

# Cálculo de Blindagem e Dosimetria na Indústria

Prof. Luciano Santa Rita

[www.lucianosantarita.pro.br](http://www.lucianosantarita.pro.br)

[tecnologo@lucianosantarita.pro.br](mailto:tecnologo@lucianosantarita.pro.br)



# Conteúdo Programático

- Revisão de grandezas radiológicas
- Cálculo de barreiras em boa geometria
- Detectores de radiação e dosimetria pessoal
- Cálculo de barreiras em má geometria – Uso do fator de Build up
- Projeto de Blindagem – Metodologia NCRP49 e atualizações



# Bibliografia

- SEGURANÇA NUCLEAR E PROTEÇÃO DO MEIO AMBIENTE – Paulo Fernando Lavalle Heilbron Filho et al.
- CIÊNCIA RADIOLÓGICA PARA TECNÓLOGOS: FÍSICA, BIOLOGIA E PROTEÇÃO – Stewart Carlyle Bushong.
- FÍSICA E DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES – Thomaz Bitelli.
- RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA: FUNDAMENTOS – Luiz Tauhata et al.

A close-up photograph of a wooden surface with several pieces of colored chalk (blue, red, and white) scattered on it. The background is blurred, showing more of the wooden surface and some green objects.

# Grandezas radiológicas

- 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.
  - Desde que surgiram as primeiras preocupações com a possibilidade das radiações ionizantes induzirem detrimientos à saúde humana, apareceram os métodos de produção, caracterização e medição da radiação, bem como de definição de grandezas que expressassem com realismo a sua interação com o tecido humano.
  - A classificação e definição usadas para as grandezas a seguir estão de acordo com ICRU e ICRP.



# 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.

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad [Bq \text{ ou } Ci] \quad t = \frac{1}{\lambda} \cdot \text{Ln} \left( \frac{A_0}{A} \right) \quad [s]$$

- Onde 1 Ci = 37GBq e 1 Bq = 1 dps
- Alguns múltiplos:
  - 1 kBq (1 kilobecquerel) =  $10^3$  dps;
  - 1 MBq (1 megabecquerel) =  $10^6$  dps;
  - 1 GBq (1 gigabecquerel) =  $10^9$  dps.



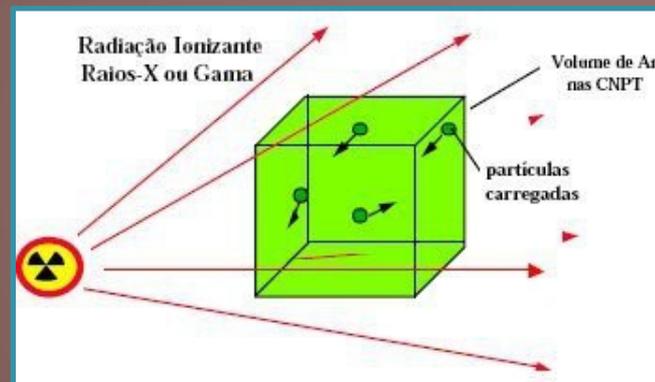
# Grandezas radiológicas: **Atividade**

- 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.

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

# 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 depositada pela radiação ionizante por unidade de massa dessa matéria, num ponto de interesse.
- A unidade atual (SI) a dose absorvida é o gray (Gy):
  - $1 \text{ J / kg} = 1 \text{ gray (Gy)}$
  - SI : Sistema Internacional de unidades.
- Nas unidades antigas a dose era medida em rad:
  - $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$

# Relação entre grandezas

- Exposição pode ser associada à atividade gama de uma fonte, pela expressão:

$$X = \Gamma \cdot \frac{A \cdot t}{d^2}$$

- $\Gamma$  = constante de exposição de uma fonte pontual (Gamão);
- $A$  = atividade da fonte radioativa;
- $t$  = tempo de exposição;
- $d$  = distância até a fonte.
- Esta relação vale para as seguintes condições:
  - I. a fonte é suficientemente pequena (puntiforme), de modo que a fluência de fótons varie com o inverso do quadrado da distância;
  - II. a atenuação na camada de ar intermediária entre a fonte e o ponto de medição é desprezível ou corrigida pelo fator de atenuação;
  - III. somente fótons provenientes da fonte contribuem para o ponto de medição, ou seja, que não haja espalhamento nos materiais circunvizinhos.

# Fator de exposição gama (gamão)

| Radionuclídeo     | $\Gamma$ (R.m <sup>2</sup> /h.Ci) | Radionuclídeo     | $\Gamma$ (R.m <sup>2</sup> /h.Ci) |
|-------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| <sup>131</sup> I  | 0,22                              | <sup>75</sup> Se  | 0,15                              |
| <sup>125</sup> I  | 0,07                              | <sup>60</sup> Co  | 1,32                              |
| <sup>99m</sup> Tc | 0,12                              | <sup>24</sup> Na  | 1,84                              |
| <sup>192</sup> Ir | 0,48                              | <sup>198</sup> Au | 0,23                              |
| <sup>226</sup> Ra | 0,83                              | <sup>124</sup> Sb | 0,98                              |
| <sup>137</sup> Cs | 0,33                              | <sup>54</sup> Mn  | 0,47                              |

# Relação entre grandezas

- Dose absorvida pode ser associada à atividade gama de uma fonte, pela expressão:

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

- $\Gamma$  = constante de exposição de uma fonte pontual (Gamão);
- $A$  = atividade da fonte radioativa;
- $t$  = tempo de exposição;
- $d$  = distância até a fonte.
- Esta relação vale para as seguintes condições:
  - I. a fonte é suficientemente pequena (puntiforme), de modo que a fluência de fótons varie com o inverso do quadrado da distância;
  - II. a atenuação na camada de ar intermediária entre a fonte e o ponto de medição é desprezível ou corrigida pelo fator de atenuação;
  - III. somente fótons provenientes da fonte contribuem para o ponto de medição, ou seja, que não haja espalhamento nos materiais circunvizinhos.

# Fator de dose gama (gamão)

| Radionuclídeo     | $\Gamma$ (mSv.m <sup>2</sup> /h.GBq) | Radionuclídeo     | $\Gamma$ (mSv.m <sup>2</sup> /h.GBq) |
|-------------------|--------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|
| <sup>131</sup> I  | 0,052                                | <sup>75</sup> Se  | 0,036                                |
| <sup>125</sup> I  | 0,016                                | <sup>60</sup> Co  | 0,313                                |
| <sup>99m</sup> Tc | 0,028                                | <sup>24</sup> Na  | 0,436                                |
| <sup>192</sup> Ir | 0,114                                | <sup>198</sup> Au | 0,054                                |
| <sup>226</sup> Ra | 0,197                                | <sup>124</sup> Sb | 0,232                                |
| <sup>137</sup> Cs | 0,078                                | <sup>54</sup> Mn  | 0,111                                |

# Exercício

- 1) Os slides 10 e 12 apresentam uma relação de fatores de exposição e dose gama para vários radionuclídeos. Faça as conversões de unidades de grandezas necessárias para gerar uma tabela com o fator gama na unidade de  $\mu\text{Sv}\cdot\text{cm}^2 / \text{h}\cdot\text{MBq}$ ,

| Radionuclídeo            | $\Gamma$ ( $\mu\text{Sv}\cdot\text{cm}^2/\text{h}\cdot\text{MBq}$ ) | Radionuclídeo     | $\Gamma$ ( $\mu\text{Sv}\cdot\text{cm}^2/\text{h}\cdot\text{MBq}$ ) |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------|
| $^{131}\text{I}$         |                                                                     | $^{75}\text{Se}$  |                                                                     |
| $^{125}\text{I}$         |                                                                     | $^{60}\text{Co}$  |                                                                     |
| $^{99\text{m}}\text{Tc}$ |                                                                     | $^{24}\text{Na}$  |                                                                     |
| $^{192}\text{Ir}$        |                                                                     | $^{198}\text{Au}$ |                                                                     |
| $^{226}\text{Ra}$        |                                                                     | $^{124}\text{Sb}$ |                                                                     |
| $^{137}\text{Cs}$        |                                                                     | $^{54}\text{Mn}$  |                                                                     |

# Relação entre grandezas

- Sob condições de equilíbrio eletrônico (CPE), a Exposição  $X$ , medida no ar, se relaciona com a Dose Absorvida no ar, pela expressão:

$$D_{ar} = X \cdot (w/e)_{ar}$$

- Onde  $(w/e)_{ar}$  é a energia média para formação de um par de íons no ar dividida pela carga do elétron:
  - No SI = 33,97 J/C
  - Quando exposição dada em Röentgen (R) =  $0,876 \text{ rad/R}$ .



# Grandezas radiológicas: Dose equivalente ( $H_T$ )

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

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \quad [Sv \text{ ou } J \cdot kg^{-1}]$$

- onde  $w_R$  é o fator de peso de cada radiação R que permite converter a dose absorvida  $D_{T,R}$  no tecido T, em dose equivalente no tecido T, devido à radiação do tipo R.
- A unidade especial da grandeza dose equivalente é o rem (*röntgen equivalent man*) que é relacionado com a unidade do SI por:  $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem} = 1 \text{ J/kg}$

# Grandezas radiológicas: Dose equivalente ( $H_T$ )

- Fator de ponderação da radiação:  $w_R$

| Tipos de radiação e intervalos de energia             | $w_R$ (ICRP-60) |
|-------------------------------------------------------|-----------------|
| Fótons de todas as energias                           | 1               |
| Elétrons e múons de todas as energias                 | 1               |
| Nêutrons com energias:                                |                 |
| < 10keV                                               | 5               |
| 10 – 100 keV                                          | 10              |
| >100keV a 2 MeV                                       | 20              |
| >2 MeV a 20 MeV                                       | 10              |
| >20MeV                                                | 5               |
| Prótons                                               | 5               |
| Partículas alfa, elementos 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. Onde  $w_T$  é o fator de peso para o tecido T e  $H_T$  é a dose equivalente a ele atribuída.

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad [Sv \text{ ou } J \cdot kg^{-1}]$$

- Os fatores de ponderação de tecido ou órgão  $w_T$  são relacionados com a sensibilidade de um dado tecido ou órgão à radiação, no que concerne à indução de câncer e a efeitos hereditários

# Grandezas radiológicas: Dose efetiva(E)

- Fator de ponderação do tecido:  $w_T$

| Tecido ou órgão     | $w_T$ (1990) |
|---------------------|--------------|
| Gônadas             | 0,20         |
| Medula óssea        | 0,12         |
| Cólon               | 0,12         |
| Pulmão              | 0,12         |
| Estômago            | 0,12         |
| Mama                | 0,05         |
| Bexiga              | 0,05         |
| Esôfago             | 0,05         |
| Fígado              | 0,05         |
| Tireoide            | 0,05         |
| Superfície do osso  | 0,01         |
| Cérebro             | -            |
| Glândulas salivares | -            |
| Pele                | 0,01         |
| Restante            | 0,05         |
| <b>Soma total</b>   | <b>1,00</b>  |

# Limitação de dose individual

## Limites de Dose 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 cm<sup>2</sup> de área, na região mais irradiada.



