

# Dosimetria, Cálculo de Blindagem e Proteção Radiológica

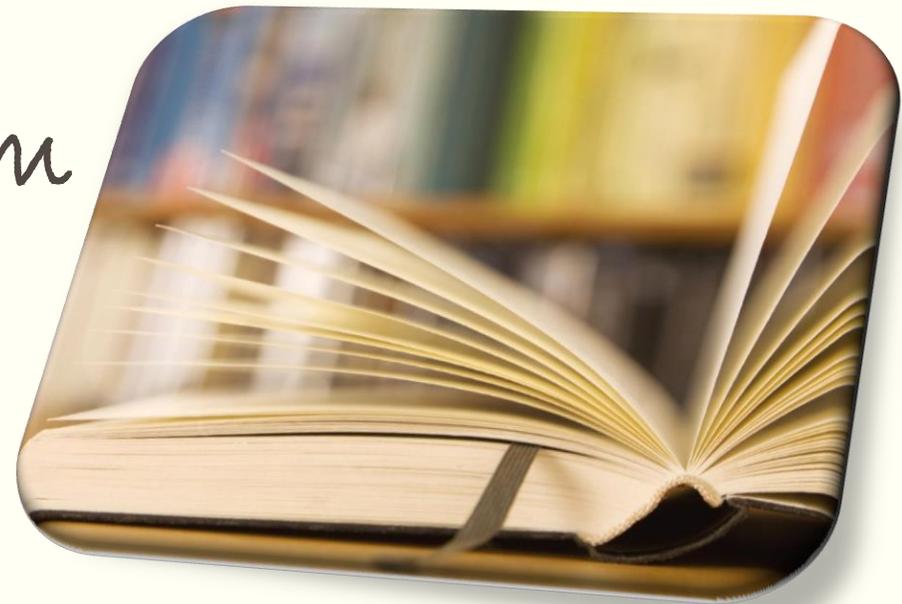
Prof. Luciano Santa Rita

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

[lucianosantarita@outlook.com](mailto:lucianosantarita@outlook.com)

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

[www.facebook.com/SPR.LucianoSantaRita/](https://www.facebook.com/SPR.LucianoSantaRita/)



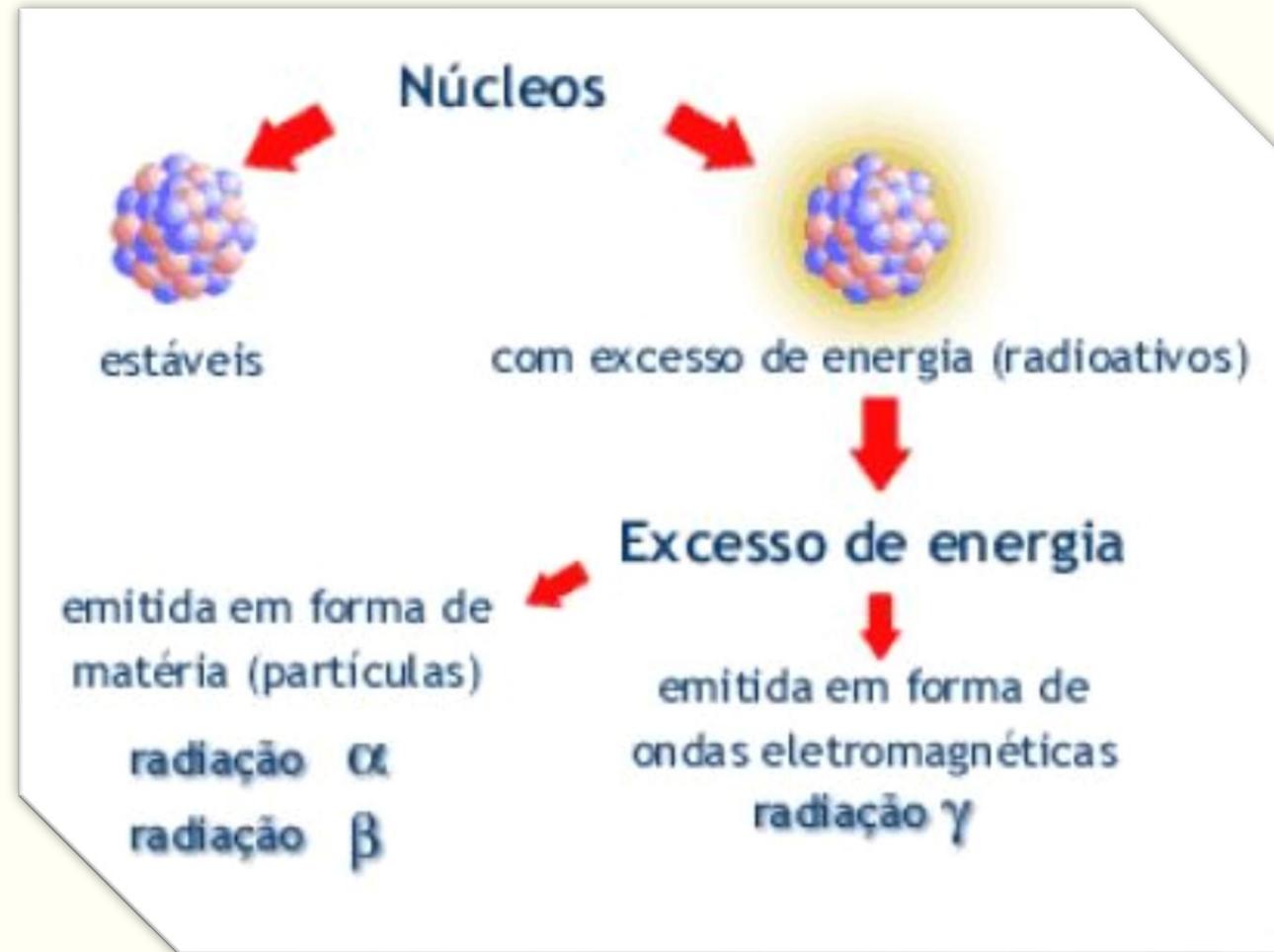
# Conteúdo Programático

---

- Revisão de conceitos radiológicos
- Classificação e organização das grandezas para radiação ionizante;
- Grandezas radiológicas;
- Conceitos e legislação em proteção radiológica (PR da norma 3.01)
- Níveis de restrição de dose e de ação
- Serviço de Proteção Radiológica
- Operação de monitores de radiação
- Cálculo de doses ocupacionais e adequação de áreas
- Fatores de quantificação da interação de fótons em uma blindagem
- Projeto de blindagem para uma fonte pontual com energia discreta

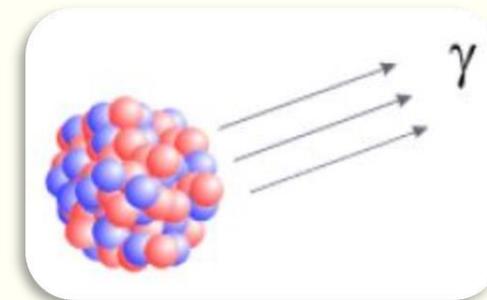
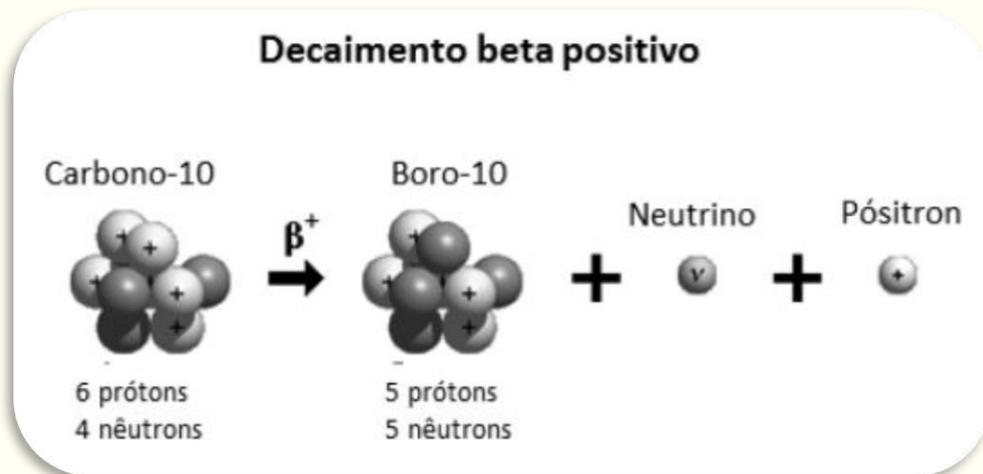
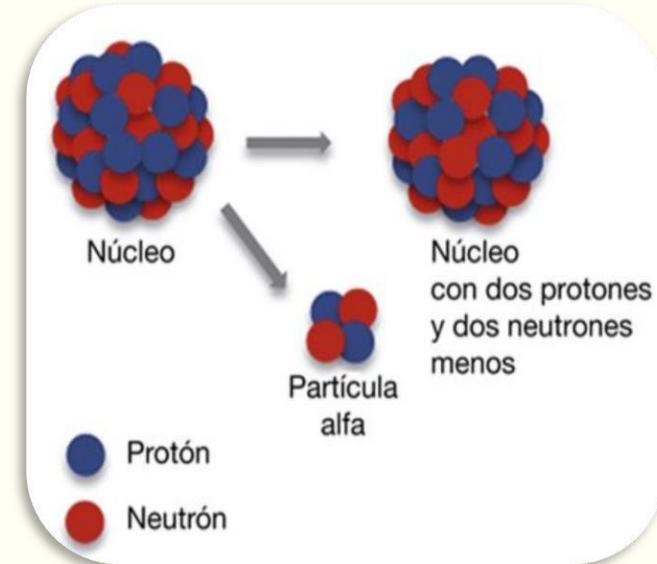
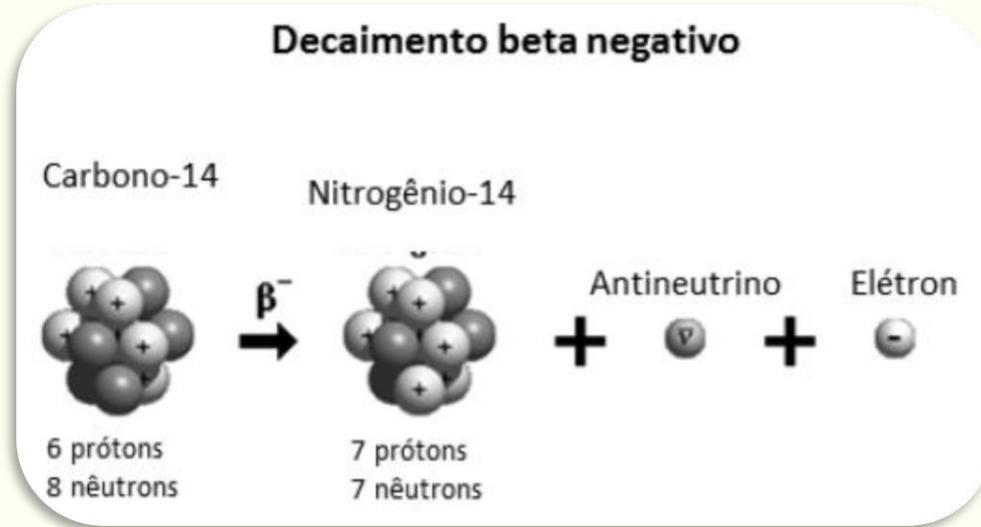
# Revisão de Conceitos radiológicos: Radioatividade

---



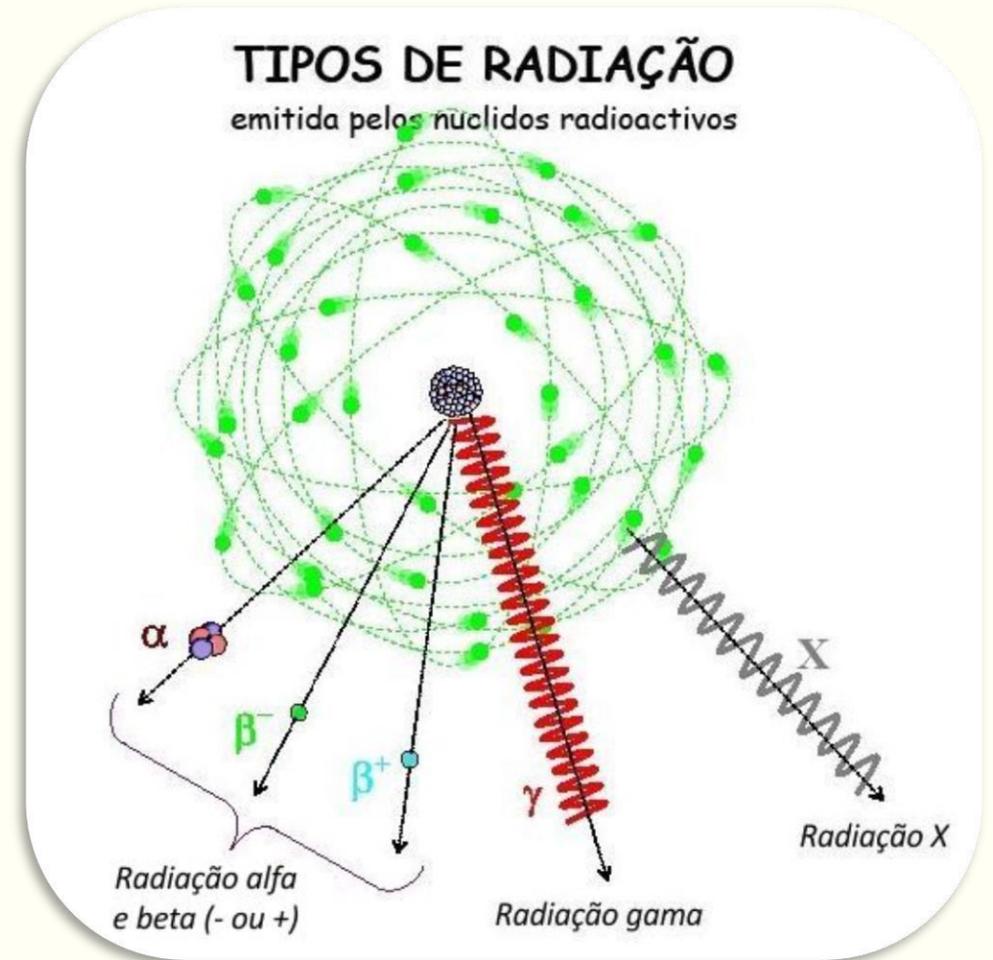
□ É a emissão de partículas e energia, com o intuito de atingir a estabilidade.

