



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS TANDEM DE  
ACTIVÍMETROS E ESTABELECIMENTO DE DOSIMETRIA  
BETA EM SERVIÇOS DE MEDICINA NUCLEAR**

**SONIA GARCIA PEREIRA CECATTI**

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

**Orientadora:  
Dra. Linda V.E. Caldas**

**São Paulo  
2004**

**INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES**

**Autarquia associada à Universidade de São Paulo**

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS TANDEM DE ACTIVÍMETROS E  
ESTABELECIMENTO DE DOSIMETRIA BETA EM SERVIÇOS DE  
MEDICINA NUCLEAR**

**SONIA GARCIA PEREIRA CECATTI**



Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Doutor em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Aplicações.

Orientadora:  
Dra. Linda V. E. Caldas

**SÃO PAULO**

**2004**



## AGRADECIMENTOS

*À Dra. Linda V. E. Caldas, pela orientação, incentivo e liberdade durante toda a evolução deste trabalho e sobretudo pela amizade.*

*À FUNDACENTRO, pela oportunidade e pelos recursos financeiros, sem os quais não seria possível a realização deste projeto.*

*À Dra. Laura Natal Rodrigues e a Dra. Maria Inês Calil Cury Guimarães, amigas incansáveis, pelo incentivo constante e por todos os momentos de discussões e sugestões.*

*À MSc. Claudia Carla Gronchi, sempre presente, meu obrigada por todo o carinho, incentivo e apoio, não só neste trabalho, mas desde a minha chegada em São Paulo.*

*À Dra. Marina F. Koskinas pelo preparo das fontes depositadas e pela concessão da utilização do Laboratório de Metrologia Nuclear.*

*À Dra. Leticia Lucente Campos Rodrigues e ao MSc. Dávid T. Fukumori, pelo fornecimento das amostras e pelo livre acesso aos laboratórios e equipamentos da Divisão de Calibração e Dosimetria.*

*Ao Sr. Marcos Xavier e ao Sr. Valdir de S. Carvalho, pelo apoio técnico na utilização dos equipamentos do Departamento de Metrologia das Radiações.*

*Ao Sr. Claudinei T. Cescon, ao MSc. Gelson P. dos Santos e ao Engº Flávio Betti, pela disponibilidade e por estarem sempre prontos para os reparos e ajustes eletrônicos nos ativímetros utilizados neste trabalho.*

*Ao Sr. José Carlos Sabino, pelo trabalho de usinagem nas peças construídas.*

*À Sra. Maria de Lourdes do Nascimento e ao Sr. Antonio Cornélio de Souza, pelo apoio na utilização dos equipamentos do Laboratório de Materiais Dosimétricos.*

*À Dra. Marycel F. Barbosa, ao BSc. Enocles Melo de Oliveira e ao Sr. Geraldo Alves Pereira, pelo preparo das amostras não seladas.*

*À minha filha Patricia Garcia Pereira Cecatti, pelas idas e vindas ao IPEN nas incansáveis sessões de fotos.*

*Ao meu sobrinho Arquiteto Maurício Garcia Pereira Thomaz, por toda a dedicação na confecção dos desenhos.*

*Ao MSc. Eduardo Giampaoli, pelas valiosas discussões sobre o programa Origin.*

*À Dra. Maria da Penha Albuquerque Potiens e ao MSc. Vitor Vívoló, pelo apoio na utilização do espectrômetro.*

*Ao Sr. Nildemar A. M. Ferreira, pela análise da estrutura metálica do portadosímetro.*

*À Sra. Ana Paula Amaral Martins, meu carinho especial, pela sensibilidade em perceber o essencial e confiar no que viu.*

*À Sra. Ana Helena Vieira Winter, um agradecimento especial, por me fazer ver a vida sob uma nova perspectiva e por sua torcida incessante, mesmo estando longe.*

*Ao MSc. Robson Gomes Spinelli, por ter me acolhido na hora em que eu mais precisei de alguém que acreditasse em mim.*

*À Sra. Solange Regina Schaffer, pela compreensão e confiança durante o desenvolvimento deste trabalho.*

*Aos secretários Creu Costa, Luciana Dilser, Elaine Oliveira e Diego Ramos, da Fundacentro, e Adriana Lima e Filomena Beraldo, do IPEN, sempre atenciosos me ajudando a solucionar os detalhes burocráticos.*

*Aos colegas do grupo da Pós-Graduação: MSc. Adeílson P. Melo, Dr. Alessandro M. Costa, BSc. Ana Carolina Bessa, MSc. Ana Maia, Dra. Felícia Rocha, Dra. Maria Inês Teixeira, MSc. Mércia Oliveira e Dr. Oscar Alvarez que estiveram presentes nos bons e maus momentos.*

*A todos os amigos da Coordenação de Higiene do Trabalho da Fundacentro pelo companheirismo em vários momentos desta trajetória.*

*Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares/CNEN, pela infra-estrutura oferecida na realização deste trabalho.*

*Ao Centro de Medicina Nuclear/USP, pela cessão de suas instalações, permitindo a realização da monitoração do pessoal envolvido com radiofármacos beta.*

*Aos meus familiares, sempre tão presentes, sem vocês eu não teria chegado até aqui!*

“Apesar das ruínas e da morte  
Onde sempre acabou cada ilusão  
A força dos meus sonhos é tão forte  
Que de tudo renasce a exaltação  
E nunca as minhas mãos estão vazias”

*Sophia de Mello Breyner*

# DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS TANDEM DE ACTIVÍMETROS E ESTABELECIMENTO DE DOSIMETRIA BETA EM SERVIÇOS DE MEDICINA NUCLEAR

Sonia Garcia Pereira Cecatti

## RESUMO

Um programa de controle de qualidade nos Serviços de Medicina Nuclear inclui desde a verificação de qualquer equipamento utilizado para o diagnóstico e tratamento até a monitoração individual dos trabalhadores ocupacionalmente expostos às radiações ionizantes. Neste trabalho foram realizados os testes operacionais em três tipos de activímetros para assegurar seu desempenho, utilizando-se fontes seladas padrão de  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{60}\text{Co}$ . Foram estabelecidos e caracterizados sistemas tandem de activímetros utilizando-se quatro absorvedores cilíndricos de materiais diferentes, constituindo um teste adicional no programa de controle de qualidade dos equipamentos medidores de atividade dos radiofármacos, nos Serviços de Medicina Nuclear. A utilidade principal deste novo teste é a possibilidade de detecção de impurezas nos radiofármacos, quando a razão das medições com os absorvedores for diferente das obtidas em condições ideais em laboratório. Foram também estudadas as características dosimétricas de três tipos de detectores de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}+\text{Teflon}$ , para uma escolha adequada do material a ser utilizado na monitoração individual de trabalhadores envolvidos com a radiação beta. Os detectores termoluminescentes foram calibrados em campos padrões de radiação beta de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ ,  $^{204}\text{Tl}$ ,  $^{147}\text{Pm}$ ,  $^{153}\text{Sm}$  e  $^{32}\text{P}$ . Foi ainda desenvolvido um portador dosímetro de pulso e foram propostos dosímetros para monitoração dos trabalhadores que manuseiam radiofármacos beta nos Serviços de Medicina Nuclear.

# DEVELOPMENT OF DOSE CALIBRATORS TANDEM SYSTEMS AND ESTABLISHMENT OF BETA DOSIMETRY IN NUCLEAR MEDICINE

Sonia Garcia Pereira Cecatti

## ABSTRACT

A quality control program at Nuclear Medicine Services includes the checking of all equipment used for diagnostics and treatment, and the individual monitoring of the workers occupationally exposed to ionizing radiations. In this work the main quality control tests were performed with three dose calibrators using standard radiation sources of  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{60}\text{Co}$ . Tandem systems of dose calibrators were established and characterized using four cylindrical absorbers of different materials for an additional quality control test in Nuclear Medicine. The main utility of this new test is the possibility of impurity detection in radiopharmaceuticals, when the ratio of the measurements with different absorbers is different from that obtained at the laboratory in ideal conditions. The dosimetric characteristics of three types of  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon pellets were studied for an appropriate choice of the material to be used for individual monitoring of workers. The thermoluminescent detectors were irradiated using beta sources of  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ ,  $^{204}\text{Tl}$ ,  $^{147}\text{Pm}$ ,  $^{153}\text{Sm}$  and  $^{32}\text{P}$ . A wrist badge for beta individual monitoring was developed for workers that handle beta radiopharmaceuticals in Nuclear Medicine Services.

## SUMÁRIO

	<i>Página</i>
LISTA DE TABELAS . . . . .	12
LISTA DE FIGURAS . . . . .	17
LISTA DE ABREVIATURAS . . . . .	25
<b>1 INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>27</b>
<b>2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS . . . . .</b>	<b>33</b>
<b>2.1 <i>Controle de Qualidade em Medicina Nuclear</i> . . . . .</b>	<b>33</b>
2.1.1 Medicina Nuclear . . . . .	33
2.1.2 Aplicação dos radionuclídeos na medicina . . . . .	34
2.1.2.1 Radionuclídeos para diagnóstico . . . . .	35
2.1.2.2 Radionuclídeos para terapia . . . . .	36
2.1.3 Controle de qualidade dos activímetros . . . . .	36
2.1.4 Espectrometria com detector de estado sólido . . . . .	41
2.1.5 Sistemas tandem . . . . .	42
<b>2.2 <i>Dosimetria Termoluminescente</i> . . . . .</b>	<b>42</b>
2.2.1 Termoluminescência . . . . .	43
2.2.2 Materiais termoluminescentes . . . . .	47
2.2.3 Dosimetria termoluminescente . . . . .	48
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS . . . . .</b>	<b>50</b>
<b>3.1 <i>Controle de Qualidade em Medicina Nuclear</i> . . . . .</b>	<b>50</b>
3.1.1 Sistemas de medidas . . . . .	50
3.1.1.1 Activímetro padrão secundário . . . . .	50
3.1.1.2 Activímetro comercial . . . . .	52
3.1.1.3 Activímetro desenvolvido no IPEN. . . . .	53

3.1.1.4 Rastreabilidade dos sistemas de medida . . . . .	55
3.1.2 Fontes padrão . . . . .	55
3.1.2.1 Fontes seladas . . . . .	55
3.1.2.2 Fontes não seladas . . . . .	57
3.1.3 Espectrometria com detector de estado sólido para fótons. . . . .	59
3.1.4 Absorvedores . . . . .	60
<b>3.2 Dosimetria Termoluminescente . . . . .</b>	<b>62</b>
3.2.1 Sistemas de radiação . . . . .	63
3.2.1.1 Radiação gama . . . . .	63
3.2.1.2 Radiação beta . . . . .	63
3.2.2 Sistema leitor TL. . . . .	65
3.2.3 Materiais utilizados. . . . .	66
3.2.3.1 Pastilhas de CaSO <sub>4</sub> :Dy (50 mg). . . . .	67
3.2.3.2 Pastilhas de CaSO <sub>4</sub> :Dy (20 mg). . . . .	68
3.2.3.3 Pastilhas de CaSO <sub>4</sub> :Dy + 10% de grafite. . . . .	68
3.2.4 Tratamento térmico . . . . .	69
3.2.5 Objeto simulador. . . . .	71
<b>4 RESULTADOS . . . . .</b>	<b>73</b>
<b>4.1 Controle de Qualidade em Medicina Nuclear . . . . .</b>	<b>73</b>
4.1.1 Testes de controle de qualidade . . . . .	73
4.1.1.1 Teste de precisão e de exatidão . . . . .	74
4.1.1.2 Teste de reprodutibilidade da resposta . . . . .	76
4.1.1.3 Teste de linearidade . . . . .	77
4.1.1.4 Calibração com fontes seladas . . . . .	83
4.1.1.5 Calibração com fontes não seladas . . . . .	88
4.1.2 Espectrometria com detector de estado sólido . . . . .	89
4.1.3 Formação de sistemas tandem . . . . .	91
4.1.3.1 Reprodutibilidade com fontes seladas . . . . .	102
4.1.3.2 Reprodutibilidade com fontes não seladas . . . . .	104
4.1.4 Sistemas tandem com impurezas. . . . .	108
4.1.5 Aplicações dos sistemas tandem . . . . .	115
<b>4.2 Dosimetria Termoluminescente . . . . .</b>	<b>124</b>
4.2.1 Estabilidade do sistema leitor TL . . . . .	125

4.2.2	Curvas de emissão TL . . . . .	126
4.2.3	Reprodutibilidade da resposta TL . . . . .	128
4.2.4	Curvas de calibração. . . . .	130
4.2.4.1	Feixes de radiação gama. . . . .	130
4.2.4.2	Feixes de radiação beta . . . . .	130
4.2.4.3	Calibração individual dos detectores. . . . .	133
4.2.5	Limites mínimos detectáveis . . . . .	133
4.2.6	Dependência energética . . . . .	134
4.2.7	Dependência angular . . . . .	136
<b>4.3</b>	<b>Monitoração Beta. . . . .</b>	<b>137</b>
4.3.1	Desenvolvimento de um arranjo experimental . . . . .	137
4.3.1.1	Determinação da atividade e da taxa de dose absorvida da fonte de $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ (LMN/IPEN) . . . . .	140
4.3.1.2	Reprodutibilidade . . . . .	141
4.3.1.3	Curvas de calibração. . . . .	142
4.3.2	Aplicação da dosimetria TL em monitoração beta. . . . .	144
4.3.2.1	Determinação das doses absorvidas ( $^{153}\text{Sm}$ , $^{32}\text{P}$ ). . . . .	145
4.3.2.2	Curvas de calibração. . . . .	146
4.3.3	Dosímetro de pulso . . . . .	150
4.3.3.1	Protótipo do porta-dosímetro . . . . .	150
4.3.3.2	Curvas de calibração. . . . .	151
4.3.3.3	Aplicações do dosímetro de pulso. . . . .	155
4.3.3.4	Atenuação e espalhamento no porta-dosímetro . . . . .	160
4.3.3.5	Radiação gama e beta do $^{153}\text{Sm}$ . . . . .	164
4.3.3.6	Utilização do protótipo de dosímetro. . . . .	167
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES . . . . .</b>	<b>172</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS. . . . .</b>	<b>175</b>

## LISTA DE TABELAS

	<i>Página</i>
2.1 Testes de controle de qualidade dos activímetros . . . . .	39
3.1 Características das fontes padrão. . . . .	56
3.2 Características das fontes não seladas, produzidas no IPEN, utilizadas em diagnóstico. . . . .	57
3.3 Características das fontes não seladas, produzidas no IPEN, utilizadas em terapia . . . . .	58
3.4 Características do sistema padrão secundário de radiação beta . . . . .	64
3.5 Características dos radionuclídeos emissores beta do sistema padrão secundário. . . . .	64
3.6 Características dos dosímetros TL produzidos no IPEN. . . . .	67
4.1 Teste de exatidão dos activímetros NPL (LMN), NPL (LCI), IEN e IPEN. Desvios percentuais (s) dos valores da atividade medida com relação ao valor da atividade da fonte padrão, corrigido para o decaimento radioativo . . . . .	75
4.2 Teste de precisão nos sistemas NPL (LMN), NPL (LCI), IEN e IPEN. É apresentado apenas o maior valor obtido do desvio padrão percentual (s) em cada caso . . . . .	75
4.3 Variações percentuais máximas (s) obtidas no teste de reprodutibilidade com as fontes padrão . . . . .	76
4.4 Variações percentuais (s) máximas obtidas no teste de reprodutibilidade com as fontes não seladas . . . . .	77
4.5 Coeficientes de correlação das curvas de linearidade dos activímetros NPL (LMN), NPL (LCI), IEN e IPEN . . . . .	80

4.6	Fatores de correção dos activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IEN. No caso do sistema IPEN, os dados são coeficientes de calibração	83
4.7	Fatores de correção dos activímetros NPL (LMN) e NPL (LCI), utilizando-se o absorvedor de PVC. No caso do sistema IPEN, os dados são coeficientes de calibração . . . . .	86
4.8	Fatores de correção dos activímetros NPL (LMN) e NPL (LCI), utilizando-se o absorvedor de latão. No caso do sistema IPEN, os dados são coeficientes de calibração . . . . .	86
4.9	Fatores de correção dos activímetros NPL (LMN) e NPL (LCI), utilizando-se o absorvedor de polipropileno. No caso do sistema IPEN, os dados são coeficientes de calibração . . . . .	87
4.10	Fatores de correção dos activímetros NPL (LMN) e NPL (LCI), utilizando-se o absorvedor de aço. No caso do sistema IPEN, os dados são coeficientes de calibração . . . . .	87
4.11	Fatores de correção e coeficientes de calibração para as fontes não seladas . . . . .	88
4.12	Razão entre as respostas dos activímetros com os absorvedores de aço e PVC para as fontes padrão . . . . .	93
4.13	Razão entre as respostas dos activímetros com os absorvedores de latão e PVC para as fontes padrão . . . . .	93
4.14	Razão entre as respostas dos activímetros com os absorvedores de latão e polipropileno para as fontes padrão . . . . .	93
4.15	Razão entre as respostas dos activímetros com os absorvedores de PVC e polipropileno para as fontes padrão. . . . .	93
4.16	Razão entre as respostas dos activímetros com os absorvedores de aço e polipropileno para as fontes padrão . . . . .	94
4.17	Razão entre as respostas dos activímetros com os absorvedores de latão e aço para as fontes padrão . . . . .	94
4.18	Razão entre as respostas dos absorvedores de aço e PVC para as fontes não seladas. . . . .	98
4.19	Razão entre as respostas dos absorvedores de latão e PVC para as fontes não seladas. . . . .	99

4.20	Razão entre as respostas dos absorvedores de latão e polipropileno para as fontes não seladas . . . . .	99
4.21	Razão entre as respostas dos absorvedores de PVC e polipropileno para as fontes não seladas . . . . .	100
4.22	Razão entre as respostas dos absorvedores de aço e polipropileno para as fontes não seladas . . . . .	100
4.23	Razão entre as respostas dos absorvedores de latão e aço para as fontes não seladas. . . . .	101
4.24	Variações percentuais máximas (s) na reprodutibilidade (10 séries de medidas) dos sistemas tandem, utilizando-se a fonte de $^{57}\text{Co}$ , para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN . . . . .	102
4.25	Variações percentuais máximas (s) na reprodutibilidade (10 séries de medidas) dos sistemas tandem, utilizando-se a fonte de $^{133}\text{Ba}$ , para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN . . . . .	103
4.26	Variações percentuais máximas (s) na reprodutibilidade (10 séries de medidas) dos sistemas tandem, utilizando-se a fonte de $^{137}\text{Cs}$ , para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN . . . . .	103
4.27	Variações percentuais máximas (s) na reprodutibilidade (10 séries de medidas) dos sistemas tandem, utilizando-se a fonte de $^{60}\text{Co}$ , para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN . . . . .	103
4.28	Variações percentuais máximas (s) na reprodutibilidade (6 séries de medidas) dos sistemas tandem, utilizando-se a fonte de $^{153}\text{Sm}$ , para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN . . . . .	104
4.29	Variações percentuais máximas (s) na reprodutibilidade (6 séries de medidas) dos sistemas tandem, utilizando-se a fonte de $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN . . . . .	105
4.30	Variações percentuais máximas (s) na reprodutibilidade (6 séries de medidas) dos sistemas tandem, utilizando-se a fonte de $^{123}\text{I}$ , para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN . . . . .	105
4.31	Variações percentuais máximas (s) na reprodutibilidade (6 séries de medidas) dos sistemas tandem, utilizando-se a fonte de $^{131}\text{I}$ , para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN . . . . .	106
4.32	Variações percentuais máximas (s) na reprodutibilidade (6 séries de medidas) dos sistemas tandem, utilizando-se a fonte de $^{201}\text{Tl}$ , para	106

	os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN . . . . .	
4.33	Variações percentuais máximas (s) na reprodutibilidade (6 séries de medidas) dos sistemas tandem, utilizando-se a fonte de $^{67}\text{Ga}$ , para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN . . . . .	106
4.34	Variações percentuais máximas (s) na reprodutibilidade (6 séries de medidas) dos sistemas tandem, utilizando-se a fonte de $^{51}\text{Cr}$ , para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN . . . . .	107
4.35	Variações percentuais máximas (s) na reprodutibilidade (6 séries de medidas) dos sistemas tandem, utilizando-se a fonte de $^{18}\text{F}$ , para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN . . . . .	107
4.36	Variações percentuais máximas (s) na reprodutibilidade (10 séries de medidas) dos sistemas tandem, utilizando-se a fonte de $^{32}\text{P}$ , para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN . . . . .	107
4.37	Proporções de $^{131}\text{I}$ e o $^{201}\text{Tl}$ nas amostras utilizadas para o estudo do sistema tandem na presença de impurezas . . . . .	109
4.38	Variações percentuais máximas (s) obtidas no teste de reprodutibilidade do sistema tandem, utilizando-se uma fonte com 24,2% de $^{201}\text{Tl}$ e 75,8% de $^{131}\text{I}$ (Amostra 01) . . . . .	113
4.39	Variações percentuais máximas (s) obtidas no teste de reprodutibilidade do sistema tandem, utilizando-se uma fonte com 46,4% de $^{201}\text{Tl}$ e 53,6% de $^{131}\text{I}$ (Amostra 02) . . . . .	114
4.40	Variações percentuais máximas (s) obtidas no teste de reprodutibilidade do sistema tandem, utilizando-se uma fonte com 55,0% de $^{201}\text{Tl}$ e 45,0% de $^{131}\text{I}$ (Amostra 03) . . . . .	114
4.41	Variações percentuais máximas (s) obtidas no teste de reprodutibilidade do sistema tandem, utilizando-se uma fonte com 62,2% de $^{201}\text{Tl}$ e 37,8% de $^{131}\text{I}$ (Amostra 04) . . . . .	114
4.42	Variações percentuais máximas (s) obtidas no teste de reprodutibilidade do sistema tandem, utilizando-se uma fonte com 81,1% de $^{201}\text{Tl}$ e 18,9% de $^{131}\text{I}$ (Amostra 05) . . . . .	115
4.43	Porcentagens de $^{131}\text{I}$ e de $^{201}\text{Tl}$ presentes na amostra na primeira aplicação realizada . . . . .	120
4.44	Porcentagens de $^{131}\text{I}$ e de $^{201}\text{Tl}$ presentes na amostra na segunda aplicação realizada . . . . .	124

4.45	Variações percentuais máximas (s) obtidas no estudo da reprodutibilidade da resposta TL das amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ + Teflon em feixes de radiação gama . . . . .	129
4.46	Limites mínimos detectáveis para as amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ + Teflon, para radiação beta . . . . .	134
4.47	Variações percentuais máximas (s) obtidas no teste de reprodutibilidade da resposta TL das amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ + Teflon em feixe de radiação beta de $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ (LMN/IPEN) no arranjo experimental . . . . .	142
4.48	Fator de atenuação do plástico fino, do plástico fino com o poliestireno e do plástico fino com o poliéster aluminizado para as fontes de $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ , $^{32}\text{P}$ e $^{153}\text{Sm}$ , para medições realizadas no objeto simulador e no porta-dosímetro com aro metálico e de PVC, com $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ + Teflon (20mg) . . . . .	161
4.49	Fatores de atenuação do plástico fino, do plástico fino com o poliestireno e do plástico fino com o poliéster aluminizado para as fontes de $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ , $^{32}\text{P}$ e $^{153}\text{Sm}$ , para medições realizadas no objeto simulador e no porta-dosímetro com aro metálico e de PVC, com $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ + Teflon (20mg) . . . . .	161
4.50	Fatores de atenuação do plástico fino, do plástico fino com o poliestireno e do plástico fino com o poliéster aluminizado para as fontes de $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ , $^{32}\text{P}$ e $^{153}\text{Sm}$ , para medições realizadas no objeto simulador e no porta-dosímetro com aro metálico e de PVC, com $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ + Teflon (20mg) . . . . .	162
4.51	Fatores de espalhamento do plástico fino, do plástico fino com o poliestireno e do plástico fino com o poliéster aluminizado para as fontes de $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ , $^{32}\text{P}$ e $^{153}\text{Sm}$ , para medições realizadas no objeto simulador e no porta-dosímetro com aro metálico e de PVC, com $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ + Teflon (50mg) . . . . .	163
4.52	Fatores de espalhamento do plástico fino, do plástico fino com o poliestireno e do plástico fino com o poliéster aluminizado para as fontes de $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ , $^{32}\text{P}$ e $^{153}\text{Sm}$ , para medições realizadas no objeto simulador e no porta-dosímetro com aro metálico e de PVC, com $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ + Teflon (20mg) . . . . .	163
4.53	Fatores de espalhamento do plástico fino, do plástico fino com o poliestireno e do plástico fino com o poliéster aluminizado para as fontes de $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ , $^{32}\text{P}$ e $^{153}\text{Sm}$ , para medições realizadas no objeto simulador e no porta-dosímetro com aro metálico e de PVC, com $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ + Teflon + 10% C. . . . .	164

4.54	Ensaio para verificação da atenuação da radiação de $^{57}\text{Co}$ , que emite radiação gama de energia próxima à da fonte de $^{153}\text{Sm}$ . . . . .	165
4.55	Dose absorvida devida à radiação beta e gama do $^{153}\text{Sm}$ . . . . .	167
4.56	Atividade inicial do $^{153}\text{Sm}$ e data da realização de cada simulação .	169
4.57	Resultados das doses equivalentes na pele dos trabalhadores ocupacionalmente expostos a $^{153}\text{Sm}$ , durante a simulação realizada.	170

## LISTA DE FIGURAS

	<i>Página</i>
2.1 Esquema de um activímetro . . . . .	37
2.2 Vista interna do poço da câmara de ionização de um activímetro. .	38
2.3 Curva de sensibilidade, em termos da resposta relativa em função da energia do fóton, para um activímetro comercial típico . . . . .	40
2.4 Representação do fenómeno de termoluminescência . . . . .	43
2.5 Esquema dos níveis de energia em semicondutores e isolantes: (a) ionização; (b) e (e) elétron e lacuna armadilhados, respectivamente; (c) e (f) liberação de elétron e lacuna, respectivamente; (d) e (g) transição banda-centro; (h) transição banda-banda. $E_C$ e $E_V$ são as energias do fundo da banda de condução e do topo da banda de valência, respectivamente. . . . .	44
2.6 Modelo simplificado dos processos num cristal TL (a) durante a exposição à radiação ionizante e, (b) durante o aquecimento posterior . . . . .	45
3.1 Activímetro padrão secundário com câmara de ionização tipo poço e módulo de leitura Capintec, modelo CRC <sup>®</sup> -15R . . . . .	51
3.2 Activímetro comercial, MS-13001, desenvolvido no Instituto de Engenharia Nuclear/CNEN, Rio de Janeiro . . . . .	52
3.3 Activímetro desenvolvido no IPEN, câmara de ionização de placas paralelas, do tipo poço, acoplada a um eletrômetro Keithley. . . . .	54
3.4 Esquema das fontes padrão . . . . .	56
3.5 Conjunto de fontes padrão seladas . . . . .	57
3.6 Esquema do frasco de penicilina . . . . .	58

3.7	Frasco de penicilina para fontes não seladas. . . . .	59
3.8	Esquema dos absorvedores . . . . .	60
3.9	Conjunto de absorvedores utilizados: latão, PVC, aço e polipropileno, desenvolvido inicialmente por Dytz e Caldas . . . . .	60
3.10	Sistema leitor TL, Harshaw Nuclear Systems, modelo 2000A, acoplado ao pico amperímetro, modelo 2000B . . . . .	65
3.11	Representação do sistema leitor TL utilizado, com sistema de gás acoplado . . . . .	66
3.12	Amostras de CaSO <sub>4</sub> :Dy + Teflon . . . . .	67
3.13	Forno programável EDG Five II, fabricado pela EDG Equipamentos do Brasil . . . . .	69
3.14	Esquema da prancheta e de sua tampa para o tratamento térmico das amostras TL. . . . .	70
3.15	Prancheta e tampa de alumínio utilizadas no tratamento térmico das amostras TL. . . . .	70
3.16	Esquema do objeto simulador para irradiação das amostras TL . . . . .	71
3.17	Objeto simulador utilizado para irradiação das amostras TL . . . . .	72
4.1	Teste de linearidade para os activímetros NPL(LMN), NPL(LCI) e IEN utilizando-se uma fonte de <sup>99m</sup> Tc com atividade inicial de 1,52 GBq . . . . .	79
4.2	Teste de linearidade para o activímetro IPEN utilizando-se uma fonte de <sup>99m</sup> Tc com atividade inicial de 1,52 GBq . . . . .	79
4.3	Linearidade de resposta do activímetro IPEN para diferentes absorvedores utilizando-se a fonte de <sup>57</sup> Co . . . . .	81
4.4	Linearidade de resposta do activímetro IPEN para diferentes absorvedores utilizando-se a fonte de <sup>133</sup> Ba . . . . .	81
4.5	Linearidade de resposta do activímetro IPEN para diferentes absorvedores utilizando-se a fonte de <sup>137</sup> Cs . . . . .	82

4.6	Linearidade de resposta do activímetro IPEN para diferentes absorvedores utilizando-se a fonte de $^{60}\text{Co}$ . . . . .	82
4.7	Fatores de correção dos activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IEN, utilizando-se as fontes padrão . . . . .	84
4.8	Coefficientes de calibração do activímetro IPEN utilizando-se as fontes padrão . . . . .	85
4.9	Representação esquemática do procedimento de espectrometria gama . . . . .	89
4.10	Espectro da fonte de $^{57}\text{Co}$ , utilizando-se o espectrômetro ORTEC GLP para fótons de energias baixas. . . . .	90
4.11	Espectro da fonte de $^{133}\text{Ba}$ , utilizando-se o espectrômetro ORTEC GLP para fótons de energias baixas. . . . .	90
4.12	Fonte não selada dentro de um dos absorvedores e já no suporte de acrílico, ainda sem a tampa, para ser inserida no activímetro . . . . .	92
4.13	Curvas tandem dos activímetros NPL(LMN), NPL(LCI) e IPEN: razão das respostas com os absorvedores de aço e PVC em função da energia das fontes padrão . . . . .	95
4.14	Curvas tandem dos activímetros NPL(LMN), NPL(LCI) e IPEN: razão das respostas com os absorvedores de latão e PVC em função da energia das fontes padrão . . . . .	95
4.15	Curvas tandem dos activímetros NPL(LMN), NPL(LCI) e IPEN: razão das respostas com os absorvedores de latão e polipropileno em função da energia das fontes padrão. . . . .	96
4.16	Curvas tandem dos activímetros NPL(LMN), NPL(LCI) e IPEN: razão das respostas com os absorvedores de PVC e polipropileno em função da energia das fontes padrão. . . . .	96
4.17	Curvas tandem dos activímetros NPL(LMN), NPL(LCI) e IPEN: razão das respostas com os absorvedores de aço e polipropileno em função da energia das fontes padrão. . . . .	97
4.18	Curvas tandem dos activímetros NPL(LMN), NPL(LCI) e IPEN: razão das respostas com os absorvedores de latão e aço em função da energia das fontes padrão . . . . .	97