# Exemplos

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

# Exercícios - Resolvidos

- 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  $^{192}\text{Ir}$  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  $^{192}\text{Ir}$  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 1,0mSv/h?
- 4) O valor de exposição medida por monitor de radiação apresenta o valor de 5,0mR. Qual o valor aproximado da dose absorvida em rad? Qual o valor da dose absorvida na unidade do SI?

# Respostas

- Resposta 1:

- $A = A_0 \times e^{-\lambda t} \Rightarrow t_{1/2} = 0,693 / \lambda \rightarrow 0,0173$

- $A = 1554 \times e^{-0,0173 \times 120} \Rightarrow A = 1554 \times 0,1254 \Rightarrow A = 1,9 \times 10^2 \text{ GBq}$

- Resposta 2:

- $t = (1 / \lambda) \times \ln (A_0 / A)$  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:

- $D = \Gamma \times A / d^2 \rightarrow 1 = 0,114 \times (24 \times 37) / d^2$

- $d^2 = 101,23$

- $D = 10 \text{ m}$

- Resposta 4:

- $D = 0,876 \cdot 5 \times 10^{-3} = 4,38 \text{ mrad}$

- $D = 4,38 \times 10^{-3} \cdot 10^{-2} = 44 \mu\text{Gy}$

# 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  $^{75}\text{Se}$  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  $^{75}\text{Se}$  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?
- 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) Suponha que uma pessoa seja exposta, homoganeamente, a um campo de raios X (energia média de 100keV) com uma exposição total de 27R, responda (unidades do SI):
- Qual o valor da dose absorvida? **Resposta:  $2,4 \times 10^2 \text{mGy}$**
  - Qual o valor da dose equivalente? **Resposta:  $2,4 \times 10^2 \text{mSv}$**
  - 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 2,0mGy. O mesmo grupo de IOE também foi exposto a uma fonte emissora de partículas alfa resultando em uma dose absorvida de 2,0mGy, responda (unidades do SI):
- Quais os valores de dose equivalente em função do campo de raios X e da fonte emissora de partícula alfa? **Resposta:  $RX = 2,0 \text{mSv}$  e  $\text{alfa} = 40 \text{mSv}$**
  - Caso os valores do item anterior forem diferentes, explique por que.

# Exercícios

7. Qual será a taxa de dose efetiva a 5 m de distância de uma fonte de  $^{192}\text{Ir}$  com atividade de 400 GBq que está sendo utilizada na realização de END em um duto?
8. Uma fonte de  $^{192}\text{Ir}$  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 ?
9. Qual a dose efetiva em mSv, recebida por um grupo de trabalhadores expostos durante 2 horas às radiações devido a uma fonte de  $^{192}\text{Ir}$  com 222 GBq de atividade , numa distância de 4 metros ?



# Exercícios

10) Suponha que uma pessoa seja exposta, homogeneamente, a um campo de raios X (energia média de 100keV) com uma exposição total de  $6,97 \times 10^{-3}$  C/kg, responda (unidades do SI):

- i. Qual a dose absorvida, sabendo que  $(W_{ar}/e) = 33,97$  J/kg?
- ii. Qual a dose equivalente ( $H_T$ ) recebida?
- iii. Se apenas os pulmões fossem expostos aos  $6,97 \times 10^{-3}$  C/kg, qual seria sua dose efetiva?

A close-up photograph of a wooden surface with several pieces of chalk. One piece is blue, and others are pink and white. The background is blurred.

# Cálculo de barreiras em boa geometria

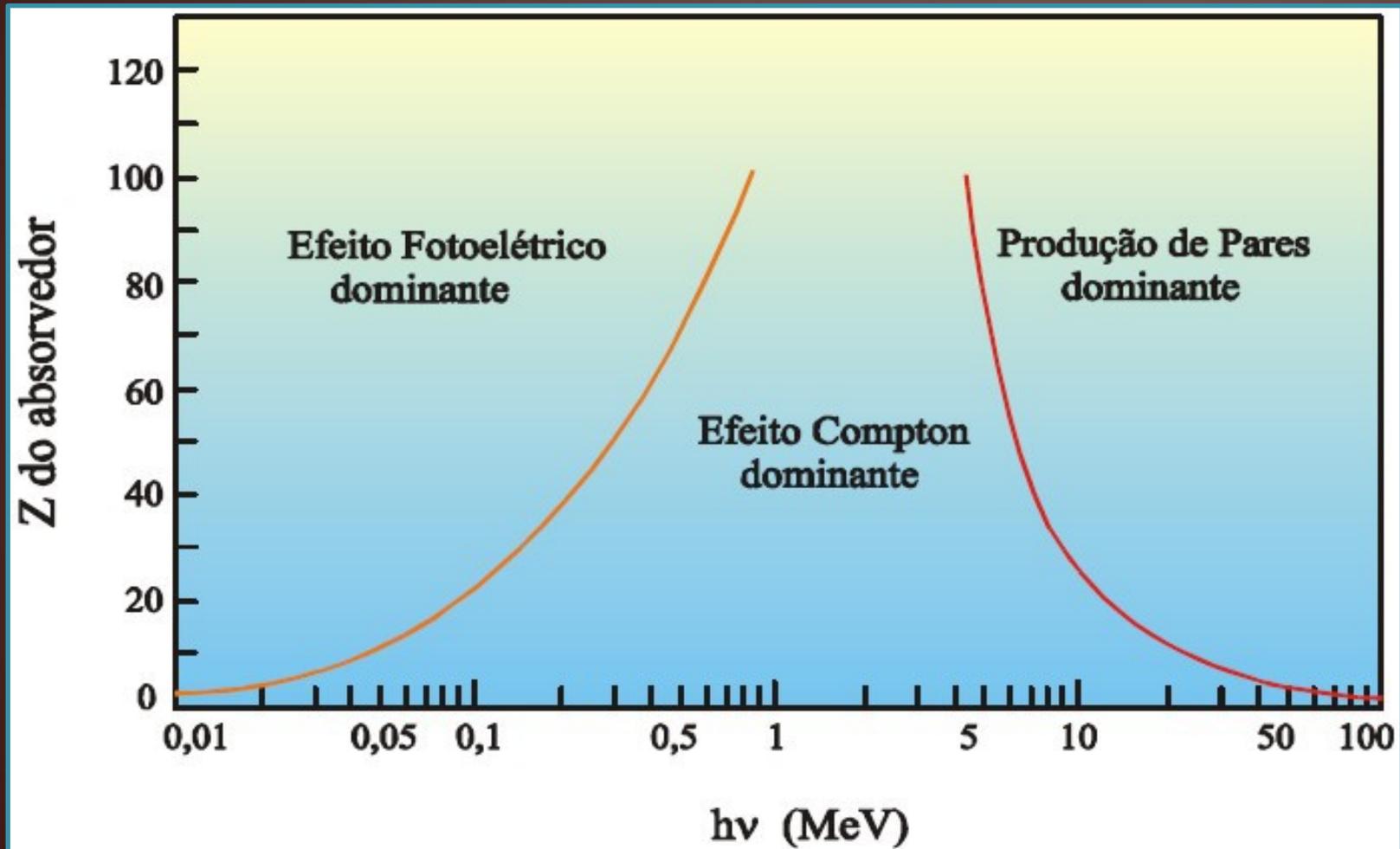
- Interação de fótons com a matéria;
- Coeficiente de atenuação linear ( $\mu$ );
- Camada semirredutora (CSR ou HVL);
- Camada decimo redutora (CDR ou TVL);
- Fator de redução ou atenuação;
- Condição de boa geometria e cálculo.

A close-up photograph of a wooden surface with a blue piece of chalk and a pink piece of chalk. The background is blurred, showing a white object and a green object.

# Interação de fótons com a matéria

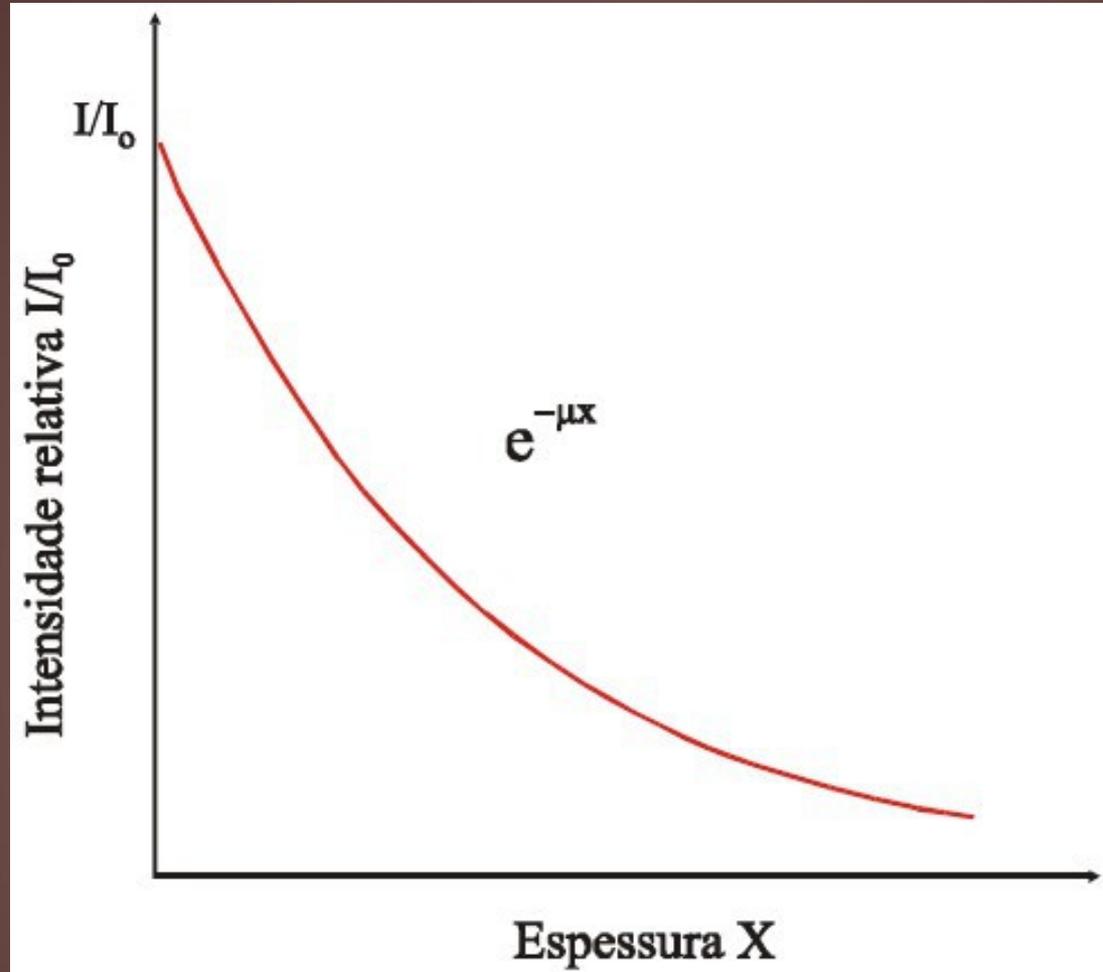
- A interação da radiação X e gama com a matéria faz-se através de diversos processos físicos. Estes processos são a difusão elástica de *Rayleigh*, o efeito fotoelétrico, a difusão de *Compton* e a criação de pares elétron-pósitron, sendo que a probabilidade de ocorrência de cada um destes processos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

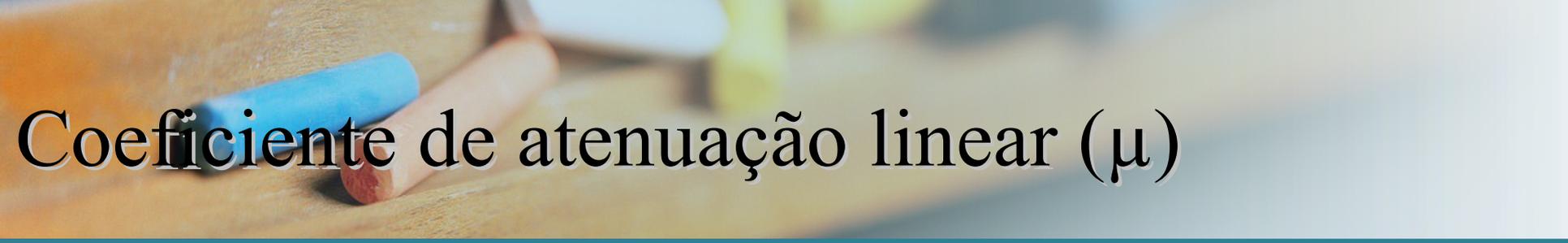
# Interação de fótons com a matéria



# Interação de fótons com a matéria

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





# Coeficiente de atenuação linear ( $\mu$ )

- 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, mas nunca se anula completamente;
- A capacidade de absorção varia de material para material. Isso se explica através de coeficiente de absorção “ $\mu$ ”, que representa a probabilidade, por unidade de comprimento, de que o fóton seja removido do feixe pelo material (por absorção ou espalhamento).