# Revisão de Conceitos radiológicos: Radioatividade



# Revisão de Conceitos radiológicos: Radioatividade

- ❑ Radiações diretamente ionizante: possuem carga elétrica, ionizam diretamente a matéria. Exemplos: partículas alfa e beta.
- ❑ Radiações indiretamente ionizante: não possuem carga elétrica, transferem sua energia para uma partícula com carga elétrica e esta ioniza a matéria. Exemplos: raios X, raios gama e nêutrons.



# Revisão de Conceitos radiológicos: Categorização de Fontes

<b>Categoria</b>	<b>Fonte</b>	<b>Exemplos</b>	<b>Atividade (TBq)</b>
1	Extremamente perigosa	Radioterapia ( $^{60}\text{Co}$ )	$4,0 \times 10^3$
2	Muito perigosa	Gamagrafia ( $^{60}\text{Co}$ , $^{192}\text{Ir}$ e $^{75}\text{Se}$ ), Braquiterapia HDR ( $^{192}\text{Ir}$ e $^{60}\text{Co}$ )	$6,0 \times 10^1 - 1,0 \times 10^2$ $6,0 \times 10^0 - 1,0 \times 10^1$
3	Perigosa	Medidores de nível ( $^{60}\text{Co}$ e $^{137}\text{Cs}$ )	$5,0 \times 10^0$
4	Provavelmente não perigosa	Medidores de espessura ( $^{85}\text{Kr}$ e $^{90}\text{Sr}$ ), Braquiterapia LDR ( $^{125}\text{I}$ e $^{198}\text{Au}$ )	$1,0 \times 10^{-1} - 1,0 \times 10^0$ $4,0 \times 10^{-2} - 8,0 \times 10^{-2}$
5	Não perigosa	PET ( $^{68}\text{Ge}$ )	$3,0 \times 10^{-3}$

- ❖ Categoria 1:  $(A/D) > 1000$
- ❖ Categoria 2:  $(A/D) 10,0 - 1000$
- ❖ Categoria 3:  $(A/D) 1,0 - 10,0$
- ❖ Categoria 4:  $(A/D) 0,01 - 1,0$
- ❖ Categoria 5:  $(A/D) < 0,01$

*IAEA - TECDOC-1344*

# Revisão de Conceitos radiológicos: Notação científica e notação de engenharia.

---

$$N \times 10^p$$

- *Notação científica* é uma forma concisa de representar números, em especial muito grande ou muito pequeno. Baseia-se no uso de potência de 10. Onde N é um número maior ou igual a 1 e menor que 10 e p é um número inteiro.
- *Notação de engenharia* é uma outra forma concisa de representar números fazendo uso de potência de 10, mas N é um número maior que 1 e menor que 1000 e p é formado por múltiplos de 3.

$$2,67 \times 10^9 \text{ ou } 8,6 \times 10^{-11}$$

$$267 \times 10^9 \text{ ou } 86 \times 10^{-18}$$

# Revisão de Conceitos radiológicos: Notação científica e notação de engenharia.

	Nome do Prefixo	Símbolo do Prefixo	Fator pelo qual a unidade é multiplicada
<b>MÚLTIPLOS</b>	yotta	Y	$10^{24} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000$
	zetta	Z	$10^{21} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000$
	exa	E	$10^{18} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000$
	peta	P	$10^{15} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000$
	tera	T	$10^{12} = 1\ 000\ 000\ 000\ 000$
	giga	G	$10^9 = 1\ 000\ 000\ 000$
	mega	M	$10^6 = 1\ 000\ 000$
	quilo	k	$10^3 = 1\ 000$
	hecto	h	$10^2 = 1\ 00$
	deca	da	10
<b>UNIDADE</b>			
<b>SUBMÚLTIPLOS</b>	deci	d	$10^{-1} = 0,1$
	centi	c	$10^{-2} = 0,01$
	mili	m	$10^{-3} = 0,001$
	micro	μ	$10^{-6} = 0,000\ 001$
	nano	n	$10^{-9} = 0,000\ 000\ 001$
	pico	p	$10^{-12} = 0,000\ 000\ 000\ 001$
	femto	f	$10^{-15} = 0,000\ 000\ 000\ 000\ 001$
	atto	a	$10^{-18} = 0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001$
	zepto	z	$10^{-21} = 0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001$
	yocto	y	$10^{-24} = 0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001$

# Revisão de Conceitos radiológicos: Regras de Arredondamento. (ABNT NBR 5891:2014)

---

- A norma ABNT NBR 5891:2014 estabelece regras de arredondamento da numeração decimal;
  - ❖ Quando o algarismo a ser preservado for seguido de outro inferior a 5: 1,3423  $\Rightarrow$  1,34;
  - ❖ Quando o algarismo a ser preservado for seguido de outro superior a 5: 4,6281  $\Rightarrow$  4,63;
  - ❖ Quando o algarismo a ser preservado for seguido de 5 e após este existir algum algarismo diferente de zero: 6,4500030  $\Rightarrow$  6,5
  - ❖ Quando o algarismo a ser preservado for seguido de 5, seguido somente por zeros e antes do 5 for um número par: 6,4500000  $\Rightarrow$  6,5
  - ❖ Quando o algarismo a ser preservado for seguido de 5, seguido somente por zeros e antes do 5 for um número ímpar: 6,3500000  $\Rightarrow$  6,3

# Revisão de Conceitos radiológicos: Algoritmos significativos (AS) em operações de medidas físicas

---

- A soma (ou diferença) de medidas físicas deve ser apresentada com o menor nº de casa decimais relativo as medidas em operação.

$$8,24 + 1,6 = 9,84$$

Certo ou errado?

- ❖ Como 1,6 tem apenas uma casa decimal, o resultado também tem que ter uma casa decimal, ou seja **9,8**.

- O produto (ou quociente) de medidas físicas deve ser apresentado com o menor nº de algarismos significativos relativo às medidas em operação.

$$2,24 \times 1,3 = 2,912$$

Certo ou errado?

- ❖ Como o nº 1,3 tem apenas 2 A.S., o resultado deve apresentar apenas 2 A.S., ou seja **2,9**.

# Revisão de Conceitos radiológicos: Exercícios de fixação

---

1.  $2 \times 10^4 + 4,2 \times 10^{-6} =$
2.  $23,43 - 4,673 =$
3.  $6,23 \times 3,4692 =$
4.  $26,42 \times 10^{-9} \div 4,462 \times 10^{-3} =$
5. Um estudante mede a massa de 3 canetas esferográficas e obtém os seguintes valores: 6,462g, 5,86g e 7,1g. Qual a soma das massas das 3 canetas?
6. Ao medir o volume de uma amostra, foi encontrado o seguinte resultado:  $V = 0,002640 \text{ m}^3$ . Qual o número de algarismos significativos desta medida?

# Classificação e organização das grandezas para radiação ionizante : Definições

---

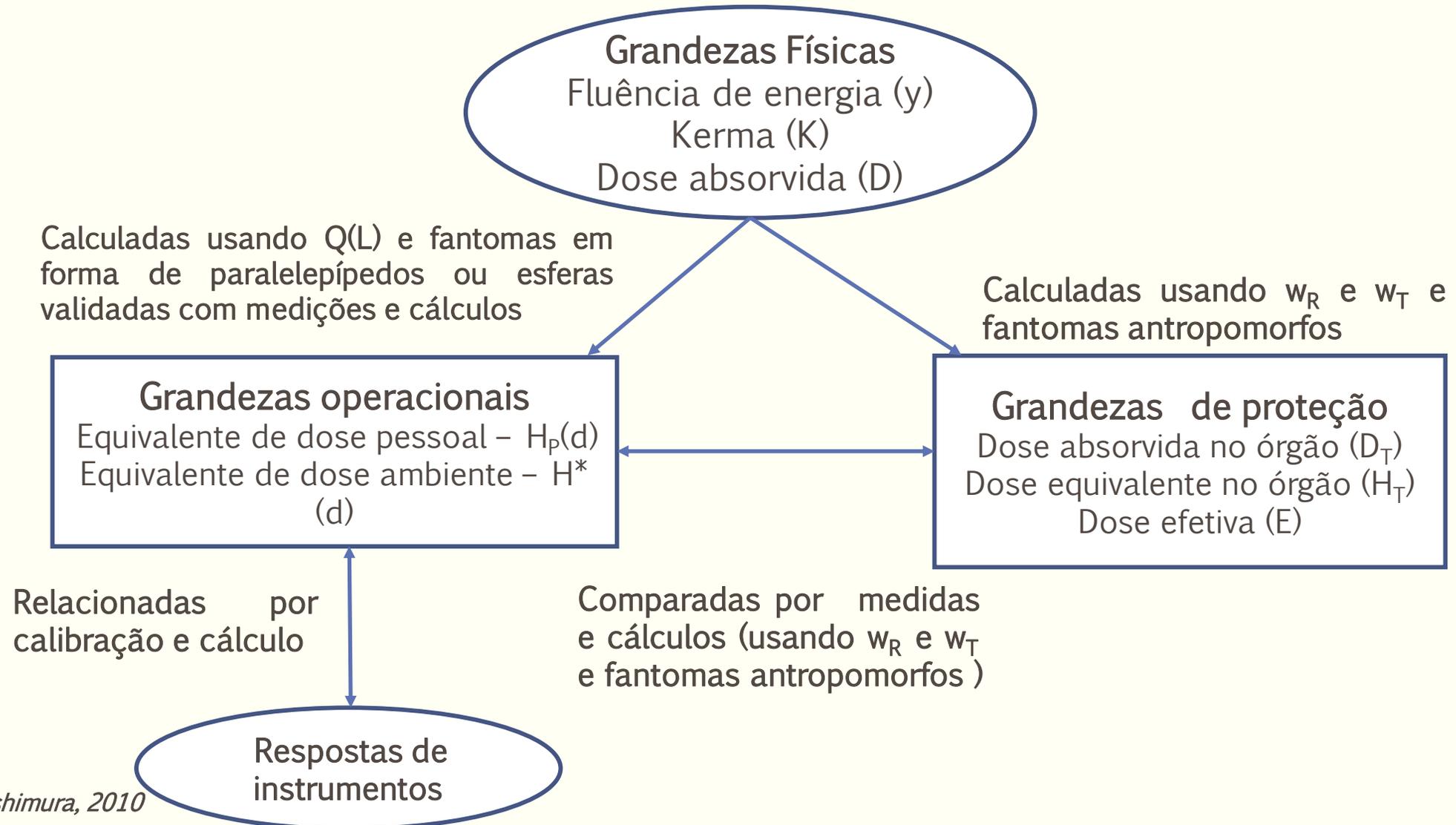
- **Grandezas:** Propriedade de um fenômeno de um corpo ou de uma substância, que pode ser expressa quantitativamente sob a forma de um número e de uma referência. A referência pode ser uma unidade de medida. Ex.:  $X = 2 \text{ R}$ ;  $D = 0,01 \text{ Gy}$  ou  $E = 0,02 \text{ Sv}$ ;
- **Unidades de medidas:** Grandeza escalar, com a qual qualquer outra grandeza da mesma natureza pode ser comparada para expressar, na forma dum número, a razão entre as duas grandezas. As unidades de medida são designadas por nomes e símbolos atribuídos por convenção. Ex.: Gray  $\rightarrow$  Gy; Sievert  $\rightarrow$  Sv ou Roentgen  $\rightarrow$  R;
- **Sistema internacional de unidades:** Sistema de unidades, incluindo uma série de prefixos com seus nomes e símbolos, em conjunto com regras de utilização, adotado pela Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM). O SI é baseado nas sete grandezas de base (comprimento (m), massa (kg), tempo (s), corrente elétrica (A), temperatura (K), quantidade de substância (mol) e intensidade luminosa (cd)).

# Classificação e organização das grandezas para radiação ionizante

---

- As grandezas para as radiações ionizantes estão separadas em três categorias principais: grandezas físicas, grandezas de proteção e grandezas operacionais.
  - As **grandezas físicas** são as grandezas que descrevem a interação da radiação com a matéria.
  - As **grandezas de proteção** são utilizadas para quantificar o risco da exposição do homem à radiação ionizante, mas não podem ser medidas com um equipamento.
  - As **grandezas operacionais** podem ser medidas e usadas para estimar o risco da exposição do homem à radiação ionizante, viabilizando a dosimetria externa.
  - Para correlacionar as grandezas operacionais com as de proteção, e ambas com as grandezas físicas foram calculados **coeficientes de conversão**, os quais estão tabelados.

# Classificação e organização das grandezas para radiação ionizante



# Classificação e organização das grandezas para radiação ionizante

---

- O laboratório nacional de metrologia das radiações ionizante (LNMRI) em sua publicação Grandezas e Unidades para Radiação Ionizante, apresenta também a classificação a seguir:
  - ❖ **Grandezas de radioatividade** são grandezas associadas com as transformações que ocorrem em materiais radioativos;
  - ❖ **Grandezas radiométricas** estão associadas com o campo de radiação;
  - ❖ **Grandezas dosimétricas** são produto das duas anteriores;
  - ❖ **Grandezas de radioproteção**
    - **Limitantes** - são grandezas criadas pela ICRP e também utilizadas em normas para indicar o risco humano da exposição à radiação ionizante;
    - **Operacionais** - são aquelas definidas para uso nas práticas de monitoração de área e monitoração individual. A existência destas grandezas deve-se ao fato de que as grandezas limitantes não são mensuráveis ou facilmente estimáveis.