4.19	Razão entre a resposta dos activímetros utilizando os absorvedores de aço e PVC para diferentes percentuais de $^{131}\text{I}$ e $^{201}\text{Tl}$ . . . . .	110
4.20	Razão entre a resposta dos activímetros utilizando os absorvedores de latão e PVC para diferentes percentuais de $^{131}\text{I}$ e $^{201}\text{Tl}$ . . . . .	110
4.21	Razão entre a resposta dos activímetros utilizando os absorvedores de latão e polipropileno para diferentes percentuais de $^{131}\text{I}$ e $^{201}\text{Tl}$ . . . . .	111
4.22	Razão entre a resposta dos activímetros utilizando os absorvedores de PVC e polipropileno para diferentes percentuais de $^{131}\text{I}$ e $^{201}\text{Tl}$ . . . . .	111
4.23	Razão entre a resposta dos activímetros utilizando os absorvedores de aço e polipropileno para diferentes percentuais de $^{131}\text{I}$ e $^{201}\text{Tl}$ . . . . .	112
4.24	Razão entre a resposta dos activímetros utilizando os absorvedores de latão e aço para diferentes percentuais de $^{131}\text{I}$ e $^{201}\text{Tl}$ . . . . .	112
4.25	Razão entre a resposta das medidas para os absorvedores de aço e PVC em diferentes percentuais de impurezas de $^{131}\text{I}$ e $^{201}\text{Tl}$ , para os activímetros NPL(LCI) e IPEN: 1ª simulação . . . . .	117
4.26	Razão entre a resposta das medidas para os absorvedores de latão e PVC em diferentes percentuais de impurezas de $^{131}\text{I}$ e $^{201}\text{Tl}$ , para os activímetros NPL(LCI) e IPEN: 1ª simulação . . . . .	117
4.27	Razão entre a resposta das medidas para os absorvedores de latão e polipropileno em diferentes percentuais de impurezas de $^{131}\text{I}$ e $^{201}\text{Tl}$ , para os activímetros NPL(LCI) e IPEN: 1ª simulação . . . . .	118
4.28	Razão entre a resposta das medidas para os absorvedores de PVC e polipropileno em diferentes percentuais de impurezas de $^{131}\text{I}$ e $^{201}\text{Tl}$ , para os activímetros NPL(LCI) e IPEN: 1ª simulação . . . . .	118
4.29	Razão entre a resposta das medidas para os absorvedores de aço e polipropileno em diferentes percentuais de impurezas de $^{131}\text{I}$ e $^{201}\text{Tl}$ , para os activímetros NPL(LCI) e IPEN: 1ª simulação . . . . .	119
4.30	Razão entre a resposta das medidas para os absorvedores de latão e aço em diferentes percentuais de impurezas de $^{131}\text{I}$ e $^{201}\text{Tl}$ , para os activímetros NPL(LCI) e IPEN: 1ª simulação . . . . .	119
4.31	Razão entre a resposta das medidas para os absorvedores de aço e PVC em diferentes percentuais de impurezas de $^{131}\text{I}$ e $^{201}\text{Tl}$ , para os activímetros NPL(LCI) e IPEN: 2ª simulação . . . . .	121

4.32	Razão entre a resposta das medidas para os absorvedores de latão e PVC em diferentes percentuais de impurezas de $^{131}\text{I}$ e $^{201}\text{Tl}$ , para os activímetros NPL(LCI) e IPEN: 2ª simulação . . . . .	121
4.33	Razão entre a resposta das medidas para os absorvedores de latão e polipropileno em diferentes percentuais de impurezas de $^{131}\text{I}$ e $^{201}\text{Tl}$ , para os activímetros NPL(LCI) e IPEN: 2ª simulação . . . . .	122
4.34	Razão entre a resposta das medidas para os absorvedores de PVC e polipropileno em diferentes percentuais de impurezas de $^{131}\text{I}$ e $^{201}\text{Tl}$ , para os activímetros NPL(LCI) e IPEN: 2ª simulação . . . . .	122
4.35	Razão entre a resposta das medidas para os absorvedores de aço e polipropileno em diferentes percentuais de impurezas de $^{131}\text{I}$ e $^{201}\text{Tl}$ , para os activímetros NPL(LCI) e IPEN: 2ª simulação . . . . .	123
4.36	Razão entre a resposta das medidas para os absorvedores de latão e aço em diferentes percentuais de impurezas de $^{131}\text{I}$ e $^{201}\text{Tl}$ , para os activímetros NPL(LCI) e IPEN: 2ª simulação . . . . .	123
4.37	Estudo da estabilidade do sistema leitor TL ao longo do tempo. $\bar{L}$ : média da leituras; $L_0$ : valor de referência . . . . .	126
4.38	Curva de emissão TL do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ + Teflon (50 mg) irradiado com 10 mGy ( $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ ) . . . . .	127
4.39	Curva de emissão TL do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ + Teflon (20 mg) irradiado com 10 mGy ( $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ ) . . . . .	127
4.40	Curva de emissão TL do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ + Teflon + 10 % C irradiado com 10 mGy ( $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ ) . . . . .	128
4.41	Curva de calibração do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ + Teflon (50 mg) obtida em feixe de radiação gama . . . . .	130
4.42	Curva de calibração do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ + Teflon (20 mg), obtida em feixe de radiação gama . . . . .	131
4.43	Curva de calibração do $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ + Teflon + 10% C, obtida em feixe de radiação gama. . . . .	131
4.44	Curvas de calibração das amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ + Teflon, obtidas em feixe de radiação beta ( $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ ) . . . . .	132

4.45	Dependência energética da resposta TL das amostras de CaSO <sub>4</sub> :Dy + Teflon para radiação beta . . . . .	135
4.46	Dependência angular da resposta TL das amostras de CaSO <sub>4</sub> :Dy+Teflon para <sup>90</sup> Sr+ <sup>90</sup> Y (3,5 mGy) . . . . .	136
4.47	Esquema do arranjo experimental para irradiação com fontes beta. a) dimensões da fonte depositada preparada pelo LMN/IPEN; b) detalhe frontal do suporte com a fonte depositada encaixada; c) detalhe lateral do suporte; d) vista em perspectiva do suporte.. . . .	139
4.48	Arranjo experimental para irradiação com fontes beta. . . . .	140
4.49	Curva de calibração do CaSO <sub>4</sub> :Dy + Teflon (50mg), obtida com as fontes de <sup>90</sup> Sr+ <sup>90</sup> Y do (LCI/IPEN) e <sup>90</sup> Sr+ <sup>90</sup> Y (LMN/IPEN) . . . . .	143
4.50	Curva de calibração do CaSO <sub>4</sub> :Dy + Teflon (20mg), obtida com as fontes de <sup>90</sup> Sr+ <sup>90</sup> Y do (LCI/IPEN) e <sup>90</sup> Sr+ <sup>90</sup> Y (LMN/IPEN) . . . . .	143
4.51	Curva de calibração do CaSO <sub>4</sub> :Dy + Teflon + 10% C, obtida com as fontes de <sup>90</sup> Sr+ <sup>90</sup> Y do (LCI/IPEN) e <sup>90</sup> Sr+ <sup>90</sup> Y (LMN/IPEN) . . . . .	144
4.52	Curva de calibração para as amostras de CaSO <sub>4</sub> :Dy + Teflon (50mg) para a radiação beta do <sup>153</sup> Sm. . . . .	147
4.53	Curva de calibração para as amostras de CaSO <sub>4</sub> :Dy + Teflon (20mg) para a radiação beta do <sup>153</sup> Sm. . . . .	147
4.54	Curva de calibração para as amostras de CaSO <sub>4</sub> :Dy + Teflon + 10% C para a radiação beta do <sup>153</sup> Sm.. . . .	148
4.55	Curva de calibração para as amostras de CaSO <sub>4</sub> :Dy + Teflon (50mg) para a radiação beta do <sup>32</sup> P.. . . . .	148
4.56	Curva de calibração para as amostras de CaSO <sub>4</sub> :Dy + Teflon (20mg) para a radiação beta do <sup>32</sup> P.. . . . .	149
4.57	Curva de calibração para as amostras de CaSO <sub>4</sub> :Dy + Teflon + 10% C para a radiação beta do <sup>32</sup> P.. . . . .	149
4.58	Suporte de PVC expandido para irradiação das amostras no portadosímetro com radiação beta.. . . . .	150
4.59	Protótipo do dosímetro de pulso com aro metálico. . . . .	151

Estima-se que existam, hoje, em operação no país 400 câmaras gama, sendo 100 câmaras planares e 300 tomográficas (SPECT) [MENDES e col., 2004].

Na área de Medicina Nuclear, a utilização clínica de substâncias marcadas com radioisótopos, e apresentadas na forma de fontes não seladas, tem como objetivo principal a avaliação orgânica funcional de inúmeros processos fisiológicos. A administração correta da atividade do radiofármaco prescrita a um paciente é um fator importante para assegurar a confiabilidade no diagnóstico ou na eficiência terapêutica, ao mesmo tempo em que se mantenha a exposição dos trabalhadores tão baixa quanto possível [OROPESA e col., 2003]. A exposição de um trabalhador, ocupacionalmente exposto às radiações ionizantes, em Medicina Nuclear, ocorre principalmente nas atividades de preparação da dose terapêutica e ensaio, administração do radiofármaco e obtenção da imagem. Durante a obtenção da imagem, após a injeção do radiofármaco, o paciente constitui a maior fonte de exposição.

Para assegurar a quantidade adequada do radiofármaco, antes de ser administrada ao paciente, a atividade empregada deve ser determinada com precisão. O instrumento que permite essa determinação é o activímetro, também chamado de calibrador de dose, curiômetro ou medidor de atividade, que fornece diretamente a leitura da atividade em múltiplos de becquerel (Bq) ou submúltiplos de curies (Ci) [CNEN, 1996].

Esses sistemas de medida requerem verificações permanentes quanto ao seu funcionamento para garantir medidas da atividade com incertezas mínimas. A falta de exatidão da resposta dos activímetros pode causar erros significativos na atividade administrada ao paciente, o que pode resultar em imagens de baixa qualidade acarretando a repetição do exame e o aumento da dose no paciente e na equipe de profissionais envolvidos nas diferentes etapas do procedimento.

Entretanto, a simples utilização de uma câmara de ionização, tipo poço, na determinação da atividade de um material não permite a detecção de impurezas nos radiofármacos. Quando impurezas são encontradas nos

radiofármacos, elas podem produzir conseqüências indesejáveis, tal como aumentar a dose absorvida pelos pacientes e pelos trabalhadores envolvidos no procedimento. A presença de impurezas nos radionuclídeos afetará a leitura do instrumento, a menos que o efeito da impureza seja eliminado por filtração. Uma proposta é o estabelecimento de sistemas tandem para serem utilizados nos Serviços de Medicina Nuclear, de modo que se permita a detecção da presença de impurezas nos radionuclídeos.

O método tandem tem sido utilizado há muito tempo com dosímetros termoluminescentes [KENNEY e CAMERON, 1963], [GORBICS e ATTIX, 1968], [SPURNY e col., 1973], [DaROSA e NETTE, 1988] e com câmaras de ionização [ALBUQUERQUE e CALDAS, 1989], [CALDAS, 1991], [GALHARDO e CALDAS, 2000], [SARTORIS e CALDAS, 2001], [COSTA e CALDAS, 2003a], [COSTA e CALDAS, 2003b]. Na dosimetria termoluminescente o sistema tandem consiste no uso de dois detectores termoluminescentes individuais com dependências energéticas diferentes e que permitem a determinação da energia efetiva em campos de radiação não conhecidos. No caso das câmaras de ionização, os sistemas tandem consistem de duas câmaras individuais com dependências energéticas diferentes que permitem a confirmação dos valores de camadas semi-redutoras ou de energias efetivas em feixes de raios X previamente determinados pelo método convencional. Os sistemas tandem com câmaras de ionização têm mostrado um desempenho bastante satisfatório nos programas de controle de qualidade em equipamentos de raios X, níveis de radioterapia e radiodiagnóstico, na verificação da constância da qualidade dos feixes.

No caso da monitoração individual dos trabalhadores ocupacionalmente expostos às radiações ionizantes, atualmente a legislação brasileira exige que ela seja realizada por serviços de monitoração externa que dispõem de técnicas dosimétricas para medir doses de radiações X e gama [CNEN, 1988]. A dosimetria das radiações X e gama já está bem estabelecida.

No entanto, o aumento crescente do número de procedimentos médicos utilizando fontes de radiação beta requer uma atenção especial às doses

de extremidade recebidas pelos trabalhadores nos Serviços de Medicina Nuclear, além de implicar na realização de uma dosimetria mais acurada desses trabalhadores [BARTH e col., 2004], [BERUS e col., 2004].

A energia da radiação beta pode ser totalmente absorvida num pequeno volume de tecido. A equipe de profissionais envolvida nos procedimentos em Medicina Nuclear está exposta a uma dose de radiação no corpo todo; entretanto, as extremidades recebem uma dose de radiação muito maior do que as outras partes do corpo [TSOPELAS e col., 2003].

Höfert e col. [1986] determinaram a dose absorvida no cristalino utilizando um programa computacional para calcular a dose absorvida, a partir de uma geometria que simulava o globo ocular, o cristalino e a fonte beta. Os dados teóricos foram comparados com medidas experimentais, realizadas com um monitor de radiação, tipo câmara de ionização, Nardeaux, modelo Babyline, concluindo-se que a dose no cristalino não é um fator limitante, mas por outro lado as doses de extremidade podem ser extremamente altas e não são avaliadas corretamente pelos instrumentos utilizados na rotina dos Serviços de Medicina Nuclear.

González e col. [1999] forneceram informações sobre um centro médico de imagem, onde os trabalhadores são monitorados com dosímetros termoluminescentes de LiF (TLD-100), Harshaw, para radiação gama. Os trabalhadores do setor de radiofarmácia foram, sem dúvida, os mais expostos, ainda que as doses anuais de corpo inteiro estivessem dentro dos limites do relatório ICRP 60 [ICRP, 1991]. No entanto, as doses de extremidades desses profissionais podem exceder o limite anual.

Alguns pesquisadores [GREAVES e TINDALE, 1999], [CASTRONOVO e SCHLEIPMAN, 1999], [CHIESA e col., 1997], [BENATAR e col., 2000] determinaram a taxa de dose externa média de pacientes injetados, a várias distâncias (0,5 cm; 1 cm e 2 cm), e calcularam o tempo médio em que um trabalhador fica exposto, a essas distâncias, de um paciente radioativo.

Clarke e col. [1992] e Sloboda e col. [1987] utilizaram dosímetros eletrônicos de bolso para registrar a dose total recebida pelos trabalhadores por procedimento realizado em Serviços de Medicina Nuclear. Lundberg e col. [2002], utilizando os dosímetros eletrônicos Dosicard, Eurisys Mesures, França, determinaram a dose equivalente no corpo inteiro, devida à radiação gama, para cada técnico, por procedimento realizado num Serviço de Medicina Nuclear.

Tsopelas e col. [2003] procuraram uma maneira prática para reduzir a dose absorvida recebida nas mãos sem alterar significativamente as atividades rotineiras necessárias na preparação dos radiofármacos. Eles utilizaram uma tampa de chumbo, modificada para lacrar o frasco contendo  $^{99m}\text{Tc}$ , deixando apenas um pequeno orifício centralizado de 2,5 mm de diâmetro, que permitia a introdução de uma seringa com agulha longa, de modo a acessar a solução sem precisar destampar o frasco.

Chruscielewski e col. [2002] utilizaram dosímetros termoluminescentes (TL) de LiF para determinar a dose absorvida que os trabalhadores recebiam nas mãos durante suas atividades de preparo e manuseio de radiofármacos, no caso de exposição à radiação gama.

Existem vários métodos de medida baseados na termoluminescência para a dosimetria das radiações pouco penetrantes. Diferentes sistemas de detecção podem ser melhorados pela otimização dos projetos dos dosímetros e pelo desenvolvimento de novos materiais ou equipamentos de avaliação.

A determinação da dose devida à radiação beta enfrenta ainda várias dificuldades; entre elas pode-se citar a necessidade de se medir a dose nas camadas muito finas da pele.

A grandeza utilizada para radiação beta é a dose equivalente na pele. Para determinação da dose de extremidade são geralmente utilizados detectores TL devido ao seu tamanho. O detector deve ser fino a fim de se evitar uma atenuação significativa da radiação [BERUS e col., 2004]. Entretanto, a resposta

da maioria dos dosímetros TL depende do radionuclídeo e da geometria de irradiação.

Os objetivos deste trabalho são: estabelecer e caracterizar sistemas tandem de activímetros utilizando absorvedores cilíndricos de materiais com densidades diferentes, para constituírem um teste adicional aos programas de controle de qualidade realizados nos Serviços de Medicina Nuclear; determinar as principais características dosimétricas de materiais TL, de fabricação nacional, para uma escolha adequada do dosímetro a ser utilizado na monitoração de trabalhadores ocupacionalmente expostos à radiação beta; e propor um protótipo de dosímetro TL de pulso, para trabalhadores que manipulam radiofármacos emissores de radiação beta, específico para o tipo de radiação utilizada.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Este capítulo está dividido em duas partes; na primeira parte serão abordados os conceitos e as definições relativas à aplicação dos radionuclídeos em Medicina Nuclear, os testes que devem ser realizados dentro de um programa de controle da qualidade, a espectrometria de feixes gama com detector de estado sólido e a formação de sistemas tandem. Na segunda parte serão descritos o fenômeno da termoluminescência (TL), as propriedades dos materiais TL e as características principais da dosimetria TL.

### ***2.1 Controle de Qualidade em Medicina Nuclear***

Para garantir a obtenção de uma imagem de boa qualidade, isto é, com nitidez e visibilidade dos detalhes das estruturas anatômicas de interesse, assim como assegurar a dose terapêutica, é necessário que a quantidade dos radiofármacos seja garantida por meio de um programa de controle de qualidade.

#### **2.1.1 Medicina Nuclear**

A Medicina Nuclear é uma especialidade das ciências médicas que, utilizando uma diversidade de radionuclídeos incorporados a compostos específicos, avalia a fisiologia e o metabolismo do tecido *in vivo*, mediante o registro da radioatividade detectada em curvas de atividade em função do tempo, tanto para fins de diagnóstico como para fins terapêuticos.

Ao contrário das técnicas de imagem convencionais como radiografia, tomografia computadorizada, ultra-som ou ressonância magnética nuclear, a Medicina Nuclear tem como base a análise da função do tecido e de órgãos

[SCOTT, 1999]. A Medicina Nuclear não avalia as doenças pelo modo como elas se apresentam do ponto de vista anatômico e estrutural, e sim pela forma como a doença atua do ponto de vista funcional, bioquímico, farmacológico e até molecular [BUCHPIGUEL, 1999].

### **2.1.2 Aplicação dos radionuclídeos na medicina**

Os radionuclídeos utilizados tanto para fins de diagnóstico como de terapia são produzidos artificialmente nos ciclotrons e nos reatores nucleares, têm meias-vidas curtas e são utilizados como fontes não seladas, o que implica que a sua manipulação seja realizada de acordo com as recomendações nacionais e internacionais de proteção radiológica.

Os radionuclídeos são úteis para a investigação e para medidas de processos bioquímicos, essenciais à vida. A escolha do substrato, ou análogo, depende principalmente do processo fisiológico a ser medido e, entre outros fatores, inclui a disponibilidade, a facilidade de síntese e a dosimetria da radiação. O radionuclídeo, ligado a um composto farmacológico para ser utilizado como traçador, é denominado radiofármaco, por apresentar afinidades químicas com determinados órgãos do corpo humano e ser útil para transportar a substância radioativa para o órgão ou tecido a ser diagnosticado ou tratado.

A preparação mais comum de um radiofármaco envolve [BOYD e SILVESTER, 1998]: extração do radionuclídeo do volume da substância alvo; purificação do radionuclídeo, a fim de remover impurezas químicas; sintetização do radionuclídeo puro, convertendo-o num composto com características biológicas bem definidas; adição de recipientes necessários para tornar a preparação adequada para a administração ao paciente; e os testes de controle de qualidade.

Os radiofármacos devem apresentar as seguintes propriedades: esterilidade alta; pureza isotópica e química altas; meia-vida curta; toxicidade química baixa; valor alto na relação dose absorvida por atividade e dose local por dose nos órgãos adjacentes; raios gama adequados para a obtenção da imagem, e partículas beta de energia alta no caso do uso em terapia.

### 2.1.2.1 Radionuclídeos para diagnóstico

Em diagnóstico, o principal teste, entre os métodos analíticos utilizados nos procedimentos *in vitro*, denomina-se radioimunoensaio, que se baseia no princípio da quantidade de reagente marcado para quantificar o antígeno ou anticorpo não-marcado na amostra, e é utilizado para quantificar hormônios, drogas, marcadores tumorais, entre outros [IWAHARA, 2001].

Para o diagnóstico *in vivo*, a escolha dos radionuclídeos é realizada com base na sua capacidade de fornecer informação clínica útil e ao mesmo tempo garantir que a exposição do paciente à radiação seja mínima. Para cumprir essas exigências alguns fatores devem ser levados em conta quando da escolha do radionuclídeo [BOYD e SILVESTER, 1998]:

- a) possuir uma meia-vida relativamente curta;
- b) não emitir radiações do tipo partículas ( $\alpha$  ou  $\beta$ );
- c) emitir radiação gama com energia suficientemente alta para ser detectável mesmo se emitida de tecidos mais profundos;
- d) não emitir radiação gama de energia tão alta de forma que a detecção seja ineficiente;
- e) estar disponível a um custo razoável; e
- f) apresentar características químicas boas para a preparação dos radiofármacos.

Em diagnóstico são utilizados radionuclídeos como  $^{99m}\text{Tc}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{18}\text{F}$  e  $^{111}\text{In}$ .

### 2.1.2.2 Radionuclídeos para terapia

As considerações fisiológicas e bioquímicas dos radiofármacos para fins terapêuticos são similares às aplicadas aos utilizados para fins de diagnóstico. Para fins terapêuticos, os radionuclídeos que decaem por emissão de partículas beta são os mais utilizados [NEVES e col., 2002].

O objetivo do uso terapêutico de um radiofármaco é transferir o radionuclídeo para dentro dos tecidos lesionados a serem tratados; assim, as exigências físicas para um radionuclídeo para fins terapêuticos são opostas às necessárias para fins de diagnóstico. Em terapia, o radionuclídeo deveria emitir apenas radiação de partículas (beta ou alfa) e preferivelmente nenhuma radiação penetrante (X ou gama) [CHANDRA, 1992]. Em terapia são utilizados os radionuclídeos como  $^{153}\text{Sm}$ ,  $^{131}\text{I}$  e  $^{32}\text{P}$ .

### 2.1.3 Controle de qualidade dos activímetros

Na área de Medicina Nuclear não é possível estimar diretamente a dose absorvida utilizando qualquer tipo de detector de radiação. A dose é avaliada em função de uma série de dados físicos e biológicos e por modelos matemáticos especialmente desenvolvidos para esse fim. Entre os vários parâmetros utilizados para o cálculo de dose em um órgão estão a meia-vida, a atividade, a energia e a probabilidade de emissão da radiação do radionuclídeo administrado [IWAHARA, 2001].

Na Medicina Nuclear, um programa de controle de qualidade tem o objetivo de assegurar com precisão a medida da atividade dos radiofármacos, antes de seu uso. A característica que diferencia os activímetros de outros sistemas que utilizam câmaras de ionização é o seu circuito eletrônico que permite que a resposta do instrumento seja mostrada diretamente em unidades de atividade [NCRP, 1985].

Um activímetro consiste basicamente de uma câmara de ionização tipo poço, com geometria  $4\pi$ , e é calibrado com fontes de referência, de atividades conhecidas e certificadas, com energias correspondentes aos nuclídeos de interesse [CNEN, 1996].

As partes funcionais do medidor de atividade incluem uma câmara de ionização tipo poço, um eletrômetro para a medição de correntes baixas, um dispositivo para o cálculo da atividade, uma fonte de alta tensão estabilizada e um mostrador para a leitura da atividade da amostra radioativa (FIG. 2.1 e 2.2).

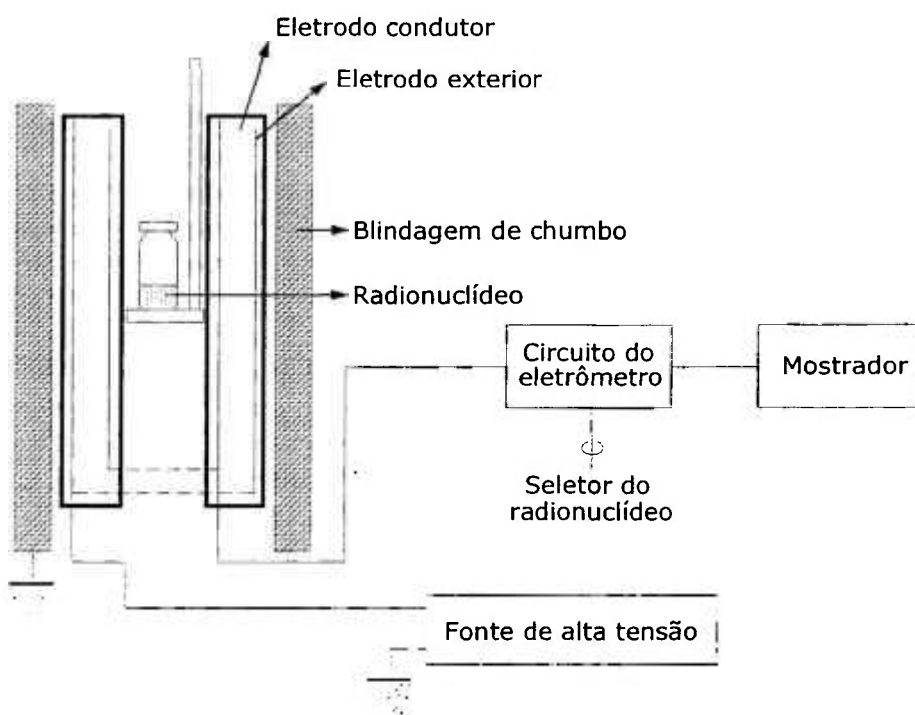


FIGURA 2.1 Esquema de um activímetro.

A câmara de ionização é um recipiente fechado contendo um gás (geralmente argônio) sob pressão, onde dois eletrodos cilíndricos coaxiais são mantidos sob uma diferença de potencial constante. A parte central da câmara constitui um poço ou espaço vazio onde é colocada a amostra radioativa a ser medida (FIG. 2.2). A tensão é fornecida por uma fonte estabilizada e a eletrônica associada converte a corrente de ionização em uma tensão que é proporcional à atividade da amostra. Para uma dada geometria e um nuclídeo específico, a

corrente de ionização é diretamente proporcional à atividade da amostra [IWAHARA, 2001].

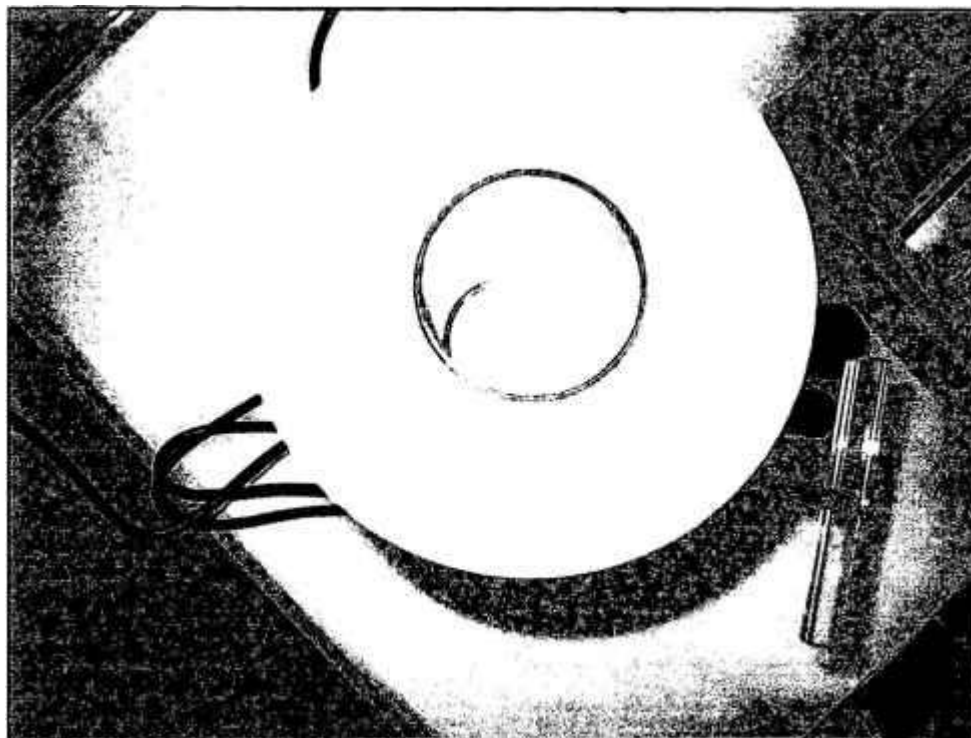


FIGURA 2.2 Vista interna do poço da câmara de ionização de um activímetro.

