

**FRAÇÃO ABSORVIDA ESPECÍFICA NO TECIDO ÓSSEO E MEDULA ÓSSEA
RESULTANTE DE FÔTONS DISTRIBUÍDOS NO ESQUELETO**

Goro Hiramoto

**DISSERTAÇÃO E TESE - IPEN 3
IPEN - DT - 3**

DEZEMBRO/1979

CONSELHO DELIBERATIVO

MEMBROS

Dr. Luiz Cintra do Prado – Presidente
Dr. Edgardo Azavedo Soares Júnior – Vice-Presidente

CONSELHEIROS

Dr. Hécio Modesto da Costa
Dr. Ivano Humbert Marchesi
Dr. Admar Cervellini
Dr. Waldyr Muniz Oliva

REPRESENTANTES

Dr. Jacob Charcot Pereira Rios
Dr. Paolo Enrico Maria Zaghen

SUPERINTENDENTE

Hernani Augusto Lopes de Amorim

**FRAÇÃO ABSORVIDA ESPECÍFICA NO TECIDO ÓSSEO E MEDULA ÓSSEA
RESULTANTE DE FÓTONS DISTRIBUÍDOS NO ESQUELETO**

Goro Hiromoto

**Dissertação para obtenção do Título de "Mestre –
Área Tecnologia Nuclear" – Orientador Dr. Gian-Maria
A. A. Sordi. Apresentada e defendida em 11 de abril de
1979, no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.**

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
SÃO PAULO - BRASIL**

Série DISSERTAÇÃO E TESE IPEN

INIS Categories and Descriptors

C55

Bone marrow

Phantoms

Internal irradiation

Gamma dosimetry

Monte Carlo method

Mathematical models

A codes

Computer calculations

SUMÁRIO

	Página
I – INTRODUÇÃO	1
1 – Fins e Meios da Proteção Radiológica	1
2 – Homem Referência	3
3 – Modelo Matemático do Homem	4
4 – Objetivos deste Trabalho	7
II – ESTRUTURA E RADIOSENSIBILIDADE DOS TECIDOS DO OSSO	10
1 – Estrutura Ossea	10
1.1 – Medula Óssea	10
1.2 – Tecido Ósseo	12
1.2.1 – Células do Tecido Ósseo	12
1.2.2 – Substância Intersticial	12
1.3 – Formação e Organização do Tecido Ósseo	13
1.4 – Dimensões Estruturais	13
1.4.1 – Tecido Ósseo Cortical e Trabecular	13
1.4.2 – Cavidades Medulares	16
2 – Radiossensibilidade dos Tecidos do Osso	16
2.1 – Células Osteogênicas	16
2.2 – Células Hematopoéticas da Medula	17
2.3 – Células Epiteliais Localizadas Junto às Superfícies Ósseas	17
3 – Locais de Deposição dos Radiosótopos no Esqueleto	17
III – FORMALISMO PARA O CÁLCULO DE DOSE INTERNA	18
1 – Fração Absorvida Específica	18
2 – Cálculo da Dose Equivalente	20
3 – Aditividade da Função S	20
IV – DESCRIÇÃO DO PROGRAMA ORIGINAL ALGAM 97	23
1 – Aplicação da Técnica de Monte Carlo	23
2 – Diagrama Esquemático do Algam 97	25
3 – Cômputo da Dose no Esqueleto	25
4 – Estatística	30

	Página
V – ALGAM 108: O PROGRAMA MODIFICADO	31
1 – Desenvolvimento da Sub-Rotina Source	31
2 – Modificações Introduzidas no Programa Original	32
VI – RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
1 – Resultados	37
2 – Discussão	37
2.1 – Dependência da Fração Absorvida Específica com a Energia do Fóton	37
2.2 – Comparação com o Modelo Antigo	47
2.3 – Exatidão dos Resultados	47
APÊNDICE I	50
APÊNDICE II	52
APÊNDICE III	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

FRAÇÃO ABSORVIDA ESPECÍFICA NO TECIDO ÓSSEO E MEDULA ÓSSEA RESULTANTE DE FÓTONS DISTRIBUIDOS NO ESQUELETO

Goro Hiromoto

RESUMO

Existe um código de computador, o "ALGAM: Monte Carlo estimation of internal dose from gamma-ray sources in a phantom man", que efetua o cálculo da fração absorvida específica em 97 regiões do corpo humano, resultante de fontes de radiação gama monoenergética uniformemente distribuídas em qualquer uma destas 97 regiões.

Desenvolveu-se um método para modificar o programa no sentido de possibilitar a estimativa da fração absorvida específica no tecido ósseo e na medula óssea, separadamente, visto que, no modelo atual do homem, o esqueleto é considerado como um meio homogêneo.

O novo programa foi processado para três órgãos fonte: esqueleto, medula hematopoética e medula adiposa, para 12 energias distintas do fóton, de 10 KeV a 4 MeV.

Os resultados obtidos mostram que, em baixas energias, o modelo antigo superestima a fração absorvida específica na medula óssea por um fator até 4 e a subestima no tecido ósseo por um fator até 1,6.

1 - INTRODUÇÃO

Se a busca de conforto e bem-estar sempre acompanhou o homem desde os primórdios de sua evolução, é verdade que essas conquistas só se tornaram possíveis à custa de certos riscos voluntariamente assumidos pela sociedade. É dentro desse contexto histórico que deve ser abordada a utilização pacífica da energia atômica, pois, muito embora se saiba que as radiações ionizantes podem provocar certos detrimientos biológicos, é inegável que, com seu emprego, abriram-se novos horizontes em quase todos os quadrantes da atividade humana.

Especialmente durante os últimos 30 anos os riscos causados pela disseminação de fontes artificiais de radiação têm gerado uma crescente preocupação, não somente entre o público em geral como também no meio científico, o que levou a indústria nuclear a se tornar uma das mais seguras, sob o ponto de vista de proteção ao indivíduo e ao meio ambiente, entre as modernas indústrias. Não se justifica, portanto, o temor às radiações que ainda persiste em quase todos os segmentos da população, principalmente se estabelecermos um paralelo ao fato de que se aceita o convívio cotidiano com outras formas de agentes potencialmente mutagênicos ou carcinogênicos.

1 - Fins e Meios da Proteção Radiológica^(6,8,17,28,29,32,33,45)

A prevenção e o controle dos perigos da radiação tornaram-se possíveis graças ao desenvolvimento e à prática da proteção radiológica, especialmente a partir da década de 40.

Aprovada para publicação em Abril/1979.

Nota: A redação, ortografia, conceitos e revisão final são de responsabilidade do Autor.

A proteção radiológica tem como objetivo primário proteger o indivíduo e a espécie humana contra os efeitos biológicos nocivos das radiações ionizantes, mantendo as exposições tão baixas quanto razoavelmente alcançáveis, sem no entanto privar o homem dos benefícios advindos de seu emprego.

Para alcançá-lo, é necessário compreender os mecanismos envolvidos nos vários estádios de evolução dos danos biológicos induzidos^(4,47), desenvolver técnicas adequadas de medidas da radiação e determinar níveis aceitáveis de exposição.

O que se poderia considerar, entretanto, como nível aceitável de exposição?

A tentativa de se estabelecer esses níveis⁽³⁰⁾ data da descoberta dos raios-X, em fins do século XIX, quando os primeiros efeitos nocivos provocados pela radiação se fizeram observar; não havia, entretanto, uma grandeza aceitável com a qual se pudesse medi-la. Nos anos iniciais do emprego da radiação como fonte artificial foram utilizados parâmetros biológicos como referência para a fixação dos níveis de exposição aceitáveis; o eritema foi um dos primeiros efeitos somáticos observados e a quantidade de radiação tolerável era definida como sendo 1/10 daquela necessária para provocar tal efeito.

A filosofia era a de que se poderia determinar uma dose limiar abaixo da qual não ocorreria nenhum dano biológico ao indivíduo exposto.

A extrapolação de resultados a partir de experiências efetuadas com altas doses parecia entretanto indicar que, pelo menos no caso dos efeitos hereditários da radiação, não havia uma dose que se pudesse considerar como limiar; passou-se então a admitir que qualquer dose de radiação poderia ser acompanhada por algum efeito deletério no indivíduo exposto ou nas gerações futuras. Alterou-se, desta forma, a filosofia adotada para a determinação dos padrões de proteção radiológica; ao invés de se tomar como base o conceito de dose limiar, passou-se a considerar como permissível a dose abaixo da qual o dano biológico seria aceitável, particularmente à luz dos benefícios derivados do uso da radiação.

No sistema atual de limitação de doses busca-se uma interpretação mais objetiva daquilo que possa ser considerado como risco aceitável. Recomenda-se que as doses sejam mantidas tão baixas quanto praticáveis, levando-se em consideração aspectos econômicos e sociais. Isto significa que toda operação que envolve certo risco de exposição deve ser justificável por meio de uma análise de custo-benefício.

Entende-se por benefício "tanto aqueles que podem ser especificamente identificados e, ao menos teoricamente, sujeitos a quantificação em termos monetários ou em outra unidade apropriada, como aqueles intangíveis, isto é, aqueles que contribuem reconhecidamente para a satisfação humana, embora não sujeitos a uma quantificação formal"⁽¹⁷⁾. Os custos são definidos, de um modo geral, "como a soma total de todos os aspectos negativos de uma dada operação, incluindo os valores de todos os bens e serviços usados na construção, operação, manutenção, inspeção, substituição e limitação da atividade proposta e todos os outros gastos, perdas, compromissos e efeitos adversos induzidos, tanto tangíveis como intangíveis, incluindo o detrimento à saúde e ao meio ambiente e todos os efeitos que contribuem para a infelicidade do homem"⁽¹⁷⁾.

É prática atual da proteção radiológica a aplicação de uma análise simplificada de custo-benefício, por meio da equação:

$$B = V - (P + X + Y),$$

onde

B = benefício líquido de uma dada operação

V = benefício da produção

P = custo básico da produção

X = custo para se atingir o nível de segurança selecionado

Y = detrimento biológico total envolvido na produção, uso e disposição do produto.

Para que uma dada operação seja justificável, o benefício líquido deve ser positivo e, para que as exposições sejam mantidas tão baixas quanto razoavelmente alcançáveis, a equação deve ser otimizada por um processo de análise diferencial que torne máximo o benefício líquido.

Embora a principal preocupação da proteção radiológica esteja voltada às atividades envolvendo exposições de seres humanos, a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP) entende que, ao se proteger o homem adequadamente, outras espécies de vida estarão também suficientemente protegidas, ainda que não necessariamente cada um de seus membros tomados individualmente.

A implementação efetiva destes padrões de proteção radiológica requer a aplicação de unidades adequadas de radiação, a partir de conceitos que definam de modo claro e inequívoco as grandezas a serem quantificadas, bem como o desenvolvimento das técnicas que tornem possíveis tais medidas.

As principais quantidades e unidades de radiação utilizadas em proteção radiológica estão definidas no apêndice I.

As medidas de dose decorrente de exposições externas, isto é, radiações que se originam de fontes situadas fora do corpo, podem ser feitas com relativa facilidade e exatidão pois requerem apenas especificações básicas sobre o indivíduo exposto; na maioria dos casos, dados referentes à massa, dimensão e composição química dos órgãos e tecidos são suficientes. As medidas podem ser feitas por dosímetros pessoais apropriados a cada campo de radiação — filmes fotográficos, cristais termoluminescentes ou radiofotoluminescentes, câmaras de ionização — ou estimadas pelo mapeamento dos níveis de radiação nas áreas de trabalho⁽²⁰⁾.

As exposições internas⁽³⁸⁾ têm origem quando o corpo é contaminado com um radioisótopo, interna ou externamente. Quando a contaminação for interna, o indivíduo continua a sofrer a irradiação mesmo após abandonar o local no qual foi contaminado, por um espaço de tempo proporcional à meia-vida efetiva* do radioisótopo, o que torna importante a adoção de medidas preventivas para se evitar a incorporação de materiais radioativos, quer por inalação, ingestão ou através da pele.

Uma vez incorporado, no entanto, pode-se estimar a dose em cada órgão irradiado se for conhecida sua concentração inicial no meio ambiente e uma série de parâmetros biológicos do homem que podem influenciar de modo significativo no cálculo destas doses, como por exemplo a massa, volume, densidade e forma geométrica dos órgãos irradiados, funções de excreção do organismo e quantidades diárias de água ingerida ou ar inalado.

Esses parâmetros são necessários não somente para a estimativa de dose decorrente de incorporação de radioelementos, pelas vias citadas ou por administração de medicamentos, como também para a determinação dos limites permissíveis de concentração de radioisótopos no ar e na água.

2 – Homem Referência

A padronização dos parâmetros biológicos, ou seja, o estabelecimento de um conjunto de dados que possa ser tomado como referência, torna possível comparar as estimativas de dose efetuadas por

(*) Meia-vida efetiva de um radioisótopo, em um determinado órgão, é o tempo necessário para que sua atividade seja reduzida à metade do valor inicial, levando-se em consideração o decaimento radioativo e a eliminação biológica.

diferentes pesquisadores, sem que haja necessidade de uma exaustiva enumeração dos valores assumidos em cada caso.

Assim é que surgiu a idéia do *homem referência*, formalmente apresentado e adotado pela primeira vez em 1949. Após sucessivas modificações para acréscimo e revisão de dados, chegou-se ao modelo de 1953, que serviu de base para as recomendações das doses máximas permissíveis para radiação interna, formuladas pela ICRP em 1959⁽¹³⁾.

Em 1963 foi formado um grupo de trabalho⁽¹⁸⁾ da ICRP especialmente para: (1) revisar as características do *homem referência*, tomando-se por base um trabalhador ocupacional típico, e (2) estender seu conceito de modo a fornecer uma indicação do grau de variação individual existente em relação ao padrão adotado, incluindo dependência com idade, sexo, hábito ou outros fatores que pudessem ser considerados na estimativa de dose para os indivíduos do público.

Definiu-se o *homem referência* com as características de um indivíduo entre 20 e 30 anos de idade, 1,70 metros de altura, 70 Kg de massa e habitante num clima de temperatura média entre 10 e 20°C; tal descrição corresponde às populações norte-americana, do oeste europeu e do Cáucaso. Estas regiões foram tomadas por base unicamente porque os dados necessários ao estabelecimento de todas as demais características levantadas eram mais familiares aos membros do grupo da ICRP, e porque era impraticável um estudo similar que se estendesse a outros continentes; na realidade esse fato é de importância secundária, considerando-se que o *homem referência* é apenas um indivíduo hipotético. Caberia às organizações responsáveis de cada país ou região determinar as modificações apropriadas no modelo, de tal modo a satisfazer as características de cada população em particular.

Vários dados do homem foram omitidos, por não estarem diretamente relacionados com o cálculo de doses. Essencialmente, padronizaram-se dados referentes às massas, dimensões e características físicas em termos de órgãos e tecidos biológicos, composições elementares dos tecidos e do corpo todo, além de dados referentes à incorporação e excreção diárias.

Recomenda-se, por conseguinte, que o termo *homem referência* seja usado quando o contexto em questão indicar claramente que se trata de uma área de atuação específica da proteção radiológica; caso contrário, deverá ser usado o termo "*homem referência para fins de proteção radiológica*".

A definição de um padrão de referência é de extrema utilidade para estimativas rotineiras de dose onde os níveis de exposição são suficientemente baixos de modo a permitir que as diferenças individuais comumente existentes possam ser ignoradas. Quando, porém, for preciso estimar com maior precisão a dose recebida por um dado indivíduo, basta que se faça um ajuste conveniente nos resultados já obtidos para o *homem referência*.

3 – Modelo Matemático do Homem

Para o cálculo de doses internas, idealizou-se um modelo matemático do homem onde o corpo total e seus principais órgãos são descritos em termos de expressões matemáticas, tomando-se como base os dados contidos no *homem referência*. O "*phantom*"* pode ser utilizado tanto para estimativas teóricas de dose como para a obtenção de dados experimentais por meio da construção física do modelo.

Exteriormente, o *phantom* atual (Figura 1) tem aproximadamente a forma adulta do corpo humano, sendo formado de três secções principais:

- 1) um cilindro elíptico representando a região do pescoço e a parte inferior da cabeça, acrescido de uma semi-elipsóide.

(*) "*Phanton*" optamos pela conservação do termo em inglês na ausência de um vocábulo correspondente no nosso idioma que estivesse consagrado pelo consenso geral.

- 2) um cilindro elíptico representando os braços, o torso e os quadris.
- 3) dois cones circulares truncados representando as pernas e os pés, associadas a uma pequena região plana frontal delimitando a região genital.

Os detalhes menos significantes, sob o ponto de vista geométrico, como os pés, dedos, orelhas, queixo e nariz, são omitidos por contribuírem somente com uma pequena parcela ao espalhamento dos fótons.

O sistema de coordenadas tem sua origem localizada no centro da base do tronco e todas as dimensões são dadas em centímetro.

- 1) A secção da cabeça é um cilindro elíptico sólido acrescido de uma meia elipsoide sólido, dados por:

$$\left(\frac{x}{7}\right)^2 + \left(\frac{y}{10}\right)^2 \leq 1, \quad 70 \leq z \leq 85,5 \quad \text{e}$$

$$\left(\frac{x}{7}\right)^2 + \left(\frac{y}{10}\right)^2 + \left(\frac{z-85,5}{8,5}\right)^2 \leq 1, \quad 85,5 \leq z \leq 94$$

O volume total é de 4655 cm³ e a massa, 5083 g.

- 2) O tronco é um cilindro elíptico sólido dado por:

$$\left(\frac{x}{20}\right)^2 + \left(\frac{y}{10}\right)^2 \leq 1, \quad 0 \leq z \leq 70$$

sendo incluídos também os braços e os quadris. O volume do tronco é de 43982 cm³ e a massa, 42701 g.

- 3) Os membros inferiores são dois cones circulares sólidos dados por:

$$x^2 + y^2 \leq \pm x \left(20 + \frac{z}{5}\right), \quad -80 \leq z \leq 0,$$

onde o sinal positivo define a perna esquerda e o sinal negativo, a direita. O volume total de ambas as pernas é de 20776 cm³ e a massa, 21901 g.

- 4) A região genital masculina é dada por:

$$4,8 \leq z \leq 0, \quad -\left(10 + \frac{z}{10}\right) \leq x \leq \left(10 + \frac{z}{10}\right),$$

$$\left(10 + \frac{z}{10}\right) \leq y \leq 0 \quad \text{e} \quad \left[x \pm \left(10 + \frac{z}{10}\right)\right]^2 + y^2 \geq \left(10 + \frac{z}{10}\right)^2$$

O volume total da região genital é de 196,3 cm³ e a massa, 193,7 g.

O *phantom* é ainda subdividido em 101 regiões geométricas. No tronco essas regiões são formadas pelos planos $z = 0, 14, 28, 42, 56$ e 70 , planos $x = \pm y$ e cilindros elípticos concêntricos dados por:

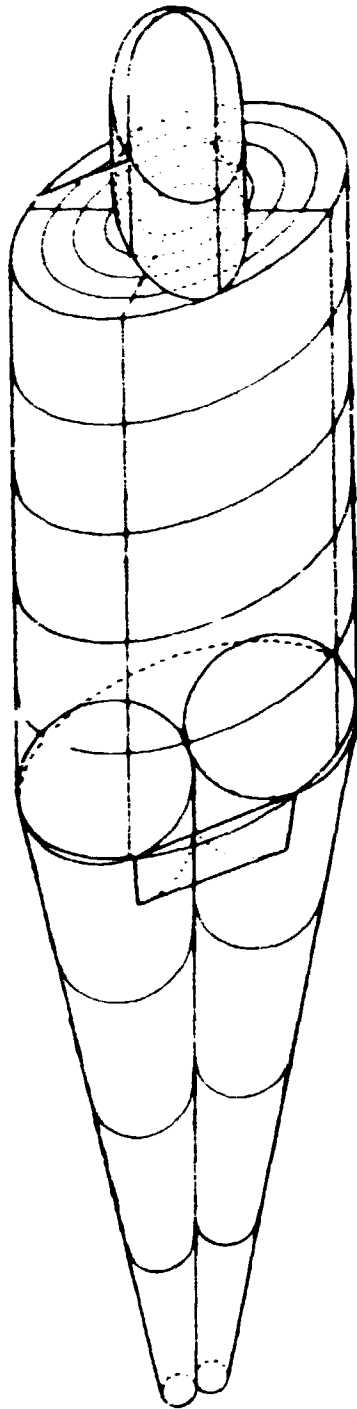


Figura 1 -- *Phantom* atual do homem adulto

$$\left(\frac{x}{20}\right)^2 + \left(\frac{y}{10}\right)^2 = \rho^2, \quad \text{onde } \rho = 0,2, 0,4, 0,6 \text{ e } 0,8$$

As pernas são subdivididas em regiões pelos planos $z = 20, 40, 60$ e 80 . A cabeça, em 8 regiões definidas por $x = \pm y, 70 \leq z \leq 82$ e $82 \leq z \leq 94$.

De modo análogo, os principais órgãos internos (Figura 2) são representados aproximando-os a figuras geométricas mais simples possíveis^(39,40), consistentes com as dimensões, forma e posição real de cada órgão no corpo.

A simplificação das expressões que descrevem os órgãos é importante a medida que é necessário minimizar o tempo de computação gasto no cálculo das doses absorvidas, quando o mesmo é efetuado, por exemplo, pelo método de Monte Carlo ou pelo método do fator de "build-up"⁽⁴⁰⁾.

A descrição matemática dos órgãos internos considerados é apresentada no apêndice II.

Quanto à composição elementar do *phantom*, considera-se que seja formado essencialmente por apenas três tipos de tecidos: tecido pulmonar, tecido do esqueleto e o restante, genericamente denominado tecido mole.

A composição química do pulmão difere de outros órgãos em virtude da ausência quase total de gordura e a presença de uma quantidade percentual maior de sangue. O esqueleto inclui o tecido ósseo, a medula óssea e outros componentes orgânicos, como cartilagem e tecido periarticular.

Cada uma destas três regiões são consideradas homogêneas tanto em composição química como em densidade (Tabela I).

Procura-se atualmente aperfeiçoar esse modelo matemático do *homem referência*, buscando uma representação mais realística da posição, forma e composição de vários órgãos⁽⁴⁶⁾. As variações individuais existentes entre o padrão adotado, típico de um trabalhador ocupacional, e os indivíduos do público, levaram ao desenvolvimento de modelos matemáticos de referência análogos para a criança⁽¹⁰⁾ e o feto⁽³⁵⁾.

4 – Objetivos deste Trabalho

Existe um código de computador, desenvolvido no Laboratório Nacional de Oak Ridge que, utilizando o método de Monte Carlo e baseado no modelo anteriormente descrito, efetua o cálculo da fração de energia absorvida nos vários órgãos do corpo resultante de uma distribuição interna de fótons.

O programa fornece a estimativa da fração de energia média absorvida no esqueleto, uma vez que não há um modelo realístico, no *phantom* atual, que distinga o tecido ósseo da medula óssea.

O que se pretende, neste trabalho, é introduzir determinadas modificações no código citado, de modo a permitir estimativa da fração absorvida no tecido ósseo e na medula, distintamente.

O interesse em tornar o esqueleto heterogêneo é justificável considerando-se que a medula óssea hematopoética e o tecido ósseo, por possuírem diferentes radiosensibilidades, contribuem com pesos diferentes para a avaliação do detrimento total que uma irradiação provoca em um indivíduo exposto.

Essa justificativa pode se tornar mais clara atentado-se à nova filosofia adotada pela ICRP em relação ao sistema de limitação de doses.

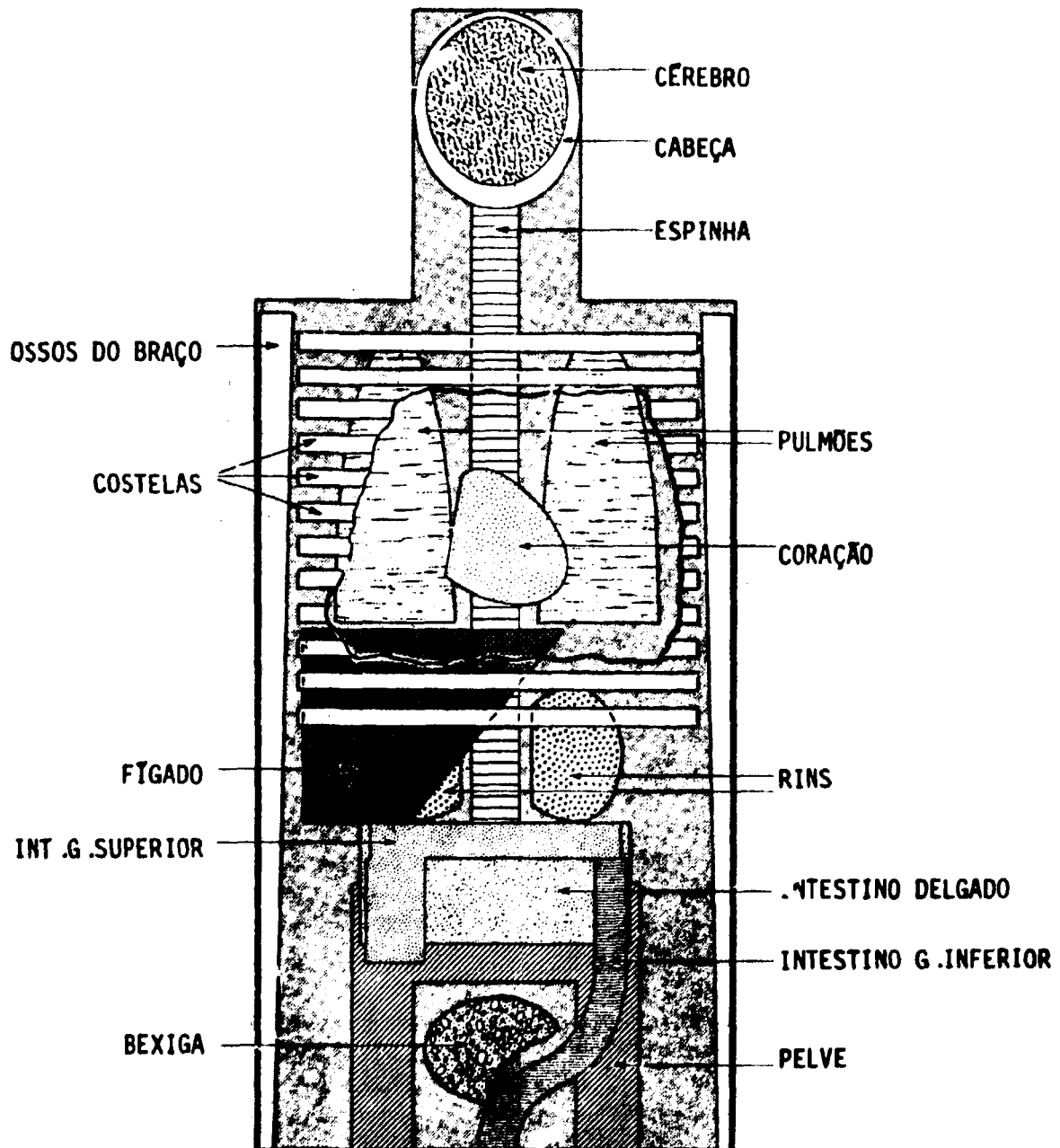


Figura 2 -- Vista anterior dos principais órgãos representados no *phantom*

Tabela 1

Composição Elementar dos Diferentes Tecidos do *Phantom* (% por Massa)

Elemento	Tecido do Esqueleto ¹	Tecido Pulmonar ²	Tecido Mole ³
H	7.04	10.21	10.47
C	22.79	10.01	23.02
N	3.87	2.80	2.34
O	48.56	75.96	63.21
Na	0.32	0.19	0.13
Mg	0.11	7.4×10^{-3}	0.015
P	6.94	0.081	0.24
S	0.17	0.23	0.22
Cl	0.14	0.27	0.14
K	0.15	0.20	0.21
Ca	9.91	7.0×10^{-3}	0
Fe	8.0×10^{-3}	0.037	6.3×10^{-3}
Zn	4.8×10^{-3}	1.1×10^{-3}	3.2×10^{-3}
Rb	0	3.7×10^{-4}	5.7×10^{-4}
Sr	3.2×10^{-3}	5.9×10^{-6}	3.4×10^{-5}
Zr	0	0	8.0×10^{-4}
Pb	1.1×10^{-3}	4.1×10^{-5}	1.6×10^{-5}

¹ Densidade: 1,4862 g/cm³² Densidade: 0,2958 g/cm³³ Densidade: 0,9869 g/cm³

Segundo essas recomendações⁽¹⁹⁾, o dano biológico deve ser quantificado em termos do homem como um todo, ou seja, pela somatória dos detrimientos individuais de cada tecido afetado, de acordo com sua radiosensibilidade. Para tanto, atribuem-se fatores de peso a um certo número de órgãos e tecidos – considerados em virtude de sua susceptibilidade à radiação, da severidade dos danos induzidos e da possibilidade de tratamento adequado – proporcionais à importância relativa de seus detrimientos em relação ao dano total assumido quando o corpo todo é irradiado uniformemente.

Para a avaliação do risco total, à medula óssea hematopoética é atribuído um fator de peso relativo de 0,12 e ao tecido ósseo, 0,03*.

Tendo por agente a radiação, o dano na medula óssea é o principal responsável pela indução de leucemia, enquanto que as células endosteais e epiteliais localizadas nas superfícies ósseas são as responsáveis pela indução do câncer ósseo.

