



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE  
DE SÃO PAULO

**MEDIDA DO PERFIL DE DOSE NO ALUMÍNIO, IRRADIADO  
COM RAIOS GAMA DE CAPTURA DE NÊUTRONS  
TÉRMICOS, UTILIZANDO O DOSÍMETRO  
TERMOLUMINESCENTE  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$**

**CLAUDIO ANTONIO FEDERICO**

**Dissertação apresentada como parte  
dos requisitos para obtenção do Grau  
de Mestre em Ciências na Área de  
Tecnologia Nuclear - Aplicações.**

**Orientador:  
Dr. Luiz Paulo Geraldo**

**São Paulo  
2002**

# **INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

## **MEDIDA DO PERFIL DE DOSE NO ALUMÍNIO, IRRADIADO COM RAIOS GAMA DE CAPTURA DE NÊUTRONS TÉRMICOS, UTILIZANDO O DOSÍMETRO TERMOLUMINESCENTE $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$**

**CLAUDIO ANTONIO FEDERICO**



Dissertação apresentada como parte dos  
requisitos para obtenção do grau de Mestre  
em Tecnologia Nuclear - Aplicações

Orientador:

Dr. Luiz Paulo Geraldo

**SÃO PAULO**

**2002**

A meus pais José (em memória) e Diomar, por  
sua dedicação e ao meu filho Claudio, em quem  
deposito todas as minhas esperanças.

## AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Estudos Avançados (IEAv), do Centro Técnico Aeroespacial (CTA), pela oportunidade de continuar a minha formação profissional e por todo apoio ao longo destes anos.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP), pelos cursos ministrados e por ter possibilitado a realização de grande parte dos experimentos.

Ao Dr. Luiz Paulo Geraldo pela orientação, profissionalismo e paciência durante o desenvolvimento desta dissertação.

Ao Dr. Odair Lelis Gonzalez, pelo apoio, desenvolvimento dos programas computacionais e excelentes sugestões ao longo de todo o trabalho.

Ao Dr. Alexandre D. Caldeira pelo desenvolvimento dos programas computacionais e pela ajuda e incentivo nos momentos mais difíceis.

À Dra. Linda V. E. Caldas e à Dra. Leticia L. C. Rodrigues pelos ensinamentos, apoio e discussões sobre dosimetria termoluminescente.

Ao Dr. Wilson J. Vieira pelo apoio nas simulações computacionais.

Ao amigo M.Sc. Renato Semmler, pelo apoio sempre solícito na preparação e manutenção do aparato experimental no reator.

Ao amigo M.Sc. Wagner Aguiar de Oliveira pela compreensão das minhas ausências no SPR do CTA a fim de que pudesse desenvolver este trabalho.

Às amigas M.Sc. Leda S. Yanagihara Rigolon e M.Sc. Maria Cecília Conceição Évora pelo apoio irrestrito quando necessário.

À Ana Cristina S. Ciavdar, pela ajuda e pela compreensão quando de minhas dificuldades e ausências.

Aos amigos Claudemir B. Bonato e Wilson P. Arantes pelo apoio e incentivo.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

**ÍNDICE**

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>iii</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b>	<b>vii</b>
<b>RESUMO</b>	<b>viii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>ix</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivo	3
1.3 Roteiro	4
<b>2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	<b>5</b>
2.1 Introdução	5
2.2 Fundamentos de Dosimetria	5
2.3 Determinação da dose absorvida a partir do fluxo	7
2.4 Termoluminescência	13
<b>3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>15</b>
3.1 Metodologia	15
3.2 O material dosimétrico	16
3.3 Obtenção da curva de emissão termoluminescente	16
3.4 Tratamento térmico	18
3.5 Determinação do campo de radiação de uma fonte de $^{60}\text{Co}$ para a calibração do dosímetro	19
3.6 Calibração dos dosímetros	21
3.7 Descrição do arranjo experimental de fótons de captura	23

<b>3.8 O porta-dosímetro</b>	<b>28</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>29</b>
<b>4.1 Resultados experimentais</b>	<b>29</b>
<b>4.2 Comparação com cálculo teórico da dose absorvida</b>	<b>47</b>
<b>5 CONCLUSÕES</b>	<b>52</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>53</b>
<b>APÊNDICE</b>	<b>57</b>
<b>ANEXO 1</b>	<b>60</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 2.1</b>	<b>Curva de dose e kerma em função da profundidade no meio.</b>	<b>12</b>
<b>FIGURA 2.2</b>	<b>Curva de emissão TL do CaSO<sub>4</sub>:Dy com Gaussiana ajustada.</b>	<b>14</b>
<b>FIGURA 3.1</b>	<b>Intensidade do campo de radiação gama da fonte de <sup>60</sup>Co em função da distância ao detector.</b>	<b>20</b>
<b>FIGURA 3.2</b>	<b>Retas ajustadas aos dados experimentais obtidos para 15 pastilhas dosimétricas pertencentes ao lote A.</b>	<b>22</b>
<b>FIGURA 3.3</b>	<b>Distribuição de frequência do coeficiente angular das retas ajustadas aos dados experimentais das 90 pastilhas dosimétricas utilizadas neste trabalho.</b>	<b>22</b>
<b>FIGURA 3.4</b>	<b>Bandeja de acrílico, contendo as pastilhas dosimétricas.</b>	<b>23</b>
<b>FIGURA 3.5</b>	<b>Suporte empregado para fixação da fonte de <sup>60</sup>Co.</b>	<b>23</b>
<b>FIGURA 3.6</b>	<b>Arranjo experimental para produção e utilização de fótons de captura, mostrando o local de irradiação do porta-dosímetro contendo as pastilhas TLD (amostra).</b>	<b>24</b>
<b>FIGURA 3.7</b>	<b>Espectro de raios gama de captura de nêutrons térmicos no alvo de Alumínio, após atenuação pelos filtros de nêutrons do canal BH-12.</b>	<b>26</b>
<b>FIGURA 3.8</b>	<b>Espectro de raios gama de captura de nêutrons térmicos no alvo de Cromo, após atenuação pelos filtros de nêutrons do canal BH-12.</b>	<b>26</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 2.1</b>	<b>Curva de dose e kerma em função da profundidade no meio.</b>	<b>12</b>
<b>FIGURA 2.2</b>	<b>Curva de emissão TL do <math>\text{CaSO}_4:\text{Dy}</math> com Gaussiana ajustada.</b>	<b>14</b>
<b>FIGURA 3.1</b>	<b>Intensidade do campo de radiação gama da fonte de <math>^{60}\text{Co}</math> em função da distância ao detector.</b>	<b>20</b>
<b>FIGURA 3.2</b>	<b>Retas ajustadas aos dados experimentais obtidos para 15 pastilhas dosimétricas pertencentes ao lote A.</b>	<b>22</b>
<b>FIGURA 3.3</b>	<b>Distribuição de frequência do coeficiente angular das retas ajustadas aos dados experimentais das 90 pastilhas dosimétricas utilizadas neste trabalho.</b>	<b>22</b>
<b>FIGURA 3.4</b>	<b>Bandeja de acrílico, contendo as pastilhas dosimétricas.</b>	<b>23</b>
<b>FIGURA 3.5</b>	<b>Suporte empregado para fixação da fonte de <math>^{60}\text{Co}</math>.</b>	<b>23</b>
<b>FIGURA 3.6</b>	<b>Arranjo experimental para produção e utilização de fótons de captura, mostrando o local de irradiação do porta-dosímetro contendo as pastilhas TLD (amostra).</b>	<b>24</b>
<b>FIGURA 3.7</b>	<b>Espectro de raios gama de captura de nêutrons térmicos no alvo de Alumínio, após atenuação pelos filtros de nêutrons do canal BH-12.</b>	<b>26</b>
<b>FIGURA 3.8</b>	<b>Espectro de raios gama de captura de nêutrons térmicos no alvo de Cromo, após atenuação pelos filtros de nêutrons do canal BH-12.</b>	<b>26</b>



<b>FIGURA 3.9</b>	<b>Intensidade do feixe em corte horizontal.</b>	<b>27</b>
<b>FIGURA 3.10</b>	<b>Intensidade do feixe em corte vertical.</b>	<b>27</b>
<b>FIGURA 3.11</b>	<b>Suporte (porta-dosímetro), com visualização das posições de alojamento das pastilhas.</b>	<b>28</b>
<b>FIGURA 4.1</b>	<b>Dose por contagem do SPND para radiação gama proveniente do canal, porta-alvos e invólucros dos alvos (alvo “branco”).</b>	<b>29</b>
<b>FIGURA 4.2</b>	<b>Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Índio.</b>	<b>32</b>
<b>FIGURA 4.3</b>	<b>Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Samário.</b>	<b>33</b>
<b>FIGURA 4.4</b>	<b>Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Itérbio.</b>	<b>33</b>
<b>FIGURA 4.5</b>	<b>Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Sódio.</b>	<b>34</b>
<b>FIGURA 4.6</b>	<b>Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Potássio.</b>	<b>34</b>
<b>FIGURA 4.7</b>	<b>Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Háfnio.</b>	<b>35</b>
<b>FIGURA 4.8</b>	<b>Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Carbono.</b>	<b>35</b>
<b>FIGURA 4.9</b>	<b>Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Enxofre.</b>	<b>36</b>

<b>FIGURA 4.10</b>	<b>Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Silício.</b>	<b>36</b>
<b>FIGURA 4.11</b>	<b>Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Manganês.</b>	<b>37</b>
<b>FIGURA 4.12</b>	<b>Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Ítrio.</b>	<b>37</b>
<b>FIGURA 4.13</b>	<b>Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Alumínio.</b>	<b>38</b>
<b>FIGURA 4.14</b>	<b>Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Titânio.</b>	<b>38</b>
<b>FIGURA 4.15</b>	<b>Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Berílio.</b>	<b>39</b>
<b>FIGURA 4.16</b>	<b>Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Selênio.</b>	<b>39</b>
<b>FIGURA 4.17</b>	<b>Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Vanádio.</b>	<b>40</b>
<b>FIGURA 4.18</b>	<b>Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Nitrogênio.</b>	<b>40</b>
<b>FIGURA 4.19</b>	<b>Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Zinco.</b>	<b>41</b>
<b>FIGURA 4.20</b>	<b>Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Ferro.</b>	<b>41</b>

<b>FIGURA 4.21</b>	<b>Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Cobre.</b>	<b>42</b>
<b>FIGURA 4.22</b>	<b>Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Chumbo.</b>	<b>42</b>
<b>FIGURA 4.23</b>	<b>Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Cromo.</b>	<b>43</b>
<b>FIGURA 4.24</b>	<b>Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Níquel.</b>	<b>43</b>
<b>FIGURA 4.25</b>	<b>Curva de ETPC em função da energia média.</b>	<b>45</b>
<b>FIGURA 4.26</b>	<b>Comparação dos dados experimentais de dose absorvida com o resultado obtido teoricamente para o alvo de alumínio.</b>	<b>50</b>
<b>FIGURA 4.27</b>	<b>Comparação dos dados experimentais de dose absorvida com o resultado obtido teoricamente para o alvo de cromo.</b>	<b>50</b>

**ÍNDICE DE TABELAS**

<b>TABELA 2.1</b>	<b>Alcance de elétrons e atenuação do feixe primário para várias energias de radiações gama incidentes.</b>	<b>11</b>
<b>TABELA 3.1</b>	<b>Características dos alvos geradores de raios gama de captura.</b>	<b>25</b>
<b>TABELA 4.1</b>	<b>Coefficientes do ajuste da função semi-empírica para cada alvo utilizado.</b>	<b>44</b>
<b>TABELA 4.2</b>	<b>Valores de <math>R(E)</math> e <math>\mu(E)</math> utilizados para o cálculo de alcance CSDA corrigido.</b>	<b>46</b>
<b>TABELA 4.3</b>	<b>Resultados do teste de qui-quadrado aplicado ao ajuste do alcance e do alcance corrigido aos dados experimentais, com 23 graus de liberdade.</b>	<b>47</b>
<b>TABELA 4.4</b>	<b>Dose em função da espessura para os espectros do Al e Cr em comparação com o cálculo para fótons monocromáticos com energia igual à energia média do feixe.</b>	<b>51</b>

**MEDIDA DO PERFIL DE DOSE NO ALUMÍNIO, IRRADIADO COM RAIOS  
GAMA DE CAPTURA DE NÊUTRONS TÉRMICOS, UTILIZANDO O  
DOSÍMETRO TERMOLUMINESCENTE  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$**

**Claudio Antonio Federico**

**RESUMO**

Radiação gama com energias maiores que 1,25 MeV são usualmente encontradas em ambientes de reatores, aceleradores de partículas e campos de radiação de origem cósmica. Nestas energias, a resposta de um dosímetro varia fortemente com a espessura de material absorvedor, até atingir um valor máximo conhecido como espessura de equilíbrio de partículas carregadas.

O objetivo principal do presente trabalho foi a determinação experimental do perfil de dose absorvida por uma amostra de alumínio, para várias energias de feixes de raios gama, de forma a obter uma relação entre a energia média do campo de radiação gama e a espessura de equilíbrio de partículas carregadas para o alumínio.

Os dosímetros foram irradiados com radiação gama produzida pela captura de nêutrons térmicos em 23 materiais alvos no arranjo experimental montado no canal tangencial do reator do IPEN-CNEN/SP.

Na determinação da camada de equilíbrio de partículas carregadas, foi ajustada aos dados experimentais uma função semi-empírica que permitiu obter a espessura de ETPC (Equilíbrio Transitório de Partículas Carregadas) para cada espectro de radiação gama utilizado neste trabalho, com energia média variando no intervalo de 3,26 a 7,85 MeV.

Os resultados experimentais do presente trabalho permitiram obter uma relação entre a energia média do campo de radiação gama e a espessura de ETPC, que apresenta uma excelente concordância com o alcance corrigido dos elétrons gerados naquela energia.

**MEASUREMENT OF DOSE PROFILE IN ALUMINUM, IRRADIATED WITH THERMAL NEUTRON CAPTURE GAMMA RAYS, BY USING THE TERMOLUMINESCENT DOSIMETER  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$**

**Claudio Antonio Federico**

**ABSTRACT**

Gamma radiation with energies greater than 1.25 MeV are usually produced in reactor environments, particle accelerators and in cosmic radiation fields. For these energies, the response of a dosimeter heavily vary with the absorber material thickness, up to attain a maximum value named as charged particle equilibrium thickness.

The main goal of this paper was the experimental determination of the absorbed dose profile in an aluminum sample for several energies of gamma ray beam, in order to obtain a relationship between the average energy of the gamma radiation field and the charged particle equilibrium thickness.

The dosimeters were irradiated with gamma radiation produced by thermal neutron capture in 23 target materials in the experimental arrangement mounted at the tangential beam hole of the IPEN-CNEN/SP reactor.

For the determination of the charged particle equilibrium thickness, it was fitted to the experimental data a semi-empirical function which allowed to obtain the thickness of CTPE ( Charged Particle Transient Equilibrium ) for each gamma radiation spectrum used in this work, with average energy varying in the interval from 3.26 to 7.85 MeV.

The experimental results of the present paper allowed to obtain a relationship between average energy of the radiation field and the CTPE thickness, which presents an excellent agreement with the corrected range for electrons produced in that energy.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

O fenômeno da luminescência é conhecido desde tempos remotos e pode ser observado em organismos luminosos, matéria orgânica e minerais. Dentre os diversos modos de excitação da luminescência destaca-se a termoluminescência (ou luminescência termicamente estimulada) que vem sendo largamente utilizada como método para determinação da dose absorvida por materiais irradiados<sup>(1)</sup>. A dosimetria por meio de materiais termoluminescentes é comumente utilizada para dosimetria pessoal, de área e em materiais irradiados, bem como para dosimetria de fontes de radiação naturais, industriais e médicas, onde, usualmente, as energias médias envolvidas situam-se abaixo ou próximas à energia da radiação gama emitida pelo  $^{60}\text{Co}$  (1,25 MeV). No entanto, há várias situações de particular interesse para a dosimetria, onde há a ocorrência de raios gama com energias maiores do que aqueles emitidos pelo  $^{60}\text{Co}$ , destacando-se:

1. Em ambientes de reatores<sup>(2)</sup>, onde há, em vários locais, a geração de raios gama por captura de nêutrons térmicos em diversos materiais, tais como: nos materiais estruturais e moderador. Por exemplo, os raios gama provenientes da reação de captura  $^{16}\text{O}(n,\gamma)^{17}\text{O}$ , na água<sup>(2)</sup>, cuja energia do raio gama emitido é da ordem de 6 MeV.
2. Em ambientes de aceleradores lineares de elétrons, onde há a produção de radiação de “bremsstrahlung”, com um espectro em energia contínuo, estendendo-se até a energia  $E_0$  do elétron do feixe primário do acelerador<sup>(3)</sup>.