A norma CNEN-NE-3.05 [CNEN, 1996] recomenda que todo Serviço de Medicina Nuclear possua um medidor de atividade e fontes padrão de  $^{57}\text{Co}$  e  $^{133}\text{Ba}$  para a realização de testes. Entretanto, fontes padrão de  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{60}\text{Co}$  também podem ser utilizadas na rotina dos programas de controle de qualidade nesta área.

A aceitação desses instrumentos pelos Serviços de Medicina Nuclear deve-se a sua simplicidade de operação, estabilidade a curto e longo prazos e a sua versatilidade de operação, permitindo a medida da atividade de soluções radioativas em frascos, seringas e ampolas.

Os activímetros têm um papel relevante na realização de um procedimento clínico; assim, é importante garantir o bom funcionamento desses equipamentos para assegurar a qualidade do diagnóstico e/ou terapia.

Os calibradores de dose exigem verificações permanentes quanto ao seu funcionamento para garantir medidas corretas com variações mínimas. A falta de exatidão da resposta desses equipamentos pode causar erros significativos na atividade administrada ao paciente, podendo resultar em imagens de baixa qualidade acarretando a repetição do exame e o aumento da dose no paciente [SANDLER e col., 1995], [DEBERTIN e SCHRADER, 1992].

A garantia do desempenho satisfatório de um medidor de atividade é obtida por meio dos testes operacionais diários, dentro do programa de controle de qualidade periódico (TAB. 2.1) [CNEN, 1996], [IAEA, 1991].

TABELA 2.1 Testes de controle de qualidade dos activímetros.

Testes	Periodicidade
Resposta à radiação de fundo	Diariamente
Precisão e exatidão	Na instalação e semestral
Reprodutibilidade	Trimestral
Linearidade	Na instalação e trimestral
Geometria	Na instalação
Calibração	Anual e a cada reparo

O teste de exatidão consiste na determinação do desvio percentual do valor da atividade medida com relação ao valor da atividade verdadeira, e o teste de precisão consiste na determinação do desvio percentual entre a medida da atividade individual e a média das medidas.

O teste de reprodutibilidade consiste na verificação da concordância entre os resultados de medições sucessivas de uma mesma grandeza realizadas do mesmo modo e em intervalos de tempo pequenos. O comportamento do medidor de atividade é considerado linear quando a resposta da atividade permanece linear nas diferentes faixas de leitura.

O activímetro deve ser calibrado para os diversos radionuclídeos utilizados clinicamente [CNEN, 1996], [IAEA, 1991]. A determinação da curva de calibração de um medidor é recomendada quando um novo radionuclídeo é introduzido na rotina de um Serviço de Medicina Nuclear ou quando ele sofre um reparo ou deterioração modificando a curva original.

A câmara de ionização, normalmente, é calibrada pelo fabricante utilizando-se um conjunto de fontes rastreadas a um laboratório nacional de padronização. Os activímetros comerciais, em sua maioria, possuem uma pré-seleção para os radionuclídeos mais utilizados, além de possuírem a possibilidade de ajuste para outros radiofármacos. Para que um usuário possa estabelecer o ponto de ajuste correspondente a um novo radionuclídeo é necessário que ele seja estabelecido por um método de interpolação; isto se consegue desde que os esquemas de decaimento para o radionuclídeo em questão estejam disponíveis, e que se conheça a eficiência da câmara em função da energia [NCRP, 1985]. A FIG. 2.3 apresenta uma curva de sensibilidade para um activímetro comercial típico.

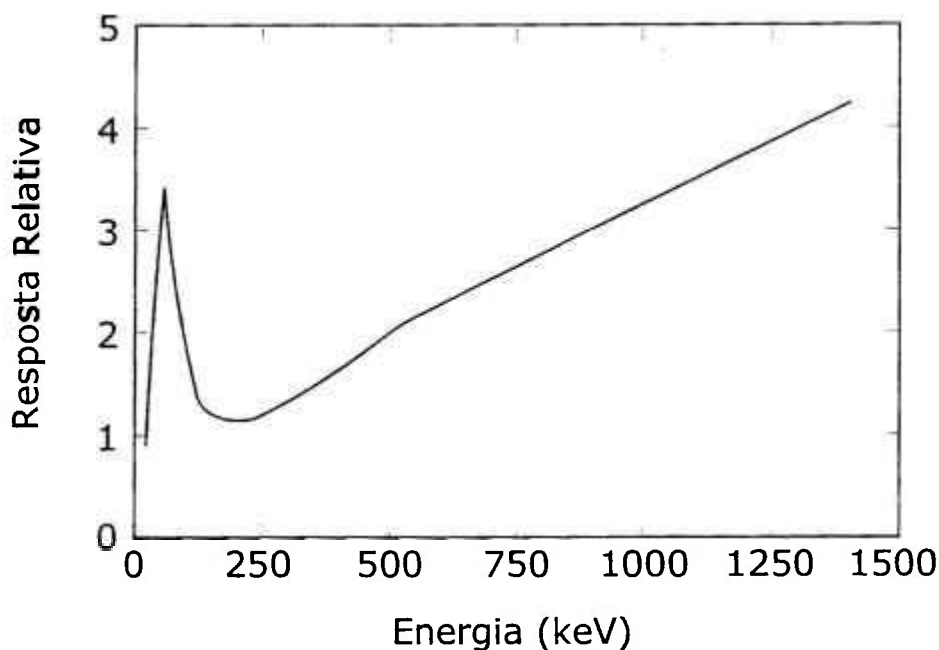


FIGURA 2.3 Curva de sensibilidade, em termos da resposta relativa em função da energia do fóton, para um activímetro comercial típico [NCRP, 1985].

As curvas de sensibilidade são especialmente úteis para se determinar os fatores de calibração de nuclídeos raros para os quais ainda não estão disponíveis padrões de calibração. Entretanto, pode-se ver que existe a possibilidade de ocorrer um erro significativo se a preponderância de fótons estiver abaixo de 200 keV, devido à dificuldade no estabelecimento da curva nessa região [NCRP, 1985].

Para energias acima de 200 keV verifica-se um aumento contínuo em relação à energia. A forma dessa curva depende da natureza e da pressão do gás de preenchimento (geralmente argônio) e do material e da espessura da parede da câmara (geralmente alumínio). O pico na região de energias baixas é devido ao aumento rápido na ocorrência do efeito fotoelétrico com a diminuição da energia e a atenuação dos fótons de energias baixas pelo frasco da amostra, pelo protetor da câmara e paredes da câmara, como também pela absorção dos fótons pelo material da amostra e o seu recipiente.

#### **2.1.4 Espectrometria com detector de estado sólido**

A espectrometria de raios X é um método de análise elementar não-destrutivo que se baseia no fato dos elementos químicos emitirem radiação característica quando sujeitos à excitação apropriada. Essa excitação, que pode ser provocada pelo impacto de partículas aceleradas ou pela incidência de radiação proveniente de um tubo de raios X ou de uma fonte radioativa adequada, é devida à transferência de energia da radiação ou das partículas incidentes para os elétrons internos dos átomos e resulta na ejeção desses mesmos elétrons. A distribuição dos elétrons nos átomos assim ionizados não está em equilíbrio e, num intervalo de tempo muitíssimo curto, os átomos voltam ao seu estado normal, através da transição de elétrons dos níveis mais externos para os níveis mais internos, fenômeno que é acompanhado da emissão de raios X, os quais podem ser detectados com equipamento apropriado.

A energia desses raios X está relacionada com a diferença energética entre os níveis envolvidos nas transições e toma valores característicos para cada

elemento. Por outro lado, a intensidade dos raios X emitidos desse modo com certas energias pode ser relacionada com a concentração dos elementos responsáveis por essas emissões.

Para a determinação de espectros com energias até 300 keV são utilizados detectores de germânio de alta pureza [SELTZER, 1981]. Esses detectores possuem a vantagem de terem uma alta resolução com uma eficiência de detecção razoavelmente alta.

### **2.1.5 Sistemas tandem**

Um sistema tandem é constituído por dois instrumentos com diferentes respostas para uma determinada faixa de energia. Uma curva tandem é obtida por meio da relação das curvas-resposta dos dois sistemas independentes em função da energia da radiação incidente.

O sistema tandem é uma modalidade de teste que pode permitir uma verificação adicional dentro de um programa de controle de qualidade nos Serviços de Medicina Nuclear.

## **2.2 Dosimetria Termoluminescente**

A emissão de luz por um material ao ser aquecido é regida por dois processos básicos: a incandescência ou a luminescência. Na incandescência, o sólido vai mudando de coloração, tornando-se luminoso gradativamente, ao atingir determinadas temperaturas. Essa luminosidade pode ser reproduzida se a temperatura for mantida constante ou se o sólido sofrer um novo processo de aquecimento. Esse fato ocorre devido às vibrações de natureza térmica dos constituintes da matéria.

A luminescência inclui processos de emissão de luz que não têm origem exclusivamente térmica. As emissões luminescentes compreendem a

termoluminescência (TL), a fotoluminescência, a radioluminescência e outros tipos de emissões. Neste trabalho, a emissão de interesse será a TL.

### 2.2.1 Termoluminescência

A TL é a emissão termicamente estimulada, na forma de luz, da energia armazenada em alguns materiais isolantes ou semicondutores, quando aquecidos [McKEEVER, 1985], [MAHESH e col., 1989].

O fenômeno da TL pode ser descrito por dois estágios fundamentais (FIG. 2.4). No primeiro estágio, ocorre uma perturbação no sistema levando-o de um estado de equilíbrio a um metaestável. E o segundo estágio envolve o retorno do sistema do estado termicamente estimulado ao de equilíbrio. No primeiro estágio, a radiação ionizante apresenta-se como o causador da alteração no sistema, e no segundo há a emissão de luz, luminescência, como resultado do relaxamento do sistema durante o retorno à estabilidade. A TL emitida durante esse processo depende da quantidade de energia absorvida, ou seja, da dose de radiação [McKEEVER e col., 1995].

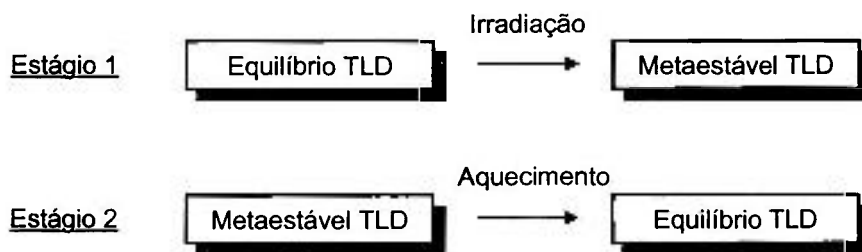


FIGURA 2.4 Representação do fenômeno de termoluminescência.

As propriedades TL podem ser explicadas pelo modelo de bandas para os níveis de energia dos elétrons para sólidos. Os materiais TL são, geralmente, cristais iônicos, nos quais a banda de valência se encontra repleta e a de condução vazia, ambas separadas por uma faixa larga de estados energéticos não permitidos aos elétrons denominada banda proibida [SCHARMANN e BÖHM, 1993].

Quando um cristal é exposto à radiação ionizante são produzidos pares de elétrons-lacunas, que migram através dele até se recombinarem ou serem capturados em armadilhas [McKEEVER, 1985], [SCHARMANN e BÖHM, 1993], [BECKER, 1973]. A FIG. 2.5 é uma representação do modelo de bandas para a emissão TL.

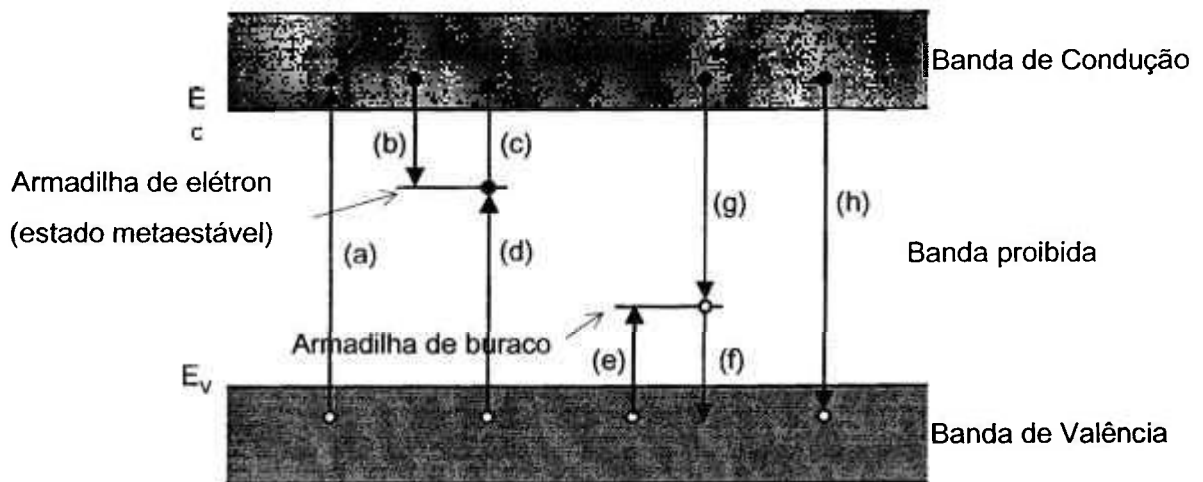


FIGURA 2.5 Esquema dos níveis de energia em semicondutores e isolantes [McKEEVER, 1985]: (a) ionização; (b) e (e) elétron e lacuna armadilhados, respectivamente; (c) e (f) liberação de elétron e lacuna, respectivamente; (d) e (g) transição banda-centro; (h) transição banda-banda.  $E_c$  e  $E_v$  são as energias do fundo da banda de condução e do topo da banda de valência, respectivamente.

A interação da radiação ionizante com o cristal resulta na transferência de elétrons da banda de valência para a banda de condução. Uma parte desses elétrons e lacunas se recombinam com um portador de sinal oposto, liberando sua energia na forma de luz, enquanto que os elétrons e lacunas remanescentes são capturados em armadilhas (FIG. 2.6a) [McKEEVER, 1985].

Quando o cristal é aquecido, os elétrons absorvem energia térmica e escapam das armadilhas, indo para a banda de condução. A maioria dos elétrons retorna para a banda de valência após um curto período de tempo dando origem

à luminescência. Entretanto, alguns elétrons são aprisionados em imperfeições da rede cristalina dentro da banda proibida. Cada elétron deixa uma lacuna na banda de valência, que é rapidamente armadilhada ou se recombina com um elétron. Quando essas recombinações ocorrem durante o aquecimento do cristal, parte da energia é liberada como luz visível ou ultravioleta, observando-se a termoluminescência (FIG. 2.6b) [McKEEVER, 1985], [BECKER, 1973].

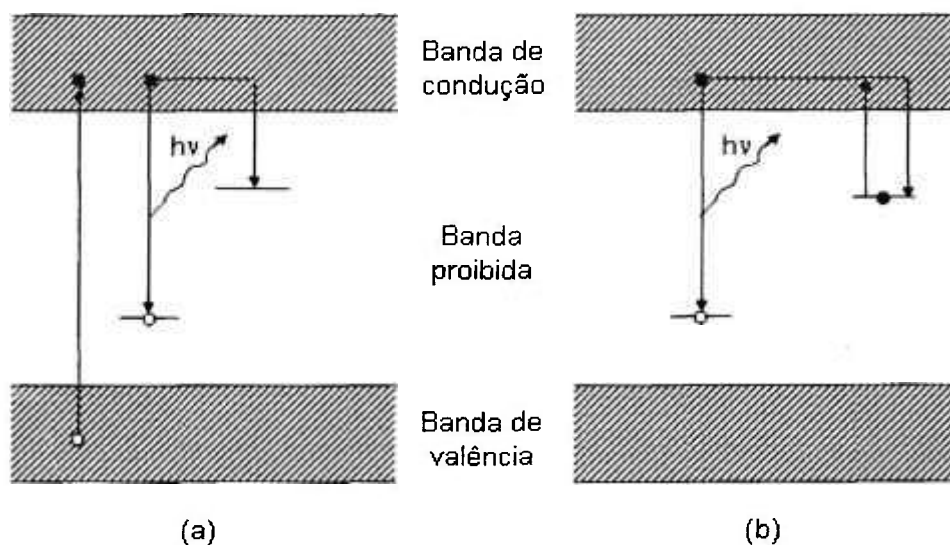


FIGURA 2.6 Modelo simplificado dos processos num cristal TL (a) durante a exposição à radiação ionizante, e (b) durante o aquecimento posterior [BECKER, 1973].

A quantidade da luz emitida é medida em função do tempo ou da temperatura de aquecimento do material. O gráfico da intensidade termoluminescente versus temperatura é denominado curva de emissão termoluminescente, podendo apresentar vários picos. Esses picos estão associados a armadilhas de elétrons, em determinadas profundidades e são caracterizados pelas temperaturas onde ocorrem os máximos de emissão. A forma da curva de emissão depende do tipo da armadilha e do centro de luminescência existentes no cristal, sendo que a presença de mais de um pico na curva indica a existência de grupos de armadilhas de diferentes profundidades. A forma da curva de emissão varia de um material para outro, dependendo não

somente de parâmetros intrínsecos como da energia de ativação e do fator de frequência, mas também da taxa de aquecimento, da dose de radiação e da concentração das armadilhas [McKEEVER, 1985].

Uma característica das curvas TL que exibem cinética de primeira ordem é que a temperatura do pico independe do nível de preenchimento da armadilha, o que é a realidade encontrada na maioria dos materiais dosimétricos. Alguns autores discutiram essa característica teoricamente e determinaram que a cinética de primeira ordem é a única onde as hipóteses são auto-consistentes, isto é, onde ocorre equilíbrio aparente e rearmadilhamento lento [McKEEVER e col., 1995].

Em 1945, Randall e Wilkins formularam um modelo para a termoluminescência usando cinética de primeira ordem, ou seja, não considerando o rearmadilhamento do portador de carga [McKEEVER e col., 1995]. Esse modelo baseia-se na distribuição de Boltzmann que propõe que após a absorção de energia, os elétrons armadilhados são liberados para a banda de condução como uma distribuição Maxwelliana de energia; portanto, a probabilidade por unidade de tempo de um elétron escapar de uma armadilha numa determinada profundidade abaixo da banda de condução, a uma dada temperatura, é dada pela equação de Arrhenius:

$$p = s e^{-E/kT},$$

onde  $E$  é a energia de ativação;  $k$  é a constante de Boltzmann;  $T$  é a temperatura absoluta em graus Kelvin; e  $s$  é um termo dependente da temperatura conhecido como fator de frequência e está relacionado à frequência de oscilação da lacuna e à variação da entropia associada com a carga liberada [McKEEVER e col., 1995], [HOROWITZ e YOSSIAN, 1995].

Uma vez que os elétrons são liberados das armadilhas para a banda de condução, a probabilidade de rearmadilhamento é muito pequena. Nesse caso:

$$\frac{dn}{dt} = -n s e^{-E/kT},$$

onde  $n$  é o número de elétrons armadilhados no tempo  $t$ . Se for considerado que: a) toda ou uma fração constante das cargas liberadas se recombinam; b) o tempo de vida dos elétrons na banda de condução é pequeno, isto é, não existe acúmulo de cargas na banda de condução; c) a eficiência da luminescência dos centros de recombinação independe da temperatura; d) as concentrações totais dos centros de armadilhas e de recombinações são independentes da temperatura; então pode-se dizer que a intensidade TL,  $I(t)$ , é proporcional ao número de cargas elétricas armadilhadas:

$$I = -c \frac{dn}{dt} = c n s e^{-E/kT},$$

onde:  $c$  é uma constante de proporcionalidade que representa a eficiência com que a emissão de luz ocorre nesse processo.

Considerando o aquecimento linear,  $T = T_0 + \beta T$ , onde  $T_0$  é a temperatura inicial e  $\beta$  é a taxa de aquecimento ( $K.s^{-1}$ ), então:

$$I(T) = c s n_0 e^{-E/kT} e^{-\frac{s}{\beta} \int_{T_0}^T e^{-E/kT'} dT'}$$

é a equação da curva de emissão TL para um tipo de armadilha com energia definida  $E$ , ou como é mais conhecida, equação de Randall e Wilkinss [HOROWITZ e YOSSIAN, 1995].

A importância de entender a forma de um pico de emissão TL e os parâmetros que a governam reside na interpretação das variações da curva de emissão que frequentemente resultam de um aumento na dose absorvida, ou de vários tratamentos térmicos [McKEEVER e col., 1995].

## 2.2.2 Materiais termoluminescentes

Na natureza muitos materiais apresentam propriedades TL. Entretanto, para ser considerado um dosímetro, o material deve reunir algumas características, que limitam bastante a quantidade dos cristais TL utilizados em dosimetria. Essas características são:

- a) resposta linear para um amplo intervalo de dose;
- b) resposta preferencialmente pouco dependente da energia dos fótons;
- c) sensibilidade à radiação mesmo para doses muito baixas, entre 5,0  $\mu\text{Sv}$  e 0,2 mSv;
- d) resposta estável, mesmo sob condições climáticas desfavoráveis;
- e) resposta reprodutível, mesmo para doses pequenas, ou seja, próximas ao limite de detecção do material;
- f) curva de emissão TL simples, de preferência com um único pico de emissão, ou com picos de emissão bem distintos.

Para fins de dosimetria, o detector deve ser caracterizado pela curva de emissão TL com um pico, preferencialmente, entre 200°C e 250°C. Esse intervalo de temperatura assegura que a profundidade da armadilha é grande o suficiente para garantir que nenhuma armadilha vazia ocorra, mas também deve ser pequeno o suficiente de modo que a interferência do sinal de radiação de fundo seja desprezível [McKEEVER, 1985].

Na escolha dos materiais TL devem ser considerados, também, os aspectos relacionados à rotina da monitoração [PIESCH, 1981]: as propriedades dosimétricas do detector incluindo intervalo de dose, resposta em função da energia, reprodutibilidade, uniformidade do lote e decaimento térmico; e as exigências do serviço de monitoração, incluindo especificações de desempenho e tipo de comprometimento, a exatidão e precisão necessária do sistema TL, a complexidade do procedimento de aquecimento, o tipo de serviço (nacional ou descentralizado) e o grau de automatização.

### **2.2.3 Dosimetria termoluminescente**

Um sistema de monitoração individual pode utilizar dosímetros termoluminescentes (TLD) para determinar a dose de radiação que um trabalhador ocupacionalmente exposto recebe durante suas atividades rotineiras.

Os detectores TL equivalentes ao tecido estão disponíveis em tamanhos físicos reduzidos e com alta precisão de medida, tanto para monitoração do corpo inteiro, como das extremidades.

A utilização do TLD em monitoração individual deve levar em consideração as recomendações da Comissão Internacional de Proteção Radiológica. Essas recomendações foram publicadas pela Agência Internacional de Energia Atômica [IAEA, 1994]. O sistema de limitação de dose está baseado nas doses equivalentes em vários órgãos e tecidos e na dose efetiva. Estas grandezas podem ser avaliadas por meio das grandezas que podem ser medidas sob condições operacionais, denominadas grandezas operacionais, e são divididas para utilização em monitoração de área e individual.

Em monitoração individual, a dose equivalente pessoal, para exposições localizadas, para radiação de pequeno poder de penetração, como a radiação beta, é a dose equivalente na pele avaliada sobre  $1 \text{ cm}^2$  de pele, independente da área exposta. Entretanto, um novo nome está sendo sugerido internacionalmente para essa grandeza, que passaria a se chamar dose de radiação ponderada [ICRP, *in press*].

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### ***3.1 Controle de Qualidade em Medicina Nuclear***

Nesta seção são apresentados os equipamentos, fontes de radiação e absorvedores utilizados na caracterização e estabelecimento dos sistemas tandem de activímetros.

##### **3.1.1 Sistemas de medidas**

Foram utilizados quatro sistemas de medida, sendo dois activímetros do tipo padrão secundário, um comercial nacional e um sistema desenvolvido no IPEN.

###### **3.1.1.1 Activímetro padrão secundário**

Os sistemas padrão secundário são constituídos por uma câmara de ionização tipo poço e módulo de leitura Capintec, modelo CRC<sup>®</sup>-15R (FIG. 3.1) do National Physical Laboratory (NPL), números de série 111113 e 111115, pertencentes aos Laboratórios de Calibração de Instrumentos (LCI) e de Metrologia Nuclear (LMN) do IPEN, respectivamente, ambos com rastreabilidade ao Laboratório Padrão Primário do NPL (março/1999), Inglaterra.

Cada unidade de leitura (CRC<sup>®</sup>-15R) possui uma interface através da qual são realizadas as leituras e a seleção dos radionuclídeos, e internamente possui um eletrômetro e uma fonte de alta tensão ajustável. A interface onde são realizadas as leituras permite que a seleção do radionuclídeo seja feita tanto pelo nome do radionuclídeo ou por seu número de calibração, fornecendo fatores de

correção em pA/MBq. Apresenta fatores de correção para 50 radionuclídeos pré-ajustados, porém fatores adicionais podem ser acrescentados conforme a necessidade. Todas as informações são apresentadas numa tela de cristal líquido.



FIGURA 3.1 Activímetro padrão secundário com câmara de ionização tipo poço e módulo de leitura Capintec, modelo CRC<sup>®</sup>-15R.

A câmara de ionização tipo poço tem uma altura total de 420 mm e diâmetro de 170 mm, sendo a profundidade do poço de 260 mm e o diâmetro interno de 60 mm. O peso da câmara poço é de 16 kg.

Os activímetros NPL operam num intervalo de medida que permite uma leitura máxima de atividade de até 300 GBq para o <sup>99m</sup>Tc, e de até 240 GBq para

todos os outros radionuclídeos. A resolução desse activímetro é de 0,001 MBq, com uma exatidão do eletrômetro de  $\pm 2\%$ .

O sistema apresenta ainda um painel traseiro, onde é possível conectar uma impressora para registrar os dados obtidos durante as medidas, além de informações sobre o controle de qualidade e outros ajustes do equipamento.

### 3.1.1.2 Activímetro comercial

O activímetro comercial, modelo MS – 13001 (FIG. 3.2), pertencente ao LCI, foi desenvolvido no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN), da Comissão Nacional de Energia Nuclear, Rio de Janeiro.

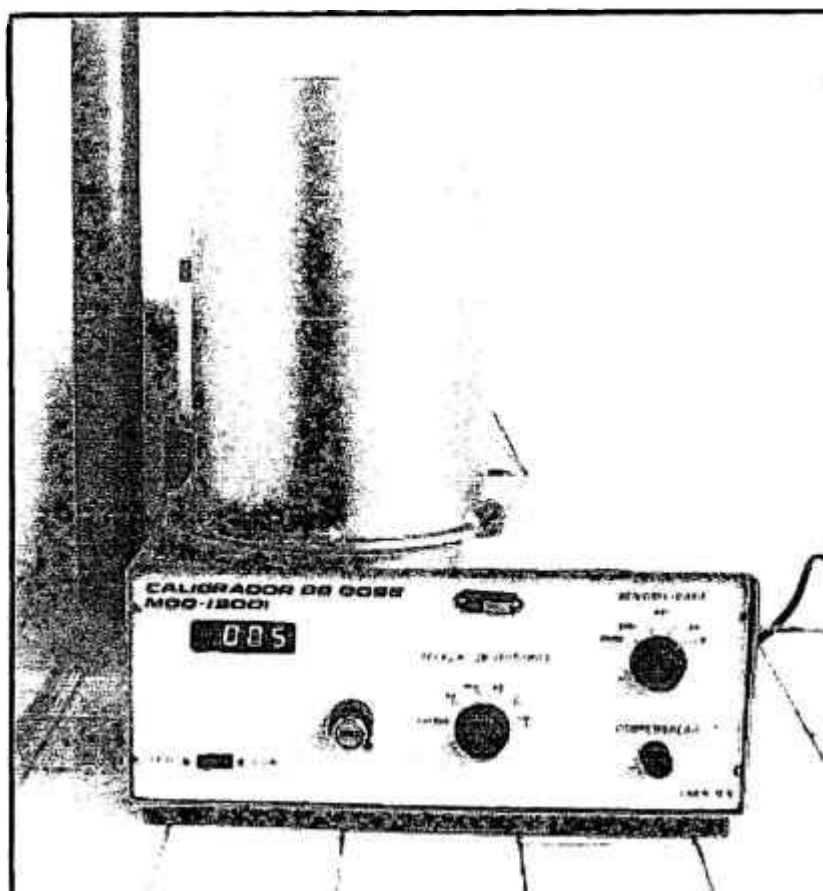


FIGURA 3.2 Activímetro comercial, MS-13001, desenvolvido no Instituto de Engenharia Nuclear/CNEN, Rio de Janeiro.

Esse sistema foi construído com o propósito de permitir um meio rápido, preciso e conveniente de medida da atividade de amostras de radiofármacos. A faixa de leitura desse sistema varia de 37 kBq até 74 GBq. As medidas da atividade são realizadas por circuitos eletrônicos altamente desenvolvidos em conjunto com uma câmara de ionização tipo poço, a argônio pressurizado, altamente sensível e estável. A resposta deste equipamento foi normalizada para duas fontes radioativas:  $^{60}\text{Co}$  e  $^{57}\text{Co}$ , com uma linearidade do detector de  $\pm 2\%$  em todo o intervalo de medida. As leituras da atividade são obtidas em um mostrador digital de 3 ½ dígitos, em quatro escalas calibradas diretamente em curie, e selecionadas manualmente.

A câmara poço tem uma altura total de 300 mm e diâmetro de 170 mm, sendo a profundidade do poço de 235 mm e o diâmetro interno de 70 mm. O peso da câmara poço é de aproximadamente 18 kg, excluindo a blindagem.

A resolução desse activímetro é de 1  $\mu\text{Ci}$  (unidade em que o sistema realiza as medidas), para todos os radionuclídeos previstos. A seleção dos isótopos é feita por uma chave rotativa, situada no painel frontal, para cinco isótopos pré-selecionados, e por meio de mostrador numérico digital para outros isótopos. A exatidão da resposta do instrumento é de  $\pm 1\%$  para amostras padrões certificadas maiores do que 18,5 kBq. A temperatura de operação não é um fator a ser considerado, uma vez que as diferenças entre as medidas são inferiores a  $\pm 0,05\%$  para a menor escala de leituras, desde que em temperaturas ambientes entre 10°C e 35°C.