# Coeficiente de atenuação linear ( $\mu$ )

| Energia (MeV) | Alumínio ( $\text{cm}^{-1}$ ) | Chumbo ( $\text{cm}^{-1}$ ) | Concreto ( $\text{cm}^{-1}$ ) | Aço ( $\text{cm}^{-1}$ ) | Urânio ( $\text{cm}^{-1}$ ) | Tijolo ( $\text{cm}^{-1}$ ) |
|---------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 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



# Camada semirredutora (CSR ou HVL)

- Um conceito importante no cálculo de blindagem é o de camada semirredutora, corresponde à espessura necessária para reduzir a intensidade do feixe de fótons à metade do valor inicial e que está relacionada com o coeficiente de atenuação linear  $\mu$  pela equação abaixo.

$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu} \text{ ou } HVL = \frac{0.693}{\mu}$$



## 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.

# Valores de HVL e TVL

| FONTE DE<br>RADIAÇÃO | Alumínio<br>2,3 g/cm <sup>3</sup><br>( cm ) |       | Chumbo<br>12 g/cm <sup>3</sup><br>( cm ) |       | Concreto<br>2,3 g/cm <sup>3</sup><br>( cm ) |       | Aço<br>7,8 g/cm <sup>3</sup><br>( 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

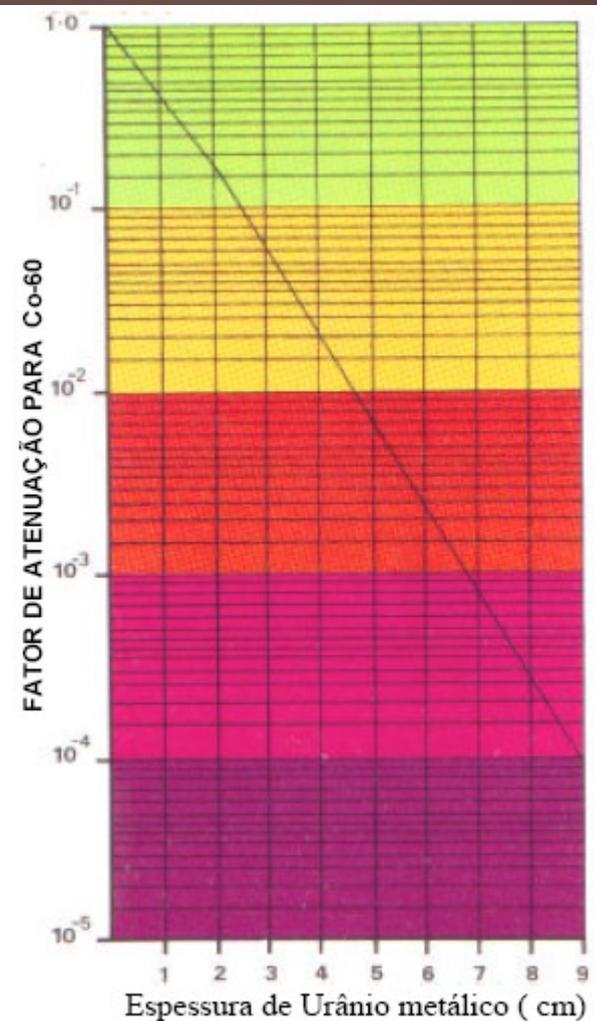
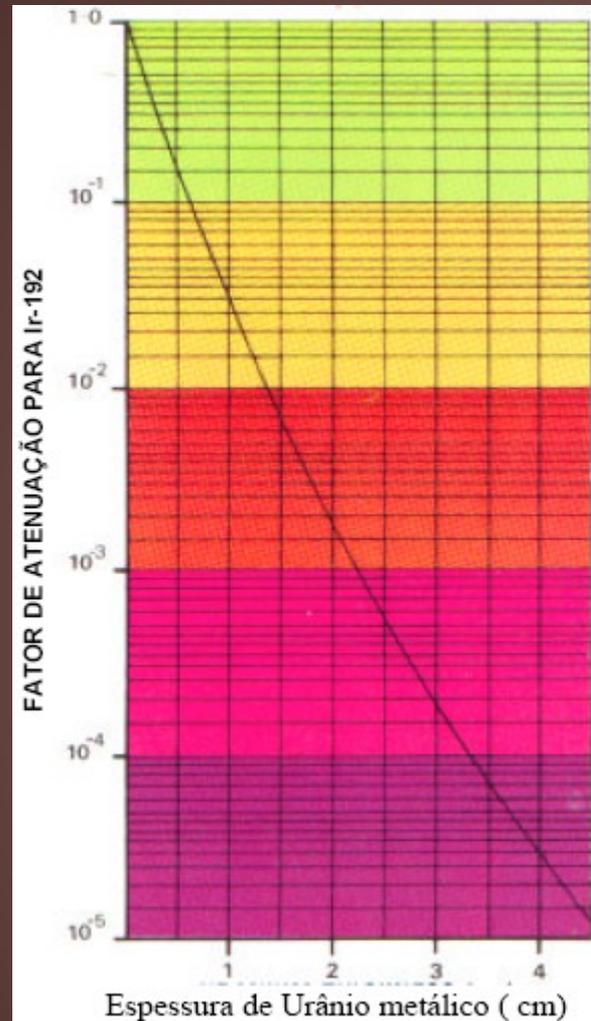
\* valores aproximados obtidos para voltagem de pico de um tubo direcional para uso médico

# Valores de HVL e TVL

| HV (MV) | Chumbo (mm) |      | Concreto (cm) |      |
|---------|-------------|------|---------------|------|
|         | HVL         | TVL  | HVL           | TVL  |
| 1       | 7,9         | 26,0 | 4,4           | 14,7 |
| 2       | 12,5        | 42,0 | 6,4           | 21,0 |
| 4       | 16,0        | 53,0 | 6,8           | 29,2 |
| 6       | 16,9        | 56,0 | 10,4          | 34,5 |
| 8       | 16,9        | 56,0 | 11,4          | 37,8 |
| 10      | 16,6        | 55,0 | 11,9          | 39,6 |

# Fator de redução ou atenuação (Fr)

$$Fr = \frac{I_0}{I}$$

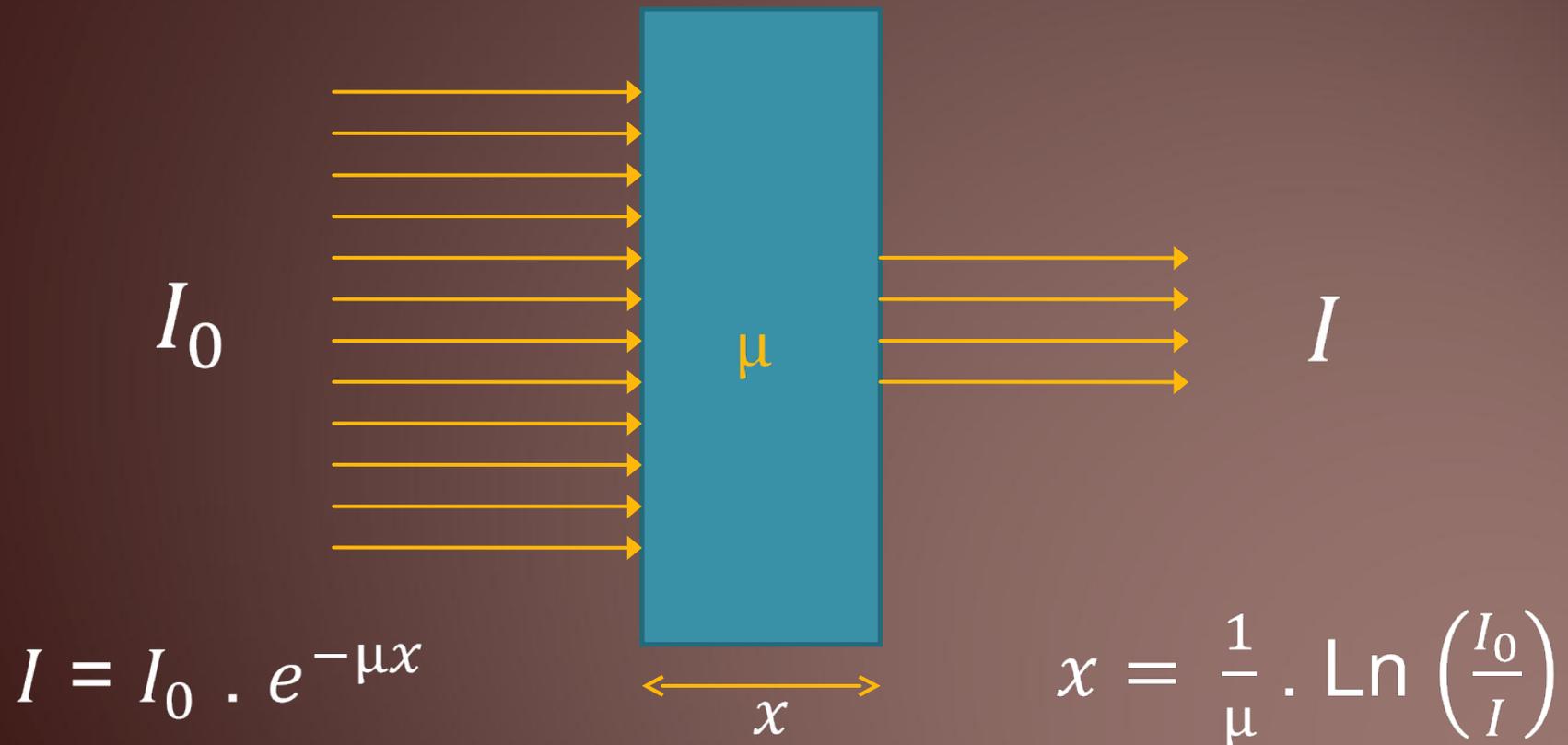




# Condição de boa geometria e cálculo

- A fonte é suficientemente pequena (puntiforme), de modo que a fluência de fótons varie com o inverso do quadrado da distância;
- A atenuação na camada de ar intermediária entre a fonte e o ponto de medição é desprezível ou corrigida pelo fator de atenuação;
- Somente fótons provenientes da fonte contribuem para o ponto de medição, ou seja, que não haja espalhamento nos materiais circunvizinhos;
- Todo espalhamento *Compton* gerado na interação dos fótons na blindagem é absorvida na mesma, o mesmo ocorrendo com os fótons por aniquilação que possam ser gerados.