Na dosimetria gama em campos mistos de interesse aeroespacial<sup>1</sup>, em proteção radiológica, bem como, em outras aplicações tecnológicas, onde é feita a medida da dose absorvida por materiais irradiados em energias maiores que a da fonte de cobalto (1,25 MeV)<sup>(4,5,6)</sup>, é usualmente exigida uma descrição adequada da dependência da resposta do dosímetro termoluminescente (TLD) com a energia da radiação gama e com a profundidade ou espessura do material irradiado.

Quanto ao uso de TLDs como detectores de radiação no campo da física nuclear, em medidas que requerem uma calibração razoavelmente precisa dos detectores, pode-se citar o trabalho de Varhue e Willianson<sup>(7)</sup>. Estes autores utilizaram dosímetros de LiF, envoltos em Teflon para a determinação do fluxo de raios gama de captura de nêutrons térmicos produzidos por alvos de Al, Cr, Co, Cu, Fe, Ni, N, S e Ti nos experimentos sobre medidas de secções de choque fotonucleares para os núcleos de <sup>232</sup>Th e <sup>238</sup>U, no intervalo de energia de excitação entre 5 e 11 MeV.

Em centros de pesquisa, clínicas de radioterapia, indústrias de alta tecnologia, bem como em reatores nucleares, é comum a presença de radiação gama e raios x com energias maiores do que 1,25 MeV. Sendo assim, o conhecimento do comportamento da dose absorvida por um dosímetro nestas condições é de interesse não só para a melhoria do conhecimento dos processos e critérios para dosimetria pessoal e de área, mas também para o entendimento do comportamento da dose no interior de materiais irradiados por tais fontes de radiação gama.

---

<sup>1</sup> Uma quantidade significativa de trabalhos abordando este tema pode ser encontrada nos *Proceedings of a Workshop on RADIATION EXPOSURE OF CIVIL AIRCREW, Luxembourg, June 25-27,1991*, publicado na revista Radiation Protection Dosimetry, vol. 48, nº 1, 1993.



## 1.2 Objetivo

O objetivo do presente trabalho foi a determinação experimental do perfil de dose absorvida em um corpo de alumínio, por meio do dosímetro termoluminescente de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ , utilizando feixes colimados de radiação gama de captura de nêutrons térmicos com energias médias variando no intervalo entre 3,26 e 7,85 MeV.

A medida da dose absorvida em função da espessura de alumínio, utilizado como filtro, para diversos alvos de captura permite a determinação da camada de equilíbrio de partículas carregadas no intervalo de energia acima citado. É, portanto, o principal objetivo do presente trabalho obter uma relação entre a energia do campo de radiação gama e a espessura de equilíbrio de partículas carregadas para o alumínio de forma similar àquela obtida por Scaff<sup>(8)</sup> no caso do tecido humano.

Uma aplicação importante para a dosimetria de radiação gama de uma forma geral é que o método desenvolvido no presente trabalho permite determinar a energia média de um campo de radiação gama desconhecido. A partir do conhecimento da energia média do espectro de raios gama e da dose absorvida no dosímetro é possível calcular a dose equivalente.

Uma vez em condição de equilíbrio eletrônico, a dose absorvida pode ser relacionada com a fluência de fótons por meio de modelos apropriados de cálculo dosimétrico<sup>(9)</sup>. É também um objetivo adicional do presente trabalho, verificar a

concordância de tais cálculos (bem como os valores dos parâmetros utilizados) com as medidas experimentais realizadas neste trabalho.

### **1.3 Roteiro**

No capítulo 2 são abordados os modelos teóricos relevantes utilizados na descrição dos fenômenos envolvidos no presente trabalho bem como na interpretação dos dados experimentais.

No capítulo 3 é discutido o procedimento experimental adotado para a realização deste trabalho, bem como as metodologias e os aparatos experimentais utilizados na calibração, irradiação e leitura dos dosímetros.

No capítulo 4 são apresentados os resultados experimentais obtidos neste trabalho na forma de gráficos e tabelas, bem como os cálculos utilizados nos ajustes teóricos efetuados.

No capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões do presente trabalho.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 Introdução

Neste capítulo são abordados os modelos teóricos relevantes utilizados na descrição dos fenômenos envolvidos neste trabalho bem como na interpretação dos resultados experimentais.

### 2.2 Fundamentos de Dosimetria

A dosimetria, de forma resumida, pode ser entendida como a medida da dose absorvida, ou taxa de dose absorvida, resultante da interação da radiação ionizante com a matéria<sup>(9)</sup>. Um dosímetro pode ser considerado, de acordo com a teoria da cavidade<sup>(9)</sup>, como sendo constituído por um volume sensível  $V$  preenchido com um meio  $g$ , e circundado por uma parede constituída por um outro meio  $w$ .

A relação entre a dose absorvida no meio  $w$  (material circundante) e a dose absorvida no meio  $g$  (dosímetro) é dada por meio da teoria da cavidade.

As aproximações envolvidas na teoria da cavidade dependem, fundamentalmente, da análise das dimensões da cavidade em relação ao alcance dos elétrons secundários gerados pela radiação primária no meio circundante à cavidade<sup>(10)</sup>.

Pode-se admitir, basicamente, três situações diferentes:

- a) A cavidade é pequena em relação ao alcance dos elétrons.

- b) Uma situação intermediária onde as dimensões da cavidade são da ordem de grandeza do alcance dos elétrons.
- c) A cavidade é grande em relação ao alcance dos elétrons.

Na primeira situação, sendo a cavidade pequena em relação ao alcance dos elétrons, resulta que, praticamente, não há perturbação do espectro de partículas fluindo no meio. Neste caso, a relação entre a dose na cavidade  $D_{cav}$  (meio  $g$ ) e a dose no meio circundante  $D_{meio}$  (meio  $w$ ) é dada pela relação entre o poder de freamento de colisão de massa na cavidade  $S_{cav}$  e no meio  $S_{meio}$  (conforme teoria de Bragg-Gray)<sup>(9)</sup>, descrito por  $S_{meio}^{cav}$ , ou seja:

$$\frac{D_{cav}}{D_{meio}} = \frac{S_{cav}}{S_{meio}} = S_{meio}^{cav} . \quad (2.1)$$

Na terceira situação, que é oposta à primeira, sendo a cavidade suficientemente grande, se estabelece um espectro de partículas dentro da cavidade diferente daquele no meio circundante. Neste caso, a relação entre as doses na cavidade e no meio é dada pela relação entre os coeficientes de absorção de energia dos respectivos locais<sup>(10)</sup>:

$$\frac{D_{cav}}{D_{meio}} = \frac{(\mu_{en}/\rho)_{cav}}{(\mu_{en}/\rho)_{meio}} . \quad (2.2)$$

Na situação intermediária, o espectro de partículas no meio é perturbado pela cavidade, mas não chega a estabelecer um comportamento determinado, como na terceira situação. Assim, para avaliar a relação entre a dose no meio e no dosímetro,

nessa situação, é utilizada a teoria que foi proposta por *Burlin*<sup>(10)</sup>. Esta teoria estabelece a seguinte relação entre as doses na cavidade e no meio:

$$\frac{D_{cav}}{D_{meio}} = d S_{meio}^{cav} + (1-d) \frac{(\mu_{en}/\rho)_{cav}}{(\mu_{en}/\rho)_{meio}}, \quad (2.3)$$

onde  $S_{meio}^{cav}$  é a razão do poder de freamento da cavidade e do meio circundante,  $(\mu_{en})$  são os coeficientes de absorção de energia da cavidade e do meio, e o parâmetro “ $d$ ” é dado por:

$$d = \frac{1 - \exp(-Bx)}{Bx}, \quad (2.4)$$

onde  $B$  é o coeficiente de massa efetivo de atenuação dos elétrons da cavidade (meio g) e  $x$  é o percurso médio dos elétrons na cavidade.

### 2.3 Determinação da Dose absorvida a partir do fluxo

A dose absorvida ( $D$ ) pode ser definida como o valor esperado da energia concedida pela radiação à matéria por unidade de massa em um determinado ponto<sup>(9)</sup>, ou seja:

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm}. \quad (2.5)$$

Como a dose absorvida na matéria é devida, essencialmente, às interações das partículas secundárias carregadas geradas no meio e não diretamente à radiação

primária incidente, não é possível relacionar a dose absorvida com a fluência de um determinado campo de radiação indiretamente ionizante.

Entretanto, sob determinadas condições, a dose absorvida pode ser calculada a partir da grandeza kerma ( $K$ ), definida por meio da quantidade *energia cinética transferida* para as partículas carregadas do meio  $\varepsilon_{tr}$ <sup>(9)</sup>, e para um ponto de interesse no meio ela pode ser expressa como:

$$K = \frac{d\varepsilon_{tr}}{dm}, \quad (2.6)$$

onde  $\varepsilon_{tr}$  é o valor esperado da energia transferida no volume infinitesimal  $dV$  cuja massa é  $dm$ .

O parâmetro kerma relaciona-se com a fluência de energia  $\Psi(E)$  da radiação incidente através do coeficiente de transferência de energia  $(\mu_{tr})_{E,Z}$ , e para um determinado espectro de fluência de energia dos fótons, com distribuição diferencial  $\Psi'(E)$ , pode ser escrita como:

$$K = \int_{E=0}^{E_{max}} \Psi'(E) \left( \frac{\mu_{tr}}{\rho} \right)_{E,Z} dE. \quad (2.7)$$

A energia cinética recebida pelas partículas carregadas produzidas na interação da radiação gama é perdida no meio de acordo com mecanismos que incluem interações coulombianas com elétrons atômicos do material absorvedor e interações radiativas com o campo coulombiano do núcleo atômico.

Denominando-se por kerma de colisão ( $K_c$ ) o primeiro caso, e por kerma de radiação ( $K_r$ ) o segundo, onde se inclui também a energia cinética perdida pelos pósitrons por meio de radiação gama produzida no fenômeno da aniquilação, pode-se expressar o parâmetro kerma como:

$$K = K_c + K_r. \quad (2.8)$$

Analogamente ao caso do parâmetro kerma, pode-se definir o kerma de colisão, utilizando o coeficiente de absorção de energia  $(\mu_{en})_{E,Z}$  para um determinado espectro de energia e material absorvedor, por meio da equação:

$$K_c = \int_{E=0}^{E_{max}} \Psi'(E) \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{E,Z} dE. \quad (2.9)$$

No caso de um espectro discreto formado por linhas de energias  $E_i$  e intensidades  $I(E_i)$ , como o espectro de raios gama de captura de nêutrons térmicos, a integral deve ser substituída pela somatória sobre as  $N$  linhas do espectro:

$$\begin{aligned} K_c &= \sum_{i=1}^N \Psi_{part}(E_i) E_i \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{E_i,Z} = \\ K_c &= \Psi_{total} \sum_{i=1}^N I(E_i) E_i \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{E_i,Z} \end{aligned} \quad (2.10)$$

onde  $\Psi_{total}$  é o fluxo total de fótons (fótons/cm<sup>2</sup>).

A relação entre a dose absorvida e o Kerma de colisão pode ser estabelecida de maneira direta, ou seja:

$$D = K_c. \quad (2.11)$$

A equação (2.11) somente é válida quando o ponto onde se deseja determinar a dose estiver em condição de Equilíbrio de Partículas Carregadas (EPC), e esta situação depende das seguintes condições:

- a composição atômica do meio deve ser homogênea, dentro de uma distância de, no mínimo, igual ao alcance dos elétrons gerados a partir do ponto onde se deseja determinar a dose;
- a densidade do meio deve ser homogênea;
- deve ocorrer um campo uniforme de radiação indiretamente ionizante e
- não deve existir uma distribuição elétrica não homogênea ou a presença de campos magnéticos.

Para energias baixas (da ordem de até centenas de keV), a atenuação do feixe primário, na profundidade ou espessura correspondente ao alcance dos elétrons gerados na superfície, poderia ser considerada desprezível, de forma a admitir-se, pelo menos a princípio, a obtenção de EPC em profundidades iguais ao alcance dos elétrons na direção de propagação do feixe de radiação. Para energias altas (acima de 2 ou 3 Mev), o alcance dos elétrons aumenta com a energia, mais acentuadamente, do que a penetração do feixe primário fazendo com que a atenuação do feixe primário na profundidade correspondente ao alcance dos elétrons gerados na superfície não possa ser desprezada. São observadas atenuações de até 12,7 % na profundidade



correspondente ao alcance máximo dos elétrons, para um feixe de 10 MeV, conforme é ilustrado na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Alcance de elétrons e atenuação do feixe primário para várias energias de radiações gama incidentes<sup>(11,12)</sup>.

Energia do feixe incidente primário (MeV)	Alcance dos elétrons na condição (CSDA)* (mm no Al)	Rendimento de produção de radiação de freamento	Atenuação do feixe primário na profundidade de alcance dos elétrons (%)
0,5	0,84	4,35E-03	1,9
1	2,05	7,64E-03	3,3
1,25	2,68	9,31E-03	3,9
2	4,54	1,45E-02	5,1
3	6,92	2,17E-02	6,4
6	13,62	4,44E-02	9,3
8	17,77	5,96E-02	11,0
10	21,72	7,45E-02	12,7
12,5	26,41	9,28E-02	14,7

\* “Continuous Slowing Down Approximation” (CSDA) considerando-se o caso limite onde os elétrons são gerados com a energia correspondente à energia máxima do feixe incidente.

A situação onde a atenuação do feixe primário não pode ser desprezada em relação ao alcance dos elétrons gerados pelo mesmo é denominada Equilíbrio Transitório de Partículas Carregadas (ETPC)<sup>(9)</sup>, e nessa região a dose é proporcional ao kerma de colisão. Conforme é mostrado na figura 2.1, a curva de dose aumenta com a profundidade do material, até tornar-se paralela às curvas referentes ao kerma ( $K$ ) e ao kerma de colisão ( $K_c$ ), e seu máximo ocorre usualmente no ponto onde a curva  $D$  cruza a curva  $K_c$ .

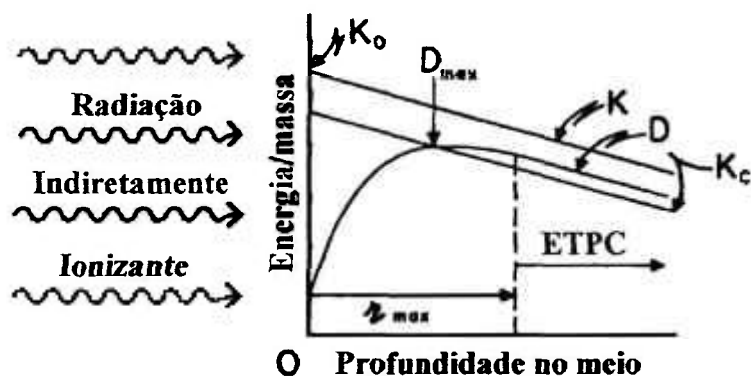


Figura 2.1 – Curva de dose e kerma em função da profundidade no meio.

Supondo que não haja ocorrência de interações radiativas e ignorando a presença de fótons espalhados, a relação entre a dose e o kerma de colisão, conforme proposto por Roesch<sup>(9)</sup>, é dada por:

$$D = K_c e^{\mu' \bar{x}}, \quad (2.12)$$

ou, ainda,

$$D = K_c \left( 1 + \mu' \bar{x} + \frac{(\mu' \bar{x})^2}{2!} + \dots \right), \quad (2.13)$$

onde  $\mu'$  representa a inclinação comum às curvas  $D$ ,  $K$  e  $K_c$  em profundidades superiores à profundidade de ETPC e  $\bar{x}$  representa o alcance médio das partículas carregadas na direção do feixe primário.