Os fatores de risco considerados para a indução de leucemia e de câncer ósseo, para fins de proteção radiológica, são de $2 \times 10^{-3} \text{ Sv}^{-1}$ ($2 \times 10^{-5} \text{ rem}^{-1}$) e $5 \times 10^{-4} \text{ Sv}^{-1}$ ($5 \times 10^{-6} \text{ rem}^{-1}$), respectivamente.

(*) Pelas recomendações anteriores da ICRP⁽¹⁴⁾, ou pelas normas de proteção radiológica vigentes no Brasil⁽⁹⁾, as doses máximas permissíveis anuais na medula óssea hematopoética e no tecido ósseo são, respectivamente, 5 rem (50 mSv) e 30 rem (300 mSv), considerando-se ainda o conceito de órgão crítico.

II – ESTRUTURA E RADIOSENSIBILIDADE DOS TECIDOS DO OSSO

Neste capítulo procuramos estudar certos aspectos de interesse dosimétrico relacionados à estrutura óssea, identificar e localizar as células mais radiosensíveis do esqueleto e indicar os locais preferenciais de deposição dos radionuclídeos que, eventualmente, possam ser incorporados ao osso.

1 – Estrutura Óssea^(2,11,27,42,50)

Macroscopicamente, dois tipos de estrutura óssea podem ser prontamente distintos: tecido ósseo cortical, de aparência quase uniforme, e tecido ósseo esponjoso, formado por uma rede de trabéculas e cavidades nas quais está contida a medula óssea.

A Figura 3 mostra um corte sagital de parte da tíbia humana, para ilustrar sua estrutura anatômica principal. As extremidades do osso, as epífises, estão separadas do corpo, ou diáfise, por uma estrutura denominada cartilagem epifisial que se ossifica somente quando o crescimento total do osso tiver sido atingido. A região logo abaixo da cartilagem epifisial, denominada metáfise, é uma zona de grande atividade no crescimento ósseo. A parede da diáfise, ou córtex, é composta de porção óssea bastante densa, geralmente lisa na superfície externa e que termina por juntar-se à estrutura esponjosa de seu interior. Há pouca substância óssea esponjosa dentro da maior parte do comprimento do osso, mas em direção a cada extremidade, onde a estrutura tubular alonga-se na metáfise, todo o interior é composto por uma rede de trabéculas. Essa rede forma os espaços trabeculares nos quais se localizam a medula hematopoética e, às vezes, a medula adiposa. Há uma fina membrana externa que cobre o osso, o periosteio, e um revestimento interno de células, o endosteio, ligado ao tecido conectivo livre da medula; ambas as estruturas estão associadas com o crescimento e reelaboração do osso. Uma ou mais artérias nutrientes penetram na parte tubular do osso para levar o suprimento sanguíneo à medula e, por ramificações radiais, suprir o córtex; vasos sanguíneos periosteais alimentam as partes externas do córtex, enquanto que uma artéria separada nutre a epífise.

Desde que o tecido ósseo se constitui essencialmente de tecido mole impregnado em uma matriz calcificada, o crescimento intersticial por simples divisões celulares não é possível. Por conseguinte, o osso cresce por processos de remodelação nos quais tecidos são adicionados (aposição) e outros removidos (ressorção). Os processos de aposição e ressorção, embora sejam contínuos tanto no tecido cortical como no esponjoso, não alteram necessariamente a massa total do esqueleto. Durante o período de maior crescimento do osso, os sítios mais ativos são constituídos pela região da cartilagem epifisial, especialmente no crescimento longitudinal, e pelas superfícies periosteal e parte da endosteal, no crescimento em espessura e diâmetro do osso. Mesmo no período de crescimento mais ativo, a aposição em um sítio é sempre acompanhada por ressorção em outro, para que a forma característica do osso seja mantida.

Outros ossos do corpo podem ser descritos, fundamentalmente, nos mesmos termos, sendo que a principal variação ocorre nas dimensões da espessura da camada cortical.

1.1 – Medula Óssea^(11,22)

No sentido macroscópico, distinguem-se dois tipos fundamentais de medula óssea: a vermelha ou hematopoética e a amarela ou adiposa.

A medula vermelha, ou ativa, deve a intensa coloração vermelha à sua rica vascularização e se distingue, funcionalmente, pela pronunciada atividade hematopoética. A medula amarela, ou adiposa, pouco vascularizada, é inativa; é, porém, capaz de transformar-se em ativa, se as circunstâncias assim o exigirem.

A medula óssea assume importância funcional, como órgão hematopoético, a partir do sétimo

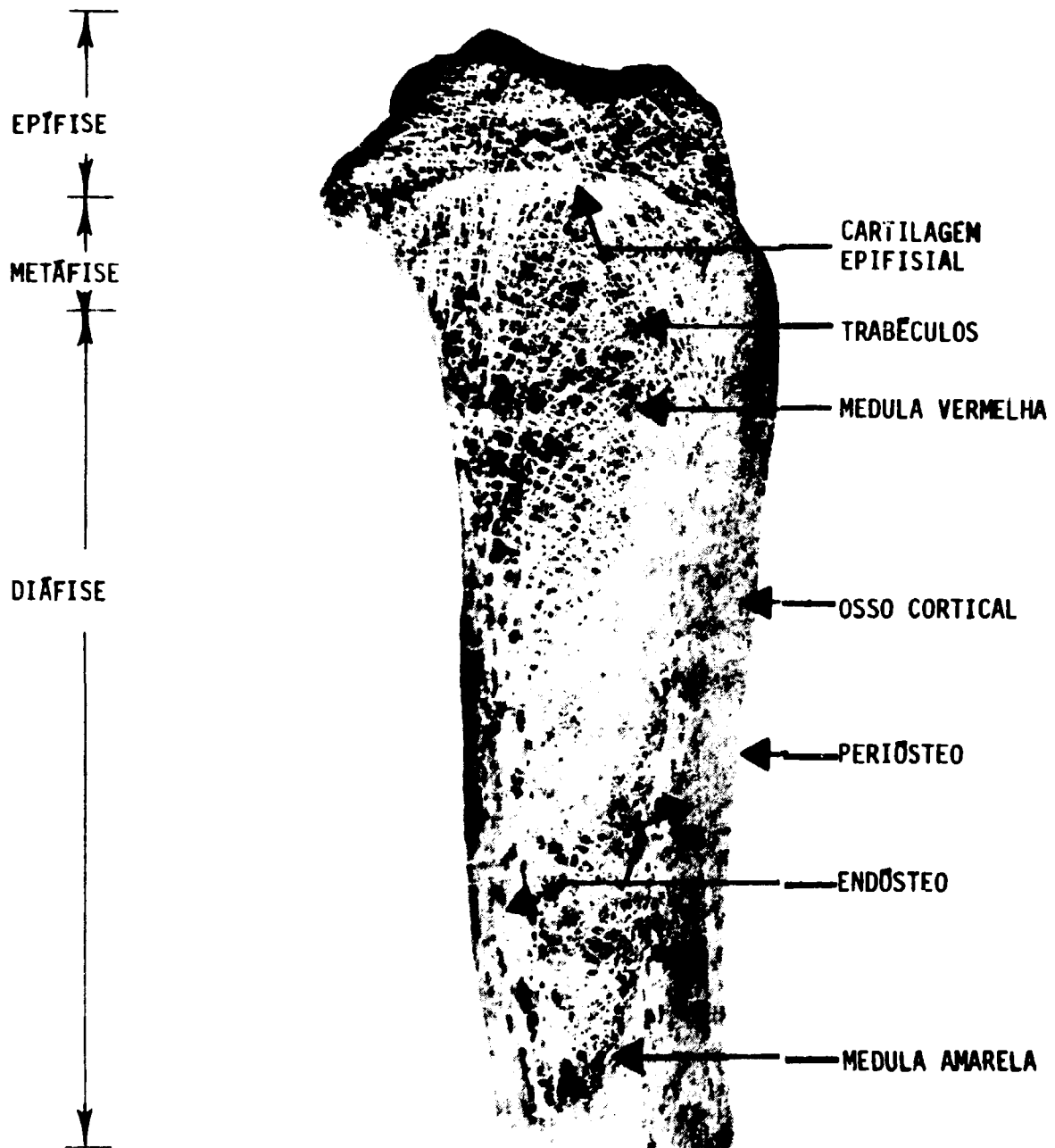


Figura 3 – Secção sagital da parte superior da tíbia humana (Spiers⁴²)

mês de vida intra-uterina. Depois do nascimento, até três ou quatro anos de idade, a medula óssea de todos os ossos do esqueleto contém medula vermelha.

A partir de então, inicia-se um processo de involução, quando grande parte da medula hematopoética transforma-se em medula adiposa. Dos dez aos vinte anos, a medula vermelha desaparece da diáfise dos ossos longos, restando somente, em pequena quantidade, nas extremidades proximais do fêmur e do úmero. No adulto normal, a medula vermelha ocupa somente os ossos do crânio, do tórax, os ossos vertebrais e os ossos da pelve. Depois dos sessenta anos, aproximadamente metade da porção medular das costelas e do esterno é formada de medula adiposa.

O processo de involução sofrido pela medula óssea efetua-se da periferia para o centro, dos membros para o tronco e das extremidades distais às proximais.

Este processo é reversível, isto é, se as condições o exigirem, a medula amarela pode se transformar em medula ativa, seguindo o caminho exatamente inverso do processo involutivo, do centro para a periferia.

1.2 – Tecido Ósseo

1.2.1 – Células do Tecido Ósseo

As componentes celulares do tecido ósseo estão associadas a três funções específicas: os osteoblastos com a formação do osso, os osteocitos com a manutenção do osso como um tecido vivo, e os osteoclastos com a resorção do tecido ósseo. Essas células têm a mesma ascendência e estão intimamente relacionadas entre si. Durante a fase mais ativa de crescimento do osso, é freqüente a transformação de uma espécie para outra, enquanto mantêm o potencial em comum das três formas. A morfologia de uma célula em particular depende da função que ela desempenha a um determinado momento. A transformação de um tipo a outro, que se processa de modo espontâneo e mais freqüentemente nos ossos em desenvolvimento, pode ser demonstrada no osso adulto sob certas condições específicas; o mais notável exemplo dessa capacidade das células de assumirem diferentes respostas pode ser verificado na cura de fraturas ósseas.

Os osteoblastos, quando ativos, têm forma cuboidal, medem 15 a 20 μm e apresentam o citoplasma rico em ácido ribonucleico. Essas características se tornam menos acentuadas ou irreconhecíveis quando o osso está no estado não ativo; adquirem então forma alongada e transformam-se em células do tecido conjuntivo. Os osteoblastos ativos são encontrados nas superfícies ósseas em crescimento e são os responsáveis pela secreção dos produtos que, ao se calcificarem, formam a substância intersticial.

Os osteocitos são formas mais maduras de osteoblastos. As células encontram-se agora em pequenas lacunas e têm 10 a 20 μm de diâmetro. As lacunas são conectadas entre si pelos canalículos, através dos quais se processa a circulação dos fluidos intersticiais.

Os osteoclastos são células gigantes com um número variável de núcleos, muitas vezes 15 a 20. Podem se originar das células estromais da medula óssea ou, às vezes, da fusão de osteoblastos e osteocitos presentes nas regiões em resorção. São encontrados nas superfícies endosteais de ossos em crescimento diametral ou nas superfícies periosteais de ossos que, durante o crescimento, estão mudando de forma.

1.2.2 – Substância Intersticial

A porção intercelular do tecido ósseo é uma substância colágena calcificada. A substância intersticial inclui a matriz orgânica, a parte inorgânica ou mineral e água.

A matriz orgânica tem dois componentes principais: as fibras colágenas e a substância fundamental. O colágeno é uma substância que produz gelatina quando aquecido; quimicamente, é composto por aminoácidos pirrolidínicos e glicina, mais uma pequena fração de aminoácidos aromáticos. A substância fundamental é o componente extracelular e interfibrilar de todos os tecidos conjuntivos; quimicamente, constitui-se de mucopolissacarina sulfatada contendo hexoaminas ou aminoaçúcares; embora pequena em quantidade, a substância fundamental é, fisiologicamente, um constituinte importante do tecido ósseo, possivelmente relacionada ao processo de calcificação.

A calcificação do tecido ósseo ocorre pela substituição da água por cristais minerais, constituídos principalmente de hidroxapatita. Quando o espaço disponível para a expansão da calcificação e do crescimento dos cristais se esgotar, a distância entre os cristais torna-se cada vez menor, até que, eventualmente, seja atingida a máxima mineralização.

1.3 – Formação e Organização do Tecido Ósseo

A unidade estrutural do tecido ósseo é o sistema de Havers, ou osteon. A formação do sistema haversiano é ilustrada esquematicamente na Figura 4. Os osteoblastos ocupam um espaço deixado pela desintegração de uma porção da cartilagem calcificada e, sob o remanescente da estrutura anterior, depositam a substância óssea intercelular que posteriormente se calcifica. Os osteoblastos continuam a se aglomerar em sucessivas camadas, a partir das paredes das cavidades, até que é deixado um espaço somente para a artéria nutrizante. Esse espaço tubular é o canal de Havers. A matriz depositada pela última ou as duas últimas camadas de células não se calcifica e permanece como tecido mole que reveste o canal, podendo desenvolver funções de osteoblastos ou osteoclastos. Os osteócitos da matriz calcificada são conectados ao canal de Havers e a seus fluidos nutrientes por uma rede de canaliculos. O perímetro da matriz calcificada é chamada de linha de cimentação. A Figura 5 mostra microfotografias de uma porção do tecido ósseo e de um único osteon.

A formação de novos sistemas haversianos continua mesmo na vida adulta do osso. As cavidades de resorção contém vasos sanguíneos e células do tecido conectivo. Enquanto se desenvolve a resorção do tecido ósseo, a cavidade é revestida por osteoclastos; quando ela cessa e se inicia a reconstrução óssea, os osteoclastos são substituídos pelos osteoblastos. A cavidade é então preenchida da parede para o centro, pela aposição de tecido ósseo em camadas concêntricas sucessivas, no decurso da qual são formadas as lacunas, os osteócitos e os canaliculos. Um osteon de aproximadamente 300 μm de diâmetro forma-se em 4 a 6 semanas.

1.4 – Dimensões Estruturais⁽⁴²⁾

1.4.1 – Tecido Ósseo Cortical e Trabecular

As camadas periosteal e endosteal podem ser caracterizadas por uma espessura típica de 10 μm , enquanto que o sistema de Havers apresenta as seguintes dimensões:

diâmetro do osteon	: 200 – 400 μm
diâmetro do canal de Havers	: 20 – 100 μm
osteócito na lacuna	: 5 x 10 x 20 μm
diâmetro dos canaliculos	: 1 μm ou menos

A espessura dos trabéculos varia consideravelmente. Para a vértebra e costelas, por exemplo, alguns autores indicam dimensões variáveis entre 20 e 250 μm , enquanto que outros pesquisadores

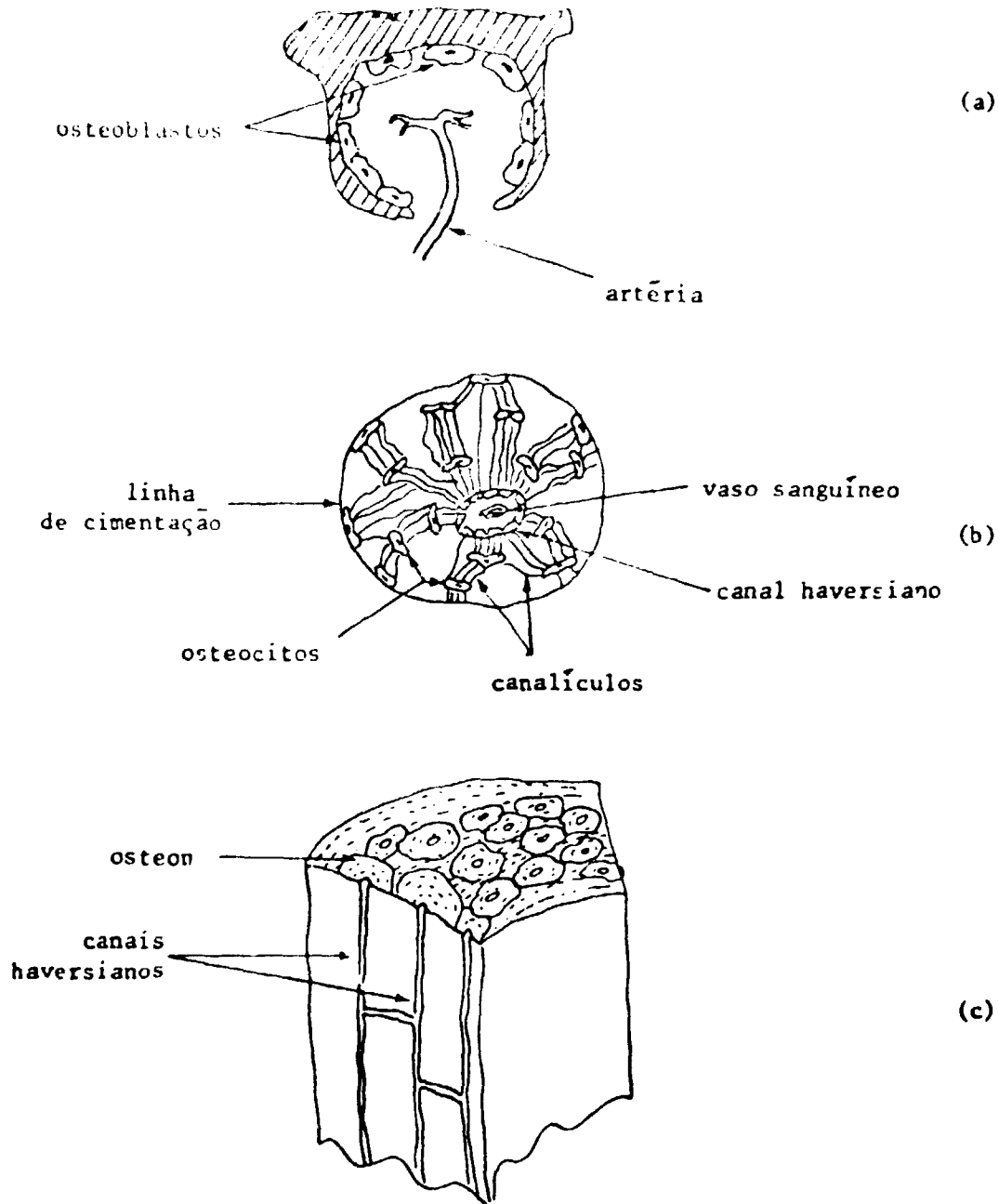


Figura 4 – Desenvolvimento do sistema de Havers: (a) deposição da matriz em uma cavidade de resorção; (b) secção de um osteon completo; (c) diagrama esquemático da estrutura do tecido ósseo cortical.

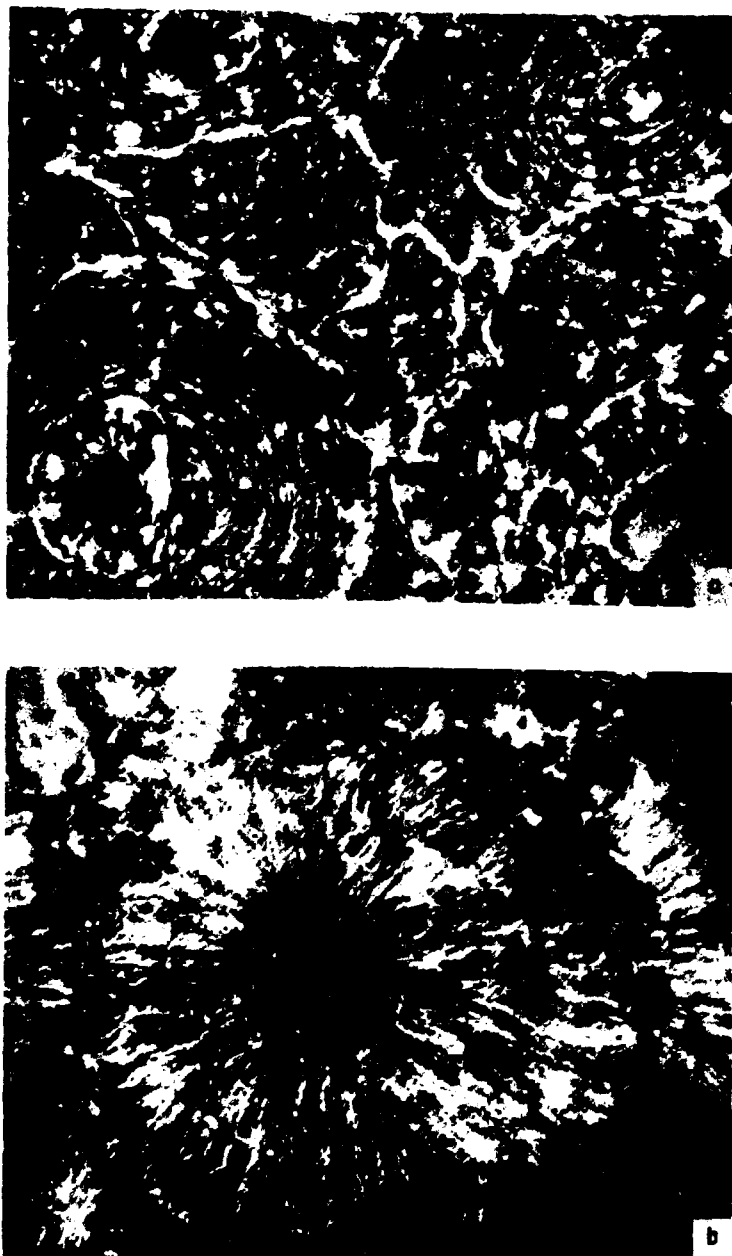


Figura 5 – (a) Microfotografia do tecido ósseo cortical. (b) Microfotografia de um único osteon: canaliculos (em branco) e linha de cimentação (em preto) (Spiers⁴²)

indicam espessuras entre 50 a 100 μm . Spiers considera que, na maioria dos casos, 100 μm é um valor suficientemente representativo para fins dosimétricos.

1.4.2 – Cavidades Medulares

As dimensões das cavidades medulares são também muito variáveis. A Tabela II mostra, no estudo efetuado para quatro ossos do esqueleto, a dimensão mais provável e as dimensões médias levando-se em consideração a atribuição de pesos proporcionais à massa e à área superficial das cavidades.

Tabela II
Dimensões das Cavidades Medulares no Tecido Ósseo
Trabecular, em um Adulto de 33 Anos

Osso	Dimensão mais Provável (μm)	Intervalo (μm)	Dimensão média ponderada por massa (μm)	Dimensão média ponderada por superfície (μm)
ilíaco	150	50 – 1100	640	560
costela	300	50 – 1200	790	720
3a. vert. lombar	300	50 – 2000	1090	870
extremid. fêmur	300	50 – 2000	1130	930

Para fins dosimétricos, Spiers recomenda a formalização da dimensão média da cavidade medular ponderada por massa em 800 μm , e de 300 μm como diâmetro mais provável.

2 – Radiossensibilidade dos Tecidos do Osso^(15,16,31,42)

A experiência clínica e as observações experimentais efetuadas em animais têm mostrado que o risco de carcinogênese em um certo tecido ósseo está diretamente associado ao potencial de proliferação de suas células. No esqueleto estas são encontradas entre as células osteogênicas das superfícies ósseas, na medula hematopoética e em certas células epiteliais localizadas junto às superfícies ósseas.

2.1 – Células Osteogênicas

A camada de células sobre as superfícies ósseas, freqüentemente denominada camada osteogênica, varia em espessura e no potencial de proliferação de suas células, dependendo da idade do indivíduo e da região do esqueleto em que se localiza.

Sabe-se que os danos provocados pela radiação manifestam-se mais rapidamente nos tecidos cujas células estão em processo mais ativo de divisão; como tal, as células mais críticas são aquelas com maior potencial de proliferação. No tecido ósseo tais células são as precursoras dos osteoblastos – os pré-osteoblastos ou osteoprogenitoras. Entretanto, convém lembrar que em circunstâncias anormais outras células podem ser estimuladas a se dividirem, como os osteoblastos no caso de fratura óssea.

A resorção e aposição são muito mais ativas nas superfícies endosteais dos tecidos ósseos trabeculares do que o são nas superfícies periosteais ou dentro do sistema de Havers. A área do osso coberta pelo periosteio é muito menor que a área coberta pelo endosteio, visto que este último cobre a

superfície de todos os trabéculos. Esses dois fatores, isto é, o maior número de células mais susceptíveis de virem a produzir algum dano, e a maior atividade destas células, provavelmente contribuem para o fato de que as células osteogênicas endosteais, particularmente aquelas associadas aos espaços medulares, parecem ser mais significativas que as células osteogênicas periosteais na indução de tumores.

2.2 – Células Hematopoéticas da Medula

As células precursoras da linha hematopoética quer sejam as multipotentes para formarem todos os tipos de células do sangue periférico, ou as unipotentes e diferenciadas para um tipo específico, originam-se na medula óssea. Há evidência de que tais células podem passar à circulação geral, embora não se saiba nada de conclusivo sobre o número e a localização precisa de tais células. Pode-se assumir, até que se tenha uma melhor evidência, que na criança elas estão randomicamente distribuídas na medula hematopoética ativa contida nos ossos e, no adulto, na medula hematopoética ativa contida nas cavidades dos ossos trabeculares. O número de tais células situadas fora da medula pode, em termos de proteção radiológica, ser ignorado.

A espécie de leucemia observada após a irradiação de adultos tem origem nas células mielóides. No presente contexto, entende-se por células mielóides quaisquer células de uma linha capaz de se diferenciar em granulócitos. A leucemia mielóide pode ou não ser granulocítica, dependendo do grau de diferenciação das células.

As células linfáticas são também encontradas na medula óssea, mas não está claro ainda qual a relação que as alterações cromossômicas observadas nestas células poderiam ter, eventualmente, com a indução de leucemia.

2.3 – Células Epiteliais Localizadas Junto às Superfícies Ósseas

Aceita-se como princípio geral de radiobiologia que as células responsáveis pelo surgimento de tumores no epitélio junto às superfícies ósseas sejam as linhas de células com maior potencial de proliferação. Os carcinomas cranianos têm origem nas células aéreas mastoidais e nos seios paranasais. Anatomicamente, essas áreas estão dentre as poucas regiões do esqueleto onde o epitélio é diretamente adjacente ao osso. As espessuras totais do epitélio e do tecido conectivo nos seios paranasais e das células aéreas mastoidais são de 50 a 100 μm ; por conseguinte, as células proliferativas podem estar mesmo dentro do alcance das partículas alfa emitidas pelo rádio que venha a se incorporar ao osso.

Parece, portanto, evidente que as doses recebidas por certos tecidos especificamente identificáveis, situados dentro do osso ou que estejam diretamente associados a ele, sejam dados mais importantes na determinação dos limites de dose do que a dose recebida pelo osso considerado simplesmente como um meio homogêneo.

Finalmente, convém salientar que outras células do osso, particularmente os osteócitos, osteoclastos e as células do endotélio vascular, ainda que, até onde a presente evidência sugere, não sejam normalmente responsáveis por alterações malignas, podem ser mortas por grandes doses de radiação. A morte destas células é, provavelmente, a principal responsável pela danificação dos ossos que pode resultar em fraturas, osteoclerose e fibrose. Não há, entretanto, nenhuma evidência histológica que tais danos, ainda que freqüentemente mutilantes, sejam necessariamente um antecedente às alterações malignas.

3 – Locais de Deposição dos Radionuclídeos no Esqueleto^(15,27)

Os radionuclídeos que se concentram no esqueleto podem ser divididos em quatro grupos, conforme os locais nos quais se depositam: (a) alcalinos terrosos, (b) plutônio e tório, (c) as terras raras

e elementos transurânicos e (b) boro e carbono. A natureza química do elemento determina o tipo de tecido no qual pode se esperar encontrá-lo, muito embora os locais reais de deposição dependam do estágio de desenvolvimento do osso e, às vezes, do estado físico-químico e do modo de administração do radioisotopo.

Os alcalinos terrosos, como o cálcio, rádio, estrôncio e bário, distribuem-se na matriz orgânica do tecido ósseo, dirigidos por uma série de fatores fisiológicos ainda não totalmente compreendidos. Estudos autorradiográficos têm mostrado que estes radionuclídeos se distribuem difusamente por toda parte mineral do osso, muito embora as regiões que apresentam grande atividade do crescimento, no momento da administração, mostrem maior concentração.

O plutônio e o tório concentram-se principalmente nas áreas de ressorção das superfícies endosteais adjacentes às cavidades medulares, e na medula óssea. A evidência experimental da incorporação do Pu e Th é baseada nos resultados de uma única injeção intravenosa, na forma monomérica, em animais; é, porém, a única informação dosimétrica disponível⁽¹⁵⁾.

O amerício distribui-se por toda superfície óssea, notadamente nas áreas quiescentes e de ressorção, mas não se encontra particularmente concentrado nas superfícies endosteais como o Pu. Outros elementos que obedecem provavelmente à mesma distribuição são os transurânicos trivalentes, como o actínio, cúrio, cério, berquélio, califórnio e eistênio.

O fósforo é citado pela I.C.R.P.⁽¹³⁾ como elemento que se encontra predominantemente no tecido ósseo e, como tal, comporta-se de modo similar aos alcalinos terrosos. No entanto, ele é incorporado também na fração nucleoproteica de todas as células, principalmente nos nódulos linfáticos, no baço e na medula óssea. O carbono está presente no mineral de apatita e também na fração nucleoproteica de todas as células. Se a administração do P e C for contínua, a retenção na medula pode ser muito maior do que no tecido ósseo.