# Condição de boa geometria e cálculo





# Exercícios

- 1) Determine a espessura da barreira de concreto, em boa geometria, que deverá ser colocada a 2 m de uma fonte de  $^{192}\text{Ir}$  de 75 Ci de atividade para reduzir a taxa de exposição a 25 mR/h.
- 2) Calcule a exposição acumulada num ponto a 20 cm de uma fonte pontual de  $^{131}\text{I}$  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?
- 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.
- 5) Calcule 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  $^{137}\text{Cs}$  de 30 Ci, situada a 176 centímetros.



# Condição de boa geometria e cálculo

- Conhecendo-se um fator de redução  $Fr$ , a espessura da barreira pode ser obtida por:

$$x = n \cdot TVL \quad \text{onde} \quad n = \log Fr$$

- ou

$$x = m \cdot HVL \quad \text{onde} \quad m = \frac{\log Fr}{\log 2}$$

- onde  $x$  é a espessura do material da barreira.

# Exemplo

1) Para a realização de um ensaio não destrutivo (END) com uma fonte de  $^{192}\text{Ir}$ , é necessário a construção de uma barreira 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?

- **Resposta :**

- $Fr = I_0/I \rightarrow Fr = 6$

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

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

- *Valor de TVL, buscar no slide 35*



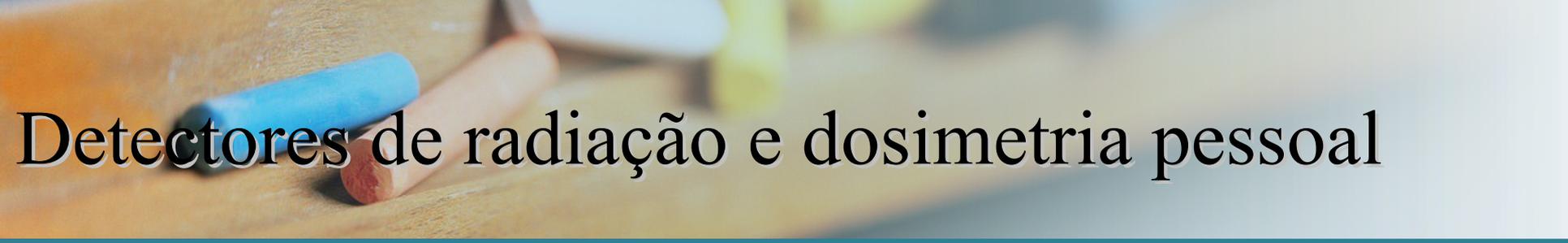
# Exercícios

1. Para a realização de um ensaio não destrutivo (END) com uma fonte de  $^{60}\text{Co}$  é necessário a construção de uma barreira de chumbo, que seja capaz de reduzir a intensidade inicial do feixe de fótons em 23 vezes. Qual a espessura necessária para a blindagem ?
2. Para a realização de um ensaio não destrutivo (END) com um equipamento de raios X de 400 kVp é necessário a construção de uma barreira de concreto, que seja capaz de reduzir a intensidade inicial do feixe de fótons em 16 vezes. Qual a espessura necessária para a blindagem ?



# Exercícios

3. Para a realização de um ensaio não destrutivo (END) com um equipamento de raios X de 200 kVp é necessário a construção de uma barreira de concreto, que seja capaz de reduzir a intensidade inicial do feixe de fótons em 16 vezes. Qual a espessura necessária para a barreira ?
4. Para a realização de um ensaio não destrutivo (END) com uma fonte de  $^{137}\text{Cs}$  é necessário a construção de uma barreira de chumbo, que seja capaz de reduzir a intensidade inicial do feixe de fótons em 9 vezes. Qual a espessura necessária para a barreira ?

A close-up photograph of a wooden surface with several pieces of chalk. One piece is blue, and others are white and pink. The background is blurred.

# Detectores de radiação e dosimetria pessoal

- 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.
- 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.

A close-up photograph of two pieces of chalk, one blue and one pink, resting on a light-colored wooden surface. The background is blurred, showing a person's hand holding a piece of chalk.

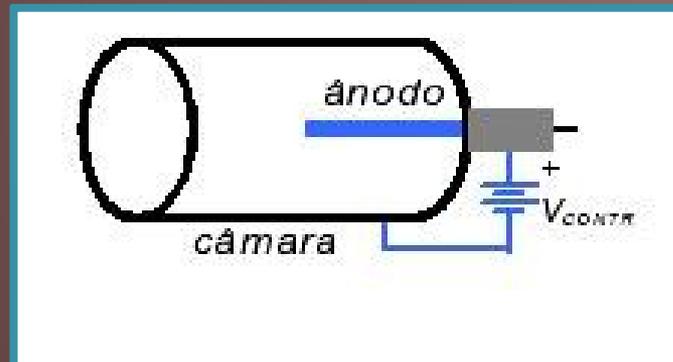
# Detectores de radiação e dosimetria pessoal

- 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
  - **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

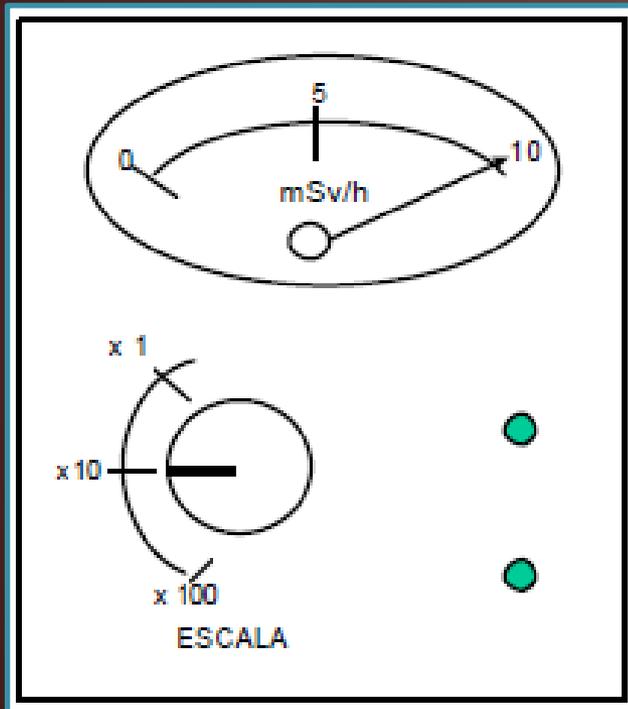
- O sinal de saída é função de uma avalanche de elétrons gerados a partir da interação inicial, sendo independente da mesma, não sendo possível discriminar a radiação incidente.



# Detectores 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 ( $\alpha$  e  $\beta$ ) 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 tipo Geiger – Müller (GM)





# Detectores tipo cintiladores

- Alguns materiais emitem luz quando irradiados chamamos esta luz de cintilação.
- Estes detectores podem ser considerados os mais eficientes na medida de raios  $\gamma$  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 conseqüentemente o pulso produzido pela fotomultiplicadora, o que permite a discriminação de fótons de energias diferentes.

# Detecção utilizando cintiladores

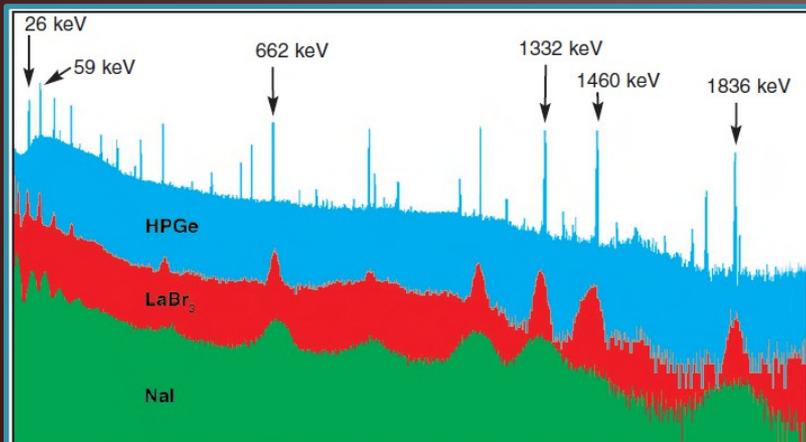
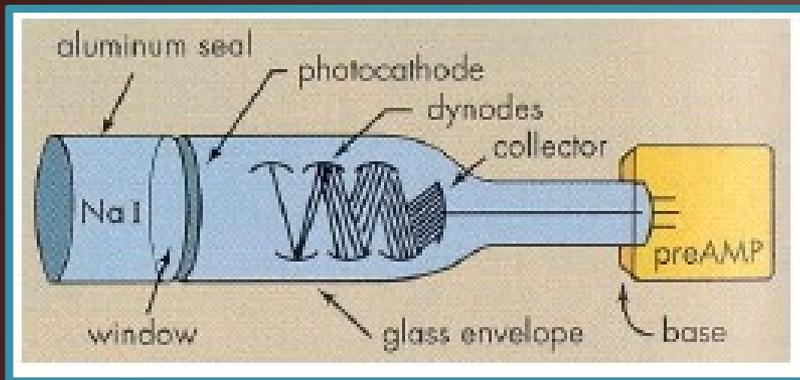


Figure 1. Comparison for LaBr<sub>3</sub>(Ce), NaI(Tl), and HPGe spectra.

