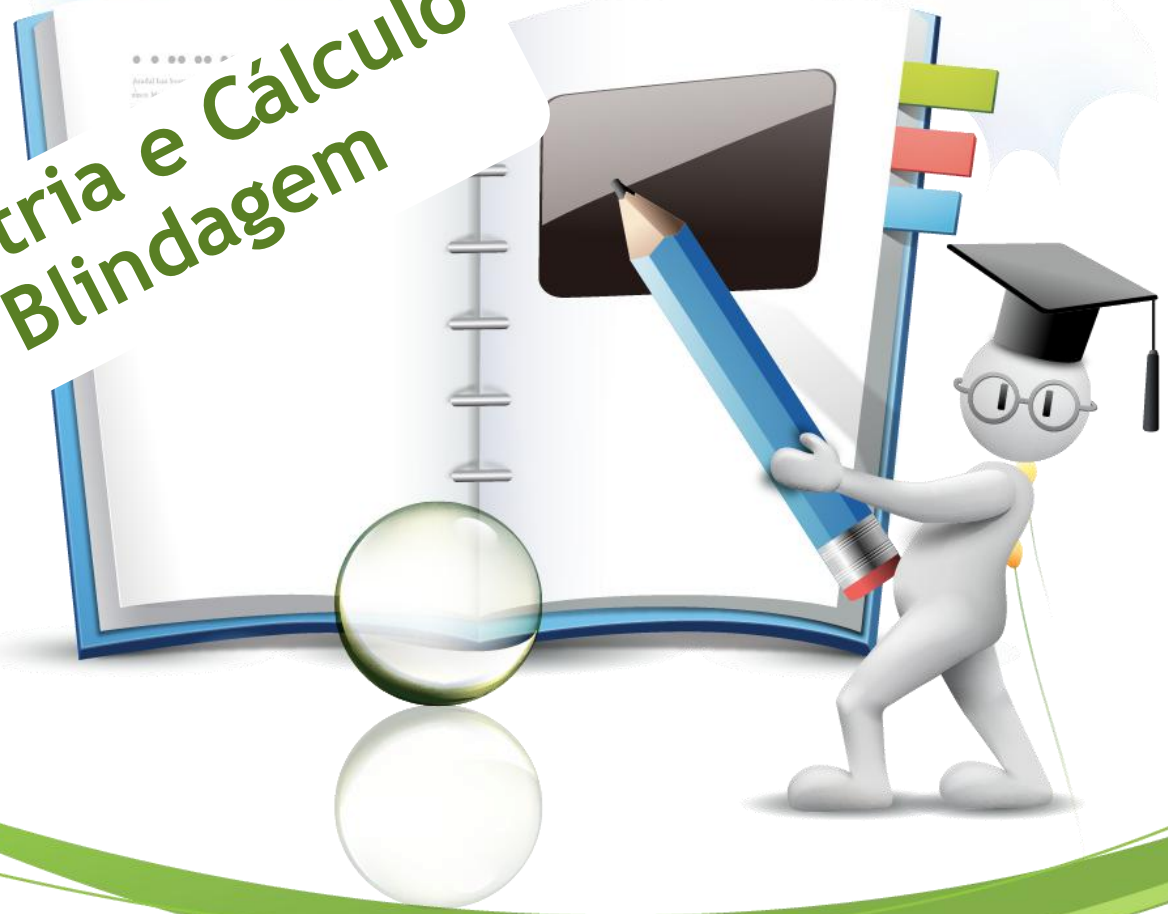
Dosimetria e Cálculo de Blindagem



Prof. Luciano Santa Rita - MSc

www.lucianosantarita.pro.br

tecnologo@lucianosantarita.pro.br

Conteudo programático

- Notação de uma grandeza, grandezas de base, unidade de medidas e sistema internacional de unidades
- Classificação e organização das grandezas para radiação ionizante;
- Grandezas radiológicas;
- Fatores de quantificação da interação de fótons em uma blindagem
- Projeto de blindagem
  - Terapia e indústria (fonte pontual com energia discreta)
  - Radiodiagnóstico (memorial descritivo)
- Estudo de caso

Notação de uma grandeza, grandezas de base, unidade de medidas e sistema internacional de unidades

- Definição de grandeza
- Grandezas de base
- Unidades de medidas
- Sistema internacional de unidades
- Notação científica e de engenharia

Notação de uma grandeza, grandezas de base, unidade de medidas e sistema internacional de unidades

- Grandeza
  - Propriedade dum fenômeno dum corpo ou duma substância, que pode ser expressa quantitativamente sob a forma dum número e duma referência. A referência pode ser uma unidade de medida. ex: X = 2 R; D = 0,01 Gy ou E = 0,02 Sv

- Grandezas de base
  - Grandeza dum subconjunto escolhido, por convenção, de um dado sistema de grandezas, no qual nenhuma grandeza do subconjunto possa ser expressa em função das outras.

Grandeza de base	Símbolo da dimensão
comprimento	L
massa	M
tempo	T
corrente elétrica	I
temperatura termodinâmica	Θ
quantidade de substância	N
intensidade luminosa	J

VIM, 2012

Notação de uma grandeza, grandezas de base, unidade de medidas e sistema internacional de unidades

- Unidades de medidas
  - Grandeza escalar real, definida e adotada por convenção, 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→Gy; Sievert→Sv ou Roentgen→R

- Sistema internacional de unidades
  - Sistema de unidades, baseado no Sistema Internacional de Grandezas, com os nomes e os símbolos das 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 do ISQ (sistea internacional de grandezas. Os nomes e os símbolos das unidades de base estão contidos na tabela seguinte.

VIM, 2012

Notação de uma grandeza, grandezas de base, unidade de medidas e sistema internacional de unidades

- Sistema internacional de unidades

Grandeza de base	Unidade de base	
Nome	**Nome**	**Símbolo**
comprimento	metro	m
massa	kilograma	kg
tempo	segundo	s
corrente elétrica	ampere	A
temperatura termodinâmica	kelvin	K
quantidade de substância	mol	mol
intensidade luminosa	candela	cd

VIM, 2012

Notação de uma grandeza, grandezas de base, unidade de medidas e sistema internacional de unidades

- Notação científica e de engenharia

  - ***Notação cientifica*** 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.

$$N \; x \; 10^{p}$$

$$2{,}34 \times 10^{4}$$

$$9{,}9 \times 10^{-6}$$

$$20 \times 10^{12}$$

$$456 \times 10^{-9}$$

Notação de uma grandeza, grandezas de base, unidade de medidas e sistema internacional de unidades

- Notação científica e de engenharia

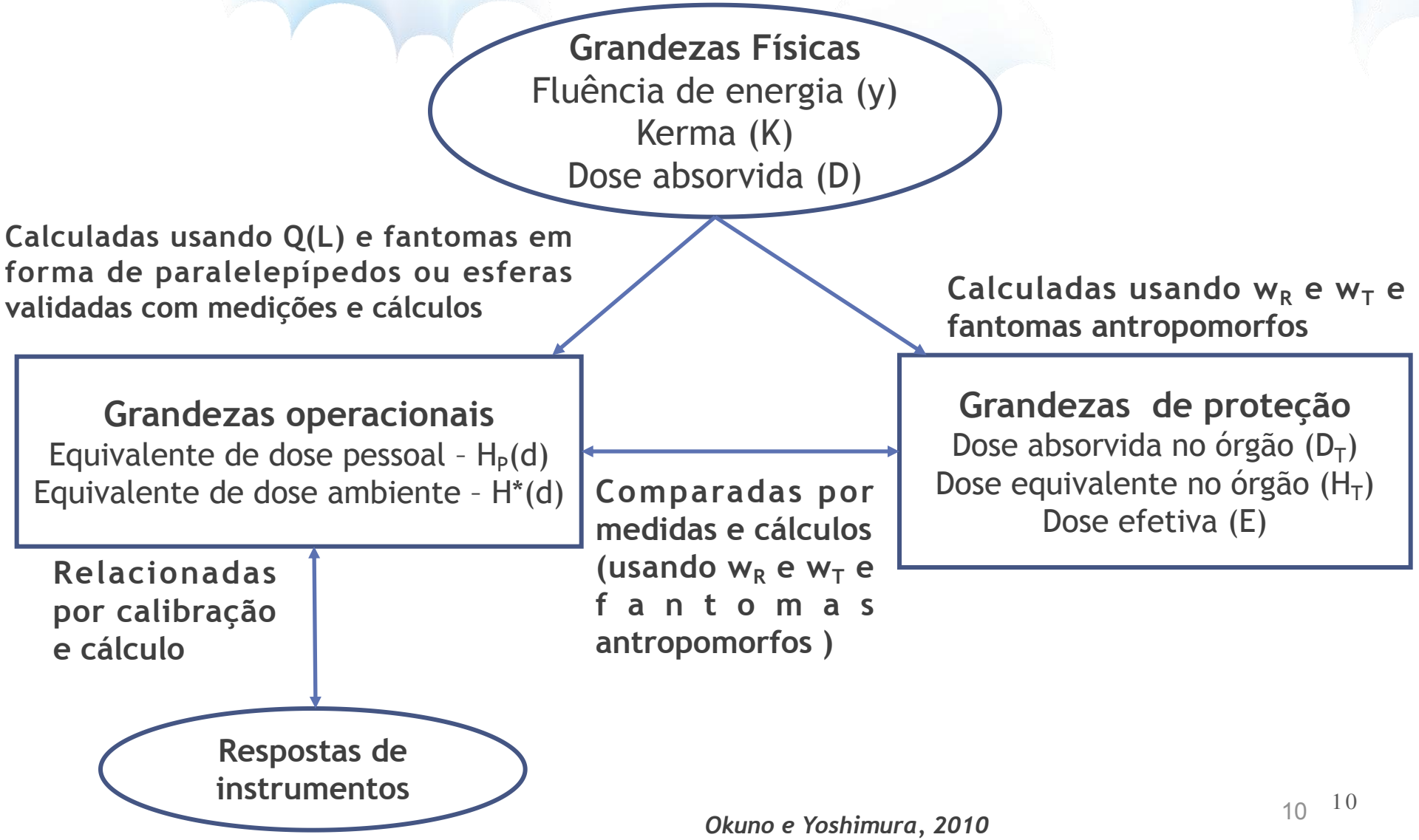
	Nome do Prefixo	Símbolo do Prefixo	Fator pelo qual a unidade é multiplicada
MÚLTIPLOS	yotta	Y	10^{24} = 1 000 000 000 000 000 000 000 000
	zetta	Z	10^{21} = 1 000 000 000 000 000 000 000
	exa	E	10^{18} = 1 000 000 000 000 000 000
	peta	P	10^{15} = 1 000 000 000 000 000
	tera	T	10^{12} = 1 000 000 000 000
	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
	UNIDADE		
SUBMÚLTIPLOS	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