### 3.1.1.3 Activímetro desenvolvido no IPEN

O sistema de medida desenvolvido no IPEN, também pertencente ao LCI, compreende uma câmara de ionização de placas paralelas, do tipo poço, acoplada a um eletrômetro Keithley (FIG. 3.3).



FIGURA 3.3 Activímetro desenvolvido no IPEN, câmara de ionização de placas paralelas, do tipo poço, acoplada a um eletrômetro Keithley.

O activímetro IPEN foi montado com o objetivo de ser utilizado como um padrão de trabalho, auxiliando em tarefas rotineiras e permitindo oportunidades de estudos, sem que seja necessária uma interferência direta nos instrumentos padrões. Esse sistema permite a determinação de atividades de radiofármacos no intervalo de 20 kBq a 10 GBq, com uma exatidão melhor do que 1%.

A câmara poço foi construída no IPEN [BREDA e col., 1990], em aço, com uma geometria próxima de  $4\pi$ , com um volume sensível de  $5800 \text{ cm}^3$ . As paredes internas da câmara possuem 0,5 mm de espessura. A câmara foi pressurizada em ambiente ultra-estéril, utilizando-se o gás argônio ultra puro, a 0,3 MPa (3 bar), como preenchimento, o que permite uma resposta linear em todo o intervalo de medida.

O eletrômetro Keithley utilizado foi o modelo 610C, que permitiu a obtenção das medidas de correntes de ionização geradas na câmara de poço. A

faixa de utilização do equipamento foi de  $10^{-9}$  A a  $10^{-11}$  A, que é a faixa de corrente gerada no interior da câmara. O mostrador analógico do eletrômetro foi substituído por um multímetro digital, Triel, modelo MTR 4410, com a função de fornecer os valores da corrente gerada na câmara de ionização.

A tensão aplicada à câmara de ionização foi fornecida por uma fonte de tensão estabilizada, Tectrol, modelo TC300-002. Para a realização das medidas a tensão foi fixada em 300 V.

#### **3.1.1.4 Rastreabilidade dos sistemas de medida**

Apesar dos dois sistemas de medida NPL terem sido calibrados pelo Laboratório Padrão Primário do National Physical Laboratory, Inglaterra, neste trabalho será adotado como padrão de referência o sistema designado por NPL (LMN), ficando o sistema NPL (LCI) como um segundo instrumento padrão.

O activímetro comercial será considerado um padrão de transferência e será designado por sistema IEN. O sistema desenvolvido no IPEN será considerado como um instrumento de trabalho, sendo designado como sistema IPEN.

#### **3.1.2 Fontes padrão**

Foram utilizadas fontes padrão seladas e não seladas, descritas a seguir.

##### **3.1.2.1 Fontes seladas**

As fontes padrão utilizadas como referência foram do conjunto de radionuclídeos de  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{60}\text{Co}$  (TAB. 3.1), Amersham, Inglaterra, com

certificados de calibração rastreáveis aos padrões mantidos no Laboratório Padrão Primário da Alemanha, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB).

TABELA 3.1 Características das fontes padrão [Amersham, 1997a, b, c,d].

Fonte	Energia (keV)	Intensidade (%)	Atividade (MBq)	Incerteza (%)	Data de referência	Meia-vida*
$^{57}\text{Co}$	14,41	9,14	197	$\pm 5$	24/01/97	272,11 d
	122,06	85,68				
	136,47	10,67				
$^{133}\text{Ba}$	80,98	34,1	8,84	$\pm 5$	09/01/97	3853,6 d
	302,85	18,32				
	356,02	62,0				
$^{137}\text{Cs}$	661,66	85,2	9,06	$\pm 5$	09/01/97	11015 d
$^{60}\text{Co}$	1173,24	99,89	1,88	$\pm 5$	09/01/97	1925,12 d
	1332,5	99,98				

\*Fonte - National Institute of Standards and Technology [NIST, 2004].

Essas quatro fontes padrão cobrem a faixa de energia de utilização dos activímetros. Cada uma é constituída com um volume determinado, uma vez que os radionuclídeos estão imobilizados no interior de um frasco de polietileno, com volume de 10 ml para a fonte e 15 ml para a resina (FIG. 3.4 e 3.5)

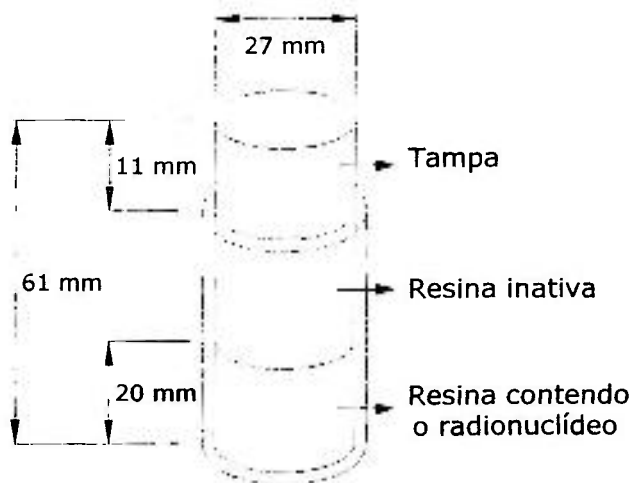


FIGURA 3.4 Esquema das fontes padrão.



FIGURA 3.5 Conjunto de fontes padrão seladas.

### 3.1.2.2 Fontes não seladas

Além das fontes padrão (TAB. 3.1), foram também realizadas medidas com fontes não seladas, utilizadas em diagnóstico e em terapia em Medicina Nuclear. Essas fontes foram produzidas pelo Centro de Radiofarmácia (CR) do IPEN, sendo suas características principais descritas nas Tabelas 3.2 e 3.3.

TABELA 3.2 Características das fontes não seladas, produzidas no IPEN, utilizadas em diagnóstico.

Radionuclídeo	Energias principais** (keV)	Intensidade (%)	Meia-Vida*	Atividade utilizada (MBq)	Data de referência
$^{99m}\text{Tc}$	142,68 ( $\gamma$ )	100	6,0123±0,0032 h	2018,35	02/04/2003 (11:03h)
$^{123}\text{I}$	158,97 ( $\gamma$ )	99,16	13,2235±0,0019 h	177,97	03/04/2003 (09:06h)
$^{201}\text{Tl}$	135,34 ( $\gamma$ ) 167,43 ( $\gamma$ )	12,0 29,6	3,0456±0,0015 d	176,53	02/04/2003 (14:17 h)
$^{67}\text{Ga}$	184,57 ( $\gamma$ ) 300,22 ( $\gamma$ )	21,7 15,8	3,26154±0,00054 d	33,67	02/04/2003 (11:56 h)
$^{51}\text{Cr}$	320,09 ( $\gamma$ )	9,9	27,7010±0,0012 d	57,72	01/04/2003 (10:02 h)
$^{18}\text{F}$	633,5 ( $\beta^+$ ) 511 ( $\gamma$ )	96,8 ***	1,82951±0,00034 h	60,31	01/04/2003 (09:49 h)

Fonte: \* National Institute of Standards and Technology [NIST, 2004].

\*\* [LAGOUTINE e col., 1983], [DELACROIX e col., 1998].

\*\*\* Emissão positrônica.

TABELA 3.3 Características das fontes não seladas, produzidas no IPEN, utilizadas em terapia.

Radionuclídeo	Energias principais** (keV)	Intensidade (%)	Meia-Vida*	Atividade utilizada (MBq)	Data de referência
$^{153}\text{Sm}$	807 ( $\beta^-$ )	21	46,2853 $\pm$ 0,0014 h	57,72	03/04/2003 (09:53 h)
	703 ( $\beta^-$ )	44			
	634 ( $\beta^-$ )	35			
	103,2 ( $\gamma$ )	28			
$^{131}\text{I}$	606 ( $\beta^-$ )	90	8,0197 $\pm$ 0,0022 d	73,63	02/04/2003 (12:57h)
	364,48 ( $\gamma$ )	83,5			
$^{32}\text{P}$	1710,4 ( $\beta^-$ )	100	14,263 $\pm$ 0,003 d	46,25	01/04/2003 (10:28 h)

Fonte: \* National Institute of Standards and Technology [NIST, 2004].

\*\* [LAGOUTINE e col., 1983], [DELACROIX e col., 1998].

As fontes não seladas foram acondicionadas em frascos do tipo penicilina, de 20 ml, onde o radionuclídeo era diluído em uma solução aquosa para injeção, estéril e apirogênica, da Ariston. O volume total de cada amostra foi de 4 ml e os frascos foram mantidos lacrados durante toda a realização dos estudos (FIG. 3.6 e 3.7).

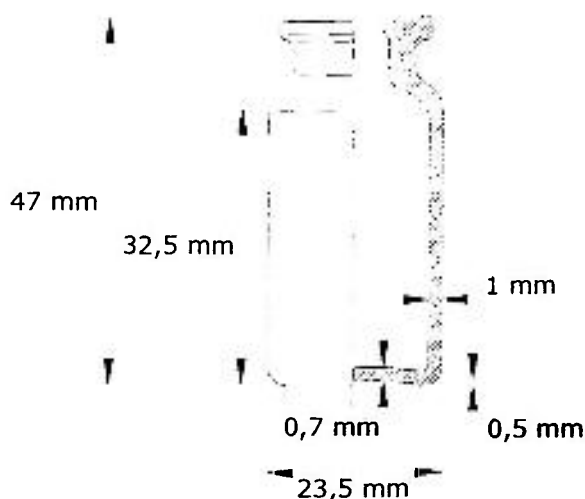


FIGURA 3.6 Esquema do frasco de penicilina.



FIGURA 3.7 Frasco de penicilina para fontes não seladas.

### 3.1.3 Espectrometria com detector de estado sólido para fótons

A espectrometria dos feixes de radiação foi realizada utilizando-se um sistema espectrométrico NOMAD Plus, EG&G ORTEC, acoplado a um detector de Germânio Hiper-Puro (HPGe), modelo GLP-16195/10P, ORTEC, do LCI/IPEN.

O espectrômetro ORTEC, da série GLP, para fótons de energias baixas é indicado para uso no intervalo de energia entre 3 e 300 keV. O cristal tem um diâmetro ativo de 16 mm, 13 mm de comprimento e uma área de 200 mm<sup>2</sup>. A espessura do material absorvedor é de 0,50 mm de berílio. Sua resolução (FWHM) para 122 keV (<sup>57</sup>Co) é de 483 eV.

A calibração do detector foi realizada, previamente, utilizando-se uma fonte de <sup>241</sup>Am (0,29 MBq), com picos de emissão em 59,4 keV (raios gama) e 17,61 keV (raios X).

Para a obtenção dos espectros, o detector foi protegido da radiação espalhada por uma blindagem de chumbo com 10 mm de espessura, que recobriu todo o detector, deixando apenas uma abertura de 10 mm, de modo a permitir que um feixe de apenas 1 mm de diâmetro alcançasse o detector.

O sistema de medição do detector de HPGe utiliza um analisador de altura de pulso para recolher o espectro a ser estudado; o *software* empregado é o programa de análise espectral Maestro que acompanha o instrumento.

### 3.1.4 Absorvedores

Para a caracterização e o estabelecimento dos sistemas tandem de activímetros foram utilizados absorvedores cilíndricos (FIG. 3.8), construídos especialmente para utilização nas medidas de atividade das fontes padrão de radiação [DYTZ e CALDAS, 2001].

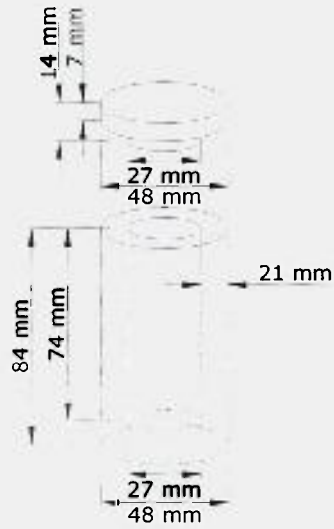


FIGURA 3.8 Esquema dos absorvedores.

Esses absorvedores foram construídos com materiais diferentes: latão, cloreto de polivinila (PVC), aço e polipropileno (FIG. 3.9). A escolha desses materiais foi baseada na procura por materiais com densidades diferentes.



FIGURA 3.9 Conjunto de absorvedores utilizados: latão, PVC, aço e polipropileno, desenvolvido inicialmente por Dytz e Caldas [2001].

O aço é uma liga de ferro-carbono com teor de carbono inferior a 2%, e pequenas porcentagens de manganês, silício, fósforo e enxofre. Segundo sua composição química, pode-se destacar dois grandes grupos de aços: os aços não ligados (aço carbono) e os aços ligados (aço inoxidável). O tipo de aço utilizado na confecção dos absorvedores foi o aço comum SAE 1020. Segundo norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), o primeiro algarismo representa o elemento de liga (para o aço-carbono o algarismo é 1), o segundo indica a porcentagem aproximada da liga (zero significa a ausência de liga) e os demais dígitos representam o teor médio de carbono.

O latão é uma liga de cobre e zinco e entre suas propriedades pode-se dizer que o latão é dúctel e maleável, bom condutor de calor e de eletricidade, resistente à ação da água e do ar. Tem uma cor variável da avermelhada (com menos de 10% de zinco) passando pelo amarelo ouro (até cerca de 40% de zinco) ao branco (acima de 40% de zinco). O latão utilizado neste trabalho foi de cor amarelo ouro, do tipo "U", considerado de excelente usinabilidade, e que contém cerca de 3% de chumbo.

Os materiais plásticos são compostos de resinas naturais ou sintéticas, e suas matérias-primas provêm do carvão mineral, do petróleo ou de produtos vegetais. Os materiais plásticos se dividem em duas categorias: os termoplásticos e os termorrígidos. Os termoplásticos são os chamados plásticos e constituem a maior parte dos polímeros comerciais. A principal característica desses polímeros é poder ser fundido diversas vezes. Exemplos: polietileno, polipropileno, politereftalato de etileno, policarbonato, poliestireno, policloreto de vinila e polimetil metacrilato.

O PVC é o único material plástico que não é 100% originário do petróleo. O PVC contém 57% de cloro (derivado do cloreto de sódio) e 43% de eteno (derivado do petróleo). A partir do sal marinho, pelo processo de eletrólise, obtém-se o cloro, soda cáustica e hidrogênio. A eletrólise é a reação química resultante da passagem de uma corrente elétrica por água salgada. Assim se obtém o cloro, que representa 57% da resina de PVC produzida. O petróleo, que representa apenas 43% desta resina, passa por um caminho um pouco mais

longo. O primeiro passo é uma destilação do óleo cru, onde se obtém a nafta leve, que passa pelo processo de craqueamento catalítico (quebra de moléculas grandes em moléculas menores com a ação de catalisadores) gerando-se o eteno. Tanto o cloro como o eteno estão na fase gasosa e eles reagem produzindo o dicloro etano (DCE). A partir do DCE obtém-se o mono cloreto de vinila (MVC), unidade básica do polímero. O polímero é formado pela repetição da estrutura monomérica. As moléculas de MVC são submetidas ao processo de polimerização, ou seja, elas vão se ligando formando uma molécula muito maior, conhecida como policloreto de vinila, que é um pó muito fino, de cor branca, e totalmente inerte. Entre suas propriedades apresenta: leveza; resistência à maioria dos reagentes químicos; bom isolante térmico, elétrico e acústico; resistência a choques; impermeabilidade a gases e líquidos; resistência às intempéries; e durabilidade.

O polipropileno é um polímero quimicamente inerte e não contém nenhum modificador pós-reator que possa ser extraído ao longo do tempo por contato com a maioria das soluções aquosas. O polipropileno, com suas características de desempenho excepcionais, tornou-se o material de maior crescimento em uso hoje em dia para aplicações diversas: excelente comportamento sob estresse e tensão; rigidez mecânica; altamente flexível; excelente resistência a intempéries; baixa cristalinidade; facilmente reparável se houver dano; boas propriedades químicas e de barragem; e não agressivo ao meio ambiente, não utilizando químicos e adesivos.

As fontes padrão foram inseridas seqüencialmente nesses absorvedores, que por sua vez foram introduzidos nas câmaras de ionização tipo poço.

### **3.2 Dosimetria Termoluminescente**

Nesta secção serão apresentados os equipamentos, materiais TL e arranjos experimentais utilizados na caracterização e estabelecimento da metodologia dosimétrica para monitoração ocupacional de radiação beta.

### 3.2.1 Sistemas de radiação

Serão descritos a seguir os sistemas de irradiação utilizados na irradiação das amostras estudadas.

#### 3.2.1.1 Radiação gama

Para a radiação gama foram utilizados os arranjos pertencentes ao LCI/IPEN:

- a) Fonte de  $^{60}\text{Co}$  em irradiador construído no IPEN, modelo CPIO – AO 0197/82, série IR – 003, com uma taxa de exposição de  $0,88 \text{ mC.kg}^{-1}.\text{h}^{-1}$  (março/2004) à distância de 71 cm, num campo de radiação de 14 cm de diâmetro.
- b) Irradiador pneumático para dosimetria TL Mark IV, da J. L. Shepherd & Associates, modelo G, número de série 5114, com fonte de  $^{137}\text{Cs}$  com atividade nominal de 25,6 MBq (dezembro/2003), com uma taxa de exposição de  $170 \mu\text{Gy}/\text{min}$  (dezembro/2003), no centro da cavidade.

As amostras foram irradiadas no ar, em ambos irradiadores, utilizando-se placas de polimetil metacrilato (Lucite) com  $0,29 \text{ g.cm}^{-2}$  de densidade superficial para a obtenção de equilíbrio eletrônico. Os detectores foram sempre acondicionados entre duas dessas placas de Lucite com 3 mm de espessura.

#### 3.2.1.2 Radiação beta

O sistema padrão secundário de radiação beta do LCI/IPEN, com fontes de  $^{147}\text{Pm}$ ,  $^{204}\text{Tl}$  e  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  (TAB. 3.4 e 3.5) da Buchler GmbH & Co., Germany, foi utilizado para a realização das irradiações. Estas fontes possuem certificados de calibração do Laboratório Padrão Primário Physikalisch – Technische Bundesanstalt (PTB), Alemanha.

TABELA 3.4 Características do sistema padrão secundário de radiação beta [PTB, 1990a], [PTB, 1990b], [PTB, 1981a], [PTB, 1981b].

Radionuclídeo	$^{147}\text{Pm}$	$^{204}\text{Tl}$	$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$	$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$
Atividade nominal (MBq)	518	18,5	74	1850
Energia média da radiação beta (MeV)	0,06	0,24	0,80	0,80
Taxa de dose absorvida no ar ( $\mu\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$ )	0,366	0,412	1,707	518,4 70,6 25,23
Taxa de dose absorvida no tecido ( $\mu\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$ )	0,411	0,462	1,896	575,9 78,4 28,03
Distância de calibração (cm)	20	30	30	11 30 50
Data de referência	25/05/1990	09/06/1990	12/01/1981	04/02/1981

TABELA 3.5 Características dos radionuclídeos emissores beta do sistema padrão secundário.

Radionuclídeo	Meia-vida (ano)	Energia máxima da radiação beta (MeV)	Intensidade (%)
$^{147}\text{Pm}$	2,6	0,225	100
$^{204}\text{Tl}$	3,8	0,763	98
$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$	29,1	0,546 2,284	100

As amostras foram sempre irradiadas sobre um objeto simulador de Lucite, que será descrito no item 3.2.5. O uso deste objeto é para simular o corpo humano e a radiação espalhada por ele.

### 3.2.2 Sistema leitor TL

Para a medida TL das amostras foi utilizado o leitor TL da Harshaw Nuclear Systems, modelo 2000A, acoplado ao pico-amperímetro, modelo 2000B, do Laboratório de Materiais Dosimétricos (LMD), do IPEN (FIG. 3.10).



FIGURA 3.10 Sistema leitor TL, Harshaw Nuclear Systems, modelo 2000A, acoplado ao pico amperímetro, modelo 2000B.

O sistema de leitura TL é constituído por um termopar, que regula o aquecimento linear da amostra, por meio da passagem de uma corrente elétrica, e uma fotomultiplicadora para captar a luz produzida. A fotomultiplicadora detecta a luz emitida produzindo um sinal proporcional à TL, que é convertido em corrente elétrica, amplificado pelo eletrômetro, que, junto com o sinal do sensor de temperatura, é enviado a um registrador X – Y, gerando a curva de emissão TL. O sinal da fotomultiplicadora também é enviado a um integrador de carga que determina o valor da área sob a parte estável da curva de emissão TL, e a apresenta num mostrador digital. A prancheta onde é colocada a amostra foi mantida sob um fluxo de gás ( $N_2$ ) constante para reduzir a TL espúria, isto é, a TL não devida à irradiação, e também para aumentar a vida útil da prancheta. Na FIG. 3.11 pode-se observar a representação esquemática do sistema leitor.

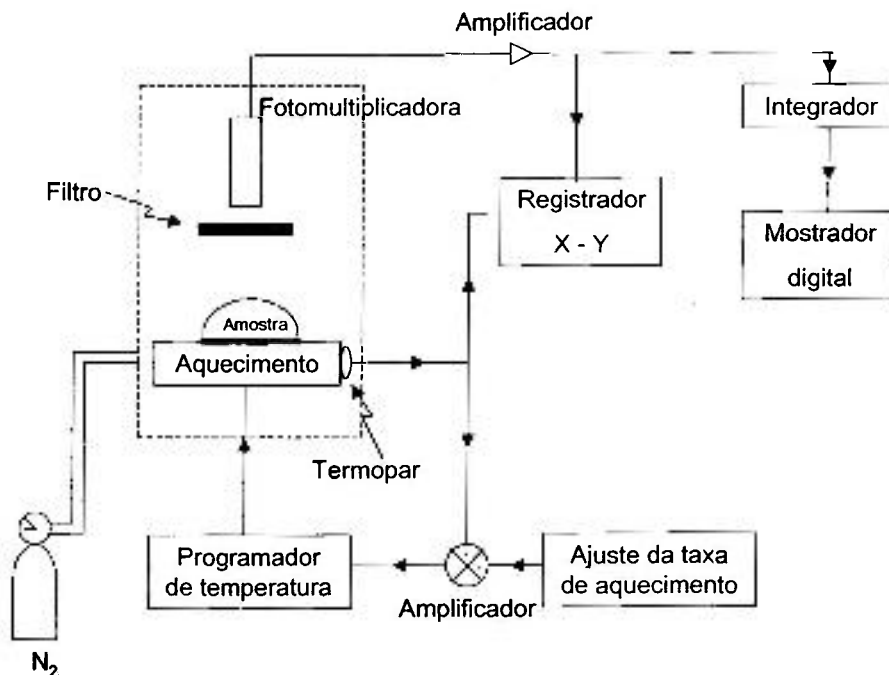


FIGURA 3.11 Representação do sistema leitor TL utilizado, com sistema de gás acoplado<sup>1</sup>.

A taxa de aquecimento linear utilizada, durante todas as medidas, foi de  $10^\circ/\text{seg}$ , com fluxo constante de  $N_2$  e  $4,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ . A área de integração sob as curvas de emissão foi no intervalo de  $140^\circ\text{C}$  a  $240^\circ\text{C}$ .

As curvas de emissão TL foram registradas por um graficador ECB modelo RB101, série 856, com um canal, de faixa de medição entre 1 mV e 2 mV, velocidade de arraste do papel de 1 cm/min a 60 cm/h e por um programa PicoLog (PLW32).

### 3.2.3 Materiais utilizados

Para o estudo da resposta TL, foram utilizadas pastilhas de sulfato de cálcio (FIG. 3.12), produzidas pelo LMD/IPEN, cujas características são apresentados na TAB. 3.6.

<sup>1</sup> Manual técnico do equipamento Harshaw Nuclear Systems.



FIGURA 3.12 Amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}^{\text{®}}$ .

TABELA 3.6 Características dos dosímetros TL produzidos no IPEN.

Material	Massa (mg)	Dimensões	
		Diâmetro (mm)	Espessura (mm)
$\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$	50	6,0	0,8
$\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$ ( Fina)	20	6,0	0,2
$\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon} + 10\% \text{ C}$	20	6,0	0,2

As pastilhas de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}^{\text{®}}$  apresentam duas grandes vantagens em relação aos materiais importados, disponíveis no mercado, que são: alta sensibilidade e baixo custo. Os três tipos de dosímetros apresentam o pico dosimétrico a 220°C.

Foram selecionadas 20 amostras de cada tipo de pastilhas de sulfato de cálcio para a realização do estudo. Todos os detectores foram identificados a lápis, com números no lado oposto ao da irradiação e leitura.

### 3.2.3.1 Pastilhas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$ (50 mg)

As pastilhas de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$  (50 mg) [CAMPOS e LIMA, 1986] são obtidas pela prensagem a frio e sinterização de uma mistura homogênea de

sulfato de cálcio e Teflon, ambos na forma de pó. O decaimento térmico do sulfato de cálcio é de apenas 5% ao mês, à temperatura ambiente, o que possibilita seu uso durante um longo período de monitoramento. Os estudos realizados [CAMPOS e LIMA, 1986] com as pastilhas de  $\text{CaSO}_4$  mostraram que após 20 ciclos de irradiação, leitura TL e tratamento térmico de um lote com 100 pastilhas, o desvio padrão máximo foi de 3,9%. Isso indica que uma pastilha pode ser reutilizada 20 vezes sem que uma nova calibração seja necessária. O sulfato de cálcio apresenta ainda uma boa estabilidade, visto que foram realizados estudos com dois lotes diferentes, sendo um irradiado com  $^{60}\text{Co}$  e o outro com  $^{137}\text{Cs}$  e ambos foram armazenados à temperaturas ambiente e em local adequado. O decréscimo do sinal TL, para ambos os casos, foi de apenas 7% para um período de 90 dias e de 3% para um período de 30, sendo que esse último é o mais utilizado em monitoração individual.

### **3.2.3.2 Pastilhas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ + Teflon (20 mg)**

As pastilhas de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon (20 mg) se diferenciam das de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon (50 mg) quanto à massa e à espessura, e apresentam uma maior sensibilidade para a detecção da radiação beta, quando comparadas com os resultados para a radiação gama do  $^{60}\text{Co}$  [CAMPOS e LIMA, 1987]. O decaimento térmico, à temperatura ambiente, para um intervalo de 30 dias, é de apenas 3% na resposta TL .

### **3.2.3.3 Pastilhas de $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ + Teflon + 10% de grafite**

As pastilhas de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon + 10 % C em sua composição [CAMPOS, 1993] são similares às de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon (20 mg) quanto a sua massa e a sua espessura, e apresentam um decaimento térmico, à temperatura ambiente, de apenas 3% da resposta TL, para um intervalo de tempo de 30 dias.

### 3.2.4 Tratamento térmico

Para a realização do tratamento térmico de reutilização das amostras TL, foi utilizado um forno programável EDG Five II, EDG Equipamentos do Brasil, pertencente ao LMD/IPEN (FIG. 3.13). As amostras foram colocadas sobre uma prancheta de alumínio e sempre levadas ao forno devidamente cobertas com uma placa do mesmo material (FIG. 3.14 e 3.15).

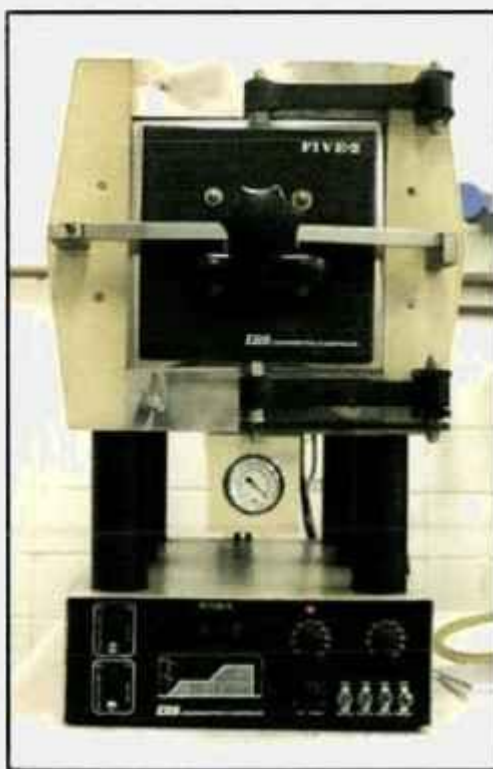


FIGURA 3.13 Forno programável EDG Five II, fabricado pela EDG Equipamentos do Brasil.

As amostras TL foram inicialmente pré-irradiadas num feixe de radiação gama de  $^{137}\text{Cs}$  e em seguida submetidas a um tratamento térmico a  $300^\circ\text{C}$  durante 1 h. Durante todo o estudo, com a finalidade de devolver às amostras suas condições iniciais, o tratamento foi realizado sempre numa temperatura fixa de  $300^\circ\text{C}$  durante o intervalo de tempo de 1 h. O resfriamento foi sempre rápido e realizado em cima de uma placa de alumínio, por cerca de 10 minutos.

