

# INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA

SECRETARIA DA CULTURA, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
AUTARQUIA ASSOCIADA A UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

127

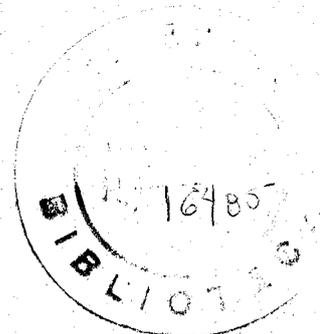
DESENVOLVIMENTO DO FANTASMA MATEMÁTICO  
DE UMA CRIANÇA DE 10 ANOS DE IDADE PARA  
FINS DE DOSIMETRIA INTERNA.

SUDERNAIQUE F. DEUS

Tese apresentada ao Instituto de  
Energia Atômica como parte dos  
requisitos para obtenção do grau de  
"Doutor em Ciências - Área  
Tecnologia Nuclear."

Orientador: Prof. Dr. SHIGUEO WATANABE

SÃO PAULO  
1978



À Silvia,  
À Luciana,  
Ao Omar,  
À minha mãe e  
Aos meus irmãos

## AGRADECIMENTOS

Expressamos nossos agradecimentos de maneira especial

Ao Prof. Dr. Shiguelo Watanabe pela atenção e interesse com que orientou este trabalho.

Ao Dr. John W. Poston pelo cuidadoso acompanhamento e incentivo durante o desenvolvimento deste trabalho, e pelo apoio, em todos os aspectos, durante nossa permanência nos Estados Unidos da América.

Ao Dr. Walter S. Snyder pelas valiosas discussões, muitas saudades.

Ao Dr. Gordon G. Warner pela sua inestimável ajuda nos cálculos computacionais.

*Ao Dr. G. Elliot Whitesides da Computer Science Division do ORNL, pela grande ajuda nos cálculos dos volumes dos órgãos mais complicados do fantasma deste trabalho.*

Ao Prof. Dr. Rômulo Ribeiro Pieroni, Superintendente do Instituto de Energia Atômica, pelo suporte necessário para nosso estágio no Oak Ridge National Laboratory (ORNL), em Oak Ridge, Tennessee, U.S.A., e por ter-me proporcionado a oportunidade de adquirir experiências inestimáveis para minha formação profissional e pessoal.

Ao Prof. Dr. Rui Ribeiro Franco pela sua grande ajuda inicial.

Ao pessoal da Health Physics Division e especialmente ao grupo da Medical Physics and Internal Dosimetry Section, do ORNL, pela calorosa acolhida.

Ao Sr. James Hickey (ORNL), Sr. Italo Salzano Jr. e Srta. Maria de Fátima Francisco (IEA) pelo esmero nos desenhos e capa da tese.

Ao Sr. Blaird Pecorari e pessoal da Gráfica, pela impressão das figuras e montagem da tese.

Agradecemos ainda,

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pela bolsa concedida, e

Ao Oak Ridge National Laboratory pelas facilidades que me foram oferecidas para o desenvolvimento desta pesquisa.

## RESUMO

Com o aumento do número de equipamentos de geração de energia nuclear, uma estimativa precisa da dose de radiação absorvida pela parte da população não ligada a trabalhos com radiação, se faz necessária. Especialmente importante é a determinação da dose absorvida nos órgãos dos indivíduos da parte da população representada pelas crianças. Essas doses se devem não somente à radiação proveniente da indústria nuclear mas também aos radionuclídeos rotineiramente usados em medicina nuclear.

Os principais objetivos desta pesquisa são: (1) desenvolver o projeto de um fantasma matemático e físico representando da maneira mais próxima possível uma criança de 10 anos de idade e (2) usar esse fantasma como a base dos cálculos das frações absorvidas específicas nos seus órgãos internos e no esqueleto devido aos radionuclídeos mais usados em medicina nuclear.

O fantasma era similar, na forma, ao fantasma adulto de Snyder e Fisher porém diversas mudanças foram feitas no projeto para torná-lo mais realístico. Essas mudanças incluíram a adição de um pescoço, colocação dos braços fora da região do tronco, modificação na forma do tronco e na forma da região da cabeça e dos órgãos genitais. Diversas modificações foram também introduzidas no esqueleto do fantasma. Por exemplo, os ossos da cabeça, pelvis, coluna vertebral, escápulas, clavículas e os ossos dos braços e das

pernas são representações próximas das formas anatômicas reais. Alguns órgãos internos como o cérebro, pulmões, fígado, intestino delgado e intestino grosso foram também modificados em consequência das modificações acima. Em todos esses casos, as <sup>mudanças</sup> modificações foram feitas não só nas formas mas também nas posições dos órgãos e ossos de maneira tal que elas fossem mais representativas da criança de 10 anos de idade.

Estimativas das frações absorvidas específicas (FAE) obtidas pelo uso deste fantasma, resultou, como esperado, significativamente diferentes daquelas obtidas pelo uso de um modelo mais simples. Em outras palavras, as razões entre as FAE nos órgãos do fantasma desenvolvido neste trabalho e as FAE nos órgãos do fantasma similar ao adulto (obtido reduzindo-se o fantasma adulto pela aplicação de fatores apropriados), variaram entre 0,37 e 5. Essas diferenças e seus significados são também discutidas.

Medidas experimentais foram feitas para situações de exposições típicas usadas em raios-X diagnósticos, com a finalidade de comparar seus resultados com os cálculos teóricos e com medidas usando espectrometria. Na comparação com os cálculos teóricos, os resultados concordaram dentro de 1,0 e 5,2% para os órgãos de interesse situados no interior do feixe de radiação (ovários, útero e tireóide), e para as medidas espectrométricas, dentro de 4,5 e 23% para os órgãos

situados dentro e fora do feixe de radiação (testículos, ovários, útero, tireóide e parte torácica da coluna vertebral). Essas diferenças são também discutidas.

## ABSTRACT

With the increasing number of nuclear energy generating facilities, an accurate estimation of absorbed dose by population other than workers connected to nuclear industry, becomes highly desirable. Specially important is to know the radiation dose absorbed by each part of children body not only due to ionizing radiation from nuclear energy facilities, but also due to radionuclides routinely used in nuclear medicine. The main purpose of present work is to design a mathematical as well as physical phantom of a ten years old average child, in order to calculate the specific absorbed fractions in its internal organs and skeleton due to the radionuclides most used in pediatric nuclear medicine.

The phantom was similar in shape to the adult phantom introduced by Snyder and Fisher, but several changes were made in the design to have a more realistic phantom. These changes included the addition of a neck, placing the arms outside the trunk section, changing the shape of the trunk and head region and a redesign of the male genitalia region. Several modifications were also made to the idealized skeleton. For example, the skull, ribs, pelvis, spine, scapulae, clavicles and the bones of the arm and leg regions were redesigned to approximate more closely the true anatomical shapes. Some internal organs were modified as to con

form the above changes. They are the brain, lungs, liver and the large and small intestines. In all cases an attempt was made to modify the shapes and locations in such a manner that they represent more closely those of the 10-year old child.

Estimates of specific absorbed fractions (SAF) obtained with this phantom, by the Monte Carlo method of calculation, resulted, as expected, significantly different from those estimates derived through the use of a simpler model. In other words, the ratio of the SAF in the organs of the phantom developed in this work to the SAF in the organs of the similitude phantom (obtained by reducing each of the three regions of the adult phantom (head, trunk and legs) by appropriate factors) ranges from 0,37 to 5. These differences and their significance are discussed in detail.

Experimental measurements were also made for typical exposure situations used in diagnostic X-ray examinations. These measurements were done in order to compare with the theoretical calculations and with measurements using spectrometry. The comparison with the calculations agreed with 1.0 to 5.2% for the organs of interest located inside the radiation field (ovaries, uterus and thyroid). The agreement with the measurement was within 4.5 to 23% for all organs of interest inside and outside the radiation field (testes, ovaries, uterus, thyroid and thoracic spine). These differences are also discussed.

## INDICE

|   | página |
|---|--------|
| CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS .....   | 1      |
| CAPÍTULO II - TEORIA .....  | 15     |
| 1. Interação da radiação com a matéria .....  | 15     |
| 1.1 Descrição geral .....   | 15     |
| 1.2 Processo fotoelétrico .....   | 17     |
| 1.2.1 Descrição geral .....   | 17     |
| 1.2.2 Variação do coeficiente de absorção de massa para o efeito fotoelétrico, em função da energia da radiação ..... | 18     |
| 1.2.3 Variação do efeito fotoelétrico com o número atômico .....  | 19     |
| 1.3 Processo Compton .....  | 20     |
| 1.3.1 Descrição geral .....   | 20     |
| 1.3.2 Variação de $\tau$ , $\tau_k$ e $\tau_s$ com a energia da radiação .....  | 23     |
| 1.3.3 Variação da absorção Compton com o número atômico .....   | 24     |
| 1.4 Produção de pares .....   | 24     |
| 1.4.1 Descrição geral .....   | 24     |
| 1.4.2 Variação da secção de choque com a energia da radiação para o processo de produção de pares .....               | 26     |
| 1.4.3 Variação do coeficiente de produção de pares com o número atômico .....   | 27     |
| 1.5 Coeficiente de absorção total de energia .....  | 28     |
| 2. Dosimetria termoluminescente .....   | 29     |
| 2.1 Descrição geral do fenômeno da termoluminescência .....   | 29     |
| 2.2 Curva de emissão termoluminescente .....  | 31     |
| 2.3 Recozimento .....   | 34     |
| 3. Método de Monte Carlo para o cálculo da dose absorvida .....   | 34     |
| 3.1 Descrição geral do método .....   | 34     |
| 3.2 Estatística .....   | 38     |
| CAPÍTULO III - DESENVOLVIMENTO DO FANTASMA MATEMÁTICO .....   | 40     |
| 1. Introdução .....   | 40     |
| 2. Determinação da altura, massa, volume e densidade do corpo do fantasma .....                                       | 42     |
| 3. Composição dos tecidos do corpo do fantasma ...  | 44     |
| 4. Determinação do volume de cada região do corpo do fantasma .....   | 44     |
| 5. Descrição matemática de cada região do corpo do fantasma .....   | 48     |

|  | página |
|--|--------|
| 5.1 Região da cabeça .....   | 49     |
| 5.2 Região do pescoço .....  | 50     |
| 5.3 Região do tronco .....   | 50     |
| 5.4 Região dos braços .....  | 51     |
| 5.5 Região das pernas .....  | 51     |
| 5.6 Região dos órgãos genitais .....   | 53     |
| 6. Desenvolvimento do esqueleto do fantasma .....                                | 53     |
| 6.1 Determinação da massa total do esqueleto .....                               | 53     |
| 6.2 Determinação da massa e volume de cada osso do esqueleto do fantasma .....   | 54     |
| 6.3 Descrição matemática dos ossos do fantasma ....                              | 66     |
| 6.3.1 Ossos da cabeça .....  | 66     |
| 6.3.1.1 Crânio .....   | 66     |
| 6.3.1.2 Mandíbula .....  | 68     |
| 6.3.1.2.1 Região dos dentes inferiores .....                                     | 68     |
| 6.3.1.2.2 Região excluindo os dentes inferiores ...                              | 69     |
| 6.3.1.3 Região superior do rosto .....   | 69     |
| 6.3.1.3.1 Sub-região superior .....  | 70     |
| 6.3.1.3.2 Sub-região dos dentes superiores .....                                 | 71     |
| 6.3.2 Coluna vertebral .....   | 72     |
| 6.3.2.1 Região cervical .....  | 72     |
| 6.3.2.2 Região torácica .....  | 72     |
| 6.3.2.3 Região lumbar .....  | 73     |
| 6.3.3 Costelas e esterno .....   | 73     |
| 6.3.4 Clavículas .....   | 75     |
| 6.3.5 Escápulas .....  | 76     |
| 6.3.6 Ossos dos braços .....   | 78     |
| 6.3.7 Pelvis e sacro .....   | 79     |
| 6.3.8 Ossos das pernas .....   | 81     |
| 7. Desenvolvimento dos órgãos internos do fantasma.                              | 82     |
| 7.1 Determinação da massa e volume dos órgãos internos do corpo do fantasma..... | 82     |
| 7.2 Descrição matemática dos órgãos internos do corpo do fantasma .....          | 88     |
| 7.2.1 Cérebro .....  | 88     |
| 7.2.2 Tireóide .....   | 88     |
| 7.2.3 Glândula timo .....  | 90     |
| 7.2.4 Coração .....  | 90     |
| 7.2.5 Pulmões .....  | 91     |
| 7.2.6 Fígado .....   | 92     |
| 7.2.7 Rins .....   | 93     |
| 7.2.8 Glândulas adrenais .....   | 95     |
| 7.2.9 Baço .....   | 96     |
| 7.2.10 Pâncreas .....  | 96     |
| 7.2.11 Trato gastro-intestinal .....   | 97     |
| 7.2.11.1 Estômago .....  | 97     |
| 7.2.11.2 Intestino delgado .....   | 99     |
| 7.2.11.3 Intestino grosso superior .....   | 99     |
| 7.2.11.4 Intestino grosso inferior .....   | 101    |
| 7.2.12 Ovários .....   | 103    |
| 7.2.13 Útero .....   | 104    |
| 7.2.14 Bexiga .....  | 104    |
| 7.2.15 Testículos .....  | 105    |
| 7.2.16 Pele do corpo .....   | 106    |

|   | Página |
|---|--------|
| CAPÍTULO IV - MATERIAIS E MÉTODOS .....   | 107    |
| 1. Equipamento de raios-X .....   | 107    |
| 2. Fantasma físico usado nas irradiações .....  | 109    |
| 2.1 Introdução .....  | 109    |
| 2.2 Materiais e composição do fantasma físico .....                                   | 112    |
| 2.2.1 Coeficientes de atenuação de massa .....  | 114    |
| 2.2.2 Volumes das diversas regiões do corpo dos fantasmas físico e matemático .....   | 116    |
| 3. Sistema dosimétrico usado .....  | 116    |
| 3.1 Câmara de ionização Victoreen modelo 550 .....                                    | 116    |
| 3.2 Dosímetros termoluminescentes e equipamento de leitura .....                      | 121    |
| 3.2.1 Comparação da dosimetria termoluminescente com outros tipos de dosimetria ..... | 122    |
| 4. Irradiação do fantasma .....   | 123    |
| 4.1 Procedimento .....  | 123    |
| 5. Processamento de dados .....   | 127    |
| CAPÍTULO V - RESULTADOS E CONCLUSÕES .....  | 135    |
| 1. Resultados .....   | 135    |
| 1.1 Frações absorvidas específicas .....  | 135    |
| 1.2 Medidas experimentais .....   | 155    |
| 1.2.1 Exame de tórax .....  | 157    |
| 1.2.2 Exame abdominal .....   | 160    |
| 1.3 Análise de erros .....  | 160    |
| 2. Conclusões .....   | 166    |
| SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS .....  | 170    |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....  | 171    |

## CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A descoberta dos raios-X pelo Professor Wilhem Conrad Roentgen em 8 de novembro de 1895, marcou o começo de uma nova era no desenvolvimento de técnicas que possibilitaram a análise do interior dos objetos e seres vivos, sem que estes fossem visivelmente danificados (pelo menos na ocasião da análise), o que até aquela época era praticamente impossível. Essa descoberta trouxe, por outro lado, um perigo, até então desconhecido, à saúde dos seres vivos, em face aos danos que a radiação ionizante pode causar em seus tecidos. Quando esses seres viventes são expostos à esse tipo de radiação, as unidades altamente organizadas que formam o seu corpo (as células) têm uma grande probabilidade de serem danificadas, esse dano ocorrendo em menos de um trilionésimo de segundo.

Há muitos tipos de reações que podem ocorrer numa célula. Essas reações podem resultar na sua morte imediata ou ela pode vir a morrer muitos anos mais tarde. Consequentemente, muitas perguntas concernentes aos efeitos da radiação ionizante em organismos vivos podem ser feitas. Por exemplo, como pode o dano a uma única célula levar dano ao organismo todo? Qual é a relação entre a dose de radiação recebida e o dano causado? Qual é a mínima dose para a qual o efeito resultante ocorreria depois da vida média de um indivíduo? E muitas outras. Todas estas perguntas devem ser respondidas a fim de que normas ainda mais significativas para o controle de exposição às radiações sejam formuladas.

Experiências com animais e dados coletados de exposições de indivíduos (experimentais e acidentais) têm levado a algumas conclusões muito úteis. Tem sido estimado que a exposição do corpo todo entre 400 e 500R seria fatal, dentro de 30 dias, para 50% dos indivíduos expostos. Esta exposição é chamada de "dose letal média" (DLM). A DLM varia de indivíduo para indivíduo de acordo com sua radiosensibilidade, e varia também de espécie para espécie. Isto é mostrado na tabela 1.1. (36)

Dados experimentais, obtidos da exposição de ratos, mostraram, como esperado, que, quando somente uma parte do corpo é exposta à radiação, a dose letal mínima (DLMin) é muito maior que quando o corpo todo é irradiado. A tabela 1.2 (36) ilustra este fato com dados sobre a DLMin para ratos.

Sabe-se, também, que exposições de baixos níveis podem levar a problemas sérios que se expressam a curto ou a longo prazo. Um único exemplo pode servir para ilustrar dois tipos de efeitos: o somático e o genético. Suponhamos que uma criança do sexo feminino receba uma exposição à radiação por algum motivo qualquer. Todos os óvulos que são liberados durante a vida da mulher estão presentes no ovário ao nascer. Devido a isso, a radiação pode afetar a mulher de duas maneiras diferentes: (1) Se a radiação interagir diretamente com as células que compõem os ovários há a possibilidade de algumas células serem alteradas causando sua morte ou uma proliferação rápida.

Tabela I.1 - Dose Letal Média (DLM) para várias Espécies Animais

| Espécie                       | DLM (Roentgens) |
|-------------------------------|-----------------|
| Porco da Guiné                | 175-250         |
| Cão                           | 325             |
| Cabra                         | 350             |
| Homem                         | 400-450         |
| Camundongo                    | 530             |
| Coelho                        | 800             |
| Rato                          | 825-900         |
| Escaravelho                   | 1000-2000       |
| Bactéria (Formação de esporo) | 20000-50000     |
| Virus                         | 50000-100000    |

Tabela I-2 - Dose Letal Mínima (DLMin) para irradiação de partes do corpo (ratos).

| Parte do corpo   | DLMin (Roentgens) |
|------------------|-------------------|
| Corpo todo       | 800               |
| Cabeça           | 2000              |
| Abdomem inferior | 3000              |
| Abdomem superior | 5000              |
| Tórax            | 10000             |

Este é um efeito somático da radiação, em que os danos são manifestados somente no indivíduo irradiado. (2) Se a radiação interagir com alguns dos óvulos de tal modo que um deles ~~se torne fertilizado,~~ <sup>sofra mutação,</sup> há uma forte possibilidade de que esse dano seja manifestado nos descendentes. Este seria um exemplo do efeito genético. Contudo, esse efeito pode não ser expresso logo no primeiro fenótipo mas pode dar lugar a uma mutação recessiva que poderá aparecer após várias gerações.

Nos indivíduos do sexo masculino, o espermatogônia, estágio anterior ao espermatozoa, é uma das células mais radiosensíveis do corpo. O desenvolvimento do espermatozoa pode ser inibido por uma exposição de aproximadamente 50R ou menos. Um exemplo real que poderia ser tomado para demonstrar essa sensibilidade é aquele ocorrido num reator nuclear do Argonne National Laboratory no dia 2 de junho de 1952. Nesse acidente dois homens e uma mulher foram expostos à radiação. O intervalo de exposição do corpo todo variou de 12 a 190R. Neste caso, mesmo o indivíduo que recebeu a menor exposição (12R) apresentou uma contagem de esperma abaixo do normal.

Para esterilizar um indivíduo do sexo masculino permanentemente seria necessário uma exposição de aproximadamente 500 a 600R, e para produzir uma esterilidade por período de cerca de um ou dois anos seriam necessários cerca de 250R. A esterilidade se torna efetiva em aproximadamente um mês depois da irradiação, porque os espermatozoa maduros são relati

vamente mais resistentes à radiação e portanto eles continuam seu desenvolvimento. Quando a esterilização é temporária, todos os espermatogônias são mortos e, assim o suprimento de espermatozoa é exaurido. A fertilidade retorna quando suficiente quantidade de espermatogônia for repostada novamente. Contudo, o esperma pode conter gens mutantes que podem se expressar em gerações futuras.

Há três maneiras pelas quais a radiação pode afetar as células reprodutivas; ela pode matar as células, quebrar os cromossomas e mutar os gens. A primeira possibilidade não é de muita importância porque se a célula é morta ela não será fertilizada e conseqüentemente não afetará os descendentes. Contudo, esta pode ser classificada como uma morte genética.

A importância da segunda possibilidade é provavelmente pequena porque as mudanças devido à quebra de cromossomas, em geral não são transmitidas às gerações futuras. O cromossoma quebrado tem uma pequena probabilidade de se reunir, e a célula que o contém morre quando tenta se dividir. No caso da célula ser bem sucedida ao fazer algumas divisões, ela ainda morrerá porque os fragmentos de cromossoma ficam perdidos e ela não possui o número de cromossomas necessários para sobreviver. Se os fragmentos se encontrarem e se "soldarem novamente", o cromossoma resultante terá sua capacidade de encontrar um companheiro normal grandemente redu

zida e conseqüentemente a fertilidade será drasticamente diminuída. Mesmo que ocorra a fertilização, ela poderá não ser bem sucedida porque é provável que o feto morra no útero. Mesmo que a célula que contém o cromossoma "soldado" se desenvolva em um indivíduo aparentemente normal, os descendentes dessa pessoa terão maior probabilidade de ter fertilidade reduzida, a qual é manifestada por repetidos abortos e má<sup>s</sup> formações.

Portanto, do ponto de vista genético, a terceira possibilidade pela qual a radiação pode afetar as células reprodutivas, isto é, por mutação dos gens, é a que nos interessa. As pequenas doses de radiação acumuladas aumentam o número de mutações de gens, as quais podem ser transmitidas para gerações futuras através da hereditariedade.

A idade dos indivíduos deve também ser levada em conta quando se estuda os efeitos da radiação na hereditariedade. Em outras palavras, se uma pessoa passou a idade de reprodução, então, obviamente os efeitos genéticos da radiação que ele recebeu após ter passado aquela idade, não precisam ser considerados porque qualquer mutação induzida não será transmitida para as futuras gerações.

A dose de radiação nos órgãos reprodutivos é de muita importância quando se considera o futuro do ser humano, e esta é uma das razões pelas quais esses órgãos foram escolhidos para a parte experimental deste trabalho.

Durante as últimas três décadas, experiências foram obtidas nas aplicações de radionuclídeos para fins de diagnose ou terapia. Especialistas em medicina nuclear necessitam do uso das radiações sem, contudo, deixar de saber, antecipadamente, a quantidade de radiação que será absorvida pelo paciente quando um composto radiofarmacêutico é administrado. As vezes, mesmo quando a quantidade a administrar foi calculada tendo por base a dose absorvida para produzir um certo efeito desejado, acontece do ~~tratamento~~ <sup>diagnóstico</sup> ser ineficiente. Então, mais composto radioativo é dado ao paciente e conseqüentemente a dose recebida será maior que o valor requerido para aquele particular ~~tratamento~~ <sup>exame</sup>. Diferenças nas taxas de eliminação biológica ou na porcentagem de absorção do composto para doses terapêuticas e doses de diagnose podem ser as razões da subestimativa da quantidade de radionuclídeo administrada.

Muitos radionuclídeos estão em uso para fins de diagnose e/ou terapia. Um bom exemplo é o  $^{99m}\text{Tc}$  que é um radioisótopo instável e totalmente artificial, ~~de um elemento que nem aparece na tabela periódica.~~ <sup>(46)</sup> Suas ótimas características (6 horas de meia vida, inexistência de partículas emitidas com a radiação gama de 140 KeV, sendo esta facilmente detetável pelos instrumentos comerciais disponíveis) fazem-no um dos mais úteis isótopos para fins médicos. <sup>(46)</sup> Devido a isto, uma grande quantidade de pesquisas tem sido feita com o intuito de incorporar este elemento em compostos químicos com

*metabolização,*  
características de absorção, pelo organismo, apropriadas para o uso médico. Uma das mais usadas formas químicas que foram desenvolvidas é o pertecnetato oxidado para uso em "brain scanning", e que pode ser injetado para avaliar se há fluência normal de sangue no cérebro. Em outras palavras, verificar se há obstrução ou deslocamento dos vasos sanguíneos do cérebro. Normalmente o pertecnetato de  $^{99m}\text{Tc}$  não se acumula nos tecidos do cérebro. Grandes quantidades podem ser administradas com pequena exposição à radiação. Este radiofarmaco se comporta como o iodo e portanto a tireóide pode ser também visualizada. Na forma de colóides o  $^{99m}\text{Tc}$  pode ser usado como traçador para examinar as funções de certos órgãos como o fígado, o baço e a medula óssea hematopoiética. Como albumina macroagregada ele pode ser usado no exame de fluxo de sangue nos pulmões. Portanto, para cada tipo de exame é requerida uma forma química adequada.

A aplicação de traçadores em medicina nuclear está ainda no seu começo e a informação que essa técnica fornece é ainda muito imprecisa em comparação com a sua capacidade potencial. Até o presente, traçadores foram usados na forma de compostos inorgânicos para prover informações sobre as funções fisiológicas e para relacionar sistema de órgãos. No futuro, compostos orgânicos serão usados para metabolismos normais ou alterados. Carbono marcado, nitrogênio, oxigênio e hidrogênio abrirão as portas para o entendimento de essencialmente todas as doenças que possam

ser relacionadas ao metabolismo, tanto em qualidade como em quantidade.

O Scientific Committee 51-B, "Radiations Protection Applied to Pediatric Nuclear Medicine", do National Council on Radiation Protection (NCRP), relacionou os mais importantes radionuclídeos usados em medicina nuclear pediátrica (relação apresentada no capítulo V) e os principais órgãos afetados. Essa relação foi necessária a fim de que cálculos das frações absorvidas específicas<sup>(a)</sup> para fótons emitidos naqueles órgãos pudessem ser feitos, e dados pudessem ser fornecidos aos praticantes de <sup>M</sup>medicina <sup>N</sup>nuclear.

Neste estudo a atenção foi concentrada na criança de 10 anos de idade, e, como é sabido, com o aumento do número de equipamentos nucleares de geração de energia, estimativas da dose absorvida por este grupo da população se fazem necessárias. Muitas fontes de radiação (naturais, radiologia diagnóstica, precipitação radioativa, etc.) e algumas fontes potenciais como as causadas pelo espalhamento (contaminação) de materiais radioativos na atmosfera devido a acidentes de reator, são de grande importância quando se pensa em termos de exposição da população. Em particular, crianças, sendo mais sensíveis à radiação que o adulto, devem merecer uma atenção especial, pois, além das fontes acima citadas, são expostas a diversos procedimentos de medicina nuclear. Por isso, estimativas mais precisas de dose absorvida

---

(a) Fração da energia emitida pela fonte e que foi absorvida pelo órgão, dividida pela massa desse órgão.

são necessãrãtas. Snyder e Fisher<sup>(14)</sup> reconheceram esta necessidade e sugeriram o projeto de seis fantasmas para uso em cálculos de dose. Esses fantasmas corresponderiam ao recém nascido, crianças de 1,5,10,15 anos de idade e ao adulto. O primeiro fantasma desenvolvido foi o adulto (20 anos) e os fantasmas de idade inferiores a 20 anos eram obtidos reduzindo-se cada uma das três regiões do adulto (cabeça, tronco e pernas) por meio de fatores escolhidos e representativos de cada idade. Todos os órgãos, etc., dentro de cada região eram reduzidos pelo mesmo fator, e diferenças relativas entre os volumes, formas e posições eram ignoradas. As figuras I.1 e I.2 mostram as formas externas do corpo desse fantasma e do seu esqueleto respectivamente.

A geometria fisiológica de uma criança é diferente da do adulto. Por exemplo, (1) o peso da cabeça com respeito ao peso total do corpo é maior para a criança que para o adulto, (2) o tronco da criança é mais circular que o do adulto (o qual é melhor representado por um cilindro elíptico) e (3) alguns órgãos internos, como a glândula timo, são, em relação aos outros órgãos, maiores na criança que no adulto. Tais fatores podem levar a erros grosseiros nos cálculos das doses absorvidas pelas crianças.

Uma pesquisa bibliográfica foi feita para determinar as massas, formas e posições dos órgãos numa criança normal de 10 anos de idade. Esses dados foram usados na cons-

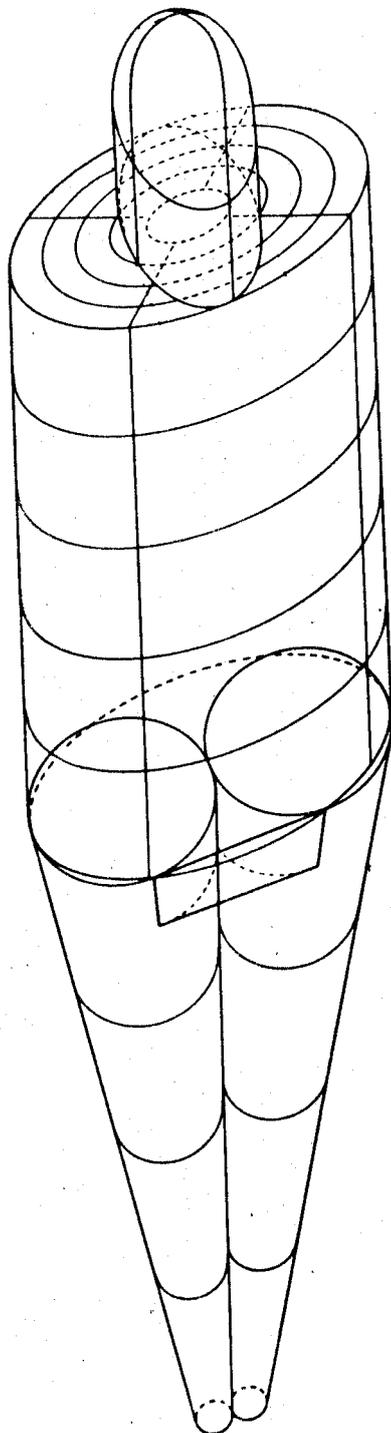


Figura I.1 - Vista geral do fantasma adulto.

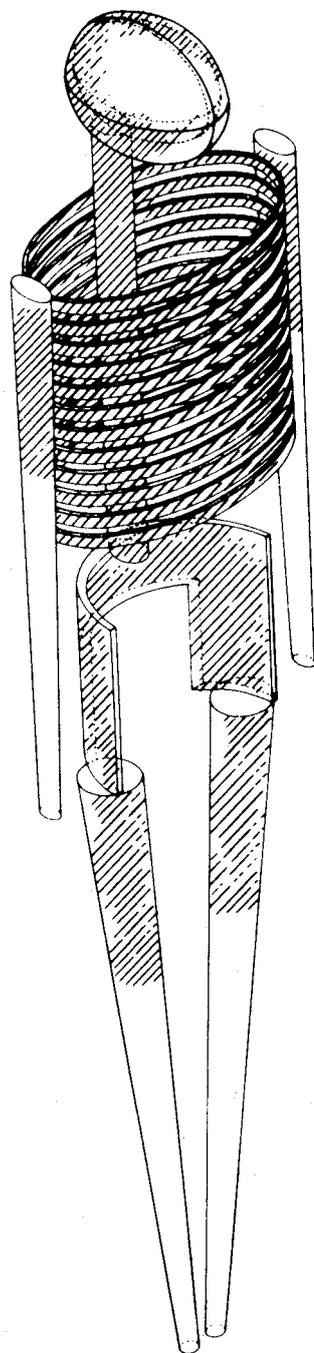


Figura I.2 - Esqueleto do fantasma adulto.

trução do fantasma matemático da criança, para obtenção computacional das doses absorvidas nas mais variadas condições de exposição.

Este fantasma de 10 anos de idade, representa o último de uma sequência de fantasmas considerados necessários para fins de estimativas de dose absorvida, e foi construído no sentido de oferecer uma contribuição no campo da dosimetria interna, e apontar para um modelo que pode representar o primeiro de uma nova geração de fantasmas para fins de dosimetria pediátrica.

Os objetivos desta pesquisa são os seguintes: (1) desenvolver um fantasma que represente uma criança referência de 10 anos de idade; (2) usar esse fantasma como a base dos cálculos de dose absorvida devido aos radionuclídeos apontados pelo Comitê Científico 51- B, referido anteriormente, e comparar os resultados com aqueles obtidos usando-se o modelo "reduzido" similar ao adulto; (3) obter medidas experimentais da razão da dose média absorvida em relação à exposição de entrada na pele, para alguns órgãos do fantasma do adulto,<sup>(a)</sup> usando o método de dosimetria termoluminescente, e comparar os resultados das medidas com os cálculos da dose

---

(a) Para a parte experimental, o fantasma físico da criança de 10 anos de idade não ficou terminado. Contudo, o fantasma do adulto foi usado nas irradiações, uma vez que a geometria e dimensões não são importantes quando se compara o código de transporte da radiação gama no mesmo fantasma em que as medidas experimentais foram feitas.

absorvida (obtidos pelo método de Monte Carlo) nos órgãos do referido fantasma; (4) obter dados experimentais, da razão acima mencionada, para os órgãos que são de maior importância para a dose genética, e comparar esses dados com outros obtidos por espectrometria.

Os órgãos escolhidos para a parte experimental foram os ovários, testículos e útero (feto) para exposições abdominais e ovários, testículos, útero, tireóide e parte torácica da coluna vertebral, para exposições do tórax.

## CAPÍTULO II - TEORIA

### 1. Interação da radiação com a matéria

#### 1.1 - Descrição geral

A radiação ionizante, ao atingir um organismo vivo, interage com os átomos das moléculas que compõem suas células, podendo ocasionar, pela deposição de energia nos tecidos, danos biológicos ou simplesmente liberação de calor. Isto é mostrado esquematicamente na figura II.1.<sup>(21)</sup> Inicialmente o fóton colide com um dos elétrons dos átomos que compõem o tecido. Esse elétron é posto em movimento e o fóton espalhado prossegue com energia mais baixa, colidindo com outros elétrons da mesma maneira que o fóton primário, até ser completamente absorvido pelo tecido ou escapar do sistema biológico. O elétron posto em movimento produz um traço ao longo do qual ionização e/ou excitação dos átomos, ou quebra das ligações moleculares, podem ocorrer e que são as responsáveis pelo dano biológico. Contudo, a maior parte da energia do fóton é convertida em calor, não havendo, portanto, ocorrência de dano nas células. Bremsstrahlung pode também ser produzido por alguns dos elétrons de alta energia quando são freados por colisões. Essa radiação (bremsstrahlung) interagirá com o tecido da mesma maneira que os fótons primários e os fótons espalhados.

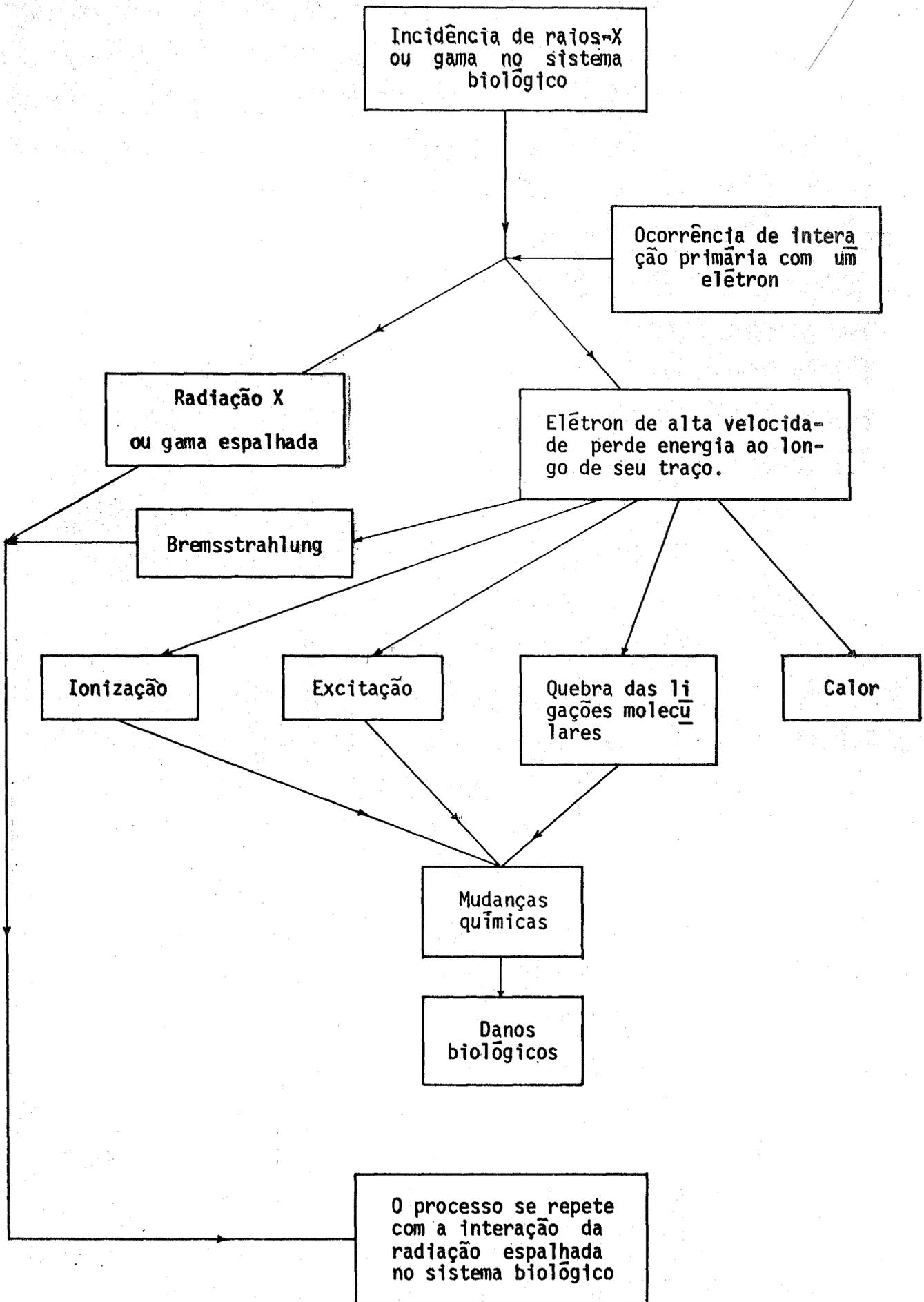


Figura II.1 - Degradação da energia dos fótons incidentes no sistema biológico.

A radiação eletromagnética interage com o tecido humano por meio de três principais processos: fotoelétrico, Compton e produção de pares.

## 1.2 - Processo fotoelétrico

### 1.2.1 - Descrição geral

O processo fotoelétrico ocorre quando um fóton com energia  $h\nu$  ( $h$  sendo a constante de Plank e  $\nu$  a frequência associada ao fóton) interage, por exemplo, com um elétron da camada K removendo-o do átomo. Esse elétron é lançado com uma energia cinética dada por  $T = h\nu - E_k$  onde  $E_k$  é a energia de ligação dos elétrons da camada K. Portanto neste processo o fóton desaparece, pois, toda sua energia é cedida ao elétron e à sua remoção do átomo. O elétron assim arrancado é substituído, em geral, por outro da camada externa seguinte, produzindo radiação característica do material absorvido (vide figura II.2).

Assim, se  $\delta$  é a energia média da radiação característica emitida, por fóton absorvido, então  $(h\nu - \delta)$  é a energia média transferida para o elétron da camada K. O coeficiente de transferência de energia dividido pela densidade do absorvedor é então dado por:

$$\frac{\tau_k}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} \frac{(h\nu - \delta)}{h\nu} = \frac{\tau}{\rho} \left(1 - \frac{\delta}{h\nu}\right)$$

onde  $\tau$  é o coeficiente de atenuação total.

Para materiais de alto número atômico o fator de correção  $(1 - \frac{\delta}{h\nu})$  é mais importante porque  $\delta$  é relativamente grande. Por exemplo, para o tungstênio, a energia de ligação da camada K é 70 KeV e portanto, para um fóton de energia 100 KeV o fator de correção é  $(1 - \frac{70}{100}) = 0,3$ . Isto significa que o coeficiente de transferência de energia é 30% do coeficiente de atenuação total para o efeito fotoelétrico.

Para materiais de baixo número atômico cuja energia de ligação para a camada K é aproximadamente 0,5 KeV, o fator de correção é  $(1 - \frac{0,5}{100}) = 0,995$  ou aproximadamente 1. Portanto para o tecido humano o coeficiente de transferência de energia é aproximadamente igual ao coeficiente de atenuação total.

### 1.2.2 - Variação do coeficiente de absorção de massa para o efeito fotoelétrico, em função da energia de radiação.

A variação do coeficiente de absorção de massa em função da energia da radiação é mostrada na figura II.2<sup>(21)</sup> para a água e para o chumbo como representantes dos materiais de baixo e de alto número atômico respectivamente. Observa-se, para a água, que o coeficiente decresce rapidamente na região de 10 a 100 KeV, e a variação com a energia segue aproximadamente a relação  $\frac{1}{E^3}$ . Num gráfico log-log essa variação é repre

sentada por uma reta e segue aproximadamente a relação  $\frac{1}{E^n}$  onde  $n$  é o coeficiente angular da reta. Para cada ciclo no eixo das energias observa-se que a variação do coeficiente é aproximadamente 3 ciclos. Há, portanto, uma boa concordância com a relação  $\frac{1}{E^3}$ . Para o chumbo, a variação do coeficiente é mais complicada em virtude das discontinuidades que ocorrem nas energias de ligação dos elétrons K, L, M ..... ou sejam 88 KeV para a camada K, 13 a 15 KeV para as camadas  $L_I$ ,  $L_{II}$  e  $L_{III}$  e 2 a 4 KeV para as camadas  $M_I$  a  $M_V$ . Entre as descontinuidades, a curva é representada por uma linha reta com coeficiente angular aproximadamente igual a 3, sendo que junto a essas descontinuidades a lei  $\frac{1}{E^3}$  não é satisfeita, pois, nessas regiões um fóton de alta energia pode ter um coeficiente de absorção maior que um fóton de energia menor. Acima de 1 MeV o coeficiente angular da curva para o chumbo varia gradualmente até o ângulo de 45°. Nessa região o coeficiente de absorção é reduzido de um fator 2 quando a energia é dobrada.

### 1.2.3 - Variação do efeito fotoelétrico com o número atômico.

A variação do efeito fotoelétrico com o número atômico do material absorvedor é notada na figura II.2, onde se verifica que acima do degrau K do chumbo, o coeficiente de absorção é mais de 1000 vezes maior que no caso da água, sendo que os números atômicos desses elementos são respectivamente 82 e 7,42. Verifica-se ainda, que o cubo da relação entre esses números atômicos concorda com a teoria que diz

que o coeficiente de atenuação varia em função do número atômico  $Z$  aproximadamente como  $Z^3$ . Por outro lado, a variação desse coeficiente, por átomo, segue a lei  $Z^4$  uma vez que cada átomo contém  $Z$  elétrons. A camada  $\bar{a}$  que o elétron pertence  $\bar{e}$  que determina a quantidade de absorção fotoelétrica ocorrida.

### 1.3 - Processo Compton

#### 1.3.1 - Descrição geral

No processo Compton, mostrado esquematicamente na figura II.3, os fótons interagem com os elétrons da camada externa, ou sejam, os elétrons mais fracamente ligados ao átomo. Essa figura mostra também o espalhamento coerente no qual o fóton espalhado tem a mesma energia que o fóton primário, porém com direção diferente. Neste caso não há deposição de energia no meio espalhador. O coeficiente de transferência de energia  $\bar{e}$  igual a zero e portanto este espalhamento  $\bar{s}$  tem interesse acadêmico para os radiologistas.