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.

Okuno e Yoshimura, 2010

Classificação e organização das grandezas para radiação ionizante



Okuno e Yoshimura, 2010

Classificação e organização das grandezas para radiação ionizante

- O laboratório nacional de metrologia das radiações ionizante 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.

Grandeza de radioatividade: Atividade

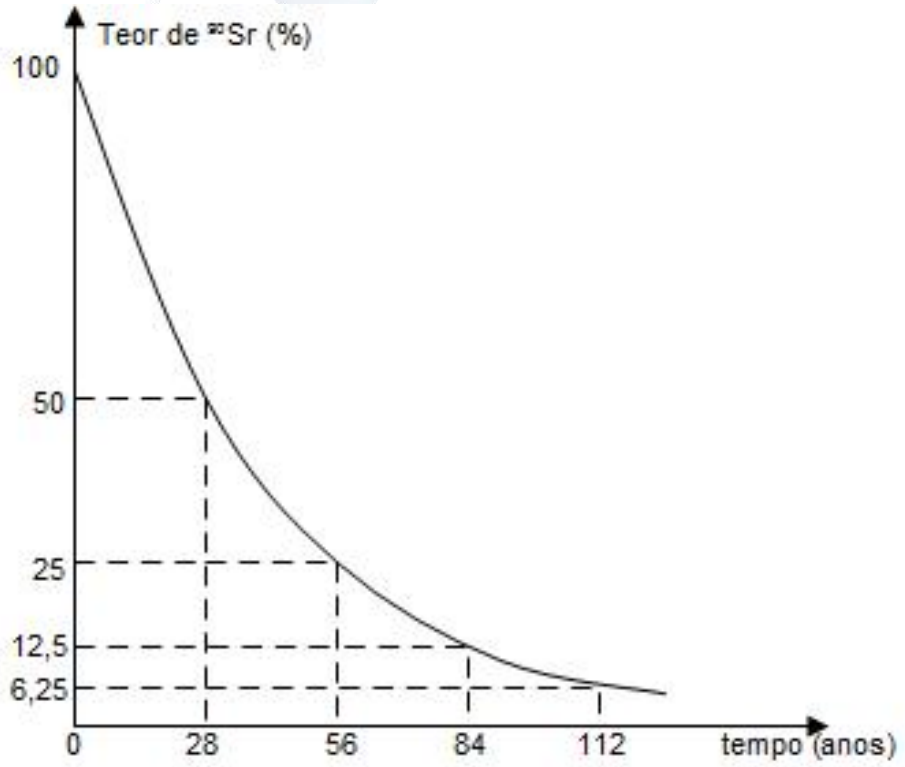
- A atividade de um material radioativo é o número de transformações nucleares por unidade de tempo.
  - onde N é o número de núcleos radioativos contidos na amostra ou material. A unidade, Becquerel (Bq), corresponde a uma transformação por segundo, ou s^{-1}.
  - A unidade antiga, Curie (Ci) = $3{,}7.10^{10}$ 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.

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

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

Exercício resolvido

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



Resposta: **28 anos**

Grandezas físicas

- Fluência : (Φ)
  - Grandeza radiométrica definida pelo quociente de dN por da , onde dN e o numero 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}.

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

- Fluência de energia : (Ψ)
  - Onde dR e a energia radiante incidente em uma esfera infinitesimal de seção reta da . Para um campo monoenergético:

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

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

- As grandezas escalares fluência e fluência de energia são relevantes na determinação da grandeza kerma.

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 R = $2{,}58 \times 10^{-4}$ [C.kg-1]

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

- ***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 absorved dose) que é relacionado com a unidade do SI por: 1 Gy = 100 rad = 1J/kg

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

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.

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

  - A grandeza kerma está relacionada a fluência de energia por meio do coeficiente transferência de energia em massa .

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

  - 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.

Grandezas físicas

- *Coeficiente de transferência de energia em massa (μ_{tr}/ρ)*

  Unidade: m^2/kg

Energia (MeV)	(μ_{tr}/ρ)
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

Attix, 1986

Relação entra grandezas: Atividade e Exposição

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

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

Constante de taxa de exposição (Γ)

Radionuclídeo	Γ (R.m²/Ci.h)	Radionuclídeo	Γ (R.m2/Ci.h)
^{241}Am	$7,49x10^{-2}$	^{125}I	$1,75x10^{-1}$
^{208}Bi	$1,11x10^{0}$	^{131}I	$2,2x10^{-1}$
^{60}Co	$1,29x10^{0}$	^{111}In	$3,46x10^{-1}$
^{137}Cs	$3,43x10^{-1}$	^{192}Ir	$4,6x10^{-1}$
^{152}Eu	$6,44x10^{-1}$	^{75}Se	$2,03x10^{-1}$
^{67}Ga	$8,03x10^{-2}$	^{99m}Tc	$7,95x10^{-2}$

Stabin, M.G. e Smith, D.S., 2012

Exercício resolvido

- Um tecnólogo entrou numa sala de irradiação e não percebeu que uma fonte de ^{67}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.

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

Relação entra 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:

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

- 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 .

Relação entra 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:

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

- $\left(\mu_{en}/\rho\right)_{ar}$ é o coeficiente de absorção de energia em massa do ar, e
- $\left(\mu_{en}/\rho\right)_{m}$ é o coeficiente de absorção de energia em massa do material m

https://physics.nist.gov/cgi-bin/Xcom/xcom2

Relação entra 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*

Okuno e Yoshimura, 2010

Exercício resolvido

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

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

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

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

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

$$D_m = \mathrm{f} \,.\, D_{ar}$$

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

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).

Grandezas de proteção

- Dose equivalente (H_T):
  - 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 equivament man) que é relacionado com a unidade com a unidade do SI por: 1 Sv = 100 rem = 1J/kg

$$H_T = \sum_R w_R . D_{T,R} \qquad [Sv \; ou \; J.kg^{-1}]$$

- 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.

$$E = \sum_T w_T . H_T \qquad [Sv \; ou \; J.kg^{-1}]$$

Grandezas de proteção - fator 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	5	Função contínua da energia do nêutron
10 - 100 keV	10	
>100keV a 2 MeV	20	
>2 MeV a 20 MeV	10	
>20MeV	5	
Prótons	5	2 (prótons e pions)
Partículas alfa, elementos de fissão, núcleos pesados	20	20

Os valores da norma CNEN NN-3.01 correspondem aos do ICRP-60. *Okuno e Yoshimura, 2010*