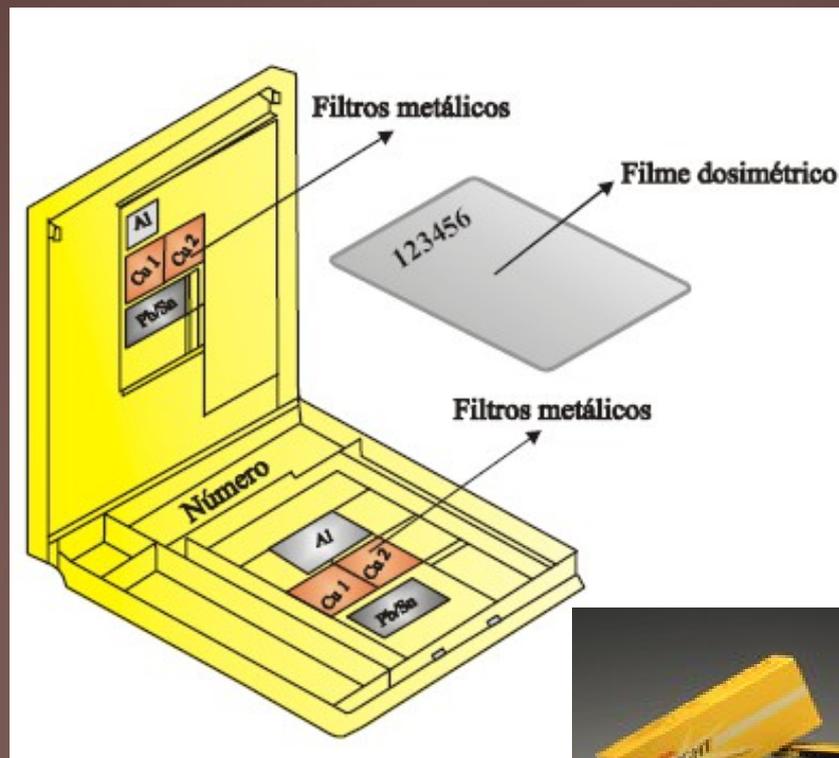




# Detecção com dosímetros pessoais

- 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), sendo posteriormente medidas através de um dado processo;
- Podem ser classificados como de leitura indireta, acumulam os efeitos da interação da radiação para posterior leitura (TLD, filmes dosimétricos), ou de leitura direta, que possibilitam a leitura imediata das interações (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 nos laboratórios da rede de calibração, os quais são rastreados ao sistema internacional de metrologia.

A close-up photograph of two pieces of chalk, one blue and one pink, resting on a light-colored wooden surface. The background is blurred, showing a white object and a green object.

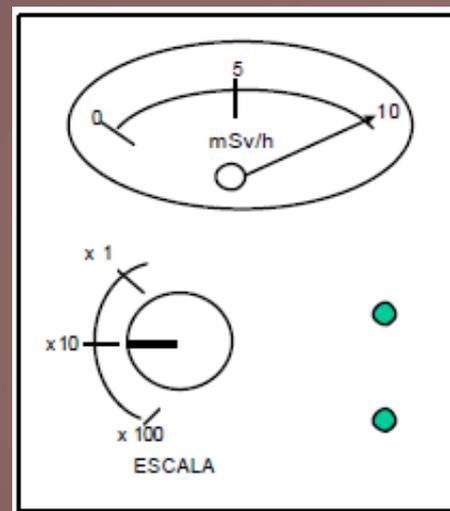
# Calibração dos instrumentos de medição

- 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\* (\*pode-se desenvolver metodologias de calibração)
    - <http://ird.go.br>
  - Laboratório de Ciências Radiológicas (**LCR** – UERJ)
    - Tipos de detectores: a gás;
    - [www.lcr.uerj.br](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 detector ?

- 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.



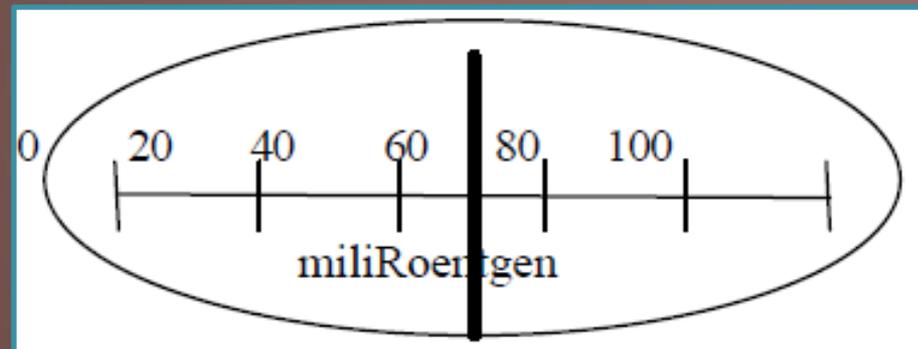
# Exercícios

2) Qual a taxa de dose 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 exposição 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 detector de radiação que utiliza mistura gasosa sob pressão dentro de um tubo metálico, e sua resposta não depende da energia das radiações eletromagnéticas incidentes, tão pouco da pressão e temperatura, é denominado:
- a) câmara de ionização
  - b) detector G.M
  - c) Cintilador
  - d) TLD
- 5) Uma empresa deve realizar um serviço de radiografia industrial numa área sem barreiras 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 ?

# Atividade campo AV1

- 1) Uma fonte radioativa apresenta neste momento uma atividade de 126 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  $^{75}\text{Se}$  durante 16 meses. Sabendo que o trabalho exige uma fonte com atividade mínima de 369 GBq e que a fonte utilizada apresenta uma atividade (no início do trabalho) de 130 Ci, após quantos meses será necessário substituir a fonte ? ( $T_{1/2} = 119,78$  dias)
- 3) Uma fonte de  $^{75}\text{Se}$  com atividade de 19 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?
- 4) O valor de exposição medida por monitor de radiação apresenta o valor de 5,8 mR. Qual o valor aproximado da dose absorvida em rad? Qual o valor da dose absorvida na unidade do SI?

# Atividade campo AV1

- 5) Qual será a taxa de dose efetiva a 7 m de distância de uma fonte de  $^{192}\text{Ir}$  com atividade de 320 GBq que está sendo utilizada na realização de END em um duto?
- 6) Uma fonte de  $^{192}\text{Ir}$  com atividade de 689 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  $^{192}\text{Ir}$  com 3459 MBq de atividade , numa distância de 259 centímetros ?

# Atividade campo AV1

- 8) Determine a espessura da barreira de concreto, em boa geometria, que deverá ser colocada a 6 m de uma fonte de  $^{192}\text{Ir}$  de 95 Ci de atividade para reduzir a taxa de exposição a 25 mR/h.
- 9) Calcule a exposição acumulada num ponto a 33 cm de uma fonte pontual de  $^{131}\text{I}$  de atividade 32 mCi, após 2 horas. Qual será o valor da exposição se a distância for aumentada para 74 cm? Qual o valor de dose absorvida aproximada?
- 10) 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  $^{60}\text{Co}$  de 72 Ci, situada a 4,5 metros.
- 11) Calcule 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  $^{137}\text{Cs}$  de 67 Ci, situada a 315 centímetros.



# Atividade campo AV1

- 12) Para a realização de um ensaio não destrutivo (END) com uma fonte de  $^{60}\text{Co}$  é necessário a construção de uma barreira de chumbo, que seja capaz de reduzir a intensidade inicial do feixe de fótons em 56 vezes. Qual a espessura necessária para a barreira ?
- 13) Para a realização de um ensaio não destrutivo (END) com um equipamento de raios X de 400 kVp é necessário a construção de uma barreira de concreto, que seja capaz de reduzir a intensidade inicial do feixe de fótons em 41 vezes. Qual a espessura necessária para a barreira ?

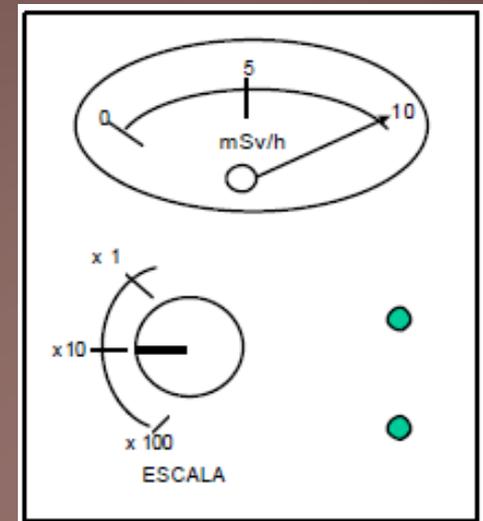


# Atividade campo AV1

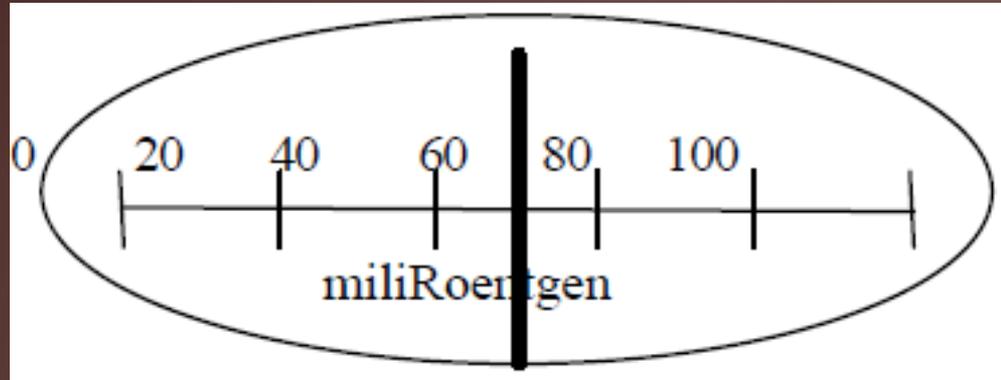
- 14) Defina detector e monitor de radiação, caracterizando a diferença de conceito entre eles.
- 15) Defina o princípio de operação de um detector a gás.
- 16) Defina o princípio de operação de um detector do tipo cintilador.
- 17) Qual a principal diferença entre um detector Geiger-Müller e detector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

# Atividade campo AV1

- 21) 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.
- 22) Diferencie dosímetros de leitura direta e indireta. Cite exemplos.
- 23) Dosímetros expressam seus resultados em que grandeza radiológica?
- 24) Baseado na figura, indique a posição do seletor de escala e do mostrador para uma taxa de dose de 25 mSv/h.



# Atividade campo AV1



25) Responda baseado no mostrador acima:

- Qual a posição do mostrador para uma exposição de 45 mR.
- Converta o valor de exposição mostrado para a unidade do SI (C/kg).
- 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?