Da mesma forma, pode-se esperar que a profundidade onde ocorre o EPC é maior do que o alcance médio das partículas carregadas na direção do feixe. Aplicando-se o fator de correção proposto por Roesch<sup>(13)</sup>, a espessura onde ocorre o EPC ( $R_{EPC}$ ), pode ser expressa por:

$$R_{EPC} = \bar{x}e^{\mu\bar{x}} \quad (2.14)$$

## 2.4 Termoluminescência

A termoluminescência é o fenômeno básico considerado neste trabalho para a determinação da dose absorvida. O processo consiste, resumidamente, na excitação por meio de radiação ionizante de um fósforo termoluminescente; a energia da radiação (ou parte dela) é armazenada pelo material e quando este é aquecido a uma temperatura apropriada, tal energia é liberada sob a forma de luz<sup>(1)</sup>. Para o material dosimétrico utilizado neste estudo (CaSO<sub>4</sub>:Dy), a intensidade de luz emitida  $I(T_0, T)$  numa determinada temperatura  $T$  é dada pela equação (2.15), que baseia-se em uma taxa de aquecimento ( $\beta$ ) do material constante e em uma cinética de segunda ordem<sup>(14,15)</sup>,

$$I(T_0, T) = n(T_0)^2 \alpha' \exp(-E/kT) \left[ 1 + (n(T_0)\alpha' / \beta) \int_{T_0}^T \exp(-E/kT') dT' \right]^{-2}, \quad (2.15)$$

onde  $\alpha'$  e  $E$  representam o fator de frequência e a energia da armadilha termoluminescente e  $n(T_0)$  corresponde ao número de armadilhas ocupadas no início do aquecimento.

A presença de mais de um tipo de armadilha termoluminescente irá resultar em múltiplos picos de emissão de luz. Na figura 2.2 é apresentada como ilustração a curva de emissão TL do dosímetro de CaSO<sub>4</sub>:Dy irradiado com radiação gama, onde dois picos de emissão TL ocorrem abaixo da temperatura de 400 °C. Nesta figura é também

mostrado o ajuste efetuado de uma função gaussiana, a qual aproxima-se à forma de  $I(T_0, T)$ , descrita pela equação (2.15).

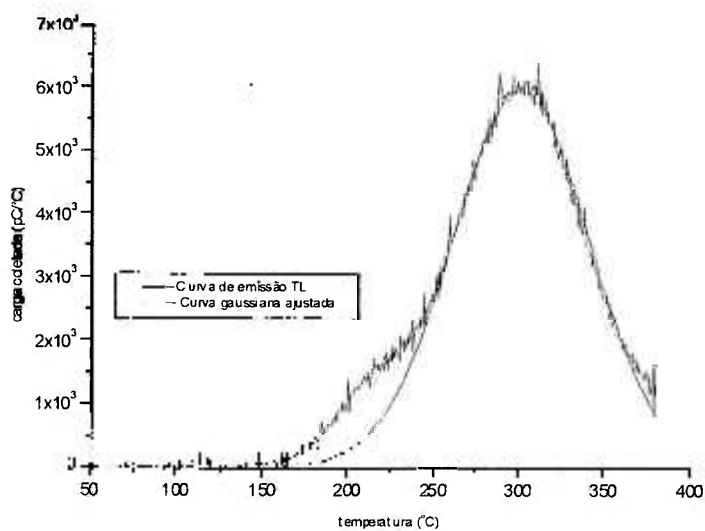


Figura 2.2 – Curva de emissão TL do  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  com Gaussiana ajustada.

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Metodologia

Os dosímetros termoluminescentes empregados neste trabalho foram irradiados com feixes de radiação gama produzidos pela captura de nêutrons térmicos em diversos alvos, no canal tangencial do reator de pesquisa IEA-R1 do IPEN, conforme descrito na seção 3.7.

Em cada irradiação foi utilizado um conjunto de 12 dosímetros posicionados no interior de um arranjo de placas de alumínio, de forma a obter-se medidas de dose em profundidades ou espessuras no intervalo de 0 a 33,1 mm.

Para cada alvo de captura foram realizadas em média 3 irradiações do dispositivo dosimétrico. Em todas as irradiações, a potência do reator foi monitorada por meio de um detector de nêutrons térmicos do tipo SPND (“Self Powered Neutron Detector”) posicionado junto aos alvos de captura.

As leituras de emissão termoluminescente dos dosímetros irradiados foram efetuadas no Laboratório de Dosimetria Termoluminescente do IEAv/CTA. O fator de calibração (dose x área do pico de emissão TL) foi determinado para cada dosímetro em um campo conhecido de radiação gama do  $^{60}\text{Co}$ . Os detalhes dos materiais utilizados e do procedimento experimental adotado neste trabalho são descritos a seguir.

### 3.2 O material dosimétrico

Neste trabalho, o dosímetro utilizado foi um tipo de pastilha produzida no IPEN<sup>(15)</sup>, composta por  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ , com aproximadamente 0,1 mol por cento de Dy, em uma matriz de teflon. As pastilhas são de formato circular, com massa aproximada de 50 mg, diâmetro de 6 mm e espessura de 0,8 mm.

Apesar da alta seção de choque do Disprósio para nêutrons térmicos e epitérmicos, os resultados de *K. Ayyangar e col.*<sup>(16)</sup> indicam que o dosímetro de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  possui uma sensibilidade relativamente baixa para nêutrons, tornando-se um material adequado para dosimetria de radiação gama em campos mistos<sup>(16,17,18)</sup>. Neste trabalho, tal característica é importante pois foi feita a sua utilização no reator IEA-R1, em um local onde nêutrons térmicos e rápidos estão sempre presentes. Entretanto, no arranjo experimental foram tomados os cuidados necessários para a blindagem de nêutrons provenientes tanto do ambiente como do canal.

A resposta do dosímetro de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  à radiação gama é tida como linear no intervalo de 10  $\mu\text{Gy}$  até 40 Gy e a sua reutilização em até 20 ciclos de irradiação, leitura e tratamento térmico não parece induzir variação sensível na eficiência do dosímetro<sup>(19)</sup>.

### 3.3 Obtenção da curva de emissão termoluminescente

A curva de emissão termoluminescente foi obtida por meio da leitora de dosímetros termoluminescentes marca VICTOREEN, modelo 2800M pertencente ao Laboratório de Dosimetria Termoluminescente do Instituto de Estudos Avançados

(IEAv/CTA). O processo de leitura consiste em um pré aquecimento da pastilha a 65 °C, seguido de um aquecimento à uma taxa constante de 7°C/s em um ciclo de 45 segundos, com a prancheta suporte submetida a um fluxo de Nitrogênio de, aproximadamente, 400 ml/min. O espectro de carga coletada pela fotomultiplicadora (carga x tempo de aquecimento) é transferido a um microcomputador tipo PC, para registro e análise, por meio de uma porta serial e um programa de aquisição de dados desenvolvido no IEAv especialmente para esta finalidade (programa RADIO<sup>1</sup>).

A informação dosimétrica das pastilhas pode ser obtida por meio da altura ou da área do pico do espectro de emissão termoluminescente. Neste trabalho optou-se pelo método que utiliza a área sob o maior pico da curva de emissão termoluminescente para a obtenção da informação dosimétrica, por ser um método relativamente insensível às eventuais flutuações que poderiam causar variações na forma (largura e altura) e na posição do pico principal.

Uma curva de emissão termoluminescente típica desse dosímetro (ver figura 2.2 na seção 2.4) apresenta dois picos de emissão. O pico de maior temperatura foi o pico escolhido para se extrair a informação dosimétrica, por possuir uma estabilidade maior à temperatura ambiente.

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia específica para a análise das curvas de emissão termoluminescente do CaSO<sub>2</sub>:Dy, a qual se baseia no fato de que, para o caso em questão, o pico dosimétrico apresenta uma razoável simetria bilateral, e sua forma se aproxima razoavelmente bem a de uma função Gaussiana.

---

<sup>1</sup> Programa que efetua a captura dos dados de emissão termoluminescente por meio de uma porta serial e grava os dados em um arquivo tipo texto.

A correção de eficiência da fotomultiplicadora e o ajuste da gaussiana às curvas de emissão TL foram efetuados por meio dos programas TLD03<sup>2</sup>, TLD04<sup>3</sup>, TLD05<sup>4</sup> e TLD06<sup>5</sup>, desenvolvidos em linguagem FORTRAN na Divisão de Energia Nuclear do IEAv/CTA. Um fluxograma mostrando a seqüência de processamento de dados com os programas citados é apresentado no Anexo 1.

A contribuição da emissão térmica produzida pela prancheta suporte da pastilha é facilmente eliminada por meio da subtração de um espectro de fundo (espectro branco), obtido pela leitura de uma pastilha não irradiada (recém saída do tratamento térmico).

### 3.4 Tratamento térmico

O tratamento térmico das pastilhas foi feito em um forno marca EDG modelo 3000, onde a temperatura é monitorada por meio da leitura apresentada em um display digital e também por meio de um termopar tipo J acoplado a um medidor Marca IOPE, modelo IOPTHERM41. Neste trabalho o tratamento térmico utilizado foi a 300 °C durante um período de 13 horas. Esta temperatura é a usualmente empregada neste tipo de tratamento e o período longo de 13 h tem a finalidade de se obter uma melhor reprodutibilidade nas leituras do espectro de luz. Após o tratamento as pastilhas foram retiradas juntamente com o seu suporte, e colocadas sempre sobre uma mesma chapa metálica em um ambiente de temperatura controlada. Este procedimento teve como

---

<sup>2</sup> modifica a formatação das informações gravadas provenientes da fotomultiplicadora.

<sup>3</sup> efetua as correções de eficiência para as leituras das pastilhas dosimétricas, baseados numa luz de referência

<sup>4</sup> ajusta os parâmetros da gaussiana ao pico dosimétrico.

<sup>5</sup> subtrai a leitura do espectro de fundo das leituras das pastilhas, efetua a conversão de leitura em dose por meio da calibração previamente realizada e ordena os dados em função da posição no arranjo.



objetivo principal obter uma taxa de resfriamento aproximadamente reprodutível para todas as pastilhas utilizadas neste trabalho.

### **3.5 Determinação do campo de radiação gama produzido por uma fonte de $^{60}\text{Co}$ para a calibração do dosímetro**

Para efetuar a calibração da resposta do dosímetro em relação a dose absorvida de radiação, foi utilizada uma fonte de  $^{60}\text{Co}$  com uma atividade de 61 MBq (1,65 mCi), exposta em geometria  $4\pi$ . Os dosímetros foram irradiados a uma distância de 30 cm da fonte.

A intensidade do campo de radiação gama da fonte foi medida por meio de uma câmara de ionização marca PTW, modelo LS-01, acoplada a um eletrômetro marca PTW-UNIDOS, calibrado em termos de kerma no ar, pelo Laboratório de Calibração do IPEN/CNEN/SP.

Na distância utilizada para a irradiação dos dosímetros (30cm), as dimensões da câmara não são desprezíveis e conseqüentemente, os resultados das medidas deveriam ser corrigidos. Para contornar este problema, foram efetuadas várias medidas com a câmara, em diversas distâncias da fonte, de forma a obter-se o perfil do campo de radiação gama.

As medidas efetuadas com a câmara foram corrigidas para as condições de temperatura e pressão padrão<sup>6</sup>. Para efetuar esta correção, a temperatura foi monitorada,

---

<sup>6</sup> PTW-UNIDOS Instruction manual.

a cada medida, por meio de um termômetro digital Lutron, modelo HT-3001C e a pressão foi obtida por meio de um barômetro do tipo Torricelli.

Neste trabalho, foram realizadas, no mínimo, cinco medidas para cada distância à fonte, que variaram no intervalo entre 0,3 m a 2,5 m. Na figura 3.1, é mostrado o ajuste, realizado pelo método dos mínimos quadrados<sup>(20)</sup> aos dados obtidos experimentalmente, da função que representa a diminuição da intensidade do campo com o inverso do quadrado da distância.

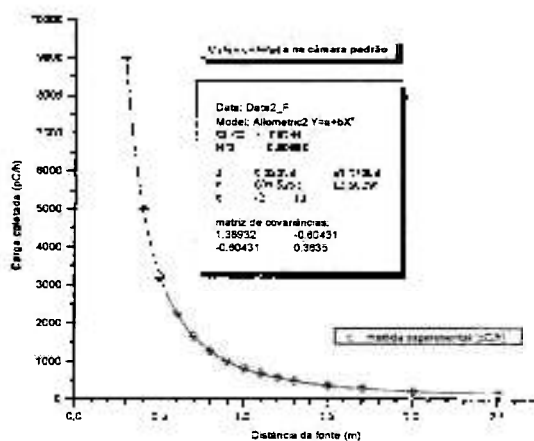


Figura 3.1 – Intensidade do campo de radiação gama da fonte de  $^{60}\text{Co}$  em função da distância ao detector.

De acordo com este ajuste, o valor da leitura da câmara (carga coletada) em pC/h em qualquer ponto de interesse, pode ser obtido por meio da equação:

$$Y = 6,02 + 801,52X^{-2}, \quad (3.1)$$

onde  $X$  representa a distância fonte-detector (em metros),  $Y$  a resposta obtida na câmara (em pC/h) e o fator constante (6,02 pC/h) corresponde à contribuição de fundo devido

ao espalhamento na sala. Aplicando-se o fator de calibração para o kerma no ar ( $N_k$ ) fornecido pelo IPEN/CNEN para a câmara utilizada ( $N_k=2,49 \times 10^4 \pm 0,02 \times 10^4$  Gy/C) bem como a correção para o decaimento radioativo da fonte desde a data de calibração até o instante da medida  $t$ , (utilizando como valor da meia-vida do  $^{60}\text{Co}$   $1925,12 \pm 0,46$  dias<sup>7</sup>) obtém-se a expressão real da taxa de kerma no ar, no ponto de interesse:

$$K_{ar} = Y N_k e^{\frac{\ln 2 t}{T_{1/2}}} . \quad (3.2)$$

As incertezas associadas a cada parâmetro do ajuste e as respectivas covariâncias foram levadas em consideração na determinação do erro final de  $Y$  e, conseqüentemente de  $K_{ar}$ , por meio da formulação geral de propagação de erros com parâmetros correlacionados<sup>(21)</sup>.

### 3.6 Calibração dos dosímetros

Neste trabalho foi feito um controle individual da eficiência de detecção de cada pastilha dosimétrica, identificando-a por meio de uma numeração seqüencial e ajustando-se uma reta de calibração para cada pastilha utilizada, conforme ilustrado na figura 3.2, para um dos lotes utilizados. Este procedimento permitiu uma redução na incerteza no cálculo final da dose em relação à calibração por lote, devida à largura do intervalo de eficiência do lote. Na figura 3.3 é mostrada a distribuição dos coeficientes angulares (parâmetro  $b$ ) das retas ajustadas para um lote de dosímetros selecionados aleatoriamente.

<sup>7</sup> <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Halfife/halfife.htm>, 30/06/2000.

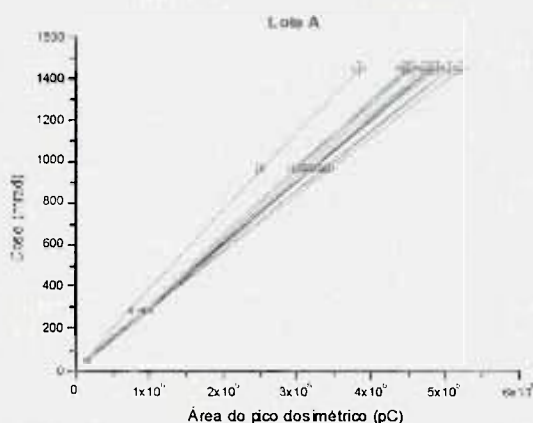


Figura 3.2 – Retas ajustadas aos dados experimentais obtidos para as 15 pastilhas dosimétricas pertencentes ao lote A.

