

4. Grandezas e unidades utilizadas na caracterização da atenuação dos raios-X nos tecidos biológicos

Antes de prosseguir com o estudo dos equipamentos e das imagens obtidas através dos raios-X propriamente ditos, ir-se-á fazer algumas considerações relativas à quantificação no que respeita à dose e aos efeitos provocados pela radiação absorvida pelos tecidos aproveitando para revisitar algumas questões relacionadas com a atenuação da radiação nos tecidos biológicos, fazendo uso das grandezas agora introduzidas.

4.1 Grandezas e unidades

Seja a fluência de um feixe definida pelo número de partículas, N , (incluindo fotões) por unidade de área perpendicular ao feixe, A :

$$\Phi = \frac{N}{A}.$$

Equação 1

Se o feixe for uniforme, a sua fluência é independente da área ou do instante que se considere. No entanto, caso isto não aconteça, pode-se considerar a taxa de alteração da fluência, à qual se dá o nome de fluxo de fluência:

$$\phi = \frac{\Phi}{t} = \frac{N}{At},$$

Equação 2

onde t é a grandeza tempo.

Se o feixe for monocromático, a fluência energética, Ψ , será simplesmente o produto da fluência, Φ , pela energia de cada partícula, E :

$$\Psi = \Phi E = \frac{NE}{A}.$$

Equação 3

E , do mesmo modo, se pode definir fluxo de energia, ao qual se dá também o nome de intensidade, e que é dado por:

$$I = \frac{\Psi}{t} = \frac{\Phi E}{t} = \frac{NE}{At}.$$

Equação 4

Caso o feixe contenha várias energias, a intensidade é, então, dada por:

$$I = \frac{\Psi}{t} = \frac{\sum f_i \Phi E_i}{t},$$

Equação 5

onde f_i é a fracção de partículas com energia E_i .

Embora estas quantidades sejam relevantes para o estudo das radiações e dos seus efeitos no corpo humano, elas são difíceis de medir directamente. Por este motivo, definem-se outras grandezas como sejam a **exposição**, a **dose absorvida** e o **equivalente de dose absorvida**. No entanto, mesmo o estabelecimento destas grandezas não é muito fácil, o que se reflecte na dificuldade de encontrar unidades adequadas para as medir. Historicamente, existem duas unidades distintas para cada uma delas: as unidades tradicionais e as do Sistema Internacional.

No que respeita à exposição à radiação, admita-se, antes de mais, que praticamente toda a energia dos raios-X (ou raios γ) é utilizada para ionizar o meio. Se Q for a carga total criada por ionização quando um pequeno volume de ar de massa m é sujeito a radiação, a exposição é definida como:

$$X = \frac{Q}{m}.$$

Equação 6

Note-se que Q , sendo a carga total, contém a carga libertada tanto primária como secundariamente (mesmo que a ionização secundária tenha lugar fora do volume considerado). A unidade de exposição tradicional é o R (Röntgen) que é numericamente equivalente a uma definição já em desuso: SEU (unidade electrostática) / cm^3 de ar nas condições normais de pressão e temperatura. A sua conversão para unidades de SI é feita através da relação:

$$1\text{R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

Equação 7

Esta grandeza é apenas aplicável a fotões γ ou raios-X com menos de 3 MeV, uma vez que para energias superiores é extremamente difícil determinar o número de pares electrão / ião que se formam secundariamente fora do volume considerado.

Uma vez que para o ar, a energia média necessária para produzir um par electrão / ião é 33.85 eV, então, quando um quilograma de ar é exposto a 1 C / Kg, este absorve 33.85 J de energia, ou, generalizando, a quantidade de energia absorvida por unidade de massa de ar é dada pela relação: $E = 33.85X$.

Como os efeitos químicos e biológicos da exposição de um tecido à radiação dependem da energia absorvida por esse tecido e não da energia absorvida pelo ar, a **dose absorvida** é definida através da razão:

$$D = \frac{E_{ef}}{m}.$$

Equação 8

Em que E_{ef} é a energia total que chega ao tecido diminuída de toda a energia que sai, ou seja, é toda a energia que efectivamente fica depositada no tecido. A sua unidade é o gray (em SI)¹.

Deve, de qualquer forma, enfatizar-se que, mesmo a grandeza dose absorvida, não engloba os efeitos biológicos e, por este motivo, passou a definir-se também outras grandezas que contabilizam estes efeitos. Assim, há a considerar a eficiência biológica relativa, que é definida como a razão entre a dose de uma radiação de referência, necessária para produzir uma determinada resposta (esterilidade, por exemplo) e a dose

¹ Uma grandeza já em desuso de dose absorvida é o rad, sendo a correspondência para o gray: 1 rad = 10^{-2} J/kg ou Gy.

da radiação em questão para produzir a mesma resposta. Esta grandeza pode ter dimensões, quando é multiplicada pela dose absorvida (embora o nome da grandeza se mantenha o mesmo).