# Classificação e organização das grandezas para radiação ionizante: Grandezas de radioatividade

---

- A **atividade** de um material radioativo é o número de transformações nucleares por unidade de tempo.
- Onde N é o número de núcleos radioativos contidos na amostra ou material. A unidade, Becquerel (Bq), corresponde a uma transformação por segundo, ou  $s^{-1}$ .
- A unidade antiga, Curie (Ci) =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq, ou ainda 1 Ci = 37GBq.
- Meia vida ( $T_{1/2}$ ) é o tempo necessário para termos no material radioativo exatamente a metade do número inicial de átomos excitados.

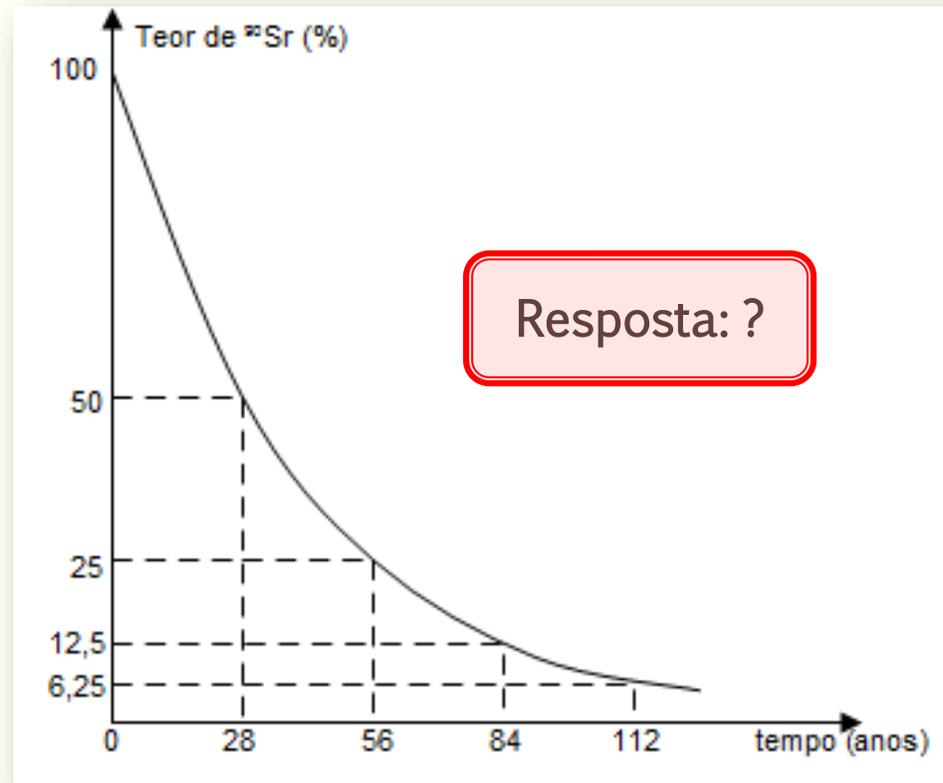
$$A = \frac{dN}{dt} \quad [s^{-1}]$$

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad [Bq]$$

# Classificação e organização das grandezas para radiação ionizante: Grandezas de radioatividade

---

- O gráfico abaixo ilustra a variação do teor de  $^{90}\text{Sr}$ , presente na amostra dessa substância. Pelo exame do gráfico, qual a meia-vida do  $^{90}\text{Sr}$ ?



# Classificação e organização das grandezas para radiação ionizante: Grandezas físicas

---

- **Fluência:** Grandeza radiométrica definida pelo quociente de  $dN$  por  $da$ , onde  $dN$  é o número de partículas ou fótons incidentes em uma esfera infinitesimal com área de seção reta perpendicular ao feixe  $da$ . A unidade de fluência é  $m^{-2}$ .
- **Fluência de energia:** Onde  $dR$  é a energia radiante incidente em uma esfera infinitesimal de seção reta  $da$ . Para um campo monoenergético:
- As grandezas escalares fluência e fluência de energia são relevantes na determinação da grandeza Kerma.

$$\Phi = \frac{dN}{da}$$

$$\Psi = \frac{dR}{da}$$

$$\Psi_E = E \cdot \Phi$$

# Classificação e organização das grandezas para radiação ionizante: Grandezas físicas

---

- **Exposição (X).** É o quociente entre  $dQ$  por  $dm$ , onde  $dQ$  é o valor absoluto da carga total de íons de um dado sinal, produzidos no ar, quando todos os elétrons liberados pelos fótons, são completamente freados. Esta grandeza só pode ser definida para o ar e para fótons X ou gama.
- A unidade especial da grandeza Exposição é Röentgen (R) que é relacionado com a unidade do SI por:  $1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ [C.kg}^{-1}\text{]}$
- **Dose absorvida (D).** Energia média  $dE$  depositada pela radiação ionizante na matéria de massa  $dm$ , num ponto de interesse. Essa grandeza vale para qualquer meio, para qualquer tipo de radiação e qualquer geometria de irradiação.
- A unidade especial da grandeza dose absorvida é o rad (radiation absorbed dose) que é relacionado com a unidade do SI por:  $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad} = 1 \text{ J/kg}$  ou Gy

$$X = \frac{dQ}{dm} \text{ [C.kg}^{-1}\text{]}$$

$$D = \frac{dE}{dm} \text{ [J/kg ou Gy]}$$

# Classificação e organização das grandezas para radiação ionizante: Grandezas físicas

---

- **Kerma ( $K$ )**. É o quociente  $dE_{tr}$  por  $dm$ , onde  $dE_{tr}$  é a soma de todas as energias cinéticas iniciais de todas as partículas carregadas liberadas por partículas neutras ou fótons, incidentes em um material de massa  $dm$ .
- A grandeza Kerma está relacionada a fluência de energia por meio do coeficiente transferência de energia em massa  $\left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right)$ .
- A diferença entre Kerma e dose absorvida, é que esta depende da energia média absorvida na região de interação (local) e o Kerma, depende da energia total transferida ao material. Isto significa que, do valor transferido, uma parte é dissipada por radiação de frenagem, outra sob forma de luz ou raios X característicos.

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad [J/kg \text{ ou } Gy]$$

$$K_m = \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho}\right)_m \cdot \Psi$$

# Classificação e organização das grandezas para radiação ionizante: Grandezas físicas

---

- Coeficiente de transferência de energia em massa ( $\mu_{tr}/\rho$ )
- Unidade:  $m^2/kg$

Energia (MeV)	( $\mu_{tr}/\rho$ )
0,010	0,461
0,015	0,127
0,020	0,0511
0,030	0,0148
0,040	0,00668
0,050	0,00406
0,060	0,00305
0,080	0,00243
0,100	0,00234
0,150	0,00250
0,200	0,00268
0,300	0,00287

# Relação entre grandezas: Exemplo

---

- Uma fonte pontual de  $^{192}\text{Ir}$  emite um número de fótons a uma energia de aproximadamente 0,300 MeV, gerando uma taxa de fluência de  $2,1 \times 10^{17}$  fótons/ $\text{m}^2 \cdot \text{s}$ , em um certo ponto no ar.
1. Qual a taxa de fluência de energia neste ponto?
  2. Qual o valor da taxa Kerma no ar por hora em unidades do SI?

$$\Psi_E = E \cdot \Phi$$

$$\Psi_E = 0,300 \cdot 1,602 \cdot 10^{-13} \cdot 2,1 \cdot 10^{17} \rightarrow \Psi_E = 10 \cdot 10^3 \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

$$K_m = \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho}_m \right) \cdot \Psi$$

$$K_m = 0,00287 \cdot 10 \times 10^3 \cdot 3600 \Rightarrow K_m = 1,0 \times 10^5 \text{ Gy/h}$$

$$1 \text{ MeV} = 1,602 \times 10^{-13} \text{ J}$$

$$1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$$

# Relação entre grandezas: Atividade e Exposição

---

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

- ❖  $\Gamma$  = 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:

- ❖ a fonte é suficientemente pequena (puntiforme), de modo que a fluência 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.

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

# Relação entre grandezas: Constante de exposição gama (Gamão)

Radionuclídeo	$\Gamma$ (R.m <sup>2</sup> /Ci.h)	Radionuclídeo	$\Gamma$ (R.m <sup>2</sup> /Ci.h)
<sup>241</sup> Am	$7,49 \times 10^{-2}$	<sup>125</sup> I	$1,75 \times 10^{-1}$
<sup>208</sup> Bi	$1,11 \times 10^0$	<sup>131</sup> I	$2,2 \times 10^{-1}$
<sup>60</sup> Co	$1,29 \times 10^0$	<sup>111</sup> In	$3,46 \times 10^{-1}$
<sup>137</sup> Cs	$3,43 \times 10^{-1}$	<sup>192</sup> Ir	$4,6 \times 10^{-1}$
<sup>152</sup> Eu	$6,44 \times 10^{-1}$	<sup>75</sup> Se	$2,03 \times 10^{-1}$
<sup>67</sup> Ga	$8,03 \times 10^{-2}$	<sup>99m</sup> Tc	$7,95 \times 10^{-2}$

## Relação entre grandezas: Exemplo

---

- Um tecnólogo entrou numa sala de irradiação e não percebeu que uma fonte de  $^{67}\text{Ga}$  estava exposta. Essa fonte possuía atividade de 100mCi, e foi estimado que o tecnólogo permaneceu a 1,5 m da fonte durante 30 minutos. Avalie o valor da exposição sofrida pelo tecnólogo.

$$X = \tau \cdot \frac{A \cdot t}{d^2} \rightarrow X = 8,03 \times 10^{-2} \cdot \frac{100 \times 10^{-3} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)}{1,5^2} \rightarrow X = 1,8 \times 10^{-3} \text{ R}$$

# Relação entre grandezas: Exposição e dose

---

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

$$D_{ar} = X \cdot \left( \frac{W}{e} \right)_{ar}$$

# Relação entre grandezas: $D_{ar}$ e $D_m$

---

- Determinada a Dose no Ar,  $D_{ar}$ , pode-se obter a dose em um meio material qualquer ( $D_m$ ), para a mesma exposição, por meio de um fator de conversão. Para a mesma condição de irradiação, a relação entre os valores da dose absorvida no material  $m$  e no ar, pode ser expressa por: *(Apesar de Emico Okuno colocar a dose absorvida no órgão como uma grandeza de proteção, ela é melhor explicada neste ponto de relação entre grandezas)*

$$f = \frac{D_m}{D_{ar}} = \frac{(\mu_{en}/\rho)_m}{(\mu_{en}/\rho)_{ar}}$$

- $(\mu_{en}/\rho)_{ar}$  coeficiente de absorção de energia em massa no ar
- $(\mu_{en}/\rho)_m$  coeficiente de absorção de energia em massa do material  $m$

# Relação entre grandezas: $D_{ar}$ e $D_m$

---

- A tabela abaixo lista valores de  $f$  para água e meios que são tecidos do corpo humano.

Energia (keV)	f (água/ar)	f (músculo/ar)	f (gordura/ar)	f (osso/ar)
10	1,04	1,05	0,62	5,65
30	1,01	1,05	0,62	6,96
50	1,03	1,06	0,75	5,70
100	1,10	1,09	1,05	1,97
200	1,11	1,10	1,11	1,12
300	1,11	1,10	1,11	1,10*
500	1,11	1,10	1,11	1,05*
600	1,11	1,10	1,11	1,03
1250	1,11	1,10	1,11	1,03

\* valores obtidos por interpolação linear

# Relação entre grandezas: Exemplo

---

- A radiação emitida por uma fonte de  $^{60}\text{Co}$  com atividade de 5,0kCi é usada para irradiar um tumor na superfície do paciente durante 2,0 minutos, posicionado a 1,0m da fonte. A energia média do feixe de fótons gama emitido pelo  $^{60}\text{Co}$  é de 1250keV. Considere o tumor com tendo densidade aproximadamente igual a do músculo. Qual a dose absorvida no tumor?

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

$$D_{ar} = X \cdot \left( \frac{W}{e} \right)_{ar}$$

$$D_m = f \cdot D_{ar}$$

$$X = 1,29 \cdot 10^0 \cdot \frac{5,0 \cdot 10^3 \cdot \left( \frac{2,0}{60} \right)}{1,0^2} \rightarrow X = 215 R$$

$$D_{ar} = \frac{215 \cdot 0,876}{100} \rightarrow D_{ar} = 1,8834 Gy$$

$$D_m = 1,10 \cdot 1,8834 \rightarrow D_m = 2,1 Gy$$

# Classificação e organização das grandezas para radiação ionizante: Grandezas de proteção

---

- Nas grandezas de proteção estão incluídas a dose equivalente no tecido ou órgão  $H_T$  e a dose efetiva  $E$ , que *são usadas nas recomendações para limitar a dose no tecido ou órgão* no primeiro caso, *e no corpo todo*, no segundo caso.
- Essas grandezas não são práticas, por não serem mensuráveis, mas podem ser *avaliadas por meio de cálculo* se as condições de irradiação forem conhecidas.
- Os *fatores de ponderação da radiação e de tecido* para essas grandezas são respectivamente, o  $w_R$  e o  $w_T$ . A unidade de ambas é o Sievert (Sv).

# Classificação e organização das grandezas para radiação ionizante: Grandezas de proteção

---

- Dose equivalente (HT): É o absorvida  $D_{T,R}$  num tecido ou órgão T, obtido sobre todo o tecido ou órgão T, devido à radiação R, onde  $w_R$  é o fator de peso de cada radiação R. A unidade especial da grandeza dose equivalente é o rem (röntgen equivalent man) que é relacionado com a unidade com a unidade do SI por:  $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem} = 1 \text{ J/kg}$

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

- 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. 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.

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

# Fator de ponderação das radiações - $w_R$

- A ICRP escolheu os valores de  $w_R$  para cada tipo de partícula e energia como representativos dos valores de efetividade biológica (*RBE* – *relative biological effectiveness*) da radiação em induzir efeitos estocásticos da radiação (indução de câncer e de efeitos hereditários).