Thomson, considerando a radiação como ondas em movimento, determinou a quantidade de energia espalhada por um elétron livre por meio de seu coeficiente de espalhamento clássico. Mais tarde foi verificado experimentalmente que a energia espalhada era menor que a prevista por Thomson. A diferença foi esclarecida por Compton em 1923. O elétron ao

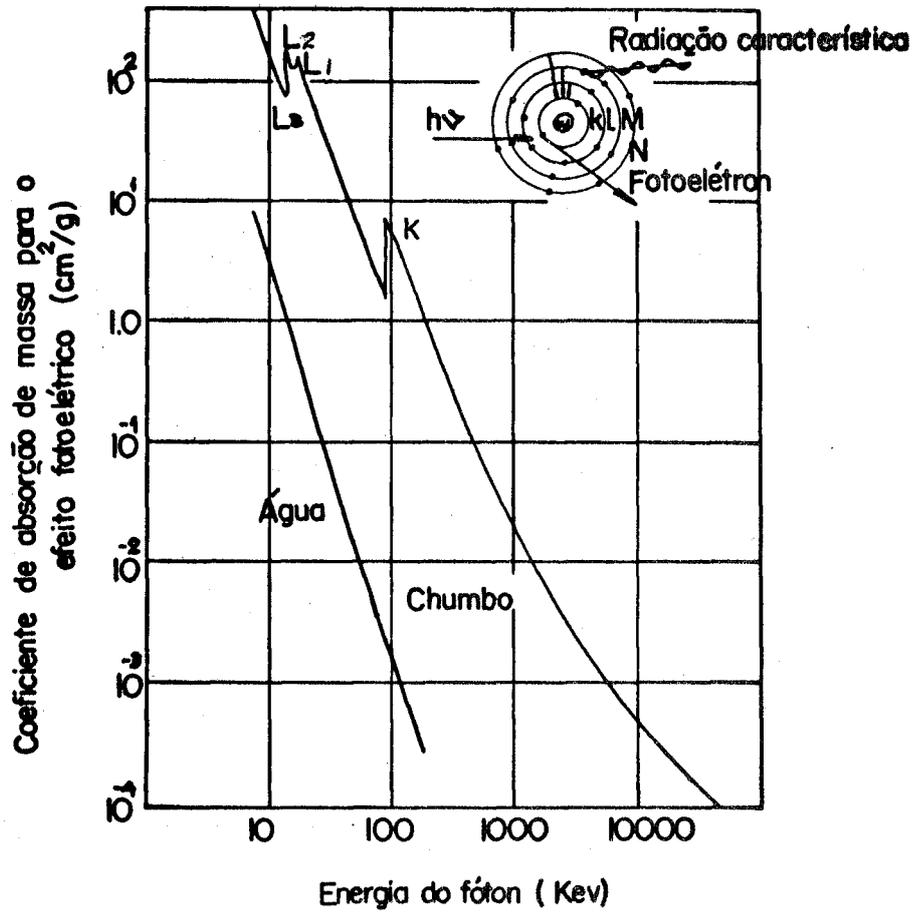


Figura 11.2 - Variação do coeficiente de absorção de massa para o efeito fotoelétrico em função da energia, para a água e o chumbo. A interação de um fóton com um elétron da camada K é também mostrada esquematicamente.

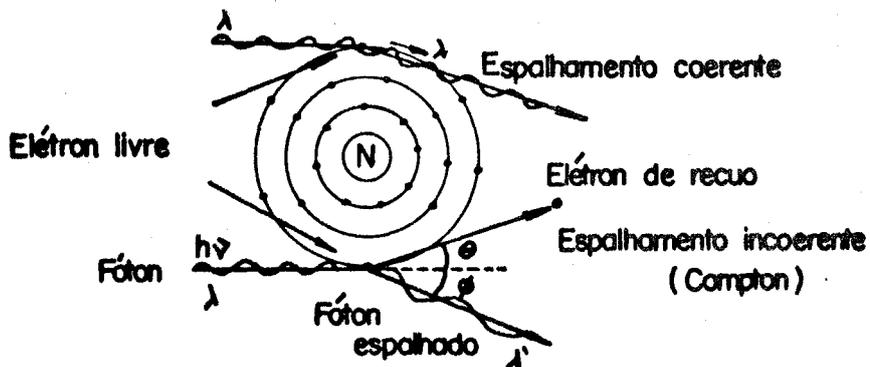


Figura 11.3 - Espalhamento coerente e incoerente

ser posto em oscilação poderia ser recuado, e o fóton espalhado teria uma energia  $h\nu'$  menor que a energia incidente  $h\nu$ . Isso pode ser representado por

$$h\nu = h\nu' + E$$

onde  $E$  é a energia cinética do elétron de recuo. Como o momento é conservado, ~~nesses processos~~, as energias do elétron de recuo e do fóton espalhado podem ser calculadas como segue:

$$E = h\nu \frac{\alpha(1-\cos\phi)}{1+\alpha(1-\cos\phi)}$$

$$h\nu' = h\nu \frac{1}{1+\alpha(1-\cos\phi)}$$

$$\text{onde } \alpha = \frac{h\nu}{m_0 c^2}$$

Quando ocorre uma colisão frontal de um fóton com um elétron, este último se movimentará com a energia máxima possível na direção do fóton incidente. O fóton por sua vez, será retroespalhado com a mínima energia possível. Essas energias são expressas pondo  $\phi = 180^\circ$  nas equações acima. Isto é

$$E_{\max} = h\nu \frac{2\alpha}{1+2\alpha}$$

$$h\nu'_{\min} = h\nu \frac{1}{1+2\alpha}$$

Por outro lado, pode ocorrer também colisão em que o fóton espalhado prossegue na mesma direção ( $\phi = 0$ ) do fóton incidente. Neste caso, as energias são:

$$E' = 0$$

$$h\nu' = h\nu$$

Portanto, para este tipo particular de colisão, aproximadamente toda energia do fóton incidente é carregada pelo fóton espalhado; a energia do elétron é, neste caso, aproximadamente igual a zero.

O coeficiente de transferência de energia é dado por

$$\sigma_k = \sigma \frac{\bar{E}_k}{h\nu},$$

onde  $\bar{E}_k$  e  $\sigma$  são respectivamente a energia média do elétron de recuo e o coeficiente de atenuação total para o espalhamento Compton. O coeficiente de espalhamento é definido por

$$\sigma_s = \sigma \left(1 - \frac{\bar{E}_k}{h\nu}\right).$$

### 1.3.2 - Variação de $\sigma$ , $\sigma_k$ e $\sigma_s$ com a energia da radiação

Sabe-se que  $\sigma = \sigma_k + \sigma_s$ . Para materiais de baixo número atômico, o coeficiente de absorção de energia  $\sigma_{en}$ , no processo Compton, é igual a  $\sigma_k$  para fótons de energia até 2 MeV. Para energias mais altas,  $\sigma_{en}$  é alguns por cento menor que  $\sigma_k$ . A variação de  $\sigma$ ,  $\sigma_k$  e  $\sigma_s$  (por elétron), com a energia dos fótons, é vista na figura II.4. Essa figura mostra que quando a energia da radiação aumenta,  $\sigma$  decresce continuamente e no intervalo de 10 a 100 KeV,  $\sigma_k \ll \sigma$ ; em aproxima

mente 10 MeV,  $\sigma_k$  aproxima-se de  $\sigma$ . Em outras palavras, para fótons de baixa energia, o elétron de recuo recebe uma fração muito pequena da energia do fóton, enquanto que para altas energias (acima de 10 MeV) o elétron de recuo recebe a maior parte da energia do fóton incidente.

### 1.3.3 - Variação da absorção Compton com o número atômico

O processo Compton é independente do número atômico uma vez que somente elétrons livres são envolvidos. Todos materiais absorvem essencialmente a mesma quantidade de radiação por elétron, neste processo, e portanto a absorção por unidade de massa é aproximadamente igual para todos os materiais uma vez que eles possuem a mesma quantidade de elétrons por grama.

## 1.4 - Produção de pares

### 1.4.1 - Descrição geral

O terceiro processo de interação da radiação com a matéria, isto é, produção de pares, pode ocorrer quando um fóton de energia maior que 1,022 MeV (correspondente a 2 vezes a energia de repouso do elétron) passa próximo ao núcleo de um átomo. O fóton interage com o campo do núcleo e desaparece dando lugar a um par pósitron - elétron (ver figura II.5). Se o fóton tem uma energia maior que 1,022 MeV, o

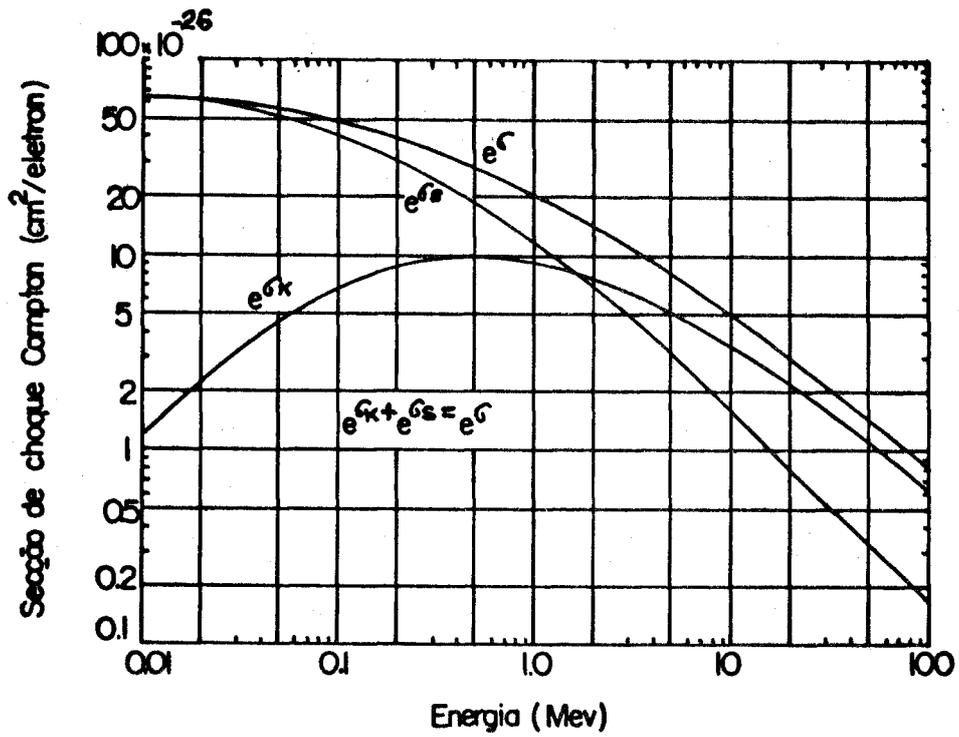


Figura 11.4 - Variação de  $\sigma$ ,  $\sigma_s$  e  $\sigma_r$  por elétron, com a energia da radiação.

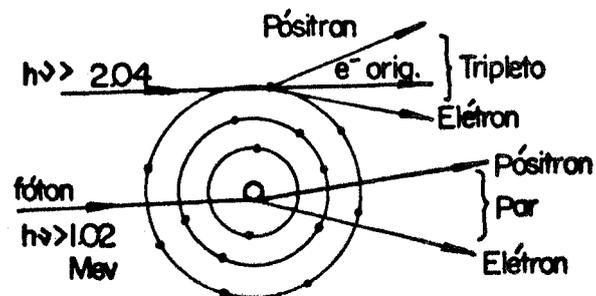


Figura 11.5 - Absorção de fótons por produção de pares e de tripletos

processo pode ser descrito por

$$h\nu = 1,022 + E_+ + E_-$$

onde  $E_+$  e  $E_-$  são as energias cinéticas do pósitron e do elétron, respectivamente. O pósitron é logo aniquilado ao interagir com um elétron e, como resultado, são emitidos dois fótons de energia 0,511 MeV na mesma direção, porém em sentidos opostos.

Se o fóton primário tem uma energia maior que 2,044 MeV, ele pode interagir com o campo de um elétron atômico dando origem a um pósitron, a um elétron e ao elétron que originou a interação, cada um com uma certa energia cinética dependente da energia do fóton incidente. Este processo é comumente chamado de produção de tripletos, e sua ocorrência é, em geral, pequena em relação a produção de pares.

#### 1.4.2 - Variação da secção de choque com a energia da radiação para o processo de produção de pares.

Acima da energia limiar (1,022 MeV) para o processo de produção de pares, a secção de choque aumenta lentamente para energias crescentes. Assim, um fóton de alta energia é mais provável de ser eliminado por meio deste processo que um fóton de energia menor.

Os coeficientes de transferência de energia  $\pi_k$  e de atenuação  $\pi$  são relacionados da seguinte forma:

$$\pi_k = \pi \frac{\bar{E}_k}{h\nu}$$

onde  $\bar{E}_k$  é a energia cinética média, por colisão, das partículas carregadas (pósitron mais elétron). Uma vez que o pósitron criado tem uma pequena probabilidade de ser aniquilado antes de atingir o repouso, a energia que aparece como radiação de aniquilação é igual a  $1,022$  MeV, e  $E_k = h\nu - 1,022$ . Portanto, da expressão acima tem-se que

$$\pi_k = \pi \frac{h\nu - 1,022}{h\nu} = \pi \left(1 - \frac{1,022}{h\nu}\right),$$

onde  $h\nu$  é expresso em MeV.

Parte da energia do elétron e do pósitron pode ser convertida em bremsstrahlung e escapar do meio absorvedor tornando o coeficiente de absorção de energia  $\pi_{en}$  menor que  $\pi$ . Por exemplo, para o ar,  $\pi_{en}$  é cerca de 4% menor que  $\pi$  para a energia de 10 MeV.

#### 1.4.3 - Variação do coeficiente de produção de pares com o número atômico.

A variação do coeficiente de produção de pares, por átomo, ( ${}_a\pi$ ), com o número atômico do material absorvedor, segue a lei  $Z^2$ . Assim, um átomo de chumbo absorverá 100 vezes mais energia que um átomo de oxigênio, pois,  $\left(\frac{Z_{pb}}{Z_{oxig}}\right)^2 = \left(\frac{82}{8}\right)^2 \cong 100$ . Como cada átomo possui  $Z$  elétrons, o coeficiente por elétron é proporcional a  $Z$  e portanto o chumbo absorverá 10 vezes mais energia, por elétron, que o oxigênio  $\left(\frac{82}{8}\right) \cong 10$ . Como to

dos os materiais têm o mesmo número de elétrons por grama, o coeficiente de absorção por grama também dependerá da primeira potência de  $Z$ . Isto significa que a absorção de fótons, pelo processo de produção de pares, num grama de chumbo, será 10 vezes maior que num grama de oxigênio.

### 1.5 - Coeficiente de absorção total de energia

O coeficiente de absorção total de energia é a soma dos coeficientes de absorção para o efeito fotoelétrico, Compton e produção de pares, ou seja:

$$\mu_{en} = \tau_{en} + \sigma_{en} + \pi_{en}$$

O espalhamento coerente não é incluído na expressão acima porque neste processo não há transferência de energia para o meio absorvedor (as radiações espalhada e incidente têm o mesmo comprimento de onda). Por outro lado, o coeficiente de espalhamento coerente  $\sigma_{coer}$  é levado em conta quando se calcula o coeficiente de atenuação total, exceção feita para os materiais de baixo número atômico onde  $\sigma_{coer}$  é geralmente desprezível para energias maiores que 10 KeV. Portanto, em geral, o coeficiente de atenuação total é dado por

$$\mu = \tau + \sigma_{coer} + \sigma + \pi,$$

onde  $\tau$ ,  $\sigma$  e  $\pi$  são respectivamente, os coeficientes de atenuação total para os efeitos fotoelétrico, Compton e produção de pares.

## 2. Dosimetria termoluminescente

### 2.1 - Descrição geral do fenômeno da termoluminescência

A dosimetria termoluminescente (DTL) é um dos mais modernos métodos de dosimetria das radiações usados atualmente. As teorias físicas e químicas da DTL ainda não são bem conhecidas mas o fenômeno básico já está qualitativamente entendido. Um diagrama hipotético e simples de energia de um cristal isolante, irradiado com raios gama ou X, é mostrado na figura II.6.<sup>(6)</sup> Quando o cristal é irradiado, elétrons da banda de valência são promovidos para a banda de condução deixando buracos na banda de valência (ver figura II.6a). Os elétrons e os buracos podem migrar dentro do cristal até se recombinarem ou serem presos em estados metaestáveis de energia, que são causados por defeitos ou impurezas na rede cristalina. Há duas maneiras pelas quais o processo termoluminescente pode ocorrer. Na primeira (vide figura II.6b), os elétrons presos adquirem energia suficiente durante o processo de aquecimento do cristal e escapam da armadilha para a banda de condução onde eles podem interagir com um centro de recombinação na banda proibida, emitindo um fóton termoluminescente (TL). Na segunda maneira (vide figura II.6c), durante o aquecimento do cristal o buraco pode adquirir suficiente energia para escapar da armadilha para a banda de valência onde pode se recombinar com um centro de recombinação emitindo um fóton TL. Esses dois processos são similares; a

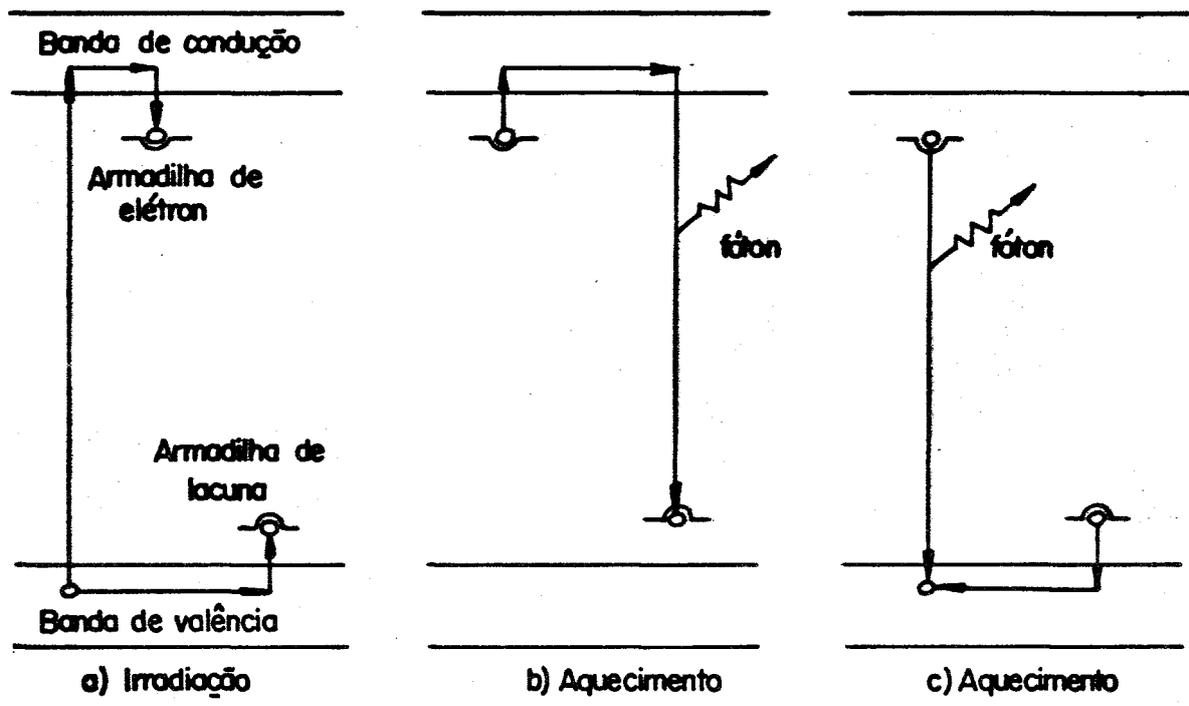


Figura 11.6 - Diagrama de energia de um cristal isolante.

predominância de um depende de qual dos portadores de carga está mais fracamente ligado. Consideremos, porém, somente o primeiro. Para liberar o elétron da armadilha é necessário que o cristal atinja uma determinada temperatura tal que a energia de agitação térmica do elétron seja suficiente para superar a barreira de potencial determinada pelo defeito do cristal.

## 2.2 - Curva de emissão termoluminescente

Quando um cristal é irradiado, a população de elétrons presos em armadilhas cresce, e quando esse cristal é aquecido cada elétron tem sua probabilidade de escape da armadilha aumentada. Assim, a uma dada temperatura, há uma certeza virtual de sua liberação e isso vem determinar o desvanescimento da energia armazenada no cristal. A esse desvanescimento está associado uma meia vida de decaimento.

Se a quantidade de fótons emitidos em consequência da interação dos elétrons com os centros de recombinação for medida em função do tempo ou da temperatura de aquecimento, o resultado é chamado de curva de emissão TL. O máximo da curva é denominado "pico de emissão", e cada curva pode ter mais de um máximo. Além disso cada material TL tem uma curva de emissão característica, com picos localizados em determinadas temperaturas, que são diferentes para cada tipo de material. Por exemplo, o LiF:Mg apresenta cinco picos, dos

quais os dois mais altos, comumente chamados de picos números 4 e 5, são os mais importantes para a dosimetria pessoal por terem meias vidas, à temperatura ambiente ( $\sim 25^{\circ}\text{C}$ ), respectivamente iguais a 7 anos e 80 anos. Os outros três picos possuem meias vidas de 5 minutos, 10 horas e 6 meses, respectivamente. Portanto os picos de números 1 e 2 não se prestam para os fins a que se pretende neste trabalho, e são, relativamente aos outros picos, diminuídos ou eliminados por tratamento térmicos especiais que serão descritos mais adiante. A figura II.7 mostra a curva de emissão TL, como função do tempo de aquecimento, para o  $\text{LiF:Mg}$  e a figura II.8 a curva de emissão TL, como função da temperatura, para o  $\text{CaF}_2\text{:Mn}$ .

A área total sob a curva de emissão, que é uma medida da quantidade total de luz emitida, é proporcional, num certo intervalo de exposição, à população de elétrons nas armadilhas, e esta é proporcional à exposição recebida. Portanto a luz emitida é proporcional à exposição recebida. Há ainda um outro método de medida da exposição, no qual é usada a proporcionalidade entre a altura de pico e a exposição recebida. Neste método a taxa de aquecimento deve ser reproduzível pelo motivo de sua influência na altura de pico. No trabalho aqui desenvolvido foi usado o primeiro método porque a emissão de luz não é dependente da taxa de aquecimento mas sim da temperatura máxima estabelecida para a leitura do cristal. Portanto mantendo essa temperatura máxima constante os resultados deverão ser reproduzíveis.

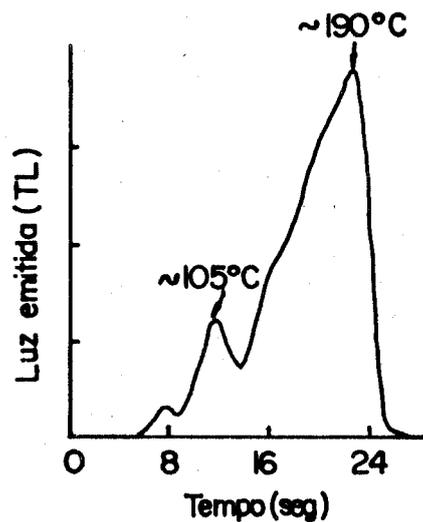


Figura II.7- Curva de emissão do LiF após recozimento de uma hora a 400°C e lido logo após irradiação com IOOR.

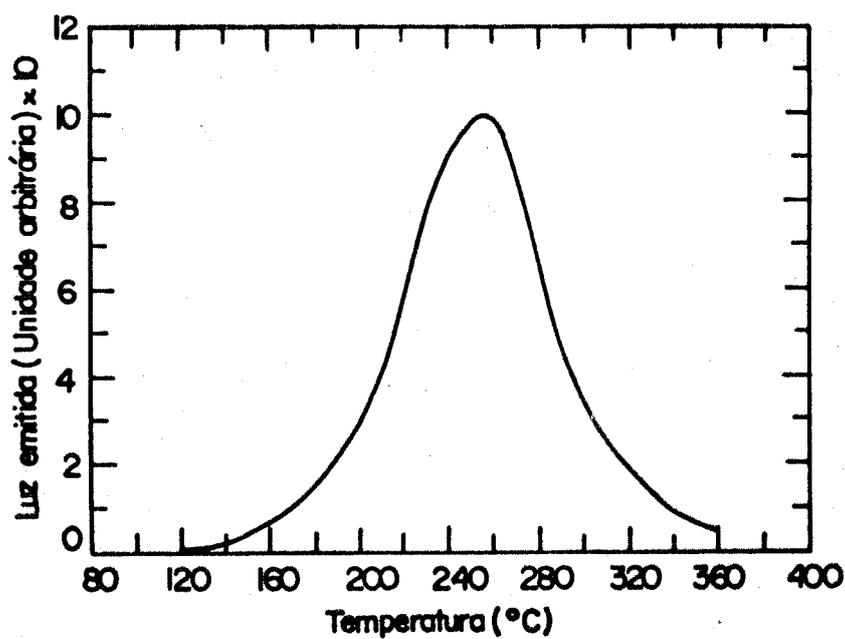


Figura II.8 - Curva de emissão do CaF<sub>2</sub>:Mn

### 2.3 - Recozimento

Antes de irradiar um dosímetro TL, é necessário fazer um tratamento térmico a fim de liberar os elétrons dos níveis metaestáveis de energia e reajustar a sensibilidade do dosímetro. Este tratamento é chamado de "recozimento". Como exemplo, o recozimento padrão do LiF sugerido por Cameron<sup>(6)</sup> se baseia na permanência do material TL durante 1 hora à temperatura de 400°C, e em seguida manter o cristal à uma temperatura de 80°C por 24 horas.

## 3. Método de Monte Carlo para o cálculo de dose absorvida

### 3.1 - Descrição geral do método

Para o cálculo da fração absorvida específica de energia nos vários órgãos do corpo do fantasma, em consequência da presença de fonte de radiação, foi usado o método de Monte Carlo. Este método é baseado numa previsão estatística de taxas de interação, transferência de energia por interação e caminhos seguidos pela radiação.

Para determinar um local de interação, os coeficientes de atenuação de massa para o efeito fotoelétrico, Compton e produção de pares foram usados para cada tipo de tecido do

fantasma, ou seja, tecido mole, esqueleto e pulmões. O método de obtenção do local de interação baseia-se na escolha de um coeficiente de atenuação  $\mu_0$  maior ou igual ao de qualquer dos tecidos acima. <sup>(41)</sup> Esse local de interação é então determinado pela expressão  $r = e^{-\mu_0 d}$ , onde  $d$  é a distância atravessada pelo fóton até ocorrer a interação, e  $r$  é um número aleatório compreendido entre 0 e 1. Portanto, o ponto de interação à distância  $d$  do ponto de partida, na direção do fóton, é testado para a região do fantasma que o contém. Se esta for a região  $i$ , então um jogo de chance é feito, com probabilidade de aceitação  $\mu_i/\mu_0$ , onde  $\mu_i$  é o coeficiente de atenuação total da região. Se o resultado do jogo for favorável, então o local de interação será aceito. Se não for favorável, o fóton iniciará um outro voo, partindo do ponto alcançado, com a mesma direção e energia. A expectativa correta para o fóton atingir qualquer ponto na direção de sua propagação é obtida por este procedimento não importando quantas interfaces ele deverá atravessar.

Como o fóton tem uma probabilidade finita de absorção, que predomina para as baixas energias, poucos penetrarão grandes distâncias e assim a estatística da estimativa será pobre. Para compensar parcialmente esta dificuldade, à cada fóton é atribuído um peso que no início do voo tem o valor 1. Depois de cada interação, o peso é reduzido para possibilitar uma probabilidade de sobrevivência, o que permitirá que o fóton continue interagindo com o meio pelo processo Compton so-

mente. O peso depois de cada interação é expresso por

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

onde  $W_{n-1}$  é o peso antes da interação de número  $n$  e  $\mu_c(E_{n-1})$  e  $\mu(E_{n-1})$  são os coeficientes de atenuação de massa para o espalhamento Compton e o coeficiente de atenuação de massa total (ambos antes da interação) respectivamente. Esta redução do peso sofrida pelo fóton é igual à expectativa para o espalhamento Compton que o fóton sofreria no processo físico real. A história do voo do fóton termina quando (1) ele escapa do fantasma, (2) sua energia cai abaixo de 4 KeV ou (3) seu peso cai abaixo de  $10^{-5}$ . Nos dois últimos casos a energia é considerada absorvida localmente.

Para a  $n$ -ésima interação, a deposição de energia no meio é dada por

$$E_n = W_{n-1} \left[ \frac{\mu_{pe}(E_{n-1})}{\mu(E_{n-1})} E_{n-1} + \frac{\mu_c(E_{n-1})}{\mu(E_{n-1})} (E_{n-1} - E_n) + \frac{\mu_{pp}(E_{n-1})}{\mu(E_{n-1})} (E_{n-1} - 2m_0c^2) \right]$$

onde  $\mu_{pe}(E_{n-1})$ ,  $\mu_c(E_{n-1})$  e  $\mu_{pp}(E_{n-1})$  são, respectivamente, os coeficientes de atenuação de massa para os processos fotoelétrico, Compton e produção de pares antes da colisão, e  $m_0c^2$  é a energia de repouso do elétron. Quando o processo fotoelétrico ocorre, a energia total do fóton é absorvida local-

mente. O mesmo acontece com a energia do elétron e do pósitron, no processo de produção de pares. A aniquilação do pósitron produz dois fótons de energia  $m_0c^2$  que também são levados em conta nos cálculos pelo computador. Os dois fótons, cada um com energia 0,511 MeV e peso total igual a  $2 W_{n-1} \mu_{pp}(E_{n-1})/\mu(E_{n-1})$ , têm uma direção aleatória de propagação, porém com sentidos opostos. O alcance dos elétrons e dos pósitrons foram também levados em conta nos cálculos. Estes alcances são em geral pequenos quando comparados com o diâmetro dos órgãos internos do corpo do fantasma. O número de interações por centímetro cúbico nas regiões de interface entre esses órgãos pode variar abruptamente. Contudo, em face do alcance finito dos elétrons secundários, a variação na dose absorvida é menos rápida nessas regiões. Por outro lado, a variação na dose, em tais regiões, é acentuada devido ao fato de não se levar em conta a dispersão da distribuição de energia, não havendo, portanto, intenção de se estimar os efeitos de superfície. A fração absorvida foi calculada para cada órgão como um todo.

Um outro tipo de radiação secundária é o "bremsstrahlung", que deveria ser considerado nos cálculos pelo motivo de seu alcance ser relativamente grande e, portanto, deveria ser seguido pelo método de Monte Carlo. Contudo, isto não é feito porque a energia total absorvida no tecido, em virtu

de dessa radiação, é muito pequena para as energias e materiais considerados neste trabalho.

### 3.2 - Estatística

A cada estimativa da dose absorvida, obtida pela aplicação do método de Monte Carlo, há um desvio padrão associado. Para calcular esse desvio padrão, considera-se uma energia  $E_{ni}$  depositada na  $n$ -ésima interação do fóton  $i$  na região de interesse. A energia total  $E_i$  depositada pelo fóton  $i$  na região considerada é dada por

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

onde  $m_i$  é o número de interações do fóton  $i$  ocorridas antes do término de sua história (conjunto de parâmetros que descrevem todo o trajeto do fóton). Portanto, a energia média depositada por fóton na região, é estimada pela expressão

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

onde  $M$  é o número de fótons emitidos pela fonte e que sofreram interação na região considerada. O desvio padrão é dado por

$$\sigma = \left[ \frac{1}{M(M-1)} \sum_{i=1}^M (E_i - \bar{E})^2 \right]^{1/2}$$

A fração absorvida (FA) e a fração absorvida especí-

fica (FAE) são relacionadas a  $\bar{E}$  por uma constante, e portanto os seus coeficientes de variação (CV), definido por  $CV=100 \frac{\sigma}{\bar{E}}$  e expresso em porcentagem, são iguais para a mesma energia média  $\bar{E}$ .

Usando-se o coeficiente de variação, é possível determinar o intervalo de confiança quando a distribuição de  $\bar{E}$  é aproximadamente normal. Em casos onde o coeficiente de variação é maior que 50% há várias indicações de que  $\bar{E}$  não é normalmente distribuída. Isto acontece quando o número de interações que contribuem para a dose absorvida é menor que 100. Nestes casos  $\sigma$  não pode levar a uma medida do nível de confiança. Isto acontece nas regiões que tem um pequeno volume e/ou estão situadas a muitos caminhos livre médio distante da fonte de radiação. O número de interações em cada região é registrado por um computador e este valor pode ser usado como uma medida subjetiva da precisão da estimativa.

Nos casos onde o valor do coeficiente de variação excede 50%, os resultados são examinados em comparação com outros obtidos por um método de cálculo independente. A conclusão é que as estimativas nesses casos, podem estar erradas por um fator de 2 a 5.<sup>(41)</sup>

### CAPÍTULO III - DESENVOLVIMENTO DO FANTASMA MATEMÁTICO

#### 1. Introdução

Diversas tentativas têm sido feitas para classificar as variações nas proporções do corpo humano em vários tipos físicos. De acordo com Bean <sup>(ref. (2), página 539),</sup> a espécie humana está dividida, do ponto de vista de suas proporções físicas, em três principais tipos: o hipo-onto-morfo, o meso-onto-morfo e o hiper-onto-morfo. No primeiro, a maturidade é atingida relativamente cedo, tal que, as proporções da criança são, de certa maneira, mantidas no adulto (cabeça grande, face pequena, corpo longo e pernas curtas). Este é o tipo característico dos mongolóides e dos filipinos. Por outro lado, o aumento na altura sentada (aproximadamente igual à diferença entre a estatura e a parte livre das pernas), que ocorre nessas raças depois da puberdade, sugere um alongamento do tronco durante a adolescência em detrimento do alongamento das pernas na pré-adolescência. O meso-onto-morfo, de acordo com Bean, parece chegar à maturidade no período correspondente ao fim da infância e começo da adolescência, idade em que as pernas são longas, o corpo curto e relativamente delgado. Este tipo é característico do negro, ou pelo menos da maioria dos negros. O hiper-onto-morfo chega à maturidade relativamente mais tarde que os outros tipos. O período de crescimento das extremidades inferiores é mais prolongado que nos mongolói-

des, e do tronco mais longo que nos negros. Verifica-se que no hiper-onto-morfo o crescimento no período final da adolescência se dá principalmente no tronco, de maneira que enquanto a estatura aumenta, o comprimento das pernas decresce em comparação com o tronco. Neste período de crescimento há um aumento nas dimensões transversais do tronco. Os caucásios são essencialmente deste último tipo.

Sugestões tem sido dadas por Manouvrier <sup>(ref. (2), página 540)</sup> no sentido de que, no estudo das proporções do corpo, os indivíduos dos grupos estudados fossem subdivididos em três subgrupos de acordo com o comprimento relativo das extremidades inferiores: os de pernas curtas ou braquisquelos, os de pernas moderadas ou mesatosquelos e os de pernas longas ou macrosquelos. Seus estudos são relacionados principalmente aos hiper-ontomorfos. Durante a adolescência o subgrupo formado pelos macrosquelos têm um crescimento relativamente grande dos membros superiores e inferiores comparados com o tronco e um crescimento relativamente grande no comprimento do tronco quando comparado com a sua largura. Observa-se que os braquisquelos têm, por outro lado, um crescimento relativamente grande do tronco em relação aos membros e geralmente um aumento em espessura do tronco e dos membros em relação ao comprimento. Apesar de todos os três subgrupos poderem ser encontrados em indivíduos de qualquer estatura, há mais braquisquelos entre os indivíduos de estatura baixa e mais macrosquelos entre os de estatura alta. Grande variação é ob-

servada no comprimento relativo dos membros de indivíduos de qualquer estatura. O comprimento dos membros superiores e inferiores geralmente varia na mesma direção. Porém, nos macrosquelos, as extremidades inferiores são relativamente maiores que as superiores. Nos braquisquelos, as extremidades superiores, enquanto curtas em relação ao tronco, são longas em relação às inferiores. Quando um braquisquelo típico fica na sua posição erecta (de pé), o pulso atinge o perônio ou abaixo dele. O cotovelo não alcança a crista ilíaca nos braquisquelos, enquanto que nos macrosquelos ele pode alcançar.

Condições fisiológicas podem influenciar as proporções relativas do corpo. Se durante a infância e a adolescência forem feitos trabalhos musculares, esta atividade tende a decrescer a estatura principalmente por causa da pressão sobre a epífise causando crescimento anormal das extremidades inferiores e fortalecendo a estrutura do corpo. Por outro lado, a vida sedentária tende a promover o comprimento das extremidades inferiores e a delgacidade da estrutura do esqueleto.

## 2. Determinação da altura, massa, volume e densidade do corpo do fantasma.

A variação na altura, massa, forma, etc. do corpo de uma criança é tão grande que se torna difícil definir uma criança referência que represente todos os tipos descritos

no item anterior. Os valores usados neste trabalho e que são mostrados na tabela III.1, são médias de dados encontrados na literatura para crianças de 10 anos de idade, sem, contudo, se saber a qual dos tipos físicos descritos no item anterior elas pertencem. Isto vem mostrar a dificuldade que existe em se definir uma criança que represente a média entre os diversos tipos existentes.

A forma geral do corpo do fantasma da criança de 10 anos de idade foi definida por meio de equações matemáticas. Na determinação dessas equações foram feitos arredondamentos nos valores dos seus parâmetros e isso causou uma variação nos volumes, massas e densidades em comparação com aqueles encontrados na literatura. Contudo, a diferença é desprezível como pode ser visto na tabela III.1.

TABELA III.1 - MASSA, VOLUME, DENSIDADE, ALTURA DO CORPO E OS CORRESPONDENTES DESVIOS PERCENTUAIS.

|   | Valor médio em<br>contrado na li-<br>teratura | Valor final<br>calculado | Desvio<br>percentual |
|---|---|--------------------------|----------------------|
| Massa do<br>corpo(g)                      | 32000 <sup>*</sup>                            | 32079                    | +0,25                |
| Volume do<br>corpo(cm <sup>3</sup> )      | 31176,9                                       | 31219,8                  | +0,14                |
| Densidade do<br>corpo(g/cm <sup>3</sup> ) | 1,0264 <sup>**</sup>                          | 1,0275                   | +0,11                |
| Altura do<br>corpo(cm)                    | 140 <sup>***</sup>                            | 140                      | 0,0                  |

(\*) Referências: (1)(4)(20)(26)(29)(31)(33)(37)(45)(49)

(\*\*) Referência: (5)

(\*\*\*) Referências: (1)(4)(20)(23)(26)(29)(31)

### 3. Composição dos tecidos do corpo do fantasma

O corpo do fantasma é composto, neste trabalho, de três diferentes tecidos: (a) tecido mole, o qual, para simplificar os cálculos da dose absorvida e conseqüentemente para minimizar o tempo de computação, é constituído de todos os tecidos do corpo cujas densidades são aproximadamente igual a  $1\text{g/cm}^3$ ; (b) esqueleto que, pelas mesmas razões apontadas acima, é composto de uma mistura homogênea de tecido cortical, trabecular, cartilaginoso, periarticular e medula óssea; (c) pulmões que são compostos de um material cuja densidade é igual a  $0,2958\text{g/cm}^3$ <sup>(41)</sup>. A composição elementar de cada um desses tecidos é dada na tabela III.2.

### 4. Determinação do volume de cada região do corpo do fantasma

Com os volumes e formas encontrados na literatura, os cálculos foram feitos a fim de se determinar as dimensões das diversas regiões do corpo da criança referência de 10 anos de idade, ou sejam, da região da cabeça, do pescoço, do tronco, dos braços, das pernas e dos órgãos genitais. Para se obter esses valores, vários ajustes tiveram que ser feitos porque os dados encontrados na literatura não se ajustavam bem quando se tentava derivar as dimensões de cada parte do corpo em relação às dimensões do corpo todo. Esta dificuldade é explicada pelo fato de que, apesar dos sólidos geométricos usados para representar cada região do corpo serem mais realísticos

(41)

TABELA III.2 - COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DOS TECIDOS DO FANTASMA  
(% EM PESO)

| Elemento | Esqueleto            | Pulmão               | Tecido mole (corpo todo menos esqueleto e pulmão) |
|----------|----------------------|----------------------|---|
| 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                 | $7,4 \times 10^{-3}$ | 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                 | $7,0 \times 10^{-3}$ | 0   |
| Fe       | $8,0 \times 10^{-3}$ | 0,037                | $6,3 \times 10^{-3}$                              |
| Zn       | $4,8 \times 10^{-3}$ | $1,1 \times 10^{-3}$ | $3,2 \times 10^{-3}$                              |
| Rb       | 0                    | $3,7 \times 10^{-4}$ | $5,7 \times 10^{-4}$                              |
| Sr       | $3,2 \times 10^{-3}$ | $5,9 \times 10^{-6}$ | $3,4 \times 10^{-5}$                              |
| Zr       | 0                    | 0                    | $8,0 \times 10^{-4}$                              |
| Pb       | $1,1 \times 10^{-3}$ | $4,1 \times 10^{-5}$ | $1,6 \times 10^{-5}$                              |

que no modelo do adulto, êles ainda são uma aproximação da forma real. Por exemplo, o tronco é representado por um cilindro elíptico cortado por planos (vide figuras III.1 e III.2), enquanto que a sua forma real possui, na região das costas, uma cavidade acompanhando a coluna vertebral e uma curvatura late-

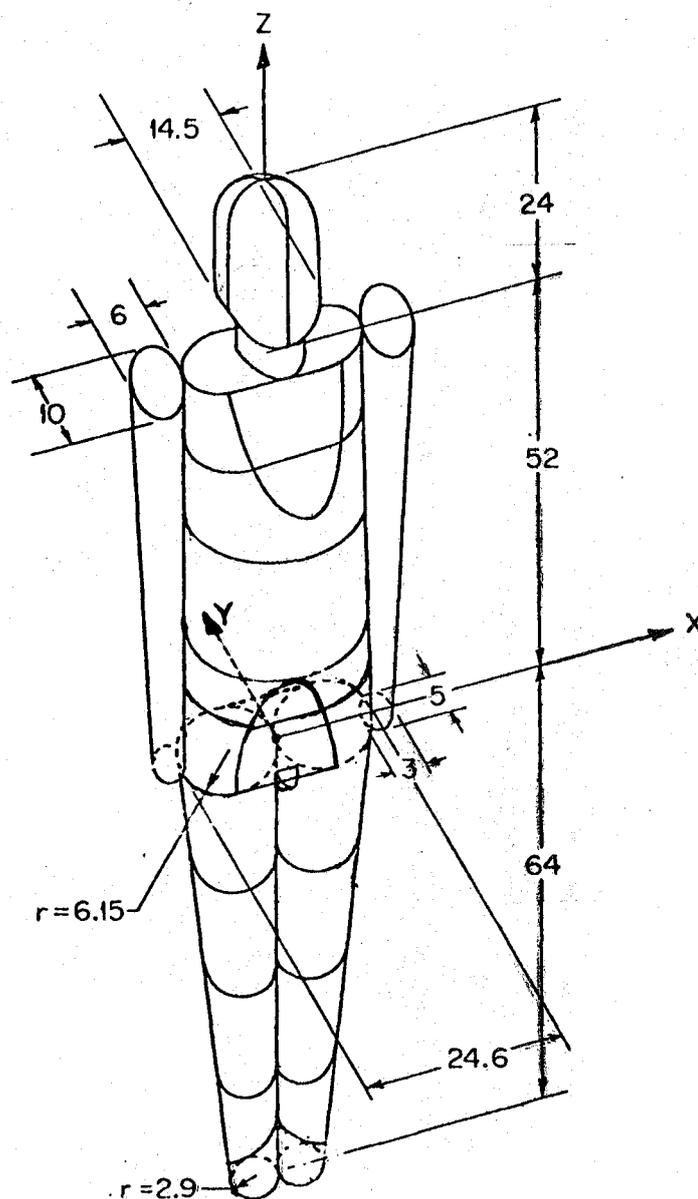


Figura III.1 - Vista geral do fantasma da criança de 10 anos de idade (todas as medidas indicadas são em centímetro)

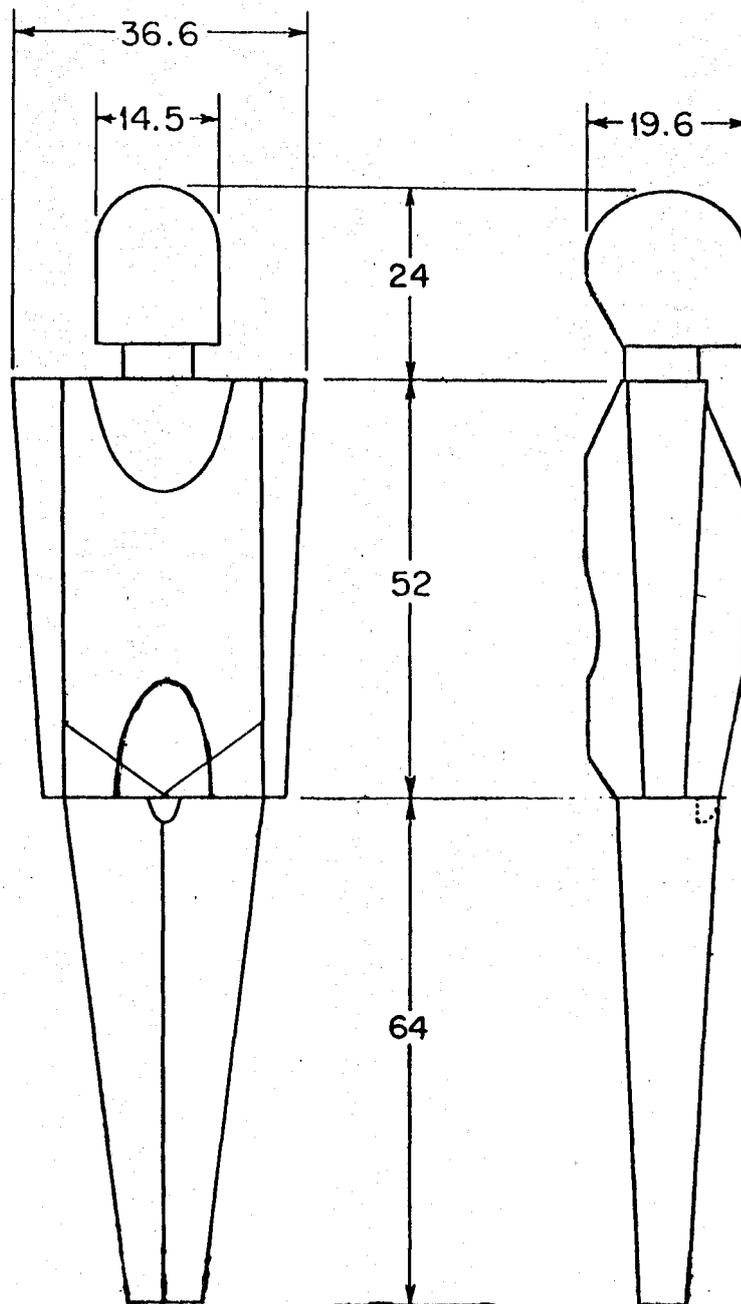


Figura III,2 - Vista frontal e lateral do fantasma da criança de 10 anos de idade (todas as medidas indicadas são em centímetro)

raí entre a crista ilíaca e os ombros. Portanto, os valores das dimensões lineares, tais como os diâmetros lateral e antero-posterior, são aproximados em relação aos diâmetros reais.