III – FORMALISMO PARA O CÁLCULO DE DOSE INTERNA

O cálculo de dose interna, notadamente quando se considera radiação X ou γ , torna-se tarefa não muito simples em razão da estrutura geométrica complexa do corpo humano e de sua heterogeneidade em termos de composição elementar.

Os métodos tradicionais de cálculo, baseados no conceito de um "raio efetivo" que caracteriza cada órgão do organismo⁽¹³⁾ ou que assumem simplesmente uma absorção exponencial segundo um certo coeficiente de absorção efetivo⁽²⁶⁾, tem se revelado inadequados por excessiva simplificação de conceitos e a conseqüente distorção dos resultados obtidos.

A adoção do conceito de fração absorvida e, posteriormente, de fração absorvida específica, tem se mostrado como ponto de partida mais adequado ao desenvolvimento de equações que permitam o cálculo de doses internas^(3,24,25,34).

I – Fração Absorvida Específica

Desde que, geralmente, faz-se necessário distinguir entre fonte e alvo, será utilizada a notação convencional $r_1 \cdot r_2$, onde r_1 é a região alvo e r_2 a região fonte.

Seja uma distribuição uniforme de um radionuclídeo em um meio infinito e homogêneo. A energia absorvida por grama está então em equilíbrio com a energia emitida por grama e a dose absorvida de equilíbrio é expressa por

$$D_{\text{em}} = C \sum_i \Lambda_i \text{ rad.}$$

onde C é a integral no tempo da concentração, dada em $\mu\text{Ci-dia/y}$ e

$$\Lambda_i = 51,15 f_i \bar{E}_i \text{ g.rad}/\mu\text{Ci-dia} ,$$

onde f_i é o número de partículas ou fótons do tipo i produzidos por desintegração, \bar{E}_i é a energia média do i -ésimo tipo de radiação e 51,15 é um fator de transformação de unidades dado em $(\text{g.rad}/\text{Mev}) \times$ (desintegração/ $\mu\text{Ci-dia}$).

Se, no entanto, parte da energia emitida por uma fonte r for absorvida em um volume alvo v , a fração absorvida em v de r , $\phi(v \leftarrow r)$, é definida como sendo a energia absorvida no volume alvo v , decorrente da região fonte r , dividida pela energia total emitida pela região fonte r .

$$\phi_i(v \leftarrow r) = \frac{m_v \bar{D}_i(v \leftarrow r)}{A_r \Delta_i} , \quad (3.1)$$

onde m_v é a massa em gramas de v , $\bar{D}_i(v \leftarrow r)$ é a dose absorvida decorrente do i -ésimo tipo de radiação, em rads, em v de r , e A_r é a integral no tempo da atividade presente no órgão fonte r , em $\mu\text{Ci-dia}$.

A aplicação da equação (3.1), que é o ponto de partida do formalismo que se segue, está limitada no entanto à condição de que a região alvo seja volumétrica.

Uma formulação mais geral pode ser obtida definindo o conceito de fração absorvida específica ϕ , isto é, a fração absorvida por unidade de massa do alvo:

$$\phi_i(v \leftarrow r) = \frac{\phi_i(v \leftarrow r)}{m_v} \text{ g}^{-1}$$

Define-se então a fração absorvida específica em uma região alvo r_1 , em decorrência de uma região fonte r_2 , pelo limite

$$\phi_i(r_1 \leftarrow r_2) = \lim_{v \rightarrow r_1} \phi_i(v \leftarrow r_2) = \frac{\bar{D}_i(r_1 \leftarrow r_2)}{A_{r_2} \Delta_i} , \quad (3.2)$$

onde v é um volume que contém totalmente a região r_1 .

Da equação (3.2) obtém-se a expressão geral

$$\bar{D}(r_1 \leftarrow r_2) = A_{r_2} \sum_i \Lambda_i \phi_i(r_1 \leftarrow r_2) \text{ rad.} \quad (3.3)$$

sem limitações de tamanho ou uniformidade das regiões fonte e alvo, de atividade de fonte ou do tipo de material absorvedor.

2 - Cálculo da Dose Equivalente

Uma vez incorporado um radioisótopo conhecido no organismo, pode-se calcular a dose equivalente média H , em um órgão alvo X a partir da atividade concentrada no órgão fonte Y , pela aplicação da equação diretamente derivada de (3.3):

$$H = U \cdot S \text{ rem.} \quad (3.4)$$

onde U representa a integral no tempo da atividade presente no órgão fonte Y , expresso em microcurie-dia, e S a dose equivalente por microcurie-dia no órgão alvo X , dado por

$$S = 51,15 \sum_i f_i \bar{E}_i \phi_i(X \rightarrow Y) Q_i(X) N_i(X) \text{ rem}/\mu\text{Ci-dia} \quad (3.5)$$

onde $Q_i(X)$ e $N_i(X)$ são o fator de qualidade e o fator modificante apropriados para o i -ésimo tipo de radiação, respectivamente.

Para o caso específico de fótons, $Q_i(X)$ e $N_i(X)$ assumem o valor unitário⁽¹²⁾. A fração absorvida específica pode ser expressa pela simples relação

$$\phi(X \rightarrow Y) = \left[\frac{\text{energia dos fótons absorvida pela região alvo}}{\text{energia total dos fótons emitidos pela região fonte}} \right] \cdot \frac{1}{m_x}$$

A região alvo pode ou não incluir a região fonte ou podem, eventualmente, ser coincidentes em certos casos de interesse, como no presente trabalho.

3 - Aditividade da Função S

As propriedades de aditividade da função S são decorrentes simplesmente do princípio da conservação de energia.

Seja

$$\{X_i\}_{i=1}^n \quad \text{e} \quad \{Y_j\}_{j=1}^m$$

dois conjuntos de órgãos ou sub-regiões discretos do corpo, totalmente contidos em duas regiões V e W , respectivamente.

Assumindo-se que exista uma distribuição uniforme de atividade em V e W ,

$$\phi(V \rightarrow W) = \sum_i \phi(X_i \rightarrow W) = \sum_j \phi(V \rightarrow Y_j) \frac{M_{Y_j}}{M_W} = \sum_i \sum_j \phi(X_i \rightarrow Y_j) \frac{M_{Y_j}}{M_W}$$

onde M_k é a massa do órgão ou região k .

Isso significa que se a energia é uniformemente emitida da região W , em cada sub-região de W a fração da energia total emitida de Y_j é M_{Y_j}/M_W e a energia é aditiva entre as regiões. Expressando cada ϕ em termos da fração absorvida específica, tem-se que

$$\begin{aligned}\phi(V \leftarrow W) &= \sum_i \phi(X_i \leftarrow W) \frac{M_{X_i}}{M_V} = \sum_j \phi(V \leftarrow Y_j) \frac{M_{Y_j}}{M_W} = \\ &= \sum_i \sum_j \phi(X_i \leftarrow Y_j) \cdot \frac{M_{X_i} \cdot M_{Y_j}}{M_V \cdot M_W}.\end{aligned}$$

Ou em termos de S , tem-se

$$\begin{aligned}S(V \leftarrow W) &= \sum_i S(X_i \leftarrow W) \frac{M_{X_i}}{M_V} = \sum_j S(V \leftarrow Y_j) \frac{M_{Y_j}}{M_W} = \\ &= \sum_i \sum_j S(X_i \leftarrow Y_j) \frac{M_{X_i} \cdot M_{Y_j}}{M_V \cdot M_W}.\end{aligned}$$

Eventualmente, torna-se útil considerar os conjuntos de órgãos

$$\{X_i\}_{i=1}^n \quad \text{e} \quad \{Y_j\}_{j=1}^m$$

associados a seus conjuntos complementares (CORPO TODO - V) e (CORPO TODO - W). Considere-se inicialmente um único órgão fonte X e um único órgão alvo Y . Então

$$M_Y S(Y \leftarrow X) + (M_{CT} - M_Y) S(CT - Y \leftarrow X) = M_{CT} S(CT \leftarrow X) \quad (3.6)$$

e

$$M_X S(Y \leftarrow X) + (M_{CT} - M_X) S(Y \leftarrow CT - X) = M_{CT} S(Y \leftarrow CT). \quad (3.7)$$

De (3.6) e (3.7), obtém-se

$$\begin{aligned}S(CT - Y \leftarrow CT - X) \cdot (M_{CT} - M_X) \cdot (M_{CT} - M_Y) &= M_{CT}^2 S(CT \leftarrow CT) + \\ - M_{CT} M_X S(CT \leftarrow X) - M_{CT} M_Y S(Y \leftarrow CT) &+ M_X M_Y S(Y \leftarrow X).\end{aligned}$$

Embora essas relações possam sempre ser expressas em termos de S , há ocasiões em que se está interessado nos complementos $CT - V$ ou $CT - W$. Tem-se então

$$S(CT \leftarrow CT) = S(CT - V \leftarrow CT) \frac{M_{CT} - M_V}{M_{CT}} + \sum_i S(X_i \leftarrow CT) \frac{M_{X_i}}{M_{CT}} =$$

$$\begin{aligned}
& S (CT - V + CT - W) \frac{(M_{CT} - M_V) (M_{CT} - M_W)}{M_{CT}^2} + \\
& S (CT - V + W) \frac{(M_{CT} - M_V) M_W}{M_{CT}^2} + \sum_i S (X_i + CT - W) \frac{M_{X_i} (M_{CT} - M_W)}{M_{CT}^2} + \\
& + \sum_i S (X_i + W) \frac{M_{X_i} \cdot M_W}{M_{CT}^2}.
\end{aligned}$$

Expandindo W, obtém-se

$$\begin{aligned}
S (CT - V + CT - W) &= S (CT + CT) \frac{M_{CT}^2}{(M_{CT} - M_V) (M_{CT} - M_W)} + \\
&- \sum_j S (CT - V + Y_j) \frac{M_{Y_j}}{(M_{CT} - M_W)} - \sum_i S (X_i + CT - W) \frac{M_{X_i}}{M_{CT} - M_W} + \\
&- \sum_i \sum_j S (X_i + Y_j) \frac{M_{X_i} \cdot M_{Y_j}}{(M_{CT} - M_V) (M_{CT} - M_W)}.
\end{aligned}$$

Expandindo CT - V e CT - W, obtém-se

$$\begin{aligned}
S (CT - V + CT - W) &= S (CT + CT) \frac{M_{CT}^2}{(M_{CT} - M_V) (M_{CT} - M_W)} + \\
&- \sum_i \frac{M_{CT} \cdot M_{X_i}}{(M_{CT} - M_V) (M_{CT} - M_W)} S (X_i + CT) + \\
&- \sum_j S (CT + Y_j) \frac{M_{CT} \cdot M_{Y_j}}{(M_{CT} - M_V) (M_{CT} - M_W)} + \\
&+ \sum_i \sum_j S (X_i + Y_j) \frac{M_{X_i} \cdot M_{Y_j}}{(M_{CT} - M_V) (M_{CT} - M_W)}.
\end{aligned}$$

onde todos os valores de S do membro direito da equação são normalmente tabelados. Analogamente, para qualquer órgão X e Y, tem-se

$$S (CT - V + Y) = S (CT + Y) \frac{M_{CT}}{M_{CT} - M_V} - \sum_i S (X_i + Y) \frac{M_{X_i}}{M_{CT} - M_V}$$

e

$$S (X + CT - W) = S (X + CT) \frac{M_{CT}}{M_{CT} - M_W} + \sum_i S (X + Y_i) \frac{M_{Y_i}}{M_{CT} - M_W}$$

O uso das relações acima derivados pode, ocasionalmente, conduzir a resultados absurdos, como, por exemplo, S assumir valores negativos. Em tais casos, deve-se questionar a precisão dos valores empregados, pois, como será visto no Capítulo IV.4, a estimativa de S pode estar afetada por um erro considerável.

IV – DESCRIÇÃO DO PROGRAMA ORIGINAL ALGAM-97

O programa "ALGAM – Monte Carlo Estimation of Internal Dose from Gamma-ray Sources in a Phantom Man" foi desenvolvido por Warner e Craig⁽⁴⁸⁾, no Laboratório Nacional de Oak Ridge, em linguagem FORTRAN-IV. Conhecido pelo código ALGAM-97, o programa efetua o cálculo da fração absorvida específica em 97 órgãos ou regiões do corpo, a partir de uma distribuição uniforme de fótons em qualquer uma destas 97 regiões.

A descrição minuciosa de todo programa, variável por variável, torna-se tarefa inviável de ser aqui apresentada, desde que o mesmo é composto de aproximadamente 2000 passos de programação.

Em virtude da inexistência de um manual de utilização do ALGAM-97, este capítulo procura descrevê-lo de forma sucinta, de modo a permitir a compreensão de suas linhas gerais e o significado das modificações que ora introduzimos.

1 – Aplicação da Técnica de Monte Carlo

A técnica de Monte Carlo^(5,36,41) é um método numérico de resolução de problemas matemáticos, largamente utilizado quando se pretende estudar o comportamento macroscópico de um sistema mediante a simulação de variáveis aleatórias microscópicas.

As leis probabilísticas de interação da radiação com a matéria tornam possíveis a aplicação deste método para o cálculo da energia absorvida, simulando a trajetória do fóton através do *phantom* e acompanhando sua história até que ele seja absorvido ou que escape em definitivo dos limites do *phantom*.

Os fótons são gerados em um órgão fonte previamente escolhido. Na realidade, gera-se matematicamente e ao acaso, pelo método de Monte Carlo, tantos pontos com direção e sentido quantos forem o número de fótons a serem seguidos.

A partir de então a história de cada um deles é determinada usando os coeficientes de atenuação de massa $\mu_{pe}(E)$, $\mu_c(E)$ e $\mu_{pp}(E)$ para o efeito fotoelétrico, Compton e produção de pares, respectivamente, para os três meios considerados: pulmão, tecido mole e esqueleto.

Recorre-se aqui a um artifício matemático, introduzindo-se um coeficiente de atenuação fictício μ_0 , maior ou igual a qualquer um dos coeficientes reais, para se determinar um ponto de interação do fóton. Esse método minimiza substancialmente o tempo de computação.

A distância ξ percorrida pelo fóton entre duas colisões sucessivas é uma variável aleatória que pode tomar qualquer valor positivo distribuído segundo a função densidade de probabilidade

$$p(x) = \mu_0 e^{-\mu_0 x}$$

Demonstra-se que⁽⁵⁾ valores de ξ podem ser selecionados da função densidade de probabilidade de $p(x)$, associando-os a uma outra variável aleatória r uniformemente distribuída no intervalo entre 0 e 1. A correspondência entre as duas variáveis é dada pela solução da equação

$$r = \int_0^{\xi} p(x) dx$$

Tem-se portanto que

$$r = \int_0^{\xi} \mu_0 \cdot \exp(-\mu_0 x) dx = 1 - \exp(-\mu_0 \xi)$$

$$\ln(1 - r) = -\mu_0 \xi \therefore \xi = -\frac{1}{\mu_0} \ln(1 - r)$$

Desde que r é um número randômico uniformemente distribuído entre 0 e 1, pode-se escrever simplesmente

$$\xi = -\frac{1}{\mu_0} \ln(r)$$

Desta forma determina-se um ponto de colisão, a uma distância ξ do ponto de origem do fóton, na direção de sua trajetória.

A partir das coordenadas de tal ponto define-se o órgão que o contém e testa-se se a interação é aceita para o meio em questão.

Denominando μ_1 o coeficiente de atenuação de massa total dessa região, há uma probabilidade μ_1/μ_0 de que este local de interação seja aceito. Se for aceito, calcula-se a energia depositada pela colisão; caso contrário, o fóton continua sua trajetória, a partir do ponto alcançado, com a mesma direção, sentido e energia.

A energia E_n^* depositada na n -ésima colisão é dada por:

$$E_n^* = W_{n-1} \left[\frac{\mu_{pe}(E_{n-1})}{\mu(E_{n-1})} \cdot E_{n-1} + \frac{\mu_c(E_{n-1})}{\mu(E_{n-1})} (E_{n-1} - E_n) \right] +$$

$$\left\{ \frac{\mu_{pp}(E_{n-1})}{\mu(E_{n-1})} (E_{n-1} - 2m_0c^2) \right\} \quad (4.1)$$

onde $\mu_{pe}(E_{n-1})$, $\mu_c(E_{n-1})$, $\mu_{pp}(E_{n-1})$ e $\mu(E_{n-1})$ são os coeficientes de atenuação de massa fotoelétrico, Compton, produção de pares e total antes da colisão, respectivamente, e W_{n-1} é o fator de peso do fóton antes da colisão.

A introdução do peso $W^{(36)}$ tem por finalidade contrabalançar a probabilidade de absorção total predominante em baixas energias. Do contrário, pouquíssimos fótons conseguiriam penetrar distâncias maiores, o que tornaria as estimativas de energia absorvida estatisticamente deficientes. Inicialmente atribui-se peso unitário ao fóton; após cada interação seu peso é reduzido por um fator igual à probabilidade que o fóton teria, no processo físico real, de sofrer um espalhamento Compton, ou seja,

$$W_n = W_{n-1} \frac{\mu_c(E_{n-1})}{\mu(E_{n-1})}$$

Note-se da equação (4.1) que toda energia do fóton é localmente absorvida quando ocorre um processo de interação fotoelétrico, o mesmo acontecendo no caso das energias cinéticas do elétron e do pósitron gerados na produção de pares. O pósitron é aniquilado e as histórias dos dois fótons emitidos, com energia m_0c^2 , são seguidas a partir do local da produção de pares, com orientação randômica, independentemente da história do fóton que originalmente os produziu.

Os fótons produzidos por "bremsstrahlung" (radiação de frenagem) não são considerados porque, além da fração da energia total dissipada por este processo ser desprezível, a probabilidade de que se gere um fóton com energia próxima à energia cinética do elétron é muito pequena.

A história da trajetória do fóton termina quando acontecer uma das três hipóteses: (1) ele escapa do *phantom*, (2) sua energia torna-se menor do que 4 KeV ou (3) seu peso é reduzido a um valor menor do que 10^{-5} ; nos dois últimos casos, considera-se que a energia foi localmente absorvida.

2 – Diagrama Esquemático do Algam-97

O esquema lógico do código ALGAM-97 é mostrado no diagrama de bloco da Figura 6.

O programa principal emprega 32 sub-rotinas, cuja seqüência de chamada é mostrada na Figura 7. As funções de cada uma delas estão agrupadas em quatro quadros. No quadro I estão as sub-rotinas responsáveis pela iniciação do programa, ou seja, pela definição dos valores iniciais das variáveis e pelo cálculo dos coeficientes de atenuação de massa dos três tecidos a partir dos coeficientes de atenuação de cada elemento, disponíveis em fita previamente incorporada ao programa. O quadro II apresenta as sub-rotinas envolvidas com todo processo de cálculo da energia absorvida em cada colisão. Pelo quadro III acompanha-se a história de um fóton e suas eventuais múltiplas colisões. E, pelo quadro IV, os cálculos finais da fração absorvida específica e do coeficiente de variação, e impressão.

3 – Cômputo da Dose no Esqueleto

A estimativa da energia absorvida é efetuada em cada uma das 13 partes em que foi dividido o esqueleto. A Figura 8 mostra o modelo do esqueleto idealizado e a Tabela III a quantidade de medula hematopoética, medula adiposa e tecido ósseo em cada região.

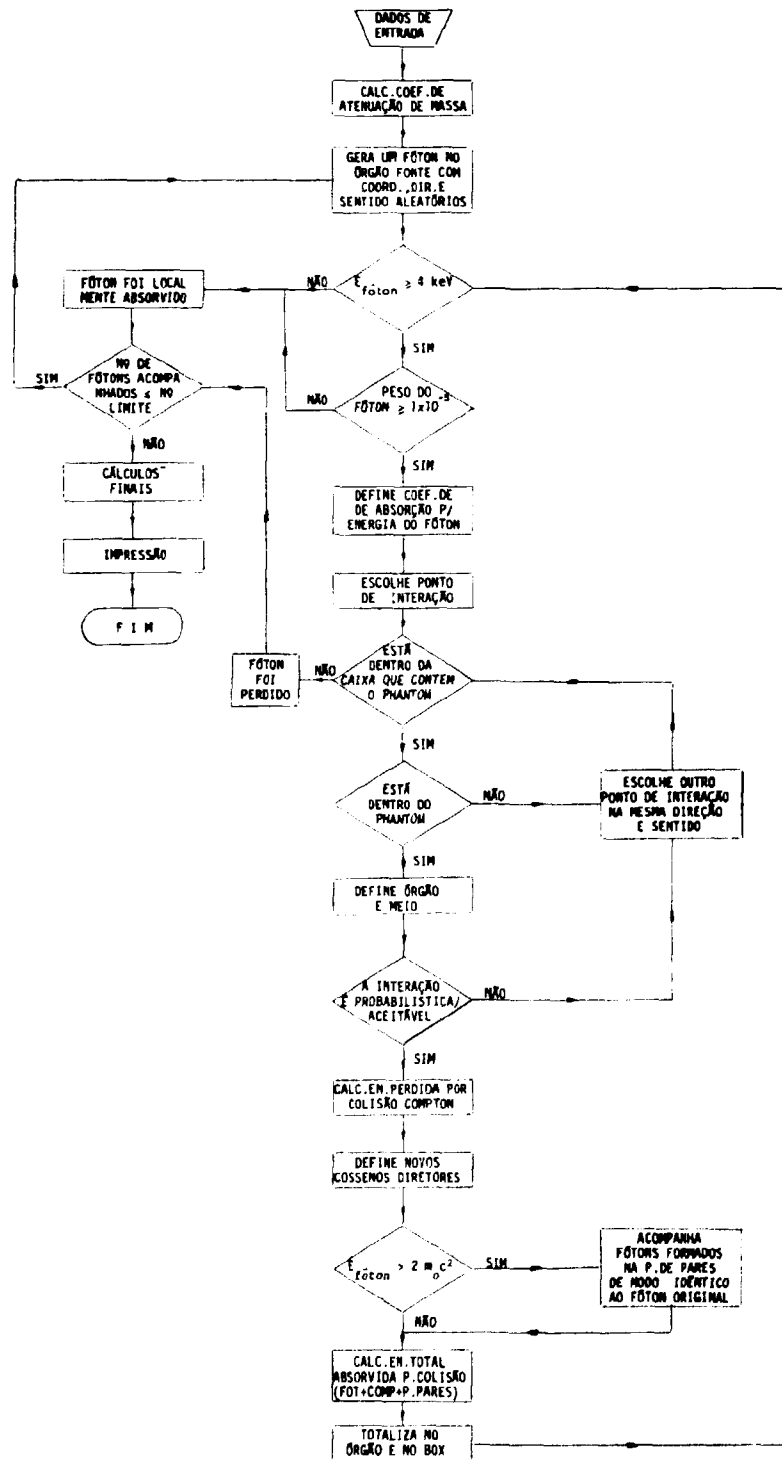


Figura 6 – Diagrama de bloco do Algam-97

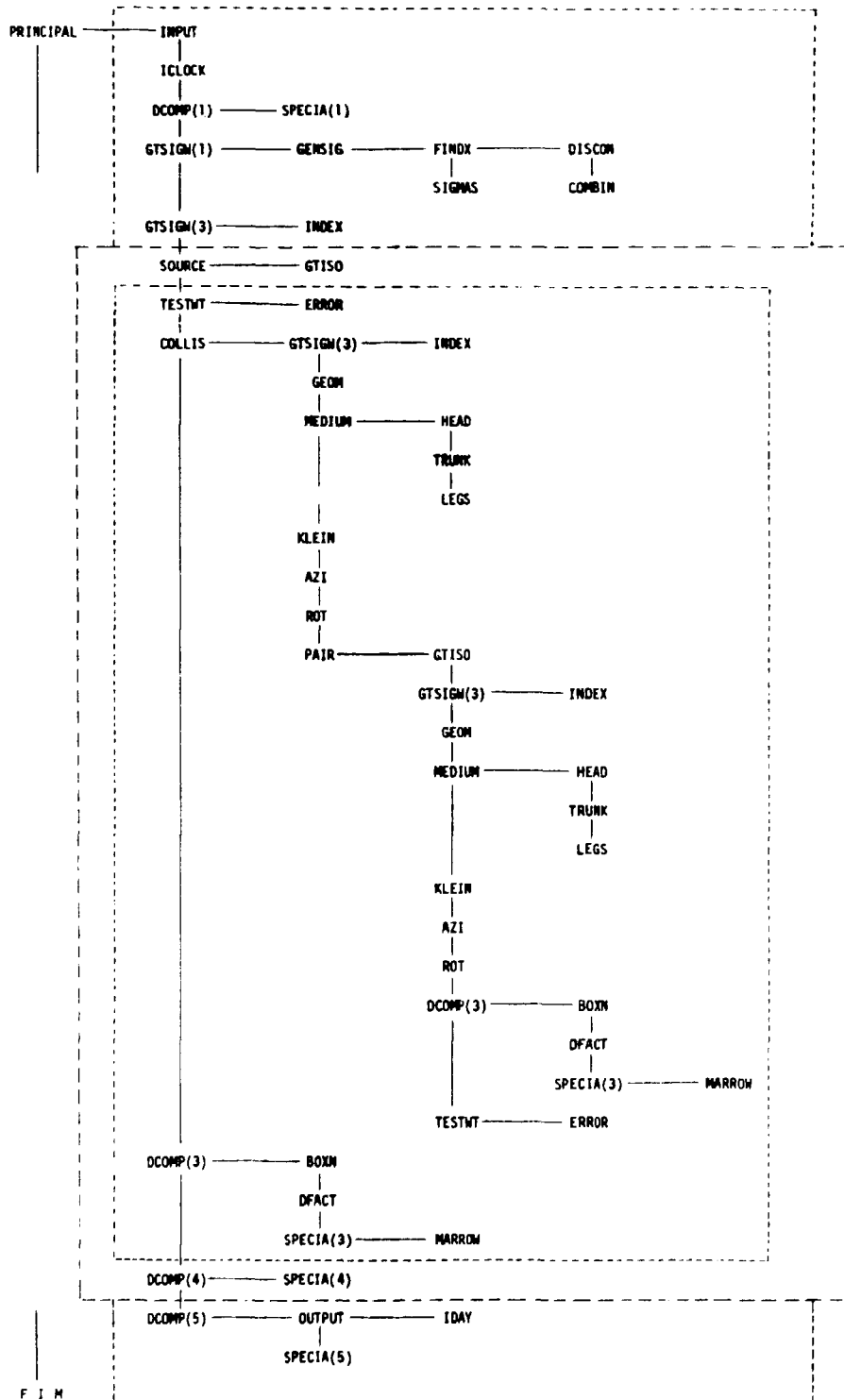


Figura 7 – Fluxograma das sub-rotinas do Algam-97



Figura 8 – Modelo idealizado do esqueleto. As áreas hachuradas mostram os locais onde se assume que exista medula hematopoética (ORNL-5000).

Tabela III

Massas de Medula Hematopoética, Medula Adiposa e Tecido Ósseo Presentes no Esqueleto do *Phantom*

Região do Esqueleto	Medula	Medula	Tecido
	Hematopoética (g)	Adiposa (g)	Ósseo (g)
Braços			
R. superior ⁽¹⁾	28,5	474	9,5
R. inferior	0	520	389
Clavículas	24	49,2	8
Pernas			
R. superior ⁽²⁾	57	2036	19
R. inferior	0	1588	461
Pelve	543	177	181
Costelas	153	677	201
Escápula	72	206	24
Cabeça			
Crânio ⁽³⁾	178,5	557	59,5
Mandíbula	18	439	6
Espinha			
R. superior ⁽⁴⁾	51	130	17
R. média	211,5	533	70,5
R. inferior ⁽⁵⁾	163,5	87,8	54,5
Total	1500	7474	1500

(1) $52,6 \leq z \leq 69$ (4) $70 \leq z \leq 78,6$ (2) $-22,8 \leq z \leq 0$ (5) $22 \leq z \leq 35,1$ (3) $z \geq -3y + 77$

Para cada interação ocorrida em um osso i do esqueleto calcula-se a energia absorvida no local, considerando-se o meio homogêneo, de densidade $1,4862 \text{ g/cm}^3$. O cálculo da energia depositada na medula hematopoética E_{MH}^i é feito pela sub-rotina MARROW, de acordo com a expressão:

$$E_{MH}^i = E_T^i \times f_{MH}^i$$

onde E_T^i é a energia total depositada no osso i e f_{MH}^i é a fração em massa de medula hematopoética presente no osso i .

Para a medula adiposa, analogamente, a energia depositada E_{MA}^i é dada por

$$E_{MA}^i = E_T^i \times f_{MA}^i$$

onde f_{MA}^i é a fração em massa da medula adiposa presente no osso i .

Considera-se, pois, que a energia absorvida por grama de medula seja idêntica à absorvida pela parte óssea, o que, principalmente para baixas energias onde há predominância do efeito fotoelétrico, superestima a dose na medula e subestima a dose no tecido ósseo.

A estimativa dos erros padrões precisa também ser analisada com reservas, desde que cada colisão em i é sempre totalizada simultaneamente para as três regiões do osso, quando, no processo físico real, *tenha* ocorrido uma única interação.

4 – Estatística

O programa calcula, também, o erro padrão da estimativa da energia absorvida em cada região ou órgão.

Seja E_{ni}^* a energia depositada, na região considerada, pela n -ésima interação do i -ésimo fóton. A energia total E_i^* depositada pelo i -ésimo fóton, ou pela i -ésima história, é dada por:

$$E_i^* = \sum_{n=1}^{m_i} E_{ni}^*$$

onde m_i é o número de interações havidas na i -ésima história. A estimativa da energia média \bar{E} depositada por fóton pode ser dada então por:

$$\bar{E} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_i^*$$

onde N é o número de fótons seguidos.