Tipos de radiação e intervalos de energia	$w_R$ (ICRP-60)	$w_R$ (ICRP-103)
Fótons de todas as energias	1	1
Elétrons e múons de todas as energias	1	1
Nêutrons com energias: < 10keV 10 – 100 keV >100keV a 2 MeV >2 MeV a 20 MeV >20MeV	5 10 20 10 5	Função contínua da energia do nêutron
Prótons	5	2 (prótons e pions)
Partículas alfa, elementos de fissão, núcleos pesados	20	20

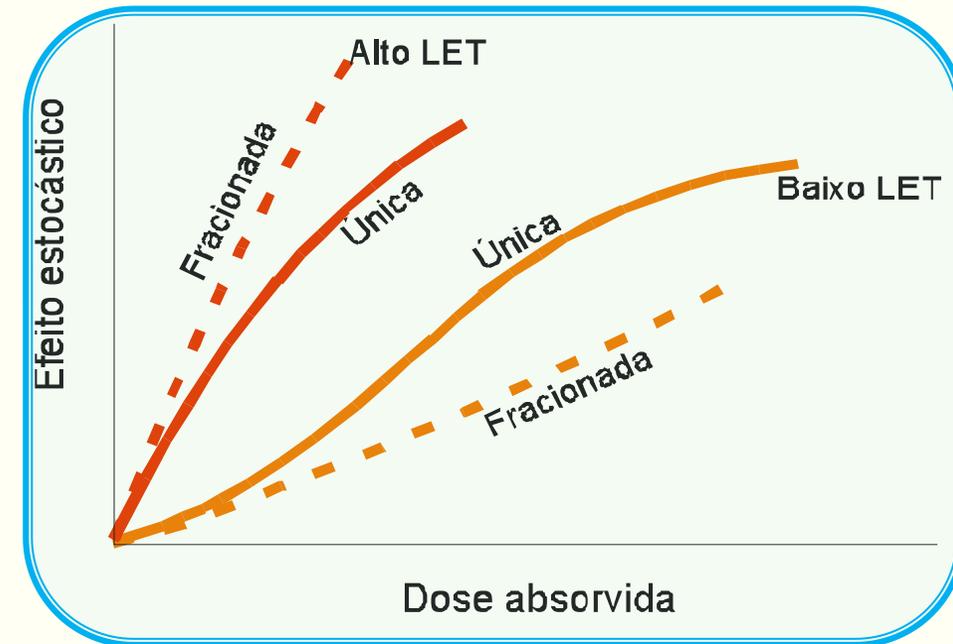
# Fator de ponderação de tecido - $w_T$

Tecido ou órgão	$w_T$ (ICRP-26/77)	$w_T$ (ICRP-60/90)	$w_T$ (ICRP-107/07)
Gônadas	0,25	0,20	0,08
Medula óssea	0,12	0,12	0,12
Cólon	-	0,12	0,12
Pulmão	0,12	0,12	0,12
Estômago	-	0,12	0,12
Mama	0,15	0,05	0,12
Bexiga	-	0,05	0,04
Esôfago	-	0,05	0,04
Fígado	-	0,05	0,04
Tireoide	0,03	0,05	0,04
Superfície do osso	0,03	0,01	0,01
Cérebro	-	-	0,01
Glândulas salivares	-	-	0,01
Pele	-	0,01	0,01
Restante	0,30	0,05	0,12
Soma total	1,00	1,00	1,00

*Os valores da norma CNEN NN-3.01 correspondem aos do ICRP-60.*

# Classificação e organização das grandezas para radiação ionizante: Grandezas de proteção

- Se os danos biológicos causados pela radiação dependessem somente da energia depositada, esta seria uma medida dos danos. Acontece que a forma de deposição é importante.
- Para uma mesma quantidade total de energia depositada, são maiores os danos causados por radiações de alto **LET** (Transferência Linear de Energia), do que aqueles causados por radiação de baixo LET.
- Transferência linear de energia (LET) permite avaliar a quantidade média de energia recebida pelo meio por unidade de caminho da partícula carregada no meio.



# Classificação e organização das grandezas para radiação ionizante: Grandezas de proteção

---

- É uma comparação da dose de radiação em estudo com uma dose de raios X de 250 keV que produz a mesma resposta biológica.

$$RBE = \frac{\text{Dose de raios X (250 Kev) para produzir um efeito específico.}}{\text{Dose de outro tipo radiação para produzir o mesmo efeito}}$$

- Exemplo: Para causar a morte a ratos são necessários 300 rads de raios X de 250 keV. Se estes ratos forem irradiados com núcleos pesados, somente são necessários 100 rads. Qual o fator RBE de núcleos pesados?

$$RBE = \frac{300 \text{ rads}}{100 \text{ rads}} = 3$$

Aumenta LET



Aumenta RBE

# Classificação e organização das grandezas para radiação ionizante: Grandezas Operacionais

---

- As grandezas de proteção utilizadas para limitar dose, não são mensuráveis. Como é possível, então, saber se um IOE está com suas doses dentro dos limites estabelecidos?
- Para correlacionar essas grandezas não mensuráveis com o campo de radiação, a ICRU e a ICRP introduziram as grandezas operacionais para medidas de exposição à radiação externa.
- As duas principais grandezas introduzidas são o equivalente de dose pessoal,  $H_p(d)$ , e o equivalente de dose ambiente,  $H^*(d)$ , à profundidade  $d$ , para os casos de irradiação com fontes externas ao corpo.

# Classificação e organização das grandezas para radiação ionizante: Grandezas Operacionais

---

- Os valores de fator de qualidade  $Q$  são dados em função da transferência linear de energia, LET. Os valores de  $Q$  em função do valor de LET ( $L$ ) da radiação na água ( $L$  é medido em  $\text{keV}/\mu\text{m}$ ) foram introduzidos na ICRP-60.
- Para feixes aos quais estamos potencialmente expostos (raios X, gama e elétrons), como o fator de qualidade da radiação  $Q$  é 1. Para uma dose absorvida  $D$  (Gy), o equivalente de dose  $H$  (Sv) tem o mesmo valor numérico.

$Q$ ( $L$ )	$L$ ( $\text{keV}/\mu\text{m}$ )
1	$< 10$
$0,32L - 2,2$	$10 \leq L \leq 100$
$300/L^{1/2}$	$> 100$

$$H = Q \cdot D$$

*(na profundidade  $d$ )*

# Classificação e organização das grandezas para radiação ionizante: Grandezas Operacionais - $H_p(d)$ e $H^*(d)$

---

- São as principais grandezas operacionais, equivalente de dose pessoal  $H_p(d)$  e equivalente de dose ambiente, à profundidade  $d$  para fontes externas ao corpo.
- Para radiações fortemente penetrantes, fótons com energia maior que 20keV segundo o ICRU adota-se a profundidade de 10mm para estimar dose efetiva.
- Para radiações fracamente penetrantes é adotada a profundidade de 0,07mm e é usado para estimar dose equivalente na pele e extremidades.
- $H^*(d)$  é usado para avaliar a exposição ocupacional num ambiente quando não há monitoração individual.
- São mais duas grandezas que também usam a unidade Sievert (Sv), gerando um pouco de dificuldade no uso, mas seu uso foi decidido pelos comitês internacionais.

# Classificação e organização das grandezas para radiação ionizante: Grandezas Operacionais – Dose externa

---

- Dose externa é uma grandeza operacional criada pela Portaria MS/SVS nº 453/98, nas Disposições Transitórias, para utilização em medidas de monitoração de ambientes de trabalho e de sua circunvizinhança, como por exemplo nas medições para levantamento radiométrico das áreas de segurança (controlada e livre) estabelecidas no serviço de radiodiagnóstico.
- O Guia para segurança e desempenho de equipamentos de radiodiagnóstico médico define outros fatores influem na determinação do valor da dose externa para as ações de controle para levantamento radiométrico. Estes fatores são: carga de trabalho (W) e fatores de uso (U) e ocupação (T).
- É uma grandeza operacional definida para monitoração de um campo de raios-x, definida neste Regulamento como o valor determinado pelo monitor de área calibrado em Kerma no ar, multiplicado por  $f = 1,14 \text{ Sv/Gy}$ .

$$Dose\ externa = K_{ar} \times f$$

# Classificação e organização das grandezas para radiação ionizante: Resumo

Grandeza	Equação	Meio	Tipo	Unidade (SI)	Unidade original	Conversão
Atividade	$A = \lambda \cdot N$	---	---	Bq = s <sup>-1</sup>	Ci	1 Ci = 37GBq
Dose absorvida	$D = \frac{dE}{dm}$	qualquer	qualquer	Gy (J/kg)	rad	1 Gy = 100 rad
Kerma	$K = \frac{dE_{tr}}{dm}$	qualquer	X, γ, n	Gy (J/kg)	rad	1 Gy = 100 rad
Exposição	$X = \frac{dQ}{dm}$	ar	X, γ	C/kg	R	1 R = 2,58x10 <sup>-4</sup> C/kg
Dose equivalente	$H_T = w_R \cdot D_{T,R}$	Órgão ou tecido	qualquer	Sv (J/kg)	rem	1 Sv = 100rem
Dose efetiva	$E = \sum_T w_T \cdot H_T$	Corpo todo	qualquer	Sv (J/kg)	rem	1 Sv = 100rem
Equivalente de dose pessoal	$H = Q \cdot D$	Corpo todo	qualquer	---	rem	1 Sv = 100rem

# Conceitos e Legislação em proteção Radiológica

---

- ❑ A proteção radiológica pode ser compreendida como um conjunto de medidas que visam proteger o homem, seus descendentes e seu meio ambiente contra possíveis efeitos indevidos causados por radiação ionizante proveniente de fontes produzidas pelo homem e fontes naturais modificadas tecnologicamente.
- ❑ Ela tem por objetivos minimizar os riscos de efeitos biológicos no ser humano, limitar doses ocupacionais e diminuir a probabilidade de efeitos de longo prazo (câncer, efeitos genéticos, etc.).

# Conceitos e Legislação em proteção Radiológica

---

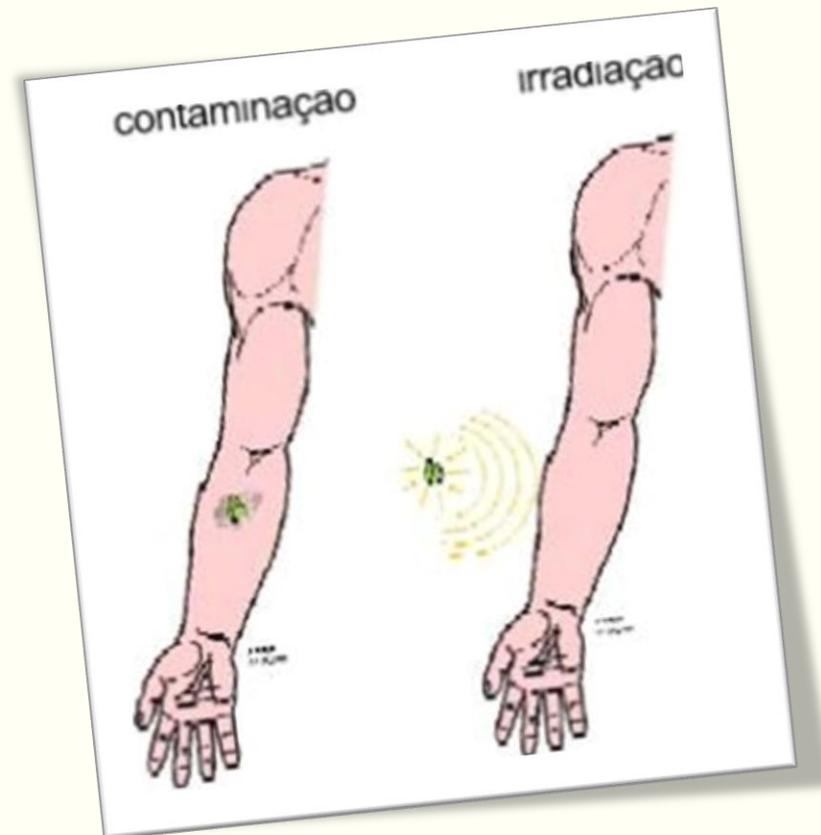
## □ Requisitos básicos de proteção básicos de proteção radiológica (NN 3.01)

- ❖ **Justificação** - Nenhuma prática ou fonte associada a essa prática será aceita pela CNEN, a não ser que a prática produza benefícios, para os indivíduos expostos ou para a sociedade, suficientes para compensar o detrimento correspondente, tendo-se em conta fatores sociais e econômicos, assim como outros fatores pertinentes.
- ❖ **Limitação de dose** - A exposição normal dos indivíduos deve ser restringida de tal modo que nem a dose efetiva nem a dose equivalente nos órgãos ou tecidos de interesse, causadas pela possível combinação de exposições originadas por práticas autorizadas, excedam o limite de dose especificado na tabela a seguir, salvo em circunstâncias especiais, autorizadas pela CNEN. Esses limites de dose não se aplicam às exposições médicas.
- ❖ **Otimização** - Em relação às exposições causadas por uma determinada fonte associada a uma prática, a proteção radiológica deve ser otimizada de forma que a magnitude das doses individuais, o número de pessoas expostas e a probabilidade de ocorrência de exposições mantenham-se tão baixas quanto possa ser razoavelmente exequível (Princípio ALARA), tendo em conta os fatores econômicos e sociais. Nesse processo de otimização, deve ser observado que as doses nos indivíduos decorrentes de exposição à fonte devem estar sujeitas às restrições de dose relacionadas a essa fonte.

# Conceitos e Legislação em proteção Radiológica

---

- ❑ Para haver contaminação tem existir material radioativo no ambiente e a pessoa ou objeto ter contato com o material radioativo.
- ❑ De outra maneira o que esta ocorrendo é um processo de irradiação.
- ❑ Uma pessoa ou objeto contaminado permanece sofrendo irradiação até que o mesmo seja descontaminado.