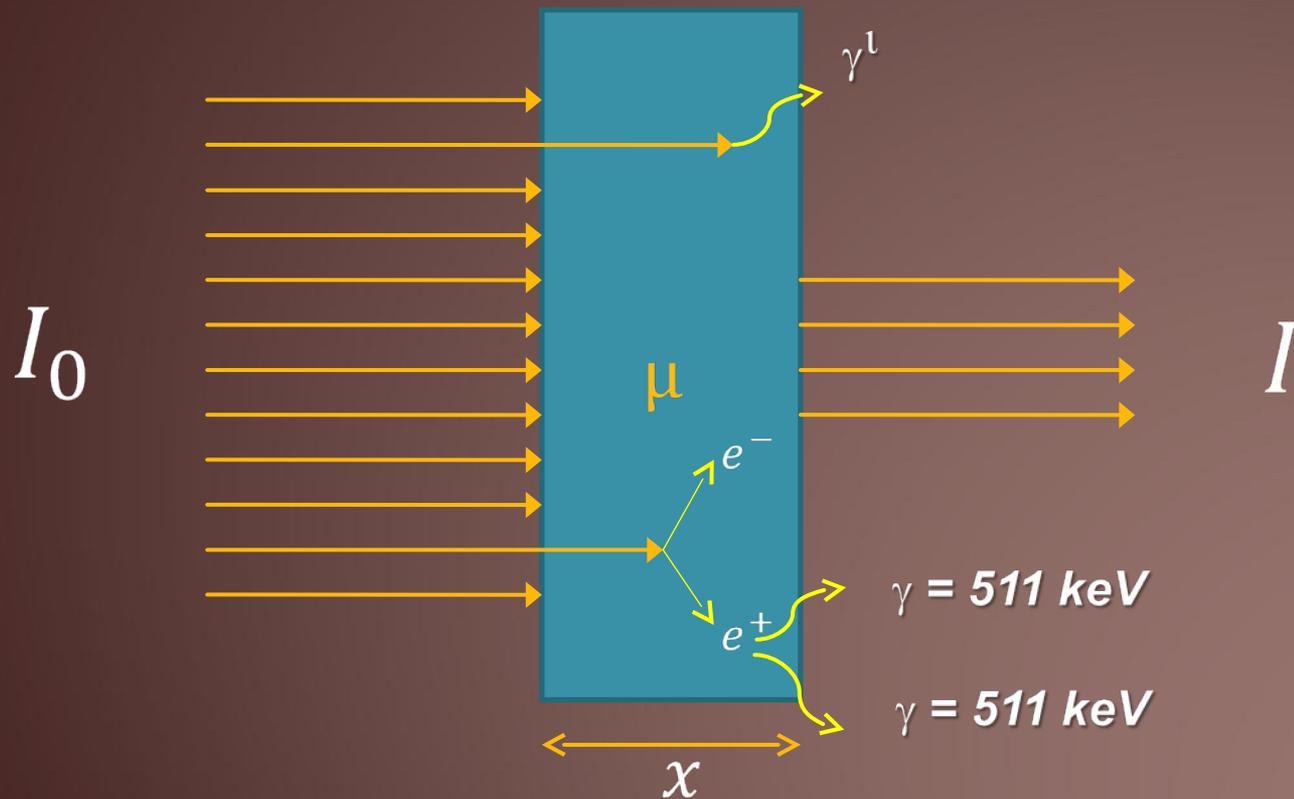
A close-up photograph of two pieces of chalk, one blue and one pink, resting on a light-colored wooden surface. The background is blurred, showing a white object and a green object.

# Cálculo de barreiras em má geometria

- 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.
- Essa contribuição aditiva representa efetivamente um crescimento da intensidade do feixe em relação ao valor esperado.

Tauhata, 2006

# Cálculo de barreiras em má geometria





# 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 da barreira e da sua espessura.
- A lei de atenuação pode ser escrita como:
  - $I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \cdot B(\mu x)$
  - Condição de boa geometria  $\rightarrow B(\mu x) = 1$ .

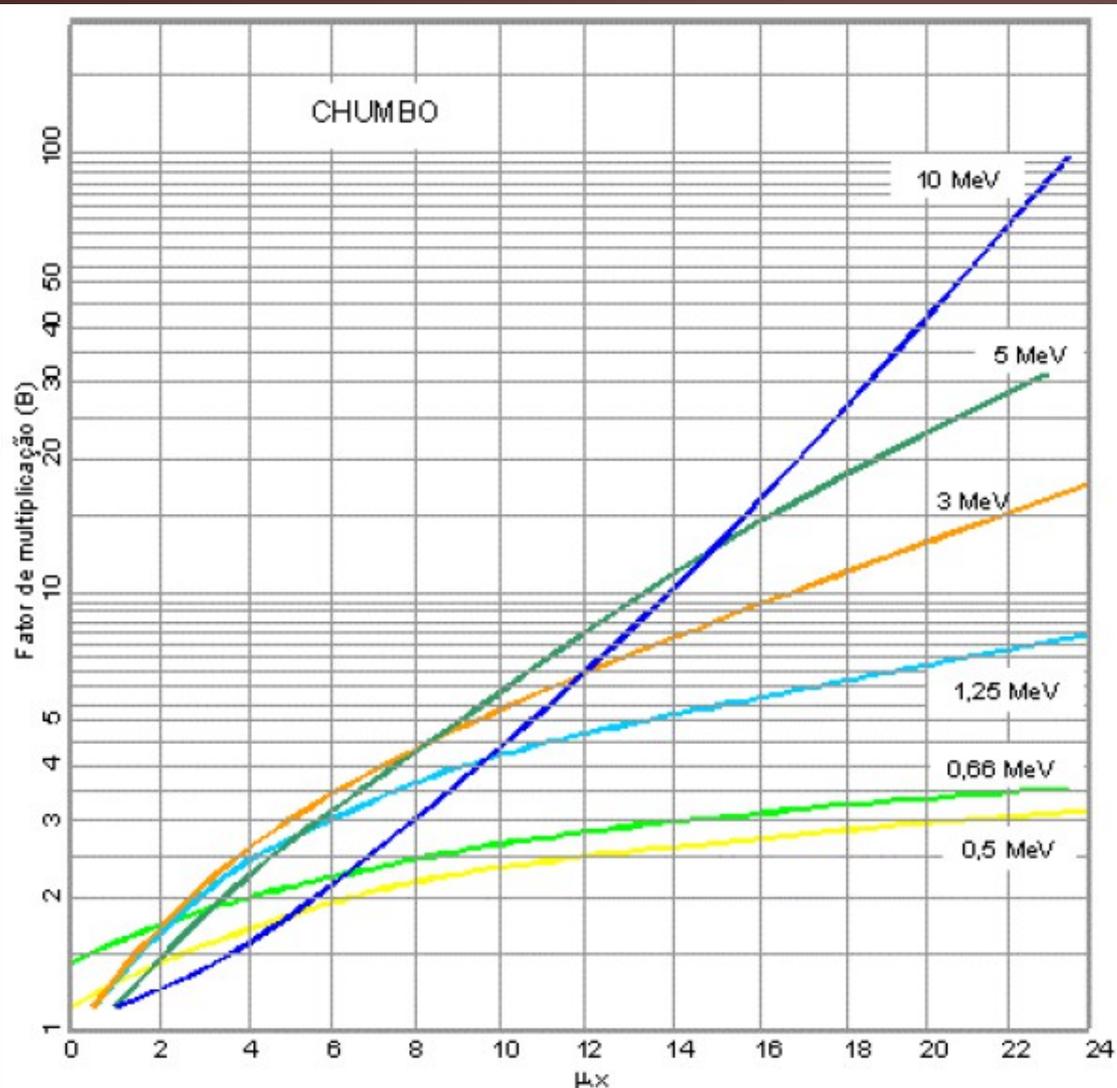
$$x = \frac{1}{\mu} \cdot \left[ \text{Ln} \left( \frac{I_0}{I} \right) + \text{Ln} (B) \right]$$

A close-up photograph of two pieces of chalk, one blue and one pink, lying on a light-colored wooden surface. The background is blurred, showing a white object and a green object.

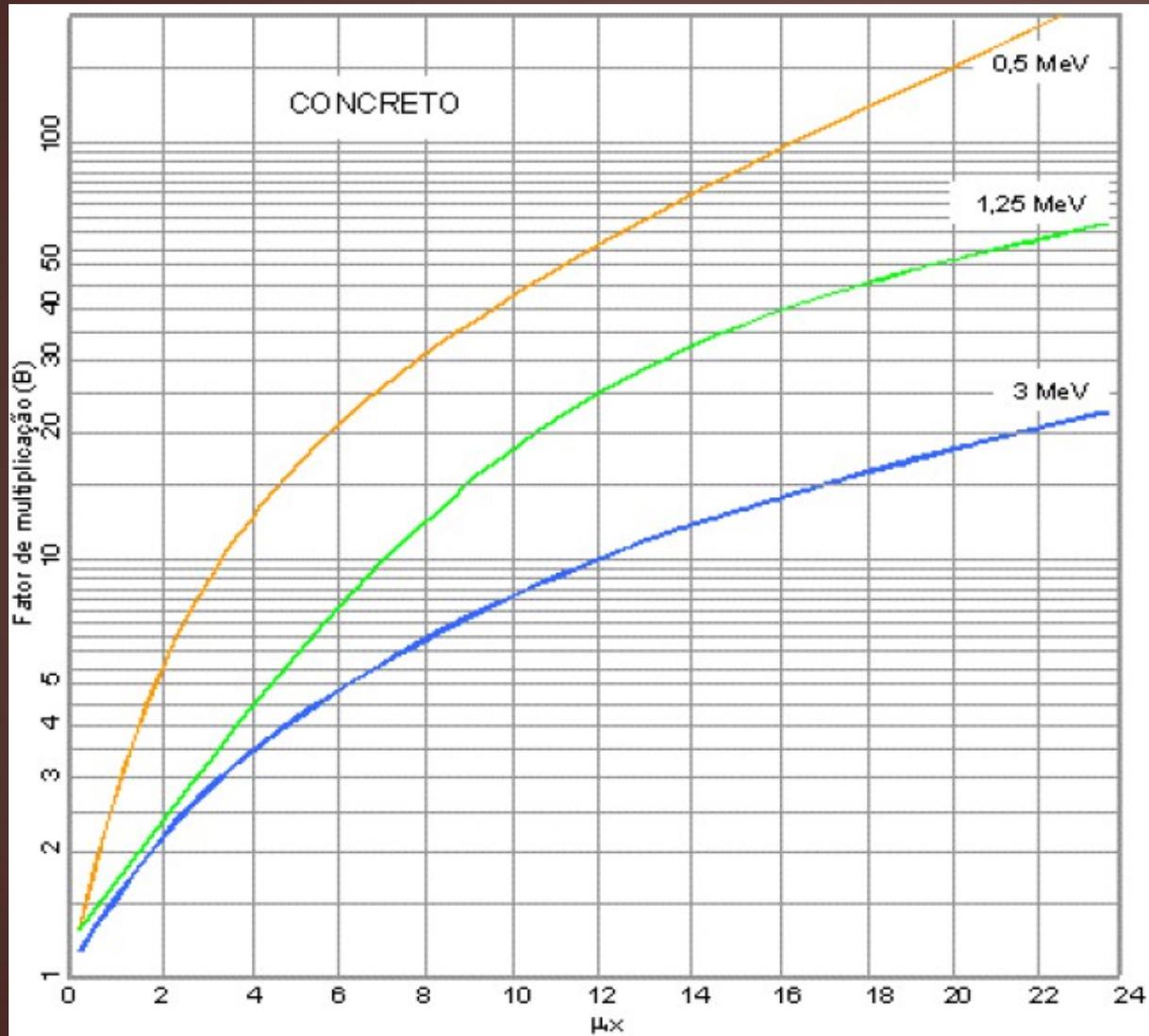
# Fator de crescimento (Build up)

- O fator  $B(\mu x)$  depende de  $\mu$  e da espessura  $x$ , podendo ser estimado, com boa aproximação por fórmulas semiempíricas ou gráficos que fornecem o valor de build-up em função de  $\mu \cdot x$ , para valores de energia média do feixe de radiação e da natureza do material absorvedor.
- No estudo desta disciplina serão usados gráficos para materiais absorvedores de chumbo, concreto e aço para a determinação do fator de Build up.