As relações entre os volumes de cada região do corpo e o volume total do corpo do fantasma foram determinadas usando os valores apresentados por Bardeen<sup>(2)</sup> e, em face dos arredondamentos dos parâmetros das equações que definem cada região, as relações finais resultaram um pouco diferentes das originais, porém o desvio é desprezível como pode ser verificado na tabela III.3.

TABELA III.3 - RELAÇÃO ENTRE OS VOLUMES DE CADA REGIÃO DO CORPO E O VOLUME DO CORPO TODO DO FANTASMA.

|   | Valores para o fantasma deste trabalho | Valores dados por Bardeen |
|---|--|---------------------------|
| $\frac{\text{Volume da cabeça}}{\text{Volume do corpo todo}}$         | 0,113                                  | 0,117                     |
| $\frac{\text{Volume do tronco+pESCOÇO}}{\text{Volume do corpo todo}}$ | 0,523                                  | 0,515                     |
| $\frac{\text{Volume dos braços}}{\text{Volume do corpo todo}}$        | 0,091                                  | 0,095                     |
| $\frac{\text{Volume das pernas}}{\text{Volume do corpo todo}}$        | 0,271                                  | 0,275                     |

##### 5. Descrição matemática de cada região do corpo do fantasma

Após um exaustivo estudo das formas anatômicas de ca

da parte do corpo humano procurou-se ajustar a essas formas, sólidos geométricos simples para representar da melhor maneira as diferentes partes do corpo do fantasma. A escolha desses sólidos, veio simplificar as equações matemáticas que descrevem as diversas regiões do corpo e consequentemente minimizar o tempo de computação.

Para o desenvolvimento das citadas equações foi estabelecido um sistema de coordenadas cartesianas com origem no ponto de separação das pernas (vide figura III.1) e com os eixos x,y e z dirigidos respectivamente para a esquerda, para atrás e para cima relativamente ao fantasma. A seguir é dada a descrição matemática de cada região do corpo.

### 5.1 - Região da cabeça

A região da cabeça é representada por um cilindro elíptico cujo topo é fechado com metade de um elipsóide. O cilindro elíptico é cortado por um plano inclinado em sua parte postero-inferior conforme visto nas figuras III.1 e III.2. O volume dessa região é  $3538 \text{ cm}^3$ , sua massa é  $3942 \text{ g}^{(a)}$  e suas equações são:

---

(a) Esta massa e as demais apresentadas para as outras regiões do corpo do fantasma foram obtidas somando-se as massas de tecido mole e de esqueleto contidas em cada região, e que serão discutidas mais adiante. Para a região do tronco, foi considerada também a massa dos pulmões.

Para  $56,87 \leq z \leq 68,8$

$$\left(\frac{x}{7,25}\right)^2 + \left(\frac{y}{9,6}\right)^2 \leq 1$$

$$y \leq 0,3623z - 14,75$$

e para  $68,8 < z \leq 76,$

$$\left(\frac{x}{7,25}\right)^2 + \left(\frac{y}{9,6}\right)^2 + \left(\frac{z-68,8}{7,2}\right)^2 \leq 1$$

### 5.2 - Região do pescoço

A região do pescoço é representada por um cilindro circular como mostram as figuras III.1 e III.2. Seu volume é  $309,82 \text{ cm}^3$ , sua massa  $329,98\text{g}$  e suas equações são:

$$x^2 + (y-1,35)^2 \leq 4,5^2$$

$$52 \leq z < 56,87$$

### 5.3 - Região do tronco

A região do tronco é representada por um cilindro elíptico cortado por quatro planos inclinados (um antero-superior, um antero-inferior, um postero-superior, um postero-inferior) e uma superfície curva na região posterior na altura da parte lombar da coluna vertebral como é visto nas figuras III.1 e III.2. O volume e a massa dessa região são res-

pectivamente  $16012,5 \text{ cm}^3$  e  $15756,13\text{g}$ . Suas equações são:

$$\left(\frac{x}{12,3}\right)^2 + \left(\frac{y}{9,6}\right)^2 \leq 1$$

$$0 \leq z < 52$$

$$z \leq 1,9984y + 58,32$$

$$z \leq -1,3580y + 59,93$$

$$z \geq -4,5275y - 27,84$$

$$z \geq 1,6268y - 10,17$$

$$z \geq 1,0569 /x/$$

Se  $14,33 \leq z \leq 26,98$  e  $y \geq 0$ , então

$$\left(\frac{x}{12,3}\right)^2 + \left(\frac{y}{0,2802z+6,77-(10,95z-0,225z^2-109,31)^{1/2}}\right)^2 \leq 1$$

#### 5.4 - Região dos braços

Os braços são representados por dois sólidos cônicos elípticos (ver figuras III.1 e III.2). O volume total dos braços é  $2858,9 \text{ cm}^3$ , sua massa  $3038,98\text{g}$  e suas equações são:

$$\left(\frac{/x/-\frac{1,5}{52}z - 13,8}{3}\right)^2 + \left(\frac{y}{5}\right)^2 \leq \left(\frac{z+52}{104}\right)^2$$

$$0 \leq z \leq 52$$

#### 5.5 - Região das pernas

As pernas estão subdivididas em duas sub-regiões:(1)

a sub-região inferior definida por sólidos cônicos que vão dos pés até a altura onde as pernas se separam, e (2) a sub-região superior que vai desta última altura até a região em que as pernas se unem ao tronco. Essa região é definida por uma superfície representada por dois planos inclinados, formando um "V" (vide figura III.2). Os pés não foram incluídos explicitamente na região das pernas pelo fato de que a aplicação mais relevante que eles teriam seria no caso de áreas contaminadas que é uma situação de interesse relativamente pequeno; mais ainda, os pés teriam influência desprezível nos casos de exposição interna em face de sua posição em relação ao corpo. O volume total das sub-regiões superiores mais as inferiores é  $8490 \text{ cm}^3$ , sua massa é  $9000,46\text{g}$  e suas equações são:

Sub-região superior

$$\left(\frac{x}{12,3}\right)^2 + \left(\frac{y}{9,6}\right)^2 \leq 1$$

$$z \geq -4,5275y - 27,84$$

$$z \geq 1,6268y - 10,17$$

$$0 \leq z \leq 1,0569 /x/$$

Sub-região inferior

$$\left( /x/ - \frac{4,637}{64} z - 6,15 \right)^2 + y^2 \leq \left( \frac{4,637}{64} z + 6,15 \right)^2$$

$$-64 \leq z \leq 0$$

### 5.6 - Região dos órgãos genitais

Esta região é definida por um quarto de elipsóide (vide figura III.1 e III.2). O volume é  $10,6 \text{ cm}^3$ , a massa  $10,80\text{g}$  e as equações são:

$$\left(\frac{x}{1,5}\right)^2 + \left(\frac{y+4,02}{2,5}\right)^2 + \left(\frac{z}{2,7}\right)^2 \leq 1$$

$$y \leq -4,02$$

$$z < 0$$

## 6. Desenvolvimento do esqueleto do fantasma

### 6.1 - Determinação da massa total do esqueleto

Sabe-se que no homem, como em todos os animais, a massa do esqueleto varia de indivíduo para indivíduo de mesma idade. Contudo, a massa do esqueleto de crianças de 10 anos de idade é estimada em aproximadamente 50% da massa do esqueleto do adulto.<sup>(39)</sup> Com isso em mente e face à escassez de dados sobre o esqueleto de crianças, usou-se um método no qual se faz a suposição de que a fração da massa do corpo representada pelo esqueleto é igual à fração usada para o adulto ( $0,1428$  ou  $\frac{10\text{kg}}{70\text{kg}}$  onde  $10\text{kg}$  e  $70\text{kg}$  são respectivamente as massas do esqueleto e do corpo todo do adulto). Portanto, sendo a massa total do corpo do fantasma igual a  $32000\text{g}$ , a massa do seu esqueleto foi calculada como segue:

$$m = 0,1428 \cdot 32000 = 4573g$$

Na determinação da massa de cada osso do esqueleto (feita mais adiante) a massa total resultou, no final do projeto, em 4634,86g, o que corresponde a 46,3% da massa do esqueleto do adulto. Portanto está de acordo com a estimativa aproximada de 50% acima citada.

## 6.2 - Determinação da massa e volume de cada osso do esqueleto do fantasma.

O esqueleto, neste trabalho, é composto de uma mistura homogênea de tecido cortical, trabecular, cartilaginoso, periarticular e medula óssea. Chamaremos de "parte densa" dos ossos do esqueleto a mistura dos quatro primeiros componentes acima.

As massas e volumes dos ossos do esqueleto, para a idade particular de 10 anos, não foram encontradas na literatura. Face a isso, foi necessário dividir um método de obtenção de seus valores. Esse método é descrito a seguir.

Inicialmente procurou-se saber o volume total de cada um dos tecidos que compõem o esqueleto do fantasma (da parte densa e da medula). Para a parte densa, esses dados não são encontrados na literatura pelo fato de incluírem a cartilagem e os tecidos periarticulares. Portanto, seus valores fo-

ram obtidos calculando-se, primeiramente sua densidade, que, por sua vez, foi obtida do fantasma adulto pelo cálculo do volume de cada um dos tecidos que compõem o seu esqueleto (vide tabela III.4). Em seguida dividiu-se a massa total da parte densa do esqueleto do adulto (7000g) pelo seu volume total ( $4343,51\text{cm}^3$ ), obtendo-se o valor  $1,6116\text{g/cm}^3$  para a densidade da parte densa dos ossos. Quanto à medula, sua densidade foi obtida diretamente da literatura.

TABELA III.4 - MASSA, DENSIDADE E VOLUME TOTAL DE CADA COMPONENTE DA MISTURA QUE REPRESENTA A PARTE DENSAS DOS OSSOS DO ESQUELETO DO FANTASMA ADULTO<sup>(3,9)</sup>

| Componentes          | Massa (g) | Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) | Volume(cm <sup>3</sup> ) (calculado) |
|----------------------|-----------|--------------------------------|--------------------------------------|
| Tecido cortical      | 4000      | 1,99                           | 2010,05                              |
| Tecido trabecular    | 1000      | 1,92                           | 520,83                               |
| Tecido cartilaginoso | 1100      | 1,098                          | 1001,82                              |
| Tecido periarticular | 900       | 1,11                           | 810,81                               |
| Total                | 7000      |                                | 4343,51                              |

Usando a referência (3), a fração da massa total do esqueleto que representa cada osso (parte densa mais medula), foi determinada pela aplicação de fatores de correção obtidos da referência (2) para crianças de 10 anos de idade. Esses fatores, vistos na tabela III.5, foram calculados como sendo o quociente entre duas razões: a razão do volume  $v_c$  de cada região do corpo da criança para o volume total  $V_c$  do corpo

da criança, e a razão do volume  $v_a$  de cada região do corpo do adulto para o volume total  $V_a$  do corpo do adulto. Matematicamente isso pode ser descrito por:

$$f = \frac{\frac{v_c}{V_c}}{\frac{v_a}{V_a}}$$

TABELA III.5 - FATOR DE CORREÇÃO,  $f$ , PARA CADA REGIÃO DO CORPO DA CRIANÇA.

|                                |                                  |                                  |                                  |
|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Cabeça                         | Tronco até a laringe             | Coxas                            | Pernas                           |
| 1,6714( $\frac{0,117}{0,07}$ ) | 0,9904( $\frac{0,517}{0,52}$ )   | 0,8971( $\frac{0,157}{0,175}$ )  | 0,8947( $\frac{0,085}{0,095}$ )  |
| Pês                            | Braços                           | Ante-Braços                      | Mãos                             |
| 1,1( $\frac{0,033}{0,03}$ )    | 0,7215( $\frac{0,0469}{0,065}$ ) | 0,8647( $\frac{0,0294}{0,034}$ ) | 1,3917( $\frac{0,0167}{0,012}$ ) |

A tabela III.6 mostra as frações da massa total do esqueleto em cada osso para o adulto (obtidas da referência 3) e para a criança, e as respectivas massas de cada osso para a criança. No caso do sacro e das partes cervical, torácica e lumbar da coluna vertebral, as massas foram determinadas tendo-se por base as referências (38) e (50), mantendo-se as proporções com relação à massa do esqueleto todo.

TABELA III.6 - MASSA DOS OSSOS DO ESQUELETO

| Ossos do esqueleto               | Fração da massa total do esqueleto do adulto | Fração da massa total do esqueleto corrigida para 10 anos de idade | Fração normalizada para 1,0000 | Fração usada neste trabalho | Massa dos ossos do esqueleto |
|----------------------------------|--|--|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Ossos da cabeça                  |  | 0,2173   | 0,2069                         | 0,2186                      | 1016,20                      |
| Ossos da cabeça exceto mandíbula | 0,118  | 0,19724  | 0,1878                         | 0,1983                      | 913,36                       |
| Mandíbula                        | 0,012  | 0,02006  | 0,0191                         | 0,0203                      | 102,84                       |
| Coluna vertebral e sacro         | 0,19   | 0,18817  | 0,1791                         | 0,1757                      | 809,04                       |
| Região cervical                  |  |  |                                |                             | 98,98                        |
| Região torácica                  |  |  |                                |                             | 324,77                       |
| Região lumbar                    |  |  |                                |                             | 272,69                       |
| Costelas e esterno               |  | 0,0811   | 0,0773                         | 0,0759                      | 349,76                       |
| Costelas                         | 0,07   | 0,06933  | 0,0660                         |                             |                              |
| Esterno                          | 0,012  | 0,0118   | 0,0113                         |                             |                              |
| Clavículas                       | 0,008  | 0,00792  | 0,0075                         | 0,0077                      | 35,52                        |
| Escápulas                        | 0,036  | 0,03565  | 0,0339                         | 0,0351                      | 161,81                       |
| Úmeros                           | 0,053  | 0,03824  | 0,0363                         | 0,0356                      | 163,59                       |
| Braços inferiores                |  | 0,0631   | 0,0601                         | 0,0596                      | 274,68                       |
| Ulnas e raios                    | 0,036  | 0,03113  | 0,0296                         |                             |                              |
| Mãos e ossos do pulso            | 0,023  | 0,03201  | 0,0305                         |                             |                              |
| Pelvis e sacro                   |  |  |                                |                             | 569,40                       |
| Pelvis                           | 0,106  | 0,10498  | 0,0999                         | 0,0992                      | 456,80                       |
| Sacro                            |  |  |                                |                             | 112,60                       |
| Fêmures                          | 0,153  | 0,13726  | 0,1307                         | 0,1276                      | 587,54                       |
| Pernas inferiores                |  | 0,1767   | 0,1682                         | 0,1650                      | 760,15                       |
| Tíbias e fíbulas                 | 0,113  | 0,1011   | 0,0962                         |                             |                              |
| Rótulas                          | 0,007  | 0,00626  | 0,0060                         |                             |                              |
| Tornozelos e pés                 | 0,063  | 0,0693   | 0,0660                         |                             |                              |
| Total                            | 1,000  | 1,0688   | 1,0000                         | 1,0000                      | 4615,09                      |

Em seguida, usando a referência (39) obteve-se 1160g para a massa total da medula óssea no esqueleto. A fração dessa massa total contida em cada osso do esqueleto foi obtida da referência (50) para o adulto, e, após a aplicação dos fatores de correção f, para a idade de 10 anos, a massa de medula em cada osso ficou determinada (vide tabela III.7). Em vista dos detalhes do projeto, a massa final resultou em 1139,13g, o que corresponde a 1,8% de diferença do valor inicial. Essa diferença foi considerada desprezível comparada com as variações normais de indivíduo para indivíduo.

O volume total da medula em cada osso, visto na tabela III.7, foi obtido pela razão entre a massa total e a densidade determinada mais adiante (vide item 7.1).

Para a massa total da medula óssea hematopoiética no esqueleto, isto é, medula formadora de sangue, obteve-se, da referência (39), o valor de 600g. Pelo fato da massa total de medula óssea no esqueleto ter resultado 1,8% menor que a inicial, a massa de medula hematopoiética ficou sendo 1,9% menor que a massa inicial. Essa diferença foi considerada desprezível pelo mesmo motivo apontado anteriormente. Com as porcentagens desse total em cada osso, fornecida por Schleien,<sup>(35)</sup> a massa da medula hematopoiética em cada osso ficou determinada.

Por outro lado, nenhuma referência foi encontrada

TABELA 111.7 - FRAÇÃO DA MASSA TOTAL DE HOMEM CORRESPONDENTE À MASSA DE 10 ANOS E AS CORRESPONDENTES MASSAS EM CADA OSSO DO ESQUELETO

| Ossos do esqueleto               | Fração da massa total da medula do adulto | Fração da massa total da medula corrigida para a idade de 10 anos | Fração normalizada para 1,0000 | Fração usada neste trabalho | Massa total da medula(g) | Volume total da medula(cm <sup>3</sup> ) |
|----------------------------------|---|---|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------|--|
| Ossos da cabeça                  | -   | -   | 0,1147                         | 0,1242                      | 142,94                   | -  |
| Ossos da cabeça exceto mandíbula | 0,0633                                    | 0,1058  | 0,1048                         | 0,1134                      | 129,33                   | 126,91                                   |
| Mandíbula                        | 0,0060                                    | 0,01003   | 0,0099                         | 0,0108                      | 13,61                    | 13,36                                    |
| Coluna vertebral                 | 0,1468                                    | 0,14539   | 0,1440                         | 0,1475                      | 168,38                   | 165,23                                   |
| Região cervical                  | 0,0178                                    | 0,01763   | 0,0175                         | 0,0182                      | 20,82                    | 20,43                                    |
| Região torácica                  | 0,0729                                    | 0,07220   | 0,0715                         | 0,0727                      | 83,00                    | 81,45                                    |
| Região lumbar                    | 0,0561                                    | 0,05556   | 0,0550                         | 0,0566                      | 64,56                    | 63,35                                    |
| Costelas e esterno               | -   | -   | 0,0855                         | 0,0862                      | 98,25                    | 96,42                                    |
| Costelas                         | 0,0734                                    | 0,07269   | 0,0720                         | -                           | -                        | -  |
| Esterno                          | 0,0138                                    | 0,01367   | 0,0135                         | -                           | -                        | -  |
| Clavículas                       | 0,0076                                    | 0,007527  | 0,0075                         | 0,0079                      | 9,01                     | 8,84                                     |
| Escápulas                        | 0,0238                                    | 0,02357   | 0,0233                         | 0,0248                      | 25,78                    | 25,30                                    |
| Ômeros                           | 0,0598                                    | 0,04315   | 0,0427                         | 0,0425                      | 48,51                    | 47,61                                    |
| Braços inferiores                | -   | -   | 0,0611                         | 0,0622                      | 70,95                    | 69,63                                    |
| Ulnas                            | 0,0138                                    | 0,01193   | 0,0118                         | -                           | -                        | -  |
| Rádios                           | 0,0134                                    | 0,01159   | 0,0115                         | -                           | -                        | -  |
| Mãos e ossos do pulso            | 0,0274                                    | 0,03813   | 0,0378                         | -                           | -                        | -  |
| Pelvis e sacro                   | -   | -   | 0,1597                         | 0,1581                      | 180,24                   | 176,88                                   |
| Pelvis                           | 0,1175                                    | 0,1164  | 0,1153                         | -                           | -                        | -  |
| Sacro                            | 0,0453                                    | 0,04486   | 0,0444                         | -                           | -                        | -  |
| Fêmures                          | 0,1706                                    | 0,1531  | 0,1516                         | 0,1516                      | 172,91                   | 169,69                                   |
| Pernas inferiores                | -   | -   | 0,2094                         | 0,1948                      | 222,16                   | 218,02                                   |
| Tibias                           | 0,1092                                    | 0,09771   | 0,0968                         | -                           | -                        | -  |
| Fibulas                          | 0,0154                                    | 0,01378   | 0,0136                         | -                           | -                        | -  |
| Rótulas                          | 0,0082                                    | 0,007337  | 0,0073                         | -                           | -                        | -  |
| Tornozelos e pés                 | 0,0842                                    | 0,09262   | 0,0917                         | -                           | -                        | -  |
| Total                            | -   | -   | -                              | -                           | 1139,13                  | 1117,89                                  |

contendo dados sobre a massa da medula óssea hematopoiética e não hematopoiética nas regiões cervical, torácica e lombar da coluna vertebral de crianças de 10 anos de idade. Os dados encontrados são somente para a coluna toda. Em vista disso, foi suposto que a massa da medula formadora de sangue em cada região, mantêm, com a massa total da medula formadora de sangue na coluna vertebral, a mesma proporção da quantidade total da medula na região em relação à quantidade total da medula na coluna vertebral.

Matematicamente isso pode ser escrito da seguinte forma:

$$\frac{m_h}{M_h} = \frac{m}{M}$$

onde  $M$  e  $M_h$  são, respectivamente, a massa total da medula óssea (hematopoiética e não hematopoiética) e da medula óssea hematopoiética no osso todo, e  $m$  e  $m_h$  são, respectivamente, a massa total da medula óssea (hematopoiética e não hematopoiética) e da medula óssea hematopoiética na região do osso em questão. A mesma suposição foi feita para os ossos da cabeça (mandíbula e o restante), da parte inferior dos braços (ulnas, raios, mãos e pulsos) e das pernas (tíbias, fíbulas, patelas, tornozelos e pés). Essa suposição resultou em valores para os quais as relações das massas das duas medulas, em cada região da coluna vertebral e nos ossos da cabeça da criança, concordaram muito bem com as mesmas relações para o adulto (41) (vide tabela III.8). Para a parte inferior dos bra

ços e das pernas não foi possível comparar os valores porque não há dados explícitos para o adulto.

TABELA III.8 - RELAÇÃO ENTRE AS MASSAS DE MEDULA ÓSSEA HEMATOPOIÉTICA (E NÃO HEMATOPOIÉTICA) DAS REGIÕES DA COLUNA VERTEBRAL E DOS OSSOS DA CABEÇA.

| Relação entre as regiões                                | Medula óssea hematopoiética |        | Medula óssea não hematopoiética |        |
|---|-----------------------------|--------|---------------------------------|--------|
|   | criança                     | adulto | criança                         | adulto |
| <u>Região cervical</u><br><u>Região toraxica</u>        | 0,251                       | 0,241  | 0,251                           | 0,241  |
| <u>Região lumbar</u><br><u>Região toraxica</u>          | 0,778                       | 0,773  | 0,778                           | 0,773  |
| <u>Mandíbula</u><br><u>Restante dos ossos da cabeça</u> | 0,095                       | 0,101  | 0,095                           | 0,101  |

A tabela III.9 mostra a massa e o volume de medula hematopoiética em cada osso determinados pela maneira ora descrita. Para o cálculo desses volumes obteve-se primeiramente, a densidade da medula óssea hematopoiética e não hematopoiética por meio da referência (39). Com esses valores e as massas dessas medulas em cada osso, os seus respectivos volumes foram determinados. Somando-se esses volumes com o volume da parte densa do osso, determinado mais adiante, obteve-se o volume total de cada osso e portanto o volume total do esqueleto todo. Em seguida, subtraiu-se do volume total do corpo todo do fantasma o volume do esqueleto e dos pulmões, obtendo-se, com isso, o volume total de tecido mole no corpo todo do

TABELA III. 9 - PORCENTAGEM, MASSA E VOLUME DE MEDULA ÓSSEA HEMATOPOIÉTICA E NÃO HEMATOPOIÉTICA EM CADA OSSO.

| Ossos do esqueleto               | Medula óssea hematopoiética |   |                      |           |                           | Medula óssea não hematopoiética |                           |
|----------------------------------|-----------------------------|---|----------------------|-----------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------|
|                                  | Porcentagem do total        | Porcentagem do total <u>usa da neste trabalho</u> | Diferença Percentual | Massa (g) | Volume (cm <sup>3</sup> ) | Massa (g)                       | Volume (cm <sup>3</sup> ) |
| Ossos da cabeça                  | 8,00                        | 8,67  | +8,4                 | 51,07     | 50,12                     | 91,87                           | 90,16                     |
| Ossos da cabeça exceto mandíbula |                             |   |                      | 46,21     | 45,35                     | 83,12                           | 81,57                     |
| Mandíbula                        |                             |   |                      | 4,86      | 4,77                      | 8,75                            | 8,59                      |
| Coluna vertebral                 | 16,94                       | 17,40   | +2,7                 | 102,40    | 100,49                    | 65,98                           | 64,75                     |
| Região cervical                  |                             |   |                      | 12,66     | 12,42                     | 8,16                            | 8,01                      |
| Região torácica                  |                             |   |                      | 50,48     | 49,54                     | 32,52                           | 31,91                     |
| Região lumbar                    |                             |   |                      | 39,26     | 38,53                     | 25,30                           | 24,83                     |
| Costelas e esterno               | 9,30                        | 9,38  | +0,86                | 55,21     | 54,18                     | 43,04                           | 42,24                     |
| Clavículas                       | 1,12                        | 1,18  | +5,4                 | 6,94      | 6,81                      | 2,07                            | 2,03                      |
| Escápulas                        | 4,20                        | 4,02  | -4,3                 | 23,62     | 23,18                     | 1,76                            | 1,73                      |
| Úmeros                           | 4,21                        | 4,23  | +0,48                | 24,88     | 24,42                     | 23,63                           | 23,19                     |
| Braços e pernas inferiores       | 21,67                       | 20,65   | -4,7                 | 121,51    | 119,24                    | 171,60                          | 168,40                    |
| Braços inferiores                |                             |   |                      | 29,41     | 28,86                     | 41,54                           | 40,77                     |
| Pernas inferiores                |                             |   |                      | 92,10     | 90,38                     | 130,06                          | 127,63                    |
| Pelvis e sacro                   | 20,66                       | 20,48   | -0,87                | 120,55    | 118,30                    | 59,69                           | 58,58                     |
| Fêmures                          | 13,90                       | 13,93   | +0,22                | 81,98     | 80,45                     | 90,93                           | 89,23                     |
| Total                            | 100,00                      | 100,00  |                      | 588,16    | 577,19                    | 550,57                          | 540,31                    |

fantasma. Fez-se, em seguida, a mesma coisa com respeito as massas, isto é, subtraiu-se da massa total do corpo do fantasma, a massa do esqueleto e dos pulmões, obtendo-se a massa total de tecido mole no corpo do fantasma. Dividindo-se essa massa total pelo volume total de tecido mole, obteve-se a densidade do tecido mole, ou seja,  $1,019\text{g/cm}^3$ . O item 7.1 adiante, descreve matematicamente o que foi dito. Portanto os volumes da medula óssea hematopoiética e não hematopoiética dados na tabela III.9, foram obtidos pela razão entre as massas em cada osso e a densidade acima. A massa de medula não hematopoiética foi obtida por diferença entre a massa total de medula e a massa de medula hematopoiética. Como se iniciou a determinação dos volumes das duas medulas usando-se valores diferentes para a densidade da medula formadora e não formadora de sangue, isto é,  $1,028\text{g/cm}^3$  e  $0,983\text{g/cm}^3$  respectivamente, isso ocasionou uma pequena variação nas porcentagens de medula hematopoiética como é verificado na tabela III.9. Contudo essa variação foi considerada desprezível em relação às variações normais de indivíduo para indivíduo.

O volume inicial da parte densa de cada osso foi obtido da seguinte maneira: Como já se conhece a massa total de cada osso (medula mais parte densa), dada na tabela III.6 e a massa total de medula em cada osso, dada na tabela III.7, a massa da parte densa é obtida por diferença. Com estes últimos valores e a densidade  $1,6116\text{g/cm}^3$ , obtida no item 6.2, o volume da parte densa de cada osso ficou determinado (vide tabela III.10).

TABELA III.10 - MASSA E VOLUME DA PARTE DENSA DE CADA OSSO DO ESQUELETO.

| Ossos do esqueleto               | Massa da parte densa dos ossos (g) | Volume da parte densa dos ossos (cm <sup>3</sup> ) |
|----------------------------------|------------------------------------|--|
| Ossos da cabeça                  | 873,26                             | 541,86   |
| Ossos da cabeça exceto mandíbula | 784,03                             | 486,49   |
| Mandíbula                        | 89,23                              | 55,37  |
| Coluna vertebral                 | 528,06                             | 327,67   |
| Região cervical                  | 78,16                              | 48,50  |
| Região torácica                  | 241,77                             | 150,02   |
| Região lumbar                    | 208,13                             | 129,15   |
| Costelas e esterno               | 251,51                             | 156,06   |
| Clavículas                       | 26,51                              | 16,45  |
| Escápulas                        | 122,02                             | 75,71  |
| Úmeros                           | 115,08                             | 71,41  |
| Braços inferiores                | 203,74                             | 126,41   |
| Pelvis e sacro                   | 389,16                             | 241,48   |
| Fêmures                          | 414,63                             | 257,28   |
| Pernas inferiores                | 537,99                             | 333,82   |
| Total                            | 3461,96                            | 2148,15  |

Somando-se o volume da parte densa e de medula obteve-se o volume total inicial de cada osso do esqueleto conforme visto na tabela III.11. Esses volumes foram as bases para os cálculos dos parâmetros das equações de cada osso do esqueleto. Como foram feitos arredondamentos dos valores desses parâmetros, o volume final resultou um pouco diferente do valor inicial conforme é mostrado na tabela III.11. Essas diferenças foram consideradas aceitáveis em comparação com o desvio normal de até 30% de indivíduo para indivíduo.<sup>(3)</sup>

Uma vez que as densidades de cada osso do esqueleto são diferentes entre si (pelo motivo da quantidade relativa

TABELA III.11 - VOLUME E MASSA INICIAL E FINAL DOS OSSOS DO ESQUELETO E SEUS RESPECTIVOS DESVIOS PERCENTUAIS.

| Ossos do esqueleto               | Volume Inicial (cm <sup>3</sup> ) | Volume Final (cm <sup>3</sup> ) | Desvio Percentual (%) | Massa Inicial (g) | Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) | Massa final (g) | Desvio Percentual na massa |
|----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------|----------------------------|
| Ossos da cabeça                  | 675,8                             | 682,14                          | 1,0                   | 1016,20           | 1,4897                         | 968,53          | - 4,7                      |
| Ossos da cabeça exceto mandíbula | 613,4                             | 613,40                          | 0,0                   | 913,36            | 1,4890                         | 870,47          | - 4,7                      |
| Mandíbula                        | 62,4                              | 68,73                           | 10,1                  | 102,29            | 1,4883                         | 98,06           | - 4,1                      |
| Parte cervical                   |                                   | 68,93                           |                       | 98,98             | 1,4359                         | 97,82           | - 1,2                      |
| Parte torácica                   |                                   | 231,46                          |                       | 324,77            | 1,4031                         | 328,47          | 1,1                        |
| Parte lumbar                     |                                   | 192,51                          |                       | 272,69            | 1,4165                         | 273,19          | 0,2                        |
| Costelas e esterno               | 252,5                             | 252,50                          | 0,0                   | 349,76            | 1,3852                         | 358,32          | 2,4                        |
| Costelas                         | 215,6                             |                                 |                       |                   |                                |                 |                            |
| Esterno                          | 36,9                              |                                 |                       |                   |                                |                 |                            |
| Clavículas                       | 24,5                              | 25,29                           | 3,2                   | 35,52             | 1,4045                         | 35,89           | 1,0                        |
| Escápulas                        | 110,7                             | 100,62                          | - 9,1                 | 147,40            | 1,4649                         | 142,79          | - 3,1                      |
| Úmeros                           | 118,9                             | 119,02                          | 0,10                  | 163,59            | 1,3745                         | 168,91          | 3,2                        |
| Braços inferiores                | 196,3                             | 196,04                          | - 0,13                | 274,68            | 1,4011                         | 278,20          | 1,3                        |
| Úlnas e raios                    | 96,7                              |                                 |                       |                   |                                |                 |                            |
| Mãos e ossos do pulso            | 99,6                              |                                 |                       |                   |                                |                 |                            |
| Pelvis e sacro                   | 418,36                            | 418,36                          | 0,0                   | 569,40            | 1,3610                         | 593,70          | 4,2                        |
| Pelvis                           | 326,30                            |                                 |                       |                   |                                |                 |                            |
| Sacro                            | 92,06                             | 92,06                           | 0,0                   |                   |                                |                 |                            |
| Fêmures                          | 426,9                             | 426,97                          | 0,016                 | 587,54            | 1,3761                         | 605,92          | 3,1                        |
| Pernas inferiores                | 549,5                             | 551,84                          | 0,43                  | 760,15            | 1,3775                         | 783,12          | 3,0                        |
| Tíbias, fíbulas e rótulas        | 333,9                             |                                 |                       |                   |                                |                 |                            |
| Tornozelos e pés                 | 215,6                             |                                 |                       |                   |                                |                 |                            |
| Total                            | 3266,4                            | 3265,67                         | - 0,01                | 4600,13           | 1,4086                         | 4634,86         | 0,7                        |

de medula e de parte densa variar de osso para osso), foi escolhida somente um valor, isto é, a média  $1,419 \text{ g/cm}^3$  entre elas, a fim de minimizar o tempo de computação. Esse procedimento ocasionou uma pequena mudança nas massas dos ossos, porém a diferença foi considerada aceitável pelo motivo já citado anteriormente. A tabela III.11 mostra as massas e volumes iniciais e finais de cada osso e o respectivos desvios percentuais.

### 6.3 - Descrição matemática dos ossos do esqueleto

Baseando-se no sistema de coordenadas descrito no item 5, nos volumes finais dos ossos do esqueleto dados na tabela III.11 e nas formas e posições obtidas dos livros de anatomia, as equações que descrevem cada osso do esqueleto foram determinadas e são apresentadas a seguir.

#### 6.3.1 - Ossos da cabeça

Os ossos da cabeça foram descritos agrupando-os em três partes a saber: crânio, mandíbula e região do rosto.

##### 6.3.1.1 - Crânio

O crânio, osso da cabeça que aloja o cérebro, é representado por dois elipsóides concêntricos cortados por dois planos inclinados conforme visto na figura III.3. Suas equações são:

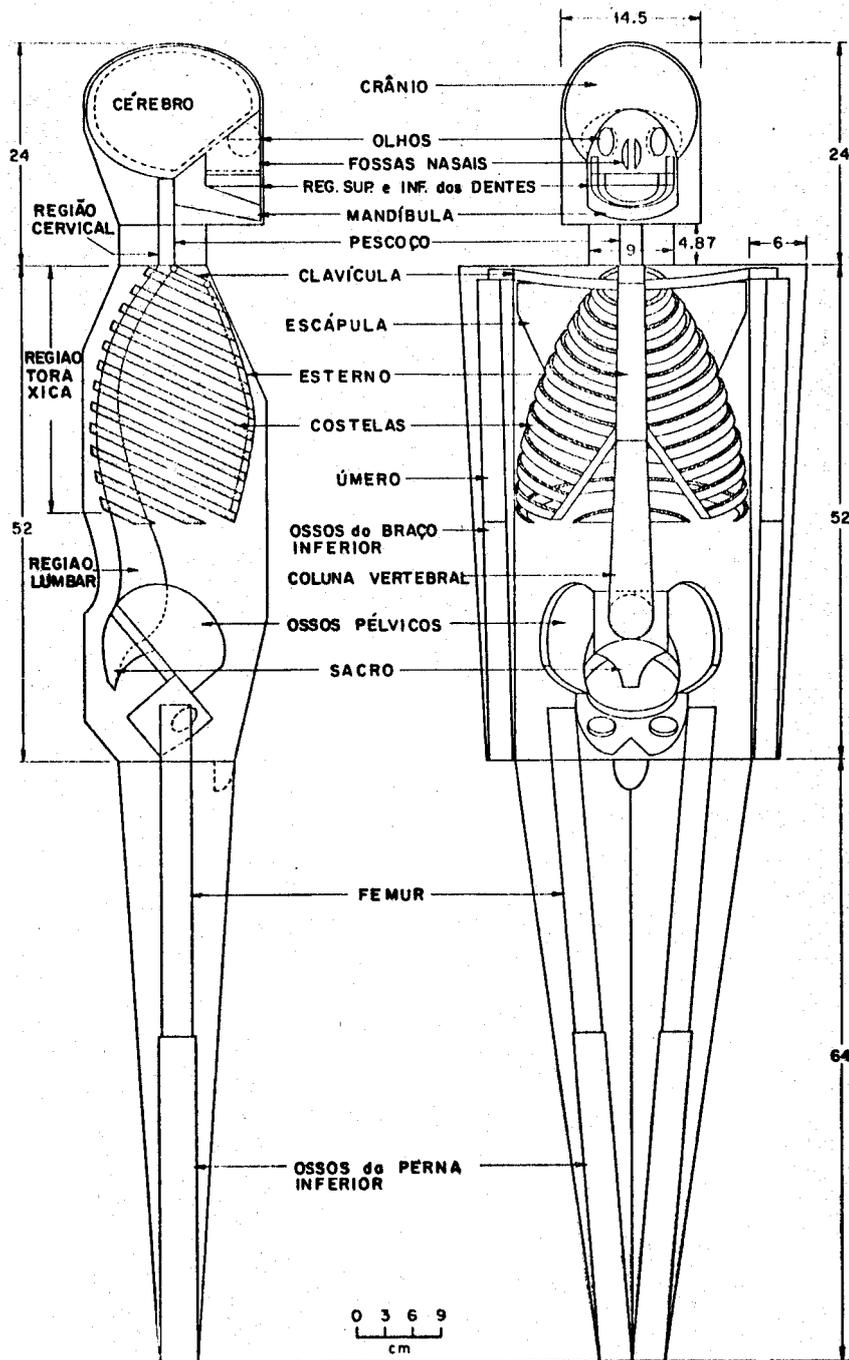


Figura III.3 - Esqueleto do fantasma da criança de 10 anos de idade.

$$\left(\frac{x}{7,05}\right)^2 + \left(\frac{y}{9,4}\right)^2 + \left(\frac{z-68,8}{7}\right)^2 \leq 1 \quad (\text{elipsóide externo})$$

Se  $y \leq 0$ , então  $z \geq 61,8 - 0,7447y$ .

$$\left(\frac{x}{6,31}\right)^2 + \left(\frac{y}{8,66}\right)^2 + \left(\frac{z-68,8}{6,26}\right)^2 \geq 1 \quad (\text{elipsóide interno})$$

Para este último elipsóide, se  $y \leq 0$  então

$$z \geq 62,54 - 0,7275y$$

### 6.3.1.2 - Mandíbula

A mandíbula foi subdividida na região dos dentes inferiores e na região restante, isto é, a parte da mandíbula excluindo os dentes (vide figura III.3).

#### 6.3.1.2.1 - Região dos dentes inferiores

A região dos dentes inferiores é descrita por dois cilindros elípticos concêntricos cortados por três planos: um inclinado, um horizontal e um vertical descritos pelas equações abaixo:

Para  $y \leq -3,2$  e  $0,3065y + 61,85 \leq z \leq 60,87$ ,

$$\left(\frac{x}{3,7}\right)^2 + \left(\frac{y+3,2}{6,2}\right)^2 \leq 1$$

$$\left(\frac{x}{2,95}\right)^2 + \left(\frac{y+3,2}{5,95}\right)^2 \geq 1.$$

### 6.3.1.2.2 - Região excluindo os dentes inferiores

Esta parte da mandíbula é definida como a região entre dois cilindros elípticos cortados por dois planos verticais ( $y = 0$  e  $y = -3,2$ ) e três planos inclinados descritos pelas seguintes equações:

Para  $0,1947y + 58,89 \leq z \leq 0,3065y + 61,85$ :

Se  $y \leq 0$ , então  $\left(\frac{x}{4,8}\right)^2 + \left(\frac{y}{9,4}\right)^2 \leq 1$

e se  $y \leq -3,2$  então  $\left(\frac{x}{2,95}\right)^2 + \left(\frac{y+3,2}{4,7}\right)^2 \geq 1$

Para  $0,1947y + 58,89 \leq z \leq 61,8 - 0,7447y$ :

Se  $-3,2 \leq y \leq 0$ , então  $\left(\frac{x}{4,05}\right)^2 + \left(\frac{y}{7,9}\right)^2 \geq 1$

O volume total da mandíbula, isto é, incluindo a região dos dentes inferiores e a parte descrita no último subitem é  $68,73 \text{ cm}^2$  e sua massa  $98,06\text{g}$ .

### 6.3.1.3 - Região superior do rosto

A região superior do rosto foi descrita subdividindo a em duas partes, ou seja, a sub-região superior (onde se encontram os olhos e as fossas nasais) e a sub-região dos dentes superiores.

### 6.3.1.3.1 - Sub-região superior

A sub-região superior do esqueleto do rosto foi projetada como sendo basicamente um cilindro sólido elíptico cortado por um plano horizontal na altura das gengivas superiores ( $z = 62,1$ ), um plano vertical ( $y = -3,2$ ) e um plano inclinado que separa a região do rosto da região do crânio (vide figura III.3). Suas equações são:

$$\left(\frac{x}{4,8}\right)^2 + \left(\frac{y}{9,4}\right)^2 \leq 1$$

$$y \leq -3,2$$

$$62,1 \leq z \leq 61,8 - 0,7447y$$

Do sólido acima foram retiradas as regiões correspondentes às cavidades oculares e às fossas nasais abaixo descritas.

As cavidades oculares foram definidas como sendo esferas cortadas pela superfície cilíndrica que define a região do rosto, estando os centros das esferas situados sobre essas superfícies cilíndricas. Suas equações são:

$$\left(\frac{x}{-3}\right)^2 + (y+7,34)^2 + (z-65,5)^2 \geq 1,6^2$$

$$\left(\frac{x}{4,8}\right)^2 + \left(\frac{y}{9,4}\right)^2 \leq 1$$

As fossas nasais são descritas por duas metades de cilindros elípticos horizontais cortadas pela superfície cilíndrica

drica que define o rosto e o plano inclinado que separa a região do rosto da região do crânio (vide figura III.3). Como as duas fossas nasais são simétricas em relação ao plano yz, suas equações são dadas em termos do módulo de x, ou seja:

$$\left(\frac{|x|-0,2}{0,65}\right)^2 + \left(\frac{z-64}{1,6}\right)^2 \geq 1 \quad \text{para } |x| \geq 0,2$$

$$-9,4 \left[1 - \left(\frac{x}{4,8}\right)^2\right]^{1/2} \leq y \leq -3,2$$

$$62,4 \leq z \leq 61,8 - 0,7447y$$

#### 6.3.1.3.2 - Sub-região dos dentes superiores

Esta sub-região é descrita por dois cilindros elípticos concêntricos cortados por três planos: um vertical ( $y=-3,2$ ) e dois horizontais ( $z=60,87$  e  $z=62,1$ ) como visto na figura III.3. Suas equações são:

$$\left(\frac{x}{3,7}\right)^2 + \left(\frac{y+3,2}{6,2}\right)^2 \leq 1$$

$$\left(\frac{x}{2,95}\right)^2 + \left(\frac{y+3,2}{5,95}\right)^2 \geq 1$$

$$y \leq -3,2$$

$$60,87 \leq z \leq 62,1$$

A soma dos volumes do esqueleto do crânio e da região do rosto superior é  $613,4 \text{ cm}^3$  e a massa é  $870,47\text{g}$ .

### 6.3.2 - Coluna vertebral

A coluna vertebral foi subdividida em três regiões: cervical, torácica e lombar.