Grandezas de proteção - fator W_T

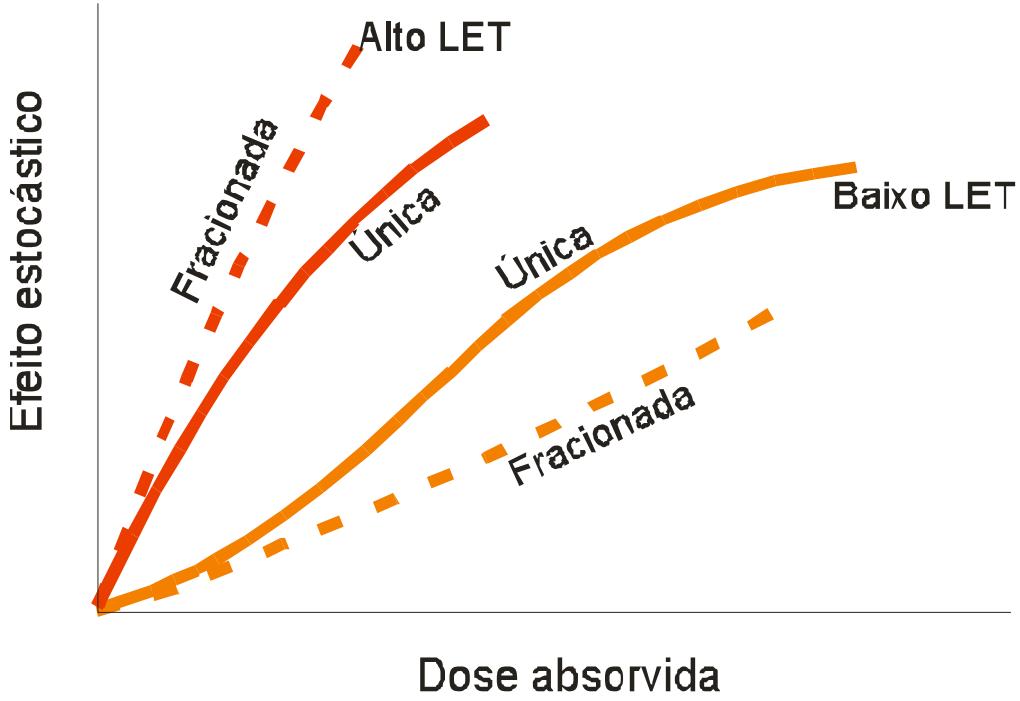
Tecido ou órgão	w_T (ICRP-26/77)	w_T (ICRP-60/90)	w_T (ICRP-107/07)
Gônadas	0,25	0,20	0,08
Medula óssea	0,12	0,12	0,12
Cólon	-	0,12	0,12
Pulmão	0,12	0,12	0,12
Estômago	-	0,12	0,12
Mama	0,15	0,05	0,12
Bexiga	-	0,05	0,04
Esôfago	-	0,05	0,04
Fígado	-	0,05	0,04
Tireoide	0,03	0,05	0,04
Superfície do osso	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.

Okuno e Yoshimura, 2010

Grandezas de proteção - Definição de LET

- 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.



Grandezas de proteção - Definição de REB

- 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 pessados, somente são necessários 100 rads. Qual o fator RBE de núcleos pessados

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

Aumenta LET → Aumenta RBE

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.

Okuno e Yoshimura, 2010

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 keV/μm) foram introduzidos na ICRP-60.

Q (L)	L (keV/μm)
1	< 10
0,32L - 2,2	10 ≤ L ≥ 100
$300/L^{1/2}$	> 100

- 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.

$$H = Q.D$$

(na profundidade d)

Okuno e Yoshimura, 2010

Grandezas operacionais - *Equivalente de dose pessoal $H_P(d)$*

- É uma grandeza para monitoração individual externa.
- A grandeza $H_P(d)$ é obtida pelo produto da dose absorvida em um ponto, na profundidade **d** do corpo humano, pelo fator de qualidade **Q** da radiação neste ponto. Deve-se medir $H_P(10\ mm)$ dose equivalente no cristalino e $H_P(7\ mm)$ na pele e nas extremidades.
- O valor de $H_P(d)$ é obtido por meio do monitor individual que o IOE utiliza no local do corpo representativo da exposição, geralmente no tórax.
- O valor obtido deve fornecer uma estimativa conservadora da dose efetiva. A unidade de $H_P(d)$ é o sievert (Sv).

$$H_p(d) = \mathrm{Q} \,.\, \mathrm{D}$$

Okuno e Yoshimura, 2010

Grandezas operacionais - Dose individual (H_X) - Photon Dose Equivalent

- Dose individual (H_X) – Photon Dose Equivalent
- As calibrações de monitores individuais em HP(d) precisam ser feitas em simuladores (cilindro da ICRU). Coeficientes de conversão tabelados são usados para converter, em condições padronizadas, o valor do kerma no ar (fótons).
- A grandeza H_X é atualmente usada no Brasil para monitoração individual externa de corpo inteiro, pois não necessita de simuladores para a calibração dos dosímetros (monitores) individuais, que são calibrados livres no ar.
- O fator de conversão (***f = 1,14 Sv/Gy para kerma no ar***) independe da energia. É uma boa estimativa da dose efetiva.

$$H_x = K_{ar} \cdot f$$

Resumo de grandezas

Grandeza	Equação	Meio	Tipo	Unidade (SI)	Unidade original	Conversão
Atividade	$A = \lambda.N$	---	---	Bq $=s^{-1}$	Ci	1 Ci = 37GBq
Dose absorvida	$D = \frac{dE}{dm}$	qualquer	qualquer	Gy (J/kg)	rad	1 Gy = 100 rad
Kerma	$K = {}^{dE_{tr}}/_{dm}$	qualquer	X, γ, n	Gy (J/kg)	rad	1 Gy = 100 rad
Exposição	$X = {}^{dQ}/_{dm}$	ar	X, γ	C/kg	R	1 R = $2{,}58 \times 10^{-4}$ C/kg
Dose equivalente	$H_T = w_R \, . \, D_{T,R}$	Órgão ou tecido	qualquer	Sv (J/kg)	rem	1 Sv = 100rem
Dose efetiva	$E = \sum_T w_T . H_T$	Corpo todo	qualquer	Sv (J/kg)	rem	1 Sv = 100rem
Equivalente de dose pessoal	$H = Q \, . \, D$	Corpo todo	qualquer	---	rem	1 Sv = 100rem

Okuno e Yoshimura, 2010

Exercício resolvido

- Uma fonte pontual de 192Ir emite um número de fótons a uma energia de aproximadamente 0,300 MeV, gerando uma taxa de fluência de 2,1x10^{17} fótons/m^2.s, em um certo ponto no ar.
  - Qual a taxa de fluência de energia neste ponto?
  - Qual o valor da taxa kerma no ar por hora em unidades do SI?
  - Que valor de taxa de dose por hora um dosímetro, medindo a grandeza H_x, registraria?

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

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

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

$$K_m = 0{,}0148 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 3600 \rightarrow K_m = 5.3 \cdot 10^5 \frac{J}{kg \cdot h} \rightarrow K_m = 5{,}3 \cdot 10^5 \; Gy/h$$