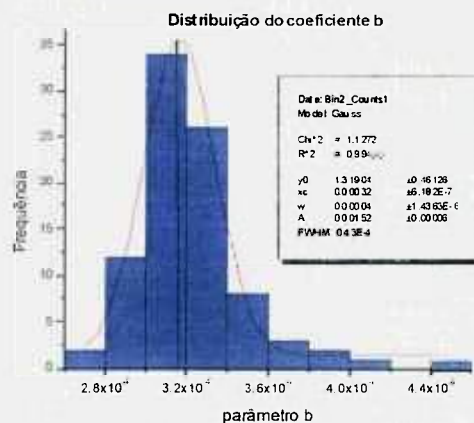


Figura 3.3 – Distribuição de frequência do coeficiente angular das retas ajustadas aos dados experimentais das 90 pastilhas dosimétricas utilizadas neste trabalho.

A largura da distribuição de frequência do coeficiente angular, mostrada na figura 3.3, indica uma incerteza associada à calibração por lote da ordem de 9 %, enquanto que o ajuste de reta de calibração para cada dosímetro individualmente reduz a incerteza a 3 % em média.

Para a calibração dos dosímetros, as pastilhas foram expostas ao campo de radiação gama da fonte de  $^{60}\text{Co}$  sobre uma bandeja côncava de acrílico (figura 3.4), a qual por sua vez foi posicionada para a irradiação na base do suporte de fixação da fonte (figura 3.5).



Figura 3.4 - Bandeja de acrílico, contendo as pastilhas dosimétricas



Figura 3.5 - Suporte empregado para fixação da fonte de  $^{60}\text{Co}$ .

A bandeja côncava foi confeccionada de forma a posicionar simultaneamente todas as pastilhas a serem irradiadas a uma distância de 30 cm da fonte. Uma cobertura de acrílico, com espessura em torno de  $350 \text{ mg/cm}^2$ , correspondente à camada de equilíbrio eletrônico na energia do  $^{60}\text{Co}$ , foi utilizada sobre as pastilhas em todas as irradiações.

Os dosímetros foram irradiados em doses aproximadas de 0,5; 3; 10 e 15 mGy no ar (ou 50, 300, 1000 e 1500 mrad), convertidas para a dose absorvida no dosímetro por meio da equação 2.2, abrangendo dessa forma os valores típicos das doses medidas neste trabalho para as radiações gama de captura.

### 3.7 Descrição do arranjo experimental de fótons de captura

Para a obtenção de feixes colimados de radiação gama com energias no intervalo de interesse foi utilizado o arranjo experimental instalado no canal tangencial (BH-12) do reator nuclear IEA-R1 do IPEN/CNEN<sup>(22)</sup> (figura 3.6).

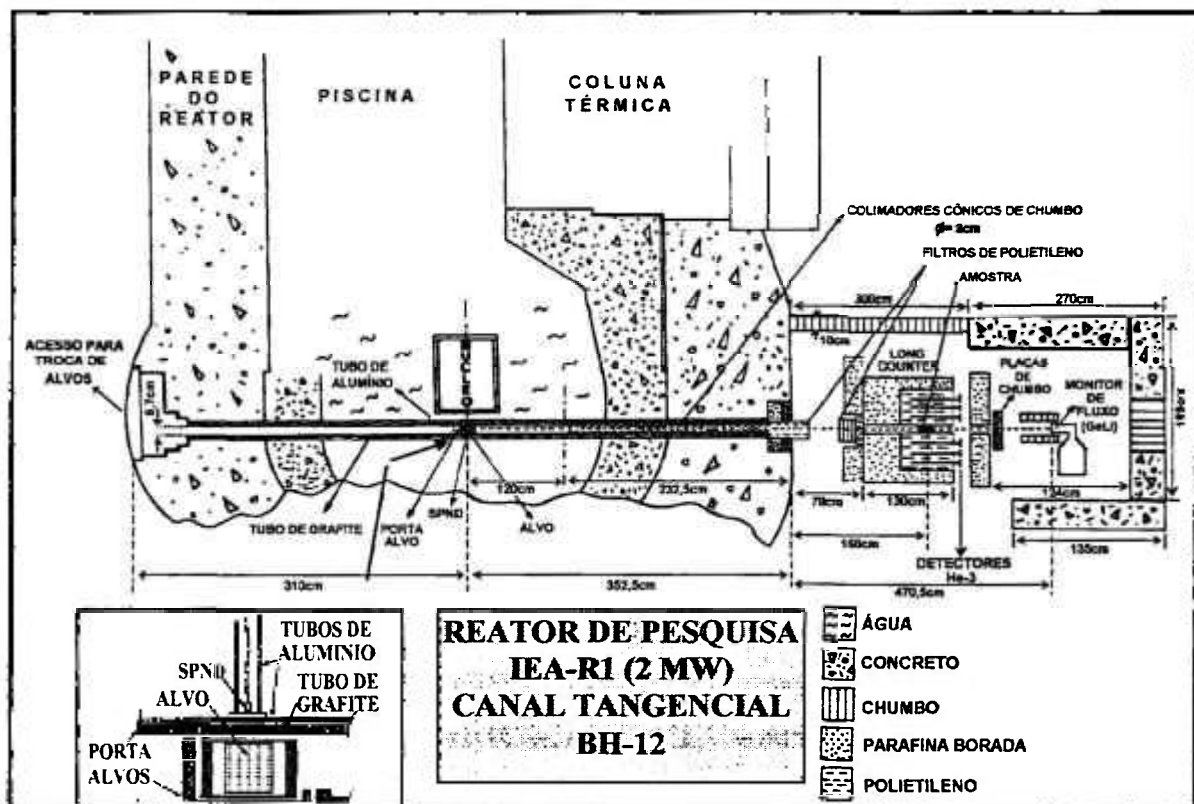


Figura 3.6 - Arranjo experimental para produção e utilização de fótons de captura, mostrando o local de irradiação do porta-dosímetro contendo as pastilhas TLD (amostra)<sup>(22)</sup>.

O feixe de radiação gama é obtido por meio de um processo de captura radiativa de nêutrons térmicos em materiais alvos, quando colocados próximos ao núcleo do reator. O alvo é posicionado manualmente dentro do canal por meio de hastes inseridas pela extremidade oposta àquela na qual se extrai o feixe de radiação. A operação de colocação ou retirada dos alvos de captura é sempre efetuada quando reator encontra-se desligado. As características dos alvos utilizados neste trabalho são apresentadas na tabela 3.1<sup>(23,24)</sup>.

Tabela 3.1 – Características dos alvos geradores de raios gama de captura.

Alvo de captura	Composição química do alvo	Massa do alvo (g)	Energia média <sup>(1)</sup> (keV)
In	In (metal)	1580	3275,16
Sm	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	610	3558,80
Yb	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1410	3964,84
Na	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1120	3999,86
K	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	1260	4184,01
Hf	HfO <sub>2</sub>	1400	4247,57
C	C (grafite)	1352	4496,88
S	S <sub>2</sub>	1500	4503,77
Si	Si (sólido policristalino)	1153	4682,59
Mn	Mn(metal)	3000	5395,54
Y	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1500	5399,82
Al	Al (metal)	2260	5433,17
Ti	Ti (metal)	2280	5582,88
Be	BeO	1500	5617,03
Se	SeO <sub>2</sub>	1320	5869,26
V	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1440	5911,04
N	C <sub>3</sub> N <sub>3</sub> (NH <sub>2</sub> ) <sub>3</sub>	1500	5921,91
Zn	Zn (metal)	3560	5983,07
Fe	Fe (metal)	2330	6643,09
Cu	Cu (metal)	3060	6907,32
Pb	Pb (metal)	5000	7337,44
Cr	Cr (metal)	2670	7376,13
Ni	Ni (metal)	3620	7850,02

<sup>(1)</sup> A energia média é a média das energias das linhas do espectro de captura ponderada pelas respectivas intensidades.

A utilização alternada de diferentes alvos permitiu a obtenção de feixes de radiação gama com diferentes espectros e conseqüentemente diferentes energias médias. Nas figuras 3.7 e 3.8 são mostrados como exemplos os espectros de captura dos alvos

de Alumínio e Cromo, após a passagem pelos filtros de nêutrons do canal tangencial. As doses utilizadas neste trabalho situaram-se entre 1 mGy e 15 mGy, com taxas de dose que variaram de 1 mGy/h até 10 mGy/h dependendo do alvo utilizado.

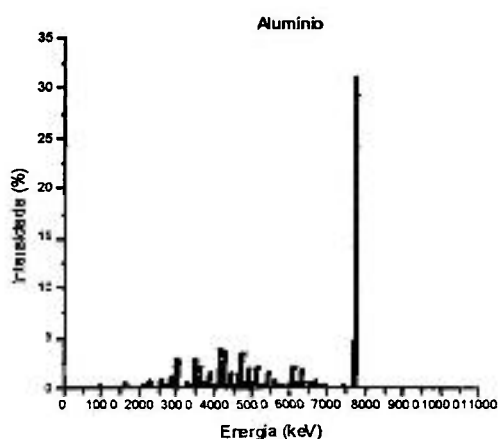


Figura 3.7 – Espectro de raios gama de captura de nêutrons térmicos no alvo de Alumínio, após atenuação pelos filtros de nêutrons do canal BH-12.

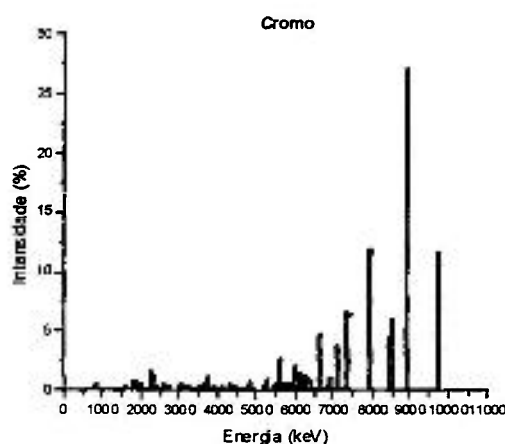


Figura 3.8 – Espectro de raios gama de captura de nêutrons térmicos no alvo de Cromo, após atenuação pelos filtros de nêutrons do canal BH-12.

Para os alvos utilizados neste trabalho, as linhas com energias abaixo de 1 MeV são bastante atenuadas pelos filtros de nêutrons do arranjo experimental. Entretanto, foram consideradas no cálculo todas as linhas do espectro acima de 100 keV, ainda que fortemente atenuadas.

O feixe de radiação gama de captura radiativa emitido pelo alvo é direcionado para o local de irradiação dos dosímetros por meio de um arranjo de colimadores cônicos de chumbo, montados dentro do canal BH-12, com comprimento total em torno de 2 m e diâmetro interno aproximado de 3 cm.



A homogeneidade do feixe de radiação na posição de irradiação dos dosímetros, em sua seção transversal, foi medida neste trabalho por meio da irradiação de um filme radiográfico e leitura da densidade óptica da imagem obtida. A intensidade relativa do feixe em função da distância radial ao seu centro, em cortes horizontal e vertical, são apresentadas nas figuras 3.9 e 3.10, indicando razoável homogeneidade dentro de um diâmetro de 3 cm. Tal resultado está em excelente acordo com medidas anteriores<sup>(23,24)</sup>, realizadas neste arranjo, utilizando um detector de NaI(Tl).

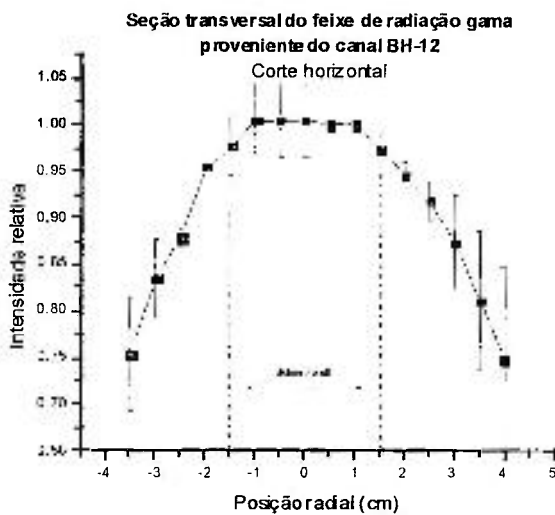


Figura 3.9 – Intensidade do feixe em corte horizontal.

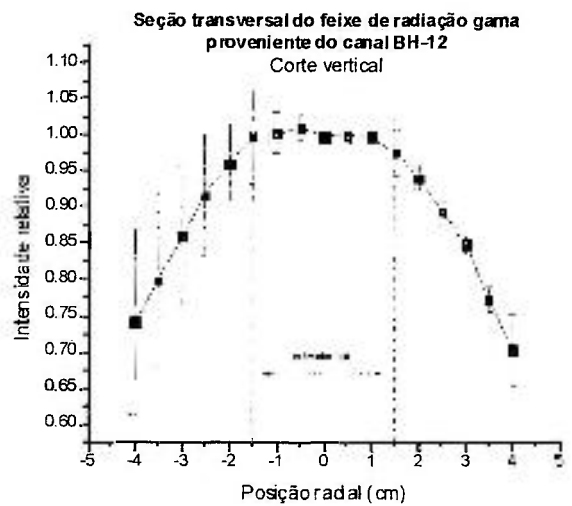


Figura 3.10 – Intensidade do feixe em corte vertical.

A irradiação das pastilhas termoluminescentes com a radiação gama de captura proveniente do alvo conversor foi feita em uma das extremidades do canal tangencial BH4-12 do Reator IEA-R1 (a posição da amostra é vista na figura 3.6). O suporte contendo os dosímetros (porta-dosímetro, vide figura 3.11) foi colocado dentro da blindagem de um detector do tipo Long Counter, após um conjunto de filtros compostos por polietileno e parafina borada com 52,2cm e 8,4cm de espessura, respectivamente.

Estes filtros foram utilizados para minimizar a contaminação do feixe com nêutrons provenientes do reator, conforme foi discutido anteriormente.

### 3.8 O porta dosímetro

O suporte das pastilhas termoluminescentes foi projetado de forma a garantir a localização das pastilhas dentro de um raio máximo em torno de 1,3 cm do eixo central do feixe de radiação gama de captura, onde verificou-se que o mesmo é aproximadamente homogêneo. As pastilhas (em número máximo de doze por irradiação) foram posicionadas no suporte de maneira que cada uma, ficasse atrás de uma determinada espessura de alumínio, que variou entre 0 e 33 mm, sem a interferência de uma pastilha sobre a outra, ou seja, desalinhadas. As espessuras de alumínio seleccionadas para a inserção das pastilhas foram as seguintes: 0; 1,1; 2,2; 3,3; 5,5; 7,7; 9,9; 12,1; 16,5; 22,0; 27,5 e 33,1 mm. Uma vista 3D do suporte é apresentada na figura 3.11, mostrando alguns dos locais de posicionamento das pastilhas.

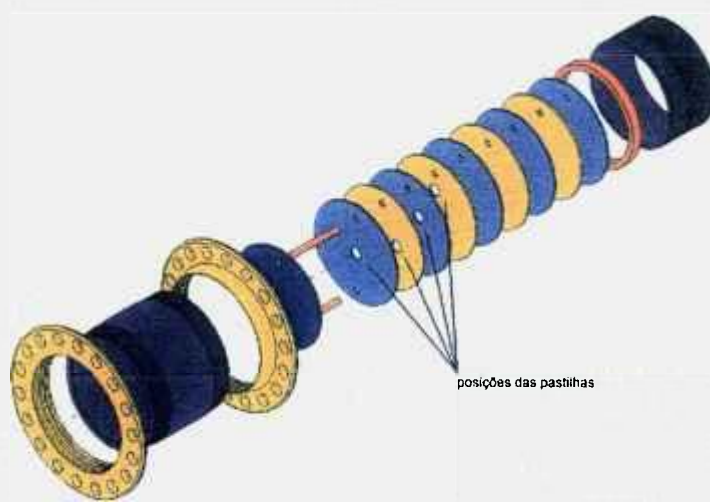


Figura 3.11 – Suporte (porta-dosímetro), com visualização das posições de alojamento das pastilhas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Resultados experimentais

Foram realizadas 3 irradiações dos conjuntos de dosímetros para todos os alvos de captura listados na tabela 3.1. A contribuição da radiação de fundo do canal, do porta-alvos e do invólucro dos alvos foi medida utilizando um alvo branco e o valor médio obtido foi subtraído dos resultados para cada alvo. Na figura 4.1 é mostrada a dose registrada pelas pastilhas TLD em várias profundidades de alumínio, produzida pela radiação de fundo com o alvo “branco”. Os valores de dose foram normalizados pelas contagens do monitor de potência do reator (SPND).

