

Calculemos a exposição à radiação para as fontes do Laboratório Didático hoje (06/05/1999). Foram recebidas 20 fontes de  $^{60}\text{Co}$  e 20 fontes de  $^{137}\text{Cs}$ , cada uma delas com uma atividade nominal (não rigidamente calibrada) de  $5,0 \mu\text{Ci}$  ( $1 \mu\text{Ci} = 3,7 \times 10^4$  desintegrações/segundo).

A tabela abaixo contém dados sobre os decaimentos, juntamente com as constantes de taxa de exposição,  $\Gamma$ . O valor de  $\Gamma$  depende de qual energia de radiação começamos a considerar, neste caso partimos desde zero, o que é um exagero, pois os elétrons e parte dos raios x moles não conseguem sair do invólucro da fonte:

Núcleo	Meia-vida (anos)	$\langle E \rangle$ (MeV/desint.)	$\Gamma$ (R · cm <sup>2</sup> /h · m Ci)
Cobalto-60	5,271	2,50 $\gamma$ + 0,096 $e^-$	13,2
Césio-137	30,0	0,566 $\gamma$ + 0,250 $e^-$	3,3

A quantidade física que queremos obter é a *dose equivalente*,  $H$ . A dose equivalente leva em conta os efeitos biológicos da deposição de energia pela radiação em certa massa de tecido vivo. Ela é calculada por

$$H = D \cdot Q \quad (1)$$

onde  $D$  é a *dose absorvida* e  $Q$  é um *fator de qualidade* adimensional, que leva em conta a ionização causada pela radiação ao longo da trajetória. Muito embora envolvam as mesmas unidades básicas (joule/quilograma), a dose absorvida e a dose equivalente são conceitualmente diferentes, sendo suas unidades batizadas como *gray* (Gy) e *sievert* (Sv), respectivamente. Duas radiações de mesma energia mas diferentes, tais que seus fatores de qualidade sejam  $Q = 1$  e  $Q = 10$  por exemplo, podem depositar a mesma dose absorvida  $D$  (mesma energia/massa), digamos de 1 Gy, mas seus efeitos biológicos serão diferentes, caracterizados pelas doses equivalentes  $H$  de 1 Sv e 10 Sv, respectivamente.

A constante de taxa de exposição  $\Gamma$  permite calcular a taxa de exposição  $\dot{X}$ , em roentgens por hora (R/h) a uma certa distância  $d$  da fonte:

$$\dot{X} = \Gamma \frac{A}{d^2} \quad (2)$$

onde  $A$  é a atividade desta. O roentgen envolve a carga de um mesmo sinal gerada em ar pela radiação:

$$1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg} \quad (3)$$

esta equivale a 1 ues (unidade eletrostática de carga) gerada em 1 cm<sup>3</sup> de ar nas CNTP (trata-se de uma massa de 0,001293 g de ar). Temos agora que conduzir as transformações que possam levar desde a eq.(2) até (1): a conversão de carga/massa para energia/massa certamente não é única, mas podemos usar que para exposição gama em ar,

$$1 \text{ C/kg representa } 33,8 \text{ J/kg} = 33,8 \text{ Gy} . \quad (4)$$

Se substituirmos o ar por água ou por tecido humano, esse número não muda muito em média, portanto será uma aproximação razoável se utilizarmos (de (3) e (4)) que

$$1 \text{ R representa } 8,72 \times 10^{-3} \text{ Gy} = 2,58 \times 10^{-4} \times 33,8 \text{ J/kg} . \quad (5)$$

Assim, a taxa de exposição  $\dot{X}$ , a taxa de dose equivalente  $\dot{H}$  podem ser calculadas em função da distância, por exemplo de 1 cm, lembrando que  $Q = 1$  para elétrons e fótons (com  $Q = 1$ , a taxa de dose absorvida  $\dot{D}$  é numericamente igual a  $\dot{H}$ ):

Fonte	$\dot{X}$ (mR/h)@1 cm	$\dot{H}$ (mSv/h)@1 cm	$\dot{H}$ (mSv/h)@1 cm
Cobalto-60	66	0,58	<b>0,56</b>
Césio-137	17	0,14	<b>0,10</b>

onde a última coluna exclui a contribuição dos elétrons (4% no cobalto e 31% no césio), pois estes não saem do invólucro da fonte. Assim, se calcularmos a taxa de dose equivalente a 1 cm de distância de todas as fontes, sem qualquer blindagem teremos um número grande, cerca de **13 mSv/h@1 cm**, sendo 85% devido às fontes de cobalto. Para comparação, a dose permitida (taxa de dose equivalente multiplicada pelo tempo de exposição) para não trabalhadores com radiação não deve exceder **5 mSv em um ano** (o limite para trabalhadores com radiação é dez vezes maior). Os números indicam que não devemos permanecer muito tempo muito perto das fontes, sem blindagem. Lembrem que o simples aumento da distância reduz fortemente a dose (**esta já cai de um fator 1000 a 32 cm**). Tudo isto foi calculado sem blindagem. Imaginemos agora que os castelos de chumbo tenham 1 cm de espessura. Qual será a redução nessa dose? A tabela abaixo contém a meia-distância (meia-distância,  $d_{1/2\rho}$ , em g/cm<sup>2</sup>, é a espessura do material (de densidade  $\rho$ ) que reduz a intensidade dos fótons de uma certa energia à

metade) de chumbo para os fótons dos dois decaimentos, juntamente com os fatores de atenuação para 1 cm de Pb ( $\rho = 11,4 \text{ g/cm}^3$ ) de blindagem:

Isótopo	$d_{1/2\rho}$ ( $\text{g/cm}^2$ ) de Pb	Atenuação (1 cm Pb)	$\dot{H}_{\text{Pb}}$ (mSv/h)@1 cm
Cobalto-60	12	0,52	<b>0,29</b>
Césio-137	6,3	0,29	<b>0,03</b>

onde a atenuação foi calculada por  $2^{-d/d_{1/2}}$  e os dados da última coluna representam a taxa de dose equivalente de uma das fontes em castelo com 1 cm de espessura de Pb, encostado no castelo. Novamente, a taxa de dose do conjunto todo a 1 cm fica em **6,4 mSv/h**, sendo que **basta que a distância ao conjunto de fontes seja cerca de 1 m e teremos uma queda de um fator 10000 em relação à última coluna da tabela anterior.**

Calculemos a dose equivalente sobre um aluno que trabalhe quatro horas com uma fonte de cobalto-60 (a mais importante em termos de dose) a uma distância  $L = 50 \text{ cm}$ : da segunda tabela temos  $\dot{H} = 0,56 \text{ mSv/h@1 cm}$ , então

$$H = \frac{\dot{H}(@1\text{cm}) \times \Delta t}{L^2} = \frac{0,56 \times 4}{50^2} \cong 10^{-3} \text{ mSv,}$$

**muito pequena**, não somente em relação ao limite anual de não-trabalhadores (5 mSv) como também em relação ao fundo natural, que vale cerca de 3 mSv anuais.

Assim, o uso e o armazenamento de **quaisquer** fontes no Laboratório Didático deve sempre levar em conta três fatores:

- **Blindagem:** as fontes devem ser sempre guardadas nos respectivos castelos de chumbo quando não estiverem em uso;
- **Distância:** qualquer trabalho envolvendo ou não as fontes radioativas deve ser feito mantendo-se o operador a uma distância segura das fontes (observe que já a 10 cm de distância a dose deve cair de um fator 100);
- **Tempo:** todo o trabalho com as fontes deve ser efetuado no menor tempo, não permanecendo fontes fora do castelo desnecessariamente.