Em muitas situações, a eficiência com que uma radiação particular provoca determinado efeito químico ou biológico varia com a transferência linear de energia² da radiação. E, portanto, para considerar esta questão existe a grandeza **dose equivalente** que é o produto da dose absorvida por um factor de qualidade, QF , que varia com a transferência linear de energia e que reflecte o facto de diferentes radiações implicarem diferentes eficiências:

$$DE = D \times QF .$$

Equação 9

A unidade de dose equivalente é o sievert (Sv) em SI³.

Se à equação Equação 9 for adicionado um factor relacionado com a não-uniformidade da distribuição da radiação no corpo, DF , passa-se a ter:

$$DE = D \times QF \times DF .$$

Equação 10

Realce-se o facto de poder ainda ser acrescentados outros factores, consoante as situações consideradas.

4.2 Atenuação da radiação nos tecidos humanos

Regressando à questão das imagens radiológicas, nomeadamente, no que toca à atenuação da radiação-X, comece-se por classificar os tecidos em quatro tipos: gordura, músculo (ou tecido mole, do qual se exclui a gordura), osso e cavidades com ar. As características destes tecidos que interessam para esta discussão estão sumarizadas na Tabela 1.

Material	Nº atómico efectivo	Densidade (g/cm ³)	Densidade electrónica (e ⁻ /Kg)
Ar	7.6	1.29 x 10 ⁻³	3.01 x 10 ²⁶
Água	7.4	1.00	3.34 x 10 ²⁶
Tecido mole	7.4	1.00	3.36 x 10 ²⁶
Gordura	5.9-6.3	0.91	3.34-3.48 x 10 ²⁶
Ossos	11.6-13.8	1.65-1.85	3.00-3.19 x 10 ²⁶

Tabela 1 – Algumas características importantes na discussão da atenuação da radiação nos tecidos biológicos.

Um dos parâmetros mais utilizados para quantificar a dose absorvida pelos diversos tecidos é o chamado factor- f . Comece-se por escrever a dose absorvida por um determinado meio relativamente à do ar:

$$D_{meio} = \frac{D_{ar} [(\mu_{en})_m]_{meio}}{[(\mu_{en})_m]_{ar}}$$

Equação 11

² A transferência linear de energia é definida como a energia média perdida por unidade de comprimento do caminho percorrido pela radiação incidente.

³ Existe, uma vez mais uma unidade que já não é habitualmente usada: o rem, cuja correspondência para o sievert é: 1 Sv = 100 rem.

Onde $[(\mu_{en})_m]_{\text{meio}}$ é o coeficiente de absorção energética do meio, para fótons com energias na gama de interesse e analogamente $[(\mu_{en})_m]_{\text{ar}}$ será o equivalente para o ar.

Esta grandeza é definida com base no coeficiente de absorção de qualquer material, μ , que, por sua vez, foi já definido através da **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** Ou seja, o coeficiente de absorção energética, relaciona-se com este, através da expressão:

$$\mu_{en} = \frac{\mu E_a}{h\nu}$$

Equação 12

Em que E_a é a energia média absorvida pelo material por cada fóton incidente e $h\nu$ a energia de cada fóton. Ou seja, o coeficiente de absorção energética é igual ao produto do coeficiente de absorção pela fracção de energia que é realmente absorvida pelo material.

Então, tendo em conta que D (dose absorvida) pode ser escrita em função da exposição, X :

$$D = fX$$

Equação 13

Chama-se factor- f à proporcionalidade entre a dose absorvida, D , num meio que esteja sujeito a uma exposição X . Ou seja, o gráfico do factor- f em função da energia dos fótons (Figura 1) permite compreender o contraste obtido para diferentes tecidos. Na verdade, prova-se, matematicamente, que o factor- f relativo a um dado tecido é proporcional à razão entre a atenuação nesse tecido e a atenuação no ar e, portanto, apresenta-se como uma medida da atenuação dos tecidos. Salvedade-se que o factor- f só deve ser considerado apenas para energias inferiores a 3MeV, visto que o conceito de exposição não é aplicável a fótons de energia mais elevada.