#### 6.3.2.1 - Região cervical

Esta região é representada por um cilindro vertical elíptico que vai da extremidade superior do tronco até a base do crânio (vide figura III.3) e cujo eixo maior de sua secção transversal é perpendicular à direção antero-posterior. Seu volume é  $68,93 \text{ cm}^3$ , sua massa  $97,82\text{g}$  e sua descrição matemática é dada abaixo:

$$\left(\frac{x}{1,93}\right)^2 + \left(\frac{y-1,29}{1,16}\right)^2 \leq 1$$

$$52 < z \leq 61,8$$

#### 6.3.2.2 - Região torácica

O conjunto da região torácica e lombar tem a forma de um "S" (vide figura III.3) cuja secção transversal é elíptica. A linha central da parte torácica é representada por um quarto de elipse formando a curvatura superior do "S", o mesmo acontecendo com a parte lombar que forma a curvatura inferior do "S". A área de sua secção transversal diminui continuamente no sentido do eixo z ou seja, da parte lombar para a torácica e sua forma varia também continuamente sendo que na re-

gião lombar o eixo maior da elipse (que define a secção transversal) é perpendicular à direção antero-posterior e na região torácica ele é paralelo à essa direção. O volume da região torácica é  $231,46 \text{ cm}^3$ , sua massa  $328,47\text{g}$  e sua descrição matemática é dada a seguir:

$$\left(\frac{x}{3,03-0,0345z}\right)^2 + \left\{ \frac{y - \left[0,25z - 15,01 + (23,48z - 0,383z^2 - 176,34)^{1/2}\right]}{2,81 - 0,0298z} \right\}^2 \leq 1$$

$$26 \leq z \leq 52$$

### 6.3.2.3 - Região lombar

A região lombar descrita no item anterior é definida pelas seguintes expressões:

$$\left(\frac{x}{3,03-0,0345z}\right)^2 + \left\{ \frac{y - \left[0,3115z + 1,92 - (10,83z - 0,2147z^2 - 96,67)^{1/2}\right]}{2,81 - 0,0298z} \right\}^2 \leq 1$$

$$1,192y + 9,28 \leq z < 26$$

Seu volume é  $192,51 \text{ cm}^3$  e sua massa  $273,19\text{g}$

### 6.3.3 - Costelas e esterno

O conjunto das costelas e esterno é representado como sendo o volume entre dois elipsóides concêntricos cortados por planos inclinados (vide figura III.3). Sua forma geral e a inclinação e distância média entre os planos foram baseadas nas figuras 72, 76, 80 e 133 da referência [8]. Seu volume to-

tal é  $252,5 \text{ cm}^3$  e sua massa  $358,32\text{g}$ . As equações das costelas e do esterno são mostradas separadamente para melhor entendimento.

As costelas foram descritas explicitando cada um dos sólidos geométricos que as compõe. Esses sólidos são os elipsóides, que definem sua forma geral, os planos inclinados, citados acima e os ossos frontais que formam a abertura epigástrica. Suas equações são dadas a seguir.

Para os elipsóides, tem-se, para  $26 \leq z \leq 52$  e  $y \geq -0,3$ ,

$$\left(\frac{x}{11,62}\right)^2 + \left\{ \frac{(y+0,3) \left[1 - \left(\frac{z-21,7}{29,82}\right)^2\right]^{1/2}}{0,2202z-11,9+(23,48z-0,383z^2-176,34)^{1/2}} \right\}^2 + \left(\frac{z-21,7}{29,82}\right)^2 \geq 1$$

$$\left(\frac{x}{12,068}\right)^2 + \left\{ \frac{(y+0,3) \left[1 - \left(\frac{z-21,7}{30,268}\right)^2\right]^{1/2}}{0,2202z-11,452+(23,48z-0,383z^2-176,34)^{1/2}} \right\}^2 + \left(\frac{z-21,7}{30,268}\right)^2 \leq 1$$

e para  $26 \leq z \leq 52$  e  $y \leq -0,3$ , tem-se

$$\left(\frac{x}{11,62}\right)^2 + \left(\frac{y+0,3}{8,92}\right)^2 + \left(\frac{z-21,7}{29,82}\right)^2 \geq 1$$

$$\left(\frac{x}{12,068}\right)^2 + \left(\frac{y+0,3}{9,368}\right)^2 + \left(\frac{z-21,7}{30,268}\right)^2 \leq 1$$

Os planos inclinados são descritos da seguinte maneira:

$$z \leq 0,4386y + 51,03 - 1,21(n-1) \quad \text{para } n \text{ ímpar}$$

$$z \geq 0,4386y + 52,48 - 1,21n \quad \text{para } n \text{ par,}$$

onde  $n$  é um número inteiro variando entre 1 e 24 e que corresponde a cada um dos 24 planos inclinados. O plano de número 1 define o topo do conjunto de costelas e o plano de número 24 a sua base.

Os ossos que formam a abertura epigástrica são descritos pelas seguintes equações:

$$|x| \leq 28,99 - 0,7375z$$

$$|x| \geq 27,76 - 0,7375z$$

$$z \geq 0,4386y \quad 28,28$$

$$y < - 0,3$$

$$1,75 < x < - 1,75$$

Para o esterno, as equações são:

$$- 1,75 \leq x \leq 1,75$$

$$35,26 \leq z \leq 50$$

$$y < - 0,3$$

#### 6.3.4 - Clavículas

As clavículas são definidas como dois segmentos de um toro circular inclinado com secção transversal também circular, tendo, em suas extremidades mais próximas aos braços, um cilindro horizontal ligando os segmentos do toro aos ossos dos braços (vide figura III.3). O volume de ambas as

clavículas é  $25,29 \text{ cm}^3$  dos quais  $19,4 \text{ cm}^3$  ( $27,53\text{g}$ ) se encontra na região do tronco e  $5,89 \text{ cm}^3$  ( $8,36\text{g}$ ) na região dos braços. Suas equações são:

Segmentos de toro:

$$z'^2 + \left\{ 26,83 - \left[ x'^2 + (y' - 23,84)^2 \right]^{1/2} \right\}^2 \leq 0,53^2$$

$$1,75 \leq |x'| \leq 12,3$$

$$x' = x$$

$$y' = 0,9107 (y + 0,3) + 0,4131 (z - 51,27)$$

$$z' = 0,9107 (z - 51,27) - 0,4131 (y + 0,3)$$

Cilindros horizontais:

$$z'^2 + \left\{ 26,83 - \left[ 12,3^2 + (y' - 23,84)^2 \right]^{1/2} \right\}^2 \leq 0,53^2$$

$$12,3 < |x'| \leq 15,3$$

### 6.3.5 - Escápulas

Cada escápula é representada por um setor cilíndrico cortado por planos como visto na figura III.4. O volume de ambas as escápulas é  $100,62 \text{ cm}^3$ , sua massa  $142,79\text{g}$  e as equações para a escápula esquerda são:

$$- 0,4469738 \text{ rd} \leq \theta \leq - 0,26381896 \text{ rd}, \quad x' > 0 \text{ e } y' < 0$$

$$\text{Para } 42,78 \leq z' \leq 52,07: \quad 1,7 \leq \rho \leq \frac{z'}{1,84} \quad - 19,6$$

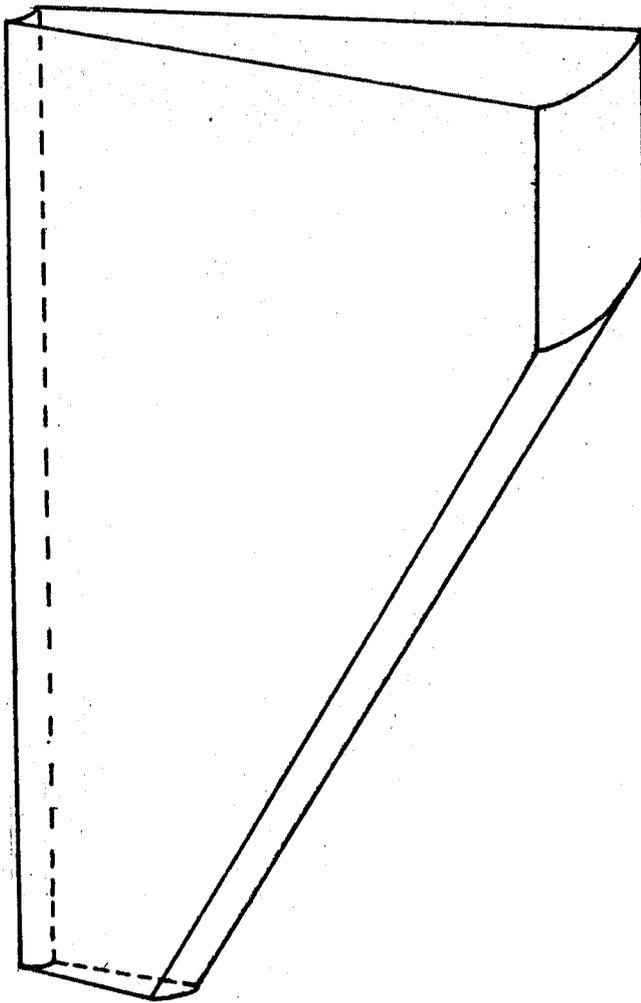


Figura III.4 - Escápula

Para  $52,07 < z' \leq 55,23$ :  $1,7 \leq \rho \leq 8,7$

$$x' = \rho \cos \theta = x - 2,9$$

$$y' = \rho \sin \theta = 0,9116 (y - 26,77) + 0,441z$$

$$z' = 0,9116z - 0,411 (y - 26,77)$$

### 6.3.6 - Ossos dos braços

Os ossos dos braços foram subdivididos em duas partes: o osso da parte superior ou úmero e os ossos da parte inferior que compreendem a ulna, o rádio e os ossos da mão e do pulso.

Os ossos da parte superior dos braços, os úmeros, são representados por cilindros circulares (vide figura III.3). O volume de ambos os úmeros é  $119,02 \text{ cm}^3$ , a massa é  $168,91\text{g}$  e suas equações são:

$$\left( \frac{|x|}{0,87} - \frac{1,5}{52} z - 13,8 \right)^2 + y^2 \leq 0,875^2$$

$$26 \leq z \leq 50,74$$

Os ossos da parte inferior de cada braço são definidos por um cilindro elíptico. O volume total para os dois braços é  $196,04 \text{ cm}^3$ , a massa é  $278,20\text{g}$  e as equações são:

$$\left( \frac{\frac{|x|}{0,87} - \frac{1,5}{52} z - 13,8}{0,87} \right)^2 + \left( \frac{y}{1,39} \right)^2 \leq 1$$

$$0,2 \leq z \leq 26$$

### 6.3.7 - Pelvis e sacro

A pelvis foi dividida em duas partes: a parte superior ou íleo e a parte inferior formada pelos ossos que compõem o pubis, o ísquio e o sacro.

A parte superior é representada pelo volume entre dois elipsóides concêntricos cortados por um cilindro circular e um plano (vide figura III.3). Suas equações são:

$$\left(\frac{x'}{9}\right)^2 + \left[\frac{y'}{15,2(1-\frac{z'}{18})}\right]^2 + \left(\frac{z'-5,9}{7,1}\right)^2 \geq 1$$

$$\left(\frac{x'}{10,28}\right)^2 + \left[\frac{y'}{16,48(1-\frac{z'}{18})}\right]^2 + \left(\frac{z'-5,9}{8,38}\right)^2 \leq 1$$

$$(y' - 4,21)^2 + z'^2 \leq 5,9^2$$

$$3,8 \leq x' \leq -3,8$$

$$y' \leq 9,76$$

$$z' > 0$$

$$x' = x$$

$$y' = 0,6428 (y+0,3) + 0,766 (z-8,92)$$

$$z' = 0,6428 (z-8,92) - 0,766 (y+0,3)$$

O osso pubis e o ísquio, pertencentes à parte inferior da pelvis são representados conjuntamente pela metade

de um cilindro circular com dois buracos laterais representando o forame obturador conforme visto na figura III.3.

Suas equações são:

$$x'^2 + y'^2 \geq 5^2$$

$$x'^2 + y'^2 \leq 6,28^2$$

$$(x' - 3,1)^2 + (z' + 2,4)^2 \geq 1,7^2$$

$$|x'| \geq -0,6993z' - 2,24$$

$$y' \leq 0$$

$$-6,8 \leq z' \leq 0$$

Para  $-1,2 \leq z' \leq 0$  e  $0 < y' \leq 9,76$ , então

$$x'^2 + y'^2 \geq 5^2$$

$$\left(\frac{x'}{10,28}\right)^2 + \left[\frac{y'}{16,48(1-\frac{z'}{18})}\right]^2 + \left(\frac{z'-5,9}{8,38}\right)^2 \leq 1$$

$$1,8056 |x'| - 6,86 > z'$$

O sacro  $\bar{e}$  é definido como o volume compreendido entre dois setores esféricos não concêntricos cortados por dois planos inclinados e dois horizontais (vide figura III.3).

Suas equações são:

$$x'^2 + y'^2 + (z' - 3,6)^2 \leq 10,4^2$$

$$x'^2 + y'^2 + (z' + 1,56)^2 \geq 5,2^2$$

$$-5,8 \leq z' \leq 0$$

$$1,8056 |x'| - 6,86 \leq z'$$

$$y' > 0$$

O volume e a massa da pelvis mais sacro são, respectivamente,  $418,36 \text{ cm}^3$  e  $593,70\text{g}$ .

### 6.3.8 - Ossos das pernas

Os ossos das pernas foram subdivididos em duas partes: o osso da parte superior, ou fêmur, e os ossos da parte inferior, que compreendem a tíbia, fíbula, rótula e os ossos dos tornozelos e dos pés.

Os ossos da parte superior das pernas, os fêmures, são definidos como sendo cilindros circulares inclinados (vide figura III.3) com volume igual a  $426,97 \text{ cm}^3$  e massa  $605,92\text{g}$ . Suas equações são:

$$\left( \left| \frac{x}{z} - \frac{5,822}{70} z - 6,836 \right| + y^2 \leq 1,435^2 \right.$$

$$\left. - 27 \leq z \leq 6 \right.$$

Os ossos da parte inferior de cada perna são representados por um cilindro circular inclinado. O volume total para as duas pernas é  $551,84 \text{ cm}^3$ , a massa  $783,12\text{g}$  e as equações são:

$$\left( \left| \frac{x}{z} - \frac{5,822}{70} z - 6,836 \right| + y^2 \leq (0,0128z + 2,12)^2 \right.$$

$$\left. - 63,8 \leq z \leq - 27 \right.$$

## 7. Desenvolvimento dos órgãos internos do fantasma

### 7.1 - Determinação da massa e volume dos órgãos internos do corpo do fantasma.

Inicialmente, para se determinar as equações que definem cada órgão do corpo do fantasma é preciso conhecer os seus respectivos volumes. Para isso, foi necessário primeiro determinar as massas e a densidade desses órgãos.

As massas foram obtidas da literatura e representam a média dos valores encontrados para crianças de 10 anos de idade. A densidade (D) foi determinada, como dito no item anterior, pela razão entre a massa total e o volume total de tecido mole no corpo do fantasma. A massa total de tecido mole ( $M_{Tm}$ ) foi, por sua vez, obtida conforme explicado no item 6.3, subtraindo-se da massa total do corpo do fantasma ( $M_F$ ) a massa do esqueleto ( $M_E$ ) e dos pulmões ( $M_P$ ), e o volume total ( $V_{Tm}$ ), subtraindo-se do volume total do corpo do fantasma ( $V_F$ ) o volume do esqueleto ( $V_E$ ) e dos pulmões ( $V_P$ ). Equacionando, teremos:

$$M_{Tm} = M_F - M_E - M_P = 32079 - 4634,86 - 426 = 27018,16g$$

$$V_{Tm} = V_F - V_E - V_P = 31219,78 - 3265,67 - 1440 = 26514,11 \text{ cm}^3$$

$$D = \frac{M_{Tm}}{V_{Tm}} = 1,0190 \text{ g/cm}^3$$

Em vista dessa densidade ter sido determinada, de certo modo, matematicamente, tentou-se verificar, por um método aproximado, porém mais convincente, quão próximo da densidade média mais provável está o valor acima determinado.

Esse método consistiu em se obter do ICRP Publicação 23 as massas e respectivas densidades dos diversos órgãos do corpo que compõem o tecido mole incluindo os músculos e gorduras (vide tabela III-12). Em seguida subtraíram-se, da massa total do corpo todo, a soma das massas dos órgãos e tecidos acima e a massa do esqueleto e dos pulmões. Obteve-se, com isso, a massa da parte de tecido mole que compõe o restante do corpo. Como não existe na literatura a densidade desta última (pois é uma mistura de diversos tipos de tecidos, tais como, órgãos, glândulas, etc.), é razoável supor-se que ela seja aproximadamente igual a média aritmética das densidades dos órgãos obtidos da Publicação 23. Essa média foi calculada e resultou em 1,039 g/cm<sup>3</sup>. Em seguida, tirou-se a média ponderada de todas as densidades acima usando como peso as respectivas massas dos órgãos. Obteve-se, como resultado, a densidade de 1,0193 g/cm<sup>3</sup> para o tecido mole, a qual é praticamente igual a densidade obtida anteriormente por meios matemáticos, o que vem comprovar a validade daqueles cálculos.

TABELA III.12 - MASSA E DENSIDADE DOS ÓRGÃOS E TECIDOS

| ÓRGÃOS            | MASSA (M)<br>(g) | DENSIDADE (D)<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | M x D              |
|-------------------|------------------|---------------------------------------|--------------------|
| GL. ADRENAIS      | 7,44             | 1,024                                 | 7,5776             |
| CÉREBRO           | 1.375,10         | 1,036                                 | 1.424,6036         |
| ESTÔMAGO          | 88,2             | 1,050                                 | 92,61              |
| INTEST. DELGADO   | 319,5            | 1,047                                 | 334,5165           |
| INT. GROSSO SUP.  | 100,7            | 1,042                                 | 104,9294           |
| INT. GROSSO INF.  | 79,6             | 1,042                                 | 82,9432            |
| CORAÇÃO           | 136,8            | 1,03                                  | 140,904            |
| RINS              | 178,4            | 1,050                                 | 187,32             |
| OVÁRIO            | 3,25             | 1,048                                 | 3,406              |
| PANCREAS          | 26,6             | 1,045                                 | 27,797             |
| PELE DO CORPO     | 2.012,03         | 1,1                                   | 2.213,233          |
| BAÇO              | 79,9             | 1,062                                 | 84,8538            |
| TESTÍCULOS        | 1,85             | 1,044                                 | 1,9314             |
| GLÂNDULA TIMO     | 30,8             | 1,026                                 | 31,6008            |
| TIREÓIDE          | 9,02             | 1,051                                 | 9,4802             |
| ÚTERO             | 5,39             | 1,052                                 | 5,6703             |
| GORDURA           | 5.450,0          | 0,916                                 | 4.992,2            |
| MÚSCULOS          | 6.110,0          | 1,0414                                | 6.362,954          |
| RESTANTE DOS TEC. | 11.003,56        | 1,039                                 | 11.433,6988        |
| <b>TOTAL</b>      | <b>27.018,14</b> |                                       | <b>27.541,2296</b> |

Portanto, DENSIDADE DO TECIDO MOLE =  $\frac{27.541,2296}{27.018,14} = 1,0193 \text{ g/cm}^3$

O volume de cada órgão foi então obtido dividindo-se sua massa pela densidade acima. A tabela III.<sup>13</sup>~~12~~ mostra essas massas e volumes para a criança de 10 anos de idade.<sup>(a)</sup>

As massas e volumes das paredes e dos conteúdos do intestino grosso superior (IGS) e do intestino grosso inferior (IGI) dados na tabela III.<sup>13</sup>~~12~~, foram determinadas indiretamente por não terem sido encontrados dados suficientes na literatura. O método usado foi o seguinte:

A massa total  $W$  das paredes do trato gastro-intestinal (exceto o estômago) da criança de 10 anos de idade é  $500g^{(39)}$  e do adulto é  $1010g^{(39)}$ .

Supondo que a razão entre a massa  $w'$  das paredes de cada secção do trato-gastro-intestinal (intestino delgado, cólon ascendente, cólon transverso, cólon descendente e cólon sigmóide mais reto) e a massa total  $W$  dada acima é a mesma usada para o adulto,  $w'$  pode ser determinada, uma vez que a massa de cada secção do trato gastro-intestinal do adulto é conhecida.

A massa das paredes do intestino delgado do adulto é  $640g^{(39)}$ . Portanto, da suposição acima, conclui-se que a massa das paredes do intestino delgado da criança é  $320g$ . Consequentemente a massa total das paredes do intestino grosso  $m_{PIG}$  (superior mais inferior) é, para a criança,

---

(a) As referências são dadas no item 7.2 para cada órgão.

| Órgãos                                       | Volume (cm <sup>3</sup> ) |         | Massa (g) |         | Desvio Percentual |
|--|---------------------------|---------|-----------|---------|-------------------|
|  | Inicial                   | Final   | Inicial   | Final   |                   |
| Cérebro                                      | 1324,83                   | 1349,46 | 1350      | 1375,10 | + 1,0             |
| Tireóide                                     | 8,636                     | 8,85    | 8,8       | 9,02    | + 2,5             |
| Timo   | 30,42                     | 30,24   | 31        | 30,81   | - 0,6             |
| Coração                                      | 134,38                    | 134,25  | 137       | 136,80  | - 0,1             |
| Pulmões                                      | 1440,00                   | 1440,00 | 426       | 426,00  | 0,0               |
| Fígado                                       | 879,29                    | 879,29  | 896       | 896,00  | 0,0               |
| Rins   | 175,66                    | 175,11  | 179       | 178,40  | - 0,3             |
| Glândulas adrenais                           | 7,26                      | 7,297   | 7,4       | 7,44    | + 0,5             |
| Baço   | 78,51                     | 78,37   | 80        | 79,90   | - 0,1             |
| Pâncreas                                     | 26,2                      | 26,08   | 26,7      | 26,60   | - 0,4             |
| Trato gastro-intestinal<br>(exceto estômago) |                           |         |           |         |                   |
| - Paredes                                    | 490,68                    | 490,27  | 500       | 499,59  | - 0,08            |
| - Conteúdo                                   | 372,91                    | 372,13  | 380       | 379,20  | - 0,2             |
| Estômago                                     |                           |         |           |         |                   |
| - Paredes                                    | 86,36                     | 86,52   | 88        | 88,2    | + 0,2             |
| - Conteúdo                                   | 122,67                    | 118,77  | 125       | 121,0   | - 3,2             |
| Intestino delgado                            |                           |         |           |         |                   |
| - Paredes e conteúdo                         | 510,30                    | 509,5   | 520       | 519,2   | - 0,2             |
| Intestino grosso superior                    |                           |         |           |         |                   |
| - Paredes                                    | 98,14                     | 98,74   | 100       | 100,7   | + 0,7             |
| - Conteúdo                                   | 107,95                    | 107,25  | 110       | 109,3   | - 0,6             |
| Intestino grosso inferior                    |                           |         |           |         |                   |
| - Paredes                                    | 78,51                     | 78,13   | 80        | 79,69   | - 0,4             |
| - Conteúdo                                   | 68,99                     | 68,6    | 70        | 69,9    | - 0,1             |
| Bexiga                                       |                           |         |           |         |                   |
| - Paredes                                    | 21,79                     | 22,66   | 22,2      | 23,1    | + 4,0             |
| - Conteúdo                                   |                           | 50,97   |           | 51,94   |                   |
| Ovários                                      | 3,140                     | 3,187   | 3,2       | 3,25    | + 1,6             |
| Útero  | 5,30                      | 5,291   | 5,4       | 5,39    | - 0,2             |
| Testículos                                   | 1,816                     | 1,819   | 1,85      | 1,854   | + 0,2             |
| Pele do corpo                                |                           | 1974,51 |           | 2012,03 |                   |

$$m_{PIG} = 500 - 320 = 180g$$

Para o adulto, a massa total das paredes do intestino grosso e do IGS são respectivamente 370g e 210g<sup>(39)</sup>. Logo, a massa das paredes do IGS da criança ( $m_{PIGS}$ ), é dada por

$$m_{PIGS} = \frac{180 \cdot 210}{370} = 100g.$$

Consequentemente, a massa das paredes do IGI da criança ( $m_{PIGI}$ ), é dada por

$$m_{PIGI} = 180 - 100 = 80g.$$

Por outro lado, a massa das paredes do IGS e do cólon ascendente do adulto são 210g e 90g<sup>(39)</sup> respectivamente. Como ( $m_{PIGS}$ ) é 100g, então a massa das paredes do cólon ascendente ( $m_{PCA}$ ) da criança foi obtida da seguinte maneira:

$$m_{PCA} = \frac{100 \cdot 90}{210} = 43g.$$

Portanto, a massa das paredes do cólon transversal ( $m_{PCT}$ ) é obtida subtraindo-se da massa total das paredes do IGS, a massa das paredes do cólon ascendente, ou seja:

$$m_{PCT} = 100 - 43 = 57g.$$

Com a massa das paredes do IGI e do cólon descendente do adulto (160g e 90g<sup>(39)</sup> respectivamente) e a massa  $m_{PIGI}$  obtida acima para a criança de 10 anos, a massa das paredes do cólon descendente ( $m_{PCD}$ ) foi obtida como segue:

$$m_{PCD} = \frac{80.90}{160} = 45g.$$

Portanto a massa das paredes do cōlon sigmōide mais a do reto ( $m_{PCSR}$ ) foi obtida por diferença entre o total do IGI e a do cōlon descendente, ou seja:

$$m_{PCSR} = 80 - 45 = 35g.$$

Para se determinar a massa do conteūdo das diversas secções do trato gastro-intestinal foi usada a mēdia, sobre o perīodo de 24 horas, do conteūdo de cada secção, dada por <sup>(12)</sup> Eve para o adulto. Supondo que a fração do conteūdo total do trato gastro-intestinal em cada secção, para o adulto, ē a mesma para a criança, as massas do conteūdo de cada secção do trato da criança foram determinadas, uma vez que essas massas sō 50% daquelas para o adulto. <sup>(39)</sup> Mais ainda, a massa do conteūdo de cada secção foi obtida mantendo uma proporcionalidade com a correspondente massa das paredes em virtude dos diâmetros de cada secção serem comparáveis.

A mēdia, sobre o perīodo de 24 horas, das massas dos conteūdos das secções do trato gastro-intestinal do adulto (segundo Eve) sō:

|                            |      |
|----------------------------|------|
| Estômago:                  | 250g |
| Intestino delgado:         | 400g |
| Intestino grosso superior: | 220g |

Intestino grosso inferior: 135g  
Total: 1005g

Para crianças, o conteúdo é aproximadamente 50% dos valores acima, ou seja:

Estômago: 125g  
Intestino delgado: 200g  
Intestino grosso superior: 110g  
Intestino grosso inferior: 70g  
Total: 505g

Logo, usando esses valores e as correspondentes massas das paredes dessas secções, e de suas subsecções (côlon ascendente, côlon transverso, côlon descendente e côlon sigmóide mais reto), as massas dos conteúdos dessas subsecções foram determinadas. São elas:

Côlon ascendente: 47,3g  
Côlon transverso: 62,7g  
Côlon descendente: 39,4g  
Côlon sigmóide e reto: 30,6g

Pelo fato de ter sido feito arredondamento dos valores dos parâmetros das equações que definem cada subsecção acima, os volumes (massas) finais das paredes e dos conteúdos resultaram um pouco diferente dos volumes (massas) originais. Contudo a diferença foi considerada pequena (vide tabela III. <sup>13</sup> ~~12~~).

## 7.2 - Descrição matemática dos órgãos internos do corpo do fantasma.

Baseado nos volumes mostrados na tabela III.13<sup>13</sup>, e nas formas e posições dos órgãos internos do corpo, obtidas da literatura, (16)(18)(47) as equações que descrevem cada um desses órgãos foram determinadas e são apresentadas a seguir:

### 7.2.1 - Cérebro

O cérebro foi definido como sendo um elipsóide cortado por um plano inclinado (vide figura III.5). O elipsóide e o plano inclinado são os mesmos que definem a superfície interna do crânio. O volume do cérebro é  $1349,46\text{cm}^3$ , sua massa é  $1375,1\text{g}$  (39) e suas equações são:

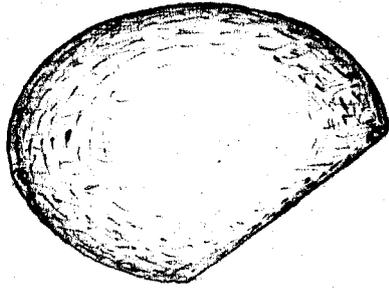
$$\left(\frac{x}{6,31}\right)^2 + \left(\frac{y}{8,66}\right)^2 + \left(\frac{z-68,8}{6,26}\right)^2 \leq 1$$

$$\text{Se } y \leq 0, \text{ então } z > 62,54 - 0,7275y$$

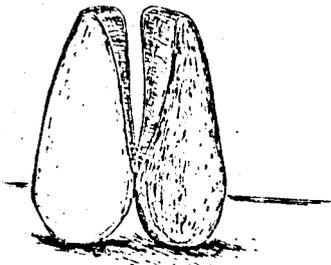
### 7.2.2 - Tireóide

A tireóide é representada como o sólido definido pelas metades de dois cilindros circulares concêntricos cortados por uma superfície (veja figura III.5). O seu volume é  $8,85\text{cm}^3$ , sua massa é  $9,02\text{g}$  (33)(39)(43) e suas equações são:

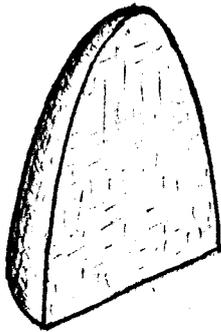
$$x^2 + (y+0,16)^2 \leq 1,68^2$$



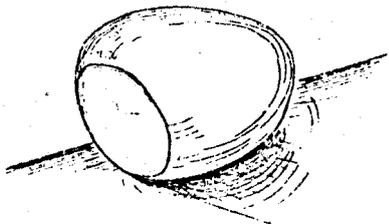
Cérebro



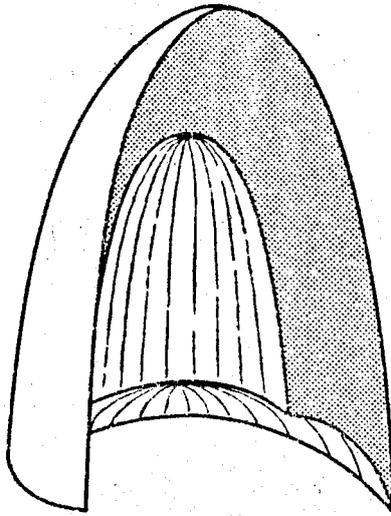
Tireóide



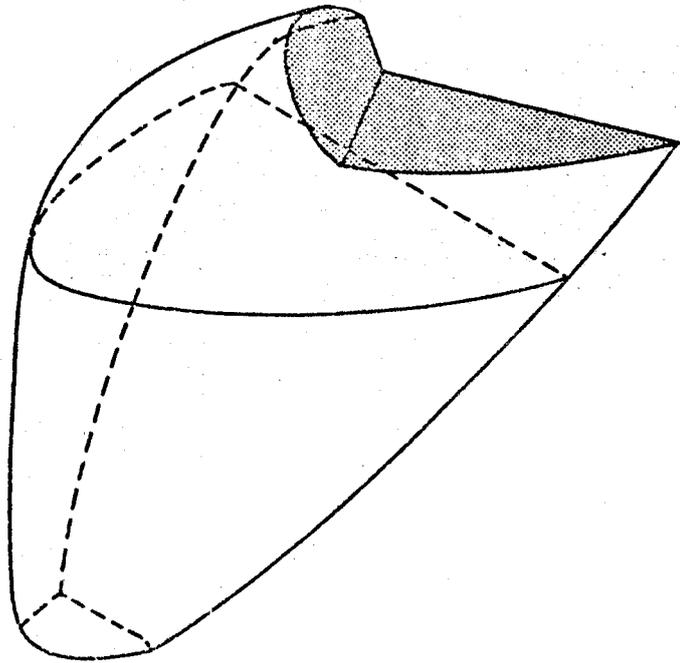
Timo



Coração



Pulmão direito



Fígado

Figura III.5 - Órgãos do fantasma: Cérebro, tireóide, timo, coração, pulmão direito e fígado (nesta figura não foram mantidas as proporções entre os órgãos).

$$x^2 + (y+0,16)^2 \geq 0,77^2$$

$$y + 0,16 \leq 0$$

$$52 \leq z \leq 55,83$$

$$(y + 0,16 - |x|)^2 \geq 2 \left[ x^2 + (y+0,16)^2 \right] \tau^2$$

na qual  $\tau = -0,3059 (z-52)+1$  para  $0 \leq z-52 \leq 0,9575$

e  $\tau = 0,10196 (z-52)+0,6095$  para  $0,9575 \leq z-52 \leq 3,83$

### 7.2.3 - Glândula timo

A Glândula timo é definida como um quarto de elipsóide extendendo-se da altura do coração até a altura do pescoço (vide figura III.5). Seu volume é  $30,24 \text{ cm}^3$  e sua massa é  $30,81\text{g}$ . Suas equações são apresentadas a seguir:

$$\left(\frac{x'}{3,5}\right)^2 + \left(\frac{y'}{0,55}\right)^2 + \left(\frac{z'}{15}\right)^2 \leq 1$$

$$y' \leq 0, \quad z' \geq 0$$

$$x' = x$$

$$y' = 0,9062 (y+6,9) - 0,4229 (z-37,6)$$

$$z' = 0,9062 (z-37,6) + 0,4229 (y+6,9)$$

### 7.2.4 - Coração

O coração é descrito como sendo metade de um elipsóide de revolução com uma meia esfera cortada por um plano em seu topo (vide figura III.5). Sua massa e volume são respec

tivamente 136,8g<sup>(4)(9)(22)(31)(39)</sup> e 134,25 cm<sup>3</sup> e suas equações são mostradas a seguir:

$$\left(\frac{x_1}{4,85}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{3,03}\right)^2 + \left(\frac{z_1}{3,03}\right)^2 \leq 1 \quad \text{para } x_1 \geq 0$$

$$x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 \leq 3,03^2 \quad \text{para } x_1 < 0$$

$$\frac{x_1}{1,82} + \frac{z_1}{3,03} \geq -1 \quad \text{para } x_1 < 0$$

$$x_1 = 0,6943 (x+0,7) - 0,3237 (y+3,2) - 0,6428 (z-37,6)$$

$$y_1 = 0,4226 (x+0,7) + 0,9063 (y+3,2)$$

$$z_1 = 0,5826 (x+0,7) - 0,2717 (y+3,2) + 0,7660 (z-37,6)$$

#### 7.2.5 - Pulmões

Cada pulmão foi definido como sendo o sólido descrito pela (a) parte dos elipsóides que definem a superfície interna das costelas, (b) parte do elipsóide que define a cavidade onde se aloja o coração, (c) parte do elipsóide que descreve a superfície inferior do pulmão (mesma que define o diafragma) e um plano vertical que separa o pulmão do espaço onde se situa a traquéia e a coluna vertebral (vide figura III.5). O volume de ambos os pulmões é 1440 cm<sup>3</sup>, a massa é 426g<sup>(7)</sup> (9)(31)(39) e as equações são:

$$32,1 \leq z \leq 51,52$$

$$|x| \geq 3,05$$

$$x_1 = \left(\frac{x}{11,62}\right)^2, \quad y_1 = y+3, \quad z_1 = \left(\frac{z-21,7}{29,82}\right)^2$$

$$\text{DEN01} = 0,2202z-11,9+(23,48z-0,383z^2-176,34)^{1/2}$$

$$\text{Se } y \geq -0,3, \text{ então } x_1 + \left[ \frac{y_1(1-z_1)^{1/2}}{\text{DEN01}} \right]^2 + z_1 < 1$$

$$\text{Se } y < -0,3, \text{ então } x_1 + \left(\frac{y_1}{8,92}\right)^2 + z_1 < 1$$

$$\left(\frac{x}{6,45}\right)^2 + \left(\frac{y+3,7}{6,45}\right)^2 + \left(\frac{z-21,7}{26,95}\right)^2 \geq 1$$

$$\left(\frac{x}{10,89}\right)^2 + \left(\frac{y_1}{8,36}\right)^2 + \left(\frac{z-32,1}{4,2}\right)^2 \geq 1$$

### 7.2.6 - Fígado

O fígado é definido pelo volume limitado pela (a) parte do mesmo elipsóide que definiu a superfície interna das costelas, (b) parte de um elipsóide e dois planos que descrevem o topo do fígado, (c) um cilindro elíptico horizontal que define a parte inferior da superfície anterior e posterior do fígado, (d) um plano inclinado descrevendo o lado postero lateral e (e) um plano horizontal definindo a superfície inferior do fígado (vide figura III.5). O volume e a massa do fígado são respectivamente  $879,3 \text{ cm}^3$  e  $896,0\text{g}$ . (5)(7)(9) (27)(33)(39) Suas equações são:

$$\left(\frac{x}{11,62}\right)^2 + \left\{ \frac{(y+0,3) \left[ 1 - \left(\frac{z-21,7}{29,82}\right)^2 \right]^{1/2}}{(0,2202z-11,9+(23,48z-0,383z^2-176,34)^{1/2})} \right\}^2 + \left(\frac{z-21,7}{29,82}\right)^2 < 1$$

$$\left(\frac{x}{11,62}\right)^2 + \left(\frac{y+0,3}{8,92}\right)^2 + \left(\frac{z-21,7}{29,82}\right)^2 < 1 \quad \text{para } y < -0,3$$

$$\left(\frac{z-34,8}{13,93}\right)^2 + \left(\frac{y+0,3}{8,92}\right)^2 < 1$$

$$\left(\frac{x}{10,89}\right)^2 + \left(\frac{y+0,3}{8,36}\right)^2 + \left(\frac{z-32,1}{3,15}\right)^2 < 1 \quad \text{para } z \geq 32,1$$

$$x + \frac{35}{45}y - \frac{35}{45}z \leq -28,23$$

$$z \leq -0,7969x + 32$$

$$\text{Se } x \geq -2,38, \quad \text{então } z \leq 33,9$$

$$z \geq 21,4$$

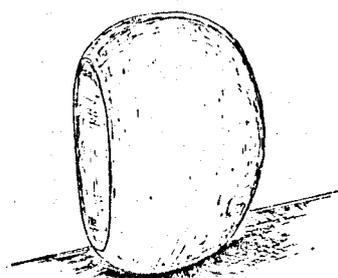
### 7.2.7 - Rins

Cada rim é definido como um elipsóide cortado por um plano vertical (veja figura III.6). O volume e a massa de ambos os rins são respectivamente  $175,11 \text{ cm}^3$  e  $178,4\text{g}$  (7)(9)(11) (39) As equações para o rim esquerdo são:

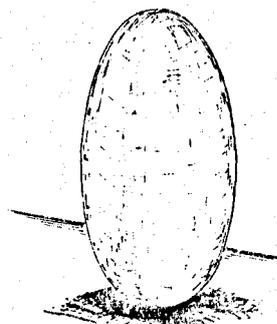
$$\left(\frac{x'}{1,42}\right)^2 + \left(\frac{y'}{3,82}\right)^2 + \left(\frac{z'}{4,16}\right)^2 \leq 1$$

$$y' \geq -2,55$$

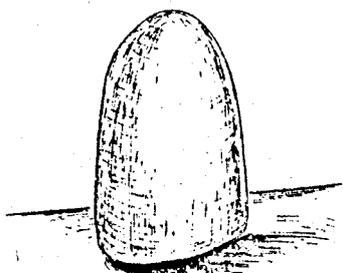
$$x' = 0,7893(x-3,9) - 0,6139(y-2,8)$$



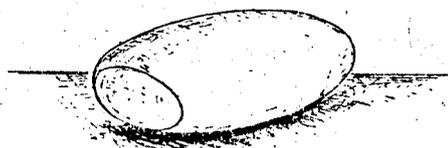
Rim



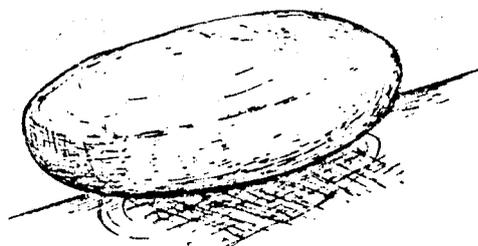
Ovário



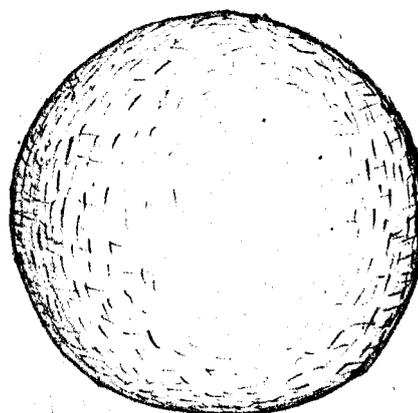
Glândula adrenal



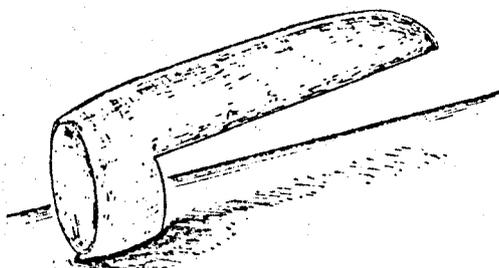
Útero



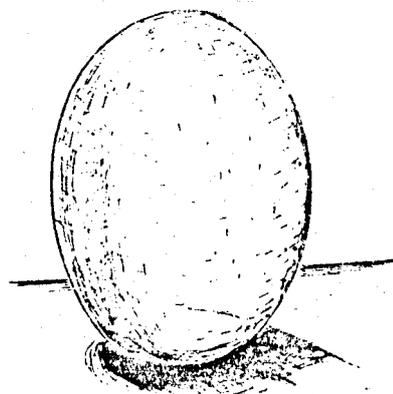
Baço



Bexiga



Pâncreas



Testículo

Figura III.6 - Órgãos do fantasma: Rim, glândula adrenal, baço, pâncreas, ovário, útero, bexiga e testículo (nesta figura não foram mantidas as proporções entre os órgãos).

$$y' = 0,7893 (y-2,8) + 0,6139 (x-3,9)$$

$$z' = z - 25,6$$

As equações para o rim direito são:

$$\left(\frac{x'}{1,42}\right)^2 + \left(\frac{y'}{3,82}\right)^2 + \left(\frac{z'}{4,16}\right)^2 \leq 1$$

$$y' \geq - 2,55$$

$$x' = 0,7893 (x+3,9) + 0,6139 (y-2,8)$$

$$y' = 0,7893 (y-2,8) - 0,6139 (x+3,9)$$

$$z' = z - 25,6$$

#### 7.2.8 - Glândulas adrenais

As glândulas adrenais são representadas por metade de um elipsóide situada no topo dos rins (veja figura III.6). O volume e a massa de ambas as glândulas são respectivamente  $7,297 \text{ cm}^3$  e  $7,44\text{g}^{(39)}$ . As equações para a glândula adrenal esquerda são:

$$\left(\frac{x'}{0,67}\right)^2 + \left(\frac{y'}{2}\right)^2 + \left(\frac{z'}{1,3}\right)^2 \leq 1$$

$$z' \geq 0$$

onde

$$x' = 0,7893 (x-3,1) - 0,6139 (y-1,8)$$

$$y' = 0,7893 (y-1,8) + 0,6139 (x-3,1)$$
$$z' = z - 29,76$$

As equações para as glândulas adrenais direita são:

$$\left(\frac{x'}{0,67}\right)^2 + \left(\frac{y'}{2}\right)^2 + \left(\frac{z'}{1,3}\right)^2 \leq 1, \quad z' \geq 0$$

onde

$$x' = 0,7893 (x+3,1) + 0,6139 (y-1,8)$$
$$y' = 0,7893 (y-1,8) - 0,6139 (x+3,1)$$
$$z' = z - 29,76$$

### 7.2.9 - Baço

O baço é definido por um elipsóide (veja figura III.6). Seu volume é 78,37 cm<sup>3</sup> e sua massa 79,9g. (5)(9)(27)(39) Suas equações são:

$$\left(\frac{x'}{1,53}\right)^2 + \left(\frac{y'}{2,67}\right)^2 + \left(\frac{z'}{4,58}\right)^2 \leq 1$$

$$x' = 0,7526 (x-8,2) + 0,6585 (y-2,2)$$
$$y' = 0,7526 (y-2,2) - 0,6585 (x-8,2)$$
$$z' = z - 26,6$$

### 7.2.10 - Pâncreas

O pâncreas é definido como metade de um elipsóide com uma

secção removida (ver figura III.6). Seu volume é  $26,08 \text{ cm}^3$ , sua massa  $26,6\text{g}$ <sup>(33)</sup><sup>(39)</sup> e suas equações são:

$$\left(\frac{x+2,26}{11,31}\right)^2 + \left(\frac{y+0,3}{0,75}\right)^2 + \left(\frac{z-23,7}{2,26}\right)^2 \leq 1$$

$$x \geq -2,26$$

$$\text{Se } x \geq 0, \text{ então } z \geq 23,7$$

### 7.2.11 - Trato gastro-intestinal

#### 7.2.11.1 - Estômago

O estômago é representado por um elipsóide com seu eixo maior na direção vertical (vide figura III.7). O volume e a massa de suas paredes são respectivamente  $86,52 \text{ cm}^3$  e  $88,2\text{g}$ .<sup>(13)</sup><sup>(34)</sup><sup>(39)</sup> O volume de seu conteúdo é  $118,77 \text{ cm}^3$  a massa  $121,0\text{g}$ . As paredes e os conteúdos são descritos como segue:

a) Paredes:

$$\left(\frac{x-4,7}{3,07}\right)^2 + \left(\frac{y+4,3}{3,07}\right)^2 + \left(\frac{z-26,7}{5,2}\right)^2 \leq 1$$

$$\left(\frac{x-4,7}{2,48}\right)^2 + \left(\frac{y+4,3}{2,48}\right)^2 + \left(\frac{z-26,7}{4,61}\right)^2 \geq 1$$

b) Conteúdo:

$$\left(\frac{x-4,7}{2,48}\right)^2 + \left(\frac{y+4,3}{2,48}\right)^2 + \left(\frac{z-26,7}{4,61}\right)^2 < 1$$

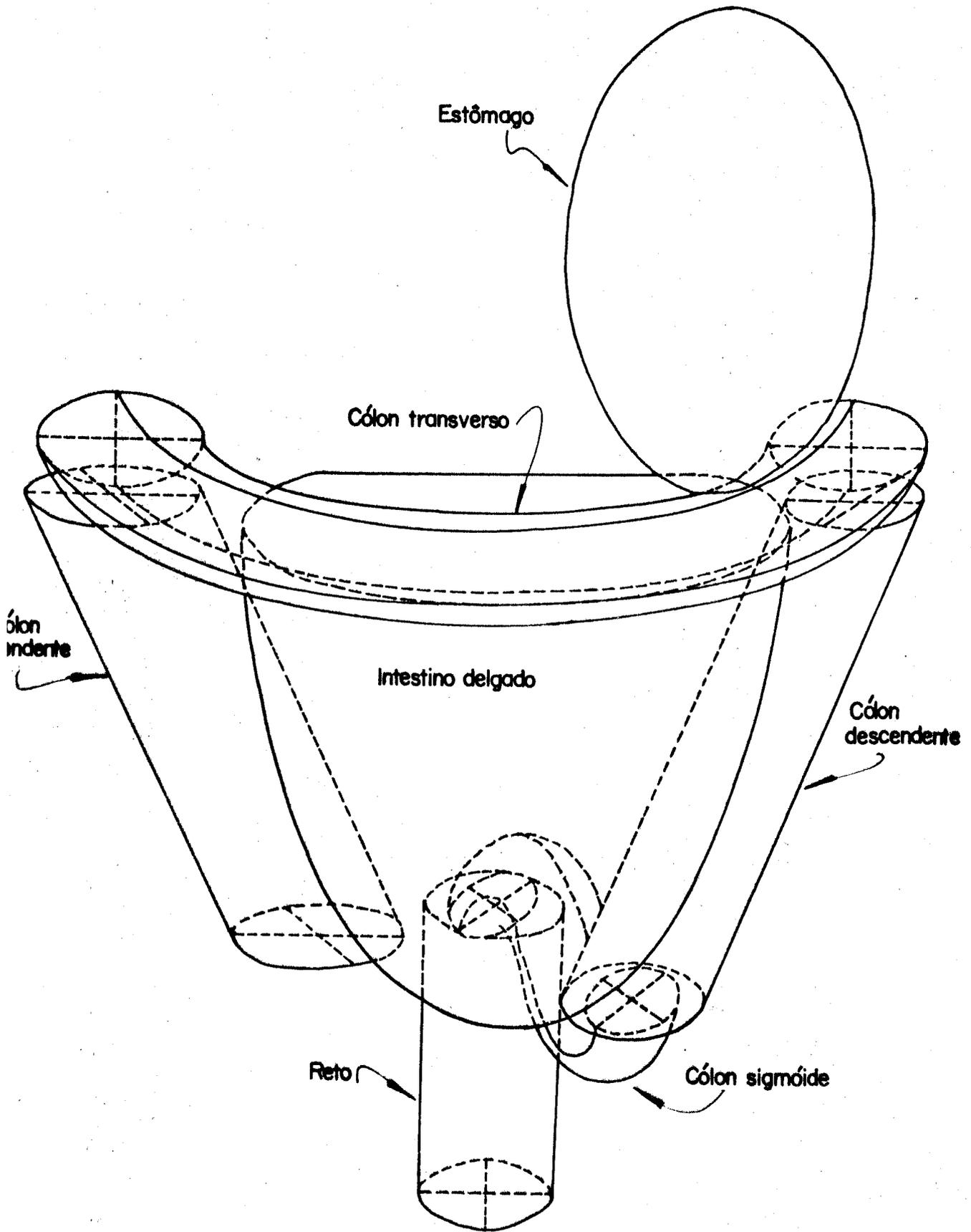


Figura III.7 - Trato gastrointestinal

### 7.2.11.2 - Intestino delgado

Em vista do intestino delgado não ter uma posição fixa (exceto as suas extremidades) e portanto ser muito difícil de se determinar sua configuração específica, ele foi definido como ocupando um espaço dentro do qual ele é livre para se mover. Mais ainda, nenhuma distinção foi feita entre suas paredes e seu conteúdo. Dessa maneira o intestino delgado foi definido como parte de um elipsóide cortado por cilindros que representam os cólons ascendente e descendente (vide figura III.7). Seu volume e sua massa são respectivamente  $509,5 \text{ cm}^3$  e  $519,2\text{g}$  e suas equações são:

$$\left(\frac{x-0,8}{5,5}\right)^2 + \left(\frac{y+2,52}{4,71}\right)^2 + \left(\frac{z-19,4}{10,4}\right)^2 \leq 1,$$

para  $y \leq 0,7$  e  $z \leq 19,4$ .