O erro padrão σ_m da estimativa de \bar{E} é expresso por

$$\sigma_m^2 = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (E_i^* - \bar{E})^2 = \frac{\sum_{i=1}^N E_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N E_i)^2}{N}}{N-1}$$

Desde que os valores da fração absorvida e da fração absorvida específica diferem de \bar{E} somente por um fator constante, eles têm o mesmo coeficiente de variação C.V. de \bar{E} .

$$\text{C.V.} = \frac{100\sigma_m}{\bar{E}} \%$$

Se os valores de E_i^* obedecerem a uma distribuição normal, a precisão obtida na estimativa da fração absorvida pode ser avaliada pela análise do erro padrão σ_m . Ocorre, porém, que em regiões de pequeno volume ou que estão a muitos caminhos livres médios da fonte, o número de interações é pequeno e σ_m não pode ser considerado como um dado válido para se estimar o intervalo de confiança de E . Por esse motivo o programa registra, também, o número de interações ocorridas em cada região ou órgão.

O exame dos resultados de \bar{E} nos casos em que o C.V. excede a 50%, quando comparados com valores obtidos por outros processos independentes de cálculo, mostra que o erro de tais estimativas pode variar de um fator 2 a 5⁽⁴⁰⁾. O método que utiliza o fator de "build-up" para meios infinitos tem se mostrado uma alternativa mais confiável para estimativa de \bar{E} nesses casos, com erro inferior a um fator 2⁽⁵⁾.

V – ALGAM-108: O PROGRAMA MODIFICADO

Muito embora a complexidade da estrutura óssea permita que se refine tanto quanto se queria qualquer modelo para ela idealizado, deve-se ter em mente que este trabalho é parte de um todo que visa ao aperfeiçoamento gradativo do modelo matemático do *homem referência*. Torna-se, por conseguinte, injustificável a procura isolada de uma precisão incompatível com aquelas apresentadas atualmente pelo restante do *phantom*.

Foi com esse espírito que escolhemos o método descrito neste capítulo para alterar o programa original no sentido de tornar o esqueleto heterogêneo.

1 – Desenvolvimento da Sub-Rotina Source

Tomaram-se como órgãos fonte dos fótons monoenergéticos o esqueleto como um todo, a medula hematopoética e a medula adiposa, para cada um dos quais foi montada a sub-rotina SOURCE.

Esta sub-rotina gera pontos de coordenadas aleatórias, uniformemente distribuídos no órgão fonte, que correspondem às posições de origem dos fótons cujas histórias serão seguidas. A sub-rotina GTISO assegura-lhes uma direção e sentido isotrópicos.

Seja FLTRNF(R) – apresentada no apêndice III – uma função geração de números pseudo-aleatórios no intervalo entre 0 e 1, e a e p dois números reais, com $a \neq 0$.

Então

$$X = a \cdot \text{FLTRNF}(R) + p$$

define um ponto aleatório na coordenada x, compreendido no intervalo entre p e p + a.

Se, em adição,

$$Y = b \cdot \text{FLTRNF}(R) + q$$

e

$$Z = c \cdot \text{FLTRNF}(R) + r$$

com b, c, q e r reais e b e c diferentes de zero, gera-se sucessivamente um conjunto de pontos uniformemente distribuídos em uma caixa de dimensões $|a| \times |b| \times |c|$, cujo centro geométrico está situado em $O(p + \frac{a}{2}, q + \frac{b}{2}, r + \frac{c}{2})$.

Para cada uma das partes que compõe o esqueleto do *phantom* atual – veja Tabela III – construímos a menor caixa retangular, de arestas coincidentes com os eixos x, y e z do *phantom*, que a contivesse por inteiro, partindo-se das inequações dos ossos definidas no apêndice II.

Para a localização de um fóton em um osso em particular utilizou-se a técnica da rejeição⁽⁴¹⁾ do método de Monte Carlo, isto é, foram gerados tantos pontos quanto necessários dentro da caixa, sucessivamente rejeitados até que um deles satisfizesse a inequação determinante do osso.

Tome-se, por exemplo, a medula hematopoética como órgão fonte; a uniformidade de distribuição dos fótons por todo o esqueleto é assegurada impondo-se que o número de pontos gerados em cada osso seja proporcional à massa de medula hematopoética nele contida. Procedimento análogo foi adotado para os dois outros órgãos fonte.

Assumiu-se, portanto, que tanto o tecido ósseo como as duas porções medulares estivessem, também, uniformemente distribuídas por todo o volume de cada osso, embora tal hipótese não corresponda exatamente à configuração anatômica real.

A Figura 9 mostra o diagrama de bloco da sub-rotina SOURCE, onde $PROB(i)$ é a relação entre as massas de meio considerado, contido no órgão i e no esqueleto todo.

As três sub-rotinas SOURCE são apresentadas no apêndice III.

2 – Modificações Introduzidas no Programa Original

Substituiu-se a composição química do meio que representava o esqueleto homogêneo no programa antigo (Tabela I) pela composição química do tecido ósseo do esqueleto e considerou-se como meio representativo das medulas o tecido mole (Tabela I), desde que seus coeficientes de atenuação são muito próximos entre si.

A composição elementar do tecido ósseo introduzido foi baseada nos dados do *homem referência*⁽¹⁸⁾ e é apresentada na Tabela IV, juntamente com as densidades parciais de cada elemento. A densidade do novo meio é de $1,8650 \text{ g/cm}^3$.

Tabela IV

Composição Elementar do Tecido Ósseo e Densidades Parciais de cada Elemento¹⁸

Elemento	% em Massa	Densidade Parcial (g/cm^3)
H	5,78	1,078E-1
C	13,88	2,589E-1
N	3,89	7,249E-2
O	53,02	9,887E-1
Na	0,33	6,222E-3
Mg	0,16	2,916E-3
P	7,45	1,389E-1
S	0,27	4,999E-3
Cl	0,15	2,861E-3
K	0,16	3,055E-3
Ca	14,89	2,778E-1
Fe	0,0087	1,639E-4
Zn	0,0071	1,333E-4
Sr	0,0034	6,388E-5
Pb	0,0012	2,250E-5

densidade total: $1,865 \text{ g/cm}^3$

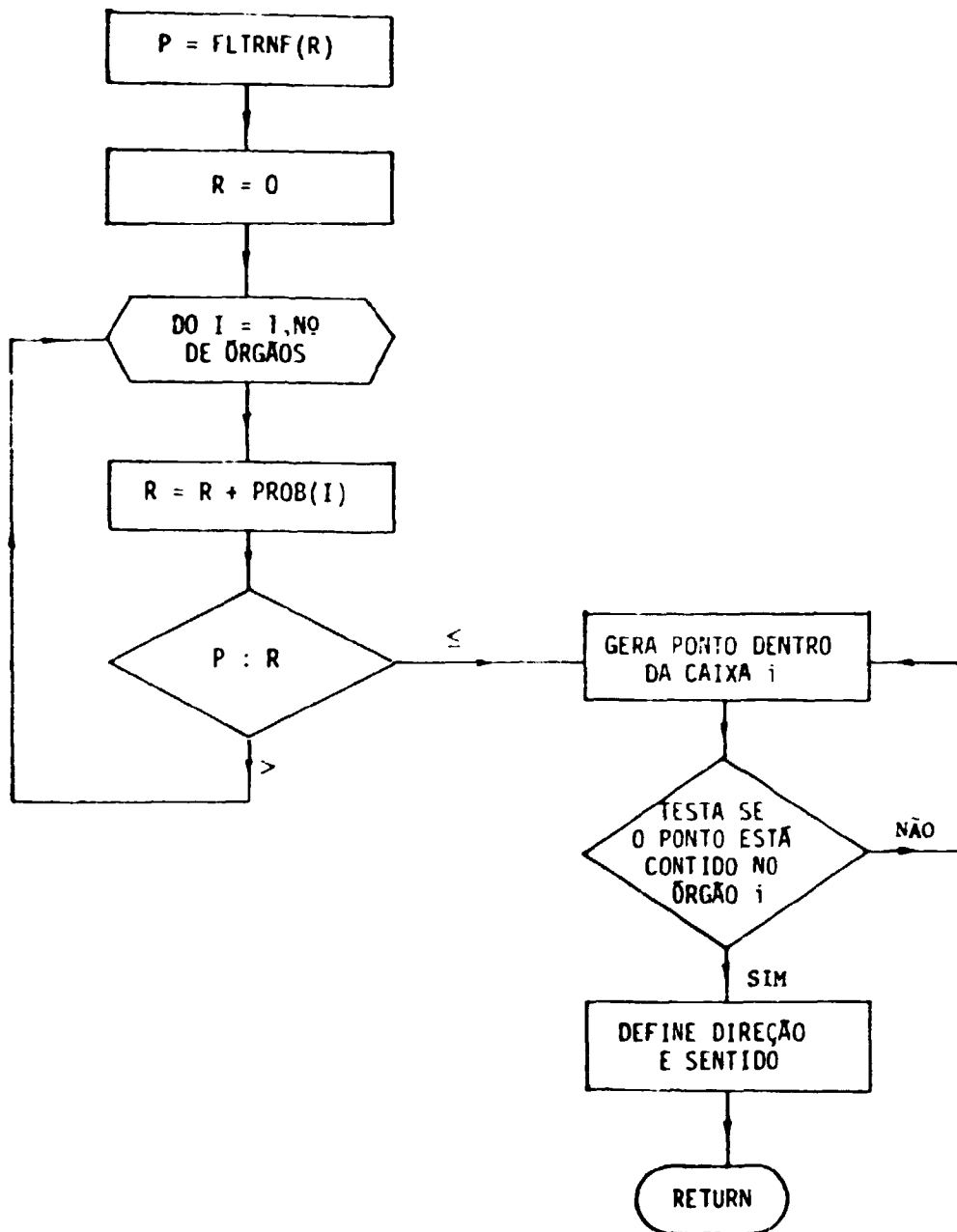


Figura 9 Diagrama de bloco da sub-rotina SOURCE

Vimos, porém, que para a estimativa da energia absorvida nos órgãos do *phantom* foi necessário dar-lhes uma forma geométrica definida. É evidente que isso não poderia ser feito para as três regiões do esqueleto ora em estudo tendo em vista a complexidade de sua estrutura. Recorremos então a um artifício. Respeitadas as proporções de massa de cada um de seus componentes (Tabela III) supôs-se que o tecido ósseo, a medula hematopoética e a medula adiposa estivessem uniformemente distribuídas pelo osso todo, o que permite o equacionamento do problema somente em termos probabilísticos.

A cada interação ocorrida em um dos ossos do esqueleto, geometricamente bem definido e considerado como um meio homogêneo no modelo antigo, definiu-se uma certa probabilidade de que tal colisão tivesse se processado no tecido ósseo, na medula hematopoética ou na medula adiposa. Essa probabilidade é proporcional ao volume ocupado por cada tecido em cada osso, considerando-se a questão sob o ponto de vista estritamente geométrico.

Tomando-se as densidades do tecido ósseo e da parte medular, e as massas da Tabela III, calculou-se o volume hipotético que cada meio ocuparia dentro do osso (Tabela V) e determinou-se a relação de volume entre eles (Tabela VI). Essas relações definem exatamente as probabilidades de cada colisão acontecer em determinado meio.

As três sub-rotinas que definem o local de interação foram alteradas: TRUNK, HEAD e LEGS.

A Figura 10 mostra o novo diagrama de bloco dessas sub-rotinas. $V(K)$ é a fração em volume do meio k presente no osso X ; os meios correspondentes à $k = 1, 2$ e 3 foram tomados na ordem decrescente de seus volumes para otimização de processamento. Os parâmetros J, JS, JR, JO e JSK definem posições de memória nas quais são totalizados o número de colisões e as frações de energia absorvida.

Em cada colisão aceita, os valores de

J definem o órgão isolado no qual ocorreu a interação.

JO , o total em um órgão ou tecido (Por exemplo, $J = 16$ define o rim esquerdo, $J = 17$ o rim direito e $JO = 18$ ambos os rins; $JO = 39$, o total na medula hematopoética, etc.).

JS , a região do corpo: cabeça ($JS = 107$), tronco ($JS = 105$) ou membros inferiores ($JS = 106$).

Quando a colisão ocorrer especificamente no esqueleto, $JS_i = 82$ define-o como um todo e JR a sua zona, para determinado meio: zona superior ($JR = 38, JR = 50$ e $JR = 80$ para a medula hematopoética, medula adiposa e tecido ósseo, respectivamente), zona intermediária ($JR = 36, JR = 57$ e $JR = 78$, idem) e zona inferior ($JR = 37, JR = 58$ e $JR = 79$, idem). A colisão e a energia absorvida são computada simultaneamente para estas cinco posições de memória.

Uma vez estabelecido o órgão e o meio no qual a interação ocorreu, testa-se a probabilidade de aceitação da colisão da mesma forma que a descrita no capítulo anterior.

As três sub-rotinas são apresentadas no apêndice III.

Diversas outras sub-rotinas tiveram que sofrer algumas modificações para tornar todo o programa compatível com as alterações descritas, notadamente a sub-rotina MEDIUM. São, contudo, simples adaptações cuja enumeração julgamos desnecessária, uma vez que a listagem completa do novo programa pode ser obtida na biblioteca do Centro de Processamento de Dados do IPEN, pelo código AIGAM 108.

As modificações introduzidas permitiram a supressão da sub-rotina MARROW descrita no capítulo anterior.

Tabela V

Volume Ocupado por cada Tecido nas 13 Regiões do Esqueleto

Região do Esqueleto	Medula	Medula	Tecido
	Hematopoética (cm ³)	Adiposa (cm ³)	Ósseo (cm ³)
Braços			
R. superior	28,8794	9,6265	254,0861
R. inferior	0	394,1791	278,7432
Clavículas	24,3195	8,1065	26,4016
Pernas			
R. superior	57,7589	19,2530	1091,4468
R. inferior	0	467,1377	851,4624
Pelve	550,2294	183,4098	94,8060
Costelas	155,0370	203,6761	363,2566
Escápula	72,9586	24,3195	110,4542
Cabeça			
Crânio	180,8765	60,2922	298,7153
Mandíbula	18,2396	6,0799	235,4454
Espinha			
R. superior	51,6790	17,2263	69,9368
R. média	214,3159	71,4386	285,6510
R. inferior	165,6768	55,2256	47,0887

Tabela VI

Fração em Volume de cada Tecido nas 13 Regiões do Esqueleto

Região do Esqueleto	Medula	Medula	Tecido
	Hematopoética	Adiposa	Ósseo
Braço			
R. superior	0,09870	0,03290	0,8684
R. inferior	0	0,5858	0,4142
Clavículas	0,4134	0,1378	0,4488
Pernas			
R. superior	0,04943	0,01648	0,9341
R. inferior	0	0,3543	0,6457
Pelve	0,6642	0,2214	0,1144
Costelas	0,2147	0,2821	0,5031
Escápula	0,3512	0,1171	0,5317
Cabeça			
Crânio	0,3350	0,1117	0,5533
Mandíbula	0,07022	0,02341	0,9064
Espinha			
R. superior	0,3722	0,1241	0,5037
R. média	0,3751	0,1250	0,4999
R. inferior	0,6182	0,2061	0,1757

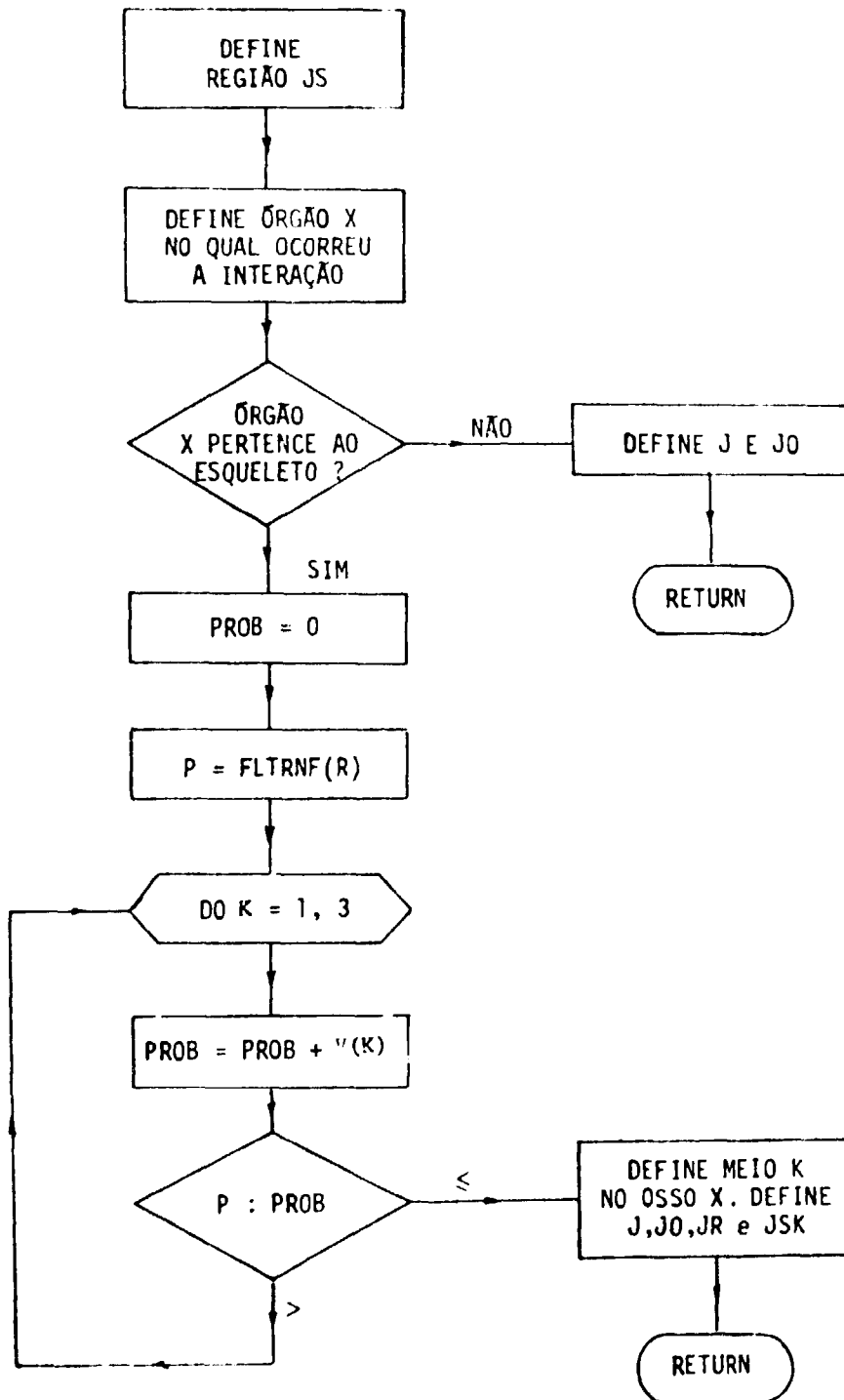


Figura 10 - Diagrama de bloco das sub rotinas TRUNK, HEAD e LEGS

VI - RESULTADOS E DISCUSSÃO

1 -- Resultados

Todos os programas foram processados no computador IBM/370, modelo 155, consumindo um total aproximado de 125 horas de C.P.U.

Apresentam-se, nas Tabelas VII, VIII e IX, as estimativas da fração absorvida específica ϕ nos principais órgãos do *phantom* e os respectivos coeficientes de variação C.V. para 12 energias do fóton, tendo como órgãos fonte a medula hematopoética, a medula adiposa e o esqueleto como um todo. Os resultados obtidos baseiam-se em uma amostra de 60000 fótons.

Os espaços em branco nas Tabelas apresentadas correspondem a valores obtidos com coeficientes de variação superiores a 50%.

2 -- Discussão

Não apresentamos os resultados da fração absorvida específica cujo coeficiente de variação excedeu a 50% porque, nestes casos, o número de colisões ocorridas no órgão alvo foi pequeno e consideramo-lo como estatisticamente insuficiente para tornar a estimativa de ϕ confiável. Como já dissemos (item 4 do Capítulo IV), os órgãos de volume pequeno ou que estão a muitos caminhos livres médios da fonte tendem a apresentar pequeno número de colisões; note-se que a tireóide e os testículos são exemplos típicos de tal situação.

2.1 -- Dependência da Fração Absorvida Específica com a Energia de Fóton

As frações absorvidas específicas na medula hematopoética, medula adiposa e tecido ósseo foram colocadas em gráfico para uma análise imediata dos resultados obtidos (Figura 11, 12 e 13).

Os gráficos mostram que a dependência de ϕ com a energia inicial do fóton segue o comportamento clássico apresentado pelos coeficientes de atenuação de massa de cada meio. Em energias baixas, onde predomina o efeito fotoelétrico, verifica-se um grande aumento de ϕ ; tal fenômeno é mais acentuado notadamente no tecido ósseo, o que se justifica pela maior presença percentual de elementos com número atômico relativamente elevado, como o cálcio e o fósforo.

Isto é esperado somente porque os órgãos fonte e alvo são coincidentes entre si (na hipótese assumida pelo presente trabalho, viu-se que os três alvos são geometricamente coincidentes, ainda que representem meios e massas distintas); caso contrário, a absorção nos tecidos eventualmente interpostos entre os órgãos fonte e alvo podem alterar completamente o aspecto das curvas.

A Figura 11 mostra o comportamento particular da curva de $\phi_{(medula\ hematop. + medula\ hematop.)}$ onde, na faixa de energia abaixo de 23 KeV, a fração absorvida específica na medula óssea hematopoética é maior que a fração absorvida específica no tecido ósseo, embora o coeficiente de atenuação de massa do tecido ósseo seja maior. Isto acontece porque a fonte está localizada na própria medula hematopoética, cuja distribuição percentual em cada osso difere substancialmente do tecido ósseo (Tabela III), isto é, massa da medula hematopoética está mais concentrada em determinados ossos específicos nos quais, obviamente, também se concentra a fonte de fótons. Esse fato não é verificado quando a medula adiposa é tomada como órgão fonte porque a mesma está mais uniformemente distribuída em todos os ossos.

Tabela VII

Fração Absorvida Específica ϕ e Coeficiente de Variação C.V. Fótons Monoenergéticos Uniformemente Distribuídos na Medula Óssea Hematopoética

Órgão Alvo	Energia do fóton (MeV)											
	0,010		0,015		0,020		0,030		0,050		0,10	
	ϕ	C.V.	ϕ	C.V.	ϕ	C.V.	ϕ	C.V.	ϕ	C.V.	ϕ	C.V.
Adrenais	—	—	—	—	—	—	6,28E-6	23	7,30E-6	16	8,32E-6	14
Parede da bexiga	—	—	—	—	—	—	2,15E-6	22	4,72E-6	11	5,00E-6	10
Parede do estômago	—	—	—	—	—	—	1,86E-6	16	3,10E-6	8,2	3,63E-6	6,8
Parede do intestino grosso superior	—	—	3,30E-6	15	5,69E-6	9,7	1,03E-5	5,7	1,12E-5	3,9	9,09E-6	3,9
Parede do intestino grosso inferior	1,43E-6	26	6,99E-6	11	1,59E-5	6,7	2,11E-5	4,6	1,71E-5	3,8	1,14E-5	4,1
Intestino delgado	8,84E-7	13	1,98E-6	8,3	5,32E-6	4,7	1,08E-5	2,8	1,35E-5	2,1	1,09E-5	2,0
Rins	—	—	3,34E-7	37	2,41E-6	13	8,95E-6	5,7	1,09E-5	3,9	9,15E-6	3,8
Fígado	—	—	1,83E-7	22	5,10E-7	12	1,56E-6	5,9	3,44E-6	3,3	3,55E-6	2,9
Pulmões	—	—	3,34E-7	21	1,16E-6	10	3,49E-6	4,7	5,07E-6	2,9	4,54E-6	2,7
Medula óssea hematopoética	1,26E-4	0,83	1,05E-4	0,87	8,35E-5	0,90	5,16E-5	0,91	2,70E-5	0,92	1,94E-5	1,1
Medula óssea adiposa	4,44E-5	1,5	3,66E-5	1,5	2,95E-5	1,5	1,83E-5	1,5	1,02E-5	1,4	7,21E-6	1,6
Tecido ósseo	9,47E-5	0,26	8,50E-5	0,28	7,93E-5	0,32	5,94E-5	0,40	3,37E-5	0,54	1,37E-5	0,77
Esqueleto	9,15E-5	0,10	8,38E-5	0,15	7,27E-5	0,22	5,23E-5	0,32	2,94E-5	0,46	1,36E-5	0,63
Pele total	4,89E-7	11	1,07E-6	6,9	1,72E-6	4,8	2,23E-6	3,1	2,39E-6	2,1	2,21E-6	2,1
Baço	—	—	—	—	2,84E-7	44	2,00E-6	16	3,88E-6	8,2	4,19E-6	7,3
Testículos	—	—	—	—	—	—	—	—	9,16E-7	28	9,62E-7	27
Timo	—	—	—	—	—	—	2,23E-6	37	2,74E-6	19	3,40E-6	17
Tireóide	—	—	—	—	—	—	—	—	3,12E-6	25	2,00E-6	25
Tecido mole restante	7,86E-7	2,0	2,16E-6	1,1	3,85E-6	0,78	5,78E-6	0,53	5,67E-6	0,45	4,66E-6	0,47
Útero	—	—	—	—	7,56E-8	47	3,21E-6	16	9,53E-6	7,5	8,56E-6	7,5
Corpo total	1,43E-5	0,060	1,42E-5	0,046	1,39E-5	0,080	1,26E-5	0,13	9,25E-6	0,24	6,07E-6	0,35

continua ...

continuação

Órgão Alvo	Energia do fóton (MeV)											
	0,20		0,50		1,0		1,5		2,0		4,0	
	φ	C.V.	φ	C.V.	φ	C.V.	φ	C.V.	φ	C.V.	φ	C.V.
Adrenais	7,02E-6	19	7,25E-6	22	7,12E-6	27	9,36E-6	25	6,22E-6	35	5,94E-6	34
Parede da bexiga	4,51E-6	13	2,69E-6	17	2,70E-6	21	3,85E-6	22	4,42E-6	22	1,34E-6	40
Parede do estômago	3,14E-6	8,3	3,59E-6	11	2,69E-6	13	3,51E-6	13	3,68E-6	14	3,03E-6	16
Parede do intestino grosso superior	8,14E-6	4,9	7,12E-6	6,1	6,05E-6	7,8	6,99E-6	8,0	6,91E-6	8,6	5,12E-6	10
Parede do intestino grosso inferior	1,05E-5	5,0	9,28E-6	6,5	8,25E-6	7,8	7,86E-6	8,8	7,61E-6	9,2	6,76E-6	11
Intestino delgado	9,52E-6	2,3	8,53E-6	2,8	8,40E-6	3,2	7,65E-6	3,6	7,36E-6	3,8	6,33E-6	4,2
Rins	8,62E-6	4,3	8,73E-6	5,2	8,80E-6	6,0	7,63E-6	6,7	6,34E-6	7,6	5,90E-6	8,4
Fígado	3,59E-6	3,0	3,62E-6	3,4	3,32E-6	3,9	3,39E-6	4,0	3,34E-6	4,2	2,77E-6	4,8
Pulmões	4,33E-6	3,2	4,16E-6	3,9	3,92E-6	4,6	4,08E-6	4,9	3,49E-6	5,3	3,29E-6	5,9
Medula óssea hematopoética	2,06E-5	1,2	2,16E-5	1,5	2,01E-5	1,7	1,84E-5	1,9	1,72E-5	2,1	1,46E-5	2,3
Medula óssea adiposa	7,81E-6	1,9	8,26E-6	2,3	7,78E-6	2,8	7,15E-6	3,0	6,85E-6	3,2	5,63E-6	3,7
Tecido ósseo	8,81E-6	0,92	7,71E-6	1,1	7,12E-6	1,3	6,62E-6	1,4	6,05E-6	1,5	5,15E-6	1,7
Esqueleto	1,03E-5	0,70	9,78E-6	0,83	9,06E-6	0,96	8,38E-6	1,0	7,75E-6	1,1	6,58E-6	1,3
Pele total	2,29E-6	2,5	2,66E-6	3,0	2,59E-6	3,4	2,64E-6	3,6	2,50E-6	3,8	2,12E-6	4,3
Baço	4,15E-6	7,4	3,68E-6	9,9	3,63E-6	11	3,75E-6	12	4,16E-6	12	2,57E-6	16
Testículos	1,42E-6	20	6,59E-7	27	1,20E-6	42	1,49E-6	41	—	—	2,67E-6	36
Timo	2,85E-6	21	2,22E-6	34	2,53E-6	37	6,50E-6	25	3,68E-6	30	3,60E-6	36
Tireóide	3,39E-6	25	3,55E-6	33	1,44E-6	48	2,61E-6	37	2,24E-7	46	2,80E-6	49
Tecido mole restante	4,52E-6	0,49	4,59E-6	0,54	4,34E-6	0,61	4,12E-6	0,66	3,95E-6	0,70	3,22E-6	0,82
Útero	6,68E-6	8,8	6,19E-6	12	5,99E-6	14	6,85E-6	14	5,38E-6	17	3,49E-6	22
Corpo total	5,44E-6	0,36	5,39E-6	0,39	5,09E-6	0,44	4,82E-6	0,48	4,56E-6	0,51	3,78E-6	0,60

Tabela VIII

Fração Absorvida Específica ϕ e Coeficiente de Variação C.V. Fótons Monoenergéticos Uniformemente Distribuídos na Medula Óssea Adiposa