$$H_x = K_{ar} \cdot f$$

1 MeV = 1,602 x 10^{-13} J

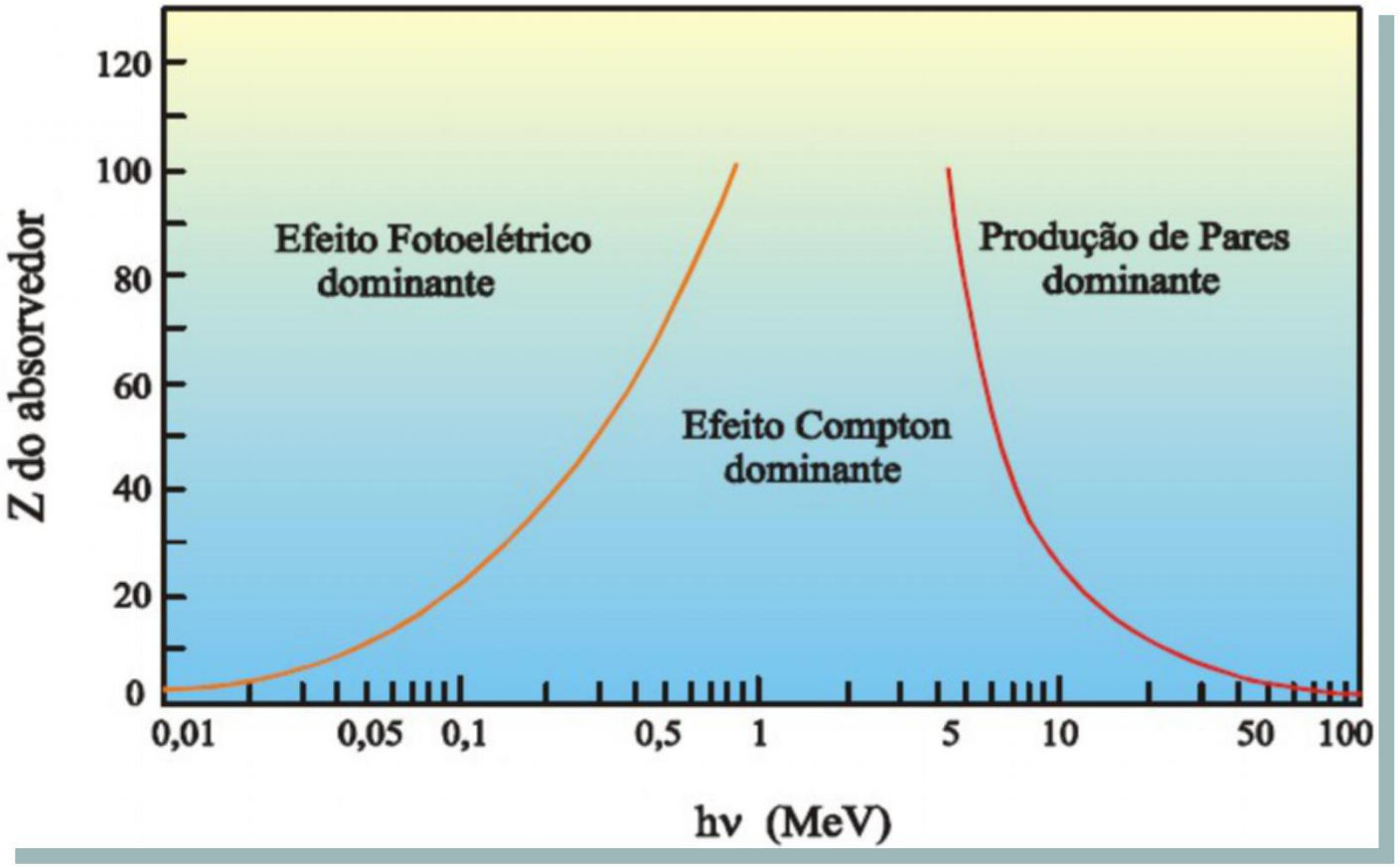
1 h = 3600 s

Fatores de quantificação da interação de fótons em uma blindagem

- Coeficiente de atenuação linear (μ);
- Coeficiente de atenuação linear em massa (μ/ρ);
- 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;



Tauhata, 2003

Fatores de quantificação da interação de fótons em uma blindagem

- Coeficiente de atenuação linear (μ);
  - Quanto maior a espessura de um material, maior a quantidade de radiação que ela absorve, ou seja, menor a intensidade do feixe que atravessa o material;
  - Como a absorção obedece a uma lei exponencial, a intensidade diminui, mas nunca se anula completamente;
  - A capacidade de absorção varia de material para material. Isso se explica através de coeficiente de absorção "μ", 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 (μ);

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

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

Ir-192 Co-60

Andrecci, 2009

Fatores de quantificação da interação de fótons em uma blindagem

- 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 μ pela equação

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

- 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.

Fatores de quantificação da interação de fótons em uma blindagem

FONTE DE RADIAÇÃO	Alumínio 2,3 g/cm³ (cm)		Chumbo 12 g/cm³ (cm)		Concreto 2,3 g/cm³ (cm)		Aço 7,8 g/cm³ (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

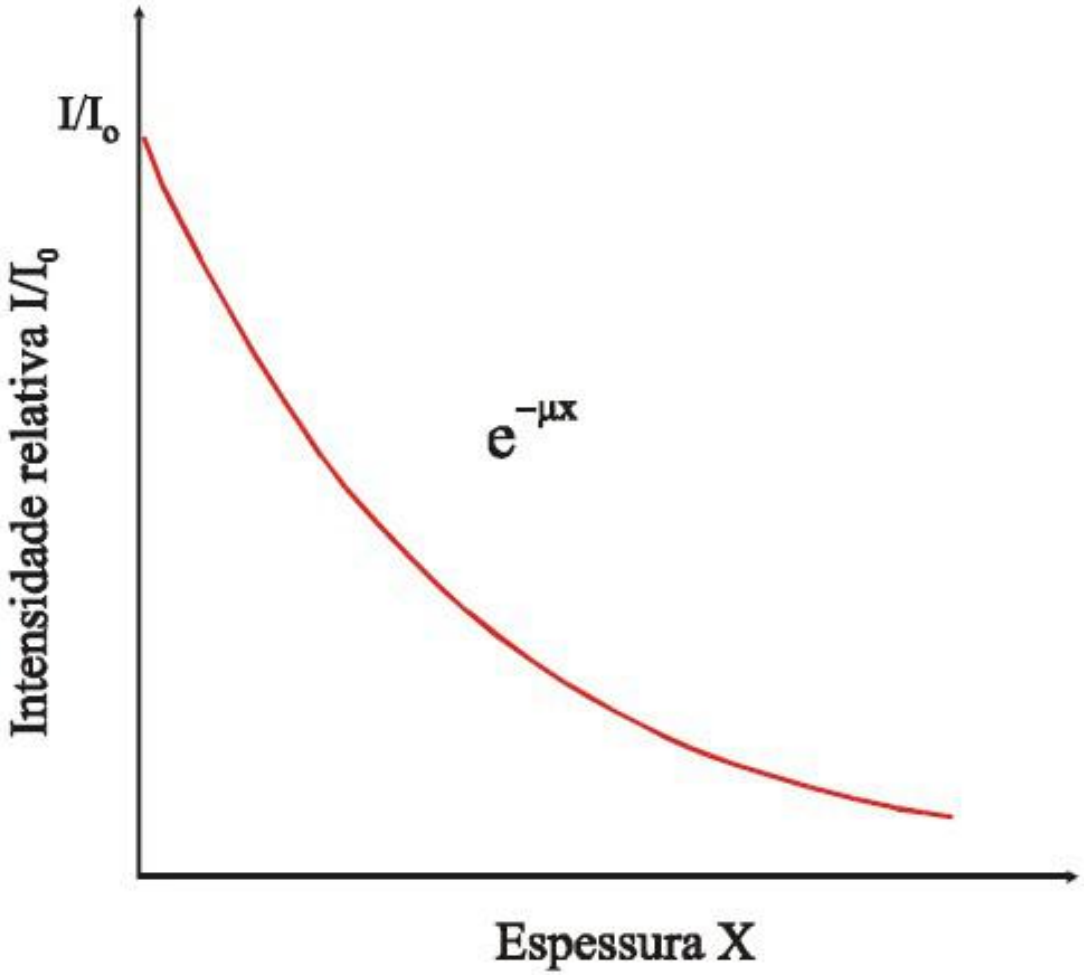
* valores aproximados obtidos para voltagem de pico de um tubo direcional para uso médico

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

Andrecci, 2009

Atenuação de fótons com a matéria

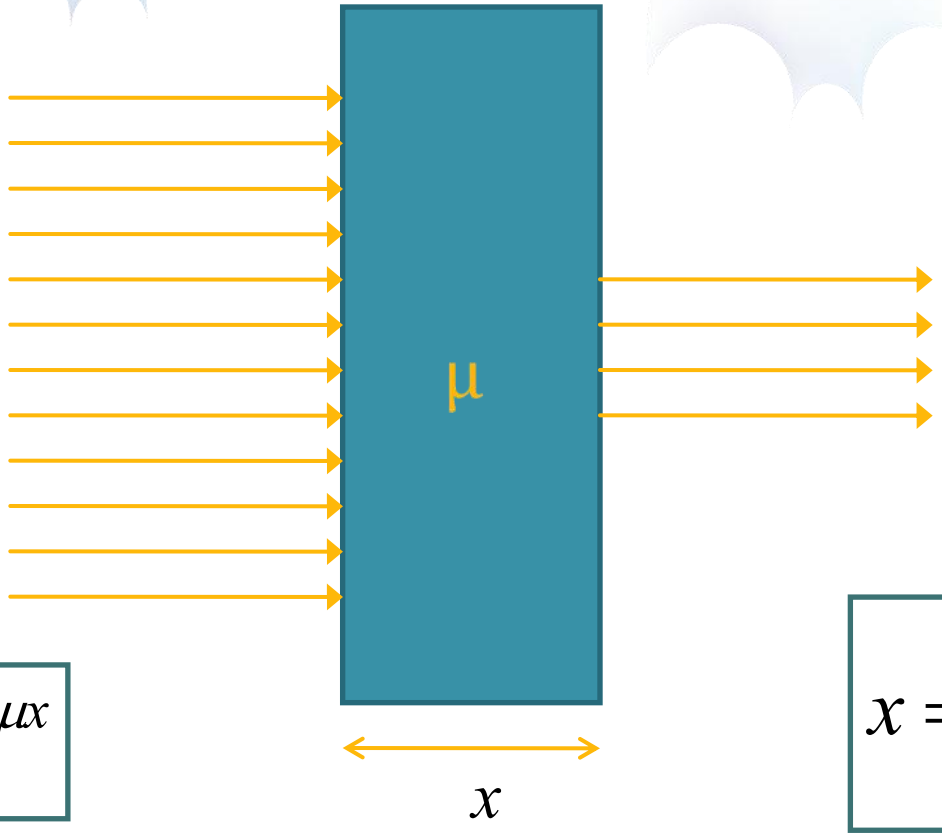
$$I = I_0 . e^{-\mu x}$$



Projeto de blindagem para fonte pontual e com energia discreta (boa gemometria - B=1)

- 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.