Se  $10,3 \leq z \leq 19,4$ , então  $(x+0,4659z-1,79)^2 + (y+0,76)^2 > (1,76)^2$

Se  $9 \leq z \leq 19,4$ , então  $\left(\frac{x-0,3909z+0,02}{1,44}\right)^2 + \left(\frac{y+0,76}{1,76}\right)^2 > 1$

### 7.2.11.3 - Intestino grosso superior

O intestino grosso superior foi subdividido em duas partes: cólon ascendente e cólon transverso.

O cólon ascendente é definido como um cilindro circular inclinado cortado por dois planos horizontais (vide figu

ra III.7). O volume e a massa de suas paredes são respectivamente  $42,45 \text{ cm}^3$  e  $43,3\text{g}$ . O volume de seu conteúdo é  $46,11 \text{ cm}^3$  e a massa  $47,0\text{g}$ . As equações que descrevem as paredes e o conteúdo são mostradas a seguir:

a) Paredes do cõlon ascendente:

$$(x+0,4659z - 1,79)^2 + (y+0,76)^2 \leq 1,76^2$$

$$(x+0,4659z - 1,79)^2 + (y+0,76)^2 \geq 1,27^2$$

$$10,3 \leq z \leq 19,4$$

b) Conteúdo do cõlon ascendente:

$$(x+0,4659z - 1,79)^2 + (y+0,76)^2 < 1,27^2$$

$$10,3 \leq z \leq 19,4$$

O cõlon transverso é definido por uma parte de um toro elíptico com secção transversal também elíptica (vide figura III.7). O volume e a massa de suas paredes são respectivamente  $56,29 \text{ cm}^3$  e  $57,4\text{g}$ . O volume de seu conteúdo é  $61,14 \text{ cm}^3$  e a massa  $62,30\text{g}$ . As equações que descrevem suas paredes e seu conteúdo são:

a) Paredes do cõlon transverso:

$$\left(\frac{z-20,4}{1}\right)^2 + \left[\frac{7,39-(x^2+y^2)}{1,61}\right]^{1/2} \leq 1$$

$$\left(\frac{z-20,4}{0,66}\right)^2 + \left[\frac{7,39-(x^2+y^2)}{1,27}\right]^{1/2} \geq 1$$

$$y \leq 0$$

b) Conteúdo do cõlon transverso:

$$\left(\frac{z-20,4}{0,66}\right)^2 + \left[\frac{7,39-(x^2+y^2)^{1/2}}{1,27}\right]^2 < 1$$

$$y \leq 0$$

#### 7.2.11.4 - Intestino grosso inferior

O intestino grosso inferior foi subdividido em duas partes: o cõlon descendente e o cõlon sigmõide mais o reto.

O cõlon descendente é definido como um cilindro elíptico inclinado cortado por dois planos horizontais. (vide figura III.7). O volume e a massa de suas paredes são respectivamente 44,11 cm<sup>3</sup> e 44,90g. O volume de seu conteúdo é 38,70 cm<sup>3</sup> e a massa é 39,4g. A descrição matemática de suas paredes e conteúdo é mostrada a seguir:

a) Paredes:

$$\left(\frac{x-0,3909z+0,02}{1,44}\right)^2 + \left(\frac{y+0,76}{1,76}\right)^2 \leq 1$$

$$\left(\frac{x-0,3909z+0,02}{0,94}\right)^2 + \left(\frac{y+0,76}{1,26}\right)^2 \geq 1$$

$$9 \leq z \leq 19,4$$

b) Conteúdo:

$$\left(\frac{x-0,3909z+0,02}{0,94}\right)^2 + \left(\frac{y+0,76}{1,26}\right)^2 < 1$$

$$9 \leq z \leq 19,4$$

O cõlon sigmõide é definido por duas metades de um toro elíptico juntas em uma de suas extremidades de forma a descrever um "S" e o reto é definido por um cilindro elíptico vertical ligado à extremidade do cõlon sigmõide (vide figura III.7). O volume e a massa das paredes do cõlon sigmõide mais o reto são respectivamente  $34,02 \text{ cm}^3$  e  $34,7\text{g}$ . O volume do conteúdo é  $29,9 \text{ cm}^3$  e a massa  $30,5\text{g}$ . As equações são:

### Cõlon sigmõide

#### a) Paredes

$$\text{para } z' \leq 0$$

$$\left( \frac{x'}{1,35} \right)^2 + \left\{ \frac{1,57 - \left[ (y'-1,57)^2 + z'^2 \right]^{1/2}}{0,95} \right\}^2 \leq 1$$

$$x'^2 + \left\{ \frac{1,57 - \left[ (y'-1,57)^2 + z'^2 \right]^{1/2}}{0,6} \right\}^2 \geq 1$$

Para  $z' > 0$

$$\left( \frac{x'}{1,35} \right)^2 + \left\{ \frac{1,57 - \left[ (y'-4,71)^2 + z'^2 \right]^{1/2}}{0,95} \right\}^2 \leq 1$$

$$x'^2 + \left\{ \frac{1,57 - \left[ (y'-4,71)^2 + z'^2 \right]^{1/2}}{0,6} \right\}^2 \geq 1$$

#### b) Conteúdo

para  $z' \leq 0$

$$x'^2 + \left\{ \frac{1,57 - \left[ (y' - 1,57)^2 + z'^2 \right]^{1/2}}{0,6} \right\}^2 < 1$$

para  $z' > 0$ ,

$$x'^2 + \left\{ \frac{1,57 - \left[ (y' - 4,71)^2 + z'^2 \right]^{1/2}}{0,6} \right\}^2 < 1$$

$$x' = 0,8325 (x - 3,5) + 0,5539 (y + 0,76)$$

$$y' = 0,8325 (y + 0,76) - 0,5539 (x - 3,5)$$

$$z' = z - 9$$

### Reto

#### a) Paredes

$$\left( \frac{x}{1,35} \right)^2 + \left( \frac{y - 4,5}{0,95} \right)^2 \leq 1$$

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

$$3 \leq z \leq 9$$

#### b) Conteúdo

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

$$3 \leq z \leq 9$$

### 6.5.12 - Ovários

Cada ovário é definido por um elipsóide (vide figu-

ra III.6). O volume e a massa de ambos os ovários são respectivamente  $3,187 \text{ cm}^3$  e  $3,25\text{g}$ .<sup>(32)(39)</sup> As equações que descrevem o ovário esquerdo são:

$$\left(\frac{x-4,0}{0,66}\right)^2 + \left(\frac{y-1,5}{0,44}\right)^2 + \left(\frac{z-12,0}{1,31}\right)^2 \leq 1.$$

#### 6.5.13 - Útero

O útero é descrito por um elipsóide cortado por um plano (vide figura III.6). Seu volume e sua massa são respectivamente  $5,291 \text{ cm}^3$  e  $5,39\text{g}$ .<sup>(4)(7)(32)</sup> e suas equações são:

$$\left(\frac{x'}{0,65}\right)^2 + \left(\frac{y'}{1,08}\right)^2 + \left(\frac{z'}{2,15}\right)^2 \leq 1$$

$$z' \geq -1,07$$

$$x' = x$$

$$y' = 0,6428 (y-1,8) + 0,766 (z-9,15)$$

$$z' = 0,6428 (z-9,15) - 0,766 (y-1,8).$$

#### 6.5.14 - Bexiga

A bexiga é definida por uma esfera (veja figura III.6). O volume e a massa de suas paredes são respectivamente  $22,66 \text{ cm}^3$  e  $23,1\text{g}$ . O volume do conteúdo é  $50,97 \text{ cm}^3$  e a massa  $51,9\text{g}$ . Este último volume (do conteúdo) corresponde a uma bexiga

moderadamente cheia. Dependendo do volume do conteúdo, a dose de radiação nas paredes, causada por radionuclídeos no conteúdo, varia grandemente mesmo para iguais concentrações de radionuclídeos. A dose absorvida nas paredes, por fóton, devido à radioatividade no conteúdo decresce de quase uma ordem de magnitude,<sup>(40)</sup> quando o volume desse conteúdo varia do seu valor mínimo ao seu valor máximo. Portanto os valores apresentados neste trabalho, são apenas para um tamanho de bexiga. Para fontes de radiação fora deste órgão a diferença na fração absorvida específica ou a taxa de dose para diferentes tamanhos é geralmente pequena.<sup>(41)</sup> As equações que descrevem suas paredes e seu conteúdo são:

a) Paredes

$$x^2 + (y+1,1)^2 + (z-6,6)^2 \leq 2,6^2$$

$$x^2 + (y+1,1)^2 + (z-6,6)^2 \geq 2,3^2$$

b) Conteúdo

$$x^2 + (y+1,1)^2 + (z-6,6)^2 < 2,3^2.$$

7.2.15 - Testículos

Cada testículo é definido por um elipsóide (vide figura III.6). O volume de ambos os testículos é 1,819 cm<sup>3</sup> e a massa é 1,854g. As equações para o testículo esquerdo são:

$$\left(\frac{x-0,47}{0,47}\right)^2 + \left(\frac{y+4,77}{0,55}\right)^2 + \left(\frac{z+1,0}{0,84}\right)^2 \leq 1.$$

#### 7.2.16 - Pele do corpo

A derme e a epiderme estão contidas numa camada de 2 mm de espessura que corresponde à pele que cobre o exterior do corpo do fantasma. Seu volume é  $1974,51 \text{ cm}^3$  e sua massa 2012,03g.

## CAPÍTULO IV - MATERIAIS E MÉTODOS

### 1. Equipamento de raios-X

O equipamento usado na irradiação do fantasma consiste de um gerador de raios-X especialmente projetado para o estudo de dose interna de radiações.

Para ser um gerador adequado para os fins a que se propõe, isto é, irradiações experimentais com fantasmas humanos, ele deve ter uma fonte de potencial bem estabilizada e reprodutível, isto é, com a mínima variação na alta tensão para assegurar que sua forma de onda tenha também pequena variação no intervalo amplo de corrente de tubo normalmente usado. Uma vez que aparelhos de raios-X com tais características não são encontrados comercialmente, foi necessário projetar e construir um, pois, os tubos convencionais usados em radiodiagnóstico e em radioterapia não satisfazem os requisitos desejados. Os tubos de diagnósticos são em geral projetados para operar com correntes altas (da ordem de centenas de miliamperes) durante intervalos curtos de tempo (frações de segundo), enquanto que os tubos de radioterapia são construídos para operar continuamente, mas com correntes de tubo relativamente baixas (em geral de 1 a 20 mA). Portanto, o equipamento de raios-X com as características citadas foi projetado e construído fazendo-se modificações num aparelho de radioterapia de 250 KV da Siemens (vide figura IV-1). Nesse

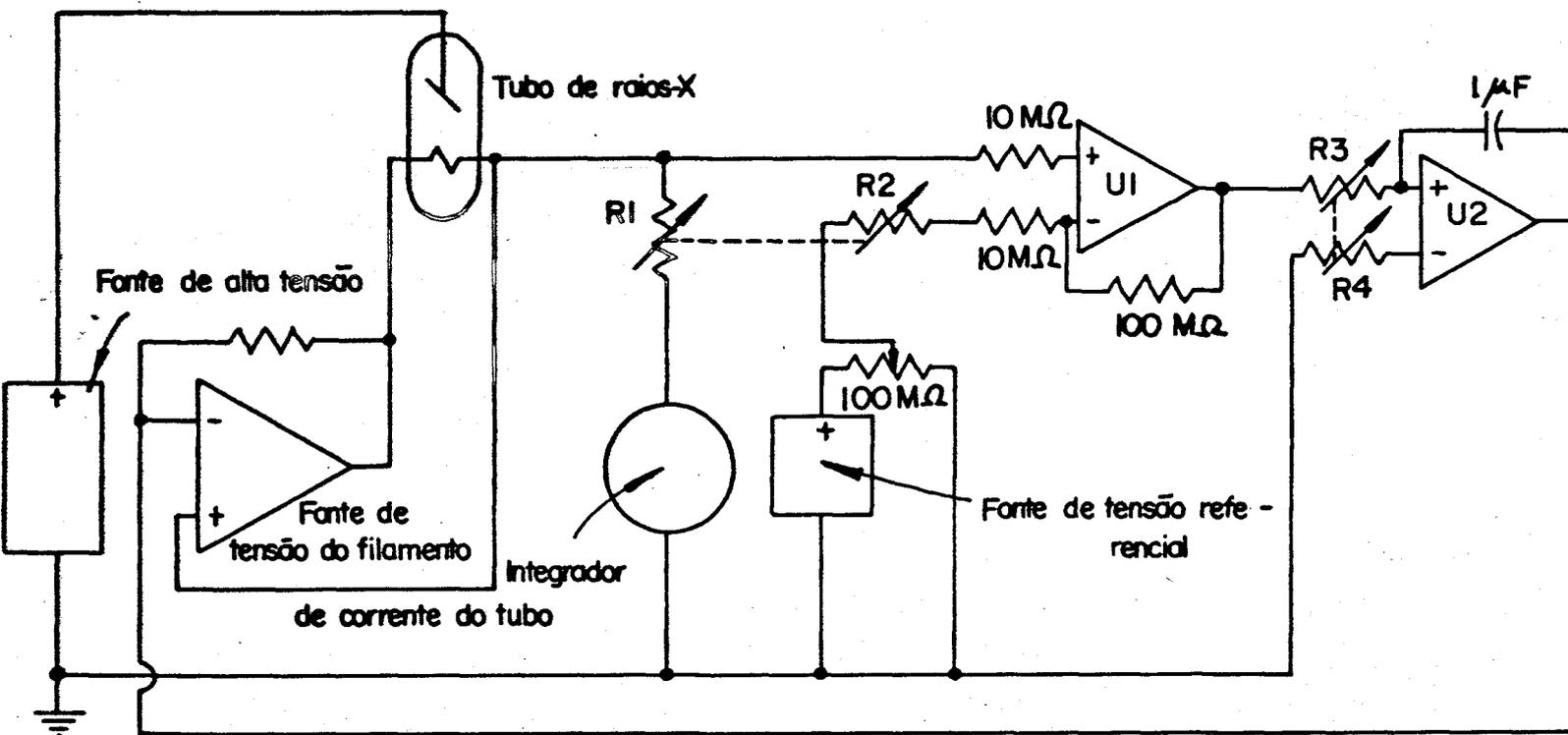


Figura IV.1- Esquema do aparelho de raios-X

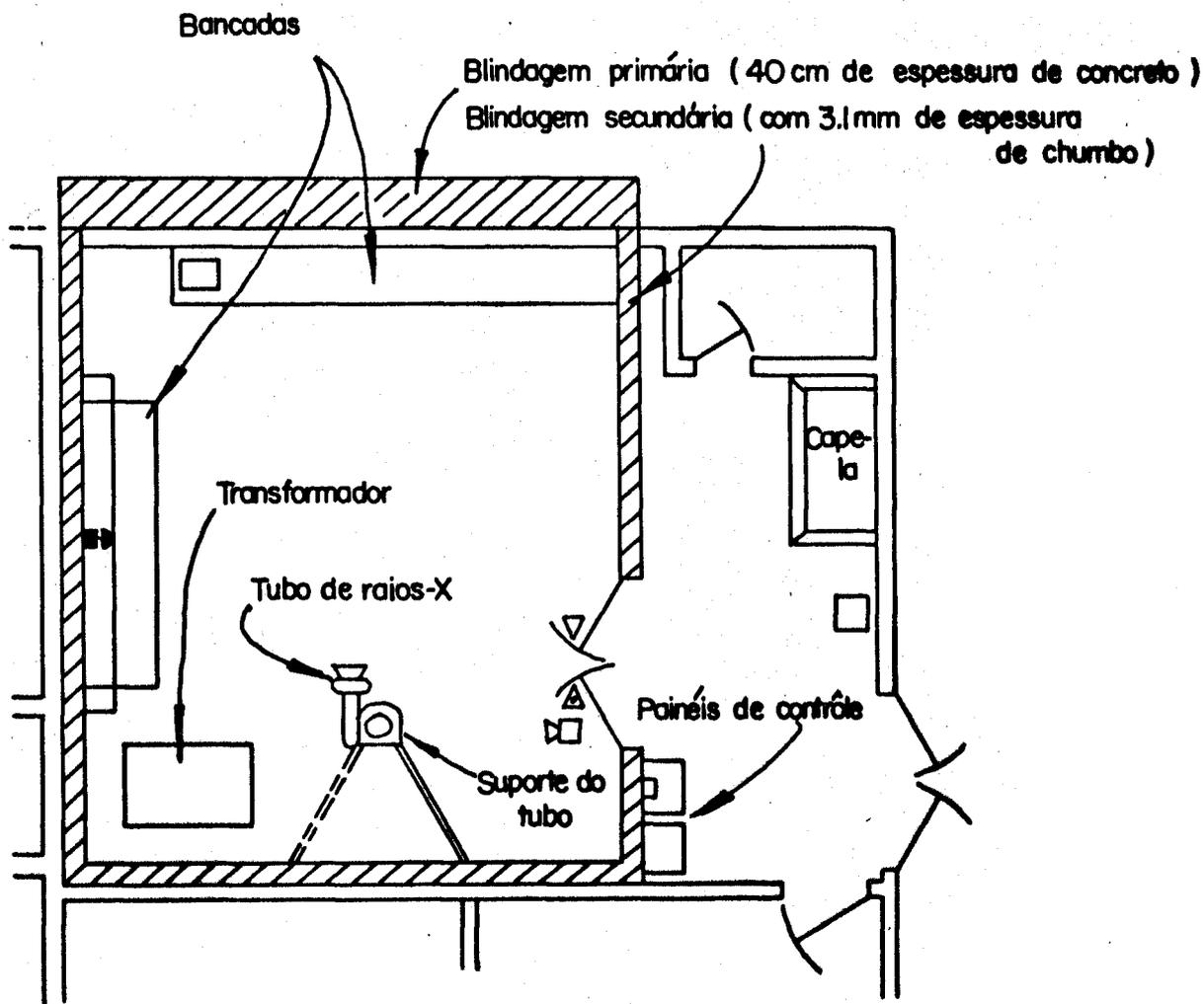
aparelho, a alta tensão positiva do anodo é fornecida por uma fonte de tensão regulada capaz de produzir 20 mA até 75KV e 10 mA até 150 KV. A realimentação é obtida por meio de um conjunto de resistências internas a fim de ajustar continuamente a queda de tensão através do tubo, mantendo um potencial de saída constante. O aumento na tensão de saída é no máximo de 0,3% quando a corrente de tubo varia do máximo (10 mA) ao mínimo (1  $\mu$ A). O intervalo de corrente de filamento usado neste aparelho é de 10  $\mu$ A a 20 mA.

A sala que aloja o equipamento de raios-X ( tubo de raios-X, colimador, blindagens do tubo, sistema de refrigeração e suporte do tubo), as blindagens primária, secundária e alguns interruptores de segurança é mostrada na figura IV.2. A figura IV.3 mostra uma vista geral do equipamento usado.

## 2. Fantasma físico usado nas irradiações

### 2.1 - Introdução

Para se verificar a confiabilidade do código de transporte de raios-X ou gama, usado pelo computador nos cálculos das frações específicas absorvidas, as dimensões do objeto irradiado não são importantes, quando os cálculos e as medidas experimentais forem feitas no mesmo objeto. Em vista disso, foi usado o fantasma físico de Snyder e Fisher (adulto de 20



- ☐ Alto-falante de advertência
- △ Microswitches
- ▣ Botão de alarme
- ▽ Interruptor

Figura IV.2 - Esquema da sala de raios-X

113  
+++

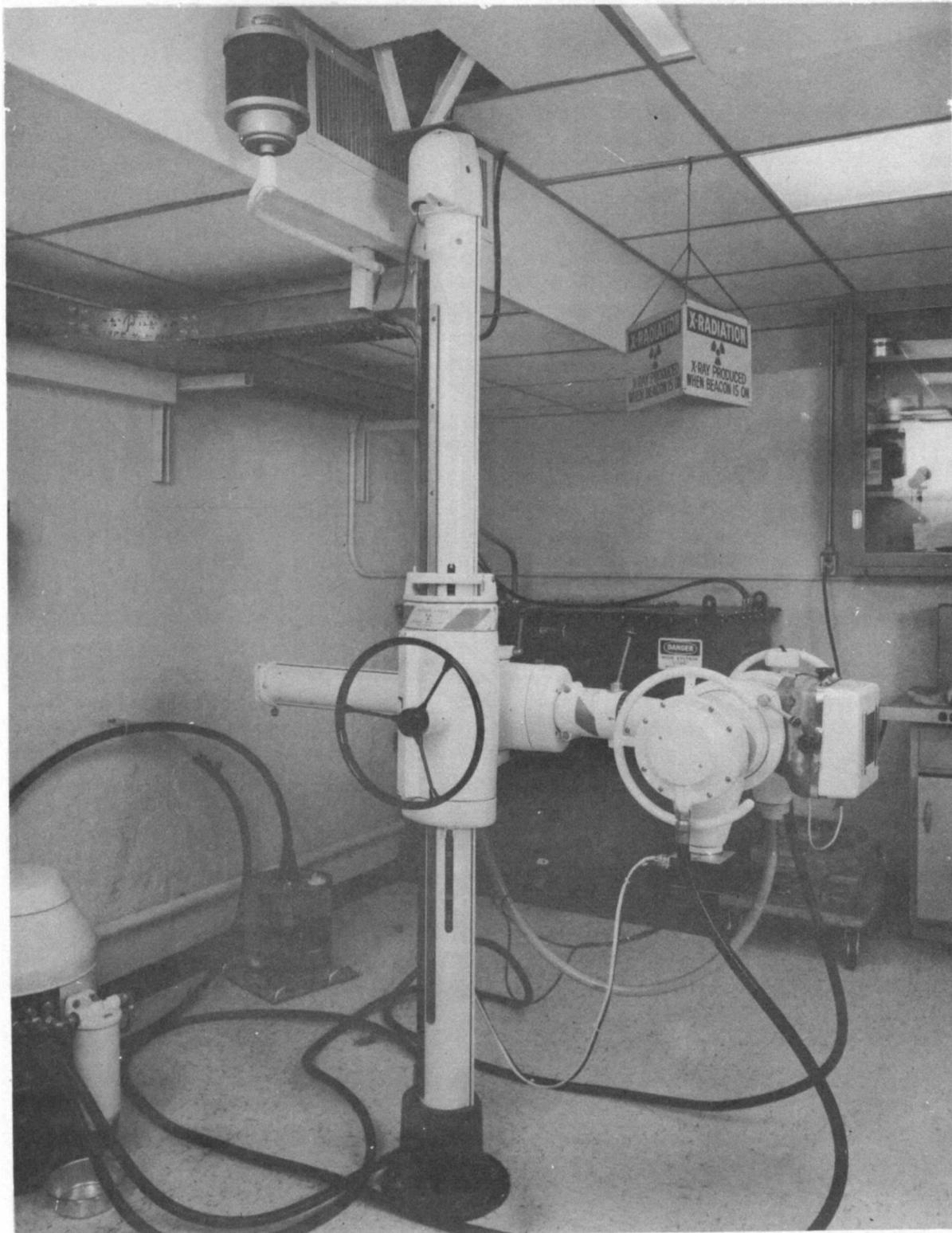


Figura IV.3 - Equipamento de raios-X

anos) nas irradiações e medidas experimentais, pelo fato do fantasma físico da criança de 10 anos de idade não ter sido construído.

A construção do fantasma do adulto (vide figura IV-4) foi baseada na publicação 23 do ICRP (International Commission on Radiological Protection);<sup>(39)</sup> a qual possui um grande número de dados para o homem referência. O corpo deste fantasma foi subdividido em três regiões: (1) região da cabeça (cabeça mais pescoço), (2) região do tronco (tronco mais os braços) e região das pernas (pernas mais órgãos genitais). Esse agrupamento de mais de uma parte do corpo na mesma região foi feita a fim de simplificar as equações que as definem e conseqüentemente diminuir o tempo de computação requerido no cálculo das doses de radiação.

## 2.2 - Materiais e composição do fantasma físico

Para construir o equivalente físico do fantasma matemático de Snyder e Fisher foram usados lucite e poliestireno, na sua superfície externa, afim de conter os materiais que representam os tecidos do corpo (tecidos do esqueleto, dos pulmões e do resto do corpo, sendo este último chamado de "tecido mole").

O material que compõe o esqueleto do fantasma matemático e do fantasma físico equivalente é uma mistura homogê-

115  
113.



Figura IV.4 - Fantasma do adulto humano

nea de osso, medula óssea, cartilagem e tecidos periarticulares. Os pulmões compõem-se de um material cuja densidade é 0,2958 e o tecido mole de um material cuja densidade é igual a 0,9869. Da mesma forma que o esqueleto, o tecido mole e os pulmões são também misturas homogêneas com composição média característica de cada um. Cada tecido é descrito no código de computador usando sua composição e densidade mostradas na tabela IV.1 para o fantasma matemático. Esses dados são vistos também para o fantasma físico equivalente.

A composição para o fantasma físico equivalente foi preparada usando, para cada tecido, as seguintes substâncias medidas em porcentagem por peso: o tecido mole como 66% de água destilada, 25% de álcool isopropílico, 8% de sacarose e 1% de cloreto de sódio; <sup>(44)</sup> esqueleto como 27% de água, 19,5% de osso moído, 39,5% de sacarose, 8% de fosfato de amônia e 6% de nitrato de amônia; pulmões como 73,5% de água, 25% de celulose, em forma de esponja, e 1,5% de cloreto de sódio.

As composições apresentadas na tabela IV.1, foram necessárias a fim de que se pudesse comparar os resultados calculados com os experimentais.

#### 2.2.1 - Coefficientes de atenuação de massa

Os coeficientes de atenuação de massa dos três tecidos

TABELA IV.1 - COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DOS TECIDOS DOS FANTASMAS MATEMÁTICO E FÍSICO EQUIVALENTE\*

| Porcentagem em massa        | Tecido mole                |                          | Esqueleto                  |                          | Pulmões                    |                          |
|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
|                             | Snyder-Fisher <sup>a</sup> | Equivalente <sup>b</sup> | Snyder-Fisher <sup>a</sup> | Equivalente <sup>c</sup> | Snyder-Fisher <sup>a</sup> | Equivalente <sup>d</sup> |
| H                           | 10,474                     | 11,26                    | 7,036                      | 6,47                     | 10,208                     | 9,78                     |
| C                           | 23,020                     | 18,36                    | 22,793                     | 19,15                    | 10,008                     | 11,11                    |
| N                           | 2,339                      |                          | 3,865                      | 3,94                     | 2,802                      |                          |
| O                           | 63,206                     | 69,38                    | 48,559                     | 52,98                    | 75,958                     | 77,61                    |
| Na                          | 0,128                      | 0,393                    | 0,315                      | 0,17                     | 0,190                      | 0,59                     |
| Mg                          | 0,016                      |                          | 0,111                      | 0,18                     | 0,008                      |                          |
| P                           | 0,236                      |                          | 6,937                      | 6,80                     | 0,081                      |                          |
| S                           | 0,221                      |                          | 0,169                      | 0,01                     | 0,230                      |                          |
| Cl                          | 0,141                      | 0,607                    | 0,139                      |                          | 0,270                      | 0,91                     |
| K                           | 0,208                      |                          | 0,145                      |                          | 0,200                      |                          |
| Ca                          |                            |                          | 9,914                      | 10,30                    | 0,007                      |                          |
| Fe                          | 0,006                      |                          | 0,008                      |                          | 0,037                      |                          |
| Zn                          | 0,005                      |                          | 0,010                      |                          | 0,002                      |                          |
| Densidade g/cm <sup>3</sup> | 1,0                        | 0,99±0,01                | 1,5                        | 1,50±0,01                | 0,3                        | 0,30±0,01                |

\* Stansbury<sup>(44)</sup>

<sup>a</sup>As composições são as mesmas encontradas no MIRD Pamphlet nº5, exceto que todos os elementos de número atômico maior que o do Zn são considerados zinco.

<sup>b</sup>66% H<sub>2</sub>O, 25% álcool isopropílico, 8% sacarose e 1% NaCl

<sup>c</sup>Osso moído, água, sacarose e sais.

<sup>d</sup>73,5% H<sub>2</sub>O, 25,0% celulose (esponja) e 1,5% NaCl.

dos sendo dependentes da composição, têm um papel importante nos cálculos das doses absorvidas de radiação. As tabelas IV.2, IV.3 e IV.4 mostram esses coeficientes para o fantasma matemático de Snyder e Fisher e os respectivos desvios percentuais do fantasma físico em relação ao fantasma matemático, para o tecido mole, esqueleto e pulmões respectivamente.<sup>(44)</sup>

### 2.2.2 - Volumes das diversas regiões do corpo dos fantasmas físico e matemático.

Nos cálculos das doses absorvidas deve-se também levar em conta a comparação entre os volumes de cada região do fantasma físico e do fantasma matemático. A tabela IV.5 mostra esses volumes e as respectivas diferenças percentuais.<sup>(17)</sup>

## 3. Sistema dosimétrico usado

### 3.1 - Câmara de ionização Victoreen modelo 550

O equipamento usado para medir a exposição de entrada na pele do corpo do fantasma, isto é, na pele voltada para a fonte de radiação, foi um eletrômetro integrador Victoreen, modelo 550 Radocon III. Esse sistema possui, de acordo com o fabricante, uma imprecisão, a 22°C, de  $\pm 0,5\%$  das leituras, quando usado até seis meses após calibrados. A flutuação com

TABELA IV.2 - COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO DE MASSA PARA A COMPOSIÇÃO DE SNYDER-FISHER E COMPARAÇÃO<sup>a</sup> COM MATERIAL EQUIVALENTE USADO NO FANTASMA PEDIÁTRICO-TECIDO MOLE.<sup>b</sup>

| Energia<br>(KeV) | Fotoelétrico                         |                   | Coerente                             |                   | Compton                              |                   |
|------------------|--------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|-------------------|
|                  | Coefficiente<br>(cm <sup>2</sup> /g) | Comparação<br>(%) | Coefficiente<br>(cm <sup>2</sup> /g) | Comparação<br>(%) | Coefficiente<br>(cm <sup>2</sup> /g) | Comparação<br>(%) |
| 10               | 4,34                                 | 1,7               | 0,231                                | 1,7               | 0,153                                | -0,7              |
| 15               | 1,18                                 | 1,5               | 0,132                                | 1,6               | 0,176                                | -0,8              |
| 20               | 0,465                                | 1,4               | 0,0862                               | 1,6               | 0,186                                | -0,9              |
| 30               | 0,124                                | 1,1               | 0,0513                               | 1,6               | 0,192                                | -0,9              |
| 40               | 0,0485                               | 1,0               | 0,0277                               | 1,5               | 0,190                                | -0,9              |
| 50               | 0,0235                               | 0,9               | 0,0187                               | 1,5               | 0,185                                | -0,8              |
| 60               | 0,0130                               | 0,8               | 0,0135                               | 1,5               | 0,180                                | -0,8              |
| 80               | 5,12E-3                              | 0,7               | 7,93E-3                              | 1,5               | 0,169                                | -0,7              |
| 100              | 2,50E-3                              | 0,6               | 5,20E-3                              | 1,4               | 0,160                                | -0,7              |
| 150              | 6,96E-4                              | 0,4               | 2,37E-3                              | 1,4               | 0,141                                | -0,6              |
| 200              | 2,85E-4                              | 0,3               | 1,34E-3                              | 1,5               | 0,128                                | -0,6              |
| 300              | 8,40E-5                              | 0,1               | 5,91E-4                              | 1,5               | 0,111                                | -0,5              |
| 400              | 3,62E-5                              | 0,1               | 3,30E-4                              | 1,5               | 0,100                                | -0,6              |
| 500              | 1,92E-5                              | 0,3               | 2,09E-4                              | 1,6               | 0,0926                               | -0,6              |
| 600              | 1,15E-5                              | 0,4               | 1,44E-4                              | 1,6               | 0,0871                               | -0,6              |
| 800              | 5,36E-6                              | 0,7               | 8,05E-5                              | 1,7               | 0,0798                               | -0,8              |
| 1000             | 3,01E-6                              | 0,9               | 5,13E-5                              | 1,8               | 0,0751                               | -0,9              |

$$^a \text{Comparação percentual} = \frac{(\mu/\rho)_{\text{equivalente}} - (\mu/\rho)_{\text{Snyder-Fisher}}}{(\mu/\rho)_{\text{Snyder-Fisher}}} \times 100$$

<sup>b</sup>Referência (44)

TABELA IV.3 - COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO DE MASSA PARA A COMPOSIÇÃO DE SNYDER-FISHER E COMPARAÇÃO<sup>a</sup> COM MATERIAL EQUIVALENTE USADO NO FANTASMA PEDIÁTRICO-ESQUELETO<sup>b</sup>.

| Energia<br>(KeV) | Fotoelétrico                         |                   | Coerente                             |                   | Compton                              |                   |
|------------------|--------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|-------------------|
|                  | Coefficiente<br>(cm <sup>2</sup> /g) | Comparação<br>(%) | Coefficiente<br>(cm <sup>2</sup> /g) | Comparação<br>(%) | Coefficiente<br>(cm <sup>2</sup> /g) | Comparação<br>(%) |
| 10               | 15,4                                 | -1,2              | 0,327                                | 1,5               | 0,143                                | -1,2              |
| 15               | 4,62                                 | -0,9              | 0,192                                | 1,4               | 0,164                                | -0,9              |
| 20               | 1,93                                 | -0,8              | 0,126                                | 1,4               | 0,174                                | -0,8              |
| 30               | 0,554                                | -0,6              | 0,0671                               | 1,4               | 0,181                                | -0,6              |
| 40               | 0,267                                | -0,5              | 0,0416                               | 1,4               | 0,179                                | -0,5              |
| 50               | 0,113                                | -0,5              | 0,0282                               | 1,4               | 0,176                                | -0,5              |
| 60               | 0,0641                               | -0,5              | 0,0204                               | 1,3               | 0,172                                | -0,5              |
| 80               | 0,0261                               | -0,5              | 0,0120                               | 1,3               | 0,162                                | -0,5              |
| 100              | 0,0131                               | -0,5              | 7,90E-3                              | 1,3               | 0,154                                | -0,5              |
| 150              | 3,76E-3                              | -0,6              | 3,61E-3                              | 1,3               | 0,138                                | -0,6              |
| 200              | 1,57E-3                              | -0,6              | 2,04E-3                              | 1,3               | 0,126                                | -0,6              |
| 300              | 4,73E-4                              | -0,6              | 9,02E-4                              | 1,3               | 0,109                                | -0,6              |
| 400              | 2,06E-4                              | -0,6              | 5,02E-4                              | 1,4               | 0,0981                               | -0,6              |
| 500              | 1,10E-4                              | -0,6              | 3,18E-4                              | 1,4               | 0,0905                               | -0,6              |
| 600              | 6,66E-5                              | -0,5              | 2,19E-4                              | 1,4               | 0,0848                               | -0,5              |
| 800              | 3,08E-5                              | -0,5              | 1,22E-4                              | 1,4               | 0,0768                               | -0,5              |
| 1000             | 1,73E-5                              | -0,4              | 7,80E-5                              | 1,5               | 0,0715                               | -0,4              |

$${}^a \text{Comparação percentual} = \frac{(\mu/\rho)_{\text{equivalente}} - (\mu/\rho)_{\text{Snyder-Fisher}}}{(\mu/\rho)_{\text{Snyder-Fisher}}} \times 100$$

<sup>b</sup>Referência (44)

TABELA IV.4 - COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO DE MASSA PARA A COMPOSIÇÃO DE SNYDER-FISHER E COMPARAÇÃO<sup>a</sup> COM MATERIAL EQUIVALENTE USADO NO FANTASMA PEDIÁTRICO-PULMÃO.<sup>b</sup>

| Energia<br>(KeV) | Fotoelétrico                         |                   | Coerente                             |                   | Compton                              |                   |
|------------------|--------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|-------------------|
|                  | Coefficiente<br>(cm <sup>2</sup> /g) | Comparação<br>(%) | Coefficiente<br>(cm <sup>2</sup> /g) | Comparação<br>(%) | Coefficiente<br>(cm <sup>2</sup> /g) | Comparação<br>(%) |
| 10               | 4,85                                 | 1,4               | 0,246                                | 1,0               | 0,152                                | -0,8              |
| 15               | 1,33                                 | 1,3               | 0,141                                | 1,0               | 0,176                                | -0,7              |
| 20               | 0,524                                | 1,2               | 0,0918                               | 1,0               | 0,186                                | -0,6              |
| 30               | 0,140                                | 1,0               | 0,0480                               | 1,0               | 0,192                                | -0,5              |
| 40               | 0,0549                               | 0,8               | 0,0295                               | 1,0               | 0,190                                | -0,5              |
| 50               | 0,0266                               | 0,7               | 0,0199                               | 1,0               | 0,185                                | -0,5              |
| 60               | 0,0147                               | 0,6               | 0,0143                               | 1,0               | 0,180                                | -0,5              |
| 80               | 5,81E-3                              | 0,5               | 8,43E-3                              | 1,0               | 0,169                                | -0,4              |
| 100              | 2,85E-3                              | 0,4               | 5,52E-3                              | 1,0               | 0,160                                | -0,4              |
| 150              | 7,91E-4                              | 0,2               | 2,51E-3                              | 1,1               | 0,140                                | -0,4              |
| 200              | 3,25E-4                              | 0,1               | 1,42E-3                              | 1,1               | 0,128                                | -0,4              |
| 300              | 9,57E-5                              | 0,1               | 6,29E-4                              | 1,1               | 0,111                                | -0,4              |
| 400              | 4,13E-5                              | 0,2               | 3,51E-4                              | 1,1               | 0,100                                | -0,4              |
| 500              | 2,19E-5                              | 0,3               | 2,23E-4                              | 1,1               | 0,0926                               | -0,4              |
| 600              | 1,32E-5                              | 0,4               | 1,54E-4                              | 1,1               | 0,0872                               | -0,4              |
| 800              | 6,10E-6                              | 0,5               | 8,60E-5                              | 1,1               | 0,0798                               | -0,4              |
| 1000             | 3,43E-6                              | 0,6               | 5,49E-5                              | 1,2               | 0,0751                               | -0,4              |

$$^a \text{Comparação percentual} = \frac{(\mu/\rho)_{\text{equivalente}} - (\mu/\rho)_{\text{Snyder-Fisher}}}{(\mu/\rho)_{\text{Snyder-Fisher}}} \times 100$$

<sup>b</sup>Referência (44)

TABELA IV.5 - COMPARAÇÃO ENTRE OS VOLUMES DAS SUB-REGIÕES DOS FANTASMAS FÍSICO E MATEMÁTICO.

| Região                        | Fantasma físico<br>(cm <sup>3</sup> ) | Fantasma matemático<br>(cm <sup>3</sup> ) | Diferença percentual |
|-------------------------------|---------------------------------------|---|----------------------|
| Cabeça                        | 5 155                                 | 4 655                                     | +10,7                |
| Tronco                        | 48 830                                | 43 982                                    | +11,0                |
| Pernas                        | 14 090                                | 20 776                                    | -32,2                |
| Região genital<br>(masculina) | 152                                   | 196                                       | -22,4                |
| Ossos da cabeça               | 880                                   | 847                                       | + 3,9                |
| Coluna vertebral              | 912                                   | 888                                       | + 2,7                |
| Costelas                      | 669                                   | 694                                       | - 2,6                |
| Ossos dos braços              | 895                                   | 956                                       | - 6,4                |
| Pelvis                        | 617                                   | 606                                       | + 1,8                |
| Pernas                        | 2 515                                 | 2 799                                     | -10,1                |
| Pulmões                       | 3 163                                 | 3 378                                     | - 6,4                |
| Tecido mole                   | 58 424                                | 59 441                                    | - 1,7                |
| Esqueleto                     | 6 488                                 | 6 790                                     | - 4,4                |
| Massa total                   | 68,1 kg                               | 70,6 kg                                   | - 3,5                |

relação à temperatura ambiente é de 0,3% por grau Celsius diferente de 22°C. Na escala mais sensível, a variação na corrente de entrada é menor que 2 dígitos, isto é,  $\pm 0,02$  mR/s e a variação do zero do aparelho é menor que 5 dígitos por hora, ou seja,  $\pm 0,05$  mR/s.