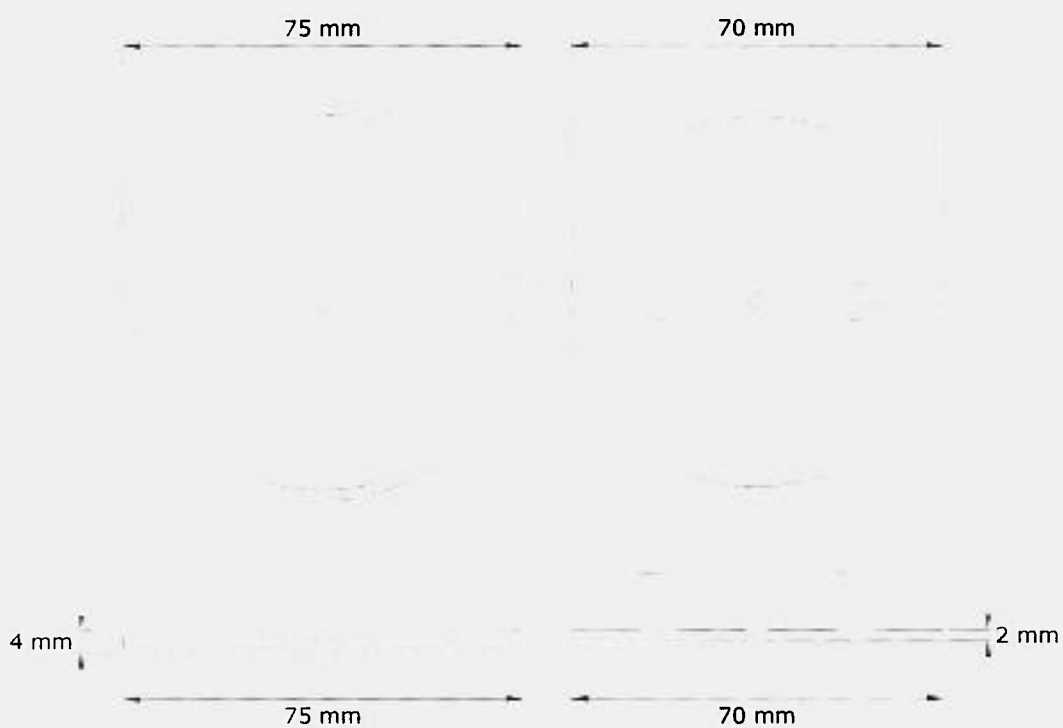


FIGURA 3.14 Esquema da prancheta e de sua tampa para o tratamento térmico das amostras TL.

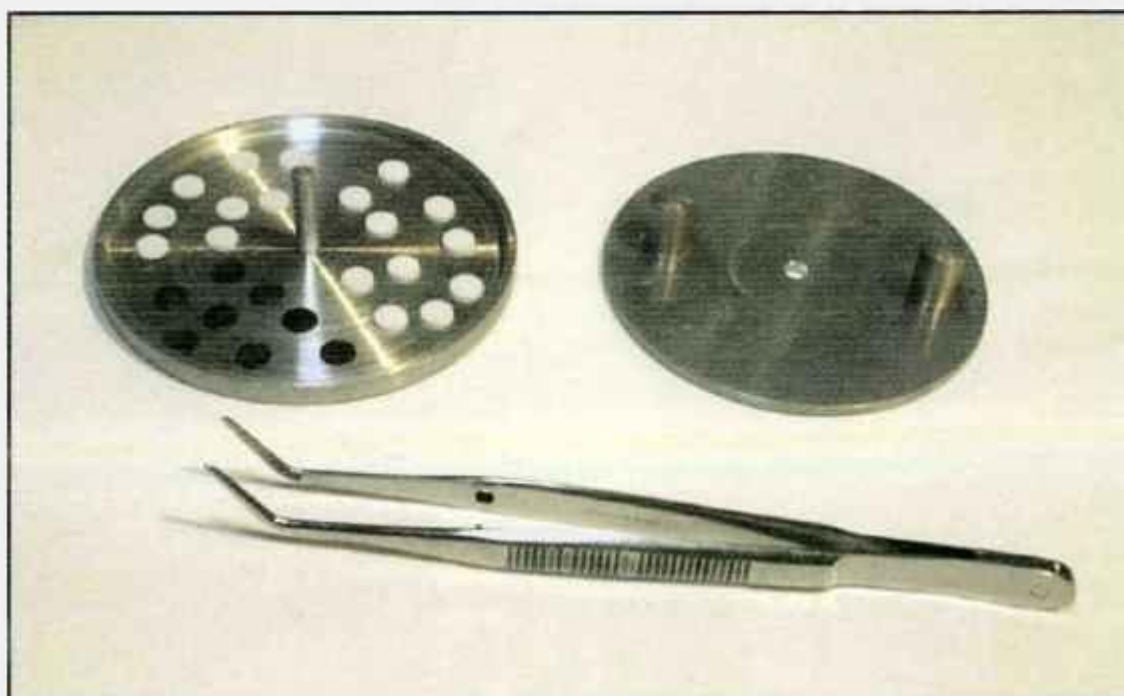


FIGURA 3.15 Prancheta e tampa de alumínio utilizadas no tratamento térmico das amostras TL.

O tratamento térmico e o resfriamento devem ser executados de modo muito acurado, devendo sua duração e a temperatura máxima serem bem reproduzíveis, uma vez que esses parâmetros afetam a sensibilidade dos picos TL dosimétricos, localizados a temperaturas mais elevadas. Qualquer variação durante o procedimento térmico poderá significar uma variação na resposta do dosímetro, podendo influir na sensibilidade e na reprodutibilidade das medidas, além de poder causar erros significativos na interpretação das medidas.

### 3.2.5 Objeto simulador

Para a irradiação das amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon, em feixes de radiação beta, foi projetado (FIG. 3.16) e construído um objeto simulador em Lucite, com dimensões de 120 mm x 120 mm x 15 mm, com orifícios de 8 mm de diâmetro e profundidade de 2 mm (FIG. 3.17).

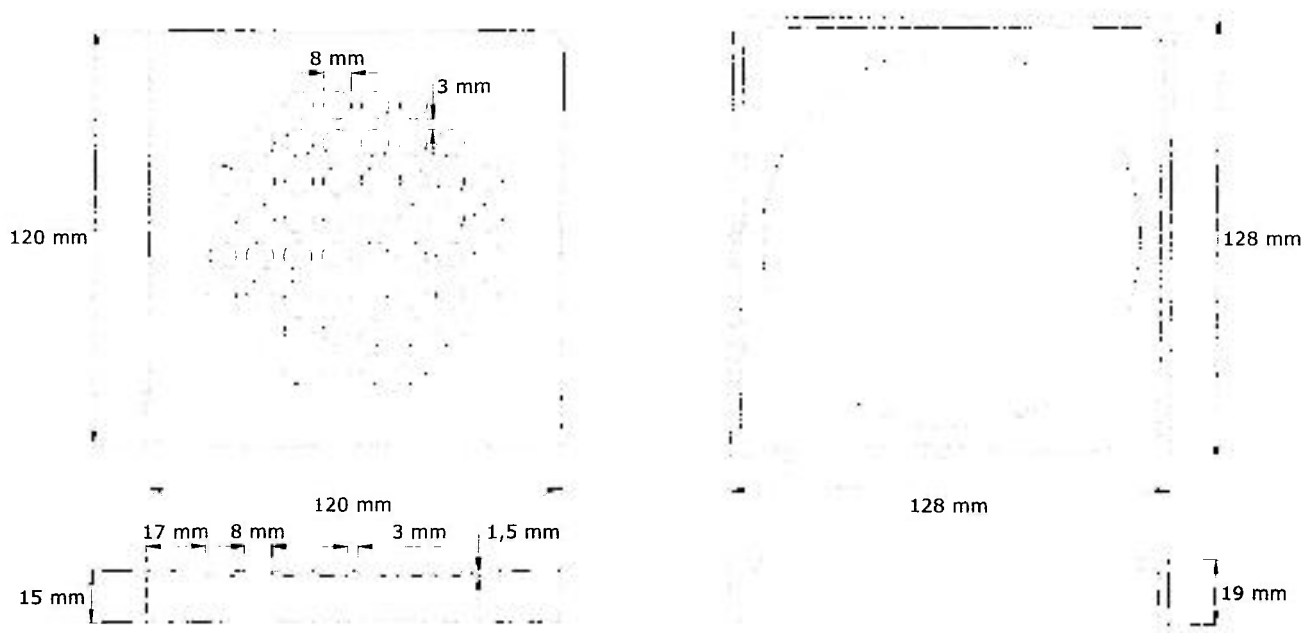


Figura 3.16 Esquema do objeto simulador para irradiação das amostras TL.

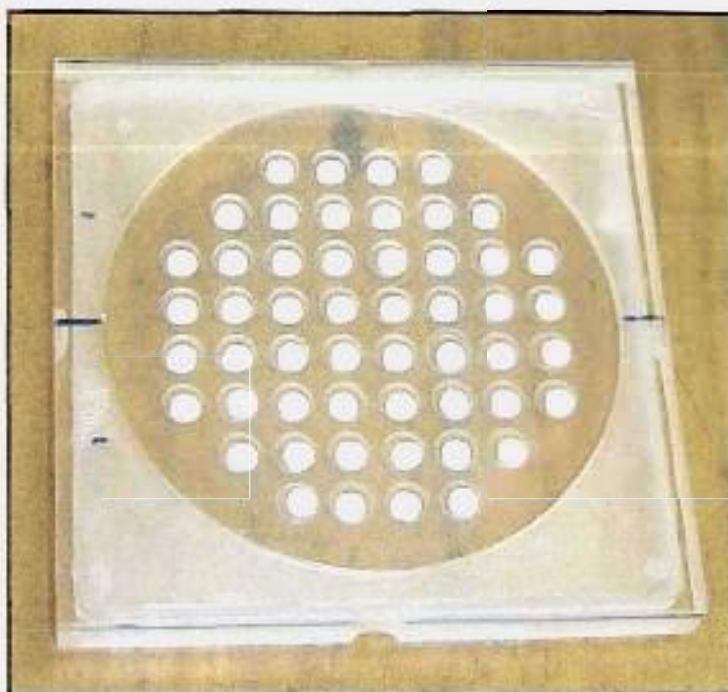


Figura 3.17 Objeto simulador utilizado para irradiação das amostras TL.

Para a irradiação em feixes beta as amostras foram sempre colocadas sobre o objeto simulador e cobertas com um filme plástico com  $1,2 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$  de densidade superficial. A posição de cada pastilha no objeto simulador foi sempre anotada, no intuito de reproduzir a geometria de cada amostra.

No caso das irradiações utilizando as fontes de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  e de  $^{204}\text{Tl}$  foi mantida uma distância fonte-superfície do objeto simulador de 30 cm. Para as irradiações com a fonte de  $^{147}\text{Pm}$ , a distância entre a fonte e a superfície do objeto simulador foi de 20 cm. Estas são as distâncias de calibração (TAB. 3.4).

## 4 RESULTADOS

Na primeira parte deste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos testes de controle de qualidade dos activímetros. A segunda parte trata dos resultados obtidos na caracterização das propriedades dosimétricas dos detectores de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon. Na terceira parte são discutidos os resultados obtidos no desenvolvimento da metodologia dosimétrica para radiação beta. A avaliação e a expressão das incertezas das medições foram feitas de acordo com as recomendações do *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição* [ISO, 2003]. As incertezas relacionadas nos resultados das medições são incertezas padrão, expressas como um desvio padrão ( $1\sigma$ ,  $k=1$ ).

### **4.1 Controle de Qualidade em Medicina Nuclear**

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos testes de controle de qualidade e da calibração, com fontes seladas e não seladas, dos activímetros; a espectrometria com detector de estado sólido de fontes gama; o estabelecimento e a caracterização de sistemas tandem, bem como seu comportamento na presença de impurezas radionuclídicas; e aplicações dos sistemas tandem.

#### **4.1.1 Testes de controle de qualidade**

Os sistemas de medida utilizados rotineiramente na determinação das atividades de radiofármacos a serem administradas aos pacientes devem ser rastreados a sistemas de referência dos Institutos Nacionais de Metrologia ou de instituições credenciadas por eles. Essa rastreabilidade deve ser estabelecida pelo menos para aqueles radionuclídeos que são medidos nestes instrumentos.

O desempenho satisfatório de cada activímetro foi verificado por meio dos testes de controle de qualidade utilizando-se as fontes padrão seladas (TAB. 3.1) e não seladas produzidas no IPEN (TAB. 3.2 e 3.3). Para a realização dos testes foram utilizadas, em todo o estudo, as quatro fontes padrão seladas, embora a utilização da fonte de  $^{60}\text{Co}$  não seja mais uma exigência nos Serviços de Medicina Nuclear. Os testes realizados e os resultados obtidos são apresentados a seguir.

#### 4.1.1.1 Teste de precisão e de exatidão

Os testes de precisão e de exatidão dos medidores de atividade foram realizados com as fontes padrão (TAB. 3.1) nas mesmas condições de geometria. Os limites de aceitação são de  $\pm 5\%$  com uma confiabilidade de 95% e de  $\pm 10\%$  com uma confiabilidade de 90% para os testes de precisão e de exatidão, respectivamente [CNEN, 1996], [IAEA, 1991]. O teste de exatidão de cada instrumento foi determinado pela equação:

$$E = 100 \left( 1 - \frac{\bar{A}}{A_c} \right) \%$$

onde:  $E$  é o desvio percentual;  $\bar{A}$  é a média das atividades medidas; e  $A_c$  é o valor da atividade da fonte padrão, corrigido para o decaimento radioativo.

Na Tabela 4.1 são apresentados os resultados do teste de exatidão, sendo a atividade de referência a da fonte padrão, obtida com o activímetro NPL(LMN). Para a realização das medidas, as fontes foram introduzidas seqüencialmente no poço da câmara, tendo sido registradas 10 leituras consecutivas em intervalos de 15 s.

Os resultados obtidos para o teste de exatidão mostram um desempenho excelente dos sistemas de medidas, considerado o limite de aceitação de  $\pm 10\%$  [CNEN, 1996], [IAEA, 1991].

O teste de precisão do instrumento foi determinado pela equação:

$$P = \frac{(A_i - \bar{A})}{\bar{A}} \times 100\%$$

onde:  $P$  é o desvio percentual entre a medida da atividade individual ( $A_i$ ) e a média das atividades medidas ( $\bar{A}$ ).

TABELA 4.1 Teste de exatidão dos activímetros NPL (LMN), NPL (LCI), IEN e IPEN. Desvios percentuais (s) dos valores da atividade medida com relação ao valor da atividade da fonte padrão, corrigido para o decaimento radioativo.

Radionuclídeo	s (%)			
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IEN	IPEN
<sup>57</sup> Co	0,31	0,61	0,61	0,37
<sup>133</sup> Ba	0,04	0,80	0,43	0,65
<sup>137</sup> Cs	0,38	0,26	1,9	0,70
<sup>60</sup> Co	0,83	0,38	1,0	2,6

Na Tabela 4.2 é apresentado o resultado do teste de precisão do sistema de referência. Pode-se observar que para todas as fontes padrão, o maior desvio percentual obtido para as medidas de atividade foi de 2,3%, portanto ainda dentro do limite recomendado de  $\pm 5\%$  [CNEN, 1996], [IAEA, 1991].

TABELA 4.2 Teste de precisão nos sistemas NPL (LMN), NPL (LCI), IEN e IPEN. É apresentado apenas o maior valor obtido do desvio padrão percentual (s) em cada caso.

Radionuclídeo	s (%)			
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IEN	IPEN
<sup>57</sup> Co	0,65	1,2	0,01	2,3
<sup>133</sup> Ba	0,30	0,93	0,30	0,30
<sup>137</sup> Cs	0,23	0,23	0,23	0,67
<sup>60</sup> Co	0,65	0,23	2,1	0,78

#### 4.1.1.2 Teste de reprodutibilidade da resposta

O teste de reprodutibilidade (estabilidade a longo prazo) da resposta de um medidor de atividade deve ser verificado, periodicamente, por meio de um radionuclídeo de meia-vida longa. O teste deve ser realizado utilizando-se uma fonte selada emissora gama, de energia média, com atividade em torno de 37 kBq ( $^{137}\text{Cs}$  ou  $^{226}\text{Ra}$ ). A reprodutibilidade deverá estar dentro de  $\pm 5\%$  com uma confiabilidade de 95% [CNEN, 1996], [IAEA, 1991].

Com o objetivo de estudar melhor o desempenho dos activímetros disponíveis foram tomadas medidas com todas as fontes padrão disponíveis (TAB. 3.1) e com as fontes não seladas (TAB. 3.2 e 3.3), sendo realizadas dez séries consecutivas de medidas em cada sistema de medida.

Os resultados do teste de reprodutibilidade, dos diferentes sistemas de medida, são apresentados nas Tabelas 4.3 e 4.4, para as fontes padrão e para as fontes não seladas, respectivamente.

TABELA 4.3 Variações percentuais máximas (s) obtidas no teste de reprodutibilidade com as fontes padrão.

Fonte	s (%)			
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IEN	IPEN
$^{57}\text{Co}$	1,4	1,3	0,74	2,0
$^{133}\text{Ba}$	0,97	0,64	0,21	0,21
$^{137}\text{Cs}$	0,31	0,44	0,11	0,21
$^{60}\text{Co}$	1,4	0,75	0,11	0,34

Os resultados do teste de reprodutibilidade de resposta demonstram um ótimo desempenho dos equipamentos, sendo o maior desvio percentual observado, entre a atividade medida e a média das atividades, de 2,0% para o activímetro IPEN, no caso das fontes padrão, enquanto que para as fontes não

seladas o maior desvio foi de 1,5% também para o activímetro IPEN, para  $^{123}\text{I}$ , mas ainda muito inferiores em relação ao limite recomendado de  $\pm 5\%$  [CNEN, 1996], [IAEA, 1991].

TABELA 4.4 Variações percentuais (s) máximas obtidas no teste de reprodutibilidade com as fontes não seladas.

Fonte	s (%)			
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IEN	IPEN
$^{153}\text{Sm}$	0,007	0,028	(a)	0,23
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	0,018	0,021	0,22	0,51
$^{123}\text{I}$	0,063	0,015	1,1	1,5
$^{201}\text{Tl}$	0,003	0,008	0,35	0,76
$^{67}\text{Ga}$	0,050	0,014	(a)	1,1
$^{51}\text{Cr}$	0,76	0,003	(a)	0,037
$^{131}\text{I}$	0,88	0,049	0,20	1,2
$^{18}\text{F}$	0,12	0,36	(b)	0,82
$^{32}\text{P}$	0,13	0,73	(b)	0,79

(a) Os fatores de correção não puderam ser obtidos para o calibrador IEN, uma vez que as atividades eram inferiores à faixa de operação do activímetro.

(b) O activímetro IEN não possui número de calibração para esses nuclídeos.

#### 4.1.1.3 Teste de linearidade

O objetivo deste teste é verificar a linearidade da resposta da atividade de um activímetro, no intervalo de atividade para o qual é utilizado, rotineiramente, por meio do decaimento de uma fonte radioativa.

A resposta do medidor de atividade é considerado linear quando a medida da atividade de um radionuclídeo pode ser reproduzida durante várias meias-vidas, ou seja, quando a corrente produzida é proporcional à atividade do radionuclídeo. A linearidade da resposta do medidor deve ser testada em todo o

intervalo de atividade no qual é utilizado, pelo decaimento de um radionuclídeo de meia-vida curta ( $^{99m}\text{Tc}$  ou  $^{113m}\text{In}$ ) em solução, com atividade inicial igual ou superior à maior atividade que será medida no instrumento. A linearidade da resposta da atividade deverá estar dentro de  $\pm 10\%$  [CNEN, 1996], [IAEA, 1991].

A linearidade de todos os activímetros foi verificada pelo acompanhamento do decaimento radioativo de uma amostra de  $^{99m}\text{Tc}$ , com atividade inicial de 41,10 MBq (março/2003), em 4 ml de solução, num frasco tipo penicilina de 20 ml, cedida pelo CR/IPEN. A atividade inicial foi determinada no activímetro NPL (LMN). A FIG. 4.1 apresenta a atividade do  $^{99m}\text{Tc}$  medida em função do tempo decorrido, para os sistemas de medida NPL (LMN), NPL (LCI) e IEN, e mostra os resultados das atividades obtidas experimentalmente em cada activímetro, em comparação com a atividade calculada.

Na FIG. 4.1 observa-se que os sistemas de medida têm uma resposta linear, sendo as maiores variações percentuais obtidas de 1,8% para o sistema NPL (LMN), 2,3% para o sistema NPL (LCI) e 3,8% para o sistema IEN, todas bem abaixo do valor limite recomendado de  $\pm 10\%$  [CNEN, 1996]. Similarmente, é apresentado na FIG. 4.2 o resultado do teste de linearidade de resposta para as medidas de atividade obtidas para o sistema IPEN.

Para o sistema IPEN não foi possível comparar os valores da atividade obtida experimentalmente com a calculada, uma vez que os dados experimentais foram obtidos em atividade (MBq) x corrente ( $10^{-9}$  A). Para comparar a linearidade dos quatro sistemas utilizando-se a fonte de  $^{99m}\text{Tc}$ , foram determinados os coeficientes de correlação para cada sistema de medida (TAB. 4.5). Observa-se que o sistema IPEN apresenta o mesmo comportamento dos outros activímetros. Ao se aplicar o método dos mínimos quadrados para se obter a equação da reta, que ajusta os pontos experimentais, observou-se que a diferença na inclinação da curva entre o activímetro NPL(LMN) e IPEN foi de apenas 0,02%.

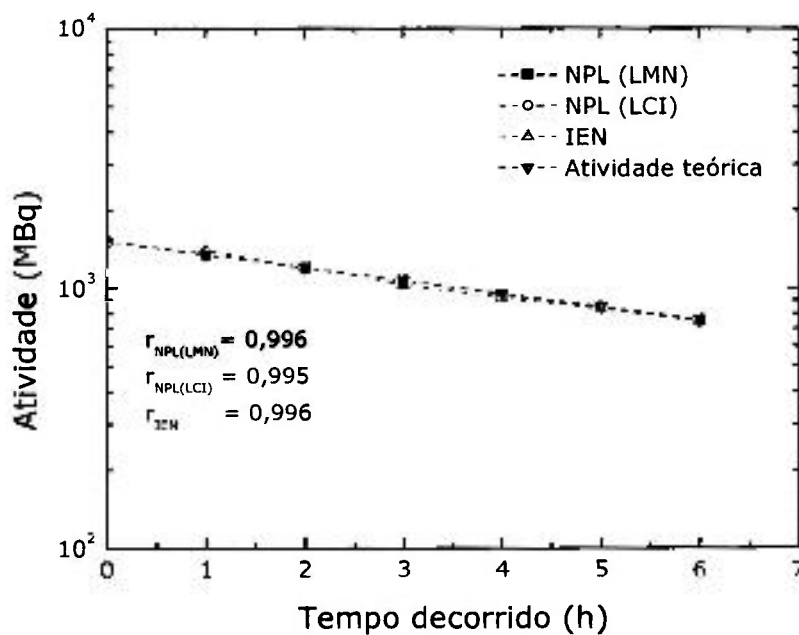


FIGURA 4.1 Teste de linearidade para os activímetros NPL(LMN), NPL(LCI) e IEN utilizando-se uma fonte de  $^{99m}\text{Tc}$  com atividade inicial de 1,52 GBq.

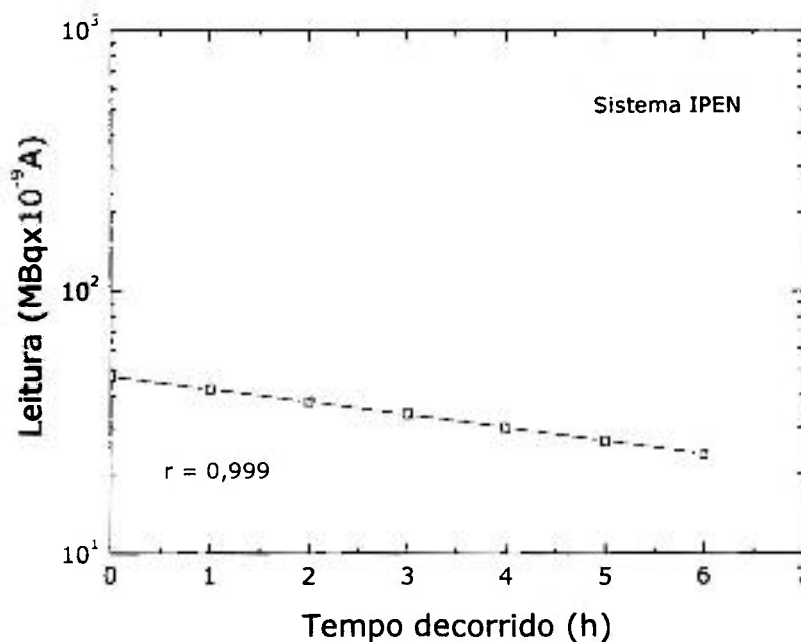


FIGURA 4.2 Teste de linearidade para o activímetro IPEN utilizando-se uma fonte de  $^{99m}\text{Tc}$  com atividade inicial de 1,52 GBq.

TABELA 4.5 Coeficientes de correlação das curvas de linearidade dos activímetros NPL (LMN), NPL (LCI), IEN e IPEN.

Activímetro	Coeficiente de correlação
NPL (LMN)	0,996
NPL (LCI)	0,995
IEN	0,996
IPEN	0,999

No caso do sistema IPEN, foi ainda verificada a linearidade da resposta utilizando-se as fontes padrão e os absorvedores de latão, aço, polipropileno e PVC. Além da linearidade obtida utilizando-se a fonte de  $^{99m}\text{Tc}$ , foi também estudada a linearidade da resposta do instrumento fixando o tempo de medição.

As medições foram realizadas utilizando-se o modo carga (nC), e variando-se o intervalo de tempo de medida entre 15 e 180 s. Foram obtidas medidas com cada uma das fontes padrão, que foram introduzidas no poço da câmara seqüencialmente e em seguida dentro de cada um dos absorvedores de latão, PVC, aço e polipropileno, alternadamente. As FIG. 4.3 a 4.6 apresentam os resultados obtidos para o teste de linearidade do activímetro IPEN, para as fontes de  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{60}\text{Co}$ , respectivamente.

As curvas obtidas, para todos os sistemas de medida, mostram linearidade da resposta do activímetro IPEN, com todas as fontes padrão e os diferentes absorvedores, no intervalo de medidas utilizado.

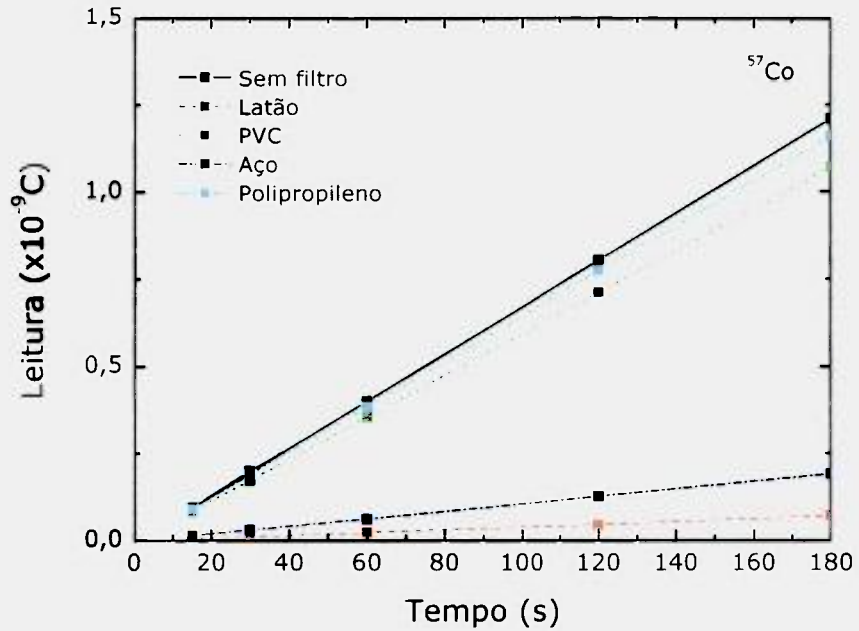


FIGURA 4.3 Linearidade de resposta do activímetro IPEN para diferentes absorvedores utilizando-se a fonte de  $^{57}\text{Co}$ .

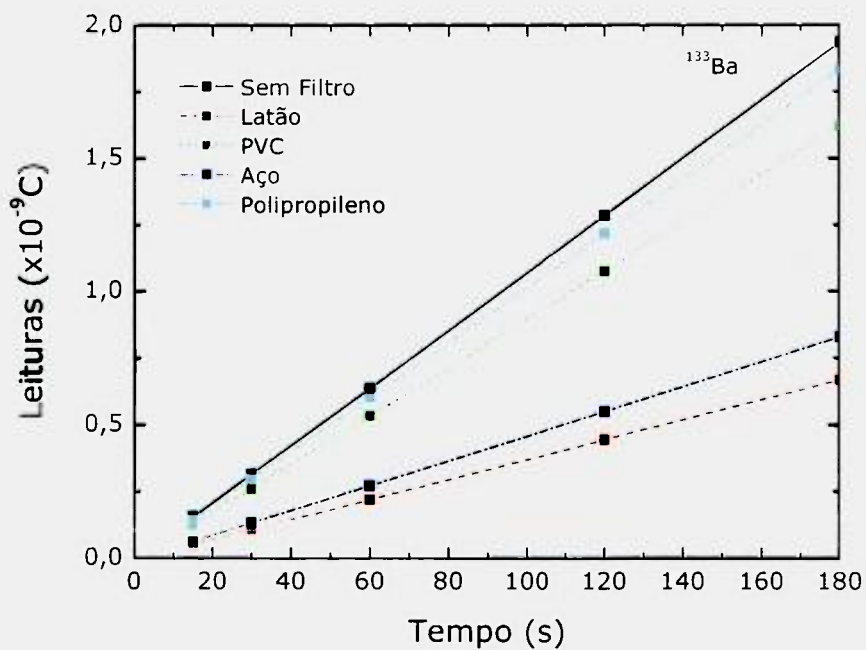


FIGURA 4.4 Linearidade de resposta do activímetro IPEN para diferentes absorvedores utilizando-se a fonte de  $^{133}\text{Ba}$ .