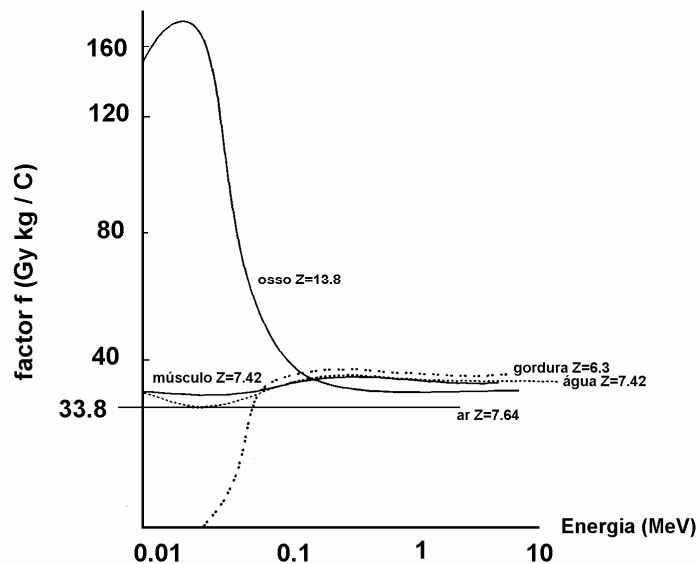


Figura 1 – Gráfico do factor f em função da energia dos fótons (adapt. W.R. Hendee, E.R. Ritenour, 1992).

A primeira questão a observar neste gráfico é o facto de o contraste entre os tecidos ser manifestamente superior para energias mais baixas.

Tal como já foi discutido numa secção anterior, os raios-X de energia inferior a 35 KeV interagem com a matéria prioritariamente através do efeito fotoeléctrico, com uma probabilidade de interacção que varia entre Z^3 e Z^4 . Ao observar a tabela anterior, verifica-se que a gordura apresenta um número atómico efectivo que é menor do que os restantes tecidos, devido à alta concentração de átomos de hidrogénio ($Z_H = 1$) e de carbono ($Z_C = 6$), quando comparada com as concentrações destes átomos nos ossos e nos músculos (que, ao serem fundamentalmente proteicos, possuem também azoto ($Z_N = 7$), oxigénio ($Z_O = 8$) e alguns iões). Deste modo, o factor- f da gordura é, para energias baixas, inferior ao dos outros tecidos. No extremo oposto, encontram-se os ossos, com uma atenuação muito elevada para baixas energias, porque possuem uma percentagem mais elevada de iões, o que lhes confere um número atómico efectivo mais elevado.

Para energias superiores, onde o efeito de Compton é primordial, sendo este directamente proporcional à densidade electrónica mássica, a gordura apresenta um factor- f mais elevado do que os outros tecidos, devido à elevada percentagem de átomos de hidrogénio (a gordura tem cerca de 11% de hidrogénio, 57% de carbono, $\approx 1\%$ de átomos de azoto, 30% de oxigénio e menos de 1% de elementos de traço com n° atómico elevado), o que implica uma elevada densidade de electrões. Repare-se que, a este respeito, os átomos de hidrogénio apresentam uma densidade electrónica elevada (cerca de duas vezes superior à dos outros átomos), visto que não possuem neutrões no seu núcleo. No que toca à construção de fantasmas, o material que, habitualmente é utilizado para modelar a gordura é o óleo mineral ou o polietileno, uma vez que são substâncias com um número atómico efectivo, densidade mássica e densidade electrónica semelhantes à gordura.

Quanto ao comportamento dos tecidos moles e dos fluidos do corpo no que respeita à atenuação dos raios-X, este é muito semelhante ao da água, uma vez que é o seu constituinte mais abundante. Aliás, também o tecido muscular tem um comportamento muito semelhante ao da água, graças à proximidade dos seus números atómicos efectivos e às suas densidades mássicas.

Observe-se que devido à alta absorção dos tecidos ósseos para baixas energias, a dose absorvida pelos tecidos moles que estão atrás dos ossos, é menor. Por este motivo, os ossos funcionam, muitas vezes, como *máscara* dos tecidos moles. Este efeito é diminuído quando se utiliza raios-X de mais alta energia, uma vez que, para fotões de energia mais elevada, o factor- f dos ossos é semelhante ao dos tecidos moles e, portanto, quando se pretende obter informação sobre tecidos que estejam naturalmente tapados por ossos, utiliza-se raios-X de maior energia.

Por outro lado, quando se pretende radiografar tecidos que tenham uma densidade mássica semelhante, mas difiram no número atómico, é aconselhável utilizar energias mais baixas, uma vez que nestas circunstâncias, é o efeito fotoeléctrico que domina e este é, maioritariamente, governado pelo número atómico da substância. Nas mamografias, por exemplo, a energia dos fotões utilizados é baixa, para minorar os efeitos nocivos nos tecidos, porque esta é a melhor gama de energias para detectar microcalcificações que podem indiciar a presença de tumores mamários e porque permite distinguir com melhor clareza a gordura do tecido glandular.

Por fim, refira-se que existem agentes de contraste em radiografia que aumentam localmente o número atómico, de modo que molharam o contraste. Para este efeito são utilizados elementos como o bário e o iodo.