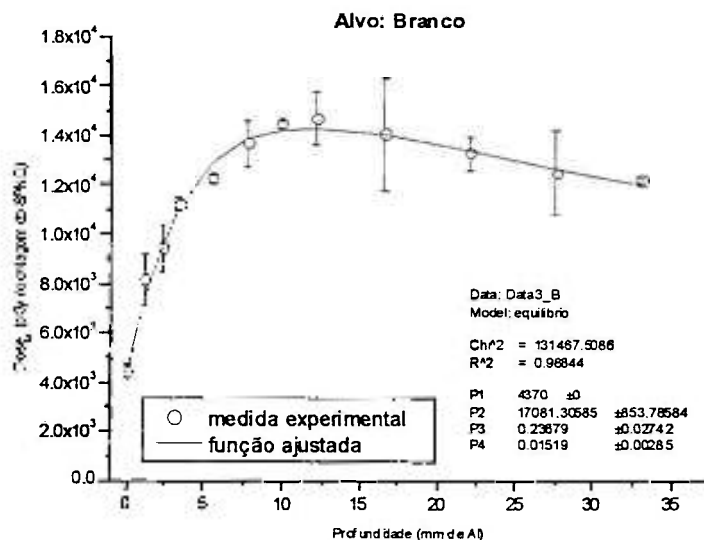


Figura 4.1 – Dose por contagem do SPND para radiação gama proveniente do canal, porta-alvos e invólucros dos alvos (alvo “branco”).

O tratamento dos dados experimentais foi processado utilizando os programas TLD03, TLD04, TLD05 e TLD06 que possibilitam a análise do espectro de emissão TL (ajuste de pico) incorporando os fatores de correção da eficiência da fotomultiplicadora e de calibração dos dosímetros a partir de um banco de dados, permitindo assim a determinação da dose medida para cada dosímetro TL, já normalizada pelas contagens do SPND.

A dose absorvida ( $d$ ) em cada dosímetro TLD para cada fóton incidente do espectro de captura é dada por:

$$d = \frac{\frac{D}{t_I}}{\frac{\Psi_{total}}{t_I}} = \frac{\dot{D}}{\phi_{total}^I} \quad (4.1)$$

onde  $D$  é a dose absorvida em pGy,  $\Psi_{total}$  é a fluência total de fótons e  $t_I$  é o tempo de irradiação dos dosímetros. Nesta situação  $\dot{D}$  é a taxa de dose e  $\phi_{total}^I$  é o fluxo total de fótons (fóton/cm<sup>2</sup>s).

O fluxo de radiação gama atua como um fator de normalização, não sendo necessária sua medida para a determinação da espessura de equilíbrio de partículas carregadas e portanto, ele não foi considerado nos cálculos finais para a obtenção do perfil de dose no alumínio

A energia média ( $\bar{E}$ ) para cada alvo foi calculada por meio da equação:

$$\bar{E} = \sum_{i=1}^N E_i I(E_i), \quad (4.2)$$

onde  $N$  representa o número de linhas do espectro de captura,  $E_i$  representa a energia de cada linha e  $I(E_i)$  representa a intensidade relativa no dosímetro normalizada para fluxo unitário e calculada por meio da equação 4.3,

$$I(E_i) = \frac{I_{aten}(E_i)}{\sum_{i=1}^N I_{aten}(E_i)} \quad (4.3)$$

e,

$$I_{aten}(E_i) = I_{cap}(E_i) e^{-\sum_{j=1}^N \mu_j(E_i) x_j} F_{av}(E_i), \quad (4.4)$$

onde  $I_{cap}(E_i)$  representa a intensidade dos raios gamas de captura expressa em fótons/100 nêutrons capturados, extraída das referências 23 e 25. O termo exponencial da equação 4.4 refere-se à atenuação do feixe gama produzido pelos filtros de nêutrons, onde  $\mu_j(E_i)$  é o coeficiente de atenuação total do material  $j$  na energia  $E_i$ ,  $x_j$  representa a espessura do material  $j$  e o termo  $F_{av}(E_i)$  é o fator de auto-absorção do alvo de captura de nêutrons térmicos, dado pela equação 4.5<sup>(23)</sup>,

$$F_{av}(E_{ij}) = \frac{1 - \exp(-\mu_{av}(E_{ij})x_{av})}{\mu_{av}(E_{ij})x_{av}}. \quad (4.5)$$

Para a obtenção da camada de equilíbrio de partículas carregadas, foi ajustada aos dados experimentais, uma expressão semi-empírica para a dose absorvida em função da espessura ( $x$ ) de Alumínio:

$$d = d_0 + (d_1 - d_0) \left(1 - e^{-\mu_1 x}\right) e^{-\mu_2 x}, \quad (4.6)$$

onde o termo  $(1 - e^{-\mu_1 x})$  está relacionado ao crescimento (“build-up”) de partículas próximo à interface do material e o termo exponencial  $e^{-\mu_2 x}$  corresponde à atenuação

do feixe primário, sendo  $\mu_2$  o coeficiente de atenuação de massa para fótons no alumínio.

No ajuste foram fixados o coeficiente  $\mu_2$  e o termo  $d_0$  correspondentes ao coeficiente de atenuação do fluxo de fótons no alumínio e à dose registrada pelo dosímetro não blindado, respectivamente. Os outros parâmetros do ajuste ( $d_1$  e  $\mu_1$ ) foram deixados livres. O ponto máximo de cada curva, obtido igualando-se a primeira derivada da função a zero, representa a espessura de equilíbrio de partículas carregadas para a energia média do referido alvo. Os resultados dos ajustes são apresentados nas figuras 4.2 a 4.24 para os alvos utilizados neste trabalho. Os parâmetros da função ajustada são apresentados na tabela 4.1, onde são listados os valores da camada de equilíbrio transitório de partículas carregadas (ETPC), obtidos para cada espectro de captura a partir da função ajustada, e a energia média associada a cada espectro.

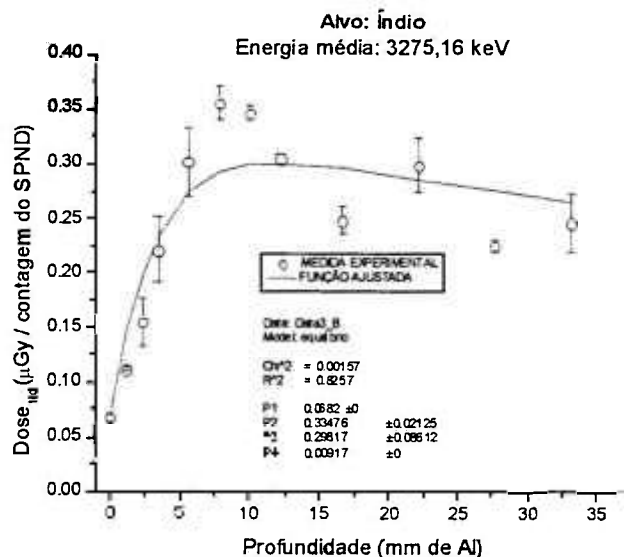


Figura 4.2 – Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Índio.

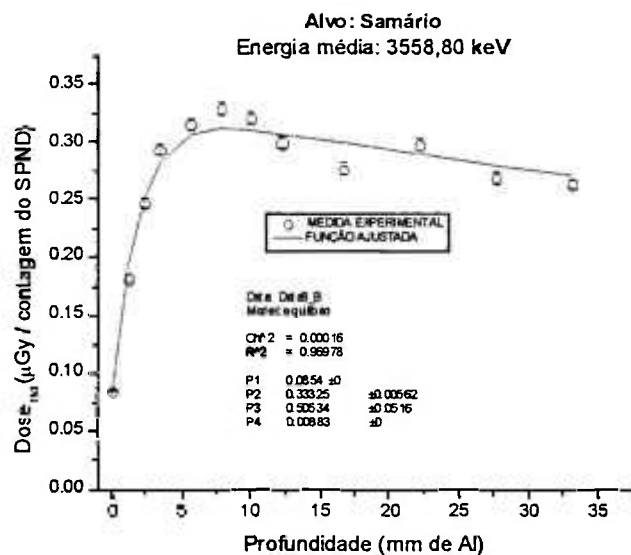


Figura 4.3 – Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Samário.

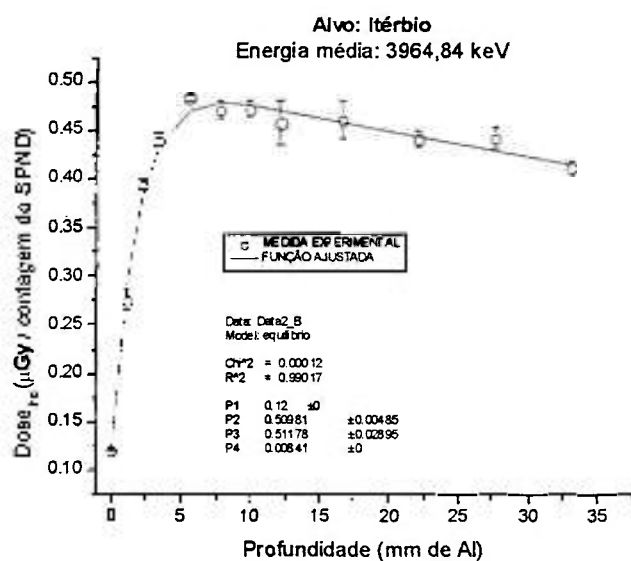


Figura 4.4 – Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Itérbio.

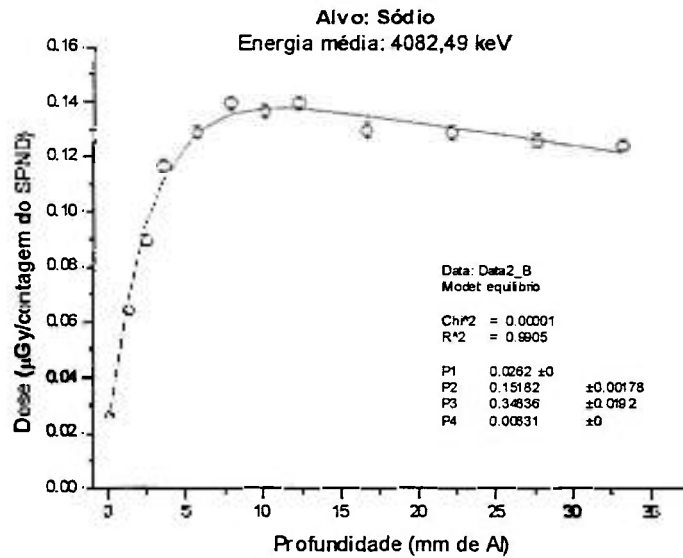


Figura 4.5 – Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Sódio.

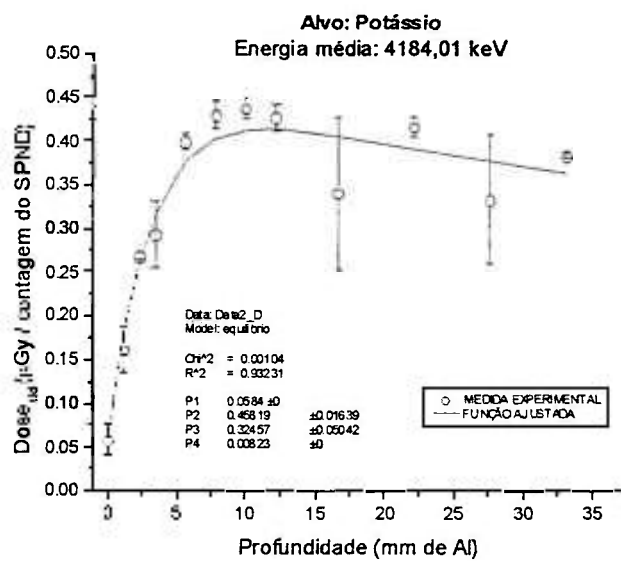


Figura 4.6 – Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Potássio.



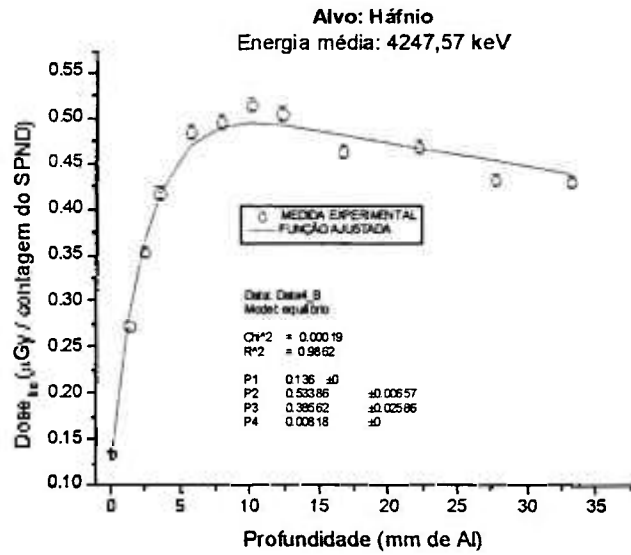


Figura 4.7 – Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Háfrio.

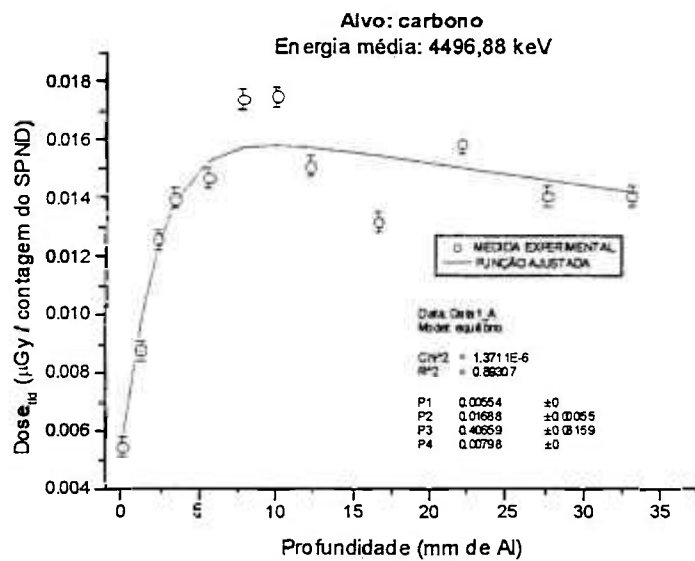


Figura 4.8 – Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Carbono.

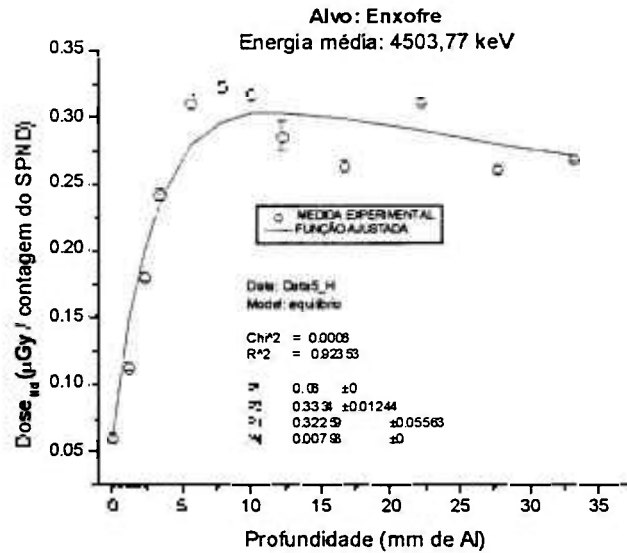


Figura 4.9 – Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Enxofre.