	Energia do fóton (MeV)											
	0,010		0,015		0,020		0,030		0,050		0,10	
	ϕ	C.V.	ϕ	C.V.	ϕ	C.V.	ϕ	C.V.	ϕ	C.V.	ϕ	C.V.
Adrenais	—	—	—	—	—	—	5,29E-6	31	3,63E-6	25	4,30E-6	21
Parede da bexiga	—	—	—	—	—	—	6,17E-7	39	1,41E-6	19	1,99E-6	17
Parede do estômago	—	—	—	—	—	—	1,52E-6	16	2,49E-6	9,3	3,24E-6	7,7
Parede do intestino grosso superior	—	—	6,43E-7	32	1,54E-6	18	3,67E-6	9,2	4,13E-6	6,3	4,10E-6	5,8
Parede do intestino grosso inferior	4,23E-7	48	1,59E-6	22	6,19E-6	11	7,36E-6	7,9	5,97E-6	6,8	4,33E-6	6,4
Intestino delgado	2,62E-7	24	6,91E-7	14	1,71E-6	8,2	3,70E-6	4,7	4,88E-6	3,4	4,38E-6	3,2
Rins	—	—	—	—	1,18E-6	19	3,44E-6	9,0	5,17E-6	5,8	4,43E-6	5,5
Fígado	3,74E-8	50	1,63E-7	23	9,51E-7	8,7	2,97E-6	4,5	4,15E-6	3,1	3,81E-6	2,9
Pulmões	—	—	3,95E-7	19	1,35E-6	9,6	4,03E-6	4,4	4,73E-6	3,0	3,72E-6	3,0
Medula óssea hematopoética	4,48E-5	1,5	3,75E-5	1,5	2,90E-5	1,6	1,85E-5	1,6	1,00E-5	1,6	7,46E-6	1,7
Medula óssea adiposa	5,41E-5	1,3	4,68E-5	1,4	3,90E-5	1,3	2,78E-5	1,2	1,65E-5	1,1	1,29E-5	1,3
Tecido ósseo	1,11E-4	0,19	1,05E-4	0,21	9,67E-5	0,24	7,53E-5	0,32	4,14E-5	0,48	1,59E-5	0,71
Esqueleto	9,29E-5	0,089	8,72E-5	0,13	7,87E-5	0,19	6,03E-5	0,28	3,33E-5	0,44	1,42E-5	0,63
Pele total	7,42E-7	8,9	1,51E-6	5,8	2,51E-6	4,0	3,07E-6	2,7	2,83E-6	2,0	2,53E-6	2,0
Baço	—	—	—	—	3,76E-7	41	3,05E-6	12	4,13E-6	7,7	3,54E-6	7,7
Testículos	—	—	—	—	—	—	—	—	3,70E-7	47	1,06E-6	36
Timo	—	—	—	—	—	—	2,47E-6	33	2,98E-6	19	2,00E-6	26
Tireóide	—	—	—	—	—	—	—	—	1,80E-6	31	1,04E-6	38
Tecido mole restante	5,02E-7	2,6	1,44E-6	1,4	2,57E-6	1,0	3,96E-6	0,68	4,10E-6	0,55	3,54E-6	0,55
Útero	—	—	—	—	—	—	1,32E-6	26	3,28E-6	13	2,65E-6	12
Corpo total	1,43E-5	0,060	1,42E-5	0,051	1,38E-5	0,089	1,22E-5	0,15	8,40E-6	0,28	5,09E-6	0,40

continua ...

continuação

Órgão Alvo	Energia do fóton (MeV)											
	0.20		0.50		1.0		1.5		2.0		4.0	
	Φ	C.V.	Φ	C.V.	Φ	C.V.	Φ	C.V.	Φ	C.V.	Φ	C.V.
Adrenais	3,32E-6	25	5,90E-6	25	3,86E-6	33	6,46E-6	33	2,94E-6	43	2,30E-6	56
Parede da bexiga	1,46E-6	21	2,06E-6	24	2,58E-6	27	8,62E-7	35	1,79E-6	38	2,32E-6	34
Parede do estômago	2,91E-6	9,1	2,37E-6	12	2,56E-6	15	3,00E-6	14	2,99E-6	15	2,65E-6	17
Parede do intestino grosso superior	3,96E-6	6,7	3,26E-6	9,3	3,35E-6	11	3,20E-6	12	3,52E-6	12	1,79E-6	17
Parede do intestino grosso inferior	3,85E-6	8,1	3,86E-6	10	3,03E-6	13	2,72E-6	15	4,04E-6	13	3,19E-6	15
Intestino delgado	3,86E-6	3,6	3,88E-6	4,3	3,52E-6	4,9	3,60E-6	5,1	3,40E-6	5,4	2,70E-6	6,4
Rins	4,05E-6	6,2	3,95E-6	7,8	3,98E-6	8,8	3,52E-6	9,9	3,98E-6	9,4	3,14E-6	11
Fígado	3,62E-6	3,1	3,73E-6	3,4	3,42E-6	3,9	3,59E-6	4,0	2,97E-6	4,5	2,72E-6	4,9
Pulmões	3,50E-6	3,5	3,80E-6	4,2	3,31E-6	5,1	3,07E-6	5,5	2,98E-6	5,8	2,70E-6	6,6
Medula óssea hematopoiética	7,70E-6	2,0	8,32E-6	2,4	7,72E-6	2,8	7,63E-6	3,0	6,86E-6	3,2	5,71E-6	3,7
Medula óssea adiposa	1,42E-5	1,5	1,55E-5	1,8	1,45E-5	2,0	1,29E-5	2,3	1,28E-5	2,4	9,74E-6	2,8
Tecido ósseo	1,02E-5	0,86	9,29E-6	1,0	8,66E-6	1,2	7,97E-6	1,3	7,45E-6	1,4	6,07E-6	1,6
Esqueleto	1,04E-5	0,71	1,00E-5	0,83	9,35E-6	0,94	8,62E-6	1,0	8,12E-6	1,1	6,54E-6	1,3
Pele total	2,87E-6	2,3	3,06E-6	2,8	2,93E-6	3,2	2,99E-6	3,4	2,89E-6	3,6	2,57E-6	4,0
Baço	3,75E-6	8,3	4,19E-6	9,9	4,07E-6	11	3,63E-6	12	2,80E-6	14	3,67E-6	14
Testículos	8,03E-7	31	—	—	1,82E-6	38	1,50E-6	39	1,30E-6	47	1,46E-6	50
Timo	2,05E-6	21	1,43E-6	38	2,50E-6	37	1,62E-6	41	2,78E-6	39	—	—
Tireóide	—	—	5,79E-7	43	—	—	2,54E-6	45	2,31E-6	49	—	—
Tecido mole restante	3,58E-6	0,56	3,70E-6	0,62	3,61E-6	0,69	3,40E-6	0,74	3,27E-6	0,78	2,74E-6	0,90
Útero	2,27E-6	15	2,62E-6	20	2,55E-6	21	2,41E-6	25	2,25E-6	27	3,76E-6	22
Corpo total	4,53E-6	0,41	4,57E-6	0,44	4,37E-6	0,49	4,12E-6	0,53	3,93E-6	0,56	3,27E-6	0,65

Tabela IX

Fração Absorvida Específica ϕ e Coeficiente de Variação C.V. Fótons Monoenergéticos Uniformemente Distribuídos no Esqueleto

Órgão Alvo	Energia do fóton (MeV)											
	0,010		0,015		0,020		0,030		0,050		0,10	
	ϕ	C.V.	ϕ	C.V.	ϕ	C.V.	ϕ	C.V.	ϕ	C.V.	ϕ	C.V.
Adrenais	-	-	-	-	-	-	3,37E-6	33	3,58E-6	22	5,19E-6	19
Parede da bexiga	-	-	-	-	-	-	5,46E-7	31	1,65E-6	18	1,90E-6	15
Parede do estômago	-	-	-	-	2,62E-7	47	8,09E-7	21	1,97E-6	11	2,01E-6	9,5
Parede do intestino grosso superior	-	-	6,55E-7	33	1,31E-6	20	2,47E-6	11	3,26E-6	7,4	2,74E-6	7,2
Parede do intestino grosso inferior	-	-	2,32E-6	20	3,83E-6	14	5,19E-6	9,2	5,54E-6	6,5	3,72E-6	6,8
intestino delgado	2,42E-7	26	5,09E-7	16	1,20E-6	9,9	2,45E-6	5,8	3,53E-6	4,0	3,20E-6	3,8
Rins	-	-	-	-	8,34E-7	22	3,52E-6	9,4	4,22E-6	6,6	2,95E-6	6,5
Fígado	-	-	1,15E-7	26	4,57E-7	13	1,84E-6	5,8	2,61E-6	3,9	2,61E-6	3,5
Pulmões	-	-	2,18E-7	26	1,05E-6	11	2,79E-6	5,1	3,98E-6	3,3	3,56E-6	3,1
Medula óssea hematopoética	4,13E-5	1,6	3,49E-5	1,6	2,77E-5	1,6	1,88E-5	1,6	1,09E-5	1,5	8,63E-6	1,6
Medula óssea adiposa	3,10E-5	1,8	2,77E-5	1,8	2,34E-5	1,8	1,65E-5	1,6	1,06E-5	1,4	8,36E-6	1,6
Tecido ósseo	1,17E-4	0,17	1,12E-4	0,18	1,05E-4	0,20	8,63E-5	0,27	5,36E-5	0,40	2,33E-5	0,61
Esqueleto	9,34E-5	0,08	8,89E-5	0,11	8,22E-5	0,16	6,66E-5	0,24	4,13E-5	0,38	1,90E-5	0,56
Pele total	4,62E-7	11	1,33E-6	6,2	1,72E-6	4,8	2,16E-6	0,32	2,43E-6	2,1	2,42E-6	2,0
Baço	-	-	-	-	6,06E-7	34	1,75E-6	16	2,74E-6	10	2,91E-6	8,5
Testículos	-	-	-	-	-	-	-	-	1,03E-6	34	1,94E-6	18
Timo	-	-	-	-	-	-	1,08E-6	39	1,77E-6	22	2,69E-6	22
Tireóide	-	-	-	-	-	-	1,17E-6	43	1,15E-6	35	1,87E-6	28
Tecido mole restante	3,99E-7	2,9	1,11E-6	1,7	2,04E-6	1,1	3,32E-6	0,77	3,79E-6	0,59	3,62E-6	0,54
Útero	-	-	-	-	-	-	1,80E-6	24	3,04E-6	13	1,94E-6	14
Corpo total	1,43E-5	0,060	1,42E-5	0,047	1,39E-5	0,079	1,27E-5	0,13	9,38E-6	0,24	5,87E-6	0,36

continua

Continuação

Órgão Alvo	Energia do fóton (MeV)											
	0,20		0,50		1,0		1,5		2,0		4,0	
	‡	C.V.	‡	C.V.	‡	C.V.	‡	C.V.	‡	C.V.	‡	C.V.
Adrenais	2,79E-6	26	5,51E-6	28	6,20E-6	28	2,80E-6	45	—	—	5,07E-6	40
Parede da bexiga	1,50E-6	19	1,78E-6	22	2,09E-6	29	1,28E-6	33	1,58E-6	34	1,20E-6	42
Parede do estômago	1,80E-6	11	2,14E-6	15	2,31E-6	15	2,45E-6	16	1,26E-6	23	1,62E-6	21
Parede do intestino grosso superior	2,68E-6	8,4	2,71E-6	10	2,49E-6	13	1,84E-6	14	2,43E-6	14	2,00E-6	17
Parede do intestino grosso inferior	4,64E-6	7,2	4,23E-6	9,5	3,74E-6	12	2,76E-6	14	2,83E-6	15	2,72E-6	16
Intestino delgado	2,92E-6	4,2	2,79E-6	5,0	2,66E-6	5,6	2,49E-6	6,2	2,36E-6	6,5	1,70E-6	7,9
Rins	3,61E-6	6,8	3,36E-6	8,4	3,56E-6	9,4	3,45E-6	10	3,02E-6	11	2,20E-6	13
Fígado	2,56E-6	3,5	2,47E-6	4,2	2,47E-6	4,5	2,23E-6	5,1	2,37E-6	5,0	1,88E-6	5,9
Pulmões	3,54E-6	3,5	3,19E-6	4,5	3,43E-6	5,0	2,98E-6	5,7	2,60E-6	6,2	2,16E-6	7,2
Medula óssea hematopoética	9,22E-6	1,8	9,77E-6	2,2	9,42E-6	2,5	8,56E-6	2,8	8,24E-6	3,0	6,32E-6	3,5
Medula óssea adiposa	9,11E-6	1,8	9,77E-6	2,2	9,26E-6	2,5	8,98E-6	2,7	8,29E-6	2,9	7,03E-6	3,4
Tecido ósseo	1,50E-5	0,73	1,33E-5	0,86	1,23E-5	0,99	1,11E-5	1,1	1,04E-5	1,2	8,92E-6	1,3
Esqueleto	1,34E-5	0,65	1,23E-5	0,85	1,14E-5	0,85	1,04E-5	0,94	0,76E-6	1,0	8,28E-6	1,1
Pele total	2,67E-6	2,3	3,07E-6	2,8	3,07E-6	3,1	3,01E-6	3,4	2,73E-6	3,7	2,41E-6	4,1
Baço	2,36E-6	10	3,05E-6	11	2,60E-6	14	2,24E-6	15	2,44E-6	15	1,62E-6	20
Testículos	2,43E-6	22	2,61E-6	26	1,91E-6	33	2,18E-6	33	1,45E-6	44	—	—
Timo	3,27E-6	21	2,24E-6	31	1,50E-6	40	2,54E-6	36	1,80E-6	45	2,33E-6	45
Tireóide	2,34E-6	31	1,56E-6	41	1,44E-6	44	2,15E-6	49	—	—	—	—
Tecido mole restante	3,72E-6	0,54	3,84E-6	0,60	3,69E-6	0,67	3,47E-6	0,73	3,31E-6	0,77	2,80E-6	0,85
Útero	2,26E-6	15	2,79E-6	19	2,44E-6	22	2,43E-6	24	1,58E-6	33	1,19E-6	37
Corpo total	5,09E-6	0,38	5,01E-6	0,41	4,77E-6	0,46	4,44E-6	0,50	4,20E-6	0,54	3,56E-6	0,62

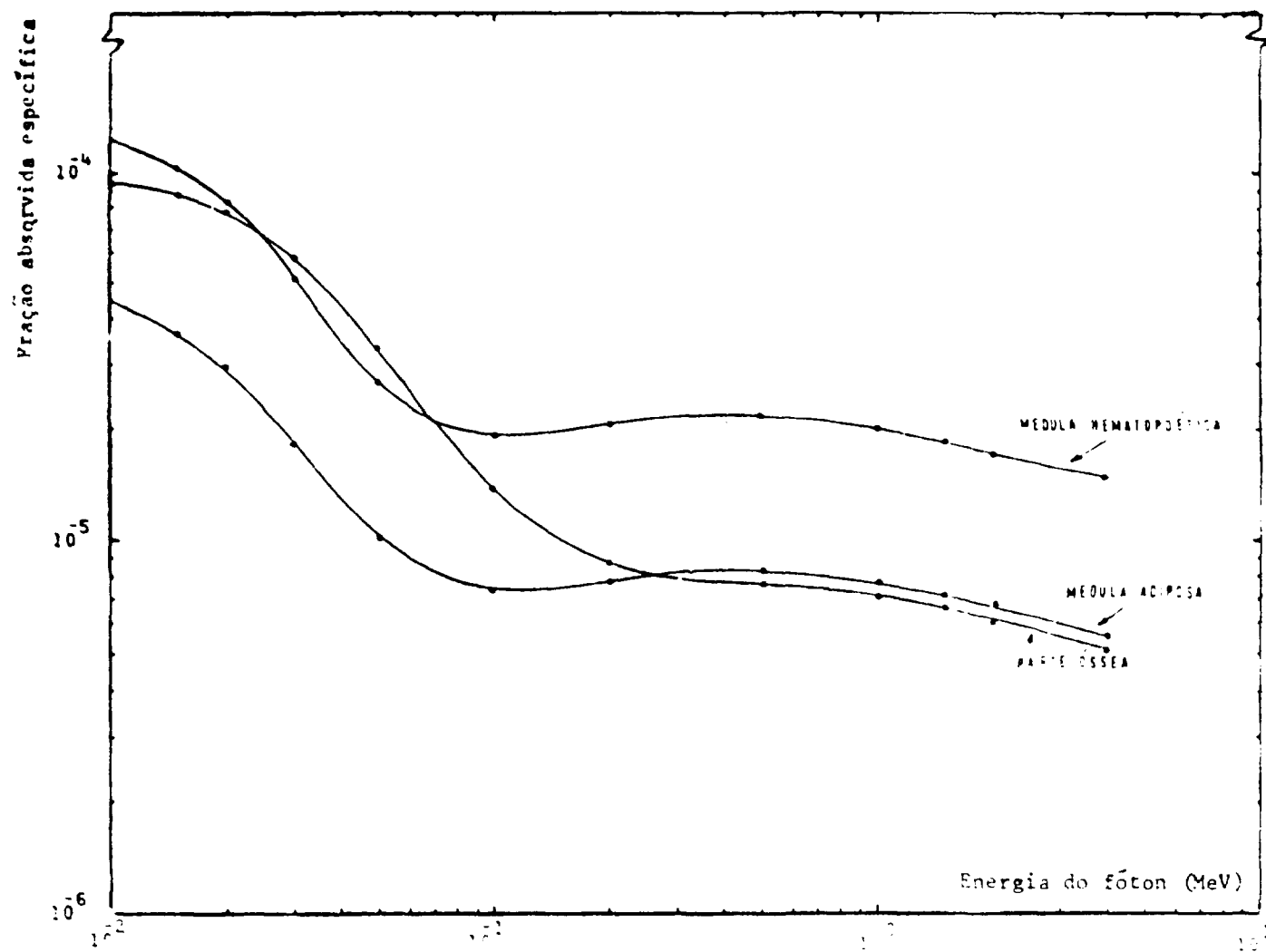


Figura 11 – Fração absorvida específica resultante de fótons na medula hematopoética

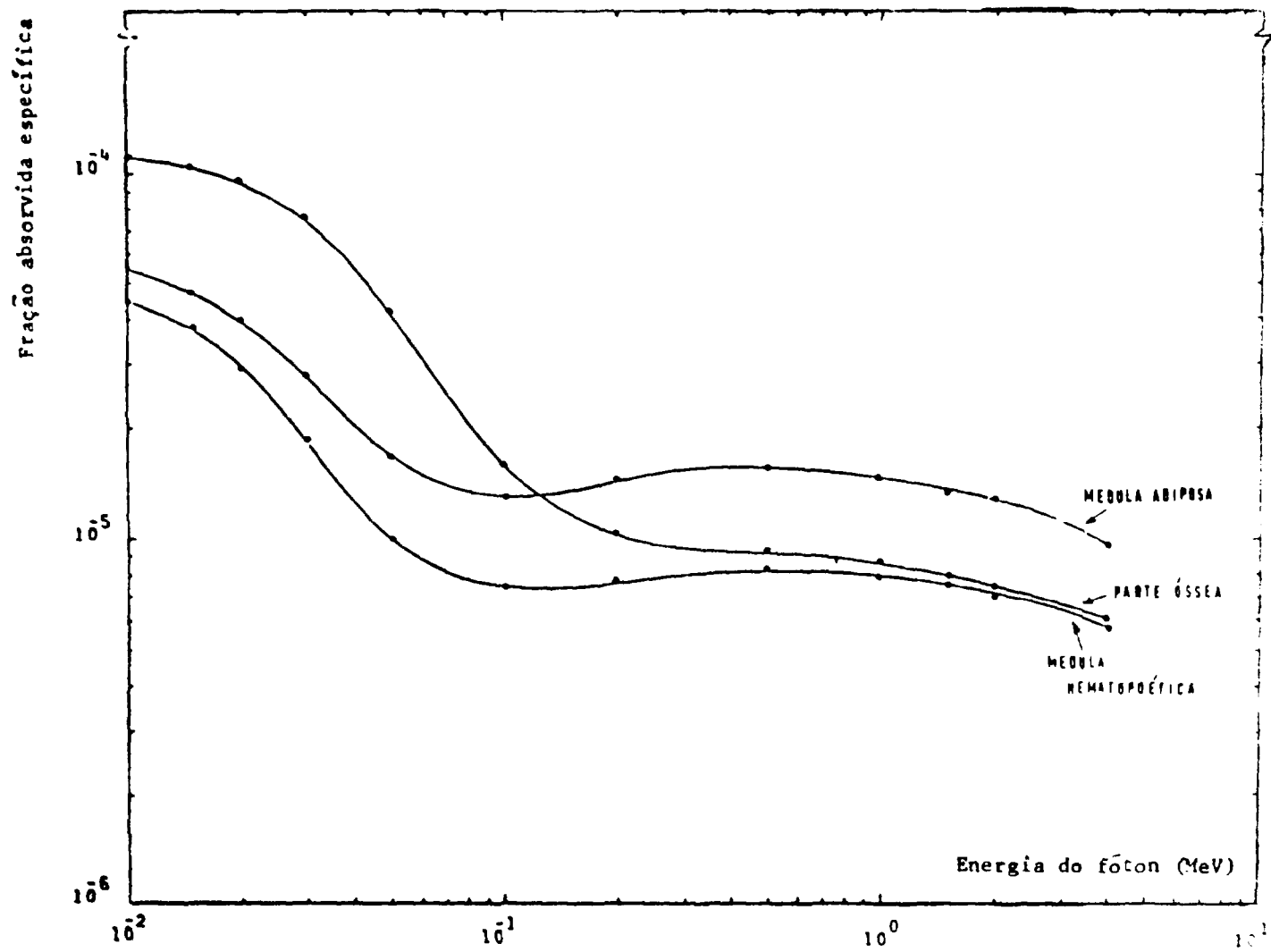


Figura 12 - Fração absorvida específica resultante de fótons na medida adiposa

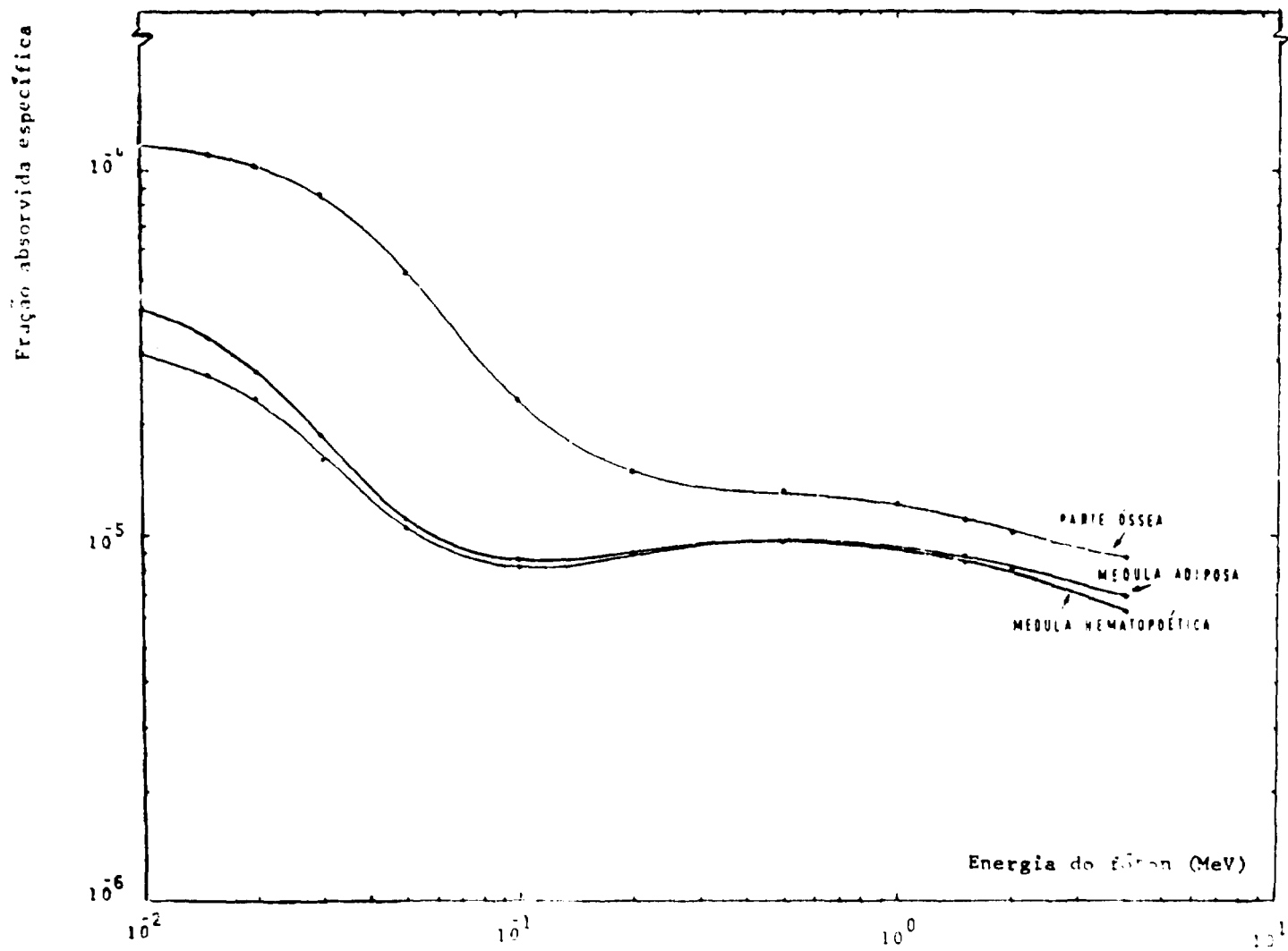


Figura 13 - Fração absorvida específica resultante de fótons no esqueleto

2.2 – Comparação com o Modelo Antigo

As frações absorvidas específicas do modelo antigo foram obtidas de Snyder et al.⁽⁴⁰⁾

As modificações efetuadas no programa original não deveriam provocar diferenças significativas nos valores de \bar{f} para o esqueleto visto como um todo, segundo o modelo antigo e o novo. A concordância obtida situou-se dentro de 20%. Tal diferença nos parece perfeitamente justificável, pois seria de se esperar uma concordância perfeita entre os dois valores somente se todos os ossos do esqueleto tivessem a mesma proporção de medula e tecido ósseo.

Para a medula hematopoética e medula adiposa verificou-se que no modelo novo as frações absorvidas específicas diminuíram de um fator 1,0 (na região Compton) a 4,0 (na região do fotopico), enquanto que, para o tecido ósseo, aumentaram de um fator 1,0 a 1,6. As alterações foram menos significativas para o tecido ósseo principalmente porque sua contribuição em massa para o esqueleto é maior que a contribuição de ambas as medulas.

Para os demais órgãos relacionados na referência supracitada, obteve-se um grau de concordância compatível com os valores dos coeficientes de variação e da localização de cada órgão.

Tomemos o exemplo típico da fração absorvida específica no intestino delgado, resultante de uma fonte de fótons localizada na medula hematopoética. No modelo novo, $\bar{f}_{(\text{intestino delgado})}$ é 2,7 vezes maior que no modelo antigo, para 10 KeV. Isto ocorre porque o intestino delgado está localizado junto à pelve (veja Figura 2 ou as integrações no Apêndice II); ela concentra mais de 1/3 dos fótons e 80% de sua massa é constituída de medula. No esqueleto heterogêneo a predominância de tecido mole na composição da pelve, em contraste com a composição do esqueleto do modelo antigo, faz com que muito maior número de fótons possam escapar da pelve e colidir no intestino.

2.3 – Exatidão dos Resultados

O cálculo da dose a partir da estimativa de \bar{f} no tecido ósseo precisa ser cuidadosamente interpretado, levando-se em consideração a localização de suas células mais radiosensíveis e que são, portanto, as mais importantes para a indução do câncer ósseo e as de maior interesse sob o ponto de vista de proteção radiológica. Viu-se no Capítulo II que tais células se localizam nas superfícies internas dos ossos.

Acontece, porém, que o presente método desenvolvido para a estimativa de \bar{f} não se aplica à interface entre o tecido ósseo e a medula, em virtude do escoamento dos elétrons secundários, que, no processo físico real, são produzidos em um meio mas vão perder parte de sua energia no outro. A Figura 14 ilustra de modo qualitativo a distribuição real de dose nos tecidos imediatamente adjacentes à superfície óssea, supondo que os fótons estejam uniformemente distribuídos nas duas regiões.

Neste trabalho, a energia depositada em cada meio é calculada supondo-se que o elétron secundário produzido em cada colisão perde toda sua energia no próprio local de interação, isto é, assume-se uma distribuição de dose conforme a Figura 15.

Tal hipótese parece ser perfeitamente válida em se tratando das cavidades medulares pois, na faixa de energia na qual as energias absorvidas em cada uma das duas regiões são substancialmente diferentes entre si, a dimensão média das cavidades (800 μm) é muito maior que o alcance no tecido mole dos fotoelétrons produzidos (130 μm para 100 keV, decrescendo para apenas 7 μm em 20 keV). O cálculo da dose na medula é então imediato, a partir do formalismo apresentado no Capítulo III.

Analogamente, a mesma hipótese é válida para as células contidas na matriz mineralizada; em casos de acidentes envolvendo altos níveis de radiação, a determinação da dose nestas células pode se tornar um fator importante na análise clínica do indivíduo exposto.