A câmara de ionização usada foi a modelo 550-0.1. Esta câmara é calibrada com uma incerteza de  $\pm 2\%$  na faixa de energia de 21 a 1250 KeV.

### 3.2 - Dosímetros termoluminescentes e equipamento de leitura

Para as medidas das doses absorvidas na posição dos órgãos do corpo foram usados dosímetros termoluminescentes de LiF:Mg e CaF<sub>2</sub>:Mn da Harshaw (em forma de cristais). Esses dosímetros foram calibrados previamente por Chen.<sup>(8)</sup> O aparelho leitor consistiu de um equipamento Victoreen modelo 2800 TLD Reader, que possui um ciclo de recozimento para o material LiF. Esse recozimento é efetuado automaticamente logo após a leitura do dosímetro.

O LiF é inicialmente aquecido a 120°C durante 17 segundos. Em seguida a temperatura é aumentada para 255°C durante 24 segundos a uma taxa de 10°C por segundo. A leitura é então fornecida em forma de dígitos. Quanto ao recozimento, a temperatura de 340°C é então atingida e o LiF é recozido durante 37 segundos.

O tratamento inicial a 120°C elimina os picos de baixa temperatura da curva de emissão termoluminescente e o recozimento a 340°C reajusta a sensibilidade e estabilidade do dosímetro por um período de uma semana. Se passar um tempo mais longo após a última leitura, então é aconselhável que o dosímetro seja lido novamente antes da próxima exposição à radiação.

Para o  $\text{CaF}_2:\text{Mn}$  o recozimento não é tão importante como para o  $\text{LiF}:\text{Mg}$  por ser sua estrutura de nível metaestável diferente da estrutura do  $\text{LiF}:\text{Mg}$ . Além disso, o tempo de recozimento depende da exposição prévia que o dosímetro recebeu. Contudo, no intervalo normal de exposição em dosimetria pessoal, 400°C por 5 minutos é suficiente para recondicionar o dosímetro.

### 3.2.1 - Comparação da dosimetria termoluminescente com outros tipos de dosimetria.

A dosimetria termoluminescente (TL) tem diversas vantagens sobre os outros sistemas de dosimetria tais como filmes, câmaras de ionização, radiofotoluminescência e outros. O pequeno tamanho do dosímetro, além de ser bastante conveniente em dosimetria pessoal, faz com que ele seja muito útil em dosimetria de implante uma vez que ele não muda significativamente a distribuição espacial de energia espalhada no local do dosímetro e em suas vizinhanças. Por outro lado, a

linearidade da resposta com a exposição, no intervalo de interesse da dosimetria pessoal rotineira, a pequena dependência com a energia para alguns materiais como o fluoreto de lítio, a estabilidade, a longo prazo, da energia armazenada (o LiF tem um desvanecimento de ~5% por trimestre), a sensibilidade e baixo custo constituem características de um bom material dosimétrico. Além disso, como cada material TL tem em geral diferente resposta com a energia, a energia efetiva do campo de radiação pode ser determinada usando a razão das respostas de dois ou mais dosímetros, técnica essa usada neste trabalho.

#### 4. Irradiação do fantasma

##### 4.1 - Procedimento

Antes de começar a irradiação do fantasma foi feito um levantamento bibliográfico para determinar os parâmetros (quilovoltagem, distância foco-pele, tamanho e posição do campo de radiação, etc.) que são comumente usados em exames diagnósticos com raios-X.

Os exames simulados (irradiações) foram feitos com o fantasma em sua posição erecta (de pé). Os exames escolhidos para este estudo foram (1) tórax PA (posterior-anterior) e (2) abdominal AP (anterior-posterior). Esta escolha foi feita pelo fato da frequência com que o exame de tórax é fei

to e pela importância do exame abdominal para a dose genética. Os órgãos selecionados para as medidas e os cálculos das doses absorvidas em ambas as irradiações foram os ovários, os testículos e o útero. <sup>(\*)</sup> Uma outra razão de serem escolhidos esses órgãos foi por serem de pequeno tamanho, o que vem facilitar as medidas da dose média por eles absorvida. Por outro lado, nos cálculos teóricos a estatística será mais pobre pelo fato de ocorrer nesses órgãos um número menor de interações da radiação.

A irradiação dos órgãos genitais, como consequência dos exames acima citados tiveram dois objetivos: (1) obter valores experimentais da dose absorvida para fins de comparação com os cálculos teóricos, e (2) fornecer dados da dose absorvida nesses órgãos para cada um dos exames acima mencionados. Para este estudo foi feita, inicialmente, a montagem do esqueleto e dos pulmões no interior da estrutura de lucite que define a forma externa do corpo do fantasma. Em seguida, o fantasma foi preenchido com o líquido equivalente ao tecido mole, sendo que o esqueleto e os pulmões já continham os respectivos materiais equivalentes aos seus tecidos.

Os procedimentos para as irradiações experimentais foram os seguintes: Inicialmente foi escolhida uma dose de 200 mrad por ser relativamente baixa porém não tão baixa a ponto de ser mascarada pela radiação ambiente. Além disso essa dose permite um maior número de irradiações sem alterar a sensibilidade do dosímetro.

---

(\*) A tireóide e a 5a. vértebra lumbar foram também incluídas no caso da irradiação do tórax.

O tempo de irradiação para atingir essa dose de 200 mrad, com a corrente de tubo desejada, foi então calculado baseado na taxa de exposição na posição dos órgãos de interesse dada por Stansbury.<sup>(44)</sup> Quando a localização do órgão era fora do feixe de raios-X, o órgão recebia somente radiação espalhada e portanto foi necessário um tempo mais longo para que ele recebesse a dose aproximada de 200 mrad.

Tendo o tempo de irradiação para cada órgão e para cada tipo de exame, as irradiações foram então feitas de acordo com os seguintes procedimentos:

O fantasma foi posicionado na distância foco-pele especificada para cada tipo de exame, o tamanho do campo foi ajustado e o seu centro localizado na posição adequada de acordo com a tabela IV.6.

TABELA IV.6 - PARÂMETROS USADOS NAS IRRADIAÇÕES

|                                      | Exame de tórax (PA) | Exame abdominal (AP) |
|--------------------------------------|---------------------|----------------------|
| Voltagem (KV)                        | 100                 | 100                  |
| Distância foco-pele (cm)             | 163                 | 100                  |
| Distância foco-filme (cm)            | 183                 | 120                  |
| Tamanho do campo na posição do filme | 36x44               | 36x44                |
| Coordenadas do centro do campo (x;z) | (0;51,6)            | (0;22)               |
| Corrente de tubo (mA)                | 10                  | 2                    |

O equipamento foi então ajustado para 75KV e 5mA e ligado por 5 minutos para permitir o aquecimento do sistema todo. Em seguida, a alta tensão foi mudada para 100 KV e foi feita uma irradiação no ar, sem o fantasma, usando, para medida da exposição, a câmara Victoreen mencionada anteriormente, e posicionada na mesma distância foco-pele especificada na tabela IV.6. Essa medida foi feita diversas vezes a fim de se obter a taxa de exposição média de entrada na pele do fantasma. Essa taxa foi usada nos cálculos da razão entre a dose absorvida nos órgãos e a exposição de entrada na pele, e que serão mostrados mais adiante. O procedimento acima foi feito para cada tipo de exame citado anteriormente.

Outro conjunto de irradiações foi feito nas mesmas condições anteriores, porém desta vez usando o fantasma. Essas irradiações tiveram a finalidade de se determinar a taxa de exposição média no mesmo local das exposições anteriores, isto é, na mesma distância foco-pele. A medida foi diferente do caso anterior (sem o fantasma), porque ela inclui a radiação retroespalhada possibilitando a determinação do fator de retroespalhamento. Para a irradiação do tórax, esse fator resultou em 1,3498 e para a irradiação do abdômen obteve-se 1,4829.

Seis dosímetros TL (três LiF:Mg e três CaF<sub>2</sub>:Mn) foram então colocados num pequeno porta-dosímetro de plástico e este selado num saquinho de polietileno especialmente cons

truido para esse fim. Este arranjo foi necessário para evitar o contacto dos dosímetros com os líquidos no interior do fantasma. Em seguida cada saquinho foi inserido na sua respectiva posição (previamente estabelecida) no interior do fantasma. Estas posições foram determinadas usando-se as coordenadas dos órgãos internos do fantasma. A seguir foram feitas as irradiações durante o tempo necessário para cada caso.

Depois da irradiação os dosímetros foram removidos do fantasma e guardados por 24 horas numa blindagem de chumbo para protegê-los da radiação ambiental. Esse tempo de depósito (24 horas) foi previamente estabelecido usando-se a figura IV.4, e tem a finalidade de evitar que fatores de correção para corrigir o desvanescimento do  $\text{CaF}_2:\text{Mn}$  fosse aplicado. Quanto ao  $\text{LiF}:\text{Mg}$ , sua estabilidade é muito boa, isto é, desvanesce apenas 5% em três meses o que indica que não há necessidade de correção para o efeito em questão. As figuras IV.5 e IV.6<sup>(8)</sup> mostram a variação da emissão TL com o tempo para o  $\text{CaF}_2:\text{Mn}$  e para o  $\text{LiF}:\text{Mg}$  respectivamente.

##### 5. Processamento dos dados

As leituras obtidas acima foram multiplicadas por um fator de calibração C determinado anteriormente para cada dosímetro ( $\text{LiF}$  e  $\text{CaF}_2$ ). Em seguida foi calculada a razão das leituras dos dosímetros de  $\text{CaF}_2$  para as leituras dos dosímetros de  $\text{LiF}$ , sendo, a seguir, usada a figura IV.7<sup>(8)</sup> para deter

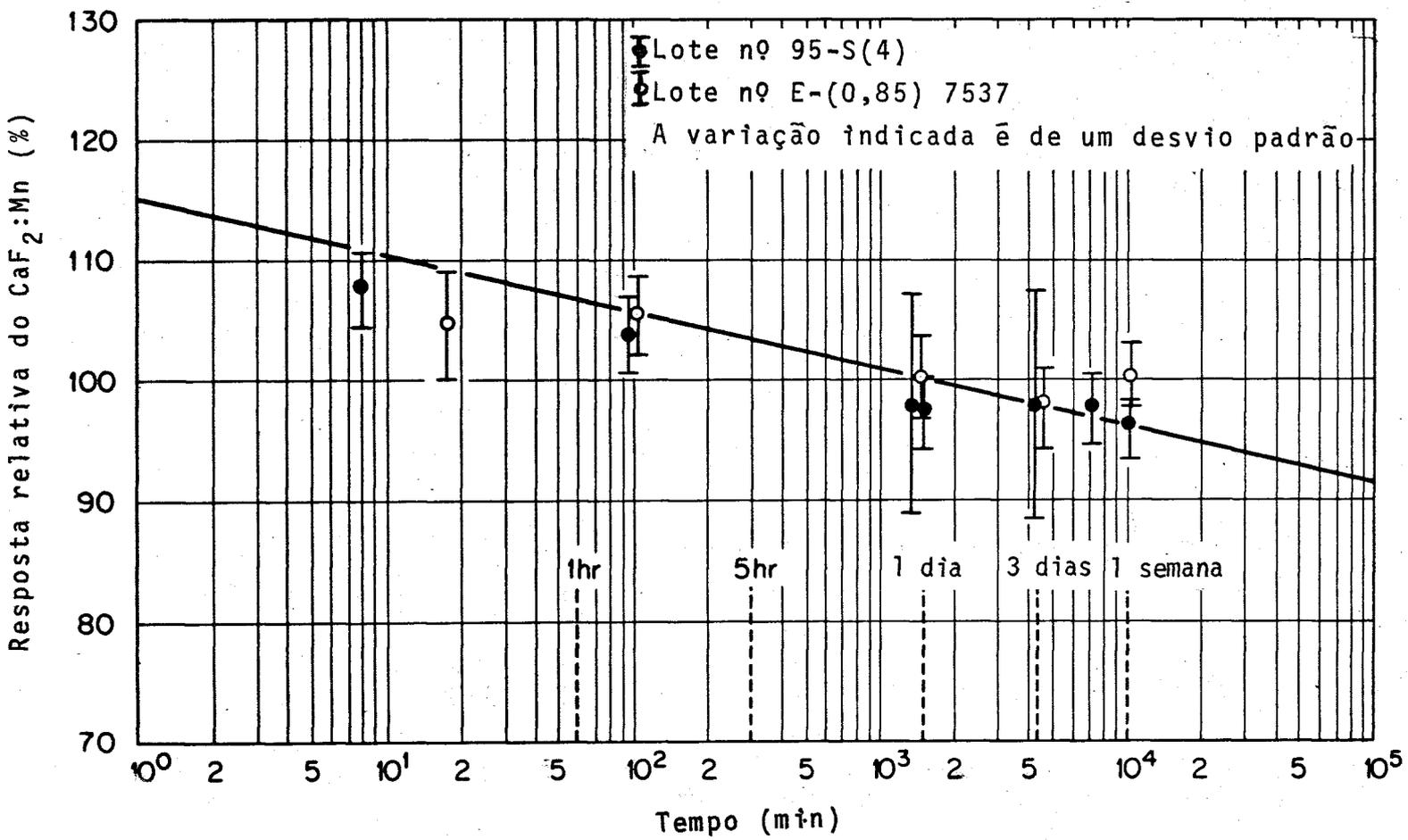


Figura IV.5 - Desvanescimento do  $\text{CaF}_a:\text{Mn}$

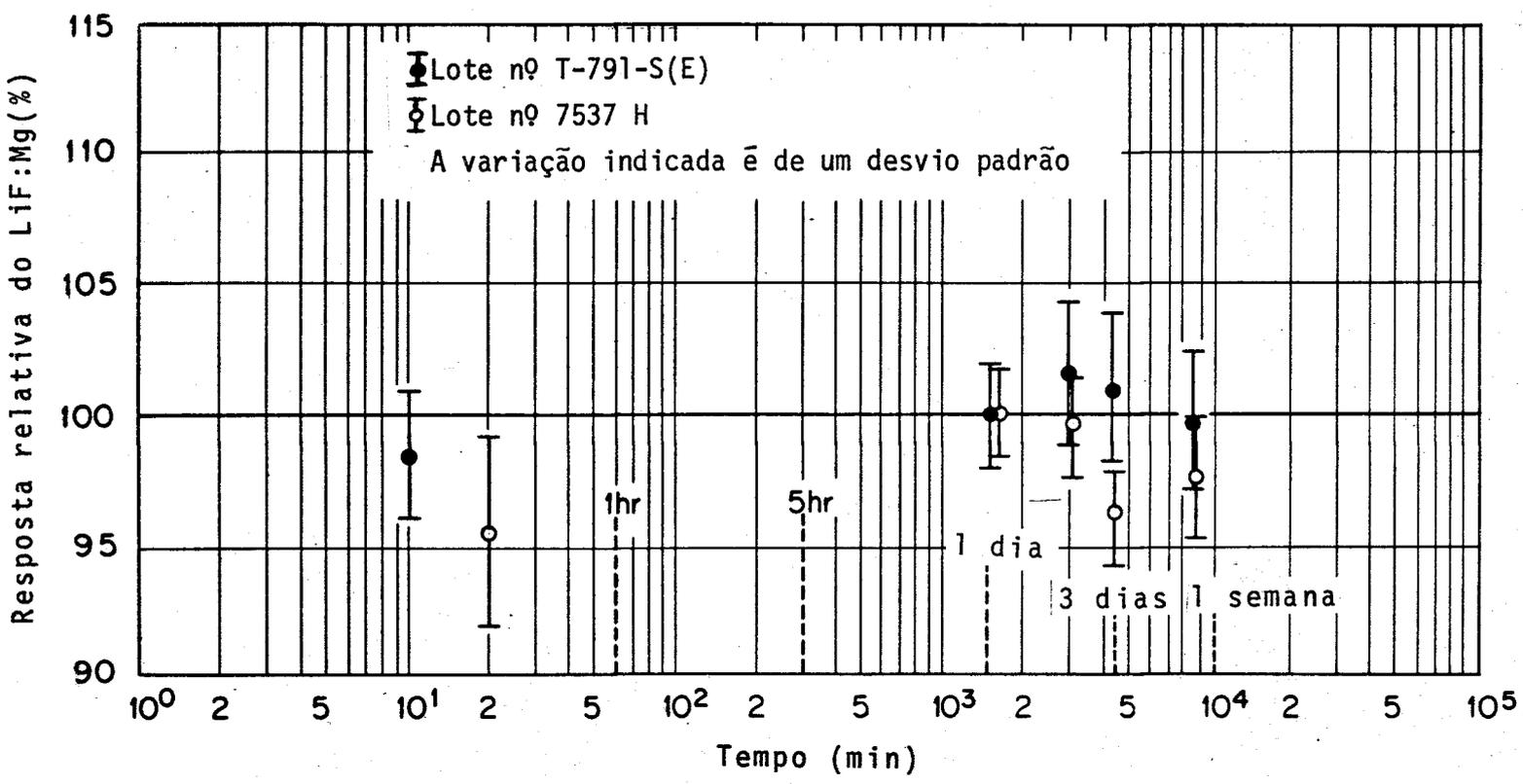


Figura IV.6 - Desvanescimento do LiF:Mg

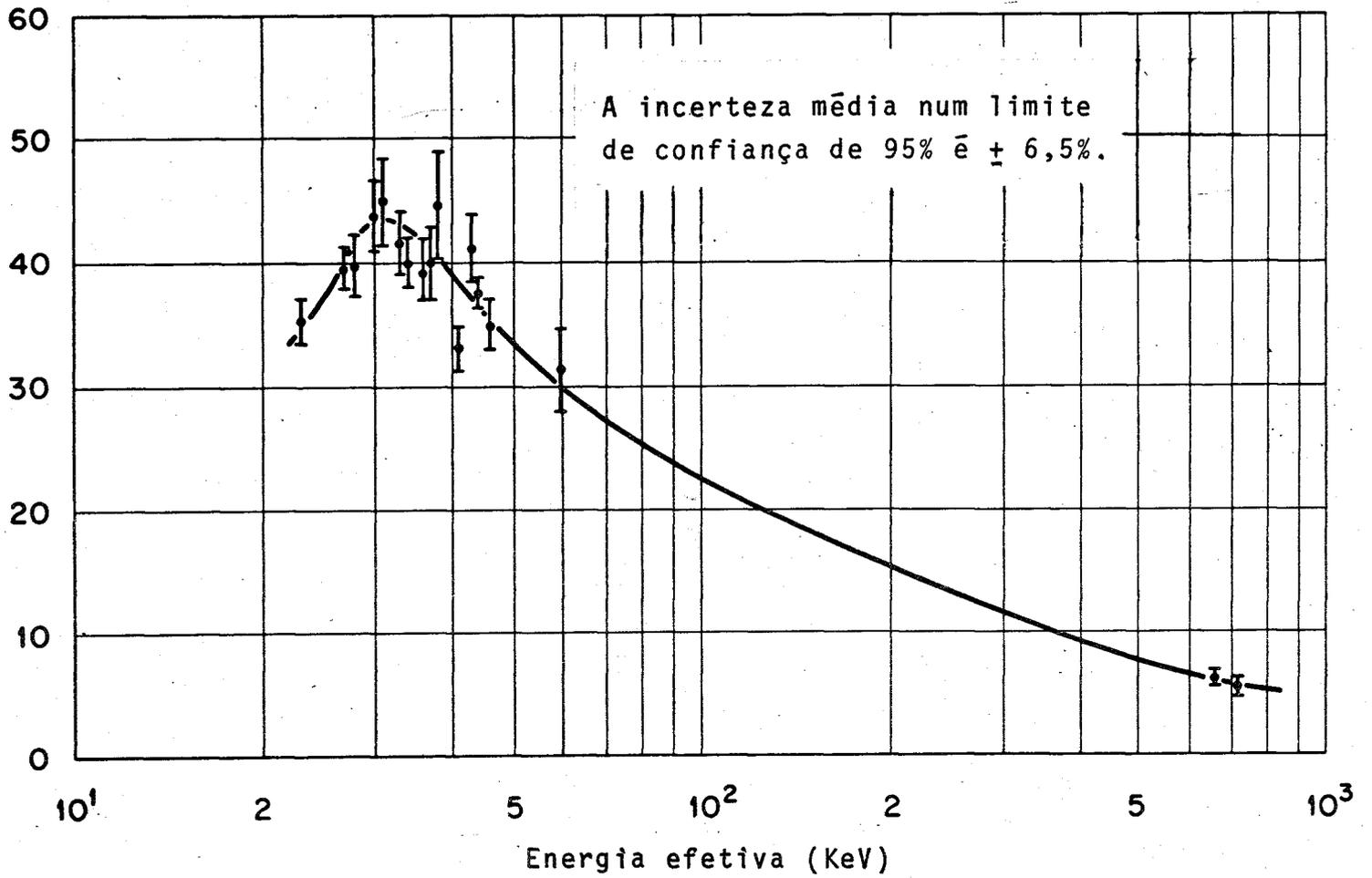


Figura IV.7 - Razão entre as respostas do  $\text{CaF}_2:\text{Mn}$  e  $\text{LiF}:\text{Mg}$  em função da energia efetiva da radiação.

minar a energia efetiva da radiação na posição do órgão. Quando se determinou essa energia efetiva verificou-se que ela decrescia com a profundidade no tecido, estando portanto de acôrdo com os resultados obtidos por Greenhouse.<sup>(19)</sup> Uma vez determinada essa energia, os fatores de correção para a energia puderam ser determinados pelas figuras IV.8 para o LiF ou IV.9<sup>(8)</sup> para o CaF<sub>2</sub>. Essas figuras mostram a resposta por Roentgen relativa ao gama do <sup>137</sup>Cs em função da energia da radiação.

Com os dados acima obtidos, a dose absorvida D, relativa à exposição, X<sub>e</sub>, de entrada na pele, discutida anteriormente, pode ser calculada para cada órgão pela seguinte expressão:

$$D/X_e = \frac{(TL) \cdot C \cdot 0,869 \cdot (\mu/\rho)_{meio} / (\mu/\rho)_{ar}}{f(E) \cdot (TL)_{1R}}$$

onde (TL) é a leitura TL dos dosímetros; C é o fator de calibração do dosímetro, 0,869  $(\mu/\rho)_{meio} / (\mu/\rho)_{ar}$  é o fator de conversão de exposição para dose absorvida (dependente da energia da radiação), f(E) é o fator de correção para a energia da radiação e (TL)<sub>1R</sub> é a leitura TL para um roentgen de gamas do <sup>137</sup>Cs.

Para os dosímetros de LiF:Mg o valor de (TL)<sub>1R</sub> foi 1461 e para os dosímetros de CaF<sub>2</sub> foi 8528. A exposição de entrada na pele, X<sub>e</sub>, foi 33,8R para o exame do tórax e 0,484R e 4,194R

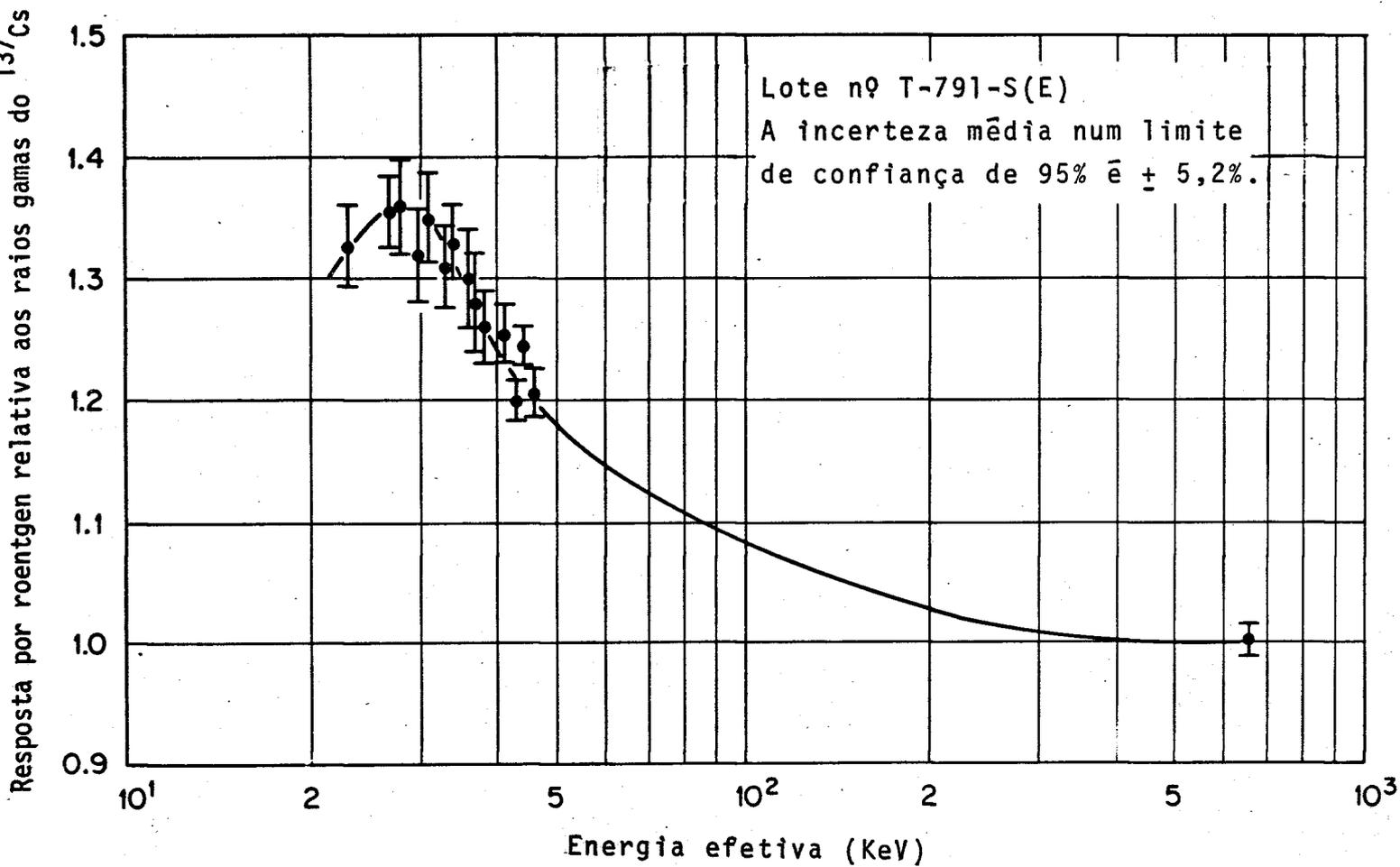


Figura IV.8 - Resposta relativa do LiF:Mg em função da energia efetiva da radiação.

Resposta por roentgen relativa aos raios gamas do <sup>137</sup>Cs

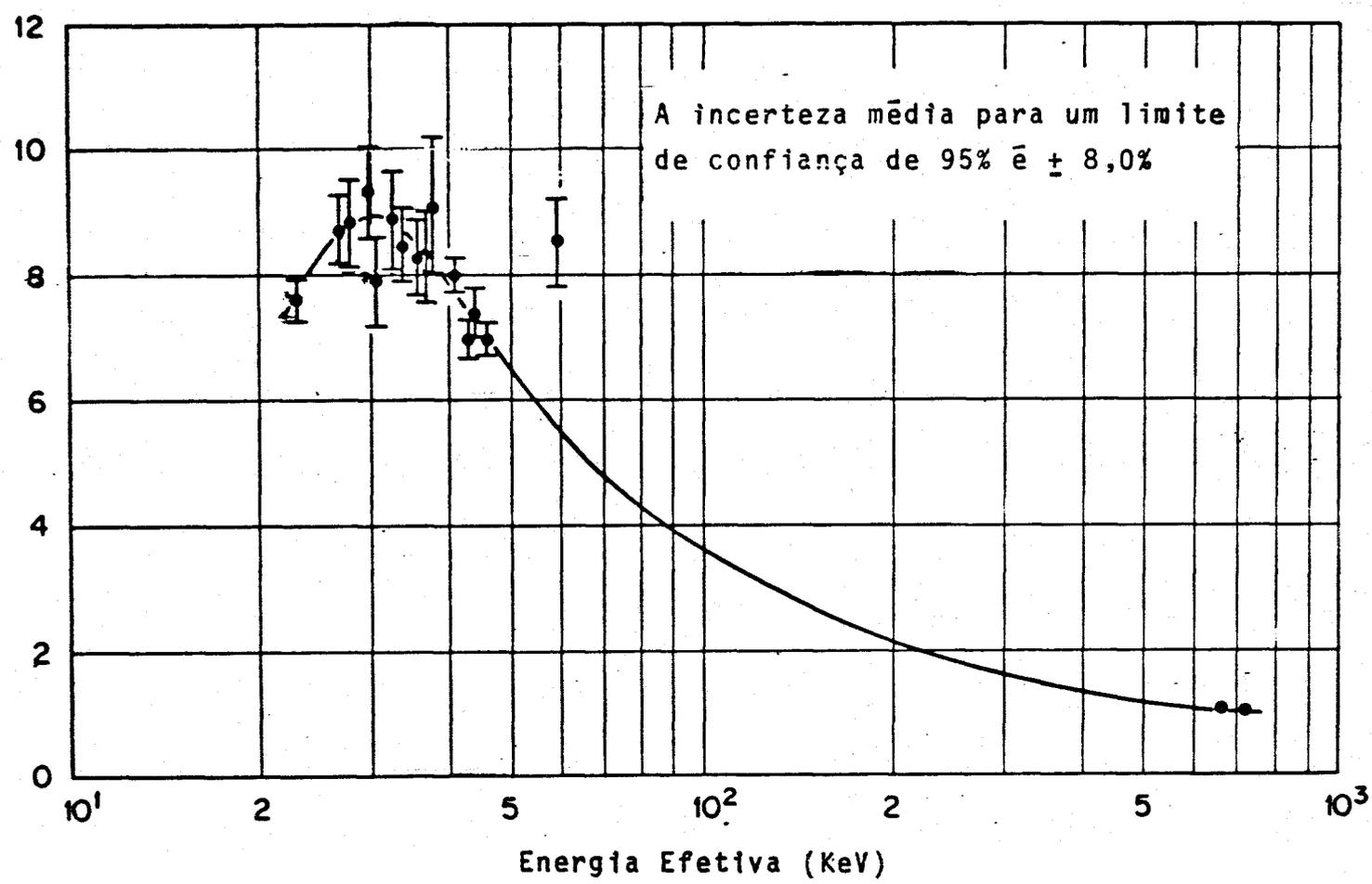


Figura .IV.9 - Resposta relativa do  $\text{CaF}_2:\text{Mn}$  em função da energia efetiva da radiação.

136  
734

para o exame abdominal. A exposição de 0,484R foi obtida ao irradiar os ovários e o útero e 4,194R ao irradiar os testículos e a 5a. vértebra lumbar, sendo que todos esses valores já foram corrigidos para a radiação retroespalhada.

## CAPÍTULO V - RESULTADOS E CONCLUSÕES

### 1. Resultados

#### 1.1 - Frações absorvidas específicas

Depois de todos os órgãos e estrutura externa do fantasma matemático terem sido projetados, suas equações foram programadas para uso num computador digital. Esse conjunto de equações formaram a sub-rotina "geometria" para uso nos cálculos das frações absorvidas específicas (FAE) pelo método de Monte Carlo. Esses cálculos forneceram valores das FAE para os órgãos principais atingidos pelos radionuclídeos após a administração de radiofármacos numa criança de 10 anos de idade.

Uma compilação dos radionuclídeos mais importantes usados em medicina nuclear pediátrica e os principais órgãos atingidos por esses radionuclídeos foi fornecida pelo "Scientific Committee 51-8, "Radiation Protection Applied to Pediatric Nuclear Medicine" do National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP)".<sup>(28)</sup> Essa compilação é dada abaixo:

#### Radionuclídeos

#### Principais órgãos atingidos

$^{51}\text{Cr}$

Rins, conteúdo da bexiga, baço, fígado, medula óssea hematopoiética e corpo todo.

- $^{111}\text{In}$  Fígado, baço, medula óssea hematopoiética e corpo todo.
- $^{67}\text{Ga}$  Fígado, baço, rins, conteúdo da bexiga, conteúdo do intestino grosso superior, conteúdo do intestino grosso inferior e corpo todo.
- $^{99\text{m}}\text{Tc}$  Rins, conteúdo da bexiga, fígado, baço, medula óssea hematopoiética, pulmões, tireóide, conteúdo do intestino grosso inferior, paredes do estômago e corpo todo.
- $^{131}\text{I}$  Tireóide, conteúdo do estômago, conteúdo do intestino delgado, rins, conteúdo da bexiga, paredes do estômago e corpo todo.
- $^{123}\text{I}$  Rins, pulmões, fígado e tireóide.

A compilação acima forneceu informações necessárias para os cálculos das frações absorvidas específicas para a criança de 10 anos de idade, podendo, com isso, atender a uma necessidade no campo da medicina nuclear.

Como mencionado anteriormente, foi usado, para os cálculos, o método de Monte Carlo para o transporte de raios gama no interior do fantasma. Para cada radionuclídeo, o espec-

tro de emissão gama foi usado como entrada e histórias de 60000 fôtons foram seguidas em cada computação.

As tabelas V.1 a V.6 mostram as frações absorvidas específicas para os órgãos alvos<sup>(\*)</sup> selecionados e para os radionuclídeos indicados acima pelo NCRP. Além disso são também apresentados os coeficientes de variação (C.V.). Quando esse coeficiente é maior que 50% ou quando não há interação de fôtons no interior do órgão, o valor da FAE não é indicado na tabela. Para cada cálculo das FAE foi suposto uma distribuição uniforme do radionuclídeo no interior do órgão fonte. Esses resultados foram comparados com os cálculos feitos usando o fantasma similar de um adulto. Esse fantasma, discutido no capítulo I, foi obtido reduzindo-se cada região do corpo do fantasma adulto (cabeça, tronco e pernas) por meio de fatores escolhidos para essa idade particular de 10 anos. Os resultados dos cálculos das frações absorvidas específicas nos órgãos desse fantasma, devido ao  $^{99m}\text{Tc}$  uniformemente distribuído no conteúdo da bexiga, na tireóide, medula óssea hematopoiética e no corpo todo, são mostrados na tabela V.7.

As razões entre as FAE nos órgãos do fantasma desenvolvido neste trabalho e do fantasma similar ao adulto (para

---

(\*) Órgão fonte é um termo usado em dosimetria interna da radiação para indicar o órgão que absorveu ou simplesmente contém radionuclídeo no seu interior; órgãos alvos são órgãos que são irradiados pelo órgão fonte. O órgão fonte pode ser ao mesmo tempo órgão alvo.

TADELA V.1 - FRAÇES ABSORVIDAS ESTEUA EOR (FAL) NOS SÍMIOS SELECCIONADOS, TANTO UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDO EM VÁRIOS ÓRGÃOS FONTES.

| Órgãos alvos                    | Ó r g ã o s F o n t e s |      |                    |     |           |      |           |      |
|---------------------------------|-------------------------|------|--------------------|-----|-----------|------|-----------|------|
|                                 | Rins                    | C.V. | Conteúdo da bexiga |     | Baço      | C.V. | Fígado    | C.V. |
| Cérebro                         | 0,104E-06               | 39   | -                  | -   | 0,265E-06 | 22   | 0,214E-06 | 25   |
| Olhos                           | -                       | -    | -                  | -   | -         | -    | -         | -    |
| Tireóide                        | -                       | -    | -                  | -   | -         | -    | -         | -    |
| Timo                            | 0,411E-05               | 34   | -                  | -   | 0,308E-05 | 30   | 0,897E-05 | 21   |
| Coração                         | 0,121E-04               | 10   | 0,638E-06          | 45  | 0,771E-05 | 12   | 0,257E-04 | 7    |
| Pulmão esquerdo                 | 0,858E-05               | 9    | 0,438E-06          | 36  | 0,128E-04 | 7    | 0,540E-05 | 11   |
| Pulmão direito                  | 0,781E-05               | 9    | 0,597E-06          | 33  | 0,391E-05 | 12   | 0,234E-04 | 6    |
| Fígado                          | 0,241E-04               | 3    | 0,178E-05          | 11  | 0,703E-05 | 5    | 0,181E-03 | 1    |
| Glândula adrenal esquerda       | 0,869E-04               | 23   | -                  | -   | 0,250E-04 | 27   | 0,171E-04 | 35   |
| Glândula adrenal direita        | 0,909E-04               | 22   | -                  | -   | -         | -    | 0,894E-04 | 22   |
| Rim esquerdo                    | 0,538E-03               | 2    | 0,399E-05          | 21  | 0,111E-03 | 4    | 0,100E-04 | 12   |
| Rim direito                     | 0,527E-03               | 2    | 0,246E-05          | 23  | 0,141E-04 | 11   | 0,422E-04 | 7    |
| Baço                            | 0,622E-04               | 6    | 0,331E-05          | 23  | 0,109E-02 | 1    | 0,692E-05 | 16   |
| Pâncreas                        | 0,971E-04               | 8    | 0,597E-05          | 29  | 0,551E-04 | 11   | 0,237E-04 | 15   |
| Paredes do estômago             | 0,301E-04               | 8    | 0,247E-05          | 23  | 0,413E-04 | 7    | 0,171E-04 | 10   |
| Paredes do I.D. (*)             | 0,144E-04               | 5    | 0,361E-04          | 3   | 0,913E-05 | 6    | 0,683E-05 | 7    |
| Paredes do I.G.S.               | 0,187E-04               | 9    | 0,210E-04          | 8   | 0,100E-04 | 11   | 0,148E-04 | 10   |
| Paredes do I.G.I.               | 0,920E-05               | 13   | 0,688E-04          | 5   | 0,105E-04 | 14   | 0,250E-05 | 22   |
| Ovário esquerdo                 | -                       | -    | 0,760E-04          | 36  | -         | -    | -         | -    |
| Ovário direito                  | -                       | -    | -                  | -   | -         | -    | -         | -    |
| Testículo esquerdo              | -                       | -    | -                  | -   | -         | -    | -         | -    |
| Testículo direito               | -                       | -    | -                  | -   | -         | -    | -         | -    |
| Útero                           | -                       | -    | 0,143E-03          | 14  | -         | -    | -         | -    |
| Parêdes da bexiga               | 0,372E-05               | 38   | 0,594E-03          | 4   | 0,243E-05 | 48   | 0,359E-05 | 47   |
| Pele do corpo                   | 0,343E-05               | 5    | 0,351E-05          | 5   | 0,471E-05 | 4    | 0,458E-05 | 4    |
| Esqueleto                       | 0,868E-05               | 2    | 0,872E-05          | 2   | 0,541E-05 | 3    | 0,463E-05 | 3    |
| Medula óssea hematopoiética     | 0,868E-05               | 2    | 0,872E-05          | 2   | 0,541E-05 | 3    | 0,463E-05 | 3    |
| Medula óssea não hematopoiética | 0,868E-05               | 2    | 0,872E-05          | 2   | 0,541E-05 | 3    | 0,463E-05 | 3    |
| Restante dos tecidos            | 0,104E-04               | 1    | 0,111E-04          | 1   | 0,994E-05 | 1    | 0,716E-05 | 1    |
| Corpo todo                      | 0,130E-04               | 0,8  | 0,131E-04          | 0,8 | 0,116E-04 | 0,8  | 0,115E-04 | 0,8  |

(\*) Nesta e nas demais tabelas, I.D., I.G.S. e I.G.I., significam intestino delgado, intestino grosso superior e intestino grosso inferior, respectivamente.

| Órgãos alvos                    | Órgãos Fontes               |      |            |      | Total     |
|---------------------------------|-----------------------------|------|------------|------|-----------|
|                                 | Medula óssea hematopoietica | C.V. | Corpo todo | C.V. |           |
| Cérebro                         | 0,508E-05                   | 6    | 0,916E-05  | 4    | 0,148E-04 |
| Olhos                           | 0,678E-05                   | 38   | 0,782E-05  | 35   | 0,146E-04 |
| Tireóide                        | 0,543E-05                   | 46   | 0,746E-05  | 32   | 0,129E-04 |
| Timo                            | 0,357E-05                   | 33   | 0,975E-05  | 22   | 0,295E-04 |
| Coração                         | 0,344E-05                   | 19   | 0,127E-04  | 10   | 0,625E-04 |
| Pulmão esquerdo                 | 0,749E-05                   | 10   | 0,104E-04  | 8    | 0,452E-04 |
| Pulmão direito                  | 0,762E-05                   | 10   | 0,104E-04  | 8    | 0,537E-04 |
| Fígado                          | 0,469E-05                   | 7    | 0,121E-04  | 4    | 0,231E-03 |
| Glândula adrenal esquerda       | -                           | -    | -          | -    | 0,129E-03 |
| Glândula adrenal direita        | -                           | -    | 0,186E-04  | 48   | 0,199E-03 |
| Rim esquerdo                    | 0,100E-04                   | 14   | 0,120E-04  | 12   | 0,686E-04 |
| Rim direito                     | 0,101E-04                   | 14   | 0,114E-04  | 13   | 0,607E-04 |
| Baço                            | 0,630E-05                   | 19   | 0,104E-04  | 14   | 0,118E-02 |
| Pâncreas                        | 0,646E-05                   | 24   | 0,705E-05  | 26   | 0,195E-03 |
| Parêdes do estômago             | 0,365E-05                   | 19   | 0,116E-04  | 13   | 0,106E-03 |
| Parêdes do I.D.                 | 0,833E-05                   | 7    | 0,136E-04  | 5    | 0,885E-04 |
| Parêdes do I.G.S.               | 0,831E-05                   | 13   | 0,121E-04  | 11   | 0,851E-04 |
| Parêdes do I.G.I.               | 0,120E-04                   | 12   | 0,149E-04  | 12   | 0,118E-03 |
| Ovário esquerdo                 | -                           | -    | -          | -    | 0,760E-04 |
| Ovário direito                  | -                           | -    | 0,430E-05  | 33   | 0,430E-05 |
| Testículo esquerdo              | -                           | -    | -          | -    | -         |
| Testículo direito               | -                           | -    | -          | -    | -         |
| Útero                           | 0,144E-04                   | 39   | 0,102E-04  | 40   | 0,168E-03 |
| Parêdes da bexiga               | 0,150E-04                   | 21   | 0,121E-04  | 24   | 0,631E-03 |
| Pele do corpo                   | 0,468E-05                   | 4    | 0,668E-05  | 3    | 0,276E-04 |
| Esqueleto                       | 0,261E-04                   | 1    | 0,984E-05  | 2    | 0,634E-04 |
| Medula óssea hematopoietica     | 0,261E-04                   | 1    | 0,984E-05  | 2    | 0,634E-04 |
| Medula óssea não hematopoietica | 0,261E-04                   | 1    | 0,984E-05  | 2    | 0,634E-04 |
| Restante dos tecidos            | 0,745E-05                   | 1    | 0,938E-05  | 1    | 0,556E-04 |
| Corpo todo                      | 0,981E-05                   | 0,9  | 0,951E-05  | 0,9  | 0,687E-04 |

TABELA V.2 - FRAÇÕES ABSORVIDAS ESPECÍFICAS (FAE) NOS ÓRGÃOS SELECIONADOS, FAZENDO ...  
UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDO EM VÁRIOS ÓRGÃOS FONTES.

| Órgãos alvos                    | Órgãos Fontes |      |           |      |                                     |            |           |     | Total     |
|---------------------------------|---------------|------|-----------|------|-------------------------------------|------------|-----------|-----|-----------|
|                                 | Fígado        | C.V. | Baço      | C.V. | Medula óssea<br>hematopoiética C.V. | Corpo todo | C.V.      |     |           |
| Cérebro                         | 0,919E-06     | 17   | 0,169E-06 | 20   | 0,474E-05                           | 4          | 0,900E-05 | 3   | 0,148E-04 |
| Olhos                           | -             | -    | -         | -    | 0,725E-05                           | 26         | 0,623E-05 | 25  | 0,134E-04 |
| Tireóide                        | -             | -    | -         | -    | 0,721E-05                           | 27         | 0,955E-05 | 27  | 0,167E-04 |
| Timo                            | 0,933E-05     | 13   | 0,471E-05 | 20   | 0,604E-05                           | 17         | 0,912E-05 | 14  | 0,292E-04 |
| Coração                         | 0,279E-04     | 4    | 0,946E-05 | 7    | 0,497E-05                           | 10         | 0,134E-04 | 6   | 0,559E-04 |
| Pulmão esquerdo                 | 0,565E-05     | 8    | 0,102E-04 | 6    | 0,840E-05                           | 6          | 0,973E-05 | 5   | 0,340E-04 |
| Pulmão direito                  | 0,228E-04     | 4    | 0,203E-05 | 11   | 0,823E-05                           | 6          | 0,991E-05 | 6   | 0,430E-04 |
| Fígado                          | 0,174E-03     | 0,7  | 0,674E-05 | 4    | 0,505E-05                           | 4          | 0,119E-04 | 3   | 0,198E-03 |
| Glândula adrenal esquerda       | 0,155E-04     | 22   | 0,596E-04 | 14   | 0,110E-04                           | 39         | 0,152E-04 | 36  | 0,101E-03 |
| Glândula adrenal direita        | 0,779E-04     | 14   | 0,907E-05 | 34   | 0,700E-05                           | 43         | 0,893E-05 | 26  | 0,102E-03 |
| Rim esquerdo                    | 0,115E-04     | 8    | 0,134E-03 | 2    | 0,108E-04                           | 9          | 0,132E-04 | 8   | 0,169E-03 |
| Rim direito                     | 0,414E-04     | 4    | 0,118E-04 | 8    | 0,103E-04                           | 9          | 0,131E-04 | 8   | 0,768E-04 |
| Baço                            | 0,714E-05     | 10   | 0,935E-03 | 0,9  | 0,733E-05                           | 10         | 0,102E-04 | 8   | 0,960E-03 |
| Pâncreas                        | 0,244E-04     | 10   | 0,517E-04 | 6    | 0,823E-05                           | 15         | 0,142E-04 | 12  | 0,987E-04 |
| Paredes do estômago             | 0,163E-04     | 6    | 0,415E-04 | 4    | 0,392E-05                           | 13         | 0,132E-04 | 8   | 0,750E-04 |
| Paredes do I.D.                 | 0,692E-05     | 5    | 0,953E-05 | 4    | 0,975E-05                           | 4          | 0,136E-04 | 3   | 0,398E-04 |
| Paredes do I.G.S.               | 0,149E-04     | 6    | 0,106E-04 | 7    | 0,735E-05                           | 9          | 0,127E-04 | 7   | 0,457E-04 |
| Paredes do I.G.I.               | 0,178E-05     | 15   | 0,106E-04 | 8    | 0,141E-04                           | 8          | 0,123E-04 | 8   | 0,389E-04 |
| Ovário esquerdo                 | -             | -    | -         | -    | 0,235E-04                           | 41         | -         | -   | 0,235E-04 |
| Ovário direito                  | -             | -    | -         | -    | 0,391E-04                           | 38         | 0,163E-04 | 40  | 0,554E-04 |
| Testículo esquerdo              | -             | -    | -         | -    | -                                   | -          | -         | -   | -         |
| Testículo direito               | -             | -    | -         | -    | -                                   | -          | -         | -   | -         |
| Útero                           | -             | -    | 0,482E-05 | 36   | 0,709E-05                           | 26         | 0,148E-04 | 29  | 0,267E-04 |
| Paredes da bexiga               | 0,332E-05     | 33   | 0,328E-05 | 30   | 0,140E-04                           | 14         | 0,114E-04 | 15  | 0,321E-04 |
| Pele do corpo                   | 0,426E-05     | 3    | 0,468E-05 | 3    | 0,489E-05                           | 3          | 0,606E-05 | 2   | 0,199E-04 |
| Esqueleto                       | 0,574E-05     | 2    | 0,639E-05 | 2    | 0,280E-04                           | 0,7        | 0,114E-04 | 1   | 0,515E-04 |
| Med. óssea hematopoiética       | 0,574E-05     | 2    | 0,638E-05 | 2    | 0,280E-04                           | 0,7        | 0,114E-04 | 1   | 0,516E-04 |
| Medula óssea não hematopoiética | 0,574E-05     | 2    | 0,638E-05 | 2    | 0,280E-04                           | 0,7        | 0,114E-04 | 1   | 0,516E-04 |
| Restante dos tecidos            | 0,752E-05     | 0,7  | 0,104E-04 | 0,6  | 0,752E-05                           | 0,7        | 0,913E-05 | 0,6 | 0,346E-04 |
| Corpo todo                      | 0,117E-04     | 0,5  | 0,117E-04 | 0,5  | 0,101E-04                           | 0,5        | 0,954E-05 | 0,5 | 0,432E-04 |

Observação: Vide rodapé na tabela V.1.