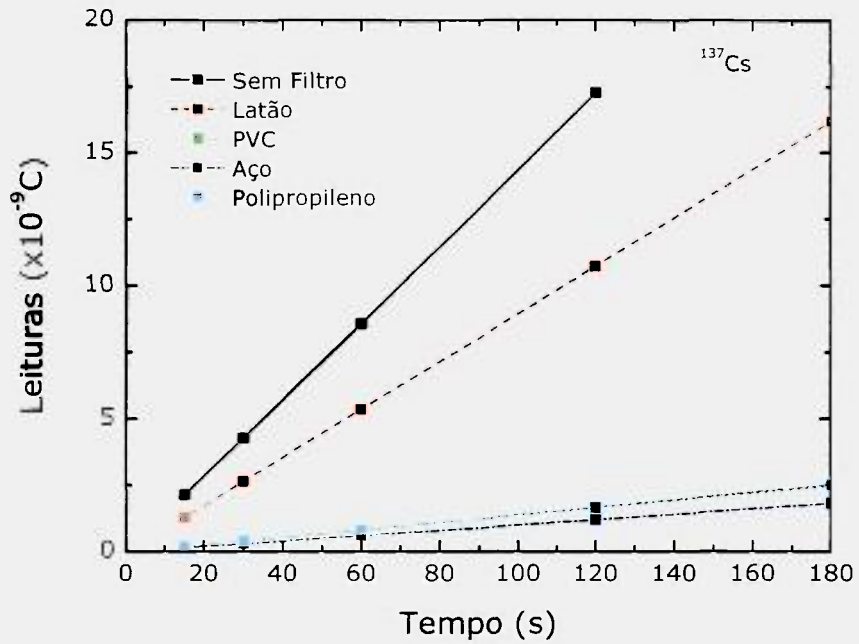


FIGURA 4.5 Linearidade de resposta do activímetro IPEN para diferentes absorvedores utilizando-se a fonte de  $^{137}\text{Cs}$ .

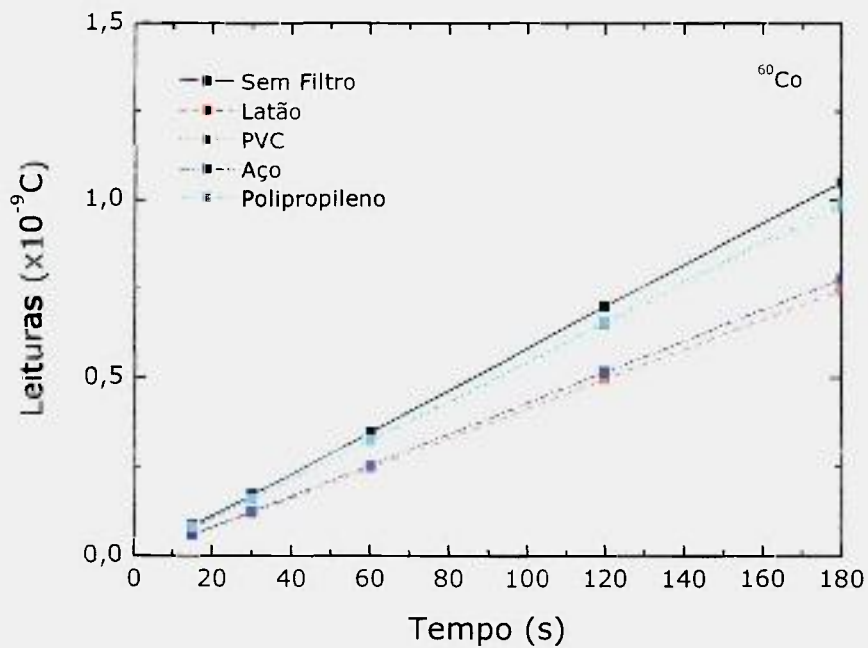


FIGURA 4.6 Linearidade de resposta do activímetro IPEN para diferentes absorvedores utilizando-se a fonte de  $^{60}\text{Co}$ .

#### 4.1.1.4 Calibração com fontes seladas

Cada medidor de atividade deve ser calibrado para os diversos radionuclídeos utilizados clinicamente [DALE, 1961], [WILLIAMS E BIRDSEYE, 1967], [WOODS, 1970]. Os fatores de calibração para cada radionuclídeo são estabelecidos individualmente, por uma câmara padrão, no NPL, de modo a fornecer rastreabilidade para todas as outras câmaras, assegurando a transferência do fator de calibração [WOODS e col., 1996], [WOODS e col., 1998], [TYLER e WOODS, 2003]. A calibração deve ser realizada colocando-se uma fonte padrão no poço da câmara de ionização e ajustando-se o eletrômetro do activímetro de modo que a leitura obtida corresponda à atividade certificada da fonte [SCHRADER, 1997], [SCHRADER e WEIß, 1983]. Esse procedimento de calibração deve ser efetuado para diversas fontes padrão com energias diferentes.

Para a calibração dos activímetros foram realizadas dez séries consecutivas de medidas das atividades de cada fonte em separado, tendo sido considerada a leitura média corrigida para o decaimento radioativo (TAB. 3.1), assim como o desvio de cada leitura. Na TAB. 4.6 são apresentados os fatores de correção para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IEN, e os coeficientes de calibração [MEGHZIFENE e SHORTT, 2002] para o sistema IPEN, ambos em função da energia das fontes padrão. Os fatores de correção compensam um erro ou uma tendência no resultado de uma medição, e os coeficientes de calibração estabelecem a relação entre grandezas físicas diferentes.

TABELA 4.6 Fatores de correção dos activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IEN. No caso do sistema IPEN, os dados são coeficientes de calibração.

Radionuclídeo	Fatores de correção			Coeficientes de calibração
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IEN	(MBq x 10 <sup>-9</sup> A)
<sup>57</sup> Co	1,007±0,006	1,014±0,013	1,011±0,005	0,992±0,001
<sup>133</sup> Ba	0,982±0,010	0,983±0,006	0,964±0,002	0,550±0,068
<sup>137</sup> Cs	0,985±0,002	0,986±0,004	0,958±0,001	0,424±0,091
<sup>60</sup> Co	1,002±0,008	1,012±0,005	0,949±0,005	0,147±0,077

Os fatores de correção e os coeficientes de calibração obtidos mostram variações dentro do limite recomendado de  $\pm 10\%$  [CNEN, 1996], [IAEA, 1991] para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IEN. Os desvios padrão máximos foram de 1,0%, 1,3% e 0,5% para os activímetros NPL(LMN), NPL(LCI) e IEN, respectivamente. O activímetro IPEN apresenta uma dependência energética muito alta que é preciso ser levada em conta quando ele for utilizado. Para radiações com energias abaixo de 200 keV, podem surgir erros devido à grande variação na eficiência de resposta deste tipo de detector (FIG. 2.3) [NCRP 1985], [WOODS, 1986].

Para uma melhor visualização, são apresentados na FIG. 4.7 os fatores de correção em função da energia, para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IEN, respectivamente, e na FIG. 4.8 os coeficientes de calibração para o sistema IPEN.

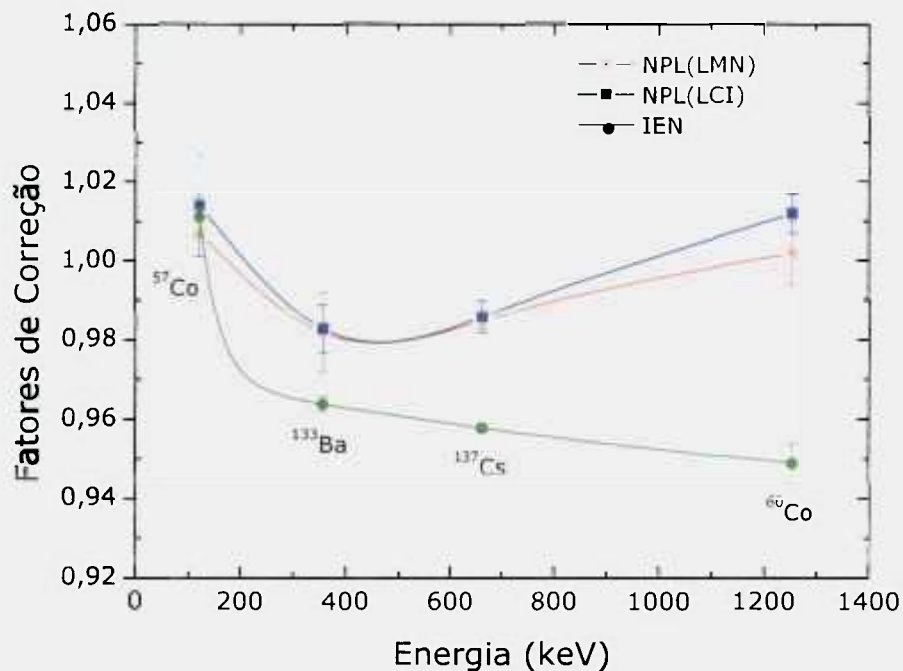


FIGURA 4.7 Fatores de correção dos activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IEN, utilizando-se as fontes padrão.

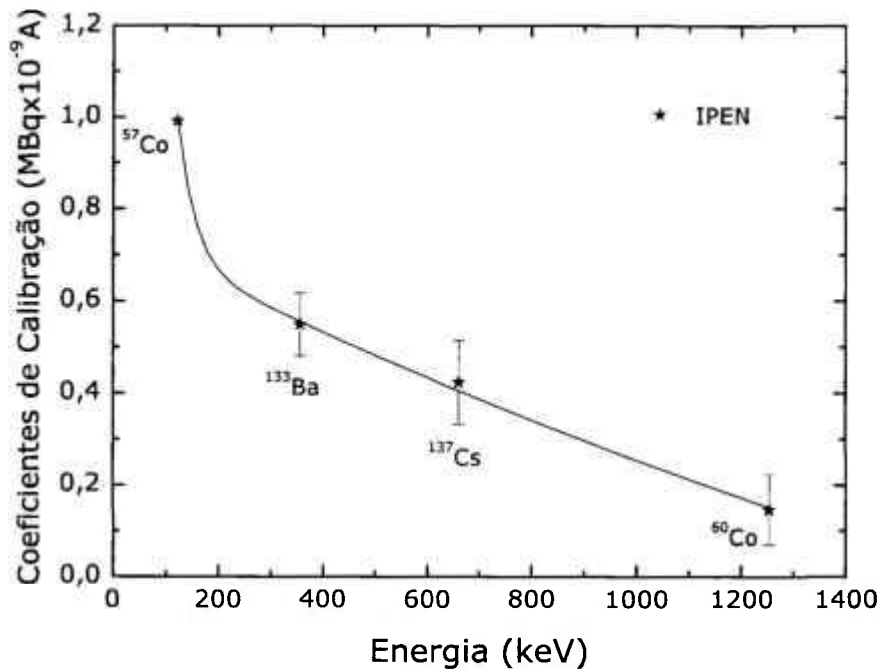


FIGURA 4.8 Coeficientes de calibração do activímetro IPEN utilizando-se as fontes padrão.

Pode-se observar que os activímetros NPL apresentam uma concordância excelente para energias superiores a 300 keV (intervalo de energia das fontes de <sup>133</sup>Ba a <sup>60</sup>Co). Para a fonte de <sup>57</sup>Co há uma discrepância de aproximadamente 3%. Para o activímetro IEN a dependência energética foi menor que 7% na faixa estudada, enquanto que para o activímetro IPEN a dependência energética foi dez vezes maior para a mesma faixa de energia.

Foram também determinados os fatores de correção para os activímetros NPL (LMN) e NPL (LCI) e os coeficientes de calibração para o sistema IPEN utilizando-se os absorvedores de PVC, latão, polipropileno e aço. As medições foram realizadas introduzindo-se as fontes em cada absorvedor alternadamente, tendo sido realizadas três séries de medidas das atividades de cada fonte padrão, com cada absorvedor, para os sistemas NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN; foi considerada a leitura média, corrigida para o decaimento

radioativo (TAB. 3.1), assim como o desvio padrão de cada série de leituras (TAB. 4.7 a 4.10). Não foi possível a realização de medidas no sistema IEN utilizando-se os absorvedores, embora eles tivessem sido construídos nas dimensões menores possíveis (em termos de diâmetro), suficientes apenas para a introdução das fontes padrão, seladas e não seladas; fisicamente eles não encaixaram no suporte de introdução de amostras no poço da câmara do activímetro IEN.

TABELA 4.7 Fatores de correção dos activímetros NPL (LMN) e NPL (LCI), utilizando-se o absorvedor de PVC. No caso do sistema IPEN, os dados são coeficientes de calibração.

Fonte	Fatores de correção		Coeficientes de calibração (MBq x 10 <sup>-9</sup> A)
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
<sup>57</sup> Co	1,155±0,039	1,170±0,009	1,132±0,039
<sup>133</sup> Ba	1,197±0,017	1,198±0,010	0,654±0,057
<sup>137</sup> Cs	1,050±0,005	1,051±0,002	0,566±0,010
<sup>60</sup> Co	1,068±0,015	1,069±0,005	0,153±0,022

TABELA 4.8 Fatores de correção dos activímetros NPL (LMN) e NPL (LCI), utilizando-se o absorvedor de latão. No caso do sistema IPEN, os dados são coeficientes de calibração.

Fonte	Fatores de correção		Coeficientes de calibração (MBq x 10 <sup>-9</sup> A)
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
<sup>57</sup> Co	---	---	7,273±0,001
<sup>133</sup> Ba	2,578±0,015	2,780±0,012	1,619±0,043
<sup>137</sup> Cs	1,578±0,001	1,579±0,002	0,844±0,007
<sup>60</sup> Co	1,403±0,027	1,412±0,005	0,202±0,058

TABELA 4.9 Fatores de correção dos activímetros NPL (LMN) e NPL (LCI), utilizando-se o absorvedor de polipropileno. No caso do sistema IPEN, os dados são coeficientes de calibração.

Fonte	Fatores de correção		Coeficientes de calibração (MBq x 10 <sup>-9</sup> A)
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
<sup>57</sup> Co	1,029±0,027	1,045±0,030	0,987±0,031
<sup>133</sup> Ba	1,048±0,013	1,050±0,006	0,580±0,046
<sup>137</sup> Cs	1,037±0,007	1,038±0,002	0,561±0,047
<sup>60</sup> Co	1,053±0,019	1,060±0,005	0,153±0,045

TABELA 4.10 Fatores de correção dos activímetros NPL (LMN) e NPL (LCI), utilizando-se o absorvedor de aço. No caso do sistema IPEN, os dados são coeficientes de calibração.

Fonte	Fatores de correção		Coeficientes de calibração (MBq x 10 <sup>-9</sup> A)
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
<sup>57</sup> Co	---	---	4,628±0,045
<sup>133</sup> Ba	2,172±0,050	2,201±0,041	1,294±0,030
<sup>137</sup> Cs	1,466±0,009	1,468±0,007	0,779±0,030
<sup>60</sup> Co	1,368±0,020	1,378±0,009	0,196±0,022

Comparando-se os valores dos fatores de correção obtidos para os activímetros tipo NPL, observa-se comportamentos bastante similares, embora as medições obtidas com o activímetro NPL(LMN), considerado como padrão, apresentem fatores de correção menores (máximo de 7,8%) que os do activímetro NPL(LCI). Observa-se, ainda, uma dependência dos resultados com a energia bem maior quando se utiliza os absorvedores de latão e aço, do que quando se utiliza os absorvedores de plástico (PVC e polipropileno).

#### 4.1.1.5 Calibração com fontes não seladas

A calibração das fontes não seladas foi realizada de maneira similar à das fontes padrão. Para a calibração dos activímetros, utilizando-se fontes não seladas, foram realizadas seis séries de medidas das atividades de cada fonte em separado, tendo sido considerada a leitura média corrigida para o decaimento radioativo (TAB. 3.2 e 3.3), assim como o desvio de cada leitura. Os valores dos fatores de correção e os coeficientes de calibração obtidos são apresentados na TAB. 4.11.

TABELA 4.11 Fatores de correção e coeficientes de calibração para as fontes não seladas.

Nuclídeo	Fatores de correção			Coeficientes de calibração (MBq x 10 <sup>-10</sup> A)
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IEN	IPEN
<sup>67</sup> Ga	1,001±0,001	1,004±0,001	(a)	3,05±0,04
<sup>153</sup> Sm	1,000±0,001	1,001±0,001	1,11±0,01	5,25±0,01
<sup>99m</sup> Tc	1,000±0,001	1,004±0,001	1,03±0,01	3,14±0,01
<sup>123</sup> I	0,999±0,001	1,003±0,003	(a)	3,06±0,02
<sup>201</sup> Tl	1,000±0,001	1,000±0,001	1,13±0,01	3,89±0,03
<sup>51</sup> Cr	1,000±0,001	1,003±0,004	(a)	19,70±0,03
<sup>131</sup> I	0,999±0,001	1,003±0,001	(a)	1,81±0,02
<sup>18</sup> F	0,999±0,001	1,000±0,001	(b)	0,82±0,01
<sup>32</sup> P	1,001±0,001	0,988±0,016	(b)	1,22±0,04

(a) Os fatores de correção não puderam ser obtidos para o calibrador IEN, uma vez que as atividades eram inferiores à faixa de operação do activímetro.

(b) O activímetro IEN não possui número de calibração para esses nuclídeos.

A maior diferença obtida entre os fatores de correção, comparando-se o activímetro NPL(LMN) com o NPL(LCI) foi de 1,3%, para <sup>32</sup>P, sendo que foram realizadas seis séries de leitura para cada fonte não selada em cada activímetro estudado.

Para o activímetro IEN não foi possível obter os fatores de correção para <sup>67</sup>Ga, <sup>123</sup>I, <sup>51</sup>Cr e <sup>131</sup>I, uma vez que as atividades desses nuclídeos eram

inferiores à faixa de operação desse activímetro, confundindo a sua resposta com a radiação de fundo. Ainda, para o sistema IEN, não foram obtidos os fatores de correção para  $^{18}\text{F}$  e  $^{32}\text{P}$ , por não estarem definidos números de calibração para esses radionuclídeos. Um método para se obter os números de calibração seria por meio da obtenção da curva de sensibilidade da câmara, mas neste caso não foi possível determiná-la devido à falta de disponibilidade de um grande número de fontes padrão.

Os coeficientes de calibração do sistema IPEN, da mesma forma que no caso das fontes seladas, foram obtidos em unidades de atividade vs corrente.

#### 4.1.2 Espectrometria com detector de estado sólido

Para assegurar que a introdução de um absorvedor, entre a fonte radioativa e câmara poço, não altera o espectro do feixe de radiação, foi realizada a espectrometria das fontes de  $^{57}\text{Co}$  e  $^{133}\text{Ba}$ , do conjunto padrão [TAB. 3.1].

A espectrometria foi realizada posicionando-se as fontes de modo que o centro de cada fonte permanecesse alinhado com o centro do orifício de 10 mm na blindagem de chumbo do detector (FIG. 4.9). Foram determinados os espectros das fontes de  $^{57}\text{Co}$  e  $^{133}\text{Ba}$  diretamente, e em seguida foram obtidos os espectros inserindo-se a fonte em questão em cada um dos absorvedores de latão, PVC, aço e polipropileno.

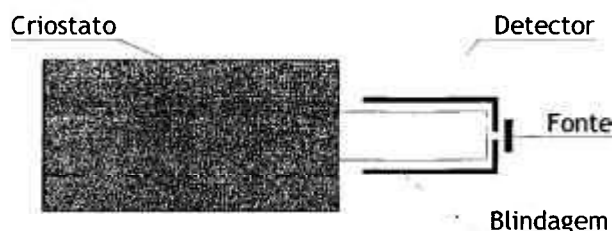


FIGURA 4.9 Representação esquemática do procedimento de espectrometria gama.

Os espectros obtidos para cada uma das fontes estudadas apresentaram exatamente o mesmo resultado tanto para as medições sem o absorvedor como utilizando-se qualquer um dos quatro absorvedores. Nas FIG. 4.10 e 4.11 são mostrados os espectros obtidos para as fontes de  $^{57}\text{Co}$  e  $^{133}\text{Ba}$ .

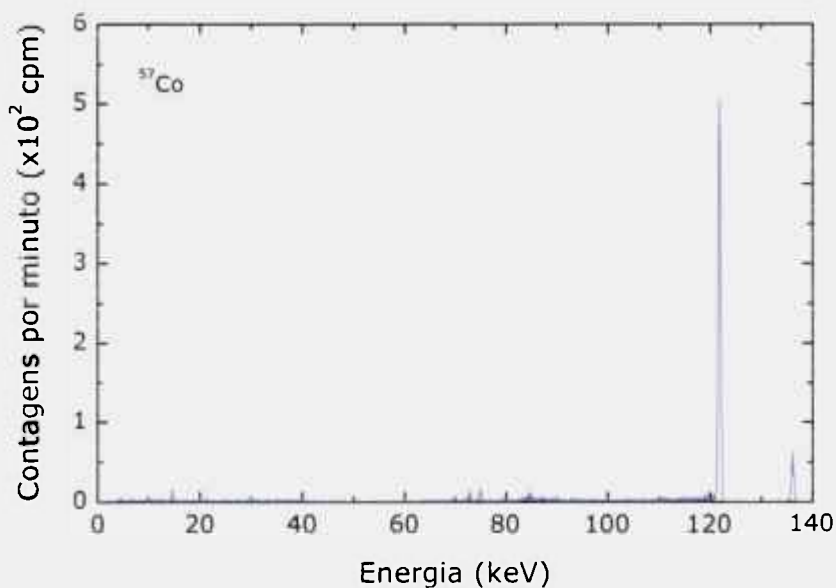


FIGURA 4.10 Espectro da fonte de  $^{57}\text{Co}$ , utilizando-se o espectrômetro ORTEC GLP para fótons de energias baixas.

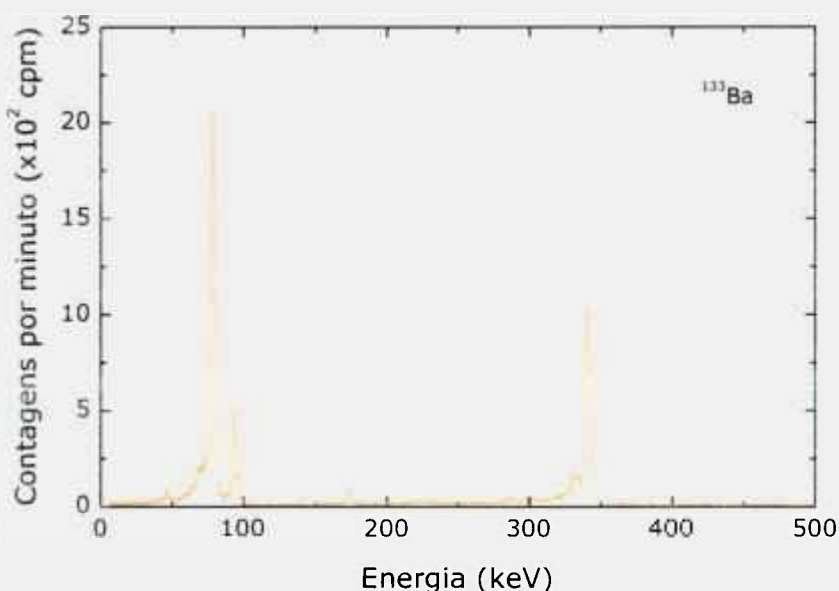


FIGURA 4.11 Espectro da fonte de  $^{133}\text{Ba}$ , utilizando-se o espectrômetro ORTEC GLP para fótons de energias baixas.

Foi apresentado apenas um espectro para cada uma das fontes estudadas porque os resultados foram coincidentes. Pode-se afirmar que a introdução de um absorvedor, independente do material utilizado, não altera os espectros de radiação das fontes de  $^{57}\text{Co}$  e  $^{133}\text{Ba}$ .

#### **4.1.3 Formação de sistemas tandem**

A utilização de um sistema tandem na área de Medicina Nuclear pode permitir a indicação da presença de impurezas nos radiofármacos. Um sistema tandem na Medicina Nuclear pode ser definido como a razão entre as leituras obtidas utilizando-se os absorvedores cilíndricos de materiais diferentes.

Foram caracterizados e estabelecidos sistemas tandem como proposta de um teste adicional nos programas de controle de qualidade em Serviços de Medicina Nuclear. Uma grande vantagem dos sistemas tandem propostos é proporcionar um método rápido e preciso de detecção de impurezas nos radiofármacos, a serem administrados aos pacientes.

Para a caracterização dos sistemas tandem foram realizadas medidas utilizando-se os absorvedores cilíndricos de PVC, latão, polipropileno e aço, que foram introduzidos seqüencialmente nas câmaras de ionização (exceto na do IEN). A introdução de um filtro, além de permitir uma verificação adicional, permite conhecer a resposta dos equipamentos mediante modificações em sua geometria e estabelecer co-relações em função do material absorvedor e da energia da fonte de interesse.

Para a obtenção dos dados com os sistemas tandem, as medições foram realizadas de maneira análoga à utilizada no estudo da reprodutibilidade, apenas com uma diferença: primeiramente as fontes foram medidas diretamente nos activímetros e, em seguida, elas foram inseridas nos diferentes absorvedores para a realização de uma nova medição (FIG. 4.12).

Foram realizadas dez séries de medidas das atividades utilizando-se as fontes seladas padrão para cada absorvedor e seis séries de medidas utilizando-se as fontes padrão não seladas, sistemas NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN, sendo consideradas as leituras médias, corrigidas para o decaimento radioativo (TAB. 3.1), assim como o desvio padrão de cada série de leituras.

As TAB. 4.12 a 4.17 apresentam as razões entre as respostas dos sistemas com os absorvedores de aço e PVC, de latão e PVC, de latão e polipropileno, de PVC e polipropileno, de aço e polipropileno e de latão e aço, respectivamente, utilizando-se as fontes padrão.

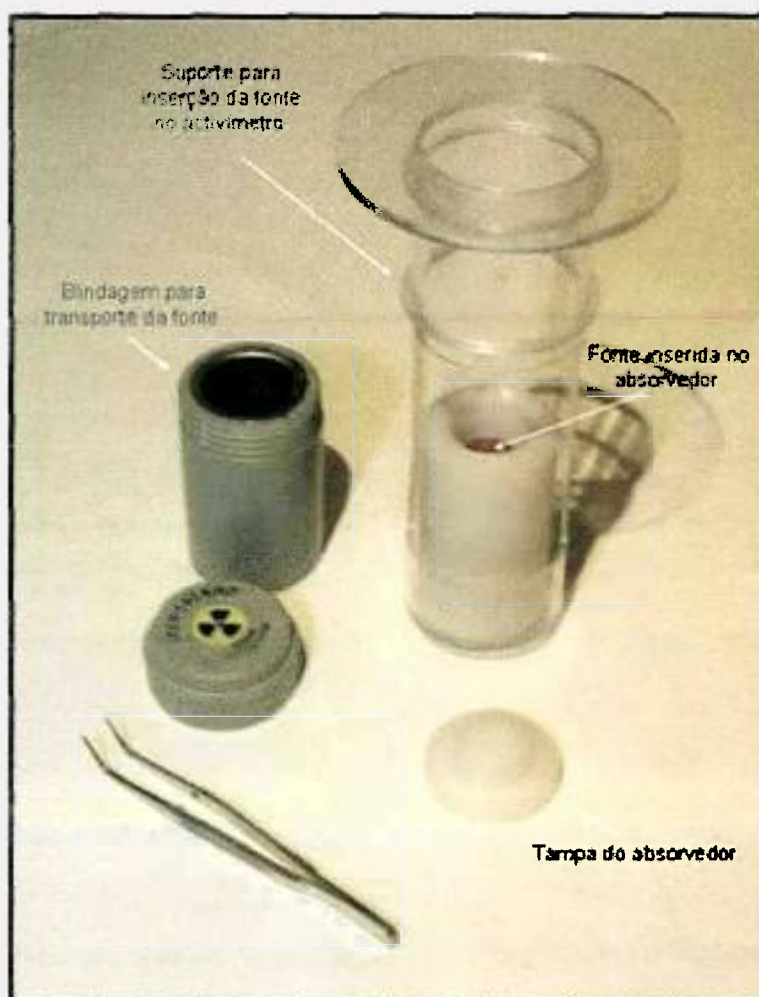


FIGURA 4.12 Fonte não selada dentro de um dos absorvedores e já no suporte de acrílico, ainda sem a tampa, para ser inserida no ativímetro.

TABELA 4.12 Razão entre as respostas dos activímetros com os absorvedores de aço e PVC para as fontes padrão.

Radionuclídeo	Activímetros		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
<sup>57</sup> Co	0,143 ± 0,014	0,142 ± 0,037	0,152 ± 0,032
<sup>133</sup> Ba	0,543 ± 0,003	0,544 ± 0,004	0,511 ± 0,009
<sup>137</sup> Cs	0,712 ± 0,003	0,715 ± 0,004	0,728 ± 0,007
<sup>60</sup> Co	0,781 ± 0,005	0,780 ± 0,007	0,773 ± 0,013

TABELA 4.13 Razão entre as respostas dos activímetros com os absorvedores de latão e PVC para as fontes padrão.

Radionuclídeo	Activímetros		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
<sup>57</sup> Co	0,074±0,010	0,062±0,013	0,089±0,023
<sup>133</sup> Ba	0,471±0,001	0,447±0,004	0,406±0,006
<sup>137</sup> Cs	0,666±0,003	0,667±0,003	0,676±0,006
<sup>60</sup> Co	0,751±0,004	0,751±0,009	0,755±0,013

TABELA 4.14 Razão entre as respostas dos activímetros com os absorvedores de latão e polipropileno para as fontes padrão.

Radionuclídeo	Activímetros		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
<sup>57</sup> Co	0,103 ± 0,019	0,132 ± 0,020	0,129 ± 0,025
<sup>133</sup> Ba	0,404 ± 0,001	0,377 ± 0,001	0,361 ± 0,006
<sup>137</sup> Cs	0,659 ± 0,004	0,660 ± 0,004	0,664 ± 0,006
<sup>60</sup> Co	0,755 ± 0,003	0,749 ± 0,004	0,794 ± 0,012

TABELA 4.15 Razão entre as respostas dos activímetros com os absorvedores de PVC e polipropileno para as fontes padrão.

Radionuclídeo	Activímetros		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
<sup>57</sup> Co	0,715±0,003	0,700±0,002	0,700±0,009
<sup>133</sup> Ba	0,873±0,005	0,880±0,004	0,890±0,010
<sup>137</sup> Cs	0,987±0,003	0,990±0,005	0,990±0,006
<sup>60</sup> Co	0,991±0,005	0,990±0,006	0,990±0,012

TABELA 4.16 Razão entre as respostas dos activímetros com os absorvedores de aço e polipropileno para as fontes padrão.