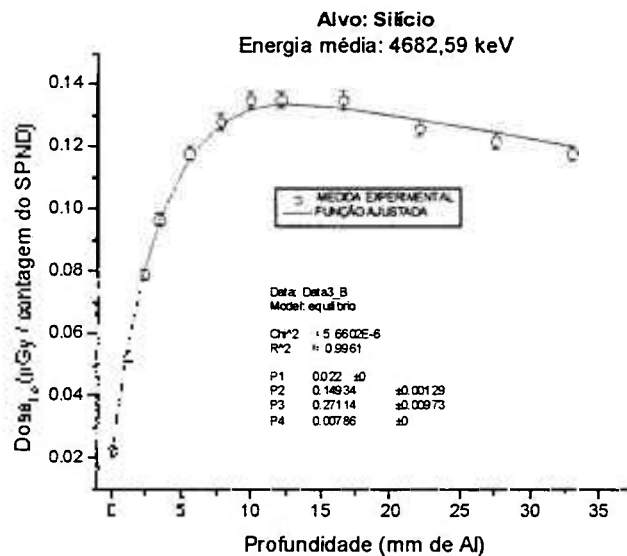


Figura 4.10 – Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Silício.

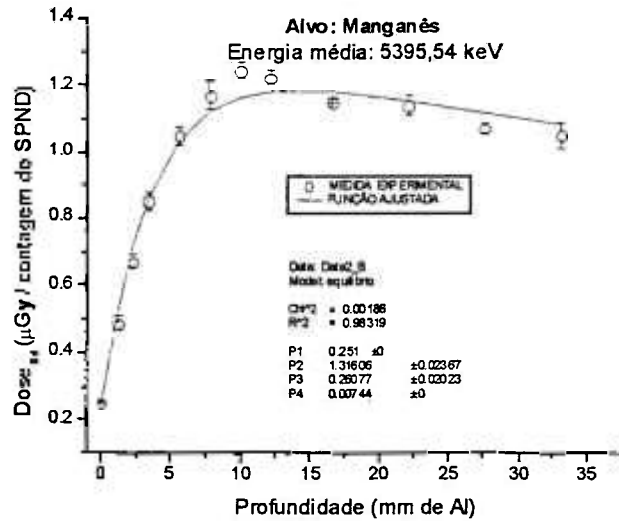


Figura 4.11 – Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Manganês.

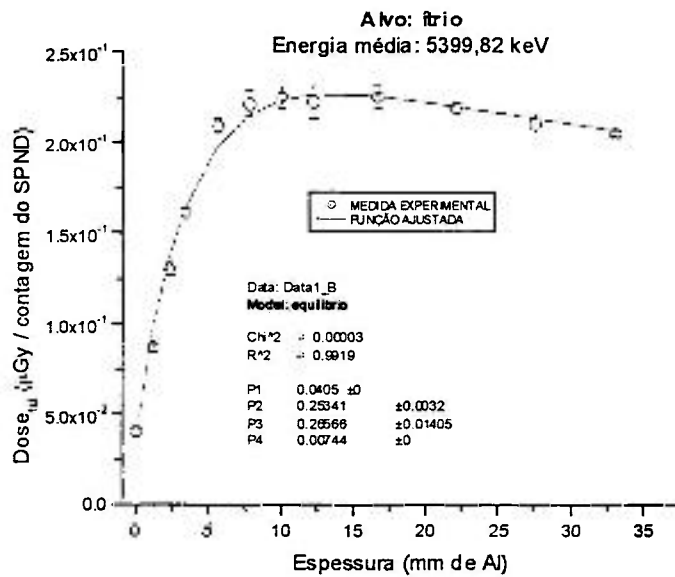


Figura 4.12 – Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Ítrio.

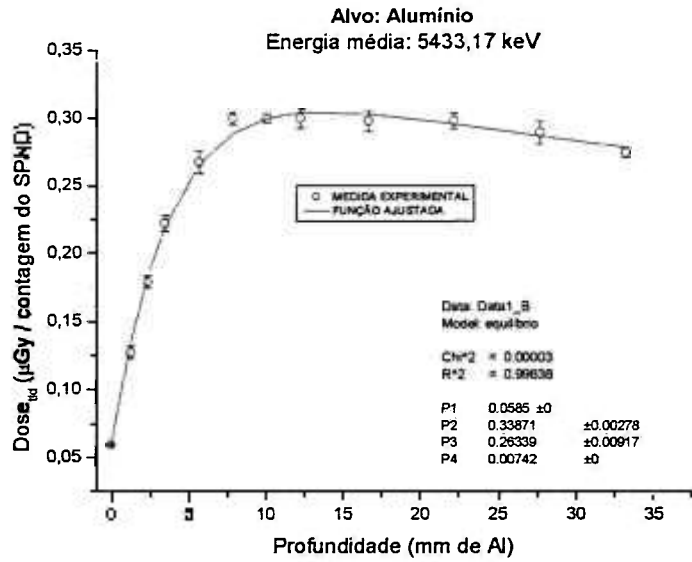


Figura 4.13 – Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Alumínio.

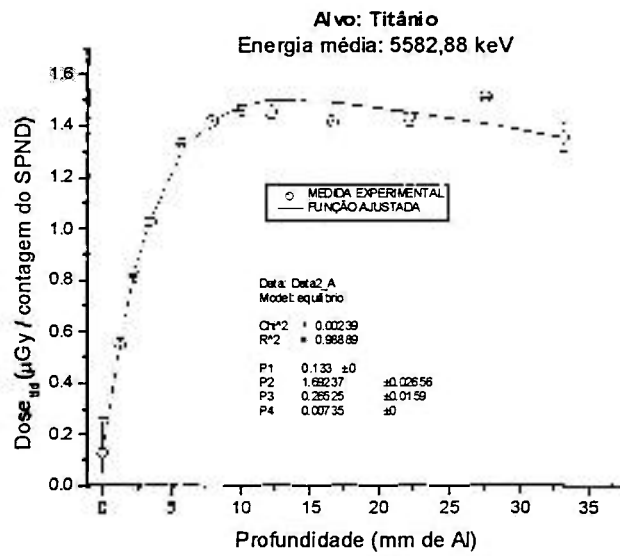


Figura 4.14 – Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Titânio.

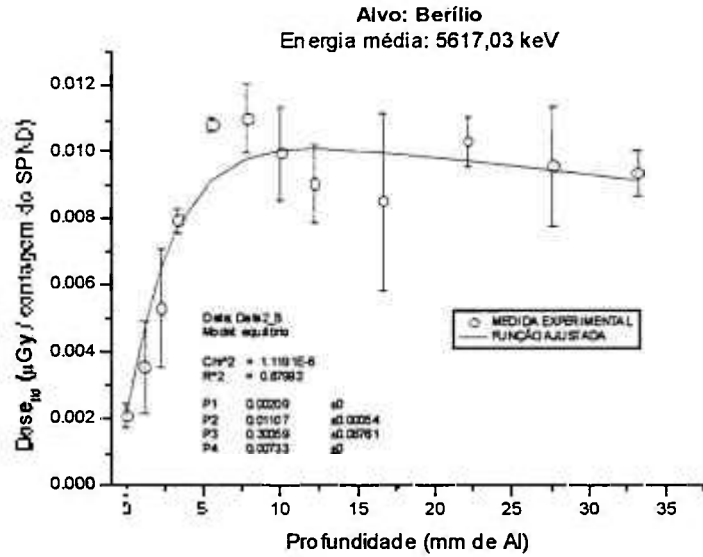


Figura 4.15 – Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Berílio.

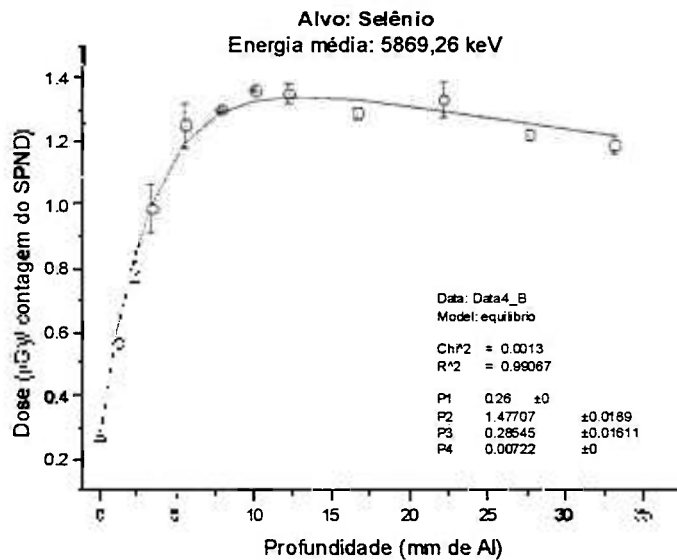


Figura 4.16 – Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Selênio.

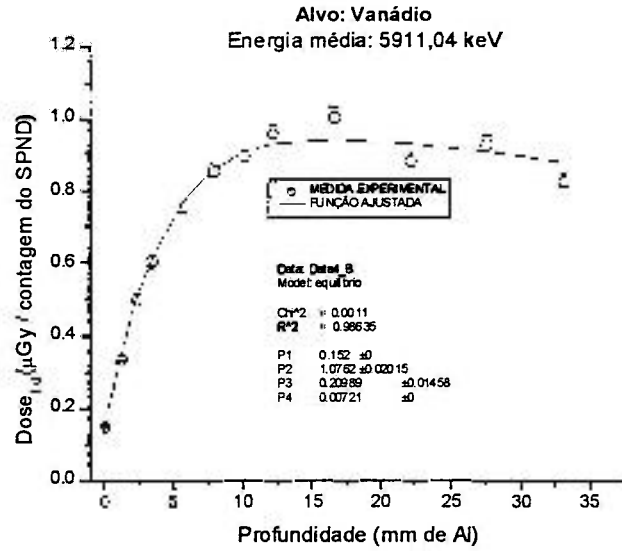


Figura 4.17 – Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Vanádio.

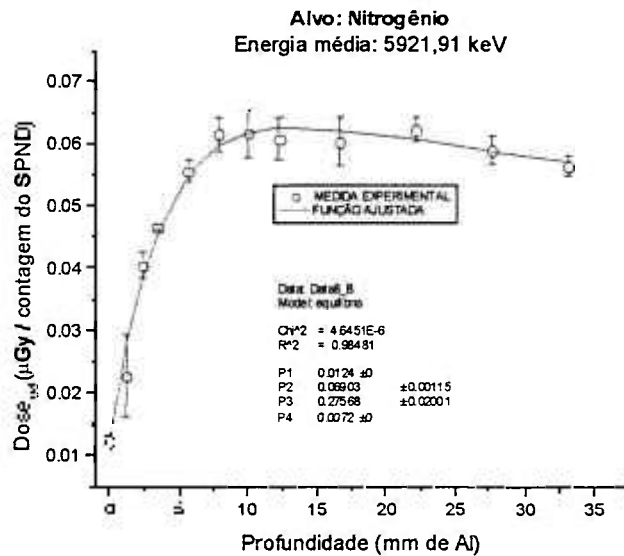


Figura 4.18 – Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Nitrogênio.

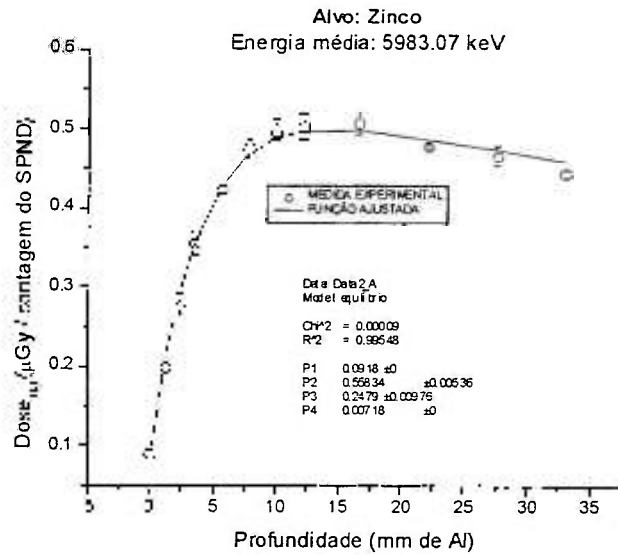


Figura 4.19 – Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Zinco.

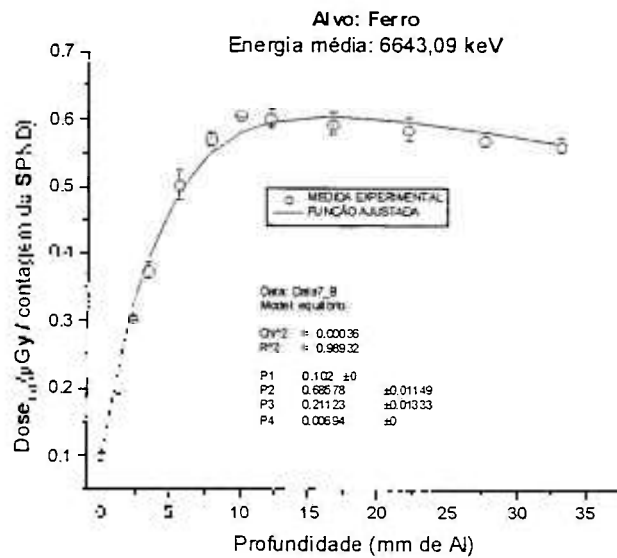


Figura 4.20 – Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Ferro.

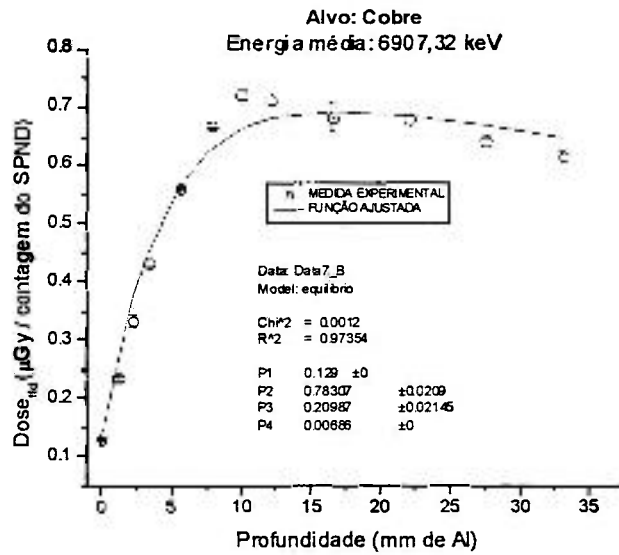


Figura 4.21 – Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Cobre.

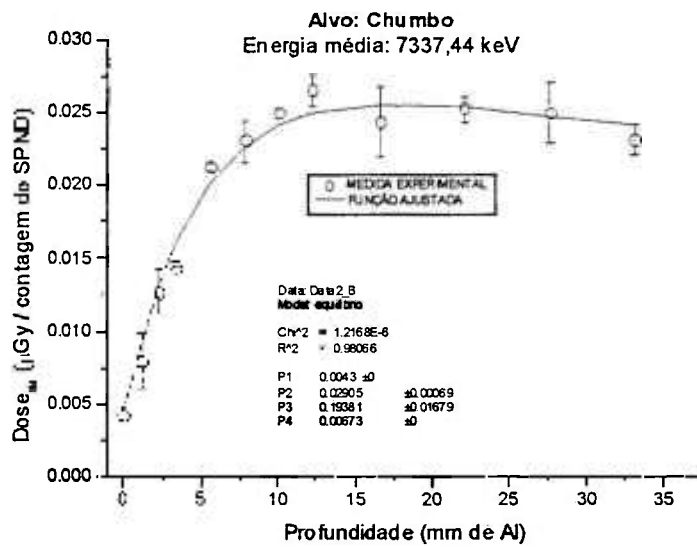


Figura 4.22 – Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Chumbo.