# Conceitos e Legislação em proteção Radiológica

---

## □ Diretrizes básicas de proteção radiológica

- ❖ **Objetivo:** Estabelecer os requisitos básicos de proteção radiológica das pessoas em relação à exposição à radiação ionizante.
- ❖ **Campo de aplicação:** Se aplica as práticas, incluindo todas as fontes associadas a essas práticas, bem como a intervenções. Assim como às exposições ocupacionais, exposições médicas e exposições do público, em situações de exposições normais ou exposições potenciais.
- ❖ **Exclusão:**
  - Estão excluídas do escopo desta Norma quaisquer *exposições* cuja intensidade ou probabilidade de ocorrência não sejam suscetíveis ao controle regulatório, a critério da *CNEN*, ou aqueles casos que a *CNEN* vier a considerar que estas diretrizes não se aplicam.
  - As práticas de radiodiagnóstico médico e odontológico são regulamentadas por Portaria do Ministério da Saúde.

# Conceitos e Legislação em proteção Radiológica

---

- ❑ As posições regulatórias são documentos complementares as normas CNEN, com o mesmo valor legal e também são de cumprimento obrigatório. Atualmente, as normas absorvem as posições regulatórias (PR) para simplificar o entendimento e a sua aplicação.
  
- ❑ Posições regulatórias da norma CNEN NN 3.01
  - ❖ PR-3.01/001: Critérios de Exclusão, Isenção e Dispensa de Requisitos de Proteção Radiológica;
  - ❖ PR-3.01/002: Fatores de Ponderação para as Grandezas de Proteção Radiológica;
  - ❖ PR-3.01/003: Coeficientes de Dose para Indivíduos Ocupacionalmente Expostos;
  - ❖ **PR-3.01/004: Restrição de Dose, Níveis de Referência Ocupacionais e Classificação de Áreas;**
  - ❖ PR-3.01/005: Critérios para o Cálculo de Dose Efetiva a partir da Monitoração Individual;
  - ❖ PR-3.01/006: Medidas de Proteção e Critérios de Intervenção em Situações de Emergência;
  - ❖ **PR-3.01/007: Níveis de Intervenção e de Ação para Exposição Crônica;**
  - ❖ PR-3.01/008: Programa de Monitoração Radiológica Ambiental;
  - ❖ PR-3.01/009: Modelo para a Elaboração de Relatórios de Programas de Monitoração Radiológica Ambiental;
  - ❖ PR-3.01/0010: Níveis de Dose para Notificação à CNEN; e
  - ❖ PR-3.01/0011: Coeficientes de Dose para Exposição do Público.

# Conceitos e diretrizes de proteção radiológica

---

- Amparado em legislação específica estabelecer os requisitos básicos de proteção radiológica para IOEs e pessoas do público em relação à exposição à radiação ionizante, buscando alcançar controle das doses ocupacionais praticadas pelo manuseio das fontes de radiação ionizante em função das práticas realizadas.
- *Restrição de dose (PR-3.01/004)* - valor inferior ao limite de dose estabelecido pela CNEN como uma restrição as doses individuais relacionadas a uma determinada fonte de radiação ionizante. Objetiva garantir um nível adequado de proteção individual para cada IOE.
- *Níveis de referência (PR-3.01/004)* - valores de dose estabelecidos ou aprovados pela CNEN, com a finalidade de determinar ações a serem desenvolvidas quando forem alcançados ou previstos de serem excedidos. Esses valores incluem os níveis de **registro**, níveis de **investigação**, níveis de **ação** e níveis de **intervenção**.

# Conceitos e diretrizes de proteção radiológica

---

## ▪ Níveis de referência (*PR-3.01/004 e PR-3.01/007*)

❖ Nível de registro → 0,2 mSv/mês

❖ Nível de investigação → 1,0 mSv/mês

❖ Nível de intervenção → 6,0 mSv/mês\*

❖ Nível de ação → valor acima do qual devem ser adotadas ações protetoras ou remediadoras em situações de emergência ou de exposição crônica,



## ▪ Histórico de dose

❖ Histórico das doses recebidas pelo IOE em decorrência de trabalho ou treinamento em práticas autorizadas ou intervenções, registras em seu controle dosimétrico.

❖ Em 5 anos consecutivos o limite de dose do IOE é de 100 mSV.

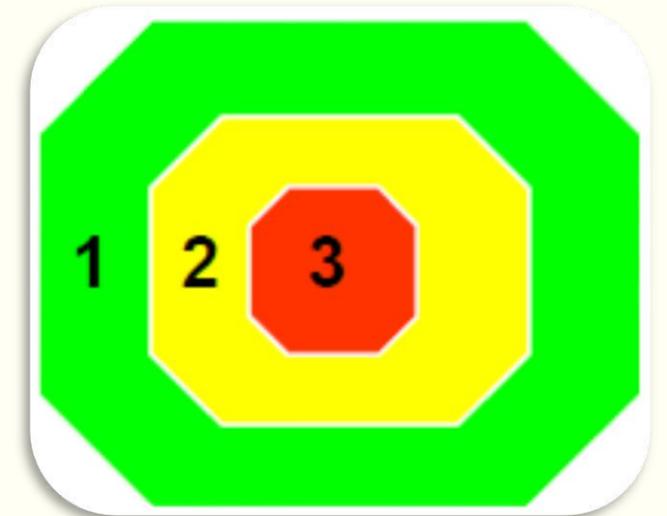
❖ O histórico de dose do IOE pode ser solicitado em:  
<http://www.cnen.gov.br/dose-ocupacional>



# Classificação e adequação de áreas

---

- As áreas de trabalho com radiação ou material radioativo, sob responsabilidade dos titulares das instalações, devem ser classificadas pelo SPR em áreas controladas, supervisionadas e livres. (PR-3.01/004)
- *Área livre* → possuir uma taxa de dose inferior ao limite de público estabelecido pela CNEN, 1 mSv/ano.
- *Área controlada* → obedecer aos limites estabelecidos para IOE pela CNEN.
- *Área supervisionada* → possuir um valor de dose que seja superior a 1 mSv/ano e inferior aos limites estabelecidos para IOE pela CNEN.



1. Área livre
2. Área supervisionada
3. Área controlada

# Serviço de Proteção Radiológica

---

- A NN 6.02 para *licenciamento de instalações radioativas* estabelece (art. 18) a necessidade de *plano de radioproteção* para autorização de funcionamento e a NN 3.01, determina que nele (art. 5.3.8) tem que estar descrita a *estrutura do serviço de proteção radiológica*.
- A NR 32 para trabalhadores dos serviços de saúde, *estabelece (32.4.6.b) que compete ao empregador manter profissional habilitado, responsável pela proteção radiológica em cada área específica, com vinculação formal com o estabelecimento*.
- A portaria 453/98 afirma (art. 3.19), que o serviço *precisa* de um profissional que responda pela proteção radiológica, um *supervisor de proteção radiológica (SPR)*.

# Serviço de Proteção Radiológica - Funções

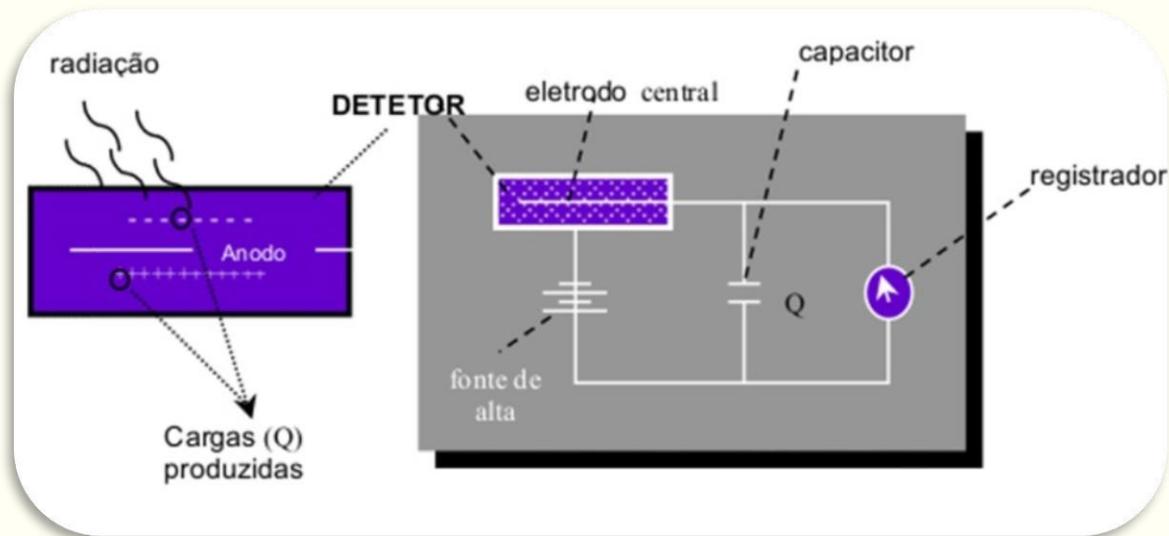
---

- Possuir estrutura constituída especificamente com vistas à execução e manutenção do plano de proteção radiológica de uma instalação;
- Garantir o planejamento das doses ocupacionais nas áreas supervisionadas e controladas fazendo uso de levantamentos radiométricos com a periodicidade estabelecida no plano de radioproteção (PRP);
- Obedecer e manter o plano de radioproteção atualizado;
- Executar treinamentos periódicos obedecendo a periodicidade estabelecida no PRP;
- Controlar as doses ocupacionais dos IOEs;
- Implementar e manter a rotina de exames de saúde para os IOEs;
- Prever as exposições em decorrência de uma emergência radiológica.

# Operação de monitores de Radiação

---

- ❑ Monitores de radiação ionizante constituem a associação de detectores (sensores) de radiação mais a instrumentação necessária para mensurar a sua quantidade em uma grandeza conhecida.



# Operação de monitores de Radiação

---

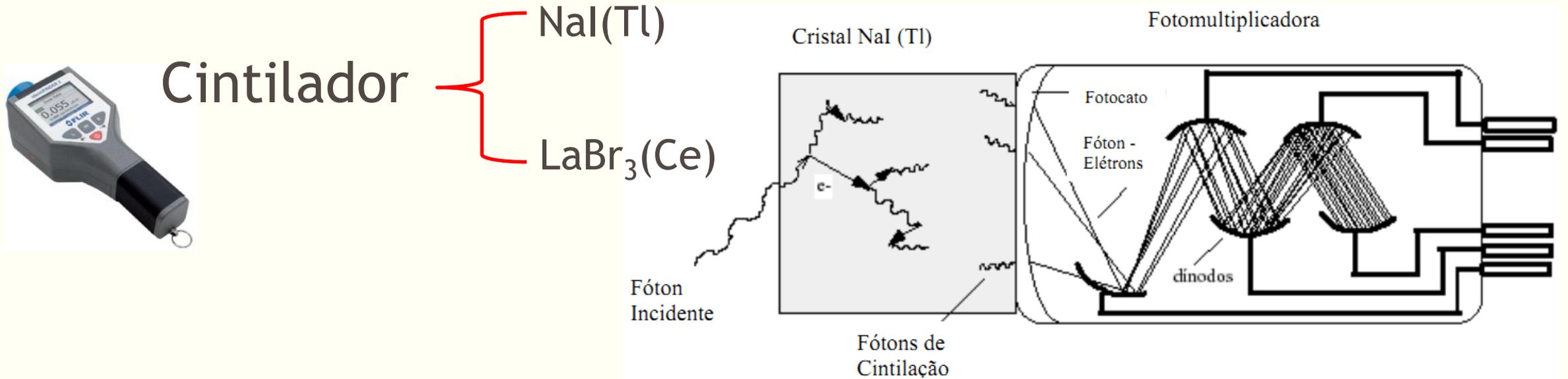
- ❑ Os monitores de radiação ionizante podem ser baseados em detectores à gás (câmara de ionização, contador proporcional e Geiger-Müller) ou mesmo cintiladores.
- ❑ Os mesmos também podem ser de tecnologia digital como a figura do slide ou analógico. Mas independente disto, a operação deste tipo de instrumento possibilita o uso de escalas para melhor adequação da capacidade de medição do mesmo.



# Operação de monitores de Radiação

- Detectores cintiladores

- ❖ Utilizam materiais que podem absorver a energia cedida pelas radiações ionizantes e convertê-las em luz (NaI, CsI, LaBr<sub>3</sub>, etc.). Esses monitores utilizam materiais cintiladores acoplados opticamente a uma fotomultiplicadora e circuitos eletrônicos.