Radionuclídeo	Activímetros		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
<sup>57</sup> Co	0,138±0,015	0,190±0,017	0,210±0,018
<sup>133</sup> Ba	0,469±0,005	0,490±0,004	0,450±0,008
<sup>137</sup> Cs	0,705±0,003	0,710±0,004	0,720±0,006
<sup>60</sup> Co	0,773±0,004	0,780±0,006	0,780±0,019

TABELA 4.17 Razão entre as respostas dos activímetros com os absorvedores de latão e aço para as fontes padrão.

Radionuclídeo	Activímetros		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
<sup>57</sup> Co	0,477±0,004	0,440±0,002	0,460±0,008
<sup>133</sup> Ba	0,810±0,011	0,830±0,005	0,800±0,012
<sup>137</sup> Cs	0,937±0,003	0,940±0,001	0,930±0,010
<sup>60</sup> Co	0,967±0,001	0,970±0,008	0,960±0,011

Ao se comparar as razões entre as respostas dos activímetros com os absorvedores, observa-se que a maioria dos valores são bastante próximos para cada fonte. Para os activímetros NPL, os maiores desvios percentuais obtidos foram sempre quando se utilizava a fonte de <sup>57</sup>Co, sendo que para a razão entre os absorvedores de aço e PVC o desvio percentual máximo foi de 26,1%. Esse comportamento pode ser explicado pela natureza da curva de sensibilidade para energias abaixo de 200 keV (FIG. 2.3).

Para uma melhor visualização são apresentadas nas FIG. 4.13 a 4.18 as razões entre as medidas obtidas utilizando-se os absorvedores de aço e PVC, latão e PVC, latão e polipropileno, PVC e polipropileno, aço e polipropileno, latão e aço, respectivamente, em função da energia das fontes padrão (TAB. 3.1) para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN. Essas curvas são denominadas curvas tandem. Pode-se observar comportamentos crescentes em função da energia média das fontes.

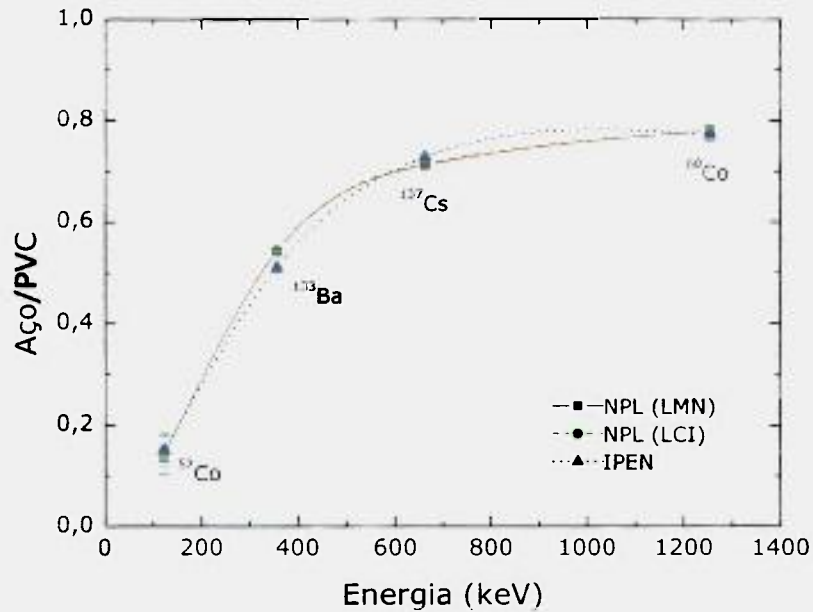


FIGURA 4.13 Curvas tandem dos activímetros NPL(LMN), NPL(LCI) e IPEN: razão das respostas com os absorvedores de aço e PVC em função da energia das fontes padrão.

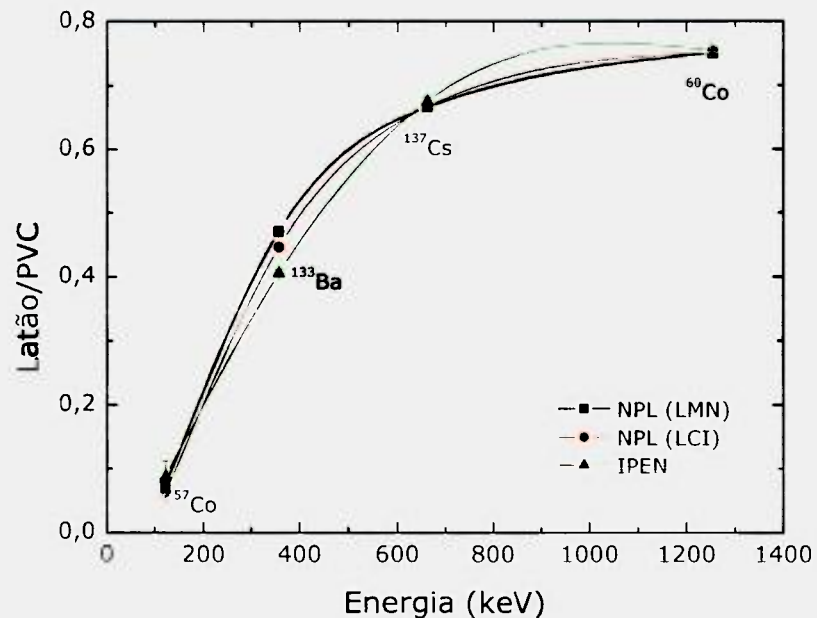


FIGURA 4.14 Curvas tandem dos activímetros NPL(LMN), NPL(LCI) e IPEN: razão das respostas com os absorvedores de latão e PVC em função da energia das fontes padrão.

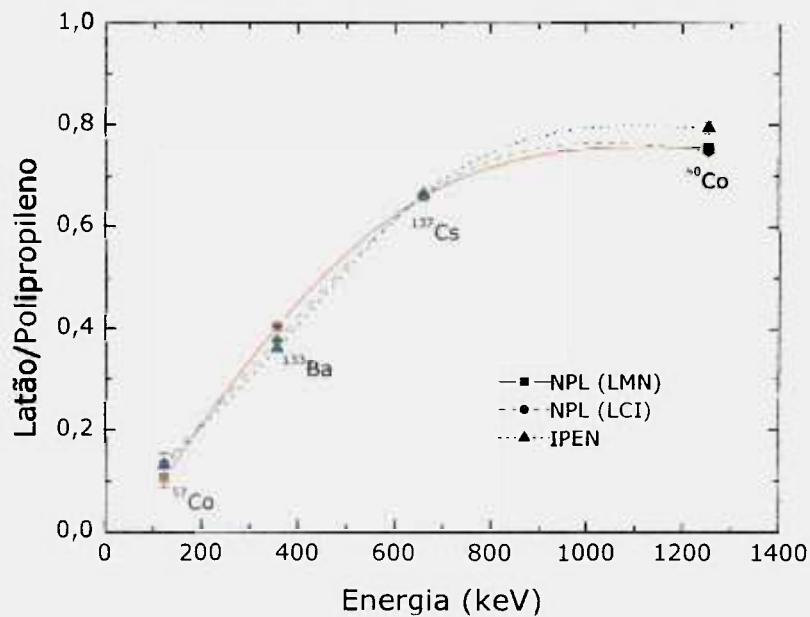


FIGURA 4.15 Curvas tandem dos activímetros NPL(LMN), NPL(LCI) e IPEN: razão das respostas com os absorvedores de latão e polipropileno em função da energia das fontes padrão.

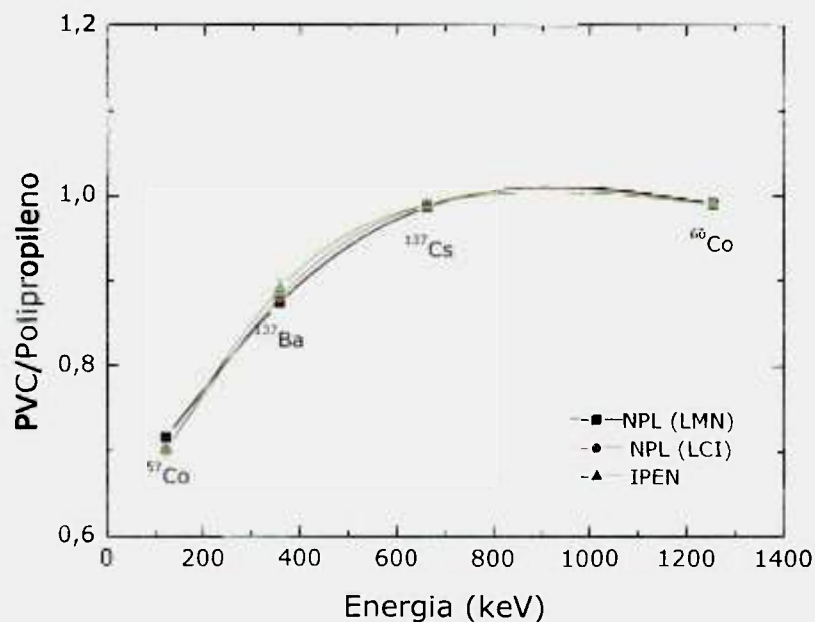


FIGURA 4.16 Curvas tandem dos activímetros NPL(LMN), NPL(LCI) e IPEN: razão das respostas com os absorvedores de PVC e polipropileno em função da energia das fontes padrão.

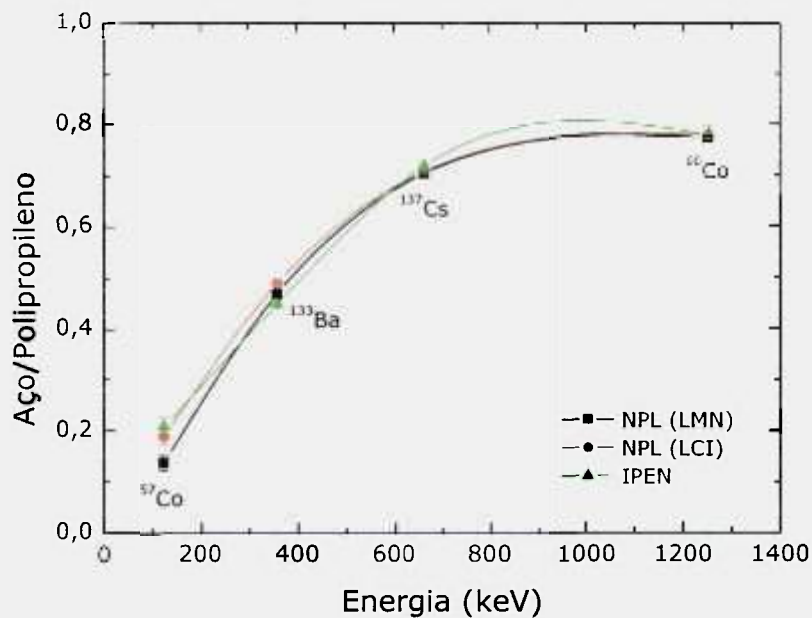


FIGURA 4.17 Curvas tandem dos activímetros NPL(LMN), NPL(LCI) e IPEN: razão das respostas com os absorvedores de aço e polipropileno em função da energia das fontes padrão.

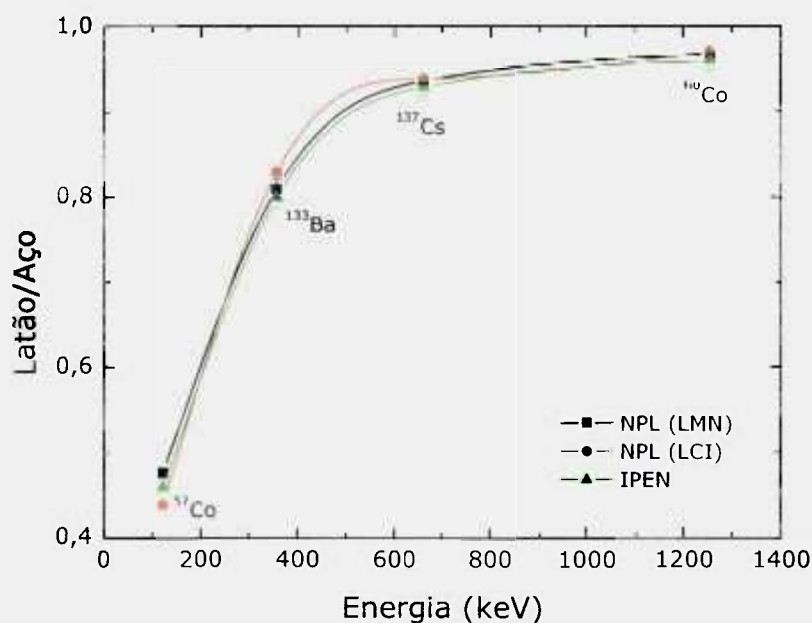


FIGURA 4.18 Curvas tandem dos activímetros NPL(LMN), NPL(LCI) e IPEN: razão das respostas com os absorvedores de latão e aço em função da energia das fontes padrão.

Ao se comparar as curvas obtidas para as diferentes combinações de absorvedores observa-se que os melhores resultados foram obtidos quando se combina o absorvedor de latão ou aço com um absorvedor de plástico. As combinações que utilizaram os absorvedores de aço/PVC (FIG. 4.13), de latão/PVC (FIG. 4.14), de latão/polipropileno (FIG. 4.15) e de aço/polipropileno (FIG. 4.18) mostraram uma boa concordância para os três sistemas de medida e comportamentos excelentes como sistemas tandem. Quanto maior a obliquidade da curva, mais fácil a interpretação do que se quer medir por interpolação. Já as combinações PVC/polipropileno (FIG. 4.16) e latão/aço (FIG. 4.18) não formaram sistemas tandem adequados.

Nas TAB. 4.18 a 4.23 são mostrados as razões obtidas, de modos similares, utilizando-se as fontes não seladas.

TABELA 4.18 Razão entre as respostas dos absorvedores de aço e PVC para as fontes não seladas.

Radionuclídeo	Activímetros		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
<sup>153</sup> Sm	0,057 ± 0,001	0,062 ± 0,001	0,061 ± 0,001
<sup>99m</sup> Tc	0,213 ± 0,001	0,213 ± 0,001	0,213 ± 0,001
<sup>123</sup> I	0,326 ± 0,001	0,327 ± 0,001	0,312 ± 0,002
<sup>201</sup> Tl	0,099 ± 0,001	0,099 ± 0,001	0,077 ± 0,002
<sup>67</sup> Ga	0,400 ± 0,004	0,394 ± 0,001	0,330 ± 0,005
<sup>51</sup> Cr	0,588 ± 0,004	0,590 ± 0,003	0,600 ± 0,008
<sup>131</sup> I	0,629 ± 0,001	0,629 ± 0,001	0,635 ± 0,003
<sup>18</sup> F	0,679 ± 0,001	0,679 ± 0,001	0,694 ± 0,008
<sup>32</sup> P	0,403 ± 0,011	0,468 ± 0,004	0,304 ± 0,035

TABELA 4.19 Razão entre as respostas dos absorvedores de latão e PVC para as fontes não seladas.

Radionuclídeo	Activímetros		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
$^{153}\text{Sm}$	0,018± 0,001	0,023± 0,001	0,023± 0,001
$^{99m}\text{Tc}$	0,069± 0,001	0,068± 0,001	0,069± 0,001
$^{123}\text{I}$	0,171± 0,001	0,171± 0,001	0,152± 0,003
$^{201}\text{Tl}$	0,051± 0,001	0,050± 0,001	0,046± 0,002
$^{67}\text{Ga}$	0,292± 0,013	0,282± 0,002	0,288± 0,004
$^{51}\text{Cr}$	0,482± 0,002	0,484± 0,002	0,487± 0,004
$^{131}\text{I}$	0,541± 0,001	0,540± 0,001	0,540± 0,002
$^{18}\text{F}$	0,624± 0,001	0,624± 0,001	0,625± 0,006
$^{32}\text{P}$	0,338± 0,028	0,363± 0,007	0,244± 0,045

TABELA 4.20 Razão entre as respostas dos absorvedores de latão e polipropileno para as fontes não seladas.

Radionuclídeo	Activímetros		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
$^{153}\text{Sm}$	0,011 ± 0,001	0,015 ± 0,001	0,016 ± 0,003
$^{99m}\text{Tc}$	0,064 ± 0,001	0,064 ± 0,001	0,065 ± 0,001
$^{123}\text{I}$	0,141 ± 0,001	0,135 ± 0,001	0,140 ± 0,001
$^{201}\text{Tl}$	0,041 ± 0,001	0,040 ± 0,001	0,038 ± 0,002
$^{67}\text{Ga}$	0,273 ± 0,001	0,267 ± 0,001	0,214 ± 0,001
$^{51}\text{Cr}$	0,475 ± 0,001	0,476 ± 0,001	0,475 ± 0,001
$^{131}\text{I}$	0,531 ± 0,001	0,531 ± 0,001	0,530 ± 0,001
$^{18}\text{F}$	0,626 ± 0,001	0,626 ± 0,001	0,630 ± 0,001
$^{32}\text{P}$	0,401± 0,007	0,380± 0,001	0,308± 0,003

TABELA 4.21 Razão entre as respostas dos absorvedores de PVC e polipropileno para as fontes não seladas.

Radionuclídeo	Activímetros		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
$^{153}\text{Sm}$	$0,649 \pm 0,001$	$0,649 \pm 0,001$	$0,687 \pm 0,002$
$^{99m}\text{Tc}$	$0,941 \pm 0,001$	$0,940 \pm 0,001$	$0,941 \pm 0,005$
$^{123}\text{I}$	$0,857 \pm 0,002$	$0,856 \pm 0,002$	$0,928 \pm 0,004$
$^{201}\text{Tl}$	$0,808 \pm 0,002$	$0,809 \pm 0,001$	$0,811 \pm 0,004$
$^{67}\text{Ga}$	$0,945 \pm 0,005$	$0,946 \pm 0,003$	$0,936 \pm 0,007$
$^{51}\text{Cr}$	$0,987 \pm 0,005$	$0,984 \pm 0,004$	$0,983 \pm 0,005$
$^{131}\text{I}$	$0,982 \pm 0,001$	$0,983 \pm 0,001$	$0,982 \pm 0,002$
$^{18}\text{F}$	$1,001 \pm 0,002$	$1,008 \pm 0,002$	$1,001 \pm 0,005$
$^{32}\text{P}$	$0,829 \pm 0,019$	$0,721 \pm 0,022$	$0,855 \pm 0,025$

TABELA 4.22 Razão entre as respostas dos absorvedores de aço e polipropileno para as fontes não seladas.

Radionuclídeo	Activímetros		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
$^{153}\text{Sm}$	$0,037 \pm 0,001$	$0,040 \pm 0,001$	$0,042 \pm 0,001$
$^{99m}\text{Tc}$	$0,200 \pm 0,001$	$0,200 \pm 0,001$	$0,201 \pm 0,001$
$^{123}\text{I}$	$0,280 \pm 0,001$	$0,280 \pm 0,001$	$0,283 \pm 0,006$
$^{201}\text{Tl}$	$0,084 \pm 0,001$	$0,080 \pm 0,001$	$0,062 \pm 0,002$
$^{67}\text{Ga}$	$0,379 \pm 0,004$	$0,373 \pm 0,002$	$0,307 \pm 0,004$
$^{51}\text{Cr}$	$0,580 \pm 0,003$	$0,581 \pm 0,002$	$0,594 \pm 0,008$
$^{131}\text{I}$	$0,618 \pm 0,001$	$0,617 \pm 0,001$	$0,628 \pm 0,003$
$^{18}\text{F}$	$0,680 \pm 0,002$	$0,684 \pm 0,001$	$0,695 \pm 0,009$
$^{32}\text{P}$	$0,478 \pm 0,014$	$0,489 \pm 0,011$	$0,360 \pm 0,029$

TABELA 4.23 Razão entre as respostas dos absorvedores de latão e aço para as fontes não seladas.

Radionuclídeo	Activímetros		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
$^{153}\text{Sm}$	0,373± 0,008	0,373± 0,001	0,373± 0,001
$^{99m}\text{Tc}$	0,323± 0,001	0,321± 0,001	0,322± 0,001
$^{123}\text{I}$	0,525± 0,001	0,522± 0,001	0,488± 0,009
$^{201}\text{Tl}$	0,519± 0,011	0,503± 0,002	0,499± 0,016
$^{67}\text{Ga}$	0,716± 0,007	0,714± 0,003	0,692± 0,012
$^{51}\text{Cr}$	0,821± 0,009	0,820± 0,003	0,811± 0,013
$^{131}\text{I}$	0,861± 0,001	0,860± 0,001	0,844± 0,004
$^{18}\text{F}$	0,919± 0,002	0,919± 0,002	0,905± 0,013
$^{32}\text{P}$	0,788± 0,038	0,776± 0,015	0,800± 0,045

Os sistemas tandem propostos (aço/PVC; latão/PVC; latão/polipropileno; aço/polipropileno) apresentaram desempenhos excelentes, tendo se mostrados estáveis e reprodutíveis durante a realização das medições. Os activímetros NPL(LMN) e NPL(LCI) apresentaram razões bastante próximas para cada fonte. Para a radiação de pósitrons do  $^{18}\text{F}$ , as razões obtidas entre os diferentes absorvedores, comparando-se o sistema NPL(LMN) com o sistema IPEN, foram próximas, sendo a maior variação entre as razões obtidas de 2,2% para aço e PVC (TAB. 4.18) e para aço e polipropileno (TAB. 4.22). A maior diferença encontrada para o activímetro IPEN, comparado ao NPL(LMN), foi para os absorvedores de latão e PVC, utilizando-se a fonte de  $^{32}\text{P}$  (TAB. 4.19).

Comparando-se, ainda, o sistema de medida IPEN com o de referência NPL(LMN), observa-se que as maiores diferenças foram obtidas para as energias inferiores a 200 keV, onde, como já foi comentado, ocorrem as maiores incertezas em função da natureza da curva de sensibilidade da câmara (FIG. 2.3) (Energias das fontes utilizadas: TAB. 3.1 a 3.3).

Para os sistemas tandem formados, utilizando-se as fontes não seladas não foi apresentada a visualização gráfica, em razão dos diferentes tipos de radiação ( $\gamma$ ,  $\beta$  e  $\beta^+$ ) emitidos pelas diferentes fontes não seladas estudadas.

#### 4.1.3.1 Reprodutibilidade com fontes seladas

A reprodutibilidade das razões dos sistemas tandem formados com as fontes padrão foi verificada realizando-se dez séries consecutivas de medidas para os activímetros NPL(LMN), NPL(LCI) e IPEN, para as diferentes combinações entre os absorvedores. As TAB. 4.24 a 4.27 apresentam as variações percentuais máximas obtidas para as fontes de  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{60}\text{Co}$ , respectivamente.

TABELA 4.24 Variações percentuais máximas (s) na reprodutibilidade (10 séries de medidas) dos sistemas tandem, utilizando-se a fonte de  $^{57}\text{Co}$ , para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN.

$^{57}\text{Co}$	s (%)		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
Latão/PVC	0,19	0,04	0,12
Latão/Aço	0,04	0,07	0,19
Latão/Polipropileno	0,23	0,37	0,14
Aço/PVC	0,16	0,33	0,16
PVC/Polipropileno	0,04	0,02	0,05
Aço/Polipropileno	0,09	0,26	0,18

TABELA 4.25 Variações percentuais máximas (s) na reprodutibilidade (10 séries de medidas) dos sistemas tandem, utilizando-se a fonte de  $^{133}\text{Ba}$ , para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN.

$^{133}\text{Ba}$	s (%)		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
Latão/PVC	0,03	0,03	0,01
Latão/Aço	0,02	0,01	0,01
Latão/Polipropileno	0,03	0,03	0,01
Aço/PVC	0,01	0,01	0,01
PVC/Polipropileno	0,01	0,00	0,01
Aço/Polipropileno	0,01	0,01	0,01

TABELA 4.26 Variações percentuais máximas (s) na reprodutibilidade (10 séries de medidas) dos sistemas tandem, utilizando-se a fonte de  $^{137}\text{Cs}$ , para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN.

$^{137}\text{Cs}$	s (%)		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
Latão/PVC	0,01	0,01	0,01
Latão/Aço	0,01	0,02	0,01
Latão/Polipropileno	0,01	0,01	0,01
Aço/PVC	0,01	0,02	0,01
PVC/Polipropileno	0,01	0,01	0,01
Aço/Polipropileno	0,01	0,02	0,01

TABELA 4.27 Variações percentuais máximas (s) na reprodutibilidade (10 séries de medidas) dos sistemas tandem, utilizando-se a fonte de  $^{60}\text{Co}$ , para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN.

$^{60}\text{Co}$	s (%)		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
Latão/PVC	0,01	0,01	0,01
Latão/Aço	0,01	0,01	0,01
Latão/Polipropileno	0,01	0,01	0,01
Aço/PVC	0,01	0,01	0,01
PVC/Polipropileno	0,01	0,01	0,01
Aço/Polipropileno	0,01	0,01	0,01

As variações percentuais mais altas, de até 0,37% (caso NPL(LCI), sistema latão/polipropileno) foram apresentadas no caso da fonte de  $^{57}\text{Co}$  (TAB. 4.24), provavelmente devido à dificuldade na obtenção da curva de sensibilidade da câmara para energias abaixo de 200 keV (FIG. 2.3]. Mesmo assim, todos os sistemas tandem propostos apresentaram uma reprodutibilidade excelente para as fontes padrão de  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  e  $^{60}\text{Co}$ .

#### 4.1.3.2 Reprodutibilidade com fontes não seladas

De modo similar, foi verificada a reprodutibilidade do sistema tandem utilizando-se as fontes padrão não seladas, para todos os sistemas de medida. Foram realizadas seis séries de medidas utilizando-se as fontes padrão não seladas, para os sistemas NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN, sendo considerada a leitura média, corrigida para o decaimento radioativo (TAB. 3.2), assim como o desvio padrão de cada série de leituras. As TAB. 4.28 a 4.36 apresentam as variações percentuais máximas obtidas para as fontes de  $^{153}\text{Sm}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ,  $^{123}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{201}\text{Tl}$ ,  $^{67}\text{Ga}$ ,  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{18}\text{F}$  e  $^{32}\text{P}$ , respectivamente.

TABELA 4.28 Variações percentuais máximas (s) na reprodutibilidade (6 séries de medidas) dos sistemas tandem, utilizando-se a fonte de  $^{153}\text{Sm}$ , para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN.

$^{153}\text{Sm}$	s (%)		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
Latão/PVC	---	---	3,5
Latão/Aço	---	---	4,8
Latão/Polipropileno	---	---	3,3
Aço/PVC	---	---	2,7
PVC/Polipropileno	0,49	0,41	0,84
Aço/Polipropileno	---	---	1,7

No caso da fonte da  $^{153}\text{Sm}$  e as razões entre os absorvedores de latão/aço, aço/PVC e aço/polipropileno as medidas com os sistemas NPL(LMN) e NPL(LCI) foram iguais ao nível da radiação de fundo, provavelmente devido à atividade baixa da fonte e da absorção alta desses dois absorvedores. Assim, não foi possível determinar as variações percentuais para as razões com os absorvedores de latão e de aço (TAB. 4.28).

TABELA 4.29 Variações percentuais máximas (s) na reprodutibilidade (6 séries de medidas) dos sistemas tandem, utilizando-se a fonte de  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ , para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN.

$^{99\text{m}}\text{Tc}$	s (%)		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
Latão/PVC	0,03	0,02	0,05
Latão/Aço	0,05	0,02	0,97
Latão/Polipropileno	0,07	0,08	0,94
Aço/PVC	0,07	0,04	0,08
PVC/Polipropileno	0,06	0,03	0,20
Aço/Polipropileno	0,04	0,05	0,29

TABELA 4.30 Variações percentuais máximas (s) na reprodutibilidade (6 séries de medidas) dos sistemas tandem, utilizando-se a fonte de  $^{123}\text{I}$ , para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN.

$^{123}\text{I}$	s (%)		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
Latão/PVC	0,31	0,16	0,77
Latão/Aço	0,05	0,24	0,88
Latão/Polipropileno	0,18	0,10	0,56
Aço/PVC	0,06	0,08	0,11
PVC/Polipropileno	0,09	0,04	0,18
Aço/Polipropileno	0,23	0,13	0,20

TABELA 4.31 Variações percentuais máximas (s) na reprodutibilidade (6 séries de medidas) dos sistemas tandem, utilizando-se a fonte de  $^{131}\text{I}$ , para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN.

$^{131}\text{I}$	s (%)		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
Latão/PVC	0,07	0,07	0,14
Latão/Aço	0,07	0,07	0,56
Latão/Polipropileno	0,06	0,06	0,16
Aço/PVC	0,04	0,04	0,36
PVC/Polipropileno	0,03	0,03	0,28
Aço/Polipropileno	0,02	0,02	0,28

TABELA 4.32 Variações percentuais máximas (s) na reprodutibilidade (6 séries de medidas) dos sistemas tandem, utilizando-se a fonte de  $^{201}\text{Tl}$ , para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN.

$^{201}\text{Tl}$	s (%)		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
Latão/PVC	1,9	0,90	1,5
Latão/Aço	1,2	2,2	1,5
Latão/Polipropileno	1,9	0,91	1,4
Aço/PVC	0,16	0,23	0,02
PVC/Polipropileno	0,17	0,03	0,12
Aço/Polipropileno	0,27	0,20	0,10

TABELA 4.33 Variações percentuais máximas (s) na reprodutibilidade (6 séries de medidas) dos sistemas tandem, utilizando-se a fonte de  $^{67}\text{Ga}$ , para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN.

$^{67}\text{Ga}$	s (%)		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
Latão/PVC	0,04	0,26	0,74
Latão/Aço	0,26	0,28	1,0
Latão/Polipropileno	0,10	0,39	0,52
Aço/PVC	0,28	0,06	0,04
PVC/Polipropileno	0,03	0,01	0,24
Aço/Polipropileno	0,16	0,11	0,38

TABELA 4.34 Variações percentuais máximas (s) na reprodutibilidade (6 séries de medidas) dos sistemas tandem, utilizando-se a fonte de  $^{51}\text{Cr}$ , para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN.