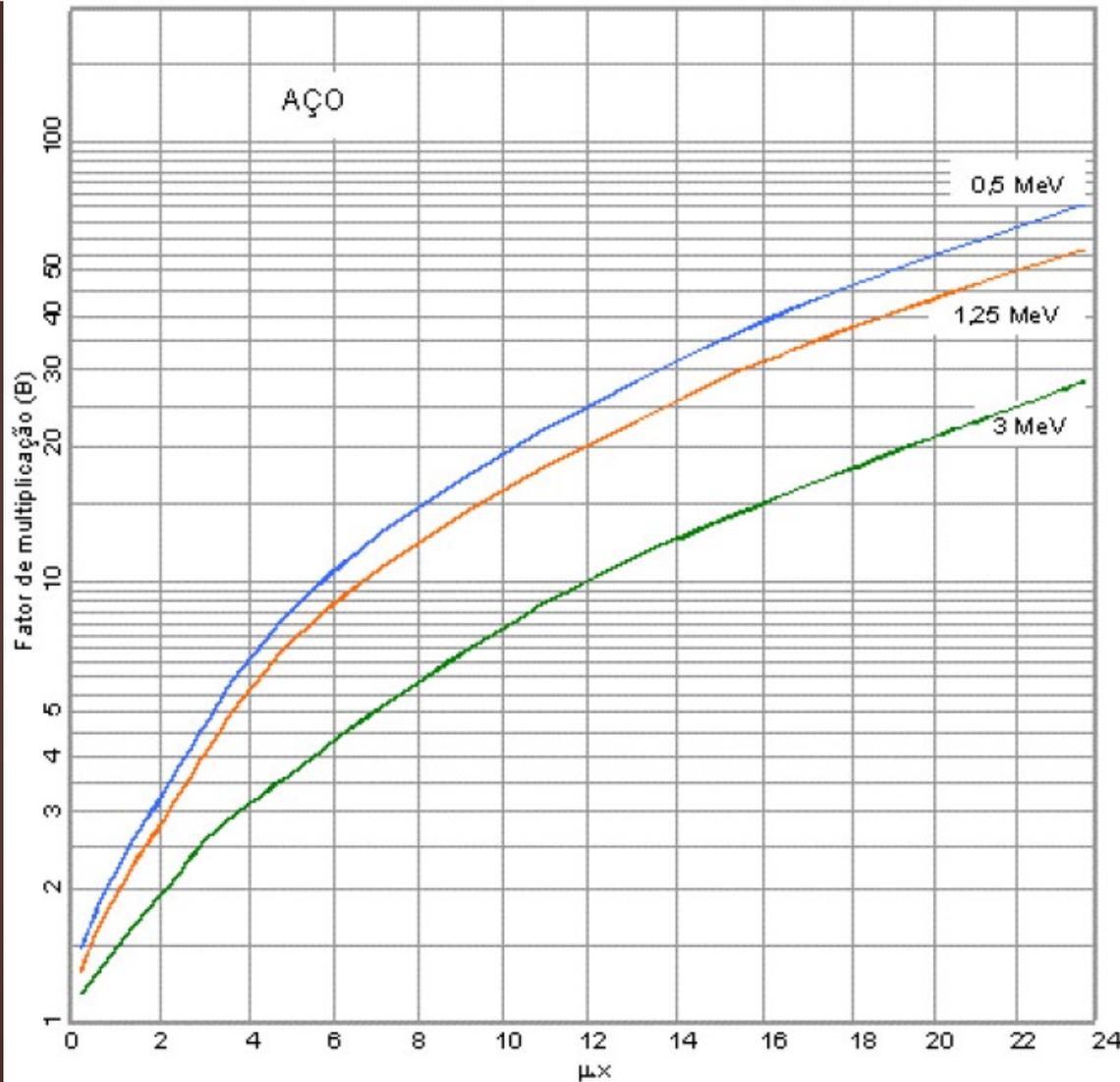
# Fator de crescimento (Build up)



# Fator de crescimento (Build up)



# Fator de crescimento (Build up)



A close-up photograph of a wooden surface with several pieces of chalk. One piece is blue, and others are light-colored. The background is blurred.

# Exemplo

- Determine a espessura das paredes de concreto de um bunker (casamata) para serviço de gamagrafia com uma fonte puntiforme de  $^{60}\text{Co}$  de 30 Ci de atividade. Sabe-se que a distância mínima entre a fonte e a parede mais próxima não será menor que 3,0 m e que a taxa de exposição externamente ao bunker não poderá exceder a 2,5 mR/h.

# Resposta

- $X_0 = \Gamma \cdot A/d^2 \rightarrow X_0 = 1,32 \cdot 30/3,0^2$   
 $\rightarrow X_0 = 4,4 \text{ R/h}$

- Espessura não corrigida:

- $x = 1/\mu \cdot \text{Ln} [I_0/I]$

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

- $x = (1/0,133) \cdot 7,473$

- $x = 56 \text{ cm}$

- $\mu x = 0,133 \cdot 56 = 7,448 \approx 8$

- no gráfico slide 70  $\rightarrow B \approx 15$

- Espessura corrigida :

- $x = 1/\mu \cdot [\text{Ln} (X_0/X) + \text{Ln} (B)]$

- $x = 56 + [(1/0,133) \cdot \text{Ln} (15)]$

- $x = 56 + [(1/0,133) \cdot 2,708]$

- $X = 56 + 20,36$

- $x = 76,36 \rightarrow \underline{x \approx 77 \text{ cm}}^*$

\* *respeitando conceitos de proteção radiológica.*



# Exercícios

- 1) Determine a espessura das paredes de concreto de um bunker (casamata) para serviço de gamagrafia com uma fonte puntiforme de  $^{60}\text{Co}$  de 75 Ci de atividade. Sabe-se que a distância mínima entre a fonte e a parede mais próxima não será menor que 4,2 m e que a taxa de exposição externamente ao bunker não poderá exceder a 2,5 mR/h.
- 2) Determine a espessura do revestimento de chumbo para as paredes de um bunker (casamata) para serviço de gamagrafia com uma fonte puntiforme de  $^{60}\text{Co}$  de 75 Ci de atividade. Sabe-se que a distância mínima entre a fonte e a parede mais próxima não será menor que 4,2 m e que a taxa de exposição externamente ao bunker não poderá exceder a 2,5 mR/h.

# Exercícios

- 3) Determine a espessura das paredes de concreto de um bunker (casamata) para serviço de gamagrafia com uma fonte puntiforme de  $^{192}\text{Ir}$  de 550 Ci de atividade. Sabe-se que a distância mínima entre a fonte e a parede mais próxima não será menor que 7 m e que a taxa de exposição externamente ao bunker não poderá exceder a 2,5 mR/h.
- 4) Determine a espessura das paredes de concreto de um bunker (casamata) para serviço de gamagrafia com uma fonte puntiforme de  $^{192}\text{Ir}$  de 350 Ci de atividade. Sabe-se que a distância mínima entre a fonte e a parede mais próxima não será menor que 6 m e que a taxa de exposição externamente ao bunker não poderá exceder a 2,5 mR/h.

# Exercícios

- 5) Determine a espessura do revestimento de chumbo para as paredes de um bunker (casamata) para serviço de gamagrafia com uma fonte puntiforme de  $^{137}\text{Cs}$  de 75 Ci de atividade. Sabe-se que a distância mínima entre a fonte e a parede mais próxima não será menor que 5,7 m e que a taxa de exposição externamente ao bunker não poderá exceder a 2,5 mR/h.

# Projeto de blindagem – Metodologia 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.
- Em 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.



# Projeto de blindagem – Metodologia NCRP 49 e atualizações

- 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.
- 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.



# Projeto de blindagem – Metodologia 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.
- 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.



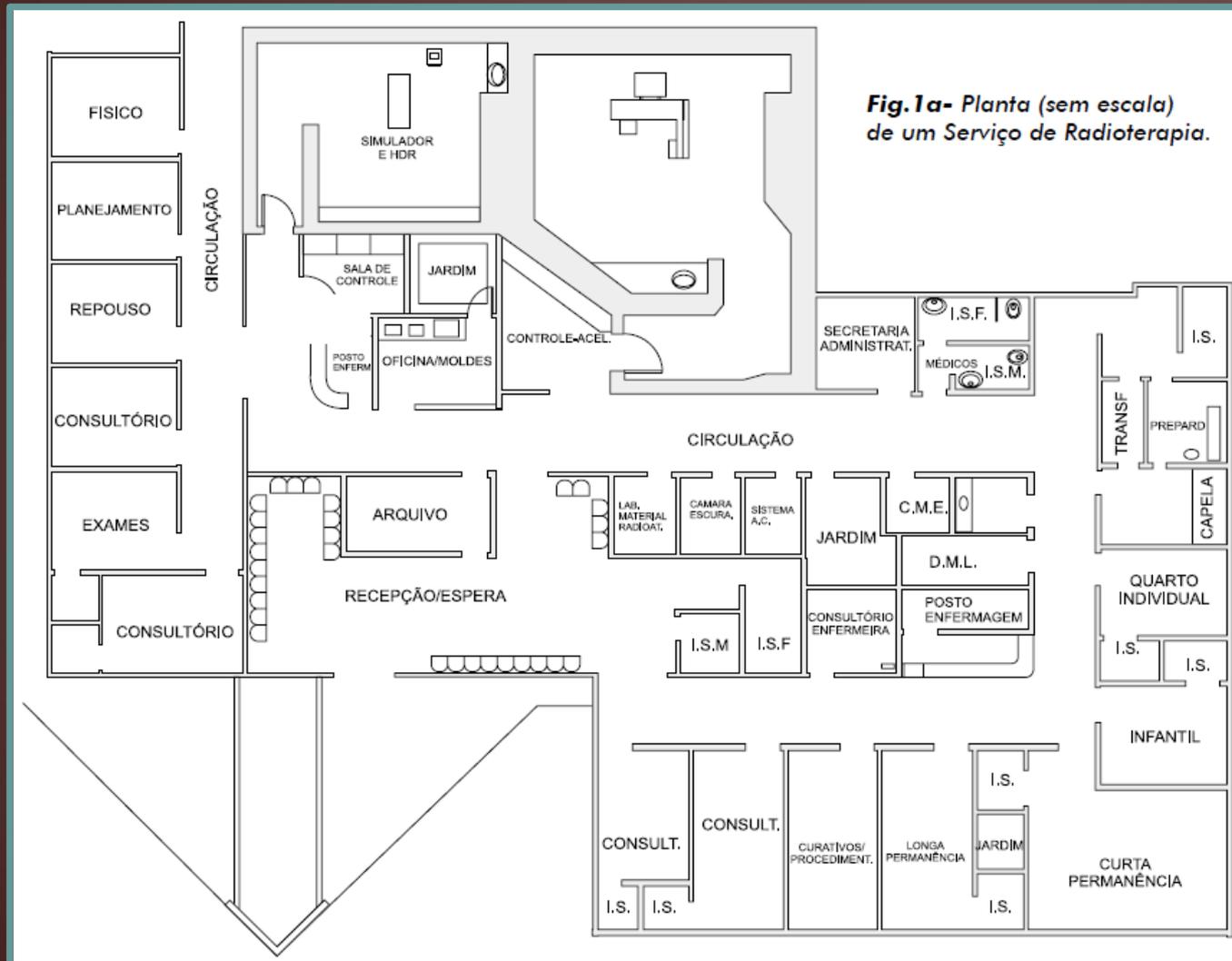
# Projeto de blindagem – Metodologia NCRP 49 e atualizações

- 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.