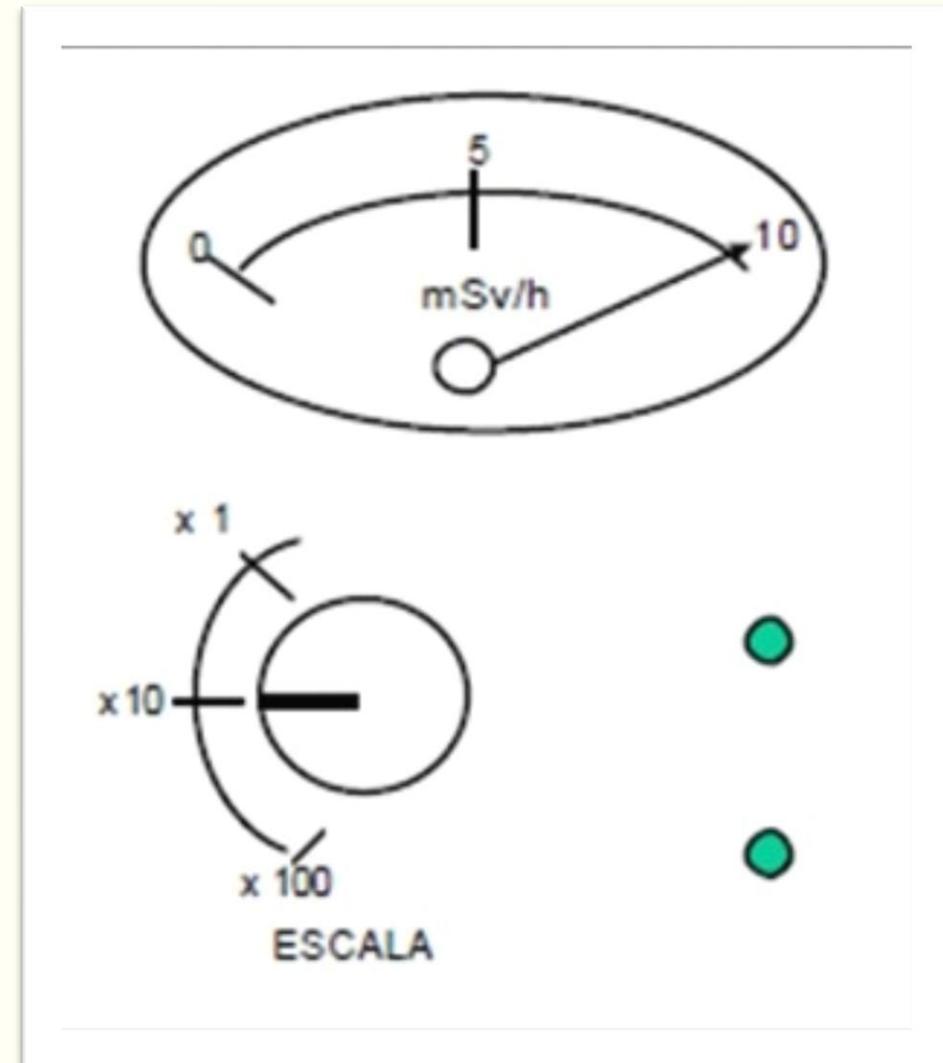
# Operação de monitores de Radiação

---

- Qualquer medidor ou monitor de radiação ionizante é capaz de mensurar a quantidade de ionização produzida no meio de detecção e assim dar sua resposta em exposição  $X = \frac{dQ}{dm}$  (R ou C/kg).
- Quando o mesmo consegue mensurar ou medir a influencia da energia dos fótons na sua resposta, este passa a ser capaz de mensurar ou medir dose absorvida  $D = \frac{dE}{dm}$  (J/kg ou Gy) e kerma  $K = \frac{dE_{tr}}{dm}$  (J/kg ou Gy). É o caso dos detectores à gás tipo câmara de ionização e proporciona, assim como dos detectores cintiladores e semicondutores.
- E ainda quando o sistema de medição é capaz de mensurar ou medir o efeito fotoelétrico, medindo assim toda a energia transferida ao meio detector, este sistema de medição funciona como um identificador radiológico ou nuclear, pois é capaz de identificar o material radioativo que emitiu a radiação ionizante. É o caso dos detectores em estado sólido tipo cintiladores e semicondutores.

# Operação de monitores de Radiação

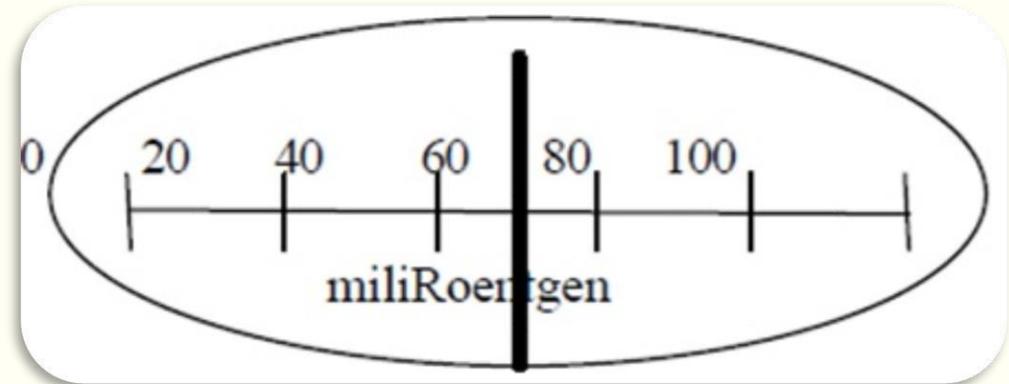
- ❑ O acesso as escalas pode ser automático ou manual, sendo assim é muito importante o reconhecimento de sua funcionalidade para a correta operação de um medidor de radiação.
- ❑ Escala é um fator multiplicador que possibilita a ampliação da capacidade de medição indicada no visor do instrumento.



# Operação de monitores de Radiação

---

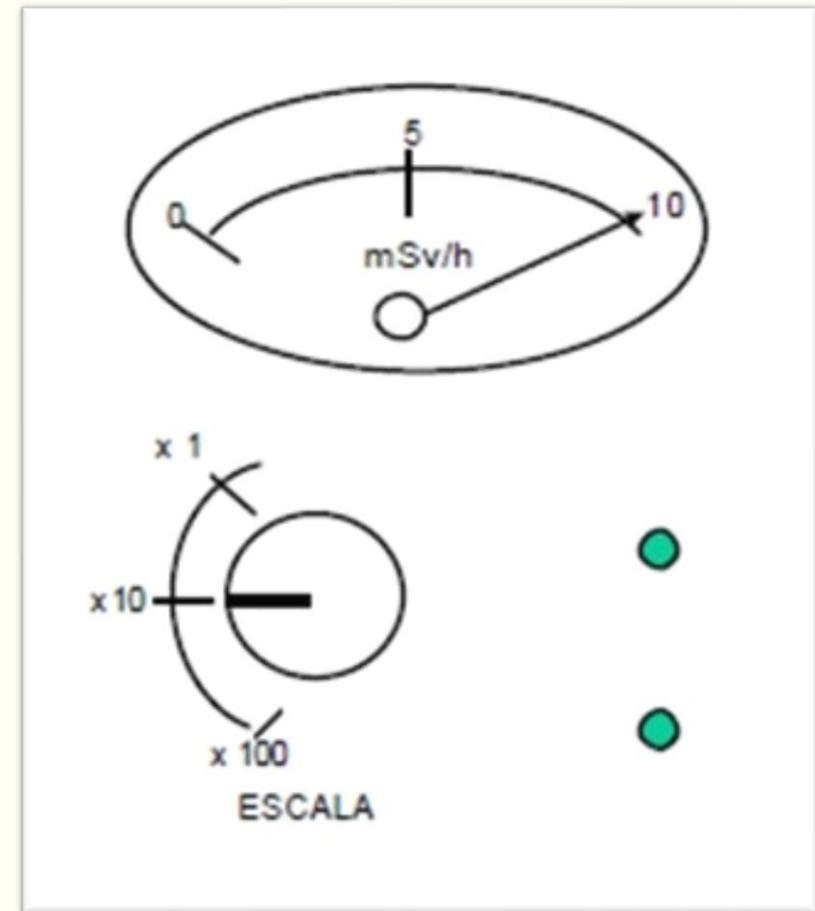
- ❑ O instrumento de medição (monitor) pode ter a opção de medição em modo taxa ou modo integrado nas diversas grandezas disponíveis para a medição.
- ❑ O mesmo pode ainda possibilitar o uso de mais de um detector em função da escala selecionada para a operação.
- ❑ Assim como o uso de mais de um detector pode possibilitar a mediação de varias tipos de radiação ionizante.



# Operação de monitores de Radiação - Exercícios

---

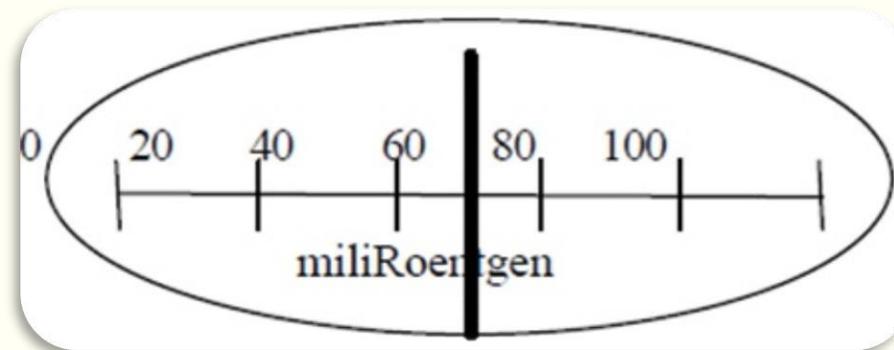
- ❑ Durante uma atividade de monitoração com um monitor o mesmo apresentou a leitura conforme indicado na figura abaixo. Que procedimento o operador deverá tomar diante da resposta do instrumento de medição?
- a) o seletor de escalas deverá ser ajustado na posição x 1
  - b) o seletor de escalas deverá ser ajustado na posição x 10
  - c) o seletor de escalas deverá ser ajustado na posição x 100
  - d) nenhuma das anteriores.



# Operação de monitores de Radiação - exercícios

---

- ❑ Qual a taxa de dose indicada pelo detector do slide anterior ?
- a) 100 mSv/h.
  - b) 10 mSv/h
  - c) 1 mSv/h
  - d) 1000 mSv/h
- ❑ 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



# Cálculo de Doses Ocupacionais - Exemplos

## Questão 6:

(1,5 ponto)

Um IOE atuando há 04 anos com atividade de gamagrafia, teve registrado nos seus relatórios de dose os seguintes valores de dose anuais: 17 mSv, 41 mSv, 21 mSv e 13 mSv. Este ano ao ser contratado por outra empresa, o supervisor de radioproteção teve que planejar suas atividades ocupacionais baseado em seu histórico de dose. Qual o valor de dose ocupacional que o IOE poderá ser submetido nos próximos dois anos? Considere os limites de dose bem como a média anual neste planejamento.

$$\text{Ano 5} = 100 - (17 + 41 + 21 + 13) = 8$$

$$\text{Ano 6} = 100 - (41 + 21 + 13 + 8) = 17$$

Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6
17	41	21	13	?	?

Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6
17	41	21	13	8	?

Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6
	41	21	13	8	17

# Cálculo de Doses Ocupacionais - Exemplos

## Questão 5:

(2,0 ponto)

Um IOE foi contrato para atuar em uma área controlada que obedece a um nível de ação estabelecido em 18 mSv/ano. O histórico de dose apresentado pelo IOE é mostrado a seguir. Baseado no histórico de dose informe se o IOE poderá atuar na área controlada nos próximos 3 anos.

Histórico de dose (em mSv)			
2014	2015	2016	2017
11	13	22	27

$$\text{Ano 5} = 100 - (11 + 13 + 22 + 27) = 27 \rightarrow 18$$

$$\text{Ano 6} = 100 - (13 + 22 + 27 + 18) = 20 \rightarrow 18$$

$$\text{Ano 7} = 100 - (22 + 27 + 18 + 18) = 15 \rightarrow 18$$

Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7
11	13	22	27	?	?	?

Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7
11	13	22	27	18	?	?

Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7
	13	22	27	18	?	?

Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7
		22	27	18	18	15

*No terceiro ano o IOE somente poderá estar sujeito a uma taxa de dose anual de 15 mSv, não podendo assim atuar durante todo o ano na área controlada*

# Cálculo de Doses Ocupacionais - Exemplos

---

## Questão 5:

(2,0 pontos)

Um IOE trabalha em uma área supervisionada onde foi estabelecida no PPR uma taxa de dose de  $\frac{1}{4}$  do limite anual em função da presença de medidores nucleares do tipo transmissão usados para medição de nível. No levantamento radiométrico de rotina realizado, observou-se uma taxa de dose de  $9 \mu\text{Sv/h}$ . Com este valor medido a taxa de dose anual estabelecida para a área supervisionada será obedecida?

Limite anual para IOE =  $50 \text{ mSv/ano}$

$\frac{1}{4}$  do limite anual =  $50/4 = 12,5 \text{ mSv/ano}$

$1 \text{ mSv} = 1000\mu\text{Sv}$

$1 \text{ ano} = 50 \text{ semanas}$

$1 \text{ semana} = 40 \text{ horas}$

$1 \text{ ano} = 2000 \text{ horas}$

$$D_{\text{anual}} = D_{\text{hora}} \cdot 2000 \frac{\text{hora}}{\text{ano}}$$

$$D_{\text{anual}} = 9 \cdot 2000 = 18000 \mu\text{Sv/ano}$$

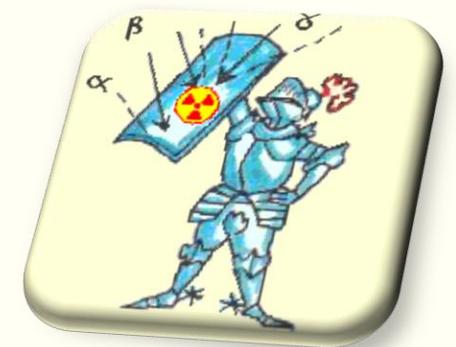
$$D_{\text{anual}} = \frac{18000}{1000} = 18 \text{ mSv/ano}$$

Com este valor de taxa de dose por hora, o valor anual estabelecido para a área supervisionada não será obedecido. Deve ser recomendado uma investigação para avaliar a causa deste valor medido no levantamento radiométrico.