Projeto de blindagem para fonte pontual e com energia discreta (boa gemometria - B=1)



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

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

Projeto de blindagem para fonte pontual e com energia discreta (boa gemometria - B=1)

- Exemplo

1. Determine a espessura da barreira de concreto, em boa geometria, que deverá ser colocada a 2,0 m de uma fonte de ^{192}Ir de 75,0 Ci de atividade para reduzir a taxa de exposição a 25 mR/h. Dados: considere 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 radidiagnóstico não há níveis de restrição. Assim sendo ao realizar os cálculos e proceder os arredondamentos necessários, busque ser conservativo em seus cáclulos para que sob nenhuma condição, os limites de proteção radiológica estabelecidos em norma CNEN NN-3.01 sejam ultrapassados.***

Projeto de blindagem para fonte pontual e com energia discreta (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}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}Iodo 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}Ir de 10 Ci, a taxa de dose é de 100 μSv/h. Refaça o cálculo para uma fonte de ^{75}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 25μSv/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 25μSv/h de uma fonte de ^{137}Cs de 30 Ci, situada a 176 centímetros.

Projeto de blindagem para fonte pontual e com energia discreta (B=1) - Exercícios

6. Uma fonte de ^{67}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 $^{67}Ga \cong 0{,}20$ MeV, 1 R ≅ 0,1 mSv e o tempo=1,0 h.

$$I = I_0 . e^{-\mu x} \qquad X = \tau \cdot \frac{A \cdot t}{d^2}$$

1 Ci = 37 GBq

$$I_0 \rightarrow X = 8{,}03 \times 10^{-2} \cdot \frac{\left(\frac{740}{37}\right) \cdot 1{,}0}{\left(\frac{36}{100}\right)^2} \rightarrow I_0 = 12\,R \rightarrow I = 12 \cdot e^{(-0{,}29 \cdot 42)} \rightarrow I = 6{,}2 \times 10^{-5}\,R$$

Convertendo para (Sv) -> $6{,}2 \times 10^{-6}$ Sv em 1h

Será área Livre ou controlada?

Projeto de blindagem para fonte pontual e com energia discreta - Trabalho para A2

- O slide 19 apresenta tabela com relação de fator de exposição para vários radionuclídeos. Faça as conversões de unidades de grandezas necessárias para gerar uma tabela com o fator gama nas seguintes unidades:

1. $mSv.m^2$ / h.GBq
2. $\mu Sv.cm^2$ / h.MBq
3. $mSv.m^2$ /h.kBq
4. $\mu Sv.cm^2$ / min.TBq

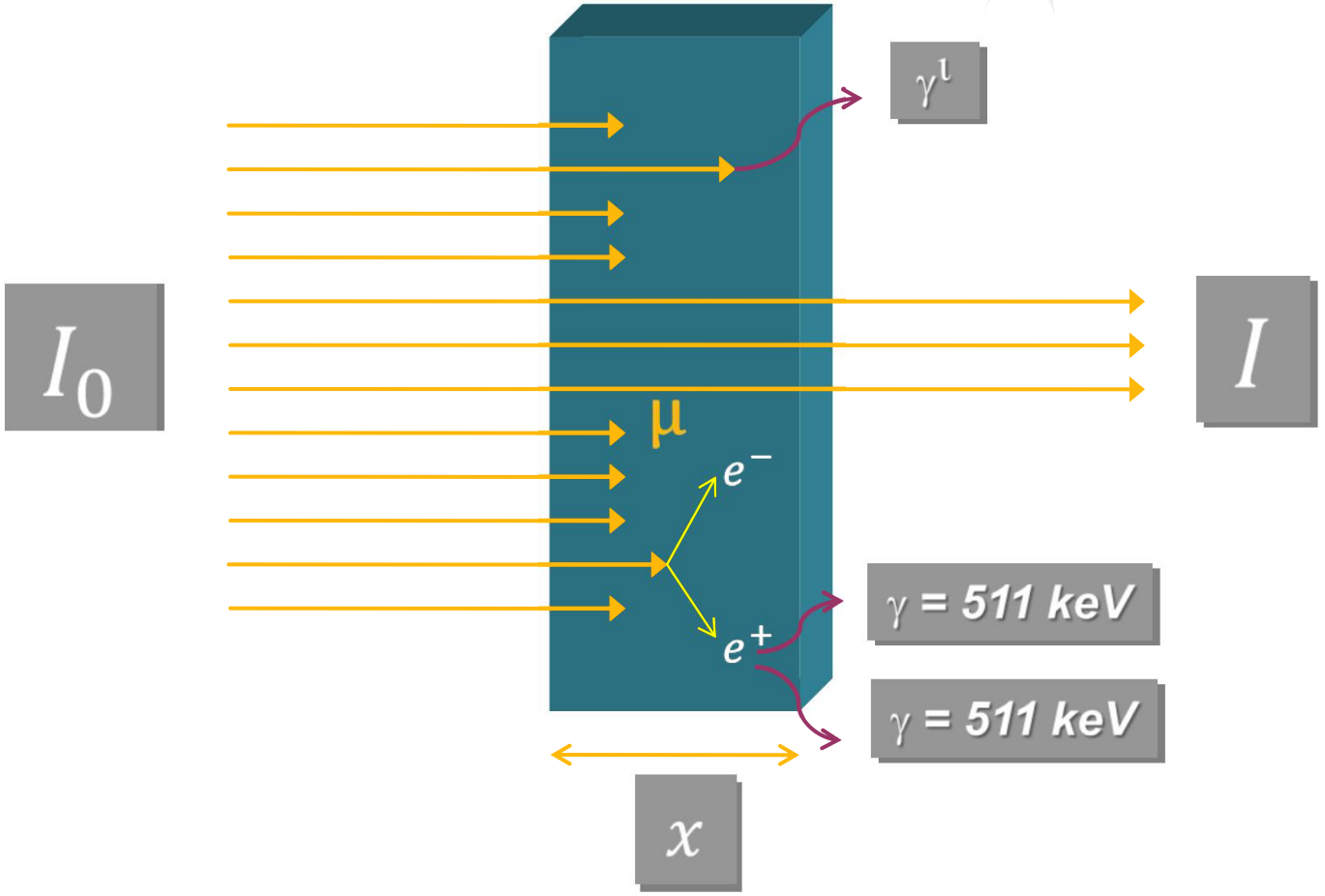
Projeto de blindagem para fonte pontual e com energia discreta (boa gemometria - B≠1)

- Condição de má geometria e cálculo
  - 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.

Tauhata, 2006

Projeto de blindagem para fonte pontual e com energia discreta (boa gemometria - B≠1)

- Condição de má geometria e cálculo



Projeto de blindagem para fonte pontual e com energia discreta (boa gemometria - B≠1)

- Condição de má geometria e cálculo
  - A 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:
    - $I = I_0 \cdot e^{-\mu x} .B$, onde $B \rightarrow \mu.x$
    - Condição de boa geometria: B = 1

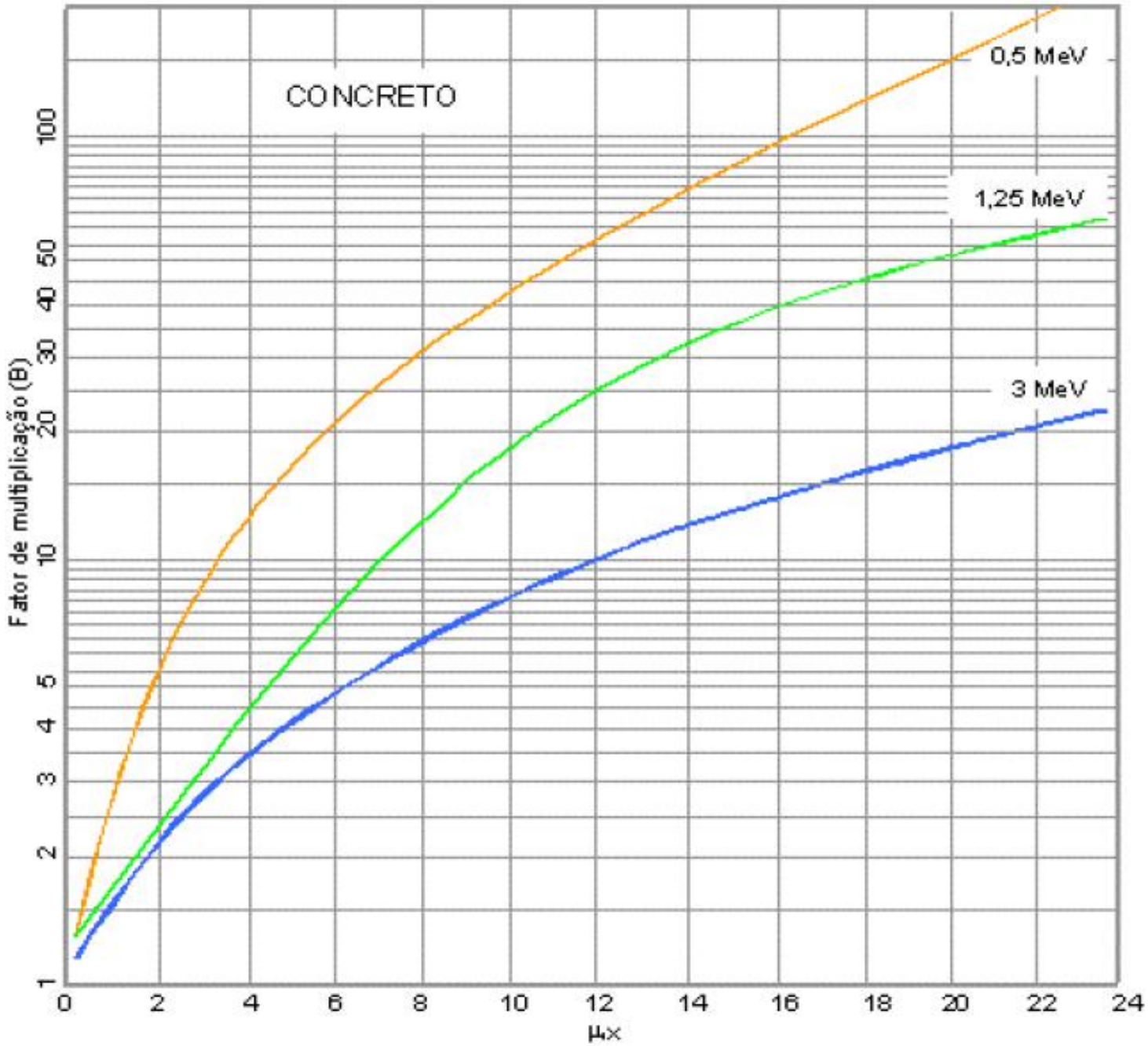
$$x = \frac{1}{\mu} . \left[Ln\left(\frac{I_0}{I}\right) + Ln\,(B) \right]$$