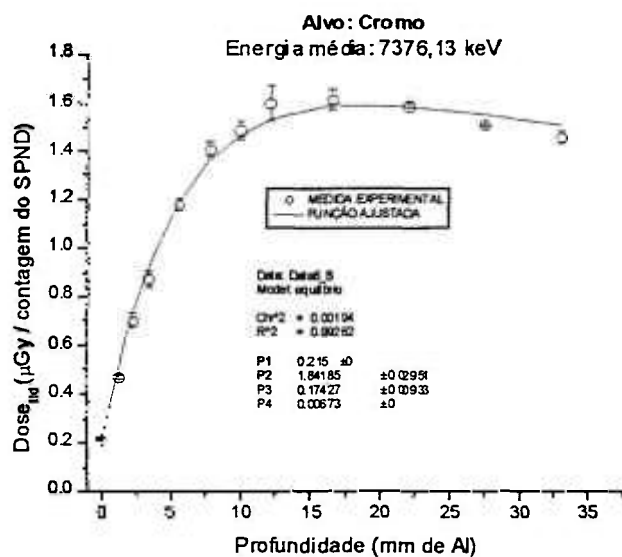


Figura 4.23 – Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Cromo.

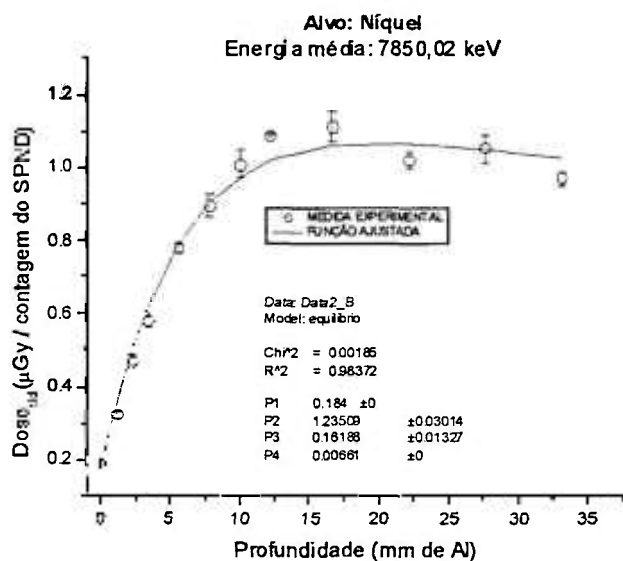


Figura 4.24 – Dose por contagem do SPND em função da profundidade de alumínio para o espectro de captura de Níquel.

Tabela 4.1 – Coeficientes do ajuste da função semi-empírica para cada alvo utilizado.

Alvo	Energia Média (keV)	$d_0$ ( $\mu\text{Gy}/\text{SPND}$ )	$d_1$ ( $\mu\text{Gy}/\text{SPND}$ )	$\mu_1$ ( $\text{mm}^{-1}$ )	$\mu_2$ ( $\text{mm}^{-1}$ )	ETPC (mm)
In	3275,16	0,068	$0,3348 \pm 0,0021$	$0,298 \pm 0,086$	0,00917	$11,8 \pm 3,4$
Sm	3558,80	0,085	$0,3332 \pm 0,0056$	$0,505 \pm 0,052$	0,00883	$8,04 \pm 0,83$
Yb	3964,84	0,120	$0,5098 \pm 0,0049$	$0,512 \pm 0,029$	0,00841	$8,06 \pm 0,46$
Na	4082,49	0,026	$0,1518 \pm 0,0018$	$0,348 \pm 0,019$	0,00831	$10,79 \pm 0,61$
K	4184,01	0,058	$0,458 \pm 0,016$	$0,325 \pm 0,050$	0,00823	$11,4 \pm 1,8$
Hf	4247,57	0,136	$0,5339 \pm 0,0066$	$0,386 \pm 0,026$	0,00818	$10,05 \pm 0,68$
C	4496,88	0,0055	$0,01688 \pm 0,00055$	$0,406 \pm 0,082$	0,00798	$9,7 \pm 2,0$
S	4503,77	0,060	$0,333 \pm 0,012$	$0,323 \pm 0,056$	0,00798	$11,5 \pm 2,0$
Si	4682,59	0,022	$0,1493 \pm 0,0013$	$0,2711 \pm 0,0097$	0,00786	$13,16 \pm 0,49$
Mn	5395,54	0,251	$1,316 \pm 0,024$	$0,261 \pm 0,020$	0,00744	$13,8 \pm 1,1$
Y	5399,82	0,041	$0,2530 \pm 0,0032$	$0,266 \pm 0,014$	0,00744	$13,56 \pm 0,74$
Al	5433,17	0,059	$0,3387 \pm 0,0028$	$0,2634 \pm 0,0092$	0,00742	$13,66 \pm 0,49$
Ti	5582,88	0,133	$1,692 \pm 0,027$	$0,265 \pm 0,016$	0,00735	$13,62 \pm 0,84$
Be	5617,03	0,0021	$0,01107 \pm 0,00054$	$0,301 \pm 0,068$	0,00733	$12,4 \pm 2,9$
Se	5869,26	0,26	$1,477 \pm 0,019$	$0,285 \pm 0,016$	0,00722	$12,97 \pm 0,75$
V	5911,04	0,152	$1,076 \pm 0,015$	$0,210 \pm 0,015$	0,00721	$16,2 \pm 1,1$
N	5921,91	0,0124	$0,0690 \pm 0,0012$	$0,276 \pm 0,020$	0,00720	$13,32 \pm 0,99$
Zn	5983,07	0,0918	$0,5583 \pm 0,0054$	$0,2479 \pm 0,0098$	0,00718	$14,40 \pm 0,58$
Fe	6643,09	0,102	$0,686 \pm 0,011$	$0,211 \pm 0,013$	0,00694	$16,3 \pm 1,1$
Cu	6907,32	0,129	$0,783 \pm 0,021$	$0,210 \pm 0,021$	0,00686	$16,5 \pm 1,7$
Pb	7337,44	0,0043	$0,02905 \pm 0,00069$	$0,194 \pm 0,017$	0,00673	$17,5 \pm 1,5$
Cr	7376,13	0,215	$1,842 \pm 0,029$	$0,1743 \pm 0,0093$	0,00672	$18,9 \pm 1,1$
Ni	7850,02	0,184	$1,235 \pm 0,030$	$0,162 \pm 0,013$	0,00661	$20,0 \pm 1,7$

Na figura 4.25 são mostrados os valores de ETPC determinados a partir dos dados experimentais obtidos para cada alvo (figuras 4.2 a 4.24), por meio do ajuste de uma função semi-empírica, em função da energia média do feixe ( $\bar{E}$ ).

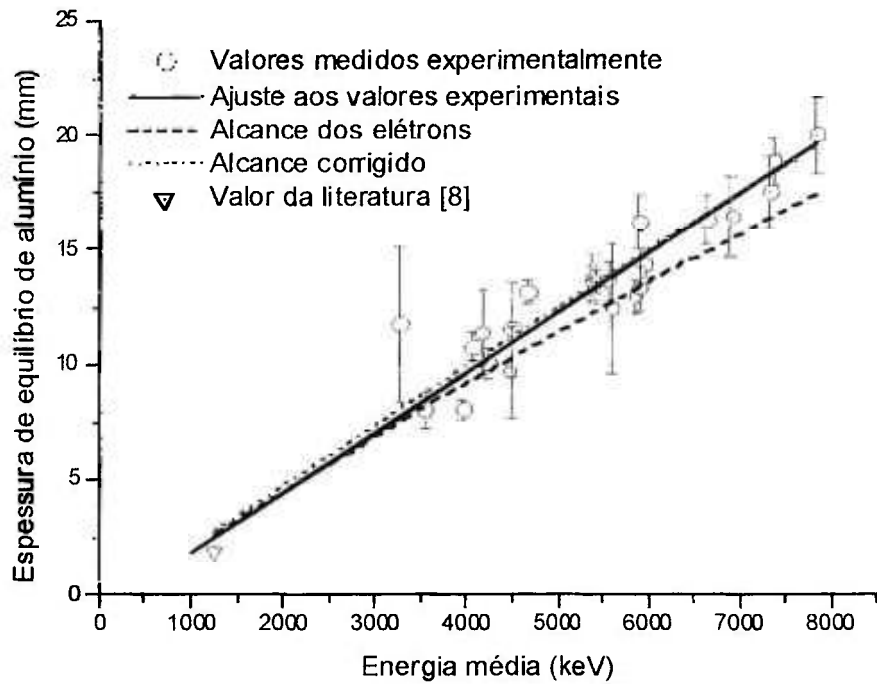


Figura 4.25 – Curva de ETPC em função da energia média.

A curva sólida representa o ajuste de uma função linear pelo método dos mínimos quadrados efetuado aos dados experimentais e cujos coeficientes obtidos foram ( $A = -0,75 \pm 0,89$  e  $B = 0,00261 \pm 0,00017$ ).

A curva tracejada corresponde ao alcance CSDA<sup>1</sup> dos elétrons produzidos por fótons monocromáticos de energia igual à energia média do feixe. A curva pontilhada representa o ajuste da função semi-empírica que relaciona a espessura de equilíbrio com a energia média ( $\bar{E}$ ) do espectro gama, baseada no alcance CSDA corrigida pela atenuação do fluxo gama, conforme foi discutido na seção 2.3 (equação 2.14), da seguinte forma:

<sup>1</sup> CSDA – “Continuous Slowing Down Approximation”

$$X_{mix} = \frac{R(E)}{\rho} e^{\mu(E)R(E)}, \quad (4.7)$$

onde  $\rho$  é a densidade do meio. O alcance médio  $\bar{X}$  foi substituído por  $R(E)$ , que é o alcance para elétrons de energia  $E$ , e  $\mu'$  foi substituído por  $\mu(E)$  que é o coeficiente de atenuação de fótons no alumínio para uma dada energia  $E$ . Os valores de  $R(E)$  e  $\mu(E)$  utilizados são listados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores de  $R(E)$  e  $\mu(E)$  utilizados para o cálculo de alcance corrigido<sup>(11,12)</sup> (Eq. 4.7 e figura 4.27).

Energia (keV)	$R(E)$ (mm)	$\mu(E)$ (mm <sup>-1</sup> )
3275,16	7,56	0,009175
3558,8	8,22	0,008832
3964,84	9,15	0,008419
4082,49	9,41	0,008313
4184,01	9,62	0,008227
4247,57	9,76	0,008176
4496,88	10,29	0,007984
4503,77	10,31	0,007981
4682,59	10,74	0,007857
5395,54	12,29	0,007441
5399,82	12,30	0,007439
5433,17	12,37	0,007422
5582,88	12,68	0,007349
5617,03	12,76	0,007333
5869,26	13,31	0,007223
5911,04	13,40	0,007206
5921,91	13,43	0,007201
5983,07	13,56	0,007177
6643,09	14,95	0,006936
6907,32	15,51	0,006853
7337,44	16,41	0,006734
7376,13	16,49	0,006726
7850,02	17,49	0,006612

Como pode ser observado na figura 4.25, o alcance corrigido para o equilíbrio transitório de partículas carregadas apresenta uma concordância muito melhor com os valores experimentais que o alcance sem correção, conforme pode ser observado pela análise de qui-quadrado realizada e cujos resultados são apresentados na tabela 4.3. Na figura 4.25 as curvas foram estendidas até a região de energia em torno de 1200 keV para comparação com o resultado na energia do  $^{60}\text{Co}$  divulgado na literatura.

Tabela 4.3 – Resultados do teste de qui-quadrado aplicado ao ajuste do alcance e do alcance corrigido aos dados experimentais, com 23 graus de liberdade.

Função	Qui-quadrado	Probabilidade de excesso do qui-quadrado (%)
Alcance	69,8	0
Alcance corrigido	40,4	1,5

## 4.2 Comparação com cálculo teórico da dose absorvida

A fim de comparar os valores experimentais da dose absorvida no dosímetro, por fóton incidente no porta dosímetro, com a dose calculada pelas eqs. 2.10 e 2.12 da seção 2.3, foram selecionados os alvos de alumínio e cromo.

Para o cálculo da dose em função da profundidade de alumínio, as equações 2.10 e 2.12 foram modificadas para o espectro de captura formado por linhas discretas, conforme discutido na seção 3.7, resultando na seguinte equação:

$$d = \frac{D_{\text{pastilha}}}{\Psi_{\text{total}}} = \sum_{i=1}^N \left( \frac{S_{\text{past}}(E_i)}{S_{\text{M}}(E_i)} \exp(\mu(E_i)\bar{x}) \right) K_{\text{col},i}, \quad (4.8)$$

onde,

$$K_{\text{col},i} = I(E_i)E_i \cdot \exp(-\mu(E_i)x)\mu_{\text{abs}}(E_i), \quad (4.9)$$

para cada alvo de captura com  $N$  linhas de emissão de diferentes energias  $E_i$  e o termo  $\frac{S_{past}(E_i)}{S_{Al}(E_i)}$  é o fator de conversão da dose no porta dosímetro de alumínio para a dose na pastilha (teflon) de acordo com a equação 2.1.

Os valores dos parâmetros  $S_{past}(E_i)$  e  $S_A(E_i)$  foram obtidos da referência 12 e os parâmetros  $\mu(E_i)$  e  $\mu_{abs}(E_i)$  foram extraídos de Hubbel & Seltzer<sup>(11)</sup>.

As equações 4.8 e 4.9 partem do pressuposto da existência da condição de equilíbrio de partículas carregadas no meio onde a mesma é aplicada. Assim, sua validade é restrita a profundidades iguais ou superiores à profundidade de ETPC.

Para se obter a intensidade do fluxo de raios gama na posição de irradiação das amostras  $\Psi(E_i)$  foi utilizado um detector semiconductor Ge(Li), fixado numa posição diferente daquela onde são irradiadas as amostras (vide figura 3.6).

Nesta simulação foram medidos os fluxos de raios gama no instante da irradiação dos dosímetros,  $\phi^A(E_i)$ , corrigidos pelo fator de variação de potência do reator,  $F_P$ . Foi utilizada a metodologia e a calibração obtidas de um trabalho anterior<sup>(24)</sup>. A monitoração de variação de potência do reator foi feita por um detector de nêutrons térmicos do tipo SPND, conforme discutido no capítulo anterior, onde as contagens,  $C_{SPND}$ , obtidas por meio de um integrador de corrente, foram registradas durante o tempo de realização de cada medida. Dessa forma os fluxos medidos na posição da amostra ( $\phi^A$ ) e os fluxos durante a irradiação das amostras ( $\phi_{total}^I$ ), relacionam-se por:

$$\phi_{total}^I = \phi^A F_P, \quad (4.10)$$

com

$$F_p = \frac{C_{SPND(N)} / t_{irr}}{C_{SPND(\gamma)} / t_\gamma}, \quad (4.11)$$

onde  $C_{irr}$  é a contagem do monitor de fluxo de nêutrons térmicos no alvo, durante o tempo  $t_{irr}$  de irradiação dos dosímetros e  $C_{SPND(\gamma)}$  é a contagem do SPND durante o tempo de medida  $t_\gamma$  do fluxo de raios gama.

Substituindo-se as equações 4.10 e 4.11 em 4.1, tem-se:

$$d = \frac{\frac{D}{C_{SPND(I)}}}{\frac{\Psi_{total}^A}{C_{SPND(\gamma)}}}, \quad (4.12)$$

onde  $\Psi_{total}^A$  é a fluência total de fótons medida na posição de irradiação dos dosímetros, a qual pode ser determinada por:

$$\Psi_{total}^A = \frac{\Psi^A(E_i)}{I(E_i)}, \quad (4.13)$$

onde  $I(E_i)$  é a intensidade relativa da linha  $E_i$  analisada e  $\Psi^A(E_i)$  é a fluência de fótons na referida linha de energia  $E_i$ .

O valor do fluxo de raios gama,  $\phi_{total}^A$ , expresso em  $\gamma/cm^2.s$  pode ser obtido multiplicando-se os valores de  $\Psi_{total}^A$ , pela taxa de contagem do SPND, que foi, tipicamente, 2,25 contagens/segundo, para o reator operando a 2 MW de potência, após 24 horas de operação contínua.