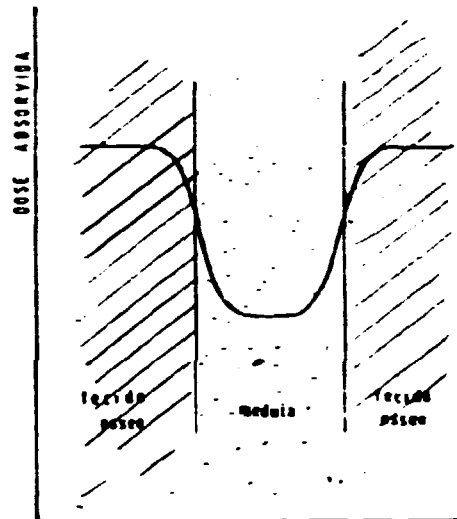


Figura 14 - Dose absorvida real na interface dos tecidos mole e ósseo

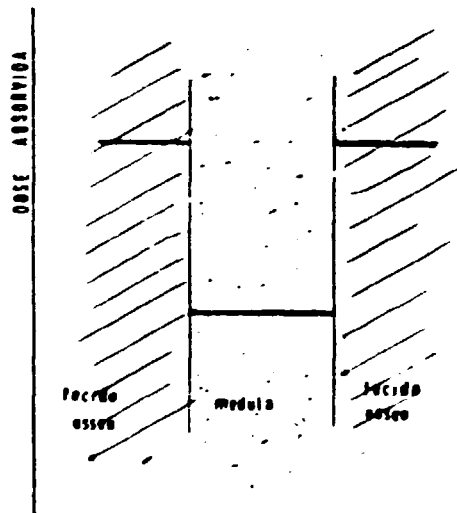


Figura 15 - Dose absorvida hipotética na interface dos tecidos mole e ósseo

Sob o aspecto de proteção radiológica, no entanto, a ICRP recomenda⁽¹⁵⁾ que o cálculo de dose no tecido ósseo seja feito considerando-se a radiosensibilidade das células endosteais localizadas até 10 μm da superfície óssea, motivo pelo qual, além do valor de Φ obtido, é necessário introduzir certos fatores geométricos de dose para representar a situação particular da interface. O problema foi contornado por Snyder et al.⁽⁴⁰⁾ ao considerar como sendo suficientemente representativa de tal situação, a dose no esqueleto como um todo.

Sugerimos, contudo, que se estude o comportamento da dose absorvida nas regiões próximas à interface do tecido ósseo com as cavidades medulares, para o caso de emissores X ou γ internos^(1,7,21,37,43,44,49). Isso permitiria extrapolar a dose absorvida nas células endosteais do esqueleto a partir das frações absorvidas específicas obtidas neste trabalho.

APÊNDICE I

**PRINCIPAIS QUANTIDADES E UNIDADES PARA
USO EM PROTEÇÃO RADIOLÓGICA**

Exposição (X): É o quociente de dQ por dm , onde dQ é o valor absoluto da carga total dos íons de um mesmo sinal produzidos no ar quando todos os elétrons (pósitrons e négatrons) liberados por fótons em um elemento de volume de ar, de massa dm , são completamente freados no ar.

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

A unidade especial de exposição é o Roentgen(R)

$$1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C} \cdot \text{Kg}^{-1}$$

Dose absorvida (D): É o quociente $d\bar{E}$ por dm , onde $d\bar{E}$ é a energia média cedida⁽¹²⁾ à matéria pela radiação ionizante, em um elemento de volume cuja massa é dm .

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm}$$

A unidade especial de dose absorvida é o rad (quando o rad puder ser confundido com o símbolo de radiano, permite-se usar rd como símbolo de rad).

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ J} \cdot \text{Kg}^{-1}$$

Dose equivalente (H): É o produto de D, Q e N, no ponto de interesse no tecido, onde D é a dose absorvida, Q é o fator de qualidade* e N é o produto de quaisquer outros fatores modificantes.**

$$H = DQN$$

(*) O fator de qualidade Q é um parâmetro introduzido na definição de dose equivalente que leva em consideração a dependência do dano biológico com a transferência linear de energia⁽¹²⁾.

(**) N é o produto de fatores modificantes tais como aqueles associados à distribuição da dose absorvida no tempo e no espaço. Pode assumir valor não unitário somente para fontes internas ao organismo.

A unidade especial de dose equivalente é o rem

$$1 \text{ rem} = 10^{-2} \text{ J} \cdot \text{Kg}^{-1}$$

Atividade (A): A atividade de uma quantidade de radionuclídeo é o quociente de dN por dt , onde dN é o número de transformações nucleares espontâneas que ocorrem nessa quantidade, no intervalo de tempo dt .

$$A = \frac{dN}{dt}$$

A unidade especial de atividade é o Curie (Ci)

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$$

Visando estender o uso do Sistema Internacional de Unidades (SI) à pesquisa e à radiologia, a Comissão Internacional de Unidades e Medidas de Radiação (ICRU) propôs e a Comissão Internacional de Pesos e Medidas adotou, em 1975, os seguintes nomes especiais do SI⁽²³⁾:

Para a atividade, Becquerel, símbolo Bq

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1} (\approx 2,703 \times 10^{-11} \text{ Ci})$$

Para a dose absorvida, Gray, símbolo Gy

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} \cdot \text{Kg}^{-1} (= 100 \text{ rad})$$

A ICRU não propôs nenhum nome especial para a unidade de exposição no SI, $\text{C} \cdot \text{Kg}^{-1}$, visto que a utilidade desta quantidade tende a se tornar progressivamente menos significativa.

A ICRU recomenda que as unidades especiais rad, Roentgen e Curie, sejam gradualmente substituídas pelas unidades do SI, Gray, $\text{C} \cdot \text{Kg}^{-1}$ e Becquerel, respectivamente, em um período aproximado de 10 anos.

Enquanto a ICRU estuda a seleção de uma unidade adequada para a dose equivalente, a ICRP recomenda⁽¹⁹⁾ o nome especial do SI, Sievert, símbolo Sv.

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J} \cdot \text{Kg}^{-1} (= 100 \text{ rem})$$

APÊNDICE II

DESCRIÇÃO DOS ÓRGÃOS INTERNOS DO "PHANTOM"⁽⁴⁰⁾

1 – Ossos do Esqueleto

Ossos da Perna

Os ossos da perna são representados por um cone circular truncado definido por

$$\left(x \mp 10 \mp \frac{8}{79,8} z\right)^2 + y^2 \leq \left(3,5 + \frac{2,5}{79,8} z\right)^2, \quad 79,8 \leq z \leq 0.$$

Os sinais superiores definem a perna esquerda. O volume de ambos os ossos é de 2799 cm³ e a massa, 4160 g.

Ossos do Braço

Os ossos do braço são representados por um cone elíptico truncado definido por

$$\left[\frac{\pm (1,4/138) (z - 69) + (x \mp 18,4)}{1,4}\right]^2 + \left(\frac{y}{2,7}\right)^2 \leq \left[\frac{138 + (z - 69)}{138}\right]^2, \quad 0 \leq z \leq 69.$$

Os sinais superiores definem o braço esquerdo. O volume de ambos os ossos é de 956 cm³ e a massa, 1421 g.

Pelve

A pelve é representada por uma porção de um volume entre dois cilindros circulares não concêntricos, descrita por

$$x^2 + (y + 3)^2 \leq (12)^2$$

$$x^2 + (y + 3,8)^2 \geq (11,3)^2$$

$$y + 3 \geq 0$$

$$0 \leq z \leq 22$$

$$y \leq 5 \quad \text{se} \quad z \leq 14$$

O volume da pelve é de 606,1 cm³ e a massa, 900,8 g.

Espinha

A espinha é representada por um cilindro elíptico dado por

$$\left(\frac{x}{2}\right)^2 + \left(\frac{y - 5,5}{2,5}\right)^2 \leq 1, \quad 22 \leq z \leq 78,5$$

O volume da espinha é de 887,5 cm³ e a massa, 1319 g. Ela é dividida em 3 regiões – superior, média e inferior – definidas pelos planos $z = 70$ e $z = 35,1$.

Cabeça

A cabeça é representada por um volume entre dois elipsóides não concêntricos definidos por

$$\left(\frac{x}{6}\right)^2 + \left(\frac{y}{9}\right)^2 + \left(\frac{z - 86,5}{6,5}\right)^2 \geq 1$$

$$\left(\frac{x}{6,8}\right)^2 + \left(\frac{y}{9,8}\right)^2 + \left(\frac{z - 85,5}{8,3}\right)^2 \leq 1$$

O volume da cabeça é de 846,6 cm³ e a massa, 1258 g. Ela é dividida em crânio e mandíbula; o crânio é definido pelo plano $z \geq -3y + 77$.

Costelas

As costelas são representadas por uma série de bandas situadas entre dois cilindros elípticos concêntricos, definidas por

$$\left(\frac{x}{17}\right)^2 + \left(\frac{y}{9,8}\right)^2 \leq 1$$

$$\left(\frac{x}{16,5}\right)^2 + \left(\frac{y}{9,3}\right)^2 \geq 1,$$

$35,1 \leq z \leq 67,3$ e com a condição de que a parte inteira de

$$\left(\frac{z - 35,1}{1,4}\right) \text{ seja par.}$$

O volume total das costelas é de 694 cm³ e a massa, 1031 g.

Clavículas

A clavícula é representada por duas porções de um toróide, definidas por

$$(z - 68,25)^2 + (20 - \sqrt{x^2 + (y - 11,1)^2})^2 \leq 0,7883^2 \text{ e}$$

$$0,89415 \leq \frac{11,1 - y}{\pm x} \leq 7,0342, \quad y \leq 0.$$

O sinal positivo de x define a clavícula esquerda. O volume de ambas as clavículas é de $54,7 \text{ cm}^3$ e a massa, 82 g.

Escápulas

A escápula é representada por uma porção de um volume entre dois cilindros elípticos, descrita por

$$\left(\frac{x}{19}\right)^2 + \left(\frac{y}{9,8}\right)^2 \leq 1$$

$$\left(\frac{x}{17}\right)^2 + \left(\frac{y}{9,8}\right)^2 > 1$$

$$50,9 \leq z \leq 67,3$$

$$y > 0, \quad 0,25 < \frac{y}{\pm x} < 0,80$$

O sinal positivo de x define a escápula esquerda. O volume de ambas as escápulas é de $201,4 \text{ cm}^3$ e a massa, 300 g.

2 – Glândulas Adrenais

Cada glândula adrenal é representada por uma semi-elipsóide definida por

$$\left(\frac{x - 4,5}{1,5}\right)^2 + \left(\frac{y - 6,5}{0,5}\right)^2 + \left(\frac{z - 38}{5}\right)^2 \leq 1, \quad z \geq 38$$

O volume de ambas as glândulas é de $15,71 \text{ cm}^3$ e a massa, 15,5 g.

3 – Bexiga

A parede da bexiga é representada por um volume entre dois elipsóides concêntricos definidos por

$$\left(\frac{x}{4,958}\right)^2 + \left(\frac{y + 4,5}{3,458}\right)^2 + \left(\frac{z - 8}{3,458}\right)^2 \leq 1$$

$$\left(\frac{x}{4,706}\right)^2 + \left(\frac{y+4,5}{3,206}\right)^2 + \left(\frac{z-8}{3,206}\right)^2 \geq 1$$

O volume da parede da bexiga é de 45,73 cm³ e a massa, 45,13 g. O seu volume interior é 202,6 cm³ e a massa, 200 g.

4 – Cérebro

O cérebro é representado por uma elipsóide definida por

$$\left(\frac{x}{6}\right)^2 + \left(\frac{y}{9}\right)^2 + \left(\frac{z-86,5}{6,5}\right)^2 \leq 1$$

O volume do cérebro é de 1470 cm³ e a massa, 1451 g.

5 – Trato Gastro-Intestinal

Estômago

A parede do estômago é representada por um volume entre dois elipsóides concêntricos definidos por

$$\left(\frac{x-8}{4}\right)^2 + \left(\frac{y+4}{3}\right)^2 + \left(\frac{z-35}{8}\right)^2 \leq 1 \quad \text{e}$$

$$\left(\frac{x-8}{3,387}\right)^2 + \left(\frac{y+4}{2,387}\right)^2 + \left(\frac{z-35}{7,387}\right)^2 \geq 1$$

O volume da parede do estômago é de 151,9 cm³ e a massa, 150 g. O seu volume interior é de 250,2 cm³ e a massa, 246,9 g.

Intestino Delgado

O intestino delgado é representado por uma secção de um cilindro circular definida por

$$x^2 + (y+3,8)^2 \leq (11,3)^2$$

$$-4,86 \leq y \leq 2,2$$

$$17 \leq z \leq 27$$

O volume total do intestino delgado é de 1054 cm³ e a massa, 1040 g.

Intestino Grosso Superior

O intestino grosso superior consiste de um colo ascendente e um colo transverso. O colo ascendente é definido pelas inequações

$$(x + 8,5)^2 + (y + 2,36)^2 \leq (2,5)^2 \quad e$$

$$(x + 8,5)^2 + (y + 2,36)^2 \geq (1,7915)^2,$$

$$14,45 \leq z \leq 24$$

A parede do colo ascendente tem um volume de $91,22 \text{ cm}^3$ e massa de $90,02 \text{ g}$. As inequações

$$(x + 8,5)^2 + (y + 2,36)^2 \leq (1,7915)^2 \quad e$$

$$14,45 \leq z \leq 24$$

definem o conteúdo do colo ascendente, cujo volume é de $96,29 \text{ cm}^3$ e a massa, $95,03 \text{ g}$.

O colo transverso é definido por

$$\left(\frac{y + 2,36}{2,5}\right)^2 + \left(\frac{z - 25,5}{1,5}\right)^2 \leq 1$$

$$\left(\frac{y + 2,36}{1,973}\right)^2 + \left(\frac{z - 25,5}{0,973}\right)^2 \geq 1$$

$$- 10,5 \leq x \leq 10,5$$

A parede do colo transverso tem um volume de $120,7 \text{ cm}^3$ e massa de $119,2 \text{ g}$. As inequações:

$$\left(\frac{y + 2,36}{1,973}\right)^2 + \left(\frac{z - 25,5}{0,973}\right)^2 \leq 1 \quad e$$

$$- 10,5 \leq x \leq 10,5$$

definem o conteúdo do colo transverso, cujo volume é de $126,7 \text{ cm}^3$ e a massa, 125 g .

Intestino Grosso Inferior

O intestino grosso inferior consiste de um colo descendente e um colo sigmóide. O colo descendente é definido pelas inequações:

$$\left(\frac{x - x_0}{1,88}\right)^2 + \left(\frac{y - y_0}{2,13}\right)^2 = 1$$

$$\left(\frac{x - x_0}{1,58}\right)^2 + \left(\frac{y - y_0}{1,34}\right)^2 \geq 1$$

$8,72 \leq z \leq 24$, onde

$$x_0 = 9 + \frac{0,28(z - 24)}{15,28} \text{ e}$$

$$y_0 = \frac{2,5(8,72 - z)}{15,28}$$

O colo descendente tem um volume de $90,59 \text{ cm}^3$ e massa de $89,40 \text{ g}$.

O colo sigmóide consiste de uma porção de dois toróides, definida pelas inequações:

$$(\sqrt{(x - 3)^2 + (z - 8,72)^2} - 5,72)^2 + y^2 \leq (1,57)^2$$

$$(\sqrt{(x - 3)^2 + (z - 8,72)^2} - 5,72)^2 + y^2 \geq (0,91)^2$$

$$x \geq 3 \quad \text{e} \quad z \leq 8,72 .$$

$$(\sqrt{(x - 3)^2 + z^2} - 3)^2 + y^2 \leq (1,57)^2$$

$$(\sqrt{(x - 3)^2 + z^2} - 3)^2 + y^2 \geq (0,91)^2$$

$$x \leq 3 \quad \text{e} \quad z \geq 0 .$$

O volume do colo sigmóide é de $70,42 \text{ cm}^3$ e a massa, $69,50 \text{ g}$.

6 – Coração

O coração é representado por uma semi-elipsóide associada a uma semi-esfera cortada por um plano, definidas por:

$$\left(\frac{x_1}{8}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{5}\right)^2 + \left(\frac{z_1}{5}\right)^2 \leq 1,$$

$$x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 \leq (5)^2 \quad \text{Se } x_1 < 0$$

$$\frac{x}{3} + \frac{y}{5} \leq 1 \quad \text{Se } x_1 < 0 .$$

onde

$$x_1 = 0,6943(x+1) - 0,3237(y+3) - 0,6428(z-51),$$

$$y_1 = 0,4226(x+1) + 0,9063(y+3) \quad e$$

$$z_1 = 0,5826(x+1) - 0,2717(y+3) + 0,7660(z-51) .$$

O volume do coração é de $603,1 \text{ cm}^3$ e a massa, $595,2 \text{ g}$.

7 – Rim

Cada rim é representado por uma elipsóide cortada por um plano, definidos por:

$$\left(\frac{x+6}{4,5}\right)^2 + \left(\frac{y+6}{1,5}\right)^2 + \left(\frac{z+32,5}{5,5}\right)^2 \leq 1 ,$$

$$x \geq 3$$

Os sinais negativos definem o rim esquerdo. O volume de ambos os rins é de 288 cm^3 e a massa, $284,2 \text{ g}$.

8 – Fígado

O fígado é representado por um cilindro elíptico cortado por um plano, definidos por:

$$\left(\frac{x}{16,5}\right)^2 + \left(\frac{y}{8}\right)^2 \leq 1 ,$$

$$\frac{x}{35} + \frac{y}{45} - \frac{z}{43} \leq 1 ,$$

$$27 \leq z \leq 43 .$$

O volume do fígado é de 1833 cm^3 e a massa, 1809 g .

9 – Pulmão

Cada pulmão é representado por uma semi-elipsóide com uma secção anterior removida, definida por:

$$\left(\frac{x+8,5}{5}\right)^2 + \left(\frac{y}{7,5}\right)^2 + \left(\frac{z-43,5}{24}\right)^2 \leq 1 , \quad z \geq 43,5$$

$$\left(\frac{x+2,5}{5}\right)^2 + \left(\frac{y}{7,5}\right)^2 + \left(\frac{z-43,5}{24}\right)^2 \geq 1, \quad \text{se } y < 0.$$

Os sinais inferiores definem o pulmão esquerdo. O volume de ambos os pulmões é de 3378 cm³ e a massa, 999,2 g.

10 – Ovário

Cada ovário é representado por uma elipsóide definida por:

$$(x \pm 6)^2 + \left(\frac{y}{0,5}\right)^2 + \left(\frac{z-15}{2}\right)^2 \leq 1$$

O sinal inferior define o ovário esquerdo. O volume de ambos os ovários é de 8,378 cm³ e a massa, 8,268 g.

11 – Pâncreas

O pâncreas é representado por uma semi-elipsóide com uma secção removida, definida por:

$$\left(\frac{x}{15}\right)^2 + y^2 + \left(\frac{z-37}{3}\right)^2 \leq 1,$$

$$x \geq 0,$$

$$z \geq 37 \quad \text{se } x > 3$$

O volume do pâncreas é de 61,07 cm³ e a massa, 60,27 g.

12 – Baço

O baço é representado por uma elipsóide definida por:

$$\left(\frac{x-11}{3,5}\right)^2 + \left(\frac{y-3}{2}\right)^2 + \left(\frac{z-37}{6}\right)^2 \leq 1$$

O volume do baço é de 175,9 cm³ e a massa, 173,6 g.

13 – Testículos

Cada testículo é representado por uma elipsóide definida por:

$$\left(\frac{x+1,3}{1,3}\right)^2 + \left(\frac{y+8}{1,5}\right)^2 + \left(\frac{z+2,3}{2,3}\right)^2 \leq 1$$

(6)

O sinal interior define o testículo esquerdo. O volume de ambos os testículos é de $37,57 \text{ cm}^3$ e a massa, $37,08 \text{ g}$.

14 – Timo

O timo é representado por uma elipsóide definida por:

$$\left(\frac{x+2}{3}\right)^2 + \left(\frac{y+6}{0,5}\right)^2 + \left(\frac{z-60,5}{4}\right)^2 \leq 1$$

O volume do timo é de $25,13 \text{ cm}^3$ e a massa, $24,80 \text{ g}$.

15 – Tireóide

Os lóbulos da tireóide estão situados entre dois cilindros concêntricos e são definidos pelas inequações:

$$x^2 + (y+6)^2 \leq (2,2)^2 ,$$

$$x^2 + (y+6)^2 \geq (1)^2 ,$$

$$y+6 \leq 0 ,$$

$$70 \leq z \leq 75 ,$$

$$[(y+6) - |x|]^2 \geq 2[x^2 + (y+6)^2]r^2 , \text{ onde}$$

$$r = \frac{2(\sqrt{2}-2)}{5}(z-70) + 1 \text{ para } 0 \leq z-70 \leq \frac{5}{4} \text{ e}$$

$$r = \frac{2(2-\sqrt{2})}{15}(z-70) + \frac{2\sqrt{2}-1}{3} \text{ para } \frac{5}{4} \leq z-70 \leq 5 .$$

O volume da tireóide é de $19,89 \text{ cm}^3$ e a massa, $19,63 \text{ g}$.

16 – Útero

O útero é representado por uma elipsóide cortada por um plano, definidos por:

$$\left(\frac{x}{2,5}\right)^2 + \left(\frac{y+2}{5}\right)^2 + \left(\frac{z-14}{1,5}\right)^2 \leq 1 ,$$

$$y \geq 4,5$$

O volume do útero é de $66,27 \text{ cm}^3$ e a massa, $65,40 \text{ g}$.

17 - Pele

A pele é representada por uma camada de 0,2 cm de espessura, que se estende por toda superfície exterior do *phantom*. O volume da pele é de 2828 cm³ e a massa, 2791 g.

APÊNDICE III

LISTAGEM DE SUB-ROTINAS DO ALGAM-100

```

C      FUNCTION FLTRNF(R)
C**
C**
C
FLTRNF  START
*      FUNCTION FLTRNF(R)
*      GENERATES UNIFORMLY DISTRIBUTED RANDOM NUMBERS
*      IN RANGE (0.,1.)
*      INTEGER*2 RANDOM,GENERA
*      COMMON/RANDOM/RANDUM(4),GENERA(2)
*      USING *,15
STM     0,4,SAVE
L       4,4
USING  RANDOM,4
L       1,RANDUM*4
M       0,6,GENERA
LTR     0,0
BP      PLUS
A       0,GENERA
PLJS   ST  1,RANDUM*4
        ST  0,SAVE
        L   1,RANDUM
        M   0,GENERA
        AL  1,SAVE
        STM 1,RANDUM*2
        LD  0,ZERO
        AD  0,RANDUM
        LM  0,4,SAVE
        BH  14
SAVE   DS  5F
        DS  00
ZERO   DC  X'4200000000000000'
J      DC  A(RANDUM)
RNDOM  CSECT
RANDOM  DC  X'420000071AFD4980'
GENERA DC  X'1AFD4980'
END

```

```

SUBROUTINE SOURCE
C**
C** FOTONS UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDOS NA MEDULA OSSEA HEMATOPOETICA
C**
REAL *BESQ
COMMON/GAMMA/X,Y,Z,ALP,BET,GAM,ENER,WGT,DUM(4),IMEDB,NRG,DOM,NAME
COMMON/PARAM/NGAMA,EZERO,DUM2(6),NMED
COMMON/SKEM/EUC(30),PROB(30),NUMEN(30),NE
COMMON/III/NJK(19),NCAX(19),NCAXT(19),ESQ(19)
P = FLTRNF(K)
IF (P .GT. 0.362) GO TO 75

C**
C** PELVIS
C**
51 X = 24. * FLTRNF(K) - 12.
L = 15
NCAX(L) = NCAX(L) + 1
NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
Y = 12. * FLTRNF(K) - 3.
Y1 = Y + 3.
Y2 = Y + 3.8
IF (X * X + Y1 * Y1 .GT. 144.16) GO TO 51
IF (X * X + Y2 * Y2 .LE. 127.69) GO TO 51
Z = 22. * FLTRNF(K)
IF (Z .LE. 14.16) GO TO 52
GO TO 100
52 IF (Y .GT. 5.16) GO TO 51
GO TO 100
75 IF (P .GT. 0.503) GO TO 95

C**
C** MIDDLE SPINE
C**
71 X = 4. * FLTRNF(K) - 2.
L = 7
NCAX(L) = NCAX(L) + 1
NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
Y = 5. * FLTRNF(K) - 2.5
IF ((X*X)/4. + (Y*Y)/6.25 .GT. 1.16) GO TO 71
Z = 34.4 * FLTRNF(K) + 35.1
Y = Y + 2.5
GO TO 100
95 IF (P .GT. 0.622) GO TO 85

C**
C** CRANIUM
C**
91 X = 15.0 * FLTRNF(K) - 6.8
L = 6
NCAX(L) = NCAX(L) + 1
NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
Y = 15.0 * FLTRNF(K) - 5.2
Z = 16.6 * FLTRNF(K) + 77.2
Z1 = Z - 80.5
Z2 = Z - 85.5
IF ((X*X)/36. + (Y*Y)/81. + (Z1*Z1)/42.25 .LE. 1.16) GO TO 91
IF ((X*X)/40.24 + (Y*Y)/90.04 + (Z2*Z2)/68.89 .GT. 1.16) GO TO 91
Z3 = 77.0 - 3. * Y
IF (Z .LE. 23) GO TO 91
GO TO 100
85 IF (P .GT. 0.751) GO TO 115

C**
C** LOWER SPINE
C**
81 X = 4. * FLTRNF(K) - 2.