Tauhata, 2006

Projeto de blindagem para fonte pontual e com energia discreta (boa gemometria - B≠1)

- Condição de má geometria e cálculo
  - O fator de build up (B) depende de μ 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 μ.x, para valores de energia média do feixe de radiação e da natureza do material absorvedor.
  - No estudo desta condição de cálculo nesta disciplina serão usados gráficos para materiais absorvedores de chumbo, concreto e aço 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 fonte pontual e com energia discreta (boa gemometria - B≠1)

- Exemplo

1. Determine a espessura das paredes de concreto de um bunker (casamata) para serviço de gamagrafia com uma fonte puntiforme de ^{60}Co de 30 Ci de atividade. Sabe-se que a distância mínima entre a fonte e a parede mais próxima não será menor que 3,0 m e que a taxa de exposição externamente ao bunker não poderá exceder a 2,5 mR/h. Considere B≠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 radidiagnóstico não há níveis de restrição. Assim sendo ao realizar os cálculos e proceder os arredondamentos necessários, busque ser conservativo em seus cáclulos para que sob nenhuma condição, os limites de proteção radiológica estabelecidos em norma CNEN NN-3.01 sejam ultrapassados.***

Projeto de blindagem para fonte pontual e com energia discreta (boa gemometria - B≠1)

- Resolução

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

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

B = 1

B ≠ 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 fonte pontual e com energia discreta (boa gemometria - B≠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

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

** sendo conservativo para respeitar princípios de proteção radiológica*

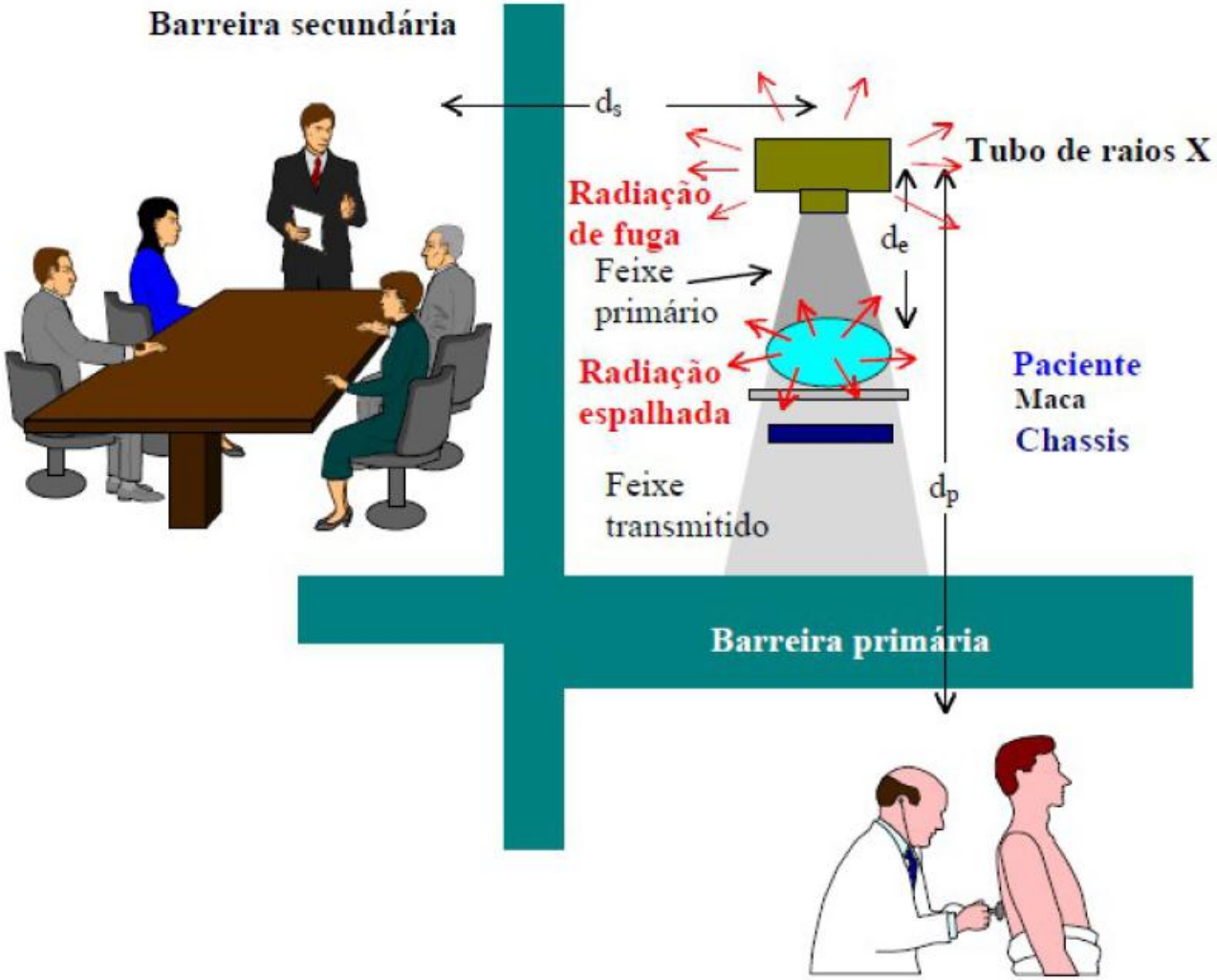
Projeto de blindagem para fonte pontual e com energia discreta (B≠1) - Exercícios

1. Determine a espessura da barreira de concreto, em boa geometria, que deverá ser colocada a 2,4 m de uma fonte de ^{192}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 25μSv/h de uma fonte de cobalto-60 de 46 Ci, situada a 3,7 metros. (Use a relação 5 R ≈ 50 mSv)

3. Calcular a espessura necessária de uma parede de concreto para proteger operários contra uma taxa de dose superior a 25μSv/h de uma fonte de ^{137}Cs de 50 Ci, situada a 276 centímetros. Obs: para o falor de μ use o slide 42. (Use a relação 5 R ≈ 50 mSv)

Projeto de blindagem para serviços de radiodignóstico



Projeto de blindagem para serviços de radiodignóstico

- 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.

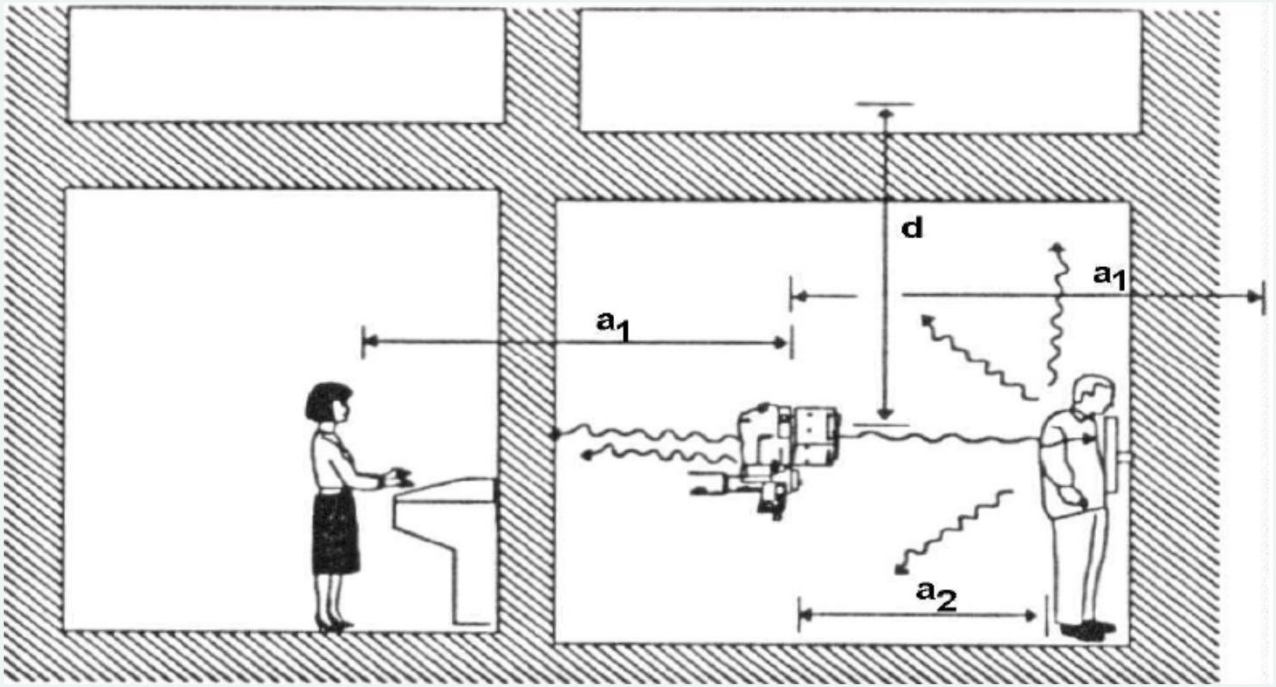
- Na década de 80 a publicação NCRP 49 tornou-se referência para os cálculos de barreiras.