# Fatores de quantificação da interação de fótons em uma blindagem

---

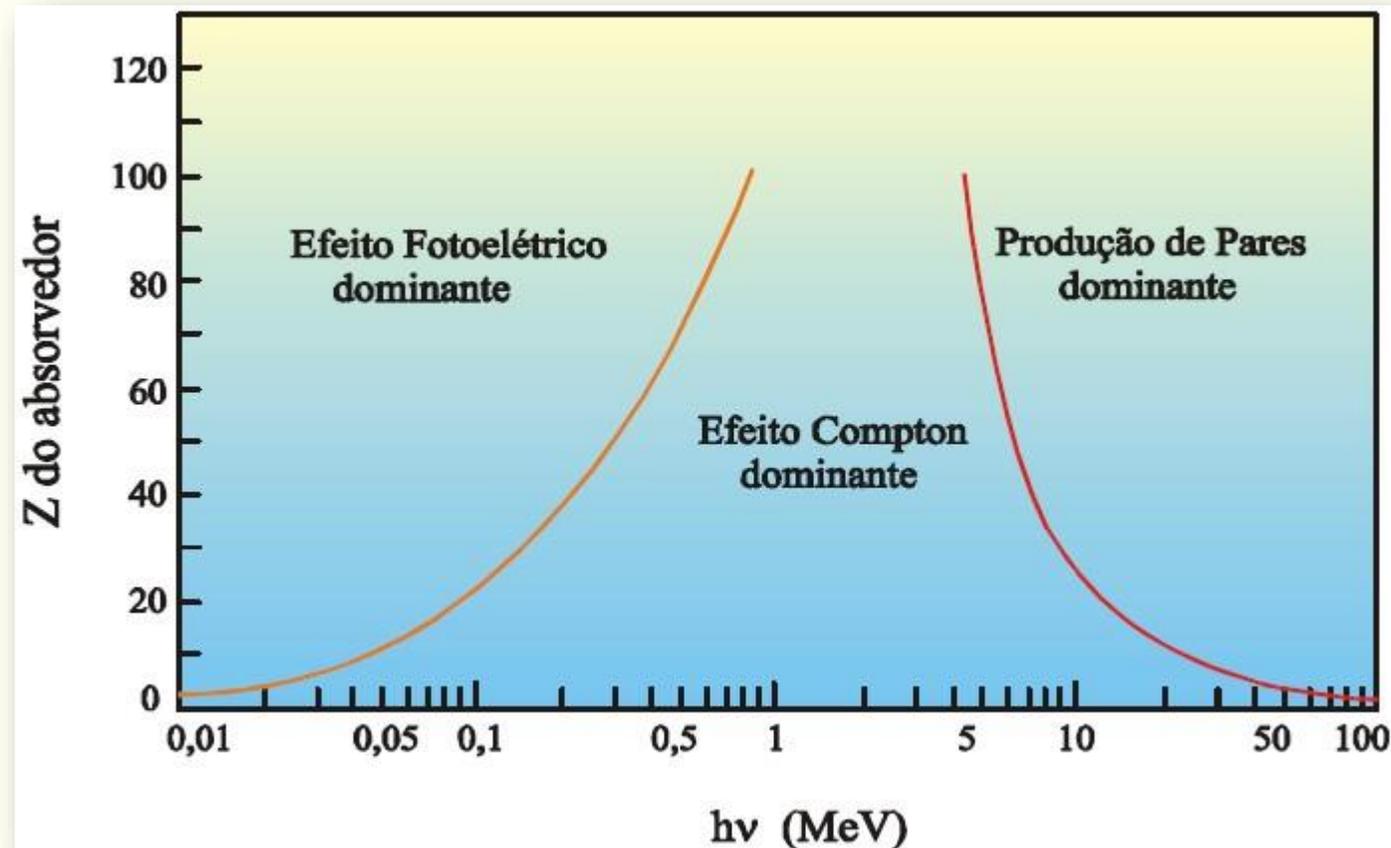
- Coeficiente de atenuação linear ( $\mu$ );
- Coeficiente de atenuação linear em massa ( $\mu/\rho$ );
- Camada semirredutora (CSR ou HVL);
- Camada decimo redutora (CDR ou TVL);
- Atenuação de um feixe de fótons em um determinado material.



# Fatores de quantificação da interação de fótons em uma blindagem

---

- Interação de fótons com a matéria;



# Fatores de quantificação da interação de fótons em uma blindagem - 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).



# Fatores de quantificação da interação de fótons em uma blindagem - 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

# Fatores de quantificação da interação de fótons em uma blindagem – HVL e TVL

---

- **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 a seguir.
- **Camada decimo 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.

$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu}$$

# Fatores de quantificação da interação de fótons em uma blindagem – HVL e TVL

$$HVL = \frac{\ln(2)}{\mu}$$

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

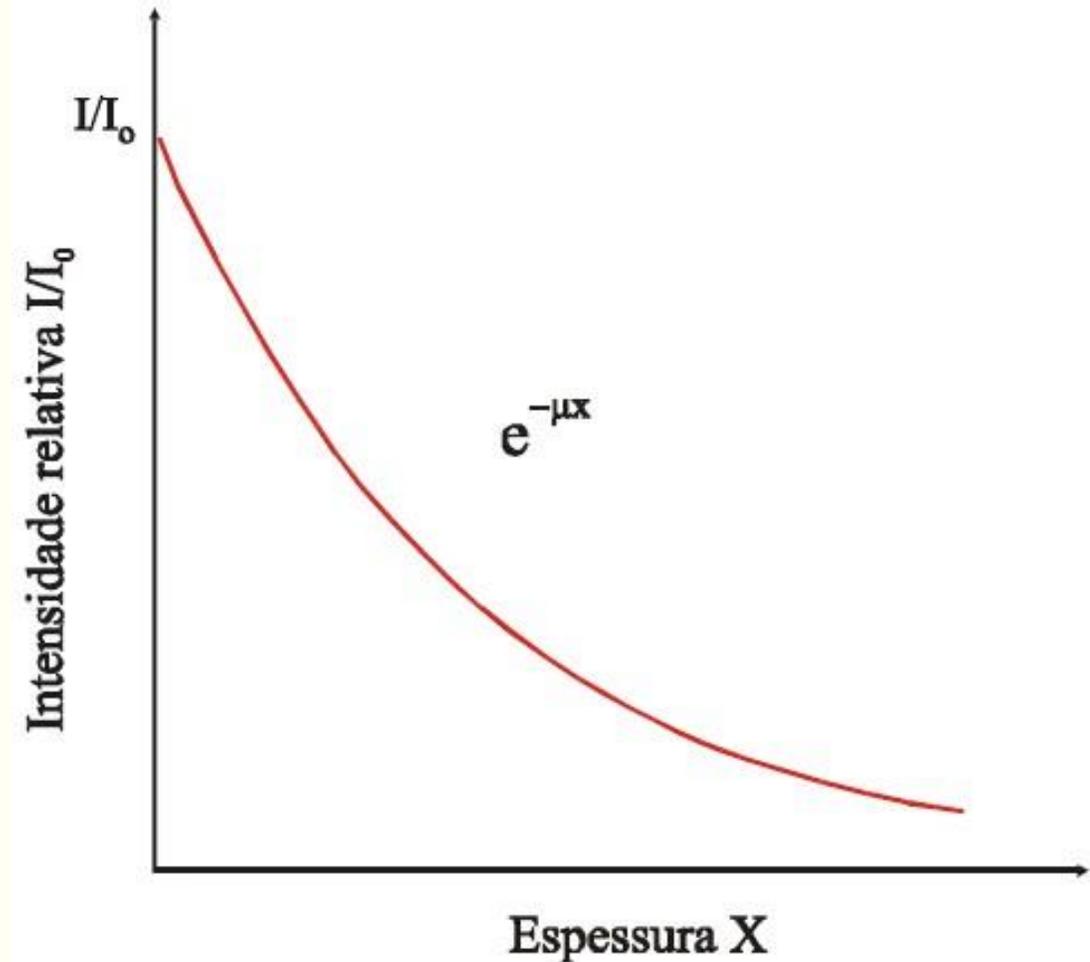
Fonte: IAEA , Manual on Gamma Radiography , e NCRP

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

# Fatores de quantificação da interação de fótons em uma blindagem – Atenuação de fótons com a matéria

---

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



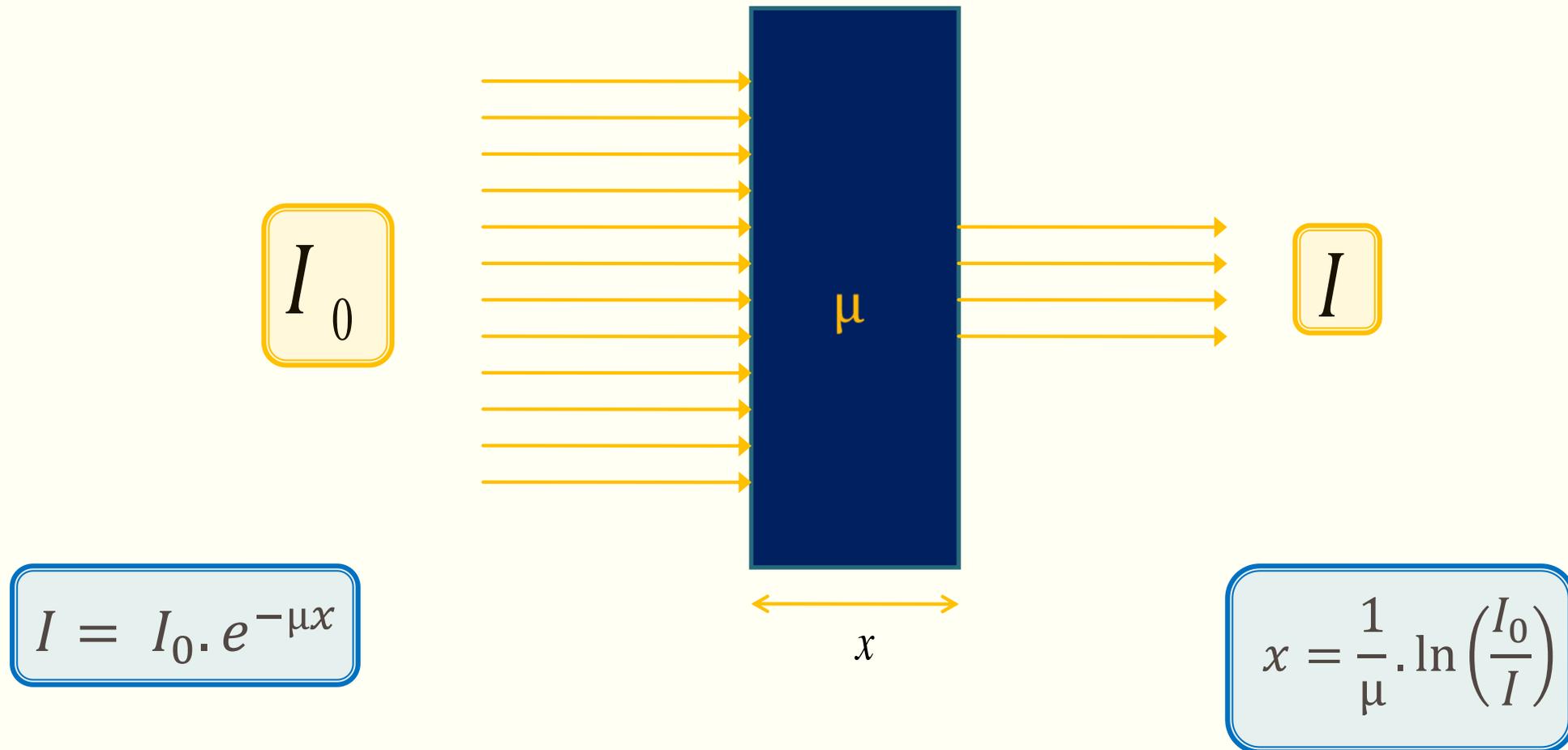
# Projeto de Blindagem para uma fonte pontual com energia discreta – Boa geometria, Build up (B) =1

---

- *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.

# Projeto de Blindagem para uma fonte pontual com energia discreta – Boa geometria, Build up (B) =1

---



# Projeto de Blindagem para uma fonte pontual com energia discreta – Boa geometria B=1: Exemplo 1

---

- Determine a espessura da barreira de concreto, em boa geometria, que deverá ser colocada a 8,0 m de uma fonte de  $^{192}\text{Ir}$  de 8,0Ci de atividade para reduzir a taxa de exposição a 25 mR/h. Dados: considere  $t = 1,0$  h. ( $E \approx 400\text{keV}$ )

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

$$X = I_0 = \frac{4,6 \times 10^{-1} \cdot 8,0 \cdot 1,0}{8,0^2} \Rightarrow I_0 = 0,057 \text{ R/h}$$

$$x = \frac{1}{\mu} \cdot \ln \left( \frac{I_0}{I} \right)$$

$$x = \frac{1}{0,224} \cdot \ln \left( \frac{0,057}{25 \times 10^{-3}} \right) \Rightarrow x = 3,7 \text{ cm}$$

# Projeto de Blindagem para uma fonte pontual com energia discreta – Boa geometria B=1: Exemplo 2

---

- Uma fonte de  $^{67}\text{Ga}$  com 740GBq de atividade será instalada em um construção cuja as paredes possuem no mínimo 42 cm de espessura de concreto. Sabendo que a fonte ficará a uma distância mínima de 36 cm da parede mais próxima, calcule a exposição do lado externo a parede e informe se esta área será área livre ou controlada. Considere a energia média do  $^{67}\text{Ga} \approx 126\text{keV}$  e o tempo=1,0 h.

$$x = \frac{1}{\mu} \cdot \ln \left( \frac{I_0}{I} \right)$$

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

$$1 \text{ Ci} = 37 \text{ GBq}$$

$$1 \text{ m} = 100 \text{ cm}$$

$$X = I_0 = \frac{8,03 \times 10^{-2} \cdot (740/37) \cdot 1,0}{(36/100)^2} \Rightarrow I_0 = 12R$$

$$I = 12 \cdot e^{-0,327 \cdot 42} \Rightarrow I = 1,3 \times 10^{-5} R \Rightarrow I = 13 \mu R$$

# Projeto de Blindagem para uma fonte pontual com energia discreta – Boa geometria B=1: 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. A área após a barreira poderá ser classificada como livre ou controlada?
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?
3. Calcular a que distância de uma fonte de  $^{192}\text{Ir}$  de 10 Ci, a taxa de dose é de 100  $\mu\text{Sv/h}$ . Refaça o cálculo para uma fonte de  $^{75}\text{Se}$  de mesma atividade.
4. Calcular a espessura necessária de uma parede de concreto para proteger operários em relação a uma taxa de dose superior a 25 $\mu\text{Sv/h}$  de uma fonte de  $^{60}\text{Co}$  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.