```

```

      * 17
      NCAX(L) = NCAX(L) + 1
      NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
      Y = 5.2 * FLTRNF(R) + 2.5
      IF ((X*X)/25. + (Y*Y)/6.25 .GT. 1.160) GO TO 81
      Z = 13.1 * FLTRNF(R) + 2.2
      Y = Y + 5.5
      GO TO 100
115  IF (P .GT. 0.835) GO TO 135
C**
C**  RIGHT
C**
111  X = 39. * FLTRNF(R) - 17.
      L = 9
      NCAX(L) = NCAX(L) + 1
      NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
      Y = 12.6 * FLTRNF(R) - 9.8
      IF ((X*X)/272.25 + (Y*Y)/86.59 .GT. 1.160) GO TO 111
      IF ((X*X)/207. + (Y*Y)/96.04 .GT. 1.160) GO TO 111
      Z = 32.2 * FLTRNF(R) + 35.1
      Z1 = (Z - 35.1) / 1.9
      IZ1 = INT(Z1)
      KZ = MOD(IZ1,2)
      IF (KZ)111,100,111
135  IF (P .GT. 0.881) GO TO 15
C**
C**  SCAPULAE
C**
      IF (FLTRNF(R) .LE. 0.916) GO TO 130
C**
C**  LEFT SCAPULAE
C**
131  X = 7.2 * FLTRNF(R) + 9.9
      L = 13
      NCAX(L) = NCAX(L) + 1
      NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
      Y = 4.5 * FLTRNF(R) + 3.8
      IF ((X*X)/361. + (Y*Y)/96.04 .GT. 1.160) GO TO 131
      IF ((X*X)/289. + (Y*Y)/96.04 .LE. 1.160) GO TO 131
      Y1 = 0.80 * X
      IF (Y .GT. Y1) GO TO 131
      Y2 = 0.25 * X
      IF (Y .LE. Y2) GO TO 131
      Z = 16.4 * FLTRNF(R) + 50.9
      GO TO 100
C**
C**  RIGHT SCAPULAE
C**
133  X = 7.2 * FLTRNF(R) - 17.1
      L = 14
      NCAX(L) = NCAX(L) + 1
      NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
      Y = 4.5 * FLTRNF(R) + 3.8
      IF ((X*X)/361. + (Y*Y)/96.04 .GT. 1.160) GO TO 133
      IF ((X*X)/289. + (Y*Y)/96.04 .LE. 1.160) GO TO 133
      Y1 = -0.80 * X
      IF (Y .GT. Y1) GO TO 133
      Y2 = -0.25 * X
      IF (Y .LE. Y2) GO TO 133
      Z = 16.4 * FLTRNF(R) + 50.9
      GO TO 100
15  IF (P .GT. 0.919) GO TO 65
C**

```

```

C**  UPPER LEG BONE
C**
      IF (FLTRNF(R) .LE. 0.5) GO TO 10
C**
C**  LEFT UPPER LEG BONE
C**
11  X = 8.6 * FLTRNF(R) + 4.9
    L = 1
    NCAX(L) = NCAX(L) + 1
    NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
    Y = 7.0 * FLTRNF(R) - 3.5
    Z = -22.8 * FLTRNF(R)
    X1 = (X - 10. + (8.7/79.8) * Z)
    Z1 = (3.5 + (2.5/79.8) * Z)
    IF (X1 * X1 + (Y * Y) - Z1 * Z1 .GT. 0.160) GO TO 11
    GO TO 100
C**
C**  RIGHT UPPER LEG BONE
C**
10  X = 8.6 * FLTRNF(R) - 13.5
    L = 2
    NCAX(L) = NCAX(L) + 1
    NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
    Y = 7.0 * FLTRNF(R) - 3.5
    Z = -22.8 * FLTRNF(R)
    X1 = (X + 10. + (8.7/79.8) * Z)
    Z1 = (3.5 + (2.5/79.8) * Z)
    IF (X1 * X1 + (Y * Y) - Z1 * Z1 .GT. 0.160) GO TO 10
    GO TO 100
65  IF (P .GT. 0.955) GO TO 35
C**
C**  UPPER SPINE
C**
61  X = 4. * FLTRNF(R) - 2.
    L = 10
    NCAX(L) = NCAX(L) + 1
    NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
    Y = 5. * FLTRNF(R) - 2.5
    IF ((X*X)/4. + (Y*Y)/6.25 .GT. 1.160) GO TO 61
    Z = 8.5 * FLTRNF(R) + 70.
    Y = Y + 5.5
    GO TO 100
35  IF (P .GT. 0.972) GO TO 125
C**
C**  UPPER ARM BONE
C**
      IF (FLTRNF(R) .LE. 0.5) GO TO 30
C**
C**  LEFT UPPER ARM BONE
C**
31  X = 2.8 * FLTRNF(R) + 17.
    L = 10
    NCAX(L) = NCAX(L) + 1
    NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
    Y = 5.4 * FLTRNF(R) - 2.7
    Z = 16.4 * FLTRNF(R) + 52.0
    X1 = (1.4 / 138.) * (Z - 69.) + (X - 18.4)
    Z1 = 69. + Z
    IF (((X1*X1)/1.96 + (Y*Y)/7.29 - (Z1*Z1)/19044.) .GT. 0.160) GO TO 31
    GO TO 100
C**
C**  RIGHT UPPER ARM BONE
C**

```

```

30  X = 2.8 * FLTRNF(R) - 19.8
    L = 11
    NCAX(L) = NCAX(L) + 1
    NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
    Y = 5.4 * FLTRNF(R) - 2.7
    Z = 16.4 * FLTRNF(R) + 52.0
    X1 = (X + 18.4) - (1.4/138.) * (Z - 69.)
    Z1 = 69. + Z
    IF (((X1*X1)/1.96 + (Y*Y)/7.29 - (Z1*Z1)/19044.) .GT. 0.) GO TO 30
    GO TO 100
125 IF (P .GT. 0.988) GO TO 101
C**
C** LEFT CLAVICLE
C**
    IF (FLTRNF(R) .LE. 0.5) GO TO 120
121 X = 12.8 * FLTRNF(R) + 2.7
    L = 18
    NCAX(L) = NCAX(L) + 1
    NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
    Y = 7.5 * FLTRNF(R) - 9.5
    Z = 1.5766 * FLTRNF(R) + 67.4617
    Y1 = (Y - 11.1)
    X1 = SQRT(X*X + Y1*Y1)
    X2 = 20. - X1
    Z2 = Z - 68.25
    C = 0.7883 **2
    IF (Z2*Z2 + X2*X2 .GT. C) GO TO 121
    Y2 = 11.1 - 7.0342 * X
    IF (Y .LE. Y2) GO TO 121
    Y3 = 11.1 - 0.89415 * X
    IF (Y .GT. Y3) GO TO 121
    GO TO 100
C**
C** RIGHT CLAVICLE
C**
120 X = 12.8 * FLTRNF(R) - 15.5
    L = 19
    NCAX(L) = NCAX(L) + 1
    NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
    Y = 7.5 * FLTRNF(R) - 9.5
    Z = 1.5766 * FLTRNF(R) + 67.4617
    Y1 = (Y - 11.1)
    X1 = SQRT(X*X + Y1*Y1)
    X2 = 20. - X1
    Z2 = Z - 68.25
    C = 0.7883 **2
    IF (Z2*Z2 + X2*X2 .GT. C) GO TO 120
    Y2 = 11.1 + 7.0342 * X
    IF (Y .LE. Y2) GO TO 120
    Y3 = 11.1 + 0.89415 * X
    IF (Y .GT. Y3) GO TO 120
    GO TO 100
C**
C** MANDIBLE
C**
101 X = 13.2 * FLTRNF(R) - 6.6
    L = 12
    NCAX(L) = NCAX(L) + 1
    NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
    Y = -9.8 * FLTRNF(R)
    Z = 15.4 * FLTRNF(R) + 77.
    Z1 = Z - 60.5
    Z2 = Z - 80.5

```



```
IF ((X*X)/36. + (Y*Y)/81. + (Z1*Z1)/42.25 .LE. 1.)GO TO 101
IF ((X*X)/46.24 + (Y*Y)/96.04 + (Z2*Z2)/68.89 .GT. 1.)GO TO 101
Z3 = 77. - 3.* Y
IF (Z .GT. Z3)GO TO 101
GO TO 100
100 CONTINUE
CALL GTISU(ALP,BET,GAM)
NOR(L) = NOR(L) + 1
ENER = EZERO
WGT = 1.
IMEDB = 2
NCAX(L) = 0
RETURN
END
```

```

SUBROUTINE SURFCE
C**
C** FOTONS UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDOS NA MEDULA ADIPUSA
C**
REAL *BESQ
COMMON/GAM4B/X,Y,Z,ALP,BET,GAM,ENER,*GT,DUM(4),IMEDB,NRG,DUM,N4M
COMMON/PARAM/NGAMA,EZERU,DUM2(6),NMED
COMMON/SKEM/EU(30),PRUB(30),NUMEN(30),NE
COMMON/DIF/NUK(19),NCAX(19),NCAXT(19),ESQ(19)
P = FLTRNF (R)
IF (P .GT. 0.307333) GO TO 45

C**
C** LOWER LEG BONE
C**
IF (FLTRNF(R) .LE. 0.5)GO TO 20

C**
C** LEFT LOWER LEG BONE
C**
21 X = 14. * FLTRNF(R)
L = 1
NCAX(L) = NCAX(L) + 1
NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
Y = 8.0 * FLTRNF(R) - 4.
Z = 57. * FLTRNF(R) - 79.8
X1 = X - 10. - (8./79.8) * Z
Z1 = 3.5 + (2.5/79.8) * Z
IF ((X1 * X1 + Y * Y - Z1 * Z1) .GT. 0.)GO TO 21
GO TO 100

C**
C** RIGHT LOWER LEG BONE
C**
20 X =-14. * FLTRNF(R)
L = 2
NCAX(L) = NCAX(L) + 1
NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
Y = 8.0 * FLTRNF(R) - 4.
Z = 57. * FLTRNF(R) - 79.8
X1 = X + 10. + (8./79.8) * Z
Z1 = 3.5 + (2.5/79.8) * Z
IF ((X1 * X1 + Y * Y - Z1 * Z1) .GT. 0.)GO TO 20
GO TO 100

C**
C** LOWER ARM BONE
C**
45 IF (P .GT. 0.500007) GO TO 115
IF (FLTRNF(R) .LE. 0.5)GO TO 40

C**
C** LEFT LOWER ARM BONE
C**
41 X = 2.8 * FLTRNF(R) + 17.0
L = 3
NCAX(L) = NCAX(L) + 1
NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
Y = 5.4 * FLTRNF(R) - 2.7
Z = 52.6 * FLTRNF(R)
X1 = (1.4/138.) * (Z - 69.1) + (X - 18.4)
Z1 = 69. + Z
IF ((X1*X1)/1.96 + (Y*Y)/7.29 - (Z1*Z1)/19044. .GT. 0.)GO TO 41
GO TO 100

C**
C** RIGHT LOWER ARM BONE
C**
40 X = 2.8 * FLTRNF(R) - 17.0

```

```

L = 4
NCAX(L) = NCAX(L) + 1
NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
Y = 5.4 * FLTRNF(R) - 2.7
Z = 52.6 * FLTRNF(R)
X1 = (X + 18.4) - (1.4/138.) * (Z - 69.)
Z1 = 69. + Z
IF ((X1*X1)/1.96 + (Y*Y)/7.29 - (Z1*Z1)/19044. .GT. 0.)GO TO 90
GO TO 100
115 IF (P .GT. 0.700667) GO TO 55
C**
C** RIBS
C**
111 X = 34. * FLTRNF(R) - 17.
L = 5
NCAX(L) = NCAX(L) + 1
NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
Y = 19.6 * FLTRNF(R) - 9.8
IF ( (X * X) / 272.25 + (Y * Y) / 86.49 .LE. 1.)GO TO 111
IF ( (X * X) / 289. + (Y * Y) / 96.04 .GT. 1.)GO TO 111
Z = 32.2 * FLTRNF(R) + 35.1
Z1 = (Z - 35.1) / 1.4
I21 = INT(Z1)
K2 = MOD(I21,2)
IF (K2)111,100,111
55 IF (P .GT. 0.821333) GO TO 75
C**
C** PELVIS
C**
51 X = 24. * FLTRNF(R) - 12.
L = 6
NCAX(L) = NCAX(L) + 1
NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
Y = 12. * FLTRNF(R) - 3.
Y1 = Y + 3.
Y2 = Y + 3.8
IF (X * X + Y1 * Y1 .GT. 144.)GO TO 51
IF (X * X + Y2 * Y2 .LE. 127.69)GO TO 51
Z = 22. * FLTRNF(R)
IF (Z .LE. 14.)GO TO 52
GO TO 100
52 IF (Y .GT. 5.)GO TO 51
GO TO 100
75 IF (P .GT. 0.868333) GO TO 95
C**
C** MIDDLE SPINE
C**
71 X = 4. * FLTRNF(R) - 2.
L = 7
NCAX(L) = NCAX(L) + 1
NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
Y = 5. * FLTRNF(R) - 2.5
IF ((X*X)/4. + (Y*Y)/6.25 .GT. 1.)GO TO 71
Z = 34.9 * FLTRNF(R) + 35.1
Y = Y + 5.5
GO TO 100
95 IF (P .GT. 0.908000) GO TO 95
C**
C** CRANIUM
C**
91 X = 13.6 * FLTRNF(R) - 6.8
L = 8
NCAX(L) = NCAX(L) + 1

```

```

NCAX(TL) = NCAX(TL) + 1
Y = 15.0 * FLTRNF(R) - 5.2
Z = 16.6 * FLTRNF(R) + 77.2
Z1 = Z - 86.5
Z2 = Z - 69.5
IF ((X*X)/36. + (Y*Y)/61. + (Z1*Z1)/42.25 .LE. 1.)GO TO 91
IF ((X*X)/46.24 + (Y*Y)/96.04 + (Z2*Z2)/68.89 .GT. 1.)GO TO 91
Z3 = 77.0 - 3. * Y
IF (Z .LE. Z3)GO TO 91
GO TO 100
85 IF (P .GT. 0.944333) GO TO 135
C**
C** LOWER SPIRE
C**
81 X = 4. * FLTRNF(R) - 2.
L = 9
NCAX(L) = NCAX(L) + 1
NCAX(TL) = NCAX(TL) + 1
Y = 5. * FLTRNF(R) - 2.5
IF ((X*X)/4. + (Y*Y)/6.25 .GT. 1.)GO TO 81
Z = 13.1 * FLTRNF(R) + 22.
Y = Y + 5.5
GO TO 100
135 IF (P .GT. 0.960333) GO TO 15
C**
C** SCAPULAE
C**
IF (FLTRNF(R) .LE. 0.5)GO TO 130
C**
C** LEFT SCAPULAE
C**
131 X = 7.2 * FLTRNF(R) + 9.9
L = 10
NCAX(L) = NCAX(L) + 1
NCAX(TL) = NCAX(TL) + 1
Y = 4.5 * FLTRNF(R) + 3.8
IF ((X*X)/361. + (Y*Y)/96.04 .GT. 1.)GO TO 131
IF ((X*X)/289. + (Y*Y)/96.04 .LE. 1.)GO TO 131
Y1 = 0.80 * X
IF (Y .GT. Y1)GO TO 131
Y2 = 0.25 * X
IF (Y .LE. Y2)GO TO 131
Z = 16.4 * FLTRNF(R) + 50.9
GO TO 100
C**
C** RIGHT SCAPULAE
C**
130 X = 7.2 * FLTRNF(R) - 17.1
L = 11
NCAX(L) = NCAX(L) + 1
NCAX(TL) = NCAX(TL) + 1
Y = 4.5 * FLTRNF(R) + 3.8
IF ((X*X)/361. + (Y*Y)/96.04 .GT. 1.)GO TO 130
IF ((X*X)/289. + (Y*Y)/96.04 .LE. 1.)GO TO 130
Y1 = -0.80 * X
IF (Y .GT. Y1)GO TO 130
Y2 = -0.25 * X
IF (Y .LE. Y2)GO TO 130
Z = 16.4 * FLTRNF(R) + 50.9
GO TO 100
15 IF (P .GT. 0.973000) GO TO 65
C**
C** UPPER LEG BONE

```

```

C**
      IF (FLTRNF(R) .LE. 0.0) GO TO 10
C**
C** LEFT UPPER LEG BONE
C**
11  X = 14. * FLTRNF(R)
      L = 12
      NCAX(L) = NCAX(L) + 1
      NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
      Y = 8.0 * FLTRNF(R) - 4.
      Z = -22.8 * FLTRNF(R)
      X1 = (X - 10. - (8./79.8) * Z)
      Z1 = (3.5 + (2.5/79.8) * Z)
      IF (X1 * X1 + (Y * Y) - Z1 * Z1 .GT. 0.1) GO TO 11
      GO TO 100
C**
C** RIGHT UPPER LEG BONE
C**
C**
10  X = -14. * FLTRNF(R)
      L = 13
      NCAX(L) = NCAX(L) + 1
      NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
      Y = 8.0 * FLTRNF(R) - 4.
      Z = -22.8 * FLTRNF(R)
      X1 = (X + 10. + (8./79.8) * Z)
      Z1 = (3.5 + (2.5/79.8) * Z)
      IF (X1 * X1 + (Y * Y) - Z1 * Z1 .GT. 0.1) GO TO 10
      GO TO 100
      IF (P .GT. 0.984333) GO TO 35
C**
C** UPPER SPINE
C**
61  X = 4. * FLTRNF(R) - 2.
      L = 14
      NCAX(L) = NCAX(L) + 1
      NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
      Y = 5. * FLTRNF(R) - 2.5
      IF ((X*X)/4. + (Y*Y)/6.25 .GT. 1.1) GO TO 61
      Z = 8.5 * FLTRNF(R) + 70.
      Y = Y + 5.5
      GO TO 100
      IF (P .GT. 0.990667) GO TO 125
C**
C** UPPER ARM BONE
C**
      IF (FLTRNF(R) .LE. 0.0) GO TO 30
C**
C** LEFT UPPER ARM BONE
C**
31  X = 2.8 * FLTRNF(R) + 17.
      L = 15
      NCAX(L) = NCAX(L) + 1
      NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
      Y = 5.4 * FLTRNF(R) - 2.7
      Z = 10.4 * FLTRNF(R) + 52.6
      X1 = (1.4 / 130.) * (Z - 69.) + (X - 18.4)
      Z1 = 69. + Z
      IF ((X1*X1)/1.46 + (Y*Y)/7.24 - (Z1*Z1)/19044.) .GT. 0.1) GO TO 31
      GO TO 100
C**
C** RIGHT UPPER ARM BONE
C**
C**
30  X = 2.8 * FLTRNF(R) - 17.0

```

```

      NCAX(L) = NCAX(L) + 1
      NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
      Y = 5.4 * FLTRNF(R) - 2.7
      Z = 16.4 * FLTRNF(R) + 52.6
      X1 = (X + 13.4) - (1.9/136.) * (Z - 69.)
      Z1 = 69. + Z
      IF ((X1*X1)/1.96 + (Y*Y)/7.29 + (Z1*Z1)/13044.) .GT. 0.160 TO 30
      GO TO 100
125 IF (P .GT. 0.996000) GO TO 101
C**
C** LEFT CLAVICLE
C**
      IF (FLTRNF(R) .LE. 0.5160 TO 120
121 X = 12.8 * FLTRNF(R) + 2.7
      L = 17
      NCAX(L) = NCAX(L) + 1
      NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
      Y = 7.5 * FLTRNF(R) - 9.5
      Z = 1.5766 * FLTRNF(R) + 67.4617
      Y1 = (Y - 11.1)
      X1 = SQRT(X*X + Y1*Y1)
      X2 = 20. - X1
      Z2 = Z - 68.25
      C = 0.7883 **2
      IF (Z2*Z2 + X2*X2 .GT. 0) GO TO 121
      Y2 = 11.1 - 7.0342 * X
      IF (Y .LE. Y2) GO TO 121
      Y3 = 11.1 - 0.89415 * X
      IF (Y .GT. Y3) GO TO 121
      GO TO 100
C**
C** RIGHT CLAVICLE
C**
120 X = 12.8 * FLTRNF(R) - 15.5
      L = 18
      NCAX(L) = NCAX(L) + 1
      NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
      Y = 7.5 * FLTRNF(R) - 9.5
      Z = 1.5766 * FLTRNF(R) + 67.4617
      Y1 = (Y - 11.1)
      X1 = SQRT(X*X + Y1*Y1)
      X2 = 20. - X1
      Z2 = Z - 68.25
      C = 0.7883 **2
      IF (Z2*Z2 + X2*X2 .GT. 0) GO TO 120
      Y2 = 11.1 + 7.0342 * X
      IF (Y .LE. Y2) GO TO 120
      Y3 = 11.1 + 0.89415 * X
      IF (Y .GT. Y3) GO TO 120
      GO TO 100
C**
C** MANDIBLE
C**
101 X = 13.2 * FLTRNF(R) - 6.6
      L = 19
      NCAX(L) = NCAX(L) + 1
      NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
      Y = -9.8 * FLTRNF(R)
      Z = 15.4 * FLTRNF(R) + 77.7
      Z1 = Z - 80.5
      Z2 = Z - 85.5
      IF ((X*X)/36. + (Y*Y)/81. + (Z1*Z1)/42.25 .LE. 1.) GO TO 101

```

```
IF ((X*X)/46.24 + (Y*Y)/96.04 + (Z*Z)/68.89 .GT. 1.)GO TO 101
Z3 = 77. - 3.* Y
IF (Z .GT. Z3)GO TO 101
GO TO 100
100 CONTINUE
NOR(L) = NOR(L) + 1
NCAX(L) = 0
CALL GTISU(ALP,HET,GAM)
ENER = EZERO
WGT = 1.
IMEUB = 2
RETURN
END
```

```

SUBROUTINE BONE
C**
C** FIBERS HORNENERGETICS UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDOS
C**
      REAL *BESU
      COMMON/GAMMB/X,Y,Z,ALP,BET,GAM,ENERK,WGT,DUM(4),IMEUB,NRG,DUM,NAME
      COMMON/PARAM/NGAMA,EZERO,DUM2(6),NMED
      COMMON/SLEM/EU(30),PROB(30),NUMEN(30),NE
      COMMON/DIF/NOR(19),NCAX(19),NCAXT(19),ESU(19)
      P = FLTRNF(R)
      IF (P .GT. 0.397226) GO TO 155
C**
C** LEG BONE
C**
      IF (FLTRNF(R) .LE. 0.5) GO TO 140
C**
C** LEFT LEG BONE
C**
141  X = 12.5 * FLTRNF(R) + 1.
      L = 1
      NCAX(L) = NCAX(L) + 1
      NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
      Y = 7. * FLTRNF(R) - 3.5
      Z = -79.8 * FLTRNF(R)
      X1 = X - 10. + (8./79.8) * Z
      Z1 = (3.5 + (2.5/79.8) * Z)
      IF (X1 * X1 + Y * Y - Z1 * Z1 .GT. 0.) GO TO 141
      GO TO 100
C**
C** RIGHT LEG BONE
C**
140  X = 12.5 * FLTRNF(R) - 13.5
      L = 2
      NCAX(L) = NCAX(L) + 1
      NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
      Y = 7. * FLTRNF(R) - 3.5
      Z = -79.8 * FLTRNF(R)
      X1 = X + 10. + (8./79.8) * Z
      Z1 = (3.5 + (2.5/79.8) * Z)
      IF (X1 * X1 + Y * Y - Z1 * Z1 .GT. 0.) GO TO 140
      GO TO 100
155  IF (P .GT. 0.532869) GO TO 165
C**
C** ARM BONE
C**
      IF (FLTRNF(R) .LE. 0.5) GO TO 150
C**
C** LEFT ARM BONE
C**
151  X = 2.8 * FLTRNF(R) + 17.
      L = 3
      NCAX(L) = NCAX(L) + 1
      NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
      Y = 5.4 * FLTRNF(R) - 2.7
      Z = 69. * FLTRNF(R)
      X1 = ((1.4/138.) * (Z - 69.) + (X - 18.4)) / 1.4
      Z1 = (69. + Z) / 138.
      IF (X1 * X1 + Y * Y / 7.29 - Z1 * Z1 .GT. 0.) GO TO 151
      GO TO 100
C**
C** RIGHT ARM BONE
C**
150  X = 2.8 * FLTRNF(R) - 17.8

```



```

L = 4
NCAX(L) = NCAX(L) + 1
NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
Y = 5.4 * FLTRNF(R) - 2.7
Z = 69. * FLTRNF(R)
X1 = ((X + 18.4) - (1.4/138.) * (Z-69.))/1.4
Z1 = (69. + Z) / 138.
IF (X1 * X1 + Y * Y/7.29 - Z1 * Z1 .GT. 0.160) GO TO 150
GO TO 100
165 IF (P .GT. 0.658749) GO TO 175
C**
C** SPINE
C**
161 X = 4. * FLTRNF(R) - 2.
L = 5
NCAX(L) = NCAX(L) + 1
NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
Y = 5. * FLTRNF(R) - 2.5
IF (X * X/ 4. + Y * Y/6.25 .GT. 1.) GO TO 161
Z = 50.5 * FLTRNF(R) + 22.
Y = Y + 5.5
GO TO 100
175 IF (P .GT. 0.778927) GO TO 175
C**
C** SKULL
C**
171 X = 13.6 * FLTRNF(R) - 0.8
L = 6
NCAX(L) = NCAX(L) + 1
NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
Y = 19.6 * FLTRNF(R) - 9.8
Z = 10.6 * FLTRNF(R) + 77.2
Z1 = Z - 80.5
Z2 = Z - 80.5
IF (X * X/36. + Y * Y/81. + Z1 * Z1/42.25 .LE. 1.) GO TO 171
IF (X * X/46.24 + Y * Y/96.04 + Z2 * Z2/68.89 .GT. 1.) GO TO 171
GO TO 100
175 IF (P .GT. 0.877406) GO TO 55
C**
C** RIBS
C**
111 X = 34. * FLTRNF(R) - 17.
L = 7
NCAX(L) = NCAX(L) + 1
NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
Y = 19.6 * FLTRNF(R) - 9.8
IF ( (X * X) / 272.25 + (Y * Y) / 80.49 .LE. 1.) GO TO 111
IF ( (X * X) / 289. + (Y * Y) / 96.04 .GT. 1.) GO TO 111
Z = 32.2 * FLTRNF(R) + 35.1
Z1 = (Z - 35.1) / 1.
IZ1 = INT(Z1)
KZ = MOD(IZ1,2)
IF (KZ)111,100,111
55 IF (P .GT. 0.963411) GO TO 135
C**
C** PELVIS
C**
51 X = 24. * FLTRNF(R) - 12.
L = 8
NCAX(L) = NCAX(L) + 1
NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
Y = 12. * FLTRNF(R) - 3.
Y1 = Y + 3.

```

```

Y2 = Y * 3.0
IF (X * X + Y1 * Y1 .GT. 144.160) GO TO 51
IF (X * X + Y2 * Y2 .LE. 127.69160) GO TO 51
Z = 22. * FLTRNFIR)
IF (Z .LE. 14.160) GO TO 52
GO TO 100
52 IF (Y .GT. 5.160) GO TO 51
GO TO 100
135 IF (P .GT. 0.992244) GO TO 125
C**
C** SCAPULAE
C**
IF (FLTRNFIR) .LE. 0.5100) GO TO 130
C**
C** LEFT SCAPULAE
C**
131 X = 7.2 * FLTRNFIR) + 9.9
L = 9
NCAX(L) = NCAX(L) + 1
NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
Y = 4.5 * FLTRNFIR) + 3.0
IF ((X*X)/361. + (Y*Y)/96.04 .GT. 1.160) GO TO 131
IF ((X*X)/289. + (Y*Y)/96.04 .LE. 1.160) GO TO 131
Y1 = 0.80 * X
IF (Y .GT. Y1) GO TO 131
Y2 = 0.25 * X
IF (Y .LE. Y2) GO TO 131
Z = 10.4 * FLTRNFIR) + 50.9
GO TO 100
C**
C** RIGHT SCAPULAE
C**
130 X = 7.2 * FLTRNFIR) - 17.1
L = 10
NCAX(L) = NCAX(L) + 1
NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
Y = 4.5 * FLTRNFIR) + 3.0
IF ((X*X)/361. + (Y*Y)/96.04 .GT. 1.160) GO TO 130
IF ((X*X)/289. + (Y*Y)/96.04 .LE. 1.160) GO TO 130
Y1 = -0.80 * X
IF (Y .GT. Y1) GO TO 130
Y2 = -0.25 * X
IF (Y .LE. Y2) GO TO 130
Z = 10.4 * FLTRNFIR) + 50.9
GO TO 100
125 CONTINUE
C**
C** LEFT CLAVICLE
C**
IF (FLTRNFIR) .LE. 0.5100) GO TO 120
121 X = 12.0 * FLTRNFIR) + 2.7
L = 11
NCAX(L) = NCAX(L) + 1
NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
Y = 7.5 * FLTRNFIR) - 9.5
Z = 1.5760 * FLTRNFIR) + 07.4017
Y1 = Y - 11.11
X1 = SQR(X*X + Y1*Y1)
X2 = 20. - X1
Z2 = Z - 00.25
C = 0.7005 * Z2
IF (Z2*Z2 + X2*X2 .GT. 0.160) GO TO 121
Y2 = 11.1 - 7.0342 * X

```

```

      IF (Y .LE. Y2)GO TO 121
      Y3 = 11.1 - 0.89415 * X
      IF (Y .GT. Y3)GO TO 121
      GO TO 100
C**
C** RIGHT CLAVICLE
C**
120  X = 12.8 * FLTRNF(K) - 15.5
      L = 12
      NCAX(L) = NCAX(L) + 1
      NCAXT(L) = NCAXT(L) + 1
      Y = 7.5 * FLTRNF(K) - 9.5
      Z = 1.5766 * FLTRNF(K) + 67.4617
      Y1 = (Y - 11.1)
      X1 = SQRT(X*X + Y1*Y1)
      X2 = 20. - X1
      Z2 = Z - 68.25
      C = 0.7883 **Z
      IF (Z2*Z2 + X2*X2 .GT. C)GO TO 120
      Y2 = 11.1 + 7.0342 * X
      IF (Y .LE. Y2)GO TO 120
      Y3 = 11.1 + 0.89415 * X
      IF (Y .GT. Y3)GO TO 120
      GO TO 100
100  CONTINUE
      CALL GETSU(ACP,GET,GAM)
      NUR(L) = NUR(L) + 1
      ENER = EZLR(L)
      WGT = 1.
      IMEDB = 1
      NCAX(L) = 0
      RETURN
      END

```

```

SUBROUTINE HEAD(J, JU, JS, JK, JSK)
COMMON/COMMON4/A, Y, Z, UMMY(Y)
JS = 107
JK = 112
JSK = 113
XA=X*A
YY=Y*Y
IF((XA/50.+YY/51.+Z*(1-55.5)*Z/42.25+.1) GO TO 8
C SKIN
J = 6
JU = 110
RETURN
8 IF((XA/40.2+YY/40.3+(Z-55.5)*Z/66.84+.1) GO TO 12
P = FLIN(FK)
IF(Z + Y + Y + Y .LE. 77.) GO TO 100
C CRANIUM
IF (P .GT. 0.553275) GO TO 101
C CRANIUM BONE
J = 13
JK = 60
JU = 31
JSK = 82
RETURN
101 IF (P .GT. 0.5063137) GO TO 102
C CRANIUM RM
J = 31
JK = 30
JU = 39
JSK = 82
RETURN
C CRANIUM YM
102 J = 32
JK = 39
JU = 60
JSK = 82
RETURN
C MANDIBLE
103 IF (P .GT. 0.9063167) GO TO 103
C MANDIBLE BONE
J = 14
JK = 60
JU = 31
JSK = 82
RETURN
103 IF (P .GT. 0.9765977) GO TO 104
C MANDIBLE RM
J = 32
JK = 38
JU = 39
JSK = 82
RETURN
C MANDIBLE YM
104 J = 33
JK = 39
JU = 60
JSK = 82
RETURN
12 IF (Z .GT. 55.5) GO TO 16
C SKIN
15 J = 72
JU = 73
RETURN
16 IF((XA/50.2+YY/50.3+.1) GO TO 15

```

```

      IF(Y<25,25,10)
      18 IF(2.0*70.0) GO TO 25
      IF(XA/4.+(Y-5.5)**2/0.22*0.1.1) GO TO 25
C   UPPER SPINE
      P = F(LAMP(L))
      IF(P .GT. 0.503/14.5) GO TO 110
C   UPPER SPINE BONE
      J = 17
      JK = 01
      JU = 00
      JSK = 02
      RETURN
110 IF (P .GT. 0.8759200) GO TO 111
C   UPPER SPINE RM
      J = 20
      JK = 20
      JU = 29
      JSK = 02
      RETURN
C   UPPER SPINE YM
111 J = 20
      JU = 00
      JK = 22
      JSK = 02
      RETURN
      25 IF(2.0*70.0) GO TO 25
      IF(2.0*70.0) GO TO 25
      IF(Y.01.-2.950) GO TO 25
      IF((Y+0.450)**2+(Z-70.0)**2.01.12.22) GO TO 25
      IF(X.01.-0.25) GO TO 25
      IF(X.01.-0.25) GO TO 25
C   NARES
29 J = 04
      JU = 05
      RETURN
      32 IF(X.01.-0.375) GO TO 30
C   SEPTUM
      J = 03
      JU=03
      RETURN
30 IF (X .GT. 0.025) GO TO 35
      GO TO 29
35 YL=Y+0.
      YL2=YL*YL
      LYA=XA+YL2
      IF(LYA.GT.4.04) GO TO 35
      IF(LYA.LT.1.) GO TO 35
      IF(YL.01.0.) GO TO 35
      IF(Z.01.75.) GO TO 35
      IF(2.0*71.25) GO TO 45
      TA=-(2*2543144)+17.402000
      GO TO 49
48 TA=2*0701040-4.82700
49 IF((YL-0.03(X))**2.01.1.1*YX+1*+1*2.0) GO TO 35
C   THYROID
      J = 99
      JU = 110
      RETURN
C   TISSUE
53 J = 102
      JU = 103
      RETURN
      END