- 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.

- Esta ***metodologia*** permite o cálculo da barreira pela determinação do fator de transmissão ou grau de atenuação levando em conta as diferentes condições de incidência da radiação, as áreas adjacentes que podem apresentar tipos e graus de ocupação diferenciados e ainda as condições de operação e a quantidade de exposições realizadas com o aparelho de raios X, distâncias consideradas, etc. .

Projeto de blindagem para serviços de radiodignóstico

- As barreiras (paredes, teto, piso, etc.) para as quais o feixe primário de raios X pode ser direcionado (geralmente, piso e parede com estativa mural) são denominadas de *barreiras primárias*. As demais são denominadas de ***barreiras secundárias*** e sobre elas incidem radiação secundária (espalhada) e radiação de fuga (transmitida através da blindagem do cabeçote).



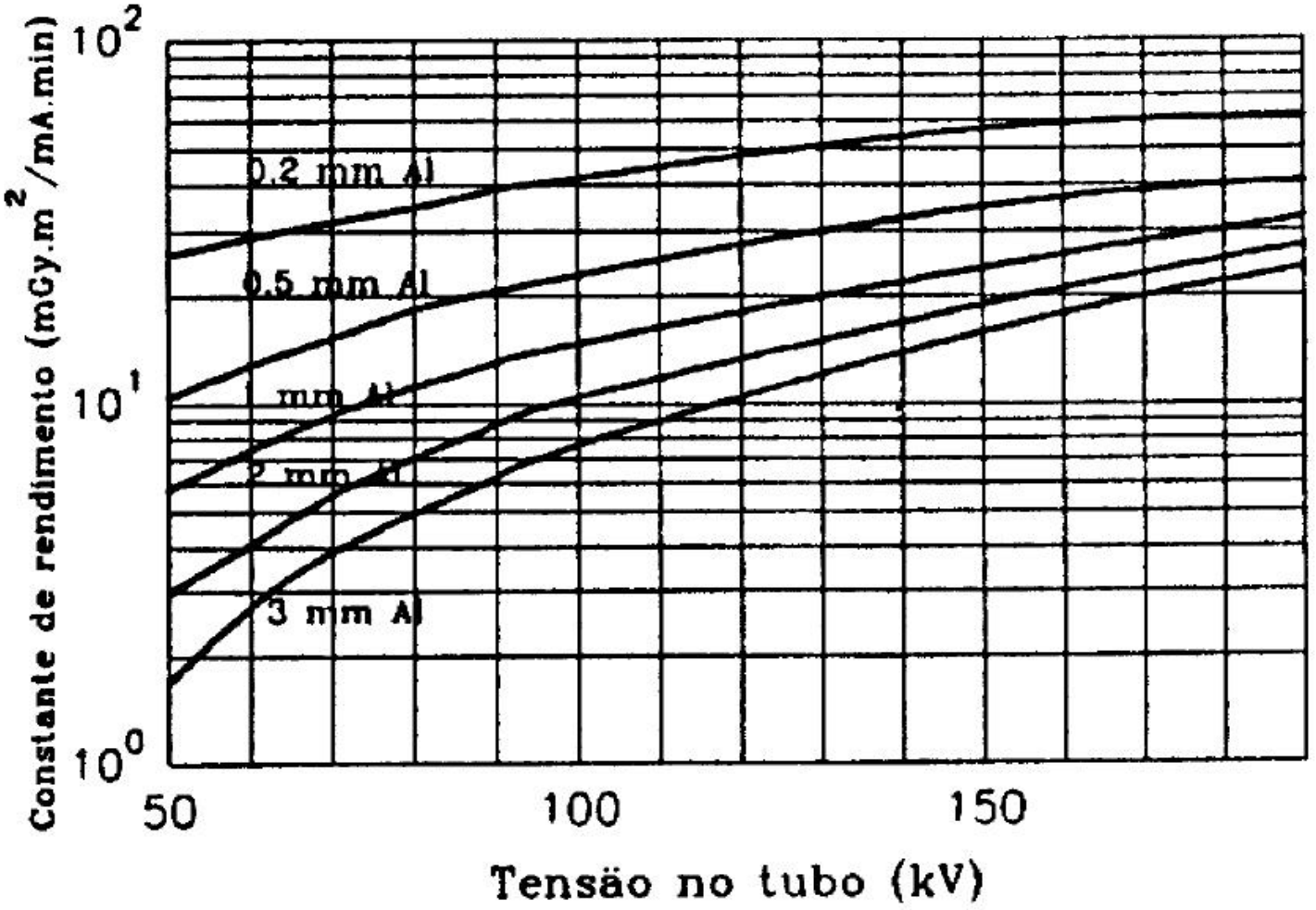
Projeto de blindagem para serviços de radiodignóstico - barreira primária

- O grau de atenuação F_p para uma determinada barreira primária é dado por:

$$F_p = \frac{T_r \,.\, W \,.\, U \,.\, T}{J_w \,.\, (a_1)^2}$$

- Onde:
  - **T_r**: constante de rendimento do aparelho de raios X, em mGy.m^2/mA.min;
  - **W**: carga de trabalho semanal do aparelho de raios X, em mA.min/sem;
  - **U**: fator de uso da barreira;
  - **T**: fator de ocupação da área adjacente;
  - **J_w**: limite autorizado semanal no ponto de interesse da área adjacente, em mGy/sem; e
  - **a_1**: distância entre o ponto de interesse da área adjacente e o ponto focal, em metros.

Constante de rendimento (T_r)



- *Obs.: Equipamento de raios X de onda completa*

Carga de trabalho semanal máxima (W)

- Não havendo dados para o cálculo específico da carga de trabalho (W) usar os valores abaixo:

Equipamento	*No de pac/dia*	*W*	*W (mA•min/sem)*		
		(mA•min/ pac)	*100 kVp*	*125 kVp*	*150 kVp*
Radiografia Geral	24	2,67	320	160	80
Radiografia de Tórax	60	0,53	160	80	–

- Fonte: Portaria 453/98 e o guia "Radiodiagnóstico Médico: Desempenho de Equipamentos e Segurança" da ANVISA.

Fator de uso (U) e ocupação (T)

Barreira	*U*
piso	0,5
parede 1	0,25
parede 2	0,25

Ocupação	*Local*	*T*
integral	consultório, recepção	1
parcial	sala de espera, vestiário, circulação interna	1/4
eventual	circulação externa, banheiros, escadas	1/16
rara	jardins cercados, casa de máquinas	1/32

- Fonte: Portaria 453/98 e o guia "Radiodiagnóstico Médico: Desempenho de Equipamentos e Segurança" da ANVISA.