No apêndice 1 são apresentadas as contribuições de cada linha na dose absorvida do espectro de captura dos alvos de Al e Cr nas profundidades de 14 mm e

19 mm, respectivamente, calculadas de acordo com este modelo. Nas figuras 4.26 e 4.27 são apresentados os resultados do cálculo para várias profundidades ou espessuras do absorvedor de alumínio, comparados com os valores obtidos experimentalmente.

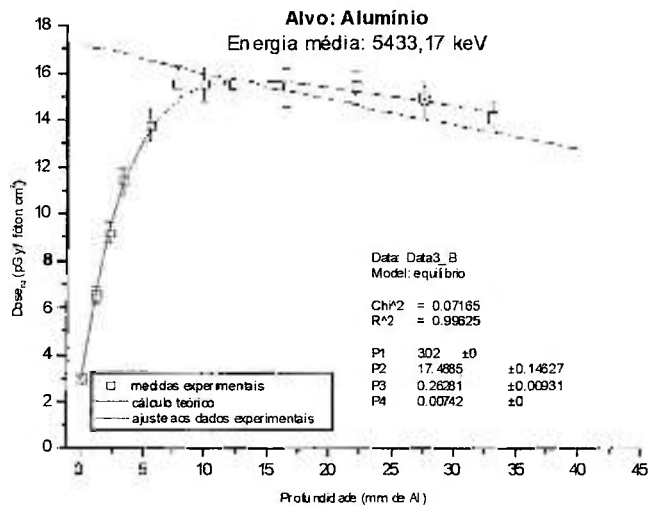


Figura 4.26 – Comparação dos dados experimentais de dose absorvida com o resultado obtido teoricamente para o alvo de alumínio.

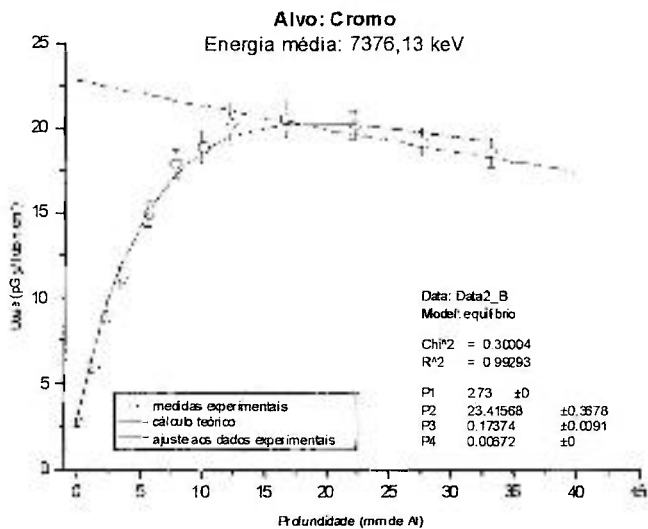


Figura 4.27 – Comparação dos dados experimentais de dose absorvida com o resultado obtido teoricamente para o alvo de cromo.



Observa-se que as doses obtidas por meio do cálculo teórico, concordam razoavelmente bem com as doses medidas experimentalmente a partir de profundidades iguais ou superiores à profundidade de ETPC.

Conforme pode ser constatado pela tabela 4.4, o cálculo da dose utilizando as linhas de emissão de fótons de captura apresenta uma diferença menor que 1% em relação ao cálculo utilizando fótons monoenergéticos com energia igual à energia média, indicando portanto que a utilização da energia média para o espectro de radiação gama pode ser considerada como uma boa aproximação para os propósitos de cálculos de dose.

Tabela 4.4 – Dose em função da espessura para os espectros do Al e Cr em comparação com o cálculo para fótons monocromáticos com energia igual à energia média do feixe.

Profundidade (mm)	Alvo de alumínio		Alvo de cromo	
	Fótons monocromáticos (pGy/fóton.cm <sup>2</sup> )	Espectro da fonte (pGy/fóton.cm <sup>2</sup> )	Fótons monocromáticos (pGy/fóton.cm <sup>2</sup> )	Espectro da fonte (pGy/fóton.cm <sup>2</sup> )
0	1,71E+01	1,73E+01	2,26E+01	2,28E+01
5	1,65E+01	1,66E+01	2,19E+01	2,21E+01
10	1,59E+01	1,60E+01	2,12E+01	2,13E+01
15	1,53E+01	1,54E+01	2,05E+01	2,06E+01
20	1,48E+01	1,49E+01	1,98E+01	1,99E+01
25	1,42E+01	1,43E+01	1,91E+01	1,93E+01
30	1,37E+01	1,38E+01	1,85E+01	1,86E+01
35	1,32E+01	1,33E+01	1,79E+01	1,80E+01
40	1,27E+01	1,28E+01	1,73E+01	1,74E+01

É de se destacar que este estudo foi efetuado para um material absorvedor composto de Al, em um intervalo de energia do feixe de radiação gama entre 3,26 a 7,85 MeV. No caso de outros materiais ou intervalos de energia diferentes, a aproximação da energia média deve ser reavaliada, pois pode haver alguma variação de acordo com a dependência do coeficiente de absorção de energia do material utilizado.

## 5 CONCLUSÕES

O perfil de dose absorvida no alumínio foi medido neste trabalho utilizando feixes de radiação gama produzidos por 23 alvos de captura de nêutrons térmicos.

Foi ajustada uma função semi-empírica aos dados experimentais da dose em função da profundidade, que permitiu obter, com razoável precisão, a espessura de equilíbrio transitório de partículas carregadas (ETPC) para cada espectro gama utilizado.

Foi obtida uma relação entre a energia média do campo de radiação gama e a espessura de ETPC, a qual mostrou ser razoavelmente concordante com o alcance dos elétrons produzidos por um feixe monocromático na energia média dos espectros utilizados, corrigido pela relação de Roesch<sup>(13)</sup>. Esta informação permitirá, como uma aplicação imediata do presente trabalho, a medida da dose e a determinação da energia média de um campo misto de radiação gama desconhecido no intervalo aproximado de energia entre 3 e 8 MeV.

Foi verificada uma razoável concordância entre o cálculo teórico simulado de dose absorvida e as medidas experimentais para os alvos de Al e Cr. Observa-se também que o cálculo de dose baseado em um único feixe de raios gama de energia igual à energia média do espectro, concorda com o resultado obtido pelo cálculo utilizando todas as linhas de emissão gama do alvo e suas respectivas contribuições na dose final. Uma reavaliação destes cálculos, bem como sua extensão aos demais alvos, será implementada após a finalização das novas medidas dos fluxos de raios gama no canal tangencial BH4-12 do reator IEA-R1.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 MAHESH K.; WENG P.S.; FURETTA C. **Thermoluminescence in Solids and its Applications**, Nuclear Technology Publish., Ashford, 1989.
- 2 LOBDELL, J. L.; and HERTEL, N. E.: Gamma-ray dose rate measurements at a boiling water reactor, **Rad. Prot. Dos.**,74(1997)163-171.
- 3 ANGELESCU, T.; GHIORDANESCU, N.; BALTATEANU, N.; LABAU, V. and VASILESCU, A.: Intercomparison of photon dose measurements at the 8 MeV electron accelerator, **Nucl. Instr. and Meth.**,B-132(1997)193-198.
- 4 JOHNSON, W. R. and VAN PROOYEN, J. A.: Spatial dose distribution from high-energy gamma rays, **Trans. Am. Nucl. Soc.**,19(1974)476-477.
- 5 ANGELESCU, T.; GHIORDANESCU, A.; MIHUL, A.; GARLEA, C.; LABAU, V.; VASILESCU, A.; BEREGIC, V. and BALTATEANU, N.: Gamma dose characterization of the neutron field in the  $\Sigma\Sigma$  irradiation facility, **Nucl. Instr. Meth.**,A-378(1996)594-597.
- 6 ANGELONE M.; BATISTONI, P.; PILLON, M.; RADO, V. and ESPOSITO, A.: Gamma and neutron dosimetry using  $\text{CaF}_2:\text{Tm}$  thermoluminescent dosimeters for fusion reactor shielding experiments, **Nucl. Sci. Eng.**,126(1997)176-186.

- 7 VARHUE, W. J. and WILLIAMSON, T. G.: Photoneutron and photofission cross sections for  $^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$  using neutron capture gamma rays, **Appl. Radiat. Isot.**,38(1987)561-568.
- 8 SCAFF, Luiz A. M. **Física da Radioterapia**. Ed Sarvier, São Paulo, 1997.
- 9 ATTIX, F. H.; **Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry**, Wiley-Interscience, 1986.
- 10 OBERHOFER, M. and SCHARMANN A. **Applied Thermoluminescence Dosimetry**, Adam Hilger Ltd., Bristol, England, 1981.
- 11 HUBBEL, J. H.; S. M. SELTZER; Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements Z=1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest. **NISTIR 5632**, 1995.
- 12 BERGER, M. J., A PC package for calculating stopping powers and ranges of electrons, protons and helium ions. **IAEA-NDS-144**, 1993.
- 13 ROESCH, W.C. Dose for nonelectronic equilibrium conditions, **Rad. Res.** 9, 399, 1958.

- 14 HOROWITZ, Yigal S.: **Thermoluminescence and Thermoluminescent Dosimetry**, v.1, CRC Press, Boca Raton, 1984.
- 15 CAMPOS, L. L.: Determination of TL parameters of CaSO<sub>4</sub>:Dy produced at Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), **Appl. Radiat. Isot.**,39(1988)233-236.
- 16 AYYANGAR, K.; LAKSHMANAN, A. R. et all: A Comparison of Thermal Neutron and Gamma Ray Sensitivities of Common TLD Materials, **Phys. Med. Biol.**, vol 19, n.5, 1974.
- 17 AYYANGAR, K.; BHUWAN, Chandra and LAKSHMANAN, A.R.: Mixed field Dosimetry with CaSO<sub>4</sub>:Dy, **Phys. Med. Biol.**, vol19 n. 5, 1974.
- 18 MCKEEVER, S. W. S., **Thermoluminescence of Solids**, Cambridge University Press, 1985.
- 19 CAMPOS, L. L. and LIMA, M. F.: Dosimetric properties of CaSO<sub>4</sub>:Dy Teflon pellets produced at IPEN, **Radiat. Prot. Dosim.**, 14(1986)333-335.
- 20 VANIN, Vito V.; GOUFFON, P.; HELENE, O.; **Tópicos Avançados de Tratamento Estatístico de Dados em Física Experimental**, notas de aula, 2<sup>a</sup> edição, São Paulo, 1998.

## Contribuição das linhas de emissão

Energia da linha (keV)	Intensidade da linha	Dose (pGy)
564.2	0.00020	3.94E-04
749.2	0.00220	5.73E-03
835.1	0.00710	2.03E-02
988.6	0.00020	6.00E-04
1151.2	0.00030	9.82E-04
1585.2	0.00160	8.44E-03
1694.8	0.00160	8.55E-03
1783.8	0.00830	4.78E-02
1898.5	0.00650	3.97E-02
1994.7	0.00430	2.70E-02
2238.9	0.01700	1.19E-01
2321.0	0.01320	9.46E-02
2349.0	0.00170	1.20E-02
2377.0	0.00320	2.36E-02
2558.2	0.00230	1.82E-02
2601.9	0.00400	3.19E-02
2621.3	0.00090	7.33E-03
2670.4	0.00350	2.80E-02
3022.3	0.00520	4.63E-02
3091.6	0.00090	7.97E-03
3178.6	0.00310	2.87E-02
3263.5	0.00190	1.76E-02
3393.6	0.00140	1.36E-02
3468.9	0.00060	5.92E-03
3488.2	0.00080	7.59E-03
3513.0	0.00200	2.07E-02
3596.7	0.00160	1.71E-02
3617.7	0.00370	3.80E-02
3720.7	0.01040	1.11E-01
3785.2	0.00080	8.57E-03
3862.7	0.00220	2.44E-02
3928.1	0.00190	2.06E-02
4022.3	0.00080	8.65E-03
4133.9	0.00210	2.40E-02
4323.3	0.00400	4.88E-02
4425.6	0.00290	3.61E-02
4455.4	0.00250	3.12E-02
4529.7	0.00110	1.44E-02
4626.4	0.00100	1.29E-02
4847.2	0.00620	8.26E-02
4872.8	0.00230	3.10E-02
5222.9	0.00430	6.18E-02

## APÊNDICE

## Contribuição das linhas de emissão do alvo de alumínio na dose calculada.

Energia da linha (keV)	Intensidade da linha	Dose (pGy)			
248.9	0.00010	8.38E-05	2727.9	0.00080	7.00E-03
252.1	0.00010	7.29E-05	2737.8	0.00070	5.83E-03
259.3	0.00000	3.73E-05	2755.1	0.00020	1.56E-03
550.7	0.00010	2.48E-04	2821.4	0.01090	9.66E-02
559.0	0.00010	2.61E-04	2877.7	0.00060	5.15E-03
597.1	0.00030	5.84E-04	2887.4	0.00090	7.95E-03
758.0	0.00050	1.48E-03	2922.3	0.00090	7.82E-03
830.4	0.00060	1.93E-03	2960.0	0.03170	2.92E-01
984.0	0.00290	1.06E-02	2976.3	0.00040	4.07E-03
1408.9	0.00120	6.15E-03	2988.4	0.00080	7.84E-03
1526.0	0.00100	5.66E-03	3033.9	0.02880	2.70E-01
1590.0	0.00140	7.92E-03	3074.6	0.00030	2.78E-03
1622.5	0.00500	2.81E-02	3128.6	0.00090	8.66E-03
1658.7	0.00130	7.28E-03	3142.8	0.00090	8.75E-03
1927.2	0.00160	1.05E-02	3191.9	0.00030	3.02E-03
1983.8	0.00150	9.88E-03	3207.4	0.00060	5.66E-03
2108.3	0.00420	2.97E-02	3265.6	0.00170	1.68E-02
2131.0	0.00080	5.93E-03	3303.0	0.00510	5.15E-02
2139.0	0.00420	2.99E-02	3347.1	0.00180	1.86E-02
2171.9	0.00060	4.44E-03	3392.2	0.00220	2.21E-02
2240.7	0.00790	5.83E-02	3465.1	0.03020	3.16E-01
2255.8	0.00120	9.18E-03	3480.6	0.00080	8.81E-03
2272.0	0.00400	2.99E-02	3541.2	0.00020	2.15E-03
2282.9	0.00790	5.88E-02	3560.5	0.00340	3.69E-02
2298.0	0.00170	1.31E-02	3591.1	0.02110	2.27E-01
2347.2	0.00040	2.79E-03	3624.2	0.00040	4.51E-03
2381.0	0.00040	2.88E-03	3639.6	0.00040	4.55E-03
2420.1	0.00030	2.31E-03	3651.0	0.00520	5.67E-02
2452.0	0.00130	1.02E-02	3659.4	0.00040	4.61E-03
2486.4	0.00050	3.93E-03	3679.7	0.00270	2.97E-02
2502.9	0.00040	2.99E-03	3709.1	0.00270	3.02E-02
2535.2	0.00020	1.54E-03	3723.3	0.00040	4.77E-03
2550.3	0.00060	4.69E-03	3753.9	0.00040	4.86E-03
2566.5	0.00050	3.70E-03	3789.4	0.00460	5.20E-02
2577.6	0.00450	3.72E-02	3823.8	0.00230	2.58E-02
2590.3	0.00880	7.27E-02	3849.2	0.01430	1.63E-01
2625.8	0.00320	2.71E-02	3875.5	0.01210	1.39E-01
2656.9	0.00050	4.59E-03	3890.4	0.00110	1.30E-02
2692.0	0.00020	1.48E-03	3902.0	0.00220	2.57E-02
2709.5	0.00170	1.44E-02	3935.5	0.00170	1.94E-02
			3949.8	0.00030	4.04E-03
			3985.7	0.00060	6.86E-03
			4002.8	0.00080	9.00E-03

## ANEXO 1

## FLUXOGRAMA DOS PROGRAMAS UTILIZADOS NA ANÁLISE DE DADOS EXPERIMENTAIS