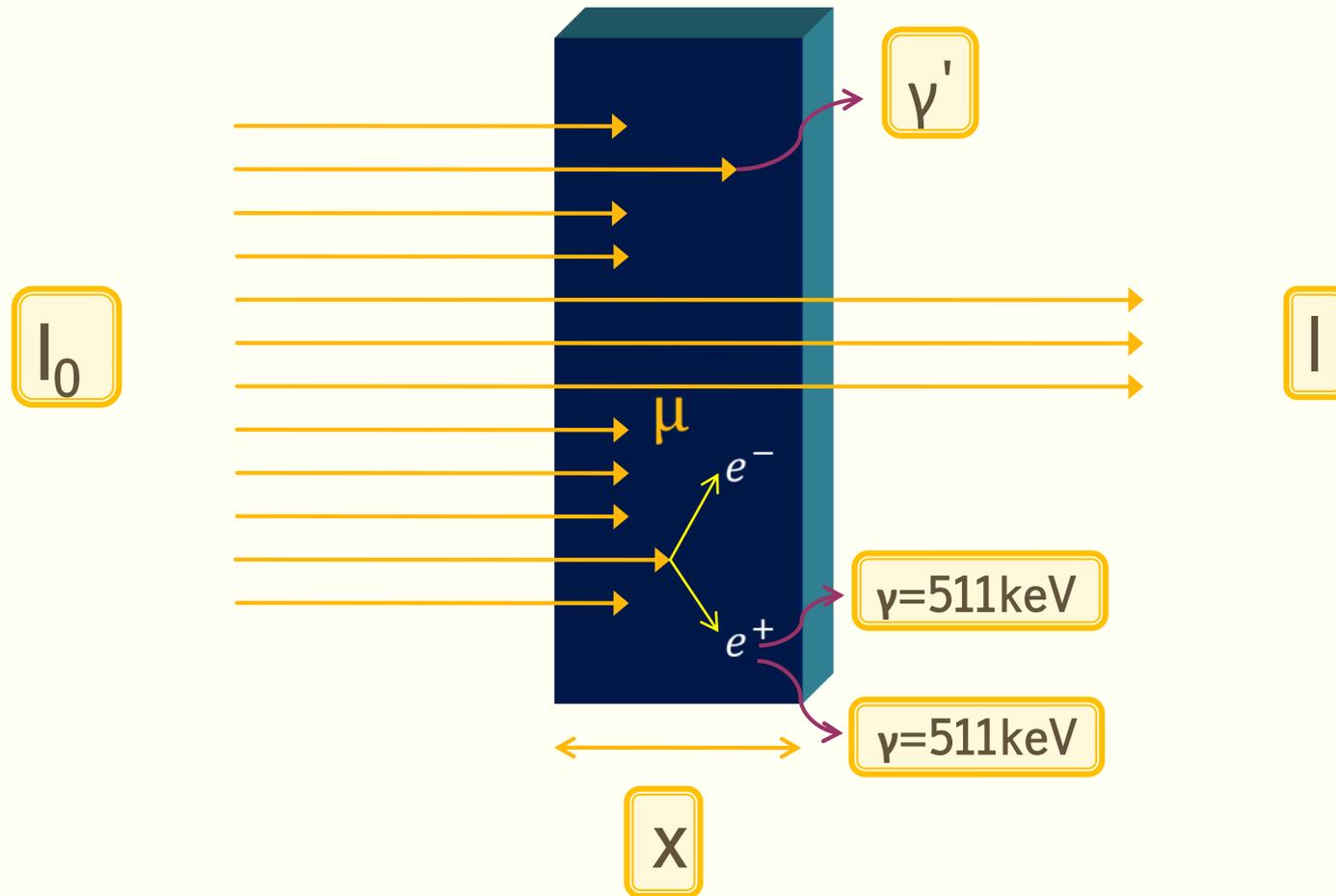
# Projeto de Blindagem para uma fonte pontual com energia discreta – Má geometria, Build up (B) $\neq 1$

---

- 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.
- Sem essa condição os fenômenos físicos da interação da radiação eletromagnética ionizante com a estrutura que compõe a blindagem, comprometerá a atenuação idealizada.
- Essa contribuição aditiva representa efetivamente um crescimento da intensidade do feixe em relação ao valor esperado.

# Projeto de Blindagem para uma fonte pontual com energia discreta – Má geometria, Build up (B) $\neq 1$

---



# Projeto de Blindagem para uma fonte pontual com energia discreta – Má geometria, Build up (B) $\neq 1$

---

- 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:
  - $I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \cdot B$ , onde  $B \rightarrow \mu \cdot x$
  - Condição de boa geometria:  $B = 1$
  - Assim a espessura da blindagem levando em conta o fator de build up:

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

ou

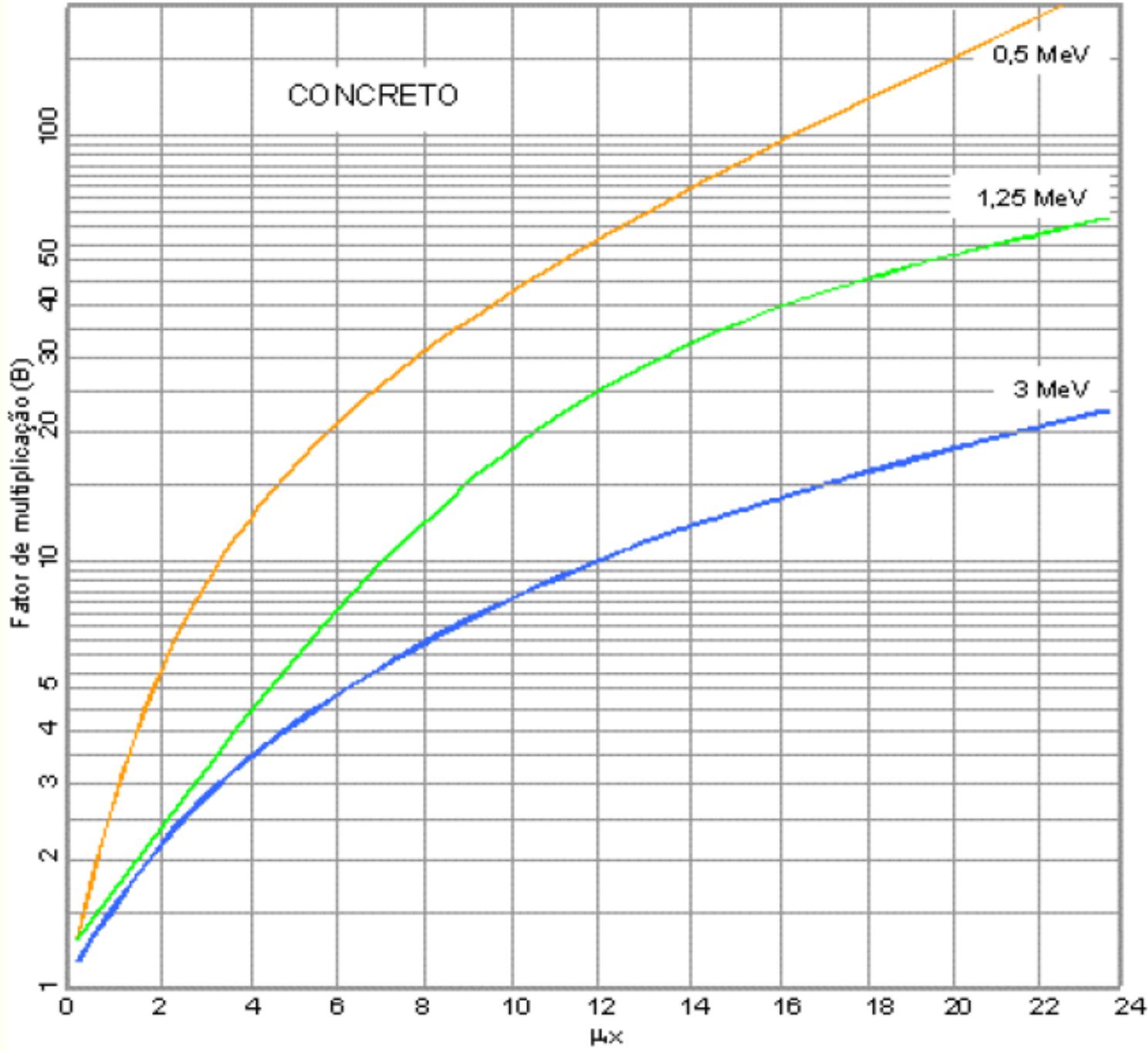
$$x = \frac{1}{\mu} \cdot \left[ \left( \ln \frac{I_0}{I} + \ln B \right) \right]$$

# Projeto de Blindagem para uma fonte pontual com energia discreta – Má geometria, Build up (B) $\neq 1$

---

- O fator de build up (B) 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 condição de cálculo nesta disciplina será usado gráfico para material absorvedor de concreto para a determinação do fator de Build up.

Metodologia para cálculo de blindagens para fótons em instalações radiológicas industriais  
Condição de má geometria



# Projeto de Blindagem para uma fonte pontual com energia discreta – Má geometria, Build up (B) $\neq$ : Exemplo 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 30Ci de atividade. Sabe-se que a distância mínima entre a fonte e a parede mais próxima não será menor que 3,0m e que a taxa de exposição externamente ao bunker não poderá exceder a 2,5mR/h. Considere  $B \neq 1$  e  $t = 1,0$  h.
- *Obs.: Os cálculos de barreiras e/ou blindagem visam dar proteção radiológica aos IOE e indivíduos do público. Ao contrário do radiodiagnóstico que o nível de restrição de dose estabelecido pela Portaria 453/98 tem que ser obedecido, nos cálculos envolvendo fontes gama ou equipamentos emissores de raios X com energias maiores que as utilizadas no radiodiagnóstico não há níveis de restrição. Assim sendo ao realizar os cálculos e proceder os arredondamentos necessários, busque ser conservativo em seus cálculos para que sob nenhuma condição, os limites de proteção radiológica estabelecidos em norma CNEN NN-3.01 sejam ultrapassados.*

# Projeto de Blindagem para uma fonte pontual com energia discreta – Má geometria, Build up (B) $\neq$ : Exemplo 1

- Resolução:

$$I_0 = \tau \cdot \frac{A \cdot t}{d^2} \rightarrow I_0 = 1,32 \cdot \frac{30 \cdot 1,0}{3,0^2} \rightarrow \boxed{I_0 = 4,4 \text{ R/h}}$$

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

$$B = 1$$

$$\boxed{B \neq 1}$$

*Para análise do gráfico e fator de build up, necessário valor da espessura em boa geometria*

$$\longrightarrow \mu \cdot x$$

# Projeto de Blindagem para uma fonte pontual com energia discreta – Má geometria, Build up (B) $\neq$ : Exemplo 1

---

▪ Resolução:

$$x = \frac{1}{\mu} \cdot \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \rightarrow x = \frac{1}{0,133} \cdot \ln\left(\frac{4,4}{2,5 \cdot 10^{-3}}\right) \rightarrow$$

*para análise do gráfico*  $\rightarrow \mu \cdot x = 0,133 \cdot 56 = 7,448 \simeq 8$

*do slide 70, B = 15*

$$x = 56 + \left(\frac{1}{0,133} \cdot \ln(15)\right) \rightarrow x = 76,36 \text{ cm} \rightarrow x = 77 \text{ cm}^*$$

*\* sendo conservativo para respeitar princípios de proteção radiológica*

# Projeto de Blindagem para uma fonte pontual com energia discreta – Má geometria, Build up (B) $\neq$ : Exercícios

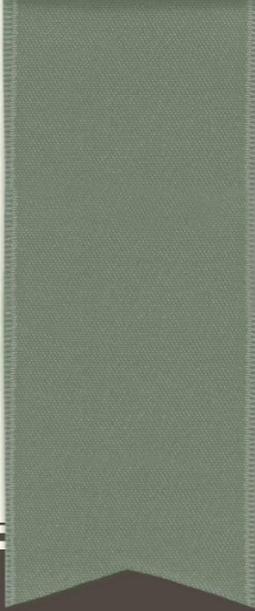
---

1. Determine a espessura da barreira de concreto, em boa geometria, que deverá ser colocada a 2,4 m de uma fonte de  $^{192}\text{Ir}$  de 95 Ci de atividade para reduzir a taxa de exposição a 25 mR/h. A área após a barreira poderá ser classificada como livre ou controlada?
2. Calcular a espessura necessária de uma parede de concreto para proteger operários em relação a uma taxa de dose superior a  $25\mu\text{Sv/h}$  de uma fonte de cobalto-60 de 46 Ci, situada a 3,7 metros. (Use a relação  $5 \text{ R} \approx 50 \text{ mSv}$ )
3. 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  $^{137}\text{Cs}$  de 50 Ci, situada a 276 centímetros. Obs.: para o valor de  $\mu$  use o slide 42. (Use a relação  $5 \text{ R} \approx 50 \text{ mSv}$ )

# Referencias bibliográficas

---

- BRASIL, 2014, Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica/Ministério da Ciência e Tecnologia, Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN. - Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia.
- Tauhata, L., Salati, I.P.A., Prinzió, R.Di., Prinzió, M.A.R.R.Di. Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos - 10a revisão abril/2014 - Rio de Janeiro - IRD/CNEN 344p. ISBN: 978-85-67870-02-1
- Okuno, E., Yoshimura, E. Física das radiações - São Paulo: Oficina de Textos, 2010
- Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012). Duque de Caxias, RJ : INMETRO, 2012. 94 p.
- Stabin, M.G. e Smith, D.S. Exposure rate constants and lead shielding values for over 1,100 radionuclides. Health Physics Society, 2012



Prof. Luciano Santa Rita  
E-mail: [tecnologo@lucianosantarita.pro.br](mailto:tecnologo@lucianosantarita.pro.br)  
[lucianosantarita@outlook.com](mailto:lucianosantarita@outlook.com)  
Site: [www.lucianosantarita.pro.br](http://www.lucianosantarita.pro.br)  
[www.facebook.com/SPR.LucianoSantaRita/](http://www.facebook.com/SPR.LucianoSantaRita/)

# Dosimetria, Cálculo de Blindagem e Proteção Radiológica