Limite autorizado semanal (J_w)

Localização	*Restrição de Dose Semanal*	*Restrição de Dose Anual*
Área controlada	0,10 mSv/sem	5,0 mSv/ano
Área livre	0,01 mSv/sem	0,5 mSv/ano

$$H_x = K_{ar} \cdot f \longrightarrow K_{ar} = \frac{H_x}{f} \longrightarrow$$ ***do slide 15 e 31***

$$J_w\ (\text{área controlada}) = \frac{0{,}10}{1{,}14} = 0{,}088\ mGy/sem$$

$$J_w\ (\text{área livre}) = \frac{0{,}01}{1{,}14} = 0{,}009\ mGy/sem$$

H_x - Dose individual (Photon Dose Equivalent)

- As calibrações de monitores individuais em $H_P(d)$ precisam ser feitas em simuladores (cilindro da ICRU). Coeficientes de conversão tabelados são usados para converter, em condições padronizadas, o valor do kerma no ar (fótons).
- A grandeza H_X é usada no Brasil, em substituição a grandeza $H_P(d)$, para monitoração individual externa de corpo inteiro, pois não necessita de simuladores para a calibração dos dosímetros (monitores) individuais, que são calibrados livres no ar.
- O fator de conversão (**f = 1,14 Sv/Gy** para kerma no ar) independe da energia. É uma boa estimativa da dose efetiva.

$$H_x = K_{ar} \cdot f$$

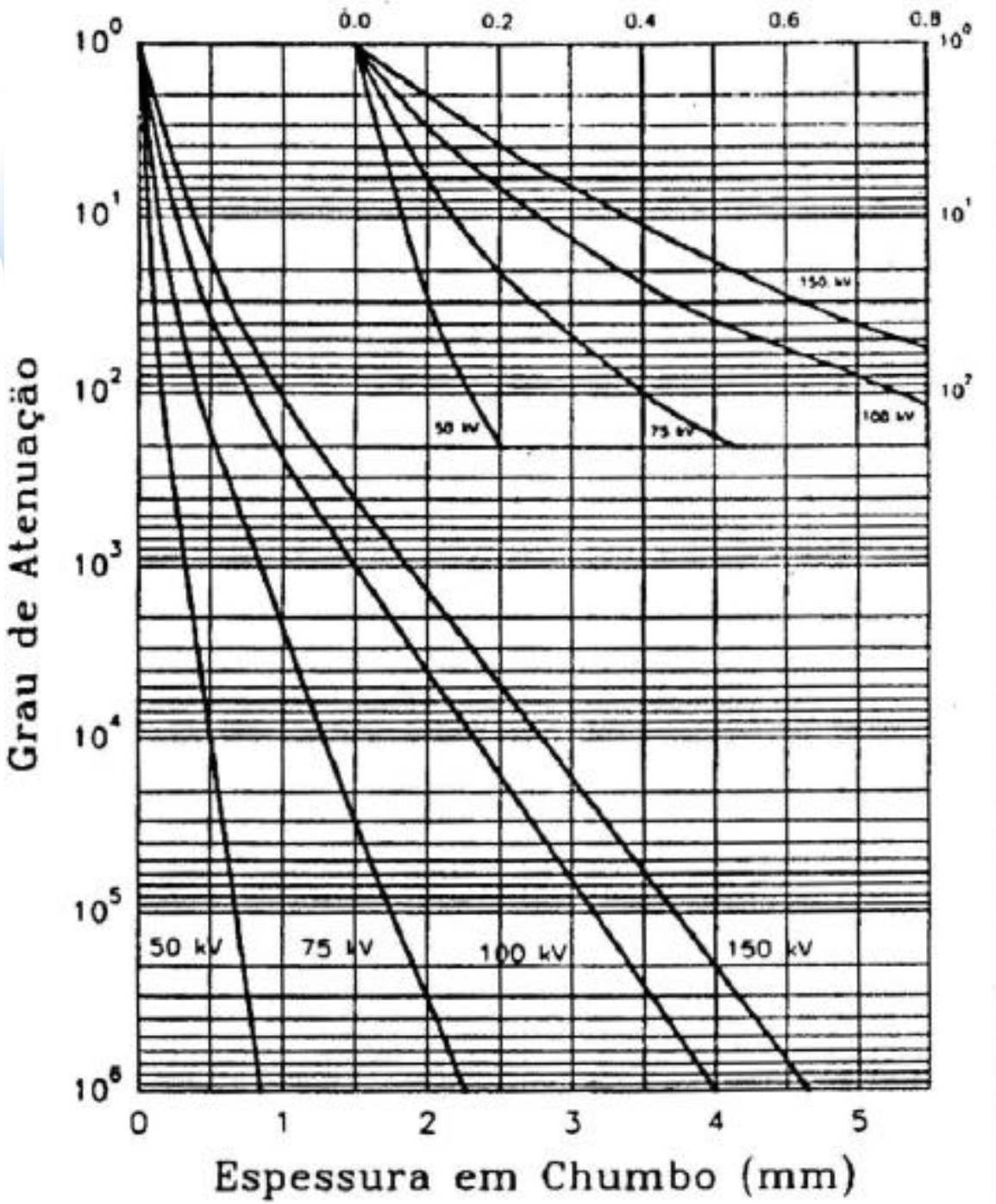
Projeto de blindagem para serviços de radiodignóstico - barreira secundária

- O grau de atenuação F_s para uma determinada barreira secundária é dado por:

$$F_s = \frac{T_r \,.\, W \,.\, U \,.\, T}{J_w \,.\, (a_2)^2 \,.\, d^2} \,.\, k$$

- Onde:
  - T_r, **W**, **U**, **T** e J_w tem o mesmo significado apresentado no slide 24;
  - a_2: distância entre a superfície do meio espalhador (no slide 23, o paciente) e o ponto focal, em metros;
  - **d**: distância entre a superfície do meio espalhador e o ponto de interesse da área adjacente;
  - **k**: coeficiente de espalhamento, em m^2. para salas de radiografia, em geral, k = 0,002 m^2 e para radiologia oral, k = 0,0005 m^2.

Espessura de chumbo (mm) da Blindagem para F_p e F_s



Projeto de blindagem

- Continua...

Referências bibliográficas

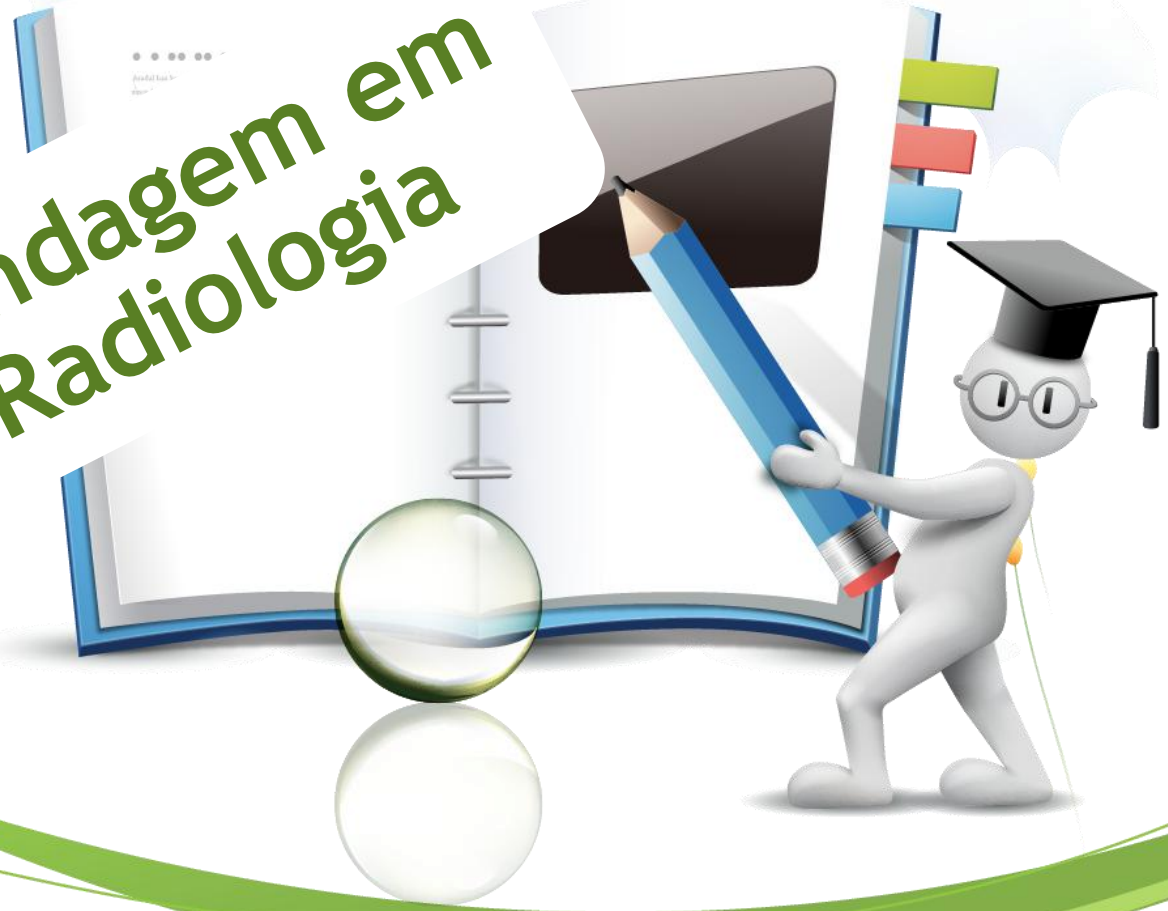
- BRASIL, 1998, Diretrizes de Proteção Radiológica em Radiodiagnóstico Médico e Odontológico/Ministério da Saúde, Agência Nacional de Vigilância Sanitária. - Brasília: Ministério da Saúde.

- Tauhata, L., Salati, I.P.A., Prinzio, R.Di., Prinzio, M.A.R.R.Di. Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos - 5a revisão agosto/2003 - Rio de Janeiro - IRD/CNEN 242p.

- 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

Blindagem em Radiologia



Prof. Luciano Santa Rita - MSc

www.lucianosantarita.pro.br

tecnologo@lucianosantarita.pro.br