```

```

SUBROUTINE LEGS(J, JU, JS, JK, JSK)
COMMON/GAMMA/X, Y, Z, UOH(Y)
JS = 100
JK = 112
JSK = 113
IF(JO.GE.14) GO TO 2d
IF(Z.GT.-79.0) GO TO 0
C SKIN
3 J = 91
JU = 93
RETURN
0 TRM1=Z/10.+10.
TRM2=(TRM1-.2)**2
IF(X10, 3, 1d
8 IF((X+TRM1)**2+Y*Y.GT.TRM2) GO TO 3
TA=Z+.1002500205 + X + 10.
TY=Z+.0513203206 + 3.3
IF(TA*(M.GT.TY+TY-Y*Y) GO TO 15
P = FLTKNF(R)
IF (Z .GE. -22.8) GO TO 000
C LOWER RIGHT LEG
IF (P .GT. 0.6457321) GO TO 001
C LOWER RIGHT LEG BONE
J = 09
JK = 79
JU = 81
JSK = 82
RETURN
C LOWER RIGHT LEG YM
001 J = 48
JK = 58
JU = 60
JSK = 82
RETURN
C UPPER RIGHT LEG
500 IF (P .GT. 0.9340911) GO TO 002
C UPPER RIGHT LEG BONE
J = 66
JK = 79
JU = 81
JSK = 82
RETURN
002 IF (P .GT. 0.9835228) GO TO 003
C UPPER RIGHT LEG KM
J = 27
JK = 37
JU = 39
JSK = 82
RETURN
C UPPER RIGHT LEG YM
003 J = 47
JK = 58
JU = 60
JSK = 82
RETURN
C FISSUE
15 J = 101
JU = 103
RETURN
10 IF((X-TRM1)**2+Y*Y.GT.TRM2) GO TO 3
TA=Z+.1002500205 - X + 10.
TY=Z+.0513203206 + 3.3
IF(TA*(A.GT.TY+TY-Y*Y) GO TO 15

```

```

      P = FLTRNFRK)
      IF (Z .GE. -22.8) GO TO 700
C   LOWER LEFT LEG
      IF (P .GT. 0.0457521) GO TO 701
C   LOWER LEFT LEG BONE
      J = 67
      JK = 79
      JU = 61
      JSK = 82
      RETURN
C   LOWER LEFT LEG YM
701  J = 46
      JK = 58
      JU = 60
      JSK = 82
      RETURN
C   UPPER LEFT LEG
702  IF (P .GT. 0.9340911) GO TO 702
C   UPPER LEFT LEG BONE
      J = 66
      JK = 79
      JU = 61
      JSK = 82
      RETURN
702  IF (P .GT. 0.9855228) GO TO 703
C   UPPER LEFT LEG RM
      J = 26
      JK = 37
      JU = 39
      JSK = 82
      RETURN
C   UPPER LEFT LEG YM
703  J = 45
      JK = 58
      JU = 60
      JSK = 82
      RETURN
28  IF (X 29.37, 33
29  IF ((X+1.3)**2/1.69+(Y+8.)**2/2.25+(Z+2.3)**2/5.29.GT.1.) GO TO 37
C   R.TESTE
      J = 96
      JU = 97
      RETURN
33  IF ((X-1.3)**2/1.69+(Y+8.)**2/2.25+(Z+2.3)**2/5.29.GT.1.) GO TO 37
C   L.TESTE
      J = 95
      JU = 97
      RETURN
C   GENITALIA
37  J = 14
      JU = 110
      RETURN
      END

```

```

SUBROUTINE TRUNK(J,JU,JS,JK,JSK)
C FOR STANDARD REFERENCE MAN ORGANS, 97. ( 5/17/72)
COMMON/GAMMA/X,Y,Z,UUM(9)
C
JS = 105
JK = 112
JSK = 113
XX=X*X
YY=Y*Y
ZZ=Z*Z
CNY=(Y/9.81)**2 -- TEST FOR RT. AND LEFT ARM BONES AND SPINE
CNY=YY/90.04
IF(XA/289.4CNY.LE.1.) GO TO 15
IF(XA/392.04+CNY.LE.1.) GO TO 6
IF(Z.LE.09.8) GO TO 13
6 TAI=(Z*1.4-2035.6)/193.2
Tol=X/1.4
TC1=YY/77.29-(Z+09.)**2/19044.
IF((TAI-Tol)**2+TC1.GT.0.) GO TO 11
IF(Z.GT.09.) GO TO 12
C LOWER RIGHT ARM
P = FLIKNF(K)
IF (Z .GE. 52.0) GO TO 400
IF (P .GT. 0.585/721) GO TO 401
C LOWER RIGHT ARM YM
J = 43
JK = 58
JU = 60
JSK = 82
RETURN
C LOWER RIGHT ARM BONE
401 J = 64
JK = 79
JU = 81
JSK = 82
RETURN
C UPPER RIGHT ARM
603 IF (P .GT. 0.86639721) GO TO 402
C UPPER RIGHT ARM BONE
J = 63
JK = 70
JU = 81
JSK = 82
RETURN
402 IF (P .GT. 0.9270993) GO TO 403
C UPPER RIGHT ARM RM
J = 24
JK = 36
JU = 39
JSK = 82
RETURN
C UPPER RIGHT ARM YM
403 J = 42
JK = 57
JU = 60
JSK = 82
RETURN
11 IF((TAI+Tol)**2+TC1.GT.0.) GO TO 12
IF(Z.GT.09.) GO TO 12
C LOWER LEFT ARM
P = FLIKNF(K)
IF (Z .GE. 52.0) GO TO 500
IF (P .GT. 0.585/721) GO TO 501

```



```

C      LOWER LEFT ARM YM
      J = 41
      JK = 50
      JU = 60
      JSK = 02
      RETURN
C      LOWER LEFT ARM BONE
501   J = 02
      JK = 79
      JU = 81
      JSK = 02
      RETURN
C      UPPER LEFT ARM
502   IF (P .GT. 0.8003972) GO TO 502
C      UPPER LEFT ARM BONE
      J = 01
      JR = 70
      JU = 01
      JSK = 02
      RETURN
502   IF (P .GT. 0.9670993) GO TO 503
C      UPPER LEFT ARM KM
      J = 23
      JK = 30
      JU = 39
      JSK = 02
      RETURN
C      UPPER LEFT ARM YM
503   J = 40
      JR = 57
      JU = 60
      JSK = 02
      RETURN
      12 IF (Z .LT. 0.09 .OR. 1) GO TO 16
      IF (XX/40.24 + CNY .LT. 1.0) GO TO 16
C SKIN
13   J = 90
      JU = 93
      RETURN
C TISSUE
14   J = 100
      JU = 103
      RETURN
      15 IF (XX/40. + (Y - 5.5) ** 2 / 6.25 .GT. 1.0) GO TO 16
      IF (Z .LT. 0.22) GO TO 3
C      MIDDLE SPINE
      P = FLTKNF(K)
      IF (Z .LE. 35.1) GO TO 800
      IF (P .GT. 0.4999094) GO TO 801
C      MIDDLE SPINE BONE
      J = 70
      JR = 70
      JU = 81
      JSK = 02
      RETURN
801   IF (P .GT. 0.8749773) GO TO 802
C      MIDDLE SPINE KM
      J = 34
      JK = 30
      JU = 39
      JSK = 02
      RETURN
C      MIDDLE SPINE YM

```

```

002   J = 55
      JR = 57
      JO = 60
      JSK = 62
      RETURN
C LOWER SPINE
003   IF (P.GT.0.6162175) GO TO 003
C     LOWER SPINE KM
      J = 53
      JK = 57
      JO = 59
      JSK = 62
      RETURN
003   IF (P.GT.0.8242900) GO TO 004
C     LOWER SPINE YM
      J = 54
      JK = 58
      JO = 60
      JSK = 62
      RETURN
C     LOWER SPINE BUNE
004   J = 75
      JK = 79
      JO = 81
      JSK = 82
      RETURN
      16 IF (Z.LE.27.) GO TO 3
      IF (Z.LE.43.) GO TO 2
CLAVICLES AND SCAPULAE
      17 IF (Y.LT.0.) GO TO 101
      IF (Z.LT.50.9) GO TO 103
      IF (Z.GT.67.3) GO TO 103
      S=Y/SUMT (XX+YY)
      IF (S.LT..2425256.DX.S.GT..624695) GO TO 103
      IF (XX/289.+CNY.LE.1.) GO TO 103
      IF (XX/361.+CNY.GT.1.) GO TO 14
C     SCAPULAE
      P = FLTKNF(K)
      IF (P.GT.0.5317140) GO TO 010
C     SCAPULAE BUNE
      J = 72
      JR = 78
      JO = 81
      JSK = 82
      RETURN
010   IF (P.GT.0.8827285) GO TO 011
C     SCAPULAE RM
      J = 30
      JK = 36
      JO = 39
      JSK = 82
      RETURN
C     SCAPULAE YM
011   J = 51
      JK = 57
      JO = 60
      JSK = 82
      RETURN
      101 IF (Z.LT.67.4617.UR.Z.GT.69.0303) GO TO 103
      YM=Y-11.1
      IF (X.LT.0.) GO TO 102
      XP=X*.4/170-YM*.88176
      YP=X*.88176+YM*.4/170

```

```

SWK=SWNT (XP*XP+Y*Y)
C=XP/SWK
IF(C.LT..93937.UR.C.GT.1.) GO TO 14
IF(AOS (SWK-20.).GT..7003) GO TO 14
IF((XP-20.)**2+(Z-60.25)**2.GT..02141009) GO TO 14
C
CLAVICLE
? = FLTRNF(R)
IF (P .GT. 0.4407950) GO TO 020
C
CLAVICLE BUNE
J = 03
JK = 70
JU = 01
JSK = 02
RETURN
020 IF (P .GT. 0.4021990) GO TO 021
C
CLAVICLE KM
J = 23
JK = 30
JU = 39
JSK = 02
RETURN
C
CLAVICLE YH
021 J = 44
JK = 37
JU = 00
JSK = 02
RETURN
102 XP=X*.47170+YH*.00170
YP=Y*.47170-X*.00170
SWK=SWNT (XP*XP+YP*YP)
C=XP/SWK
IF(C.LT.-1.00UR.C.GT.-.93937) GO TO 14
IF(AOS (SWK-20.).GT..7003) GO TO 14
IF((20.+XP)**2+(Z-60.25)**2.GT..02141009) GO TO 14
C
CLAVICLE
P = FLTRNF(R)
IF (P .GT. 0.4407950) GO TO 020
C
CLAVICLE BUNE
J = 03
JK = 70
JU = 01
JSK = 02
RETURN
020 IF (P .GT. 0.0021990) GO TO 021
C
CLAVICLE KM
J = 23
JK = 30
JU = 39
JSK = 02
RETURN
C
CLAVICLE YH
021 J = 44
JK = 37
JU = 00
JSK = 02
RETURN
C
LUNGS
103 YPZ=Y1/50.25+11-43.51**2/570.
IF((X**0.5)**2/25.+YPZ.GT.1.) GO TO 106
IF(Z.LT.43.5) GO TO 106
IF(Y.GE.0.) GO TO 105
104 J=21
JU=22

```

```

      RETURN
105 IF (X+2.5)002/25.+YP2.6E.1.) GO TO 104
   GO TO 10.
106 IF (X-8.5)002/25.+YP2.6E.1.) GO TO 104
   IF (Z.LT.45.5) GO TO 104
   IF (Y.6E.0.) GO TO 106
107 J=20
   JU=22
   RETURN
108 IF (X-2.5)002/25.+YP2.6E.1.) GO TO 107
C MEANT
109 X1=X91.
   Y1=Y03.
   Z1=Z-51.
   TX=.10.094272049-Y10.523745707-Z10.042787097
   TX2=TX*TX
   TY=.110.4220102017+Y10.900307707
   TY2=TY*TY
   TZ=X10.5023039161-Y10.2716557023+Z10.70004444
   TZ2=TZ*TZ
   IF (TX/69.4TY/25.+TZ/25..6E.1.) GO TO 120
   IF (TX.6E.0.0) GO TO 110
   IF (TX+TY+TZ.6E.25.) GO TO 120
   IF (TX/3.4TZ/5..LT.-1.) GO TO 120
110 J=15
   JU = 110
   RETURN
C RIBS AND THYMUS
120 IF (XX/272-25+YY/86.49.LT.1.) GO TO 122
   IF (XX/289.+YY/96.09.6E.1.) GO TO 14
   N=(Z-35.11)/1.4
   K=N-(N/Z)*2
   IF (K.NE.0) GO TO 122
   IF (Z.6E.67.5) GO TO 122
C RIBS
121 P = FLT(KN+K)
   IF (P .6E. 0.5031466) GO TO 830
C RIBS BONE
   J = 71
   JK = 70
   JO = 81
   JSK = 82
   RETURN
830 IF (P .6E. 0.7852583) GO TO 831
C RIBS YM
   J = 50
   JK = 57
   JO = 60
   JSK = 82
   RETURN
C RIBS RM
831 J = 29
   JK = 36
   JO = 39
   JSK = 82
   RETURN
122 IF (X+2.1002/9.+4.0(Y+6.)002+(Z-60.5)002/16..6E.1.) GO TO 123
   J = 40
   JU = 110
   RETURN
123 IF (Z.LT.69.8) GO TO 14
   IF (XX/46.24+CNV.6E.1.) GO TO 13
   GO TO 14

```

```

C LIVER, STOMACH, KIDNEYS, SPLEEN, AND KID3
  2 IF(AX/27.25*YY/04.00*GT.1.) GO TO 201
  IF(X/22.45*Y/45.-2/45.00*1.-1.) GO TO 201
  J=14
  JU = 110
  RETURN
201 XP=(X-0.)**2
  YP=(Y+4)**2
  ZP=(Z-35.)**2
  IF(AP/16.+YP/9.+ZP/04.00*GT.1.) GO TO 203
  IF(AP/11.471705+YP/5.677709+ZP/24.267709*LT.1.) GO TO 202
  J=7
  JU = 110
  RETURN
202 J=0
  JU = 110
  RETURN
203 TAZ=(Y-0.)**2/2.25+(Z-32.5)**2/30.25
  IF(X*0.)**2/20.25+TAZ*GT.1.) GO TO 204
  IF(X*GT.-3.) GO TO 205
  J=17
  JU=10
  RETURN
204 IF((X-0.)**2/20.25+TAZ*GT.1.) GO TO 205
  IF(X*LT.3.) GO TO 205
  J=10
  JU=10
  RETURN
205 IF((X-11.)**2/12.25+(Y-3.)**2/4.+(Z-37.)**2/30.00*GT.1.) GO TO 205
  J = 94
  JU = 110
  RETURN
206 IF(XX/272.25*YY/00.49*LT.1.) GO TO 21
  IF(XX/209.45*YY/90.04*GT.1.) GO TO 14
  IF(Z*LT.35.1) GO TO 21
  NN=(Z-35.1)/1.4
  KK=NN-(NN/2)**2
  IF(KK*EQ.0) GO TO 121
C PANCREAS AND ADRENALS
  21 IF(XX/225.45*YY*(Z-37.)**2/9.00*GT.1.) GO TO 213
  IF(X*LT.0.) GO TO 213
  IF(Z*LT.37.) GO TO 212
211 J = 89
  JU = 110
  RETURN
212 IF(X*LT.3.) GO TO 211
213 TAZ=4.0*(Y-0.5)**2+(Z-38.)**2/25.
  IF((X+4.5)**2/2.25+TAZ*GT.1.) GO TO 214
  IF(Z*LT.38.) GO TO 14
  J=2
  JU=3
  RETURN
214 IF((X-4.5)**2/2.25+TAZ*GT.1.) GO TO 14
  IF(Z*LT.38.) GO TO 14
  J=1
  JU=3
  RETURN
C PELVIS, UTERUS, AND OVIDUCT
  3 IF(AX*(Y+3.)**2*GT.140.) GO TO 14
  IF(AX*(Y+3.8)**2*LT.127.69) GO TO 33
  IF(Y*LT.-3.) GO TO 14
  IF(Z*GT.14.) GO TO 302
  IF(Y*GT.5.) GO TO 14

```

```

C MELVIS
301 P = FLTKNF(K)
   IF (P.GT. 0.0041/12) GO TO 040
C MELVIS NH
   J = 20
   JK = 5/
   JU = 5/
   JSK = 02
   RETURN
040 IF (P.GT. 0.00556/10) GO TO 041
C MELVIS YH
   J = 4/
   JK = 50
   JU = 00
   JSK = 02
   RETURN
C MELVIS WME
041 J = 70
   JK = 79
   JU = 01
   JSK = 02
   RETURN
302 IF(Z.LL.22.) GO TO 301
   GO TO 14
303 XP=(X+0.5)*02
   YP=(Y+2.50)*02
   IF(XP+YP.6).0.25) GO TO 304
   IF(Z.LT.14.45) GO TO 32
   IF(Z.GT.24.) GO TO 31
   IF(XP+YP.LT.5.2094/22) GO TO 333
   J=7
   JU = 110
   RETURN
333 J=10
   JU = 110
   RETURN
304 XP=(X-(Z-24.)*0.20/15.20)-9.*02
   YP=(Y-(18.72-Z)*2.5/15.20)*02
   IF(XP/3.5599+YP/7.5504.GT.1.) GO TO 305
   IF(Z.LT. 8.72) GO TO 32
   IF(Z.GT.24.) GO TO 31
   IF(XP/2.4904+YP/1.7950.LT.1.) GO TO 334
   J=11
   JU = 110
   RETURN
334 J=12
   JU = 110
   RETURN
305 IF(Z.LT.17.) GO TO 32
   IF(Y.GT.2.2) GO TO 14
   IF(Y.LT.-4.00) GO TO 14
C ULITRY), S.I., BLADDER, LLITRY), AND BLADDER
31 YP=(Y+2.30)*02
   ZP=(Z-25.5)*02
   IF(YP/0.25+ZP/2.25.GT.1.) GO TO 311
   IF(X.LT.-10.5.UR.X.GT.10.5) GO TO 311
   IF(YP/3.892724+ZP/7.446729.LT.1.) GO TO 333
   J=9
   JU = 110
   RETURN
311 J=13
   JU = 110
   RETURN

```

```

32 YP=(Y+9.5)**2
ZP=(Z-8.1)**2
IF(XX/24.381764+YP/11.75/164+ZP/11.75/164.67.1.) GO TO 324
IF(XX/24.381764+YP/10.2/164+ZP/10.2/164.67.1.) GO TO 321
J=4
JU = 110
RETURN
321 J=5
JU = 110
RETURN
322 IF(X.LT.3.1) GO TO 323
IF(X.GT.10.29) GO TO 323
P=(SQRT((X-3.)**2+(Z-8.72)**2)-3.12)**2
IF(P+YY.GT.2.4049) GO TO 323
IF(Z.GT.8.721) GO TO 323
IF(P+YY.LT..8281) GO TO 324
GO TO 324
323 IF(X.LT.-1.57) GO TO 325
P=(SQRT((X-3.)**2+Z)-3.)**2
IF(P+YY.GT.2.4049) GO TO 325
IF(P+YY.LT..8281) GO TO 324
324 J=11
JU = 110
RETURN
325 IF(XX/8.25+(Y+2.)**2/25.+(Z-14.)**2/2.25.GT.1.) GO TO 14
IF(Y.LT.-4.5) GO TO 14
J = 104
JU = 110
RETURN
C OVAMIES
33 TA4=Y*4.+(Z-15.)**2*25
IF((X*8.)**2+TA4.GT.1.) GO TO 331
J = 87
JU = 88
RETURN
331 IF((X-6.)**2+TA4.GT.1.) GO TO 303
J = 86
JU = 88
RETURN
END

```

ABSTRACT

The computer code "ALGAM: Monte Carlo Estimation of Internal Dose from Gamma-ray Sources in a Phantom Man" only provides for an average dose to bone marrow resulting from a photon source distributed in the human body.

Since there is no realistic model for the separation of these doses in the present phantom, some modifications were performed in the ALGAM code in order to introduce an heterogeneous skeleton and through this new model it was possible to make the estimation of dose in bone marrow.

~~is presented~~ The specific absorbed fraction resulting from running the new program for 12 monoenergetic photon sources distributed in three source organs - skeleton, red marrow and yellow marrow *is presented.*

The results obtained show that for low photon energies, the old model overestimates the specific absorbed fraction in bone marrow up to a factor of 4; while in bone, it underestimates the specific absorbed fractions up to a factor of 1.6.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS*

1. ASPIN, N. & JOHNS, H. E. The absorbed dose in cylindrical cavities within irradiated bone. *Br. J. Radiol.*, 36:350-62, 1963.
2. BOURNE, G. H. *The biochemistry and physiology of bone*. New York, N. Y. Academic, 1956.
3. BROWNELL, G. L.; ELLET, W. H.; REDDY, A. R. Absorbed fraction for photon dosimetry. *J. nucl. Med.*, 9(Suppl. 1):27-39, 1968.
4. BURCH, P. R. J. Radiation Biophysics. In: MORGAN, K. Z. & TURNER, J. E., editores. *Principles of radiation protection*. New York, N. Y., Krieger, 1973. p.366-97.
5. CASHWELL, E. D. & EVERETT, C. J. *A practical manual on the Monte Carlo method for random walk problems*. New York, N. Y., Pergamon, 1959.
6. CHADWICK, D. R. The Federal Radiation Council. *Health Phys.* 4:223-7, 1961.
7. CHARLTON, D. E. & CORMACK, D. V. Energy dissipation in finite cavities. *Radiat. Res.*, 17:34-49, 1962.
8. CLAUS, W. D. What is health physics? *Health Phys.*, 1:56-61, 1958.
9. COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Normas básicas de proteção radiológica*. Rio de Janeiro, set. 1973. (Resolução CNEN 6/73).
10. DEUS, S. F. *Desenvolvimento dos fantasma de uma criança de 10 anos de idade para fins de dosimetria de radiação*. (Tese de doutoramento a ser publicada).
11. GARDNER, E.; GRAY, D. J.; O'RAHILY, R. *Anatomia: estudo regional do corpo humano*. Rio de Janeiro, Guanabara Koogan, 1967.
12. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. *Radiation quantities and units*. Washington, D. C., 1975. (ICRU report 19).

(*) As referências bibliográficas relativas a documentos localizados pelo IPEN foram revistas e enquadradas na NB-66 da ABNT.

13. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. *Recommendations of the ICRP: report of Committee II on permissible dose for internal radiation, 1959*. London, Pergamon, 1959. (ICRP pub. 2)
14. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (Adopted September 17, 1965)*. Oxford, Pergamon, 1966. (ICRP pub. 9).
15. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. *A review of the radiosensitivity of the tissues in bone*. Oxford, Pergamon, 1967. (ICRP pub. 11).
16. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. *Radiosensitivity and spatial distribution of dose*. Oxford, Pergamon, 1969. (ICRP pub. 14).
17. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. *Implications of commission recommendations that doses be kept as low readily achievable: a report by Committee 4 of ICRP*. Oxford, Pergamon, 1973. (ICRP pub. 22).
18. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. *Report of the task group on reference man*. Oxford, Pergamon, 1974. (ICRP pub. 23).
19. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Annals of the ICRP*, 1(3), 1977.
20. KIEFER, H.; MAUSHART, R.; MEJDAHL, V. Radiation dosimetry. In: ATTIX, F. H. & TOCHILIN, E. *Radiation dosimetry*, v.3. New York, N. Y., Academic, 1969. p.557-616.
21. KULKARNI, R. N.; SUNDARARAMAN, V.; PRASAD, M. A. ... dose across a plane bone-tissue interface. *Radiat. Res.*, 51:1-9, 1972.
22. LIMA, A. O.; SOARES, J. B.; GRECO, J. B.; GALIZZI, J.; CANÇADO, J. R. *Métodos de laboratório aplicados à clínica*. 4.ed. Rio de Janeiro, Guanabara Kooçan, 1969.
23. LINDÉN, K. The new special names of SI units in the field of ionizing radiations. *Physics Med. Biol.*, 20:1029-30, 1975.
24. LOEVINGER, R. & BERMAN, M. A schema for absorbed dose calculations for biologically distributed radionuclides. *J. nucl. Med.*, 9(Suppl. 1):5-14, 1968.
25. LOEVINGER, R. & BERMAN, M. A formalism for calculation of absorbed dose from radionuclides. *Physics Med. Biol.* 13:205-17, 1968.
26. LOEVINGER, R.; HOLT, J. G.; HINE, G. J. Internally administered radioisotopes. In: HINE, G. & BROWNELL, G. H., editores. *Radiation dosimetry*. New York, N. Y., Academic, 1956. p.801-73.
27. McLEAN, F. C. & BUDY, A. M. *Radiation, isotopes, and bone*. New York, N. Y., Academic, 1964.
28. MORGAN, K. Z. Permissible exposure to ionizing radiation. *Science (Washington)*, 139:565-71, 1963.
29. MORGAN, K. Z. History of damage and protection from ionizing radiation. In: MORGAN, K. Z. & TURNER, J. E., editores. *Principles of radiation protection*. New York, N. Y. Krieger, 1973. p.1-77.

30. MORGAN, K. Z. Maximum permissible exposure levels-external and internal. In: MORGAN, K. Z. & TURNER, J. E., editores. *Principles of radiation protection*. New York, N. Y., Krieger, 1973. p.497-537.
31. NATIONAL BUREAU OF STANDARDS. *Report of the International Commission on Radiological Units and Measurements (ICRU) 1959*. Washington, D. C., 1961. (NBS-78).
32. NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. *Basic radiation protection criteria*. Washington, D. C., 1971. (NCRP report 39).
33. REES, D. J. *Health physics: Principles of radiation protection*. London, Butterworths, 1967.
34. ROHRER, R. H. Physics of internal dosimetry. In: U. S. DEPARTMENT OF HEALTH, EDUCATION AND WELFARE. *Radiopharmaceutical dosimetry symposium proceedings of conference held at Oak Ridge, April 26-29, 1976*. Rockville, MD, 1976. p.66-76.
35. SEGRETO, V. S. A. *Cálculo de Monte Carlo da dose equivalente recebida por um feto humano de fontes gama localizadas no trato gastro-intestinal*. São Paulo, 1978. (Dissertação de mestrado, Instituto de Energia Atômica).
36. SHREIDER, Yu. A., editor. *The Monte Carlo method. The method of statistical trials*. Oxford, Pergamon, 1966.
37. SINCLAIR, W. K. The relative biological effectiveness of 22 MeVp X-Rays, Cobalt-60 gamma rays, and 200 KVcp X-rays. *Radiat. Res.*, 16:369-83, 1962.
38. SNYDER, W. S. Internal exposure. In: MORGAN, K. Z. & TURNER, J. E. editores. *Principles of radiation protection*. New York, N. Y., Krieger, 1973. p.301-65.
39. SNYDER, W. S.; FORD, M. R.; WARNER, G. G.; FISHER, H. L. Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom. *J. nucl. Med.*, 10(Suppl. 3):1-52, 1969.
40. SNYDER, W. S.; FORD, M. R.; WARNER, G. G.; WATSON, S. B. *Tabulation of dose equivalent per microcurie-day for source and target organs of an adult for various radionuclides*. Oak Ridge, Tenn., Oak Ridge National Lab., 1974 (ORNL-5000).
41. SPANIER, J. & GELBARD, E. M. *Monte Carlo principles and neutron transport problems*. Reading, Mass., Addison-Wesley, 1969.
42. SPIERS, F. W. *Radioisotopes in the human body: physical and biological aspects*. New York, N. Y., Academic, 1968.
43. SPIERS, F. W. Dosage in irradiated soft tissue and bone. *Br. J. Radiol.*, 24:365-70, 1951.
44. SPIERS, F. W.; WHITWELL, J. R.; BEDDOE, A. H. Calculated dose factors for the radiosensitive tissues in bone irradiated by surface-deposited radionuclides. *Physics Med. Biol.*, 23(3):481-94, 1978.
45. TAYLOR, L. S. Radiation exposure as a reasonable calculated risk. *Health Phys.*, 1:62-70, 1958.
46. TODO, A. S. *Desenvolvimento de um modelo matemático para o rim e estimativa da fração absorvida utilizando o método de Monte Carlo*. São Paulo, 1979. (Dissertação de mestrado a ser publicada).

47. UPTON, A. C. & KIMBALL, R. F. Radiation Biology. In: MORGAN, K. Z. & TURNER, J. E., editors. *Principles of radiation protection*. New York, N. Y., Krieger, 1973. p.398-447.
48. WARNER, G. G. & GRAIG JR., A. M. *ALGAM: A computer program for estimating internal dose from gamma-ray sources in a man phantom*. Oak Ridge, Tenn., Oak Ridge National Lab., 1968. (ORNL-TM-2250).
49. WINGATE, C. L.; GROSS, W.; FAILLA, G. Experimental determination of absorbed dose from X-rays near the interface of soft tissue and other material. *Radiology*, 79:984-99, 1962.
50. WOLSTENHOLME, G. E. W. & O'CONNOR, C. M. *Bone structure and metabolism*. London, Churchill, 1956.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Caixa Postal, 11 049 - Pinheiros
CEP 06508
01000 - São Paulo - SP

Telefone: 211-8011
Endereço Telegráfico - IPENUCLEAR
Telex - (011) 23862 - IPEN - BR