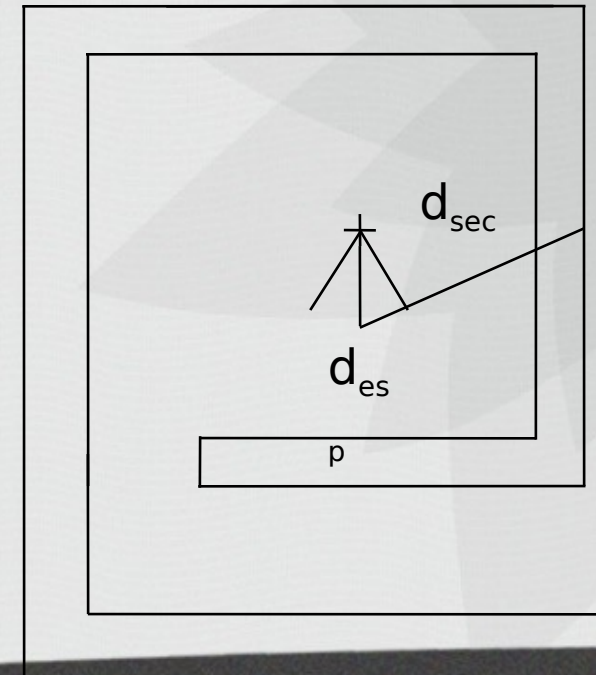
- Calcule a espessura necessária da barreira secundária, usando concreto, para um acelerador de 4MV, sendo dados:

- $W = 1000 \text{ Gy/semana a } 1 \text{ metro}$
- $P = 2 \times 10^{-5} \text{ Sv/semana (área livre)}$
- $T = 1$
- $d_{\text{esp}} = 1 \text{ m}$
- $d_{\text{sec}} = 9,9 \text{ m}$
- $\alpha = 0,0027 \text{ (ângulo de } 45^\circ)$
- $F = 400 \text{ cm}^2$

$$B_p = \frac{(2 \cdot 10^{-5} \times 1 \times 98)}{(1000 \times 1 \times 0,0027)} \rightarrow B_p = 7,26 \cdot 10^{-4}$$

- **Número de TVLs = $-\log_{10}(7,26 \cdot 10^{-4}) = 3,14$**
- **Espessura da barreira = $29,2 \text{ (tabela slide 98)} \times 3,14 = 91,7 \text{ cm de concreto}$**

$$B_p = \frac{P}{\alpha W T} (d_{\text{sec}})^2 (d_{\text{esp}})^2 \frac{400}{F}$$



Metodologia de cálculo: Exercício

- Calcule a espessura necessária da barreira primária e secundária, usando concreto, para um acelerador de 6MV, sendo dados:

- $W = 1000 \text{ Gy/semana a } 1 \text{ metro}$
- $P = 2 \times 10^{-5} \text{ Sv/semana (área livre)}$
- $T = 1$
- $U = 1/7$
- $d_{\text{prim}} = 9\text{m}$
- $d_{\text{esp}} = 1\text{m}$
- $d_{\text{sec}} = 11 \text{ m}$
- ângulo de 30°
- $F = 400\text{cm}^2$

$$B_x = \frac{P(d_{\text{prim}})^2}{WUT}$$

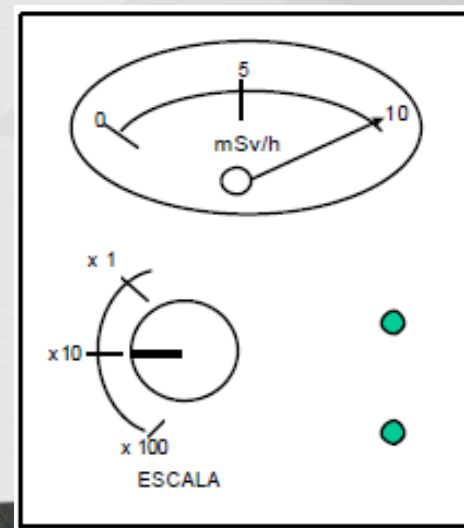
$$B_p = \frac{P}{\alpha WT} (d_{\text{sec}})^2 (d_{\text{esp}})^2 \frac{400}{F}$$