TABELA V.3 - FRAÇÕES ABSORVIDAS ESPECÍFICAS (FAE) NOS ÓRGÃOS SELECIONADOS, PARA O <sup>222</sup>Rn  
UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDO EM VÁRIOS ÓRGÃOS FONTES.

| Órgãos Alvos                    | Órgãos Fontes |      |           |      |           |      |           |      |
|---------------------------------|---------------|------|-----------|------|-----------|------|-----------|------|
|                                 | Fígado        | C.V. | Baço      | C.V. | Rins      | C.V. | Bexiga    | C.V. |
| Cérebro                         | 0,153E-06     | 23   | 0,132E-06 | 22   | 0,123E-06 | 30   | -         |      |
| Olhos                           | -             |      | -         |      | -         |      | -         |      |
| Tireóide                        | -             |      | -         |      | -         |      | -         |      |
| Timo                            | 0,715E-05     | 17   | 0,359E-05 | 25   | 0,285E-05 | 21   | -         |      |
| Coração                         | 0,284E-04     | 5    | 0,100E-04 | 9    | 0,120E-04 | 10   | 0,773E-06 | 35   |
| Pulmão esquerdo                 | 0,677E-05     | 8    | 0,134E-04 | 7    | 0,782E-05 | 6    | 0,166E-06 | 29   |
| Pulmão direito                  | 0,236E-04     | 4    | 0,341E-05 | 10   | 0,769E-05 | 7    | 0,257E-06 | 28   |
| Fígado                          | 0,174E-03     | 0,8  | 0,729E-05 | 4    | 0,252E-04 | 2    | 0,156E-05 | 9    |
| Glândula adrenal esquerda       | 0,208E-04     | 27   | 0,568E-04 | 20   | 0,950E-04 | 18   | -         |      |
| Glândula adrenal direita        | 0,774E-04     | 18   | 0,161E-04 | 33   | 0,956E-04 | 17   | -         |      |
| Rim esquerdo                    | 0,117E-04     | 9    | 0,120E-03 | 3    | 0,502E-03 | 1    | 0,350E-05 | 16   |
| Rim direito                     | 0,413E-04     | 6    | 0,101E-04 | 9    | 0,499E-03 | 1    | 0,282E-05 | 21   |
| Baço                            | 0,766E-05     | 11   | 0,100E-02 | 1    | 0,664E-04 | 5    | 0,220E-05 | 24   |
| Pâncreas                        | 0,229E-04     | 11   | 0,609E-04 | 9    | 0,105E-03 | 6    | 0,464E-05 | 21   |
| Paredes do estômago             | 0,195E-04     | 9    | 0,382E-04 | 5    | 0,292E-04 | 6    | 0,243E-05 | 19   |
| Paredes do I.D.                 | 0,648E-05     | 5    | 0,101E-04 | 4    | 0,161E-04 | 4    | 0,385E-04 | 2    |
| Paredes do I.G.S.               | 0,166E-04     | 9    | 0,123E-04 | 11   | 0,147E-04 | 7    | 0,192E-04 | 6    |
| Paredes do I.G.I.               | 0,272E-05     | 15   | 0,959E-05 | 11   | 0,891E-05 | 10   | 0,763E-04 | 4    |
| Ovário esquerdo                 | -             |      | -         |      | 0,242E-04 | 45   | 0,735E-04 | 23   |
| Ovário direito                  | -             |      | -         |      | -         |      | 0,299E-04 | 23   |
| Testículo esquerdo              | -             |      | -         |      | -         |      | -         |      |
| Testículo direito               | -             |      | -         |      | -         |      | 0,251E-04 | 48   |
| Útero                           | -             |      | -         |      | -         |      | 0,245E-03 | 11   |
| Paredes da bexiga               | 0,132E-05     | 32   | 0,238E-05 | 36   | 0,364E-05 | 26   | 0,611E-03 | 3    |
| Pele do corpo                   | 0,443E-05     | 3    | 0,463E-05 | 3    | 0,355E-05 | 4    | 0,334E-05 | 4    |
| Esqueleto                       | 0,572E-05     | 2    | 0,697E-05 | 2    | 0,115E-04 | 2    | 0,119E-04 | 1    |
| Medula óssea hematopoiética     | 0,571E-05     | 2    | 0,697E-05 | 2    | 0,115E-04 | 1    | 0,119E-04 | 1    |
| Medula óssea não hematopoiética | 0,571E-05     | 2    | 0,697E-05 | 2    | 0,115E-04 | 1    | 0,119E-04 | 1    |
| Restante dos tecidos            | 0,734E-05     | 0,9  | 0,100E-04 | 0,8  | 0,105E-04 | 0,8  | 0,115E-04 | 0,7  |
| Corpo todo                      | 0,116E-04     | 0,6  | 0,117E-04 | 0,6  | 0,134E-04 | 0,6  | 0,138E-04 | 0,6  |

<sup>67</sup>Ga UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDO EM VÁRIOS ÓRGÃOS FONTES.

Ó r g ã o s F o n t e s

| Órgãos alvos                    | Órgãos             |      | Fontes             |      | Corpo todo | C.V. | Total     |
|---------------------------------|--------------------|------|--------------------|------|------------|------|-----------|
|                                 | Conteúdo do I.G.S. | C.V. | Conteúdo do I.G.I. | C.V. |            |      |           |
| Cérebro                         | 0,319E-07          | 46   | -                  | -    | 0,943E-05  | 3    | 0,987E-05 |
| Olhos                           | -                  | -    | -                  | -    | 0,815E-05  | 29   | 0,815E-05 |
| Tireóide                        | -                  | -    | -                  | -    | 0,161E-05  | 23   | 0,161E-05 |
| Timo                            | 0,297E-05          | 35   | -                  | -    | 0,120E-04  | 15   | 0,286E-04 |
| Coração                         | 0,299E-05          | 13   | 0,106E-05          | 21   | 0,143E-04  | 8    | 0,696E-04 |
| Pulmão esquerdo                 | 0,203E-05          | 14   | 0,762E-06          | 20   | 0,935E-05  | 6    | 0,404E-04 |
| Pulmão direito                  | 0,204E-05          | 12   | 0,470E-06          | 27   | 0,982E-05  | 7    | 0,473E-04 |
| Fígado                          | 0,138E-04          | 3    | 0,260E-05          | 7    | 0,118E-04  | 4    | 0,237E-03 |
| Glândula adrenal esquerda       | 0,159E-04          | 44   | 0,300E-05          | 42   | 0,179E-04  | 31   | 0,209E-03 |
| Glândula adrenal direita        | 0,781E-05          | 35   | -                  | -    | 0,132E-04  | 48   | 0,210E-03 |
| Rim esquerdo                    | 0,141E-04          | 8    | 0,128E-04          | 9    | 0,133E-04  | 8    | 0,678E-03 |
| Rim direito                     | 0,164E-04          | 7    | 0,560E-05          | 22   | 0,131E-04  | 9    | 0,589E-03 |
| Baço                            | 0,130E-04          | 10   | 0,928E-05          | 9    | 0,111E-04  | 10   | 0,111E-02 |
| Pâncreas                        | 0,324E-04          | 9    | 0,158E-04          | 14   | 0,141E-04  | 7    | 0,256E-03 |
| Paredes do estômago             | 0,305E-04          | 7    | 0,831E-05          | 10   | 0,103E-04  | 11   | 0,138E-03 |
| Paredes do I.D.                 | 0,627E-04          | 2    | 0,631E-04          | 2    | 0,135E-04  | 4    | 0,210E-03 |
| Paredes do I.G.S.               | 0,229E-03          | 2    | 0,246E-04          | 6    | 0,118E-04  | 9    | 0,328E-03 |
| Paredes do I.G.I.               | 0,229E-04          | 6    | 0,320E-03          | 2    | 0,112E-04  | 9    | 0,452E-03 |
| Ovário esquerdo                 | 0,119E-04          | 36   | 0,125E-03          | 16   | 0,816E-05  | 41   | 0,243E-03 |
| Ovário direito                  | 0,857E-04          | 24   | 0,497E-04          | 34   | 0,238E-04  | 43   | 0,189E-03 |
| Testículo esquerdo              | -                  | -    | -                  | -    | -          | -    | -         |
| Testículo direito               | -                  | -    | -                  | -    | -          | -    | 0,251E-04 |
| Útero                           | 0,295E-04          | 15   | 0,192E-03          | 9    | 0,200E-04  | 23   | 0,488E-03 |
| Paredes da bexiga               | 0,245E-04          | 19   | 0,990E-04          | 7    | 0,105E-04  | 16   | 0,753E-03 |
| Pele do corpo                   | 0,356E-05          | 4    | 0,321E-05          | 4    | 0,598E-05  | 3    | 0,287E-04 |
| Esqueleto                       | 0,862E-05          | 2    | 0,135E-04          | 1    | 0,117E-04  | 1    | 0,701E-04 |
| Medula óssea hematopoiética     | 0,861E-05          | 2    | 0,135E-04          | 1    | 0,117E-04  | 1    | 0,701E-04 |
| Medula óssea não hematopoiética | 0,861E-05          | 2    | 0,135E-04          | 1    | 0,117E-04  | 1    | 0,701E-04 |
| Restante dos tecidos            | 0,979E-05          | 0,8  | 0,106E-04          | 0,8  | 0,912E-05  | 0,8  | 0,690E-04 |
| Corpo todo                      | 0,126E-04          | 0,6  | 0,135E-04          | 0,6  | 0,959E-05  | 0,7  | 0,863E-04 |

## UNIFORMEMENTE DISTRIBUÍDO EM VÁRIOS ÓRGÃOS FONTES.

| Órgãos alvos                    | Órgãos Fontes |      |                    |     |      |           |      |           |      |
|---------------------------------|---------------|------|--------------------|-----|------|-----------|------|-----------|------|
|                                 | Rins          | C.V. | Conteúdo da bexiga |     | C.V. | Fígado    | C.V. | Baço      | C.V. |
| Cérebro                         | 0,672E-07     | 21   | -                  |     |      | 0,147E-06 | 17   | 0,104E-06 | 21   |
| Olhos                           | -             |      | -                  |     |      | -         |      | -         |      |
| Tireóide                        | -             |      | -                  |     |      | 0,254E-05 | 34   | 0,169E-05 | 41   |
| Timo                            | 0,381E-05     | 15   | -                  |     |      | 0,100E-04 | 10   | 0,350E-05 | 16   |
| Coração                         | 0,117E-04     | 5    | 0,477E-06          | 23  |      | 0,294E-04 | 3    | 0,996E-05 | 5    |
| Pulmão esquerdo                 | 0,787E-05     | 4    | 0,237E-06          | 23  |      | 0,646E-05 | 5    | 0,139E-04 | 3    |
| Pulmão direito                  | 0,834E-05     | 4    | 0,246E-06          | 24  |      | 0,259E-04 | 3    | 0,356E-05 | 6    |
| Fígado                          | 0,263E-04     | 1    | 0,155E-05          | 6   |      | 0,150E-03 | 0,5  | 0,740E-05 | 3    |
| Glândula adrenal esquerda       | 0,130E-03     | 9    | -                  |     |      | 0,232E-04 | 19   | 0,789E-04 | 11   |
| Glândula adrenal direita        | 0,106E-03     | 10   | -                  |     |      | 0,884E-04 | 10   | 0,182E-04 | 20   |
| Rim esquerdo                    | 0,379E-03     | 1    | 0,268E-05          | 11  |      | 0,123E-04 | 6    | 0,121E-03 | 2    |
| Rim direito                     | 0,376E-03     | 1    | 0,312E-05          | 12  |      | 0,431E-04 | 3    | 0,131E-04 | 5    |
| Baço                            | 0,681E-04     | 3    | 0,270E-05          | 13  |      | 0,599E-05 | 8    | 0,757E-03 | 0,8  |
| Pâncreas                        | 0,110E-03     | 4    | 0,574E-05          | 14  |      | 0,231E-04 | 7    | 0,613E-04 | 5    |
| Paredes do estômago             | 0,337E-04     | 3    | 0,292E-05          | 10  |      | 0,168E-04 | 5    | 0,434E-04 | 3    |
| Paredes do I.D.                 | 0,165E-04     | 2    | 0,408E-04          | 2   |      | 0,737E-05 | 4    | 0,105E-04 | 3    |
| Paredes do I.G.S.               | 0,180E-04     | 4    | 0,206E-04          | 4   |      | 0,141E-04 | 5    | 0,114E-04 | 5    |
| Paredes do I.G.I.               | 0,833E-05     | 7    | 0,782E-04          | 2   |      | 0,278E-05 | 10   | 0,102E-04 | 6    |
| Ovário esquerdo                 | 0,927E-05     | 48   | 0,621E-04          | 18  |      | -         |      | 0,117E-04 | 42   |
| Ovário direito                  | 0,118E-04     | 32   | 0,537E-04          | 19  |      | -         |      | -         |      |
| Testículo esquerdo              | -             |      | 0,291E-04          | 33  |      | -         |      | -         |      |
| Testículo direito               | -             |      | 0,365E-04          | 32  |      | -         |      | -         |      |
| Útero                           | 0,494E-05     | 28   | 0,204E-03          | 6   |      | -         |      | 0,535E-05 | 31   |
| Paredes da bexiga               | 0,235E-05     | 20   | 0,590E-03          | 2   |      | 0,224E-05 | 26   | 0,234E-05 | 20   |
| Pele do corpo                   | 0,340E-05     | 2    | 0,307E-05          | 2   |      | 0,425E-05 | 2    | 0,422E-05 | 2    |
| Esqueleto                       | 0,129E-04     | 1    | 0,137E-04          | 0,9 |      | 0,670E-05 | 1    | 0,762E-05 | 1    |
| Medula óssea hematopoiética     | 0,129E-04     | 1    | 0,137E-04          | 0,9 |      | 0,670E-05 | 1    | 0,761E-05 | 1    |
| Medula óssea não hematopoiética | 0,129E-04     | 1    | 0,137E-04          | 0,9 |      | 0,670E-05 | 1    | 0,761E-05 | 1    |
| Restante dos tecidos            | 0,109E-04     | 4    | 0,118E-04          | 0,4 |      | 0,751E-05 | 0,6  | 0,101E-04 | 0,5  |
| Corpo todo                      | 0,132E-04     | 0,3  | 0,135E-04          | 0,3 |      | 0,112E-04 | 0,4  | 0,113E-04 | 0,4  |

| Órgãos alvos                    | Órgãos Fontes               |      |           |      |           |      |                    |      |
|---------------------------------|-----------------------------|------|-----------|------|-----------|------|--------------------|------|
|                                 | Medula óssea hematopoiética | C.V. | Pulmões   | C.V. | Tireóide  | C.V. | Conteúdo do I.G.S. | C.V. |
| Cérebro                         | 0,461E-05                   | 3    | 0,773E-06 | 7    | 0,538E-05 | 3    | 0,134E-07          | 40   |
| Olhos                           | 0,723E-05                   | 18   | -         | -    | 0,614E-05 | 19   | -                  | -    |
| Tireóide                        | 0,111E-04                   | 21   | 0,762E-05 | 21   | 0,294E-02 | 1    | -                  | -    |
| Timo                            | 0,557E-05                   | 14   | 0,321E-04 | 6    | 0,231E-04 | 7    | 0,149E-05          | 27   |
| Coração                         | 0,553E-05                   | 8    | 0,351E-04 | 3    | 0,473E-05 | 8    | 0,366E-05          | 9    |
| Pulmão esquerdo                 | 0,794E-05                   | 5    | 0,100E-03 | 1    | 0,117E-04 | 4    | 0,179E-05          | 9    |
| Pulmão direito                  | 0,851E-05                   | 5    | 0,952E-04 | 1    | 0,117E-04 | 4    | 0,178E-05          | 9    |
| Fígado                          | 0,507E-05                   | 3    | 0,161E-04 | 2    | 0,182E-05 | 6    | 0,135E-04          | 2    |
| Glândula adrenal esquerda       | 0,792E-05                   | 40   | 0,226E-04 | 22   | 0,174E-05 | 40   | 0,158E-04          | 23   |
| Glândula adrenal direita        | 0,827E-05                   | 26   | 0,171E-04 | 23   | -         | -    | 0,137E-04          | 24   |
| Rim esquerdo                    | 0,122E-04                   | 7    | 0,809E-05 | 7    | 0,690E-06 | 22   | 0,151E-04          | 5    |
| Rim direito                     | 0,111E-04                   | 6    | 0,717E-05 | 7    | 0,119E-05 | 17   | 0,195E-04          | 5    |
| Baço                            | 0,688E-05                   | 9    | 0,867E-05 | 8    | 0,908E-06 | 21   | 0,137E-04          | 6    |
| Pâncreas                        | 0,853E-05                   | 12   | 0,642E-05 | 14   | 0,411E-06 | 38   | 0,353E-04          | 6    |
| Paredes do estômago             | 0,453E-05                   | 9    | 0,811E-05 | 7    | 0,604E-06 | 22   | 0,297E-04          | 4    |
| Paredes do I.D.                 | 0,932E-05                   | 3    | 0,146E-05 | 8    | 0,211E-06 | 23   | 0,656E-04          | 1    |
| Paredes do I.G.S.               | 0,819E-05                   | 6    | 0,187E-05 | 12   | 0,176E-06 | 36   | 0,230E-03          | 1    |
| Paredes do I.G.I.               | 0,135E-04                   | 6    | 0,654E-06 | 22   | 0,759E-07 | 47   | 0,249E-04          | 4    |
| Ovário esquerdo                 | 0,180E-04                   | 32   | -         | -    | -         | -    | 0,172E-04          | 30   |
| Ovário direito                  | 0,164E-04                   | 38   | -         | -    | -         | -    | 0,720E-04          | 17   |
| Testículo esquerdo              | -                           | -    | -         | -    | -         | -    | -                  | -    |
| Testículo direito               | -                           | -    | -         | -    | -         | -    | -                  | -    |
| Útero                           | 0,118E-04                   | 19   | -         | -    | -         | -    | 0,309E-04          | 15   |
| Paredes da bexiga               | 0,131E-04                   | 11   | 0,774E-06 | 35   | -         | -    | 0,215E-04          | 8    |
| Pele do corpo                   | 0,443E-05                   | 2    | 0,461E-05 | 2    | 0,590E-05 | 2    | 0,334E-05          | 2    |
| Esqueleto                       | 0,252E-04                   | 0,7  | 0,940E-05 | 1    | 0,126E-04 | 1    | 0,966E-05          | 1    |
| Medula óssea hematopoiética     | 0,253E-04                   | 0,7  | 0,940E-05 | 1    | 0,126E-04 | 1    | 0,966E-05          | 1    |
| Medula óssea não hematopoiética | 0,253E-04                   | 0,7  | 0,940E-05 | 1    | 0,126E-04 | 1    | 0,966E-05          | 1    |
| Restante dos tecidos            | 0,737E-05                   | 0,6  | 0,902E-05 | 0,5  | 0,897E-05 | 0,5  | 0,992E-05          | 0,5  |
| Corpo todo                      | 0,966E-05                   | 0,4  | 0,971E-05 | 0,4  | 0,941E-05 | 0,4  | 0,122E-04          | 0,4  |

PARA O  $^{99m}\text{Tc}$  UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDO EM VÁRIOS ÓRGÃOS FONTES.

| Órgãos alvos                    | Órgãos Fontes      |      |                     |      |           |      |            |      |           |
|---------------------------------|--------------------|------|---------------------|------|-----------|------|------------|------|-----------|
|                                 | Conteúdo do I.G.I. | C.V. | Paredes do estômago | C.V. | Esqueleto | C.V. | Corpo todo | C.V. | Total     |
| Cérebro                         | 0,900E-08          | 48   | 0,108E-06           | 20   | 0,114E-04 | 2    | 0,858E-05  | 2    | 0,312E-04 |
| Olhos                           | -                  | -    | -                   | -    | 0,161E-04 | 13   | 0,752E-05  | 18   | 0,370E-04 |
| Tireóide                        | -                  | -    | -                   | -    | 0,118E-04 | 19   | 0,135E-04  | 18   | 0,298E-02 |
| Timo                            | 0,849E-06          | 45   | 0,700E-05           | 12   | 0,621E-05 | 14   | 0,110E-04  | 10   | 0,104E-03 |
| Coração                         | 0,132E-05          | 14   | 0,191E-04           | 4    | 0,475E-05 | 8    | 0,120E-04  | 5    | 0,138E-03 |
| Pulmão esquerdo                 | 0,804E-06          | 15   | 0,116E-04           | 4    | 0,643E-05 | 5    | 0,896E-05  | 5    | 0,177E-03 |
| Pulmão direito                  | 0,599E-06          | 14   | 0,506E-05           | 5    | 0,635E-05 | 5    | 0,980E-05  | 4    | 0,177E-03 |
| Fígado                          | 0,255E-05          | 5    | 0,203E-04           | 2    | 0,443E-05 | 4    | 0,108E-04  | 2    | 0,260E-03 |
| Glândula adrenal esquerda       | 0,552E-05          | 41   | 0,329E-04           | 15   | 0,862E-05 | 32   | 0,174E-04  | 22   | 0,345E-03 |
| Glândula adrenal direita        | 0,185E-05          | 46   | 0,188E-04           | 22   | 0,951E-05 | 28   | 0,205E-04  | 23   | 0,302E-03 |
| Rim esquerdo                    | 0,120E-04          | 6    | 0,475E-04           | 3    | 0,908E-05 | 7    | 0,132E-04  | 6    | 0,633E-03 |
| Rim direito                     | 0,567E-05          | 8    | 0,179E-04           | 5    | 0,102E-04 | 7    | 0,126E-04  | 6    | 0,521E-03 |
| Baço                            | 0,984E-05          | 7    | 0,482E-04           | 3    | 0,595E-05 | 9    | 0,983E-05  | 7    | 0,162E-02 |
| Pâncreas                        | 0,134E-04          | 9    | 0,786E-04           | 4    | 0,818E-05 | 12   | 0,141E-04  | 10   | 0,365E-03 |
| Paredes do estômago             | 0,109E-04          | 6    | 0,447E-03           | 1    | 0,373E-05 | 10   | 0,113E-04  | 6    | 0,613E-03 |
| Paredes do I.D.                 | 0,648E-04          | 1    | 0,191E-04           | 2    | 0,680E-05 | 4    | 0,129E-04  | 3    | 0,255E-03 |
| Paredes do I.G.S.               | 0,281E-04          | 4    | 0,295E-04           | 3    | 0,675E-05 | 7    | 0,116E-04  | 5    | 0,381E-03 |
| Paredes do I.G.I.               | 0,308E-03          | 1    | 0,105E-04           | 6    | 0,966E-05 | 7    | 0,117E-04  | 6    | 0,479E-03 |
| Ovário esquerdo                 | 0,209E-03          | 10   | -                   | -    | 0,825E-05 | 38   | 0,100E-04  | 43   | 0,346E-03 |
| Ovário direito                  | 0,390E-04          | 19   | -                   | -    | 0,895E-05 | 41   | 0,211E-04  | 35   | 0,223E-03 |
| Testículo esquerdo              | -                  | -    | -                   | -    | -         | -    | -          | -    | 0,291E-04 |
| Testículo direito               | -                  | -    | -                   | -    | -         | -    | -          | -    | 0,365E-04 |
| Útero                           | 0,185E-03          | 6    | 0,442E-05           | 2    | 0,968E-05 | 26   | 0,140E-04  | 21   | 0,471E-03 |
| Paredes da bexiga               | 0,967E-04          | 4    | 0,312E-05           | 19   | 0,101E-04 | 13   | 0,115E-04  | 11   | 0,754E-03 |
| Pele do corpo                   | 0,311E-05          | 2    | 0,369E-05           | 2    | 0,456E-05 | 2    | 0,528E-05  | 2    | 0,499E-04 |
| Esqueleto                       | 0,149E-04          | 0,9  | 0,615E-05           | 1    | 0,248E-04 | 0,7  | 0,118E-04  | 1    | 0,158E-03 |
| Med. óssea hematopoiética       | 0,149E-04          | 0,9  | 0,614E-05           | 1    | 0,251E-04 | 0,7  | 0,118E-04  | 1    | 0,156E-03 |
| Medula óssea não hematopoiética | 0,149E-04          | 0,9  | 0,614E-05           | 1    | 0,251E-04 | 0,7  | 0,118E-04  | 1    | 0,156E-03 |
| Restante dos tecidos            | 0,109E-04          | 0,4  | 0,103E-04           | 0,5  | 0,629E-05 | 0,6  | 0,846E-05  | 0,5  | 0,111E-03 |
| Corpo todo                      | 0,132E-04          | 0,3  | 0,119E-04           | 0,4  | 0,909E-05 | 0,4  | 0,902E-05  | 0,5  | 0,133E-03 |

145  
147

UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDO EM VÁRIOS ÓRGÃOS FONTES.

| Órgãos alvos                    | Ó r g ã o s F o n t e s |      |                      |      |                  |      |           |      |
|---------------------------------|-------------------------|------|----------------------|------|------------------|------|-----------|------|
|                                 | Tireóide                | C.V. | Conteúdo do estômago | C.V. | Conteúdo do I.D. | C.V. | Rins      | C.V. |
| Cérebro                         | 0,675E-05               | 3    | 0,217E-06            | 18   | 0,367E-07        | 33   | 0,174E-06 | 18   |
| Olhos                           | 0,645E-05               | 21   | -                    | -    | -                | -    | -         | -    |
| Tireóide                        | 0,272E-02               | 2    | -                    | -    | -                | -    | -         | -    |
| Timo                            | 0,259E-04               | 9    | 0,645E-05            | 15   | 0,196E-05        | 36   | 0,416E-05 | 16   |
| Coração                         | 0,503E-05               | 9    | 0,189E-04            | 5    | 0,340E-05        | 12   | 0,107E-04 | 7    |
| Pulmão esquerdo                 | 0,118E-04               | 5    | 0,101E-04            | 5    | 0,148E-05        | 13   | 0,722E-05 | 6    |
| Pulmão direito                  | 0,133E-04               | 5    | 0,481E-05            | 8    | 0,150E-05        | 13   | 0,816E-05 | 6    |
| Fígado                          | 0,204E-05               | 6    | 0,187E-04            | 2    | 0,686E-05        | 3    | 0,241E-04 | 2    |
| Glândula adrenal esquerda       | 0,314E-05               | 45   | 0,554E-04            | 17   | 0,462E-05        | 48   | 0,106E-03 | 13   |
| Glândula adrenal direita        | -                       | -    | 0,224E-04            | 24   | 0,733E-05        | 42   | 0,109E-03 | 14   |
| Rim esquerdo                    | 0,850E-06               | 24   | 0,472E-04            | 4    | 0,147E-04        | 7    | 0,380E-03 | 2    |
| Rim direito                     | 0,123E-05               | 24   | 0,157E-04            | 6    | 0,125E-04        | 7    | 0,368E-03 | 2    |
| Baço                            | 0,967E-06               | 27   | 0,439E-04            | 4    | 0,102E-04        | 8    | 0,620E-04 | 4    |
| Pâncreas                        | -                       | -    | 0,652E-04            | 6    | 0,320E-04        | 9    | 0,111E-03 | 5    |
| Paredes do estômago             | 0,119E-05               | 28   | 0,302E-03            | 2    | 0,173E-04        | 6    | 0,302E-04 | 5    |
| Paredes do I.D.                 | 0,144E-06               | 23   | 0,159E-04            | 3    | 0,229E-03        | 0,8  | 0,149E-04 | 3    |
| Paredes do I.G.S.               | 0,124E-06               | 34   | 0,245E-04            | 5    | 0,649E-04        | 3    | 0,157E-04 | 6    |
| Paredes do I.G.I.               | -                       | -    | 0,890E-05            | 8    | 0,591E-04        | 4    | 0,883E-05 | 10   |
| Ovário esquerdo                 | -                       | -    | -                    | -    | 0,640E-04        | 24   | -         | -    |
| Ovário direito                  | -                       | -    | -                    | -    | 0,553E-04        | 36   | -         | -    |
| Testículo esquerdo              | -                       | -    | -                    | -    | -                | -    | -         | -    |
| Testículo direito               | -                       | -    | -                    | -    | -                | -    | -         | -    |
| Útero                           | -                       | -    | -                    | -    | 0,650E-04        | 15   | 0,715E-05 | 43   |
| Paredes da bexiga               | -                       | -    | 0,390E-05            | 25   | 0,390E-04        | 9    | 0,475E-05 | 24   |
| Pele do corpo                   | 0,655E-05               | 2    | 0,393E-05            | 3    | 0,351E-05        | 3    | 0,350E-05 | 3    |
| Esqueleto                       | 0,963E-05               | 1    | 0,414E-05            | 2    | 0,786E-05        | 1    | 0,892E-05 | 1    |
| Medula óssea hematopoiética     | 0,963E-05               | 1    | 0,414E-05            | 2    | 0,786E-05        | 1    | 0,892E-05 | 1    |
| Medula óssea não hematopoiética | 0,963E-05               | 1    | 0,414E-05            | 2    | 0,786E-05        | 1    | 0,892E-05 | 1    |
| Restante dos tecidos            | 0,926E-05               | 0,6  | 0,936E-05            | 0,6  | 0,955E-05        | 0,6  | 0,106E-04 | 0,5  |
| Corpo todo                      | 0,921E-05               | 0,5  | 0,116E-04            | 0,4  | 0,125E-04        | 0,4  | 0,122E-04 | 0,4  |

# 15

## UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDO EM VÁRIOS ÓRGÃOS FONTES.

| Órgãos alvos                    | Ó r g ã o s   F o n t e s |      |           |      |                     |      |            |      |           |
|---------------------------------|---------------------------|------|-----------|------|---------------------|------|------------|------|-----------|
|                                 | Conteúdo da bexiga        | C.V. | Fígado    | C.V. | Paredes do estômago | C.V. | Corpo todo | C.V. | Total     |
| Cérebro                         | -                         |      | 0,320E-06 | 12   | 0,192E-06           | 18   | 0,867E-05  | 3    | 0,163E-04 |
| Olhos                           | -                         |      | -         |      | -                   |      | 0,641E-05  | 28   | 0,128E-04 |
| Tireóide                        | -                         |      | -         |      | -                   |      | 0,125E-04  | 26   | 0,274E-02 |
| Timo                            | -                         |      | 0,929E-05 | 13   | 0,639E-05           | 17   | 0,983E-05  | 15   | 0,640E-04 |
| Coração                         | 0,902E-06                 | 22   | 0,252E-04 | 5    | 0,192E-04           | 5    | 0,105E-04  | 7    | 0,941E-04 |
| Pulmão esquerdo                 | 0,369E-06                 | 33   | 0,628E-05 | 7    | 0,118E-04           | 5    | 0,855E-05  | 6    | 0,576E-04 |
| Pulmão direito                  | 0,393E-06                 | 26   | 0,256E-04 | 4    | 0,521E-05           | 7    | 0,970E-05  | 6    | 0,688E-04 |
| Fígado                          | 0,174E-05                 | 6    | 0,147E-03 | 0,7  | 0,185E-04           | 2    | 0,110E-04  | 3    | 0,230E-03 |
| Glândula adrenal esquerda       | -                         |      | 0,193E-04 | 29   | 0,511E-04           | 18   | 0,136E-04  | 33   | 0,254E-03 |
| Glândula adrenal direita        | -                         |      | 0,752E-04 | 16   | 0,303E-04           | 28   | 0,113E-04  | 38   | 0,256E-03 |
| Rim esquerdo                    | 0,385E-05                 | 14   | 0,126E-04 | 7    | 0,429E-04           | 4    | 0,129E-04  | 8    | 0,516E-03 |
| Rim direito                     | 0,391E-05                 | 14   | 0,414E-04 | 4    | 0,156E-04           | 7    | 0,130E-04  | 8    | 0,368E-03 |
| Baço                            | 0,273E-05                 | 19   | 0,757E-05 | 9    | 0,458E-04           | 4    | 0,108E-04  | 9    | 0,184E-03 |
| Pâncreas                        | 0,378E-05                 | 20   | 0,241E-04 | 10   | 0,805E-04           | 6    | 0,108E-04  | 14   | 0,328E-03 |
| Paredes do estômago             | 0,322E-05                 | 14   | 0,160E-04 | 6    | 0,431E-03           | 1    | 0,130E-04  | 8    | 0,815E-03 |
| Paredes do I.D.                 | 0,381E-04                 | 2    | 0,708E-05 | 4    | 0,173E-04           | 3    | 0,126E-04  | 4    | 0,336E-03 |
| Paredes do I.G.S.               | 0,213E-04                 | 6    | 0,145E-04 | 7    | 0,266E-04           | 5    | 0,105E-04  | 8    | 0,178E-03 |
| Paredes do I.G.I.               | 0,737E-04                 | 3    | 0,245E-05 | 18   | 0,951E-05           | 9    | 0,116E-04  | 8    | 0,174E-03 |
| Ovário esquerdo                 | 0,268E-04                 | 33   | -         |      | -                   |      | 0,256E-04  | 43   | 0,116E-03 |
| Ovário direito                  | 0,333E-04                 | 25   | -         |      | -                   |      | -          |      | 0,886E-04 |
| Testículo esquerdo              | 0,142E-04                 | 46   | -         |      | -                   |      | -          |      | 0,142E-04 |
| Testículo direito               | 0,142E-04                 | 46   | -         |      | -                   |      | -          |      | 0,142E-04 |
| Útero                           | 0,209E-03                 | 8    | -         |      | 0,211E-05           | 47   | 0,104E-04  | 3    | 0,294E-03 |
| Paredes da bexiga               | 0,576E-03                 | 2    | 0,160E-05 | 26   | 0,380E-05           | 24   | 0,865E-05  | 16   | 0,638E-03 |
| Pele do corpo                   | 0,352E-05                 | 3    | 0,463E-05 | 3    | 0,426E-05           | 3    | 0,593E-05  | 2    | 0,358E-04 |
| Esqueleto                       | 0,879E-05                 | 1    | 0,458E-05 | 2    | 0,408E-05           | 2    | 0,912E-05  | 1    | 0,570E-04 |
| Medula óssea hematopoiética     | 0,880E-05                 | 1    | 0,458E-05 | 2    | 0,408E-05           | 2    | 0,913E-05  | 1    | 0,570E-04 |
| Medula óssea não hematopoiética | 0,880E-05                 | 1    | 0,458E-05 | 2    | 0,408E-05           | 2    | 0,913E-05  | 1    | 0,570E-04 |
| Restante dos tecidos            | 0,114E-04                 | 0,5  | 0,748E-05 | 0,7  | 0,101E-04           | 0,6  | 0,881E-05  | 0,6  | 0,767E-04 |
| Corpo todo                      | 0,124E-04                 | 0,4  | 0,108E-04 | 0,4  | 0,113E-04           | 0,4  | 0,887E-05  | 0,5  | 0,892E-04 |

UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDO EM VÁRIOS ÓRGÃOS FONTES.

| Órgãos alvos                    | Órgãos Fontes |      |           |      |           |      |           |      |           |
|---------------------------------|---------------|------|-----------|------|-----------|------|-----------|------|-----------|
|                                 | Rins          | C.V. | Pulmões   | C.V. | Fígado    | C.V. | Tireóide  | C.V. | Total     |
| Cérebro                         | 0,568E-07     | 31   | 0,626E-06 | 11   | 0,144E-06 | 20   | 0,448E-05 | 4    | 0,531E-05 |
| Olhos                           | -             |      | 0,222E-05 | 44   | -         |      | 0,521E-05 | 25   | 0,743E-05 |
| Tireóide                        | -             |      | 0,917E-05 | 26   | -         |      | 0,445E-02 | 1    | 0,446E-02 |
| Timo                            | 0,284E-05     | 22   | 0,373E-04 | 8    | 0,652E-05 | 15   | 0,265E-04 | 9    | 0,732E-04 |
| Coração                         | 0,911E-05     | 7    | 0,383E-04 | 4    | 0,298E-04 | 5    | 0,433E-05 | 12   | 0,816E-04 |
| Pulmão esquerdo                 | 0,701E-05     | 6    | 0,145E-03 | 1    | 0,664E-05 | 7    | 0,117E-04 | 5    | 0,170E-03 |
| Pulmão direito                  | 0,723E-05     | 6    | 0,146E-03 | 1    | 0,294E-04 | 3    | 0,121E-04 | 6    | 0,194E-03 |
| Fígado                          | 0,272E-04     | 2    | 0,171E-04 | 2    | 0,206E-03 | 0,6  | 0,125E-05 | 9    | 0,252E-03 |
| Glândula adrenal esquerda       | 0,128E-03     | 10   | 0,275E-04 | 26   | 0,250E-04 | 26   | -         |      | 0,180E-03 |
| Glândula adrenal direita        | 0,377E-03     | 10   | 0,354E-04 | 25   | 0,744E-04 | 12   | -         |      | 0,487E-03 |
| Rim esquerdo                    | 0,551E-03     | 1    | 0,685E-05 | 11   | 0,111E-04 | 8    | 0,683E-06 | 26   | 0,570E-04 |
| Rim direito                     | 0,554E-03     | 1    | 0,929E-05 | 14   | 0,454E-04 | 5    | 0,590E-06 | 35   | 0,609E-03 |
| Baço                            | 0,785E-04     | 3    | 0,950E-05 | 13   | 0,576E-05 | 11   | 0,650E-06 | 29   | 0,944E-04 |
| Pâncreas                        | 0,140E-03     | 5    | 0,534E-05 | 19   | 0,281E-04 | 12   | 0,295E-06 | 48   | 0,174E-03 |
| Paredes do estômago             | 0,349E-04     | 5    | 0,893E-05 | 11   | 0,175E-04 | 6    | 0,950E-06 | 25   | 0,623E-04 |
| Paredes do I.D.                 | 0,146E-04     | 3    | 0,984E-06 | 14   | 0,587E-05 | 5    | 0,293E-06 | 42   | 0,217E-04 |
| Paredes do I.G.S.               | 0,149E-04     | 6    | 0,153E-05 | 18   | 0,121E-04 | 6    | 0,304E-06 | 37   | 0,289E-04 |
| Paredes do I.G.I.               | 0,919E-05     | 10   | 0,115E-05 | 25   | 0,281E-05 | 16   | -         |      | 0,131E-04 |
| Ovário esquerdo                 | -             |      | -         |      | -         |      | -         |      | -         |
| Ovário direito                  | -             |      | -         |      | -         |      | -         |      | -         |
| Testículo esquerdo              | -             |      | -         |      | -         |      | -         |      | -         |
| Testículo direito               | -             |      | -         |      | -         |      | -         |      | -         |
| Útero                           | 0,512E-05     | 40   | -         |      | -         |      | -         |      | 0,512E-05 |
| Paredes da bexiga               | 0,294E-05     | 26   | -         |      | 0,820E-06 | 49   | -         |      | 0,376E-05 |
| Pele do corpo                   | 0,339E-05     | 3    | 0,519E-05 | 3    | 0,416E-05 | 3    | 0,661E-05 | 2    | 0,192E-04 |
| Esqueleto                       | 0,128E-04     | 1    | 0,133E-04 | 1    | 0,680E-05 | 2    | 0,150E-04 | 1    | 0,480E-04 |
| Medula óssea hematopoiética     | 0,128E-04     | 1    | 0,132E-04 | 1    | 0,679E-05 | 2    | 0,150E-04 | 1    | 0,480E-04 |
| Medula óssea não hematopoiética | 0,128E-04     | 1    | 0,132E-04 | 1    | 0,680E-05 | 2    | 0,150E-04 | 1    | 0,480E-04 |
| Restante dos tecidos            | 0,119E-04     | 0,6  | 0,104E-04 | 0,7  | 0,788E-05 | 0,8  | 0,107E-04 | 0,6  | 0,410E-04 |
| Corpo todo                      | 0,148E-04     | 0,5  | 0,119E-04 | 0,5  | 0,131E-04 | 0,5  | 0,113E-04 | 0,5  | 0,513E-04 |

PARA O  $^{99m}\text{Tc}$  UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDO NO ÓRGÃO FONTE.

| Órgãos alvos                    | Órgãos Fontes      |      |           |      |                             |      |            |      |
|---------------------------------|--------------------|------|-----------|------|-----------------------------|------|------------|------|
|                                 | Conteúdo da bexiga | C.V. | Tireóide  | C.V. | Medula óssea hematopoiética | C.V. | Corpo todo | C.V. |
| Cérebro                         | -                  |      | 0,709E-05 | 3    | 0,891E-05                   | 3    | 0,502E-05  | 4    |
| Olhos                           | -                  |      | -         |      | -                           |      | -          |      |
| Tireóide                        | -                  |      | 0,217E-02 | 1    | 0,371E-05                   | 26   | 0,607E-05  | 22   |
| Timo                            | -                  |      | 0,234E-04 | 11   | 0,632E-05                   | 21   | 0,919E-05  | 20   |
| Coração                         | 0,357E-06          | 22   | 0,446E-05 | 6    | 0,731E-05                   | 5    | 0,112E-04  | 4    |
| Pulmão esquerdo                 | 0,328E-06          | 21   | 0,694E-05 | 5    | 0,779E-05                   | 5    | 0,960E-05  | 5    |
| Pulmão direito                  | 0,211E-06          | 22   | 0,651E-05 | 5    | 0,822E-05                   | 5    | 0,941E-05  | 4    |
| Fígado                          | 0,173E-05          | 6    | 0,931E-06 | 8    | 0,677E-05                   | 3    | 0,110E-04  | 3    |
| Glândula adrenal esquerda       | -                  |      | -         |      | 0,202E-04                   | 25   | 0,130E-04  | 28   |
| Glândula adrenal direita        | -                  |      | -         |      | 0,153E-04                   | 26   | 0,111E-04  | 32   |
| Rim esquerdo                    | 0,297E-05          | 15   | 0,216E-06 | 36   | 0,146E-04                   | 7    | 0,111E-04  | 8    |
| Rim direito                     | 0,258E-05          | 14   | 0,277E-06 | 40   | 0,150E-04                   | 7    | 0,113E-04  | 8    |
| Baço                            | 0,150E-05          | 17   | 0,370E-06 | 23   | 0,708E-05                   | 8    | 0,103E-04  | 7    |
| Pâncreas                        | 0,114E-05          | 28   | 0,110E-05 | 32   | 0,114E-04                   | 11   | 0,138E-04  | 11   |
| Paredes do estômago             | 0,214E-05          | 13   | 0,608E-06 | 30   | 0,663E-05                   | 9    | 0,109E-04  | 7    |
| Paredes do I.D.                 | 0,192E-04          | 2    | 0,127E-06 | 23   | 0,173E-04                   | 3    | 0,131E-04  | 3    |
| Paredes do I.G.S.               | 0,169E-04          | 5    | 0,902E-07 | 46   | 0,139E-04                   | 5    | 0,135E-04  | 6    |
| Paredes do I.G.I.               | 0,453E-04          | 3    | -         |      | 0,198E-04                   | 5    | 0,128E-04  | 7    |
| Ovário esquerdo                 | 0,412E-04          | 19   | -         |      | 0,862E-05                   | 38   | 0,875E-05  | 30   |
| Ovário direito                  | 0,466E-04          | 20   | -         |      | 0,190E-04                   | 28   | 0,908E-05  | 42   |
| Testículo esquerdo              | 0,282E-04          | 12   | -         |      | 0,352E-05                   | 33   | 0,109E-04  | 24   |
| Testículo direito               | 0,295E-04          | 13   | -         |      | 0,252E-05                   | 36   | 0,117E-04  | 23   |
| Útero                           | 0,979E-04          | 4    | -         |      | 0,126E-04                   | 10   | 0,128E-04  | 10   |
| Paredes da bexiga               | 0,451E-03          | 2    | -         |      | 0,650E-05                   | 13   | 0,114E-04  | 12   |
| Pele do corpo                   | 0,367E-05          | 3    | 0,537E-05 | 2    | 0,448E-05                   | 3    | 0,539E-05  | 2    |
| Esqueleto                       | 0,590E-05          | 1    | 0,700E-05 | 1    | 0,243E-04                   | 0,7  | 0,117E-04  | 1    |
| Medula óssea hematopoiética     | 0,129E-04          | 2    | 0,766E-05 | 2    | 0,544E-04                   | 0,8  | 0,134E-04  | 2    |
| Medula óssea não hematopoiética | 0,581E-05          | 2    | 0,380E-05 | 2    | 0,233E-04                   | 0,8  | 0,113E-04  | 1    |
| Restante dos tecidos            | 0,114E-04          | 0,5  | 0,902E-05 | 0,5  | 0,840E-05                   | 0,6  | 0,890E-05  | 0,5  |
| Corpo todo                      | 0,120E-04          | 0,4  | 0,883E-05 | 0,5  | 0,108E-04                   | 0,4  | 0,931E-05  | 0,5  |

151  
149

os órgãos fontes relacionados acima) são dadas na tabela V.8. Os dados nessa tabela mostram grande variação nos valores dessas razões, ou seja, de 0,37 a 5.0.