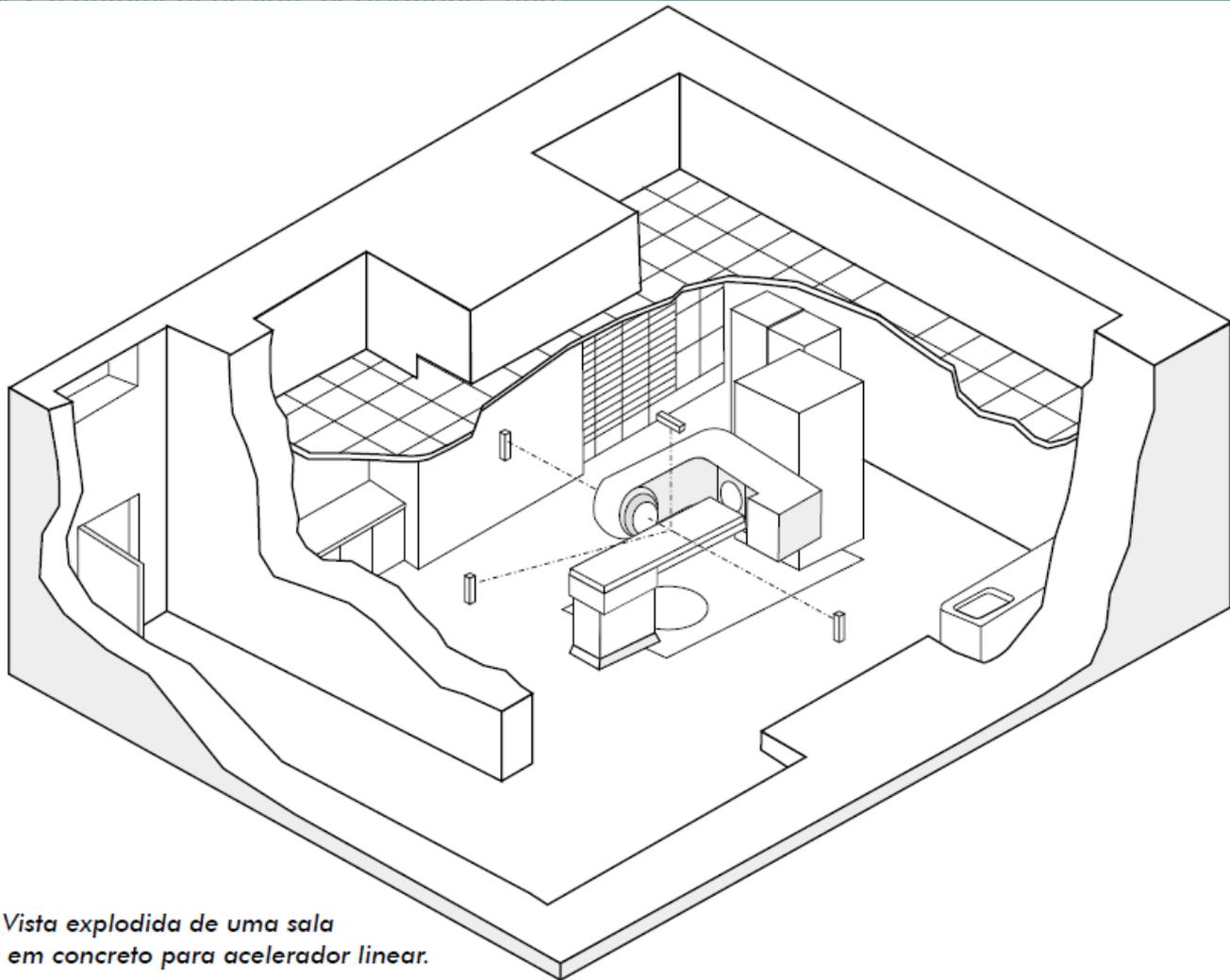
# Projeto de blindagem – Metodologia NCRP 49 e atualizações



# Projeto de blindagem – Metodologia NCRP 49 e atualizações



# Projeto de blindagem – Metodologia NCRP 49 e atualizações



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

# Projeto de blindagem – Metodologia NCRP 49 e atualizações

- 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:

$$B_x = \frac{P \cdot (d_{prim})^2}{W \cdot U \cdot T}$$

# Projeto de blindagem – Metodologia NCRP 49 e atualizações

- onde
  - $P$  é o limite autorizado derivado semanal para regiões externas;
  - $d_{\text{prim}}$  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
  - $T$  é 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.

# Projeto de blindagem – Metodologia NCRP 49 e atualizações

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

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

- 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;
- $\alpha$  é a razão entre a radiação espalhada e incidente (Tabela B-2 NCRP 49).
- $F$  é a área do campo utilizado.

# Projeto de blindagem – Metodologia NCRP 49 e atualizações

TABLE B-2 – Ratio,  $a$ , of scattered to incident exposure<sup>a</sup>

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

<sup>a</sup> Scattered radiation measured at one meter from phantom when field area is 400 cm<sup>2</sup> at the phantom surface; incident exposure measured at center of field one meter from the source but without phantom.

# Projeto de blindagem – Metodologia NCRP 49 e atualizações

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

$$B_f = \frac{1000 \cdot P \cdot (d_{sec})^2}{W \cdot T}$$

- 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.

# Projeto de blindagem – Metodologia NCRP 49 e atualizações

- 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

# Projeto de blindagem – Metodologia NCRP 49 e atualizações

- 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

# Projeto de blindagem – Metodologia NCRP 49 e atualizações

- 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  $U = 1$ .*

# Projeto de blindagem – Metodologia NCRP 49 e atualizações

- 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 ( $R.m^2$ ) ou Gray ( $Gy.m^2$ ).

# Projeto de blindagem – Metodologia NCRP 49 e atualizações

- 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)

- **$W = 50 \times 2 \times 200 \times 5 = 100.000 \text{ Rad/sem ou } 1 \times 10^3 \text{ Gy/sem a 1 m}$**

$$W = \frac{\cancel{\text{paciente}}}{\cancel{\text{dia}}} \cdot \frac{\cancel{\text{campo}}}{\cancel{\text{paciente}}} \cdot \frac{\text{Rad}}{\cancel{\text{campo}}} \cdot \frac{\cancel{\text{dia}}}{\text{semana}} = \frac{\text{Rad}}{\text{semana}}$$

# Projeto de blindagem – Metodologia NCRP 49 e atualizações

- Grandeza e fatores utilizados no cálculo de blindagem:
  - Carga de trabalho (W)
  - Exemplo de Cálculo de W para HDR:
    - Tipo de equipamento: HDR com  $^{192}\text{Ir}$
    - 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  $^{192}\text{Ir}$ : 4,8 R cm<sup>2</sup>/mCi h
  - **$W = 4,8 \cdot 10000 \text{ mCi} \cdot 5 \text{ pacientes} \cdot 5 \text{ dias} \cdot (5/60 \text{ hs})/(100\text{cm})^2$** 
    - **$W = 10 \text{ R/sem} \rightarrow 9 \times 10^{-2} \text{ Gy/sem}$  ou  $9 \text{ cGy/sem}$  a 1 m.**

# Projeto de blindagem – Metodologia NCRP 49 e atualizações

- 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.

# Projeto de blindagem – Metodologia NCRP 49 e atualizações

## ✓ Cálculo da espessura da blindagem

$$n = -\log(B_x)$$

Barreira primária

$$x = n \cdot TVL$$

$\underline{n}$ , representa o número de TVL.

$$n = -\log(B_p)$$

Barreira secundária

# Projeto de blindagem – Metodologia NCRP 49 e atualizações

- 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:
    - **$L = 0,566.X + 0,6$  (m)**

# Projeto de blindagem – Metodologia NCRP 49 e atualizações

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

→  $W = 1000 \text{ Gy/semana a } 1 \text{ metro}$

→  $P = 2 \times 10^{-5} \text{ Sv/semana (área livre)}$

→  $U = 1/7$

→  $T = 1$

→  $d = 7 \text{ m}$

$$B_x = \frac{P \cdot (d_{prim})^2}{W \cdot U \cdot T}$$

$$n = -\log(B_x)$$

$$x = n \cdot TVL$$

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



$$B_x = 7 \times 10^{-6}$$

$$n = -\log(7 \times 10^{-6})$$



$$n = 5,1549$$



$$x = 5,1549 \cdot 34,5^*$$



$$x = 178^{**} \text{ cm}$$

**\* ver slide 36**

**\*\* respeitando conceitos de proteção radiológica.**

# Projeto de blindagem – Metodologia NCRP 49 e atualizações

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

→  $W = 1000$  Gy/semana a 1 metro

→  $P = 2 \times 10^{-5}$  Sv/semana (área livre)

→  $T = 1$

→  $d_{esp} = 1$  m

→  $d_{sec} = 9,9$  m

→  $\alpha = 0,0027$  (ângulo de  $45^\circ$ )

→  $F = 400$  cm<sup>2</sup>

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

$$n = -\log(B_p)$$

$$x = n \cdot TVL$$

$$B_p = \frac{2 \times 10^{-5}}{0,0027 \cdot 1000 \cdot 1} \cdot (9,9)^2 \cdot (1)^2 \cdot \frac{400}{400}$$

$$B_x = 7 \times 10^{-4}$$

$$n = -\log(7 \times 10^{-4})$$

$$n = 3,1549$$

$$x = 3,1549 \cdot 29,2^*$$

$$x = 93,0^{**} \text{ cm}$$

\* ver slide 36

\*\* respeitando conceitos de proteção radiológica.

# Projeto de blindagem – Metodologia NCRP 49 e atualizações

- 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  $30^\circ$ \*
- $F = 400\text{cm}^2$

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

$$n = -\log(B_p)$$

$$B_x = \frac{P \cdot (d_{\text{prim}})^2}{W \cdot U \cdot T}$$

$$n = -\log(B_x)$$

$$x = n \cdot TVL$$

\* ver slide 91

# Atividade campo AV2

- Relatório sobre aula prática com o tema:
  - *Avaliação de atenuação de materiais para blindagem e medição da atenuação da intensidade de radiação ionizante.*
- **Estrutura do relatório:**
  - Capa;
  - Sumário;
  - Introdução;
  - Materiais;
  - Desenvolvimento;
  - Resultados;
  - Discussão e conclusão;
  - Referências.



# Exercícios adicionais

- 1) Determine a espessura das paredes de concreto de um bunker (casamata) para serviço de gamagrafia com uma fonte puntiforme de  $^{192}\text{Ir}$  de 530 Ci de atividade. Sabe-se que a distância mínima entre a fonte e a parede mais próxima não será menor que 5 m e que a taxa de exposição externamente ao bunker não poderá exceder a 2,5 mR/h. Considere  $B \neq 1$ .

A close-up photograph of a wooden surface with a blue piece of chalk and a red piece of chalk lying on it. The background is blurred, showing a light blue wall.

# Exercícios adicionais

- 2) Qual o valor da carga de trabalho (W) para um irradiador com seguintes características:
- Tipo de equipamento: HDR com  $^{192}\text{Ir}$
  - 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  $^{192}\text{Ir}$ : *ver slide 10*

# Exercícios adicionais

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

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

# Exercícios adicionais

4) 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  $60^\circ$
- $F = 400\text{cm}^2$

# Cálculo de Blindagem e Dosimetria na Indústria

Prof. Luciano Santa Rita

[www.lucianosantarita.pro.br](http://www.lucianosantarita.pro.br)

[tecnologo@lucianosantarita.pro.br](mailto:tecnologo@lucianosantarita.pro.br)