Atividade campo AV2

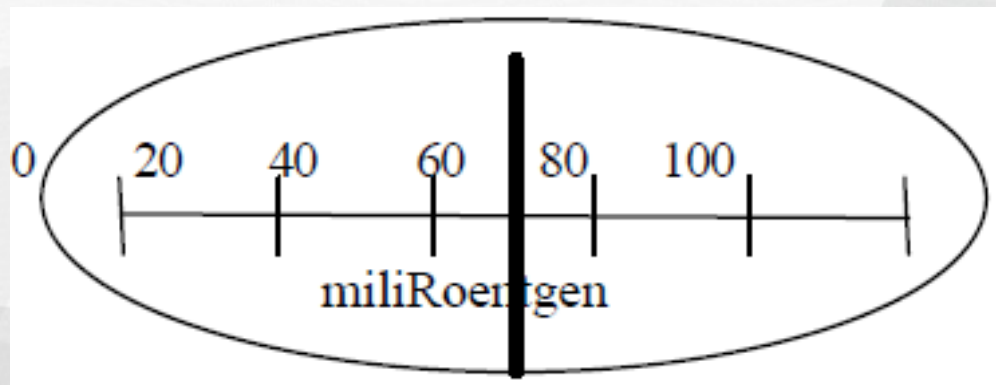
- 1) Defina detector e monitor de radiação, caracterizando a diferença de conceito entre eles.
- 2) Defina o princípio de operação de um detector a gás.
- 3) Defina o princípio de operação de um detector do tipo cintilador.
- 4) Qual a principal diferença entre um detector Geiger-Müller e detector câmara de ionização ou contador proporcional.
- 5) Explique a diferença entre repetitividade e reprodutividade, com relação aos detectores de radiação.
- 6) Um tecnólogo em radiologia, de posse de um detector GM, mediu a taxa de exposição de duas fontes sendo uma de ^{60}Co e a outra de ^{137}Cs . Sabendo que ambas possuem a mesma atividade, o que podemos afirmar sobre a taxa de exposição medida?
- 7) E se na questão anterior fosse usado um detector do tipo câmara de ionização?

Atividade campo AV2

- 8) Um detector cintilador tem o seu envoltório todo em alumínio para que o material cintilador possa exercer sua função. Com base nesta informação explique por que não é possível este cintilador detectar a presença de radiação alfa ou beta.
- 9) Diferencie dosímetros de leitura direta e indireta. Cite exemplos.
- 10) Dosímetro expressão seus resultados em que grandeza radiológica?
- 11) Baseado na figura, indique a posição do seletor de escala e do mostrador para uma taxa de dose de 25 mSv/h.



Atividade campo AV2



12) Responda baseado no mostrador acima:

- a) Qual a posição do mostrador para uma exposição de 45 mR.
- b) Converta o valor de exposição mostrado para a unidade do SI (C/kg).
- c) Considerando que a exposição marcada no mostrador foi obtida após duas horas de atividade, qual seria o valor da exposição se um IOE permanecesse somente 15 minutos no local?

Atividade campo AV2

13) Qual o valor da carga de trabalho (W) para um irradiador com seguintes características:

- Tipo de equipamento: HDR com ^{192}Ir
- Atividade típica: 13 Ci
- Número médio de pacientes por dia : 7
- Dias de tratamento por semana: 5
- Tempo médio de irradiação por paciente : 6 minutos
- Fator Gama do ^{192}Ir : $5 \text{ R cm}^2/\text{mCi h}$

Atividade campo AV2

14) Calcule a espessura necessária da barreira primária, usando concreto, para um acelerador de 10MV, sendo dados:

- ➡ $W = 1350 \text{ Gy/semana a } 1 \text{ metro}$
- ➡ $P = 2 \times 10^{-5} \text{ Sv/semana (área livre)}$
- ➡ $U = 1/7$
- ➡ $T = 1$
- ➡ $d = 8 \text{ m}$

Atividade campo AV2

15) Calcule a espessura necessária da barreira secundária, usando concreto, para um acelerador de 6MV, sendo dados:

- ➡ $W = 1000 \text{ Gy/semana a } 1 \text{ metro}$
- ➡ $P = 2 \times 10^{-5} \text{ Sv/semana (área livre)}$
- ➡ $T = 1$
- ➡ $d_{\text{esp}} = 1\text{m}$
- ➡ $d_{\text{sec}} = 7,9 \text{ m}$
- ➡ ângulo de 60°
- ➡ $F = 200\text{cm}^2$

Minicurso

CÁLCULO DE BLINDAGEM E DOSIMETRIA EM INDÚSTRIA

Prof. Luciano Santa Rita

<http://www.lucianosantarita.pro.br>

<http://facebook.com/SPR.LucianoSantaRita>

E-mail: tecnologo@lucianosantarita.pro.br