O fator 0,76 corresponde à razão das FAE no cérebro quando a tireóide é o órgão fonte. Essa diferença foi ocasionada principalmente pela completa modificação nas formas dos ossos da cabeça, na forma da região do pescoço, pela diferença na massa do cérebro dos dois fantasmas, e em face à blindagem oferecida pela parte cervical da coluna vertebral. A adição do pescoço ocasionou ainda um aumento geral nas doses dos órgãos restantes do corpo do fantasma, por haver uma espécie de colimação da radiação oferecida pelas costelas e coluna vertebral (vide figura III.3), o que não acontece no fantasma similar do adulto e por apresentar grandes coeficientes de variação (até 38%). No caso dos rins (esquerdo e direito), os respectivos fatores 3,2 e 4,3 são devido à diferença de geometria e aos coeficientes de variação envolvidos (até 40%). Exceção é feita para o pâncreas, caso em que a dose é menor por estar este órgão mais distanciado da tireóide no fantasma deste trabalho que no fantasma similar do adulto. No entanto, quando o conteúdo da bexiga é a fonte de radiação, verificou-se que essa dose é aumentada de um fator 5 por estar o pâncreas mais próximo da bexiga que no fantasma similar do adulto e, também, pela diferença de massa (-40% menor que no fantasma similar do adulto). Nessa diferença está também incluído o fator geometria, principal responsável pela distribuição espacial de radiação espalhada pelo esqueleto e pelo restante dos tecidos no interior do fantasma.

TABELA V.8 - RAZÃO ENTRE AS FRAÇÕES ABSORVIDAS ESPECÍFICAS NOS ÓRGÃOS DO FANTASMA DESENVOLVIDO NESTE TRABALHO E AS FRAÇÕES ABSORVIDAS ESPECÍFICAS NOS ÓRGÃOS DO FANTASMA SIMILAR AO ADULTO, PARA O  $^{99m}\text{Tc}$  UNIFORMEMENTE DISTRIBUIDO NOS ÓRGÃOS FONTES SELECIONADOS.

| Órgãos alvos                    | Ó r g ã o s F o n t e s |          |                             |            |
|---------------------------------|-------------------------|----------|-----------------------------|------------|
|                                 | Conteúdo da bexiga      | Tireóide | Medula óssea hematopoiética | Corpo todo |
| Cérebro                         | -                       | 0,76     | 0,52                        | 1,71       |
| Olhos                           | -                       | -        | -                           | -          |
| Tireóide                        | -                       | 1,35     | 3,00                        | 2,24       |
| Timo                            | -                       | 0,99     | 0,88                        | 1,20       |
| Coração                         | 1,34                    | 1,06     | 0,76                        | 1,07       |
| Pulmão esquerdo                 | 0,72                    | 1,69     | 1,02                        | 0,93       |
| Pulmão direito                  | 1,16                    | 1,80     | 1,04                        | 1,04       |
| Fígado                          | 0,89                    | 1,96     | 0,75                        | 0,98       |
| Glândula adrenal esquerda       | -                       | -        | 0,39                        | 1,34       |
| Glândula adrenal direita        | -                       | -        | 0,54                        | 1,84       |
| Rim esquerdo                    | 0,90                    | 3,19     | 0,84                        | 1,18       |
| Rim direito                     | 1,21                    | 4,30     | 0,74                        | 1,12       |
| Baço                            | 1,80                    | 2,45     | 0,97                        | 0,96       |
| Pâncreas                        | 5,04                    | 0,37     | 0,75                        | 1,02       |
| Paredes do estômago             | 1,36                    | 0,99     | 0,68                        | 1,04       |
| Paredes do I.D.                 | 2,13                    | 1,67     | 0,54                        | 0,99       |
| Paredes do I.G.S.               | 1,22                    | 1,96     | 0,59                        | 0,86       |
| Paredes do I.G.I.               | 1,73                    | -        | 0,68                        | 0,91       |
| Ovário esquerdo                 | 1,51                    | -        | 2,09                        | 1,15       |
| Ovário direito                  | 1,15                    | -        | 0,87                        | 2,33       |
| Testículo esquerdo              | 1,04                    | -        | -                           | -          |
| Testículo direito               | 1,24                    | -        | -                           | -          |
| Útero                           | 2,09                    | -        | 0,94                        | 1,10       |
| Paredes da bexiga               | 1,31                    | -        | 2,02                        | 1,00       |
| Pele do corpo                   | 0,84                    | 1,10     | 0,99                        | 0,98       |
| Esqueleto                       | 2,33                    | 1,80     | 1,04                        | 1,01       |
| Medula óssea hematopoiética     | 1,07                    | 1,65     | 0,46                        | 0,88       |
| Medula óssea não hematopoiética | 2,37                    | 3,32     | 1,08                        | 1,04       |
| Restante dos tecidos            | 1,03                    | 0,99     | 0,88                        | 0,95       |
| Corpo todo                      | 1,12                    | 1,07     | 0,89                        | 1,01       |

Para a medula óssea formadora de sangue como órgão fonte, verifica-se que as doses na bexiga diferem por um fator 2, pelo fato de sua maior proximidade (no fantasma deste trabalho) dos ossos pélvicos e sacro, que, conforme tabela III.9 do capítulo III, possui mais de 20% da quantidade total dessa medula no esqueleto. O mesmo pode ser dito quanto à tireóide como órgão alvo pela sua bem maior proximidade das costelas e da coluna vertebral que no modelo similar do adulto, verificando-se, ainda, que ela possui menor massa em relação a este último fantasma. Quanto aos ovários, verifica-se que houve uma variação de um fator 2,3 entre os valores para o ovário esquerdo e o direito. Isso é explicado pelo grande coeficiente de variação (-40%) que envolve esses órgãos. O mesmo pode ser dito para as glândulas adrenais. Quanto ao cérebro verifica-se novamente que, houve uma redução na sua dose de um fator de ~2, pelo motivo explicado anteriormente quando a tireóide era o órgão fonte.

Para o corpo todo como órgão fonte, verificou-se, como era esperado, grande variação somente para o cérebro, tireóide, glândulas adrenais e ovários. Para os dois primeiros, a diferença foi causada pelas modificações já citadas, e para os dois últimos pelo valor alto dos correspondentes coeficientes de variação (até 32% para as glândulas adrenais e até 43% para os ovários). Quanto aos restantes dos órgãos, a variação é pequena (em geral menor que 15%), como esperada, quando se tem o corpo todo como órgão fonte.

Como complemento da análise das variações das FAE, verificou-se que as massas dos órgãos para o fantasma desen-

volvido neste trabalho, são muito mais representativas da idade de 10 anos que os correspondentes valores para o fantasma similar do adulto. Isso foi constatado quando se fez comparação com os valores publicados por Wellman et. al.<sup>(48)</sup> em que os valores das massas deste fantasma concordam muito melhor com os daquele autor do que com os valores para o fantasma similar do adulto, como é visto na tabela V.9. Por exemplo, para o timo, glândula que diminui de tamanho com a idade, a razão entre o valor usado, neste trabalho e o do fantasma similar do adulto é 3, pelo motivo dessa glândula ter sido reduzida pelo mesmo fator que os outros órgãos do tronco, o que não corresponde à realidade. Os testículos são 8 vezes maiores que no fantasma deste trabalho pelo mesmo motivo da glândula timo, isto é, porque ele foi reduzido pelo mesmo fator que as pernas do adulto, e portanto não foi levado em consideração o crescimento destes órgãos durante a puberdade. Em relação aos valores publicados por Wellman a diferença foi de apenas 8% para o fantasma deste trabalho. No caso do útero, ele é também 5 vezes maior pelo mesmo motivo citado acima, ou seja, não ter sido levado em conta o seu desenvolvimento durante a puberdade.

A influência da diferença das massas dos órgãos fontes nas frações absorvidas de energia (fração da energia emitida pela fonte e que é absorvida pelo órgão alvo), só é importante quando esses órgãos são os próprios alvos,<sup>(15)</sup> não exercendo influência significativa para os órgãos localizados à distância<sup>(24)</sup> porque a atividade total contida no órgão fonte é sempre a mesma, havendo, portanto, somente diferença

## SIMILAR AO ADULTO E OS VALORES DADOS POR WELLMAN ET. AL.

|                               | Fantasma deste trabalho<br>(g) | Fantasma similar ao adulto<br>(g) | Valores dados por Wellman et. al.<br>(g) | Razão das massas dos órgãos do fantasma deste trabalho |  |
|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--|--|--|
|                               |                                |                                   |  | Em relação ao fantasma similar ao adulto.              | Em relação aos valores dados por Wellman |
| Cérebro                       | 1375,10                        | 988,00                            | 1313,0                                   | 1,39   | 1,05                                     |
| Olhos                         | 16,08                          | -                                 | -  | -  | -  |
| Tireóide                      | 9,02                           | 13,37                             | 8,0                                      | 0,67   | 1,13                                     |
| Timo                          | 30,81                          | 10,71                             | -  | 2,88   | -  |
| Coração                       | 136,80                         | 257,1                             | -  | 0,53   | -  |
| Pulmão esquerdo               | 213,00                         | 215,8                             | 261,5                                    | 0,99   | 0,81                                     |
| Pulmão direito                | 213,00                         | 215,8                             | 261,5                                    | 0,99   | 0,81                                     |
| Fígado                        | 896,00                         | 781,6                             | 918,0                                    | 1,15   | 0,98                                     |
| Glândula adrenal esquerda     | 3,72                           | 3,348                             | -  | 1,11   | -  |
| Glândula adrenal direita      | 3,72                           | 3,348                             | -  | 1,11   | -  |
| Rim esquerdo                  | 89,20                          | 61,39                             | 93,5                                     | 1,45   | 0,95                                     |
| Rim direito                   | 89,20                          | 61,39                             | 93,5                                     | 1,45   | 0,95                                     |
| Baço                          | 79,91                          | 75,0                              | 101,0                                    | 1,07   | 0,79                                     |
| Pâncreas                      | 26,60                          | 26,04                             | 30,0                                     | 1,02   | 0,89                                     |
| Paredes do estômago           | 88,20 (121,00) <sup>(*)</sup>  | 64,78 (106,7)                     | 90,0                                     | 1,36 (1,13)  | 0,98                                     |
| Paredes + conteúdo do I.D.    | 519,20                         | 451,1                             | -  | 1,15   | -  |
| Paredes do I.G.S.             | 100,70 (109,30)                | 90,37 (95,04)                     | 820,0                                    | 1,11 (1,15)  | 0,85                                     |
| Paredes do I.G.I.             | 79,69 (69,90)                  | 69,15 (59,09)                     | -  | 1,15 (1,18)  | -  |
| Ovário esquerdo               | 1,625                          | 1,786                             | 1,75                                     | 0,91   | 0,93                                     |
| Ovário direito                | 1,625                          | 1,786                             | 1,75                                     | 0,91   | 0,93                                     |
| Testículo esquerdo            | 0,927                          | 7,268                             | 1,0                                      | 0,127  | 0,92                                     |
| Testículo direito             | 0,927                          | 7,268                             | 1,0                                      | 0,127  | 0,92                                     |
| Útero                         | 5,39                           | 28,25                             | -  | 0,191  | -  |
| Paredes da bexiga             | 23,10 (51,94)                  | 19,49 (86,38)                     | -  | 1,19 (0,60)  | -  |
| Pele do corpo                 | 2012,03                        | 1221,0                            | -  | 1,65   | -  |
| Esqueleto                     | 4634,86                        | 4723,0                            | -  | 0,98   | -  |
| Médula óssea hematopoiética   | 588,16                         | 707,3                             | -  | 0,84   | -  |
| Med. óssea não hematopoiética | 550,57                         | 649,3                             | -  | 0,85   | -  |
| Restante dos tecidos          | 21092,52                       | 20750,0                           | -  | 1,02   | -  |
| Corpo todo                    | 32079,0                        | 30570,0                           | 33500,0                                  | 1,05   | 0,96                                     |

(\*) Os valores entre parentesis são para as massas dos conteúdos dos respectivos órgãos.

na absorção pelo próprio órgão (auto absorção). Contudo, nos resultados tendo a tireóide e o conteúdo da bexiga como órgãos fontes e alvos simultaneamente, apesar desses órgãos terem mas sas menores no fantasma aqui desenvolvido, a FAE foi maior que no fantasma similar do adulto. Isso é devido provavelmente à radiação retroespalhada pela parte cervical da coluna vertebral e pelas costelas no caso da tireóide, e pelos ossos pélvicos no caso das paredes da bexiga (no modelo deste trabalho a bexiga encosta no osso púbico e é envolvida pela parte inferior da pelvis, como no caso real, o que não acontece com o modelo similar do adulto, isto é, neste último fantasma não existe o osso pubis e a parte inferior da pelvis fica muito distante).

Verificou-se, ainda, que quando as massas são bastante diferentes, as FAE não diferem muito, caso por exemplo da glândula tímica (fator de ~3 nas massas), em que as diferenças nas FAE são de 1%, 12% e 20%, quando a tireóide, a medula óssea vermelha e o corpo todo são, respectivamente, os órgãos fontes. Por outro lado, para órgãos com massas diferentes de apenas 1%, como os pulmões, a diferença nos valores das FAE chega a ser de um fator 1,8 quando a tireóide é o órgão fonte. Esses fatos nos levam portanto a concluir que o principal fator responsável pelas diferenças nos resultados não é a massa dos órgãos mas sim as diferenças nas suas formas e posições relativas no interior do fantasma.

## 1.2 - Medidas experimentais

Para verificar se os resultados teóricos apresentados

acima são válidos, foi necessário realizar a parte experimental do trabalho.

Os resultados experimentais obtidos pela medida da razão da dose absorvida,  $D$ , nos órgãos, para a exposição de entrada na pele,  $X_e$ , foram comparadas com os cálculos publicados pelo U.S. Bureau of Radiological Health<sup>(30)</sup> (USBRH) e com as medidas espectrométricas obtidas por Stansbury<sup>(44)</sup> para dois tipos de exames diagnósticos: (1) exame de tórax e (2) exame de abdômen.

Sabe-se que num exame diagnóstico a maior dose num órgão ocorre quando esse órgão se encontra no interior do campo de raios-X usado no exame. Nessas condições, a dose absorvida é resultado da presença de radiação primária e de radiação espalhada nas vizinhanças do órgão em questão. Muitos campos de raios-X usados em radiologia não abrangem certos órgãos de interesse como os testículos, ovários, útero e tireóide. Porém, esses campos muitas vezes estão localizados nas proximidades desses órgãos e portanto contribuem com uma dose de radiação, não desprezível, ocasionada por fótons espalhados no interior do corpo do paciente. Resultados experimentais obtidos pelo USBRH para os testículos indicam que, quando esses órgãos se localizam a uma distância de 3, 5 ou 9 cm fora do limite inferior do campo de raios-X, a radiação espalhada no interior do tubo de raios-X e na camada de ar entre o tubo e o fantasma, aumentava a dose absorvida

de 25 a 50% comparada com a dose absorvida, quando essa radiação era blindada.<sup>(30)</sup> Porém, quando o órgão em questão se encontra dentro do campo de raios-X esse aumento é menor que 1%. Os cálculos teóricos feitos neste trabalho não levam em consideração essa radiação espalhada fora do fantasma.

### 1.2.1 - Exame do tórax

Os exames do tórax foram simulados aplicando os parâmetros normalmente usados em exames diagnósticos de rotina. A tensão de 100 KV foi escolhida para a operação do equipamento de raios-X conforme indicado na tabela IV.6 do capítulo IV. A escolha desse potencial teve duas razões principais: 1) maior penetração da radiação no tecido e 2) maior dose absorvida, na posição dos órgãos de interesse, por unidade de exposição de entrada na pele. Esse fato melhorará a estatística dos cálculos teóricos pelo método de Monte Carlo e conseqüentemente possibilitará melhor comparação com os resultados experimentais. O tamanho do campo de raios-X na posição do filme radiográfico, a distância foco-pele e o centro do feixe de radiação foram também ajustados de acordo com os valores dados na tabela IV.6 do capítulo anterior.

Os resultados experimentais, para o exame do tórax, são mostrados na tabela V.10. Esses resultados confirmam o que foi dito no item anterior quando comparados com os cálculos teóricos. Em outras palavras, no trabalho aqui desenvol-

TABELA V.10 - RAZÃO ENTRE A DOSE ABSORVIDA E A EXPOSIÇÃO DE ENTRADA NA PELE PARA OS TESTÍCULOS, OVÁRIOS, ÚTERO, TIREÓIDE E REGIÃO TORÁXICA DA COLUNA VERTEBRAL, PARA O EXAME DO TÓRAX.

| Órgãos                              | Resultados teóricos <sup>(a)</sup> (mrad/R) | Resultados experimentais usando dosímetros TL <sup>(b)</sup> (mrad/R) | Resultados experimentais usando espectrometria <sup>(c)</sup> (mrad/R) | Desvio percentual dos resultados teóricos | Desvio percentual das medidas espectrométricas. |
|-------------------------------------|---|---|--|---|---|
| Testículos                          | < 0,01                                      | 0,45  | (0,39) <sup>(d)</sup>  | -   | (15)  |
| Ovários                             | 2,32  | 4,7   | (4,92)   | 103                                       | (4,5)   |
| Útero                               | 2,6   | 3,6   | -  | 38  | -   |
| Tireóide                            | 48,4  | 48,9  | -  | 1   | -   |
| Região torácica da coluna vertebral | -   | 1278  | (1042)   | -   | (23)  |

a) Cálculos do U.S. Bureau of Radiological Health.

b) Medidas feitas nesse estudo.

c) Medidas feitas por Stansbury.

d) Os valores dentro dos parenteses foram calculados das taxas de dose absorvida por miliampere (mrad/s mA) dados por Stansbury.

- Significa que o valor não é definido.

vido, os ovários, útero e os testículos estão localizados a 16, 17 e 32 cm abaixo do limite inferior do campo de raios-X para o exame PA do tórax. Uma vez que essas distâncias são bem maiores que aquelas mencionadas no caso do USBRH, a contribuição na dose absorvida em consequência da radiação espalhada fora do fantasma deve ser também maior que as apresentadas naquele caso como realmente é observado na tabela V.10. Verifica-se ainda, nessa tabela, que para a tireóide houve boa concordância entre os resultados teóricos <sup>(30)</sup> e os experimentais. Nesse exame essa glândula se localiza dentro do feixe de raios-X, e portanto, como discutido anteriormente, o efeito da radiação espalhada fora do fantasma não é significativo, o que foi confirmado pelo resultado obtido. Na tabela V.10 são mostrados também os resultados experimentais obtidos por espectrometria por Stansbury.<sup>(44)</sup> Esses resultados, obtidos com o mesmo fantasma físico usado neste trabalho, concordam muito bem com as medidas feitas usando os dosímetros termoluminescentes descritos no capítulo IV. No caso de tireóide, Stansbury fez as medidas da dose absorvida, porém, o seu resultado não foi incluído na tabela V.10 porque, para fazer a medida, foi necessário remover os ossos que compõem a região da cabeça e parte da região cervical da coluna vertebral do fantasma. O motivo dessa remoção é que o detector usado tinha aproximadamente 20 cm de comprimento e, não era possível sua introdução na posição da tireóide com os ossos da cabeça em seus respectivos lugares. Portanto, neste caso, uma comparação das medidas não teria significado, uma vez que as situações de exposição eram diferentes.

Para a região torácica da coluna vertebral não há dados teóricos fornecidos pelo USBRH. Contudo, as medidas experimentais concordam razoavelmente bem (dentro de ~ 23%) com as medidas feitas por espectrometria.

### 1.2.2 - Exame abdominal

Para o exame abdominal, somente os testículos estão fora do feixe de raios-X e portanto a dose absorvida por unidade de exposição de entrada na pele foi, como esperado, maior (~31% conforme mostra a tabela V.11) que os valores dados pelo USBRH pelo motivo já explicado no item anterior. Para os ovários e o útero, situados no interior do feixe de radiação, a comparação dos resultados experimentais (obtidos neste trabalho) com os cálculos teóricos mostra que eles concordaram muito bem, isto é, dentro dos desvios percentuais de 1,4% e 5,2% respectivamente, como é visto na tabela V.11.

A comparação da dose absorvida com as medidas obtidas por espectrometria também concordaram razoavelmente bem, isto é, dentro de 5,5% para os testículos de 21% para os ovários. Quanto ao útero não foram feitas medidas espectrométricas, impossibilitando dessa maneira, uma comparação dos resultados obtidos.

### 1.3 - Análise de erros

Os erros associados aos resultados experimentais es-

TABELA V.11 - RAZÃO ENTRE A DOSE ABSORVIDA E A EXPOSIÇÃO DE ENTRADA NA PELE PARA OS TESTÍCULOS, OVÁRIOS E ÚTERO, PARA O EXAME ABDOMINAL.

| Órgãos     | Resultados teóricos(a)<br>(mrad/R) | Resultados experimentais usando dosímetros TL(b)<br>(mrad/R) | Resultados experimentais usando espectrometria.(c)<br>(mrad/R) | Desvio percentual dos resultados teóricos | Desvio percentual das medidas espectrométricas. |
|------------|------------------------------------|--|--|---|---|
| Testículos | 26                                 | 34   | 36   | 30,8                                      | 5,5   |
| Ovários    | 291                                | 287  | 365  | 1,4                                       | 21,0  |
| Útero      | 379                                | 360  | -  | 5,2                                       | -   |

a) Cálculos feitos pelo U.S. Bureau of Radiological Health.

b) Medidas feitas nesse trabalho.

c) Medidas feitas por Stansbury.

tão relacionados a diversos fatores. Esses fatores incluem principalmente a incerteza estatística nas leituras dos dosímetros TL, e os erros na determinação da energia efetiva da radiação, no posicionamento dos dosímetros no interior do fantasma, no posicionamento do centro do campo de raios-X na superfície do fantasma, na medida do tamanho do campo e da distância foco-pele e os erros associados às medidas com a câmara de ionização.

O desvio padrão para a leitura dos dosímetros TL foi calculado em  $\pm 5\%$  e o erro associado com a determinação da energia efetiva, estimado em  $\pm 3\%$ <sup>(8)</sup> no intervalo de 30 a 40 KeV. Este intervalo de energia é típico de muito exames diagnósticos. O erro médio no posicionamento dos dosímetros TL no interior do fantasma e no ajuste da posição do centro do feixe de raios-X foi de 0,3 cm e foi estimado em menos de 1%. O erro na determinação do tamanho do campo foi estimado em  $\pm 2,5\%$ <sup>(8)</sup>. A câmara de ionização tem um erro de calibração (fornecido pelo fabricante) de  $\pm 2\%$  no intervalo de energia de 0,015 a 1,25 MeV. Esses erros acima foram propagados sendo o erro nos resultados finais de  $\pm 7\%$ .

Dois outros parâmetros devem ainda ser discutidos com relação ao erro final associado a este trabalho: (1) a diferença na composição dos tecidos do fantasma físico e do fantasma matemático do adulto e (2) a diferença nas massas dos órgãos dos dois fantasmas.

Quanto às diferenças de composição, sua influência foi estudada em termos dos coeficientes de atenuação de massa. Esses coeficientes têm sido calculados<sup>(44)</sup> para o tecido mole, pulmões e ossos do esqueleto do fantasma físico e comparados (como função da energia) com os coeficientes correspondentes para o fantasma matemático, conforme é visto nas tabelas IV.2 a IV.4 do capítulo IV.

Os dados dessas tabelas indicam que no intervalo de energia de 10 KeV a 1 MeV, a diferença entre os coeficientes para os efeitos fotoelétrico, Compton e espalhamento coerente é pequena (< 2%), estando na maioria dos casos dentro de  $\pm 1\%$ . Essa diferença terá influência mínima nos resultados finais, porque a relação entre as doses absorvidas é igual à relação entre os coeficientes de absorção de massa dos tecidos em questão.<sup>(25)</sup>

Quanto às diferenças em massa dos órgãos dos fantasmas físico e matemático é extremamente difícil estimar o erro. Não existem dados que sejam relevantes para este problema. No entanto, existem diversas publicações envolvendo radioisótopos no interior do corpo humano e que, permitirão a especificação de um limite superior para esses erros.

Antes de analisar os resultados apresentados nessas publicações, é necessário dizer que os desvios nas massas

dos tecidos dos dois fantasmas são de  $-1,7\%$ <sup>(\*)</sup> para o tecido mole,  $-4,4\%$  para o esqueleto e  $-6,4\%$  para os pulmões. A variação na massa total do corpo do fantasma é de  $-3,5\%$  (vide tabela IV.5). Os maiores desvios significativos,  $-22,4\%$  e  $-32\%$  ocorreram, respectivamente, na região onde se localizam os órgãos genitais masculino e na região das pernas. Na verdade, esses desvios ocorreram pelo fato de parte dessas regiões ser ocupada pelos materiais de construção do fantasma e pelos reforços de lucite que suportam esse fantasma. Portanto, um volume menor de material líquido equivalente ao tecido estava presente. Contudo, uma vez que o material de construção era lucite, não se espera que o decréscimo no volume aparente afete os resultados significativamente.

Resultados experimentais têm sido publicados nos quais o efeito do tamanho do órgão fonte na fração absorvida de energia tem sido estudado. Num dos trabalhos foram utilizados dois diferentes órgãos fontes (estômago e bexiga, cada um com cinco tamanhos diferentes, e com variação de um fator de 10 entre o maior e o menor tamanho) e dois radionuclídeos ( $^{137}\text{Cs}$  e  $^{60}\text{Co}$ )<sup>(24)</sup>. Medidas da fração absorvida foram feitas em diversos órgãos alvos no interior do fantasma e os

---

(\*) Um sinal positivo (+) indica que o valor para o fantasma físico é maior que o valor para o fantasma matemático. Inversamente um sinal negativo (-) indica que o fantasma físico é menor.

resultados foram comparados com os valores calculados pelo método de Monte Carlo. Essa comparação mostrou que, para as energias dos dois radionuclídeos acima, a variação da fração absorvida com o tamanho do órgão fonte é menor que 5%.

Outro trabalho sobre o efeito da diferença na massa dos órgãos sobre a fração absorvida de energia foi publicado por Ford.<sup>(15)</sup> Esse trabalho contém estimativas da fração absorvida específica para 11 energias e três tamanhos diferentes de glândula tireóide com um total de nove diferentes modelos desse órgão. As massas eram 10g, 20g e 30g e a forma foi mudada diminuindo ou aumentando, ou ainda cortando parte de um dos seus lóbulos. Neste estudo a tireóide era simultaneamente órgão fonte e órgão alvo. Conforme era previsto, as estimativas das frações absorvidas eram diferentes para os três tamanhos. Para a energia de 500 KeV, se a massa da tireóide era aumentada de 50% (supondo 20g como a massa referência), a estimativa da fração absorvida aumentava de 22%. Se a massa era reduzida de 50% a fração absorvida decrescia de cerca de 39%. Em 30 KeV, as estimativas correspondentes eram de 13% e 27% respectivamente, para a mesma variação em massa.

Snyder,<sup>(42)</sup> calculando a dose nas paredes da bexiga devido a radionuclídeos contidos na urina, observou uma redução de 25% na dose, quando a eliminação da bexiga aumentava de 500 ml/dia para 1000 ml/dia. Se a eliminação fosse

aumentada para 2000 ml/dia (um fator de 4 no volume) a dose nas paredes da bexiga decrescia de 50%.

Das considerações acima e notando que a máxima diferença em massa dos órgãos de interesse, no trabalho aqui desenvolvido, é menor que 1,7%, conclui-se que a influência dessa variação no resultado final é pequena. Em outras palavras, supondo-se uma proporcionalidade entre variação em volume e variação em fração absorvida de energia, verifica-se que o erro (ou limite superior do erro) é menor que 1%.

## 2. Conclusões

Os resultados deste trabalho apresentam dados que podem ser usados com maior confiança que aqueles fornecidos pelo fantasma similar do adulto pelas seguintes razões:

a) Se compararmos a figura I.1, com as figuras III.1 e III.2, e a figura I.2 com a III.3, pode-se ver claramente que a forma geral do corpo e do esqueleto do fantasma desenvolvido neste trabalho é mais representativa do corpo humano e do esqueleto que as formas correspondentes do fantasma obtido por redução do adulto. Este fato tem importância principalmente quando são feitas irradiações com raios-X, devido à blindagem causada pelo excesso de tecido entre a fonte de radiação e o órgão de interesse. Isto é verdade

especialmente para as extremidades superior e inferior do tronco e para a região do pescoço. Além disso, a distribuição espacial da radiação espalhada no interior do fantasma objeto deste trabalho, é mais representativa da situação real que o fantasma obtido do adulto.

b) As formas e posições dos órgãos são também mais realísticas que no fantasma similar do adulto (cérebro, pulmões, fígado, intestino delgado, intestino grosso, região dos órgãos genitais, etc.).

c) O esqueleto foi projetado tendo em mente as muitas aplicações que terá em dosimetria das radiações. Por exemplo, os ossos da cabeça foram divididos em várias regiões como o crânio, mandíbula, região dos dentes e região superior do rosto (esta última contendo as cavidades oculares e as fossas nasais), cujo conjunto compara-se muito bem com o seu similar humano. Isso não acontece com o fantasma obtido do adulto, pois, os ossos da cabeça são simplesmente definidos pela região entre dois elipsóides não concêntricos conforme mostra a figura I.2. Os detalhes dos ossos da cabeça foram elaborados de modo que os resultados sejam úteis na dosimetria de raios-X dentários e na investigação da dose no cristalino dos olhos. O conjunto das costelas foi também completamente redesenhado, tendo a forma geral de parte de um elipsóide, lembrando as costelas reais e tocando, na sua superfície interna, os pulmões como realmente acontece no

corpo humano. A coluna vertebral possui a parte cervical projetada de forma tal que, o eixo maior de sua secção transversal elíptica fique paralelo à linha imaginária que une os ombros, e o conjunto das partes torácica e lumbar forma um "S", como se verifica numa coluna vertebral real. A pelvis, sendo também completamente redesenhada, oferece uma blindagem parcial à bexiga em consequência de sua parte frontal (osso pubis) ocasionando o espalhamento normal da radiação nos órgãos importantes dessa região (ovários, testículos e útero), principalmente quando essa região é exposta à radiação externa. É claro que para fontes internas ao corpo, a radiação espalhada na pelvis e nos outros ossos do esqueleto são também importantes. As escápulas como os outros ossos do esqueleto, também possuem formas semelhantes à real, e são muito importantes no caso dos exames torácicos PA pelo motivo da blindagem parcial que elas oferecem aos pulmões. No fantasma do adulto, as regiões superiores dos fêmures e dos úmeros contêm uma mistura de medula óssea hematopoiética e não hematopoiética. As partes restantes dos braços e das pernas, ou sejam, as suas regiões inferiores, contêm somente medula óssea não hematopoiética. Contudo, no fantasma aqui desenvolvido há medula óssea hematopoiética nas duas regiões desses ossos (superiores e inferiores), e para ser mais realístico, os úmeros e os fêmures (representantes das partes superiores dos braços e das pernas, respectivamente) foram completamente remodelados. O restante dos ossos dos braços (ulnas, rádios, ossos das mãos e dos pulsos) foram incorpo-

rados nas suas regiões inferiores. O mesmo foi feito com relação aos ossos das pernas (tíbias, fíbulas, rôtulas e ossos dos tornozelos e dos pês). Essa distribuição foi proposital para que a medula óssea hematopoiética, contida nesses ossos, tivesse uma distribuição mais próxima da real, isto é, mais junto às extremidades inferiores dos membros.

Pelos motivos acima apresentados, pela comparação dos resultados obtidos neste trabalho com aqueles obtidos para o fantasma similar do adulto e pelo fato das medidas experimentais comprovarem, dentro dos erros analisados, os cálculos teóricos, conclui-se que as frações absorvidas específicas aqui apresentadas para a criança de 10 anos de idade são válidas e muito mais confiáveis que aquelas para o fantasma de modelo similar ao do adulto. Além disso, é conveniente salientar que essas frações terão grande aplicação não somente na medicina nuclear pediátrica, mas também, no campo geral da proteção radiológica pelo seu uso imediato, além dos muitos trabalhos que delas poderão surgir.

172  
-170

### SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS

- Estimativa da dose absorvida nos órgãos internos de crianças de 10 anos de idade devido à passagem de uma nuvem radioativa.
- Estimativa da dose absorvida pelos órgãos internos de uma criança de 10 anos de idade em consequência dos raios-X diagnósticos.
- Estimativa da dose genética em face aos vários tipos de exames radiodiagnósticos de crianças de 10 anos de idade.
- Estimativa da dose absorvida e da dose compromissada para as paredes da bexiga de crianças de 10 anos de idade em virtude da existência de radionuclídeos na urina.

173  
-171

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BAYLEY, W. Growth curves of height and weight by age for boys and girls scaled according to physical maturity. J. Pediat., 48:183, 1956.
2. BARDEEN, C.R. The height-weight index of build in relation to linear and volumetric proportions and surface-area of the body during post-natal development. Washington, Carnegie Institution of Washington, 1920. (Contribution to Embryology, vol. IX, n.27 to 46).
3. BORISOV, B.K. & MAREI, A.N. Weight parameters of adult human skeleton. Hlth Phys., 27(2):224-9, Aug. 1974.
4. BOYD, E. An introduction to human biology and anatomy for first year medical students. Denver, Child Research Council, 1952.
5. BOYD, E. The specific gravity of the human body. Hum. Biol., 5:646-72, 1933.
6. CAMERON, J.R.; SUNTHARALINGAM, N.; KENNEY, G.N. Thermo-luminescent dosimetry. Madison, University of Wisconsin Press, 1968.
7. CASTALDI, L. & VANNUCCI, D. Le misure antropometriche esterne e i pesi viscerali piu importanti considerati in funzione del sesso, età, statura e costituzione. Scritti Biolog., 1:1-151, 1927.
8. CHEN, W.L. An evaluation of the distribution of absorbed dose in child phantoms exposed to diagnostic medical x-rays. Atlanta, Georgia, Georgia Institute of Technology, 1977 (PhD Thesis).

9. COPPOLETTA, J.M. & WOLBACK, S.B. Body length and organ weights of infant and children. Am. J. Path., 9:55-70, 1933.
10. DEUS, S.F. & WATANABE, S. Intercomparison of photographic, thermoluminescent and radiophotoluminescent dosimeters. Health Phys. J., 28:793-9, 1975.
11. EMERY, J.L. & MITHAL, A. The weights of kidneys in late intra-uterine life and childhood. J. clin. Path., 13:490-3, 1960.
12. EVE, I.S. A review of the physiology of the gastrointestinal tract in relation to radiation doses from radioactive materials. Health Phys., 12:131-61, 1966.
13. FABRY, C. Schéma anatomo-physiologique du tractus gastro-intestinal, a prendre en consideration pour le calcul des niveaux de contamination radioactive. Brussels, Belgium, European Atomic Energy Community, 1963. (EUR-489f).
14. FISHER JR., J.L. & SNYDER, W.S. Variation of dose delivered by <sup>137</sup>Cs as a function of body size from infancy to adulthood. In HEALTH Physics Division annual progress report for period ending July 31, 1966. Oak Ridge, Tenn., Oak Ridge National Lab, Oct. 1966. p.221-8 (ORNL-4007).
15. FORD, M.R.; SNYDER, W.S.; WARNER, G.G. Variation of the absorbed fraction with shape and size of the thyroid. In: HEALTH Physics Division annual progress report for period ending June 30, 1975. Oak Ridge, Tenn., Oak Ridge National Lab., Sep. 1975. p.207-13. (ORNL-5046).
16. GARDNER, E.; GRAY, D.J.; D'RAHILLY, R. Anatomy; a regional study of human structure. 2.ed. Philadelphia, W.B. Saunders, 1963.

17. GARRY, S.M.; STANSBURY, P.S.; POSTON, J.W. Measurements of absorbed fractions for photon sources distributed uniformly in various organs of a heterogeneous phantom. In: HEALTH Physics Division annual progress report for period ending July 31, 1974. Oak Ridge, Tenn., Oak Ridge National Lab., Sep. 1974. p.33-9. (ORNL-4979).
18. GRAY, H. Anatomy of the human body. 27 ed. Philadelphia, Lea & Febiger, 1959.
19. GREENHOUSE JR., N.A.; MAILLIE, H.D.; MERMAGEN, H. A thermoluminescent microdosimetry system for the measurement of photon quality. Radiat. Res., 32:641-50, 1967.
20. HEIGHT and Weight of children in the United States, India and the United Arab Republic. Rockville, Maryland. U.S. Department of Health, Education and Welfare, Sep. 1970 (series 3, number 14).
21. JOHNS, H.E. & CUNNINGHAM, J.R. The physics of radiology. 3.ed. Springfield, Ill., Charles C. Thomas, 1971.
22. KROGMAN, W.M. Growth of man. Tabul. Biol., 20: 1-963, 1941, edited by H. Denzer, V. J. Koningsberger, and H. J. Vonk.
23. McCAMMON, R.W. Human growth and Development. Springfield, Ill., Charles C. Thomas, 1970.
24. MEI, N.H.; WARNER, G.G.; STANSBURY, P.S.; POSTON, J.W. Effect of source organ size on absorbed fraction distribution. In: HEALTH Physics Division annual progress report for period ending June 30, 1975. Oak Ridge, Tenn., Oak Ridge National Lab., Sep. 1975. p.234-8. (ORNL-5046).

25. MORGAN, K.Z. & TURNER, J.E. Principles of radiation protection. New York, John Wiley, 1968.
26. NELSON, W.E. Physical growth and development: textbook of pediatrics. Philadelphia, W.B. Saunders, 1959.
27. OSGOOD, E.E. Development and growth of hematopoietic tissues with a clinically practical method of growth analysis. Pediatrics, 15:733-51, 1955.
28. POSTON, J.W. (Comunicação pessoal). 1976.
29. PRYOR, H.B. Charts of normal body measurements and revised width-weight tables in graphic form. J.Pediat., 68:621, 1966.
30. ROSENSTEIN, M. Organ doses in diagnostic radiology. Rockville, Maryland, U.S. Department of Health, Education and Welfare, May 1976. (Hew Publication-(FDA)-76-8030).
31. SCAMMON, R.E. The developmental anatomy of the chest and the thoracic organs. In: MYERS, J.A., ed. The normal chest of the adult and the child. Baltimore, Williams and Wilkins, 1927. p.330-335.
32. SCAMMON, R.E. The growth of the human reproductive system. In: GREENWOOD, A.W., ed. Second international congress for sex research, London, 1930. ~~(s.n.t)~~ p.118.23.
33. SCAMMON, R.E. The measurement of the body in childhood. In: HARRIS, J.A.; JACKSON, C.M.; PETERSON, D.G.; SCAMMON, R.E., eds. The measurement of man. Minneapolis, University of Minnesota Press, 1930. p.173-215.
34. SCAMMON, R.E. Some graphs and tables illustrating the growth of the human stomach. Am. J. Dis. Child., 17:395-422, 1919.

35. SCHLEIEN, B. A review of determinations of radiation dose to the active bone marrow from diagnostic x-ray examination. Rockville, Maryland, U.S. Department of Health, Education and Welfare, Oct. 1973. (Publication (FDA)-74-8007).
36. SHUBERT, J. & LAPP, R.E. Radiation: what it is and how it can affect you. (s.l.), Viking, 1975.
37. SMIT, P.J. Anthropometric status of white swimmers from Pretoria. Med. J., 47:385-9, Mar. 1973.
38. SNYDER, W.S. (Comunicação pessoal). 1976.
39. SNYDER, W.S.; COOK, M.J.; NASSET, E.S.; KARHAUSEN, L.; HOWELLS, G.P.; TIPTON, I.H., eds. Report of the task group on reference man. Oxford, Pergamon, 1975. (ICRP Publication. Radiation Protection, 23).
40. SNYDER, W.S.; FORD, M.R.; WARNER, G.G. Estimation of dose and dose commitment to bladder wall from a radionuclide present in urine. In: HEALTH Physics Division annual progress report for period ending July 31, 1970. Oak Ridge National Lab., Oct. 1970. p.206-8 (ORNL-4584).
41. SNYDER, W.S.; FORD, M.R.; WARNER, G.G.; WATSON, S.B. A 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., Nov. 1974 (ORNL-5000).
42. SNYDER, W.S.; POSTON, J.W.; WARNER, G.G.; OWEN, L.W. Dose to a dynamic bladder for administered radionuclides. In: HEALTH Physics Division annual progress report for period ending July 31, 1974. Oak Ridge, Tenn., Oak Ridge National Lab., Sep. 1974 p.13-6. (ORNL-4979).

43. STANSBURY, P.S. Health and Safety Research Division manual for the x-ray facility in Building 2008. Oak Ridge, Tenn., Oak Ridge National Lab., Nov. 1977. (ORNL/TM-5923).
44. STANSBURY, P.S. In-phantom spectrometry of medical diagnostic x-ray. Oak Ridge, Tenn., Oak Ridge National Lab., Oct. 1977. (ORNL/TM-5873).
45. STOUdT, H.W.; DAMON, A.; McFARLAND, R.A. Heights and weights of white Americans. Hum. Biol., 32:334, 1960.
46. WAGNER JR., H.N. Nuclear medicine. (s.l.), HP Publishing, 1975.
47. WARWICK, R. & WILLIAMS, P.L. Gray's anatomy. 35.ed. Philadelphia, W.B. Saunders, 1973.
48. WELLMAN, H.N.; KEREIAKES, J.G.; BRANSON, B.M. Total and partial body counting of children for radiopharmaceutical dosimetry data. In: CLOUTIER, R.J.; EDWARDS, C.L.; SNYDER, W.S., eds. Medical radionuclides: radiation dose and effects: proceedings of a symposium held at the Oak Ridge Associated Universities, December 8-11, 1969. Oak Ridge, Tenn., United States Atomic Energy Commission, Jun. 1970. p.133-56. (AEC Symposium series 20; CONF 691212).
49. WOLANSKI, N. A new graphic method for the evaluation of the tempo and harmony of physical growth of children. Hum. Biol., 33:284, 1961.
50. WOODARD, H.Q. & Holodny, E. A summary of the data of Mechanik on the distribution of human bone marrow. Physics Med. Biol., 5(1):57-9, Jul. 1960.