$^{51}\text{Cr}$	s (%)		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
Latão/PVC	0,27	0,63	0,43
Latão/Aço	0,01	0,31	0,68
Latão/Polipropileno	0,01	0,32	0,62
Aço/PVC	0,12	0,31	0,41
PVC/Polipropileno	0,04	0,01	0,22
Aço/Polipropileno	0,01	0,01	0,14

TABELA 4.35 Variações percentuais máximas (s) na reprodutibilidade (6 séries de medidas) dos sistemas tandem, utilizando-se a fonte de  $^{18}\text{F}$ , para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN.

$^{18}\text{F}$	s (%)		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
Latão/PVC	0,06	0,02	0,24
Latão/Aço	0,05	0,05	0,26
Latão/Polipropileno	0,08	0,04	0,43
Aço/PVC	0,03	0,05	0,22
PVC/Polipropileno	0,03	0,02	0,02
Aço/Polipropileno	0,04	0,12	0,22

TABELA 4.36 Variações percentuais máximas (s) na reprodutibilidade (6 séries de medidas) dos sistemas tandem, utilizando-se a fonte de  $^{32}\text{P}$ , para os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN.

$^{32}\text{P}$	s (%)		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
Latão/PVC	1,3	---	2,5
Latão/Aço	1,4	---	2,6
Latão/Polipropileno	2,3	---	1,8
Aço/PVC	1,9	---	2,5
PVC/Polipropileno	0,56	0,23	0,35
Aço/Polipropileno	0,67	---	2,4

O desvio percentual máximo foi de 4,8% para o activímetro IPEN, utilizando a fonte de  $^{153}\text{Sm}$ , para a razão entre o latão e o aço, que não é uma combinação recomendada (TAB. 4.28). Entre as combinações consideradas ideais para a formação do sistema tandem, o maior desvio percentual obtido foi de 1,9%, para o sistema NPL(LMN), no caso da razão entre os absorvedores de latão e polipropileno, utilizando a fonte de  $^{201}\text{Tl}$  (TAB. 4.32).

De um modo geral, observa-se que os activímetros NPL(LMN) e NPL(LCI) apresentam uma melhor reprodutibilidade quando comparados com o sistema IPEN.

#### 4.1.4 Sistemas tandem com impurezas

Os sistemas tandem propostos (latão / PVC; latão / polipropileno; aço / PVC; aço / polipropileno) podem ser recomendados para utilização num teste adicional, de um programa de controle de qualidade em Medicina Nuclear, por permitir a indicação da presença de impurezas radioativas nos radiofármacos, quando as razões entre as medidas forem diferentes das obtidas no laboratório em condições sem impurezas. Embora apenas quatro dos sistemas tandem estudados tenham sido considerados adequados, o estudo a respeito da presença de impurezas foi realizado para os seis sistemas tandem inicialmente formados.

Para o estabelecimento desse procedimento adicional foram realizadas medidas com os diferentes absorvedores utilizando-se amostras de fontes de referência não seladas, contendo impurezas radioativas. Essas amostras foram obtidas com  $^{131}\text{I}$  e  $^{201}\text{Tl}$ , em proporções distintas, sob condições controladas em laboratório, numa solução aquosa para injeção estéril e apirogênica, perfazendo um volume total de 4 ml, para cada amostra. A intenção de combinar, numa única amostra o  $^{131}\text{I}$  e o  $^{201}\text{Tl}$  foi a de simular amostras de radiofármacos com contaminações radioativas. As amostras contendo diferentes proporções de  $^{131}\text{I}$  e de  $^{201}\text{Tl}$  foram acondicionadas em frascos tipo penicilina, de 20 ml, que permaneceram lacrados durante a realização das medidas. A escolha desses radionuclídeos no estudo dos sistemas tandem na presença de impurezas foi baseada nas características da fonte de  $^{201}\text{Tl}$  ( $T_{1/2} = 3$  d; 167,43 keV) e da fonte

de  $^{131}\text{I}$  ( $T_{1/2} = 8$  d; 364,48 keV), que apresentam valores diferentes de meia-vida e de energias médias.

O estudo da formação do sistema tandem na presença de impurezas foi realizado utilizando-se as amostras contendo  $^{131}\text{I}$  e  $^{201}\text{Tl}$  nas proporções apresentadas na TAB. 4.37.

TABELA 4.37 Proporções de  $^{131}\text{I}$  e o  $^{201}\text{Tl}$  nas amostras utilizadas para o estudo do sistema tandem na presença de impurezas.

Amostra	Quantidade na amostra (%)		Data de referência
	$^{201}\text{Tl}$	$^{131}\text{I}$	
01	24,2	75,8	02/07/2003 (07:25 h)
02	46,4	53,6	02/07/2003 (07:43 h)
03	55,0	45,0	24/06/2003 (14:28 h)
04	62,2	37,8	30/07/2003 (07:45 h)
05	81,1	18,9	30/07/2003 (07:49 h)

Para cada uma das amostras foram realizadas medições da atividade durante três dias consecutivos, sendo realizadas três séries de medidas a cada dia, para cada absorvedor, tendo sido considerados a leitura média corrigida para o decaimento radioativo (TAB. 4.37) e o desvio padrão de cada leitura. As avaliações foram realizadas utilizando-se os activímetros NPL (LMN), NPL (LCI) e IPEN.

As FIG. 4.19 a 4.24 apresentam as curvas tandem estabelecidas com a presença de impurezas radioativas nos radiofármacos. Gráficos similares podem ser obtidos pelos usuários com as combinações de radiofármacos utilizados em seus serviços. A cada novo lote de radiofármacos recebidos bastaria uma simples verificação no activímetro, utilizando-se, por exemplo, dois absorvedores escolhidos na clínica: determinando-se a razão entre estas duas leituras, bastaria verificar no gráfico correspondente ao radionuclídeo que está sendo medido se existe alguma impureza nele.

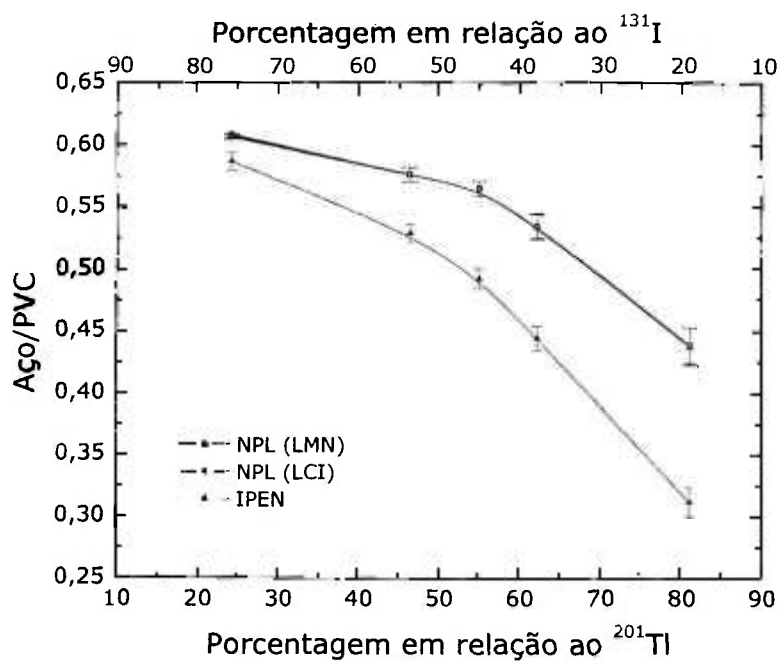


FIGURA 4.19 Razão entre a resposta dos activímetros utilizando os absorvedores de aço e PVC para diferentes percentuais de  $^{131}\text{I}$  e  $^{201}\text{Tl}$ .

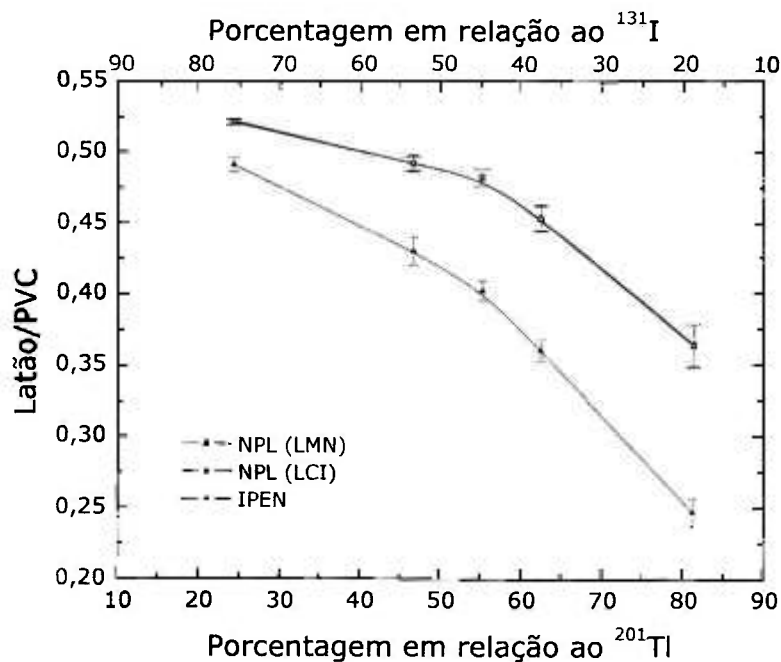


FIGURA 4.20 Razão entre a resposta dos activímetros utilizando os absorvedores de latão e PVC para diferentes percentuais de  $^{131}\text{I}$  e  $^{201}\text{Tl}$ .

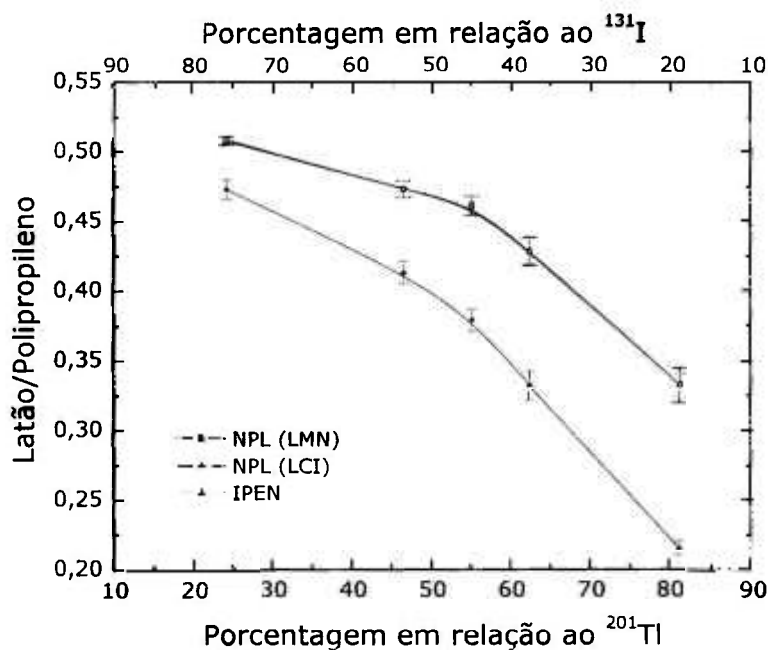


FIGURA 4.21 Razão entre a resposta dos activímetros utilizando os absorvedores de latão e polipropileno para diferentes percentuais de  $^{131}\text{I}$  e  $^{201}\text{Tl}$ .

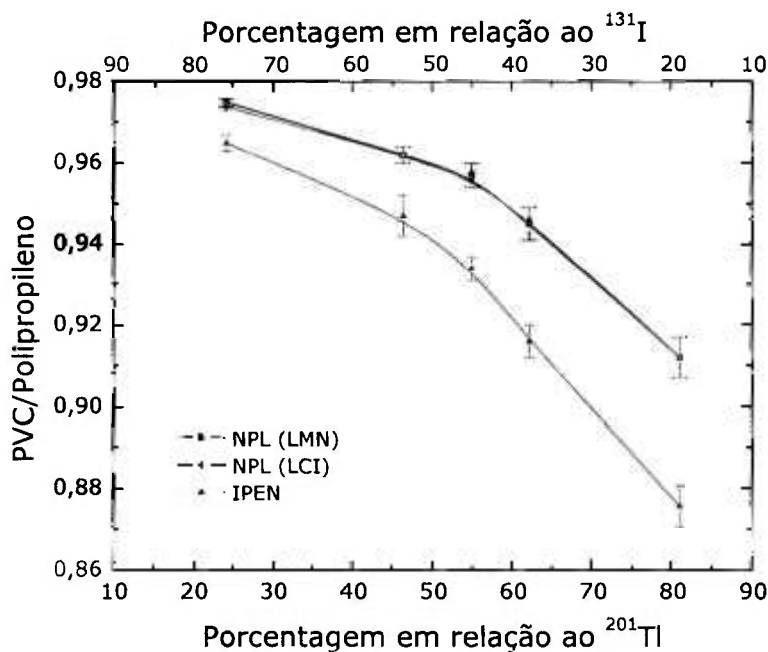


FIGURA 4.22 Razão entre a resposta dos activímetros utilizando os absorvedores de PVC e polipropileno para diferentes percentuais de  $^{131}\text{I}$  e  $^{201}\text{Tl}$ .

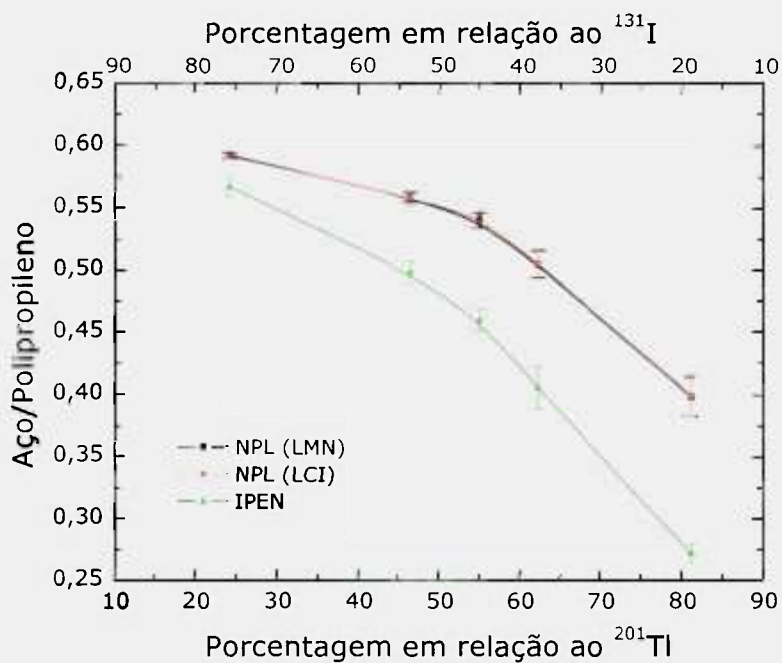


FIGURA 4.23 Razão entre a resposta dos activímetros utilizando os absorvedores de aço e polipropileno para diferentes percentuais de  $^{131}\text{I}$  e  $^{201}\text{Tl}$ .

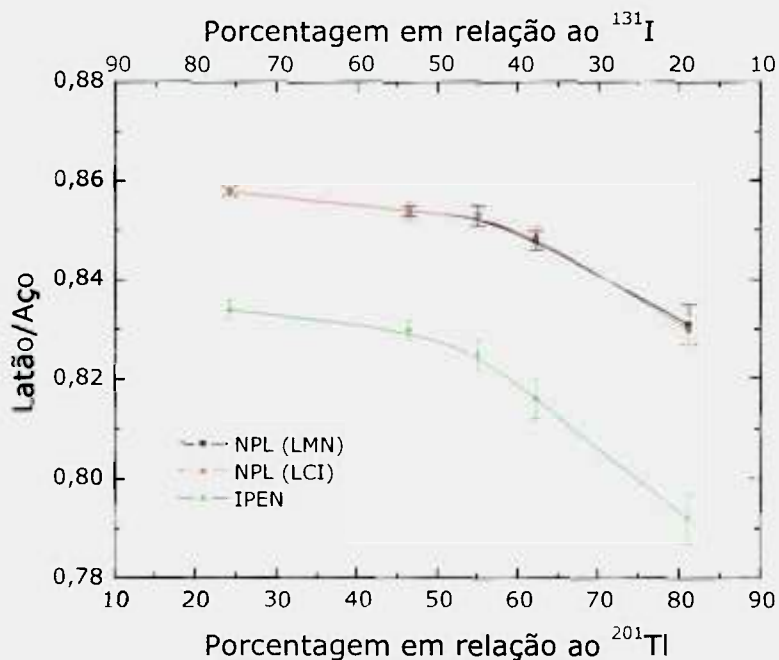


FIGURA 4.24 Razão entre a resposta dos activímetros utilizando os absorvedores de latão e aço para diferentes percentuais de  $^{131}\text{I}$  e  $^{201}\text{Tl}$ .

Os activímetros do tipo padrão secundário, NPL(LMN) e NPL(LCI), apresentaram o mesmo resultado, embora todos os três sistemas tenham mostrado um bom desempenho: o decréscimo obtido no valor das razões demonstra a aplicabilidade do método proposto. A presença de impurezas nos radiofármacos pode ser detectada com precisão e de um modo bastante simples.

Os sistemas tandem estabelecidos na presença de impurezas foram também avaliados quanto a sua reprodutibilidade (TAB. 4.38 a 4.42). Embora sejam apresentados apenas os valores do desvio percentual máximo, na determinação da reprodutibilidade, no caso dos activímetros NPL(LMN), NPL(LCI) e IPEN, foi calculada a leitura média de todas as séries de medidas realizadas, corrigida para o decaimento radioativo (TAB. 4.37), assim como o desvio padrão de cada série de leituras, para cada amostra e para cada sistema tandem estudado.

TABELA 4.38 Variações percentuais máximas (s) obtidas no teste de reprodutibilidade dos sistemas tandem, utilizando-se uma fonte com 24,2% de  $^{201}\text{Tl}$  e 75,8% de  $^{131}\text{I}$  (Amostra 01).

Absorvedores	s (%)		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
Latão/PVC	0,46	0,47	1,1
Latão/Aço	0,11	0,06	0,27
Latão/Polipropileno	0,54	0,52	1,4
Aço/PVC	0,40	0,42	1,1
PVC/Polipropileno	0,12	0,07	0,25
Aço/Polipropileno	0,48	0,48	1,3

TABELA 4.39 Variações percentuais máximas (s) obtidas no teste de reprodutibilidade dos sistemas tandem, utilizando-se uma fonte com 46,4% de  $^{201}\text{Tl}$  e 53,6% de  $^{131}\text{I}$  (Amostra 02).

Absorvedores	s (%)		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
Latão/PVC	1,1	1,2	2,4
Latão/Aço	0,08	0,19	0,26
Latão/Polipropileno	1,3	1,4	1,9
Aço/PVC	1,1	1,1	1,3
PVC/Polipropileno	0,21	0,18	0,56
Aço/Polipropileno	0,77	1,0	1,7

TABELA 4.40 Variações percentuais máximas (s) obtidas no teste de reprodutibilidade dos sistemas tandem, utilizando-se uma fonte com 55,0% de  $^{201}\text{Tl}$  e 45,0% de  $^{131}\text{I}$  (Amostra 03).

Absorvedores	s (%)		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
Latão/PVC	1,3	1,3	1,7
Latão/Aço	0,22	0,16	0,35
Latão/Polipropileno	1,5	1,3	2,1
Aço/PVC	1,1	1,1	1,6
PVC/Polipropileno	0,29	0,26	0,54
Aço/Polipropileno	1,2	0,83	2,0

TABELA 4.41 Variações percentuais máximas (s) obtidas no teste de reprodutibilidade dos sistemas tandem, utilizando-se uma fonte com 62,2% de  $^{201}\text{Tl}$  e 37,8% de  $^{131}\text{I}$  (Amostra 04).

Absorvedores	s (%)		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
Latão/PVC	1,9	1,9	4,0
Latão/Aço	0,20	0,20	0,49
Latão/Polipropileno	2,3	2,3	4,6
Aço/PVC	1,8	1,8	3,7
PVC/Polipropileno	0,39	0,32	0,71
Aço/Polipropileno	2,2	2,1	4,2

TABELA 4.42 Variações percentuais máximas (s) obtidas no teste de reprodutibilidade dos sistemas tandem, utilizando-se uma fonte com 81,1% de  $^{201}\text{Tl}$  e 18,9% de  $^{131}\text{I}$  (Amostra 05).

Absorvedores	s (%)		
	NPL (LMN)	NPL (LCI)	IPEN
Latão/PVC	2,6	3,8	3,8
Latão/Aço	0,50	0,31	0,92
Latão/Polipropileno	2,8	2,7	4,1
Aço/PVC	3,5	3,6	4,2
PVC/Polipropileno	0,60	0,56	0,53
Aço/Polipropileno	3,7	3,8	4,2

Os sistemas NPL apresentaram um desvio percentual máximo de 3,8% para as razões entre os absorvedores de aço e polipropileno (TAB. 4.42), no caso do activímetro NPL(LCI), para as medidas realizadas com a amostra 05 (81,1% de  $^{201}\text{Tl}$  e 18,9% de  $^{131}\text{I}$ ).

Os resultados do teste da reprodutibilidade de resposta confirmam o desempenho dos equipamentos utilizando-se sistemas tandem quando da presença de impurezas radionuclídicas. O maior desvio obtido foi de 4,6%, para o activímetro IPEN, utilizando o sistema tandem com os absorvedores de latão e polipropileno (TAB. 4.41), para as medidas realizadas com a amostra 04 (62,2% de  $^{201}\text{Tl}$  e 37,8% de  $^{131}\text{I}$ ), mas ainda assim inferior ao limite recomendado, de  $\pm 5\%$  [CNEN, 1996], [IAEA, 1991]. Observa-se ainda que o sistema IPEN, entre todos, apresentou sempre os maiores desvios percentuais, provavelmente devido ao fato dos valores obtidos nas medidas serem mais baixos, causando uma imprecisão nos resultados.

#### 4.1.5 Aplicações dos sistemas tandem

Vários fatores podem fazer com que uma medição rotineira realizada num Serviço de Medicina Nuclear produza um resultado incorreto, ainda que os testes de controle de qualidade sejam realizados de maneira satisfatória. Entre

esses fatores pode ser citada a presença de impurezas no radiofármaco, que podem levar a uma superestimativa na medida da atividade.

Ao se determinar a atividade de uma amostra num activímetro não é possível detectar a presença de impurezas no radiofármaco, mas com o auxílio de um sistema tandem isso é possível. Para isso, basta que cada usuário estabeleça suas curvas tandem para as combinações de radionuclídeos utilizados na clínica. A partir desses gráficos e da medição da amostra no activímetro é possível identificar na curva se existe alguma impureza.

Para assegurar a confiabilidade dos sistemas tandem estabelecidos foram realizadas duas simulações distintas, utilizando-se proporções desconhecidas de  $^{131}\text{I}$  e  $^{201}\text{Tl}$  nas amostras utilizadas.

Foram obtidas medidas das atividades de cada amostra, em ambas simulações, durante três dias consecutivos. Foram realizadas sete séries de medições com cada amostra, para cada absorvedor, tendo sido considerados a leitura média corrigida para o decaimento radioativo (02/02/2004 para a primeira simulação; 10/02/2004 para a segunda simulação), assim como o desvio padrão de cada leitura. As avaliações foram realizadas utilizando-se os activímetros NPL (LCI) e IPEN. O sistema de referência NPL(LMN) não foi utilizado nos testes de aplicação do sistema tandem, na presença de impurezas, por ser o activímetro padrão.

Os resultados são apresentados nas FIG. 4.25 a 4.30 para os sistemas tandem com os absorvedores de aço/PVC, latão/PVC, latão/polipropileno, PVC/polipropileno, aço/polipropileno e latão/aço, respectivamente. A razão das medidas para cada combinação de absorvedores foi levada aos gráficos correspondentes, dos sistemas tandem estabelecidos na secção 4.1.4, de modo a se determinar a porcentagem de  $^{131}\text{I}$  e de  $^{201}\text{Tl}$  presentes em cada simulação de contaminação. A razão aço/PVC para o activímetro NPL(LCI) foi de 0,55, o que corresponde na curva a 41,3% de  $^{131}\text{I}$  e 58,7% de  $^{201}\text{Tl}$ . Para o activímetro IPEN, a razão aço/PVC foi de 0,47, o que também corresponde a 41,3% de  $^{131}\text{I}$  e 58,7% de  $^{201}\text{Tl}$ . De maneira análoga, obteve-se a mesma proporção de  $^{131}\text{I}$  e  $^{201}\text{Tl}$  para a mesma amostra, independente do sistema tandem utilizado.

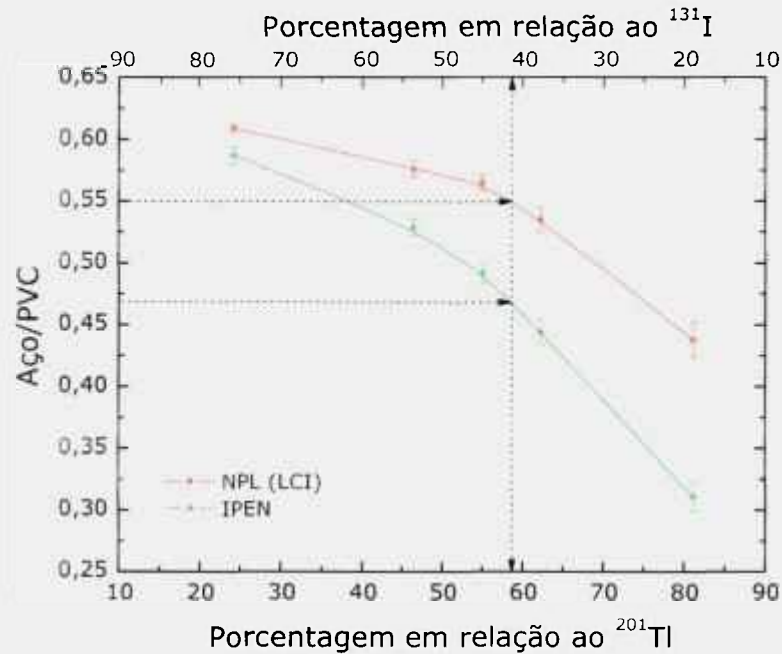


FIGURA 4.25 Razão entre a resposta das medidas para os absorvedores de aço e PVC em diferentes percentuais de impurezas de  $^{131}\text{I}$  e  $^{201}\text{Tl}$ , para os activímetros NPL(LCI) e IPEN: 1ª simulação.

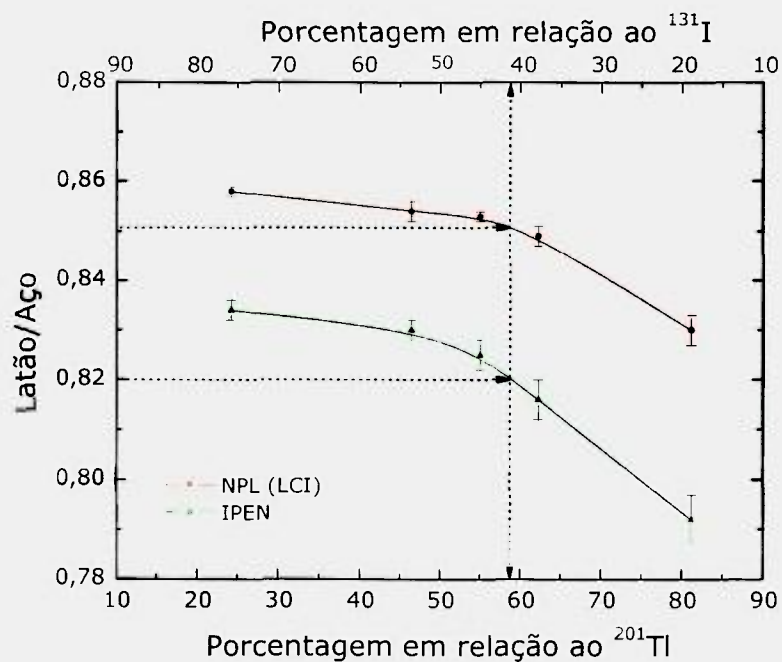


FIGURA 4.26 Razão entre a resposta das medidas para os absorvedores de latão e PVC em diferentes percentuais de impurezas de  $^{131}\text{I}$  e  $^{201}\text{Tl}$ , para os activímetros NPL(LCI) e IPEN: 1ª simulação.

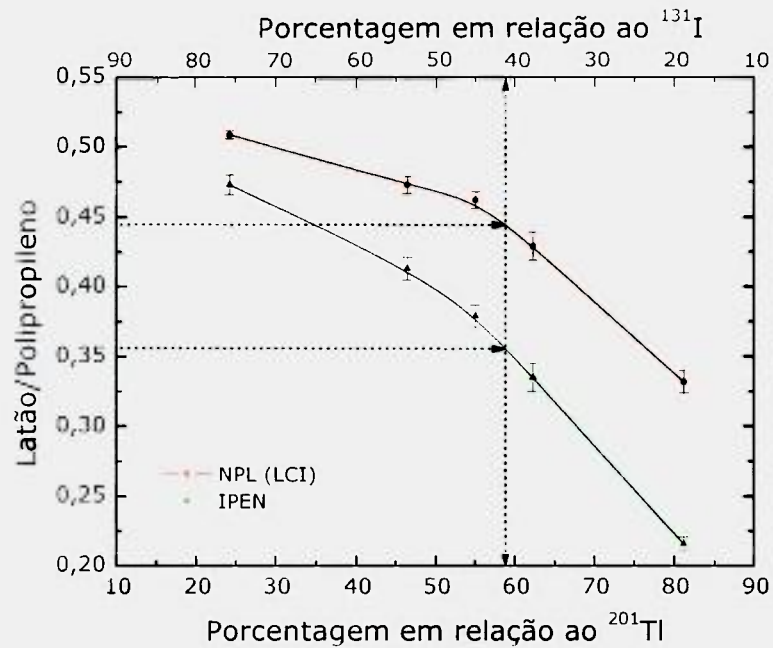


FIGURA 4.27 Razão entre a resposta das medidas para os absorvedores de latão e polipropileno em diferentes percentuais de impurezas de  $^{131}\text{I}$  e  $^{201}\text{Tl}$ , para os activímetros NPL(LCI) e IPEN: 1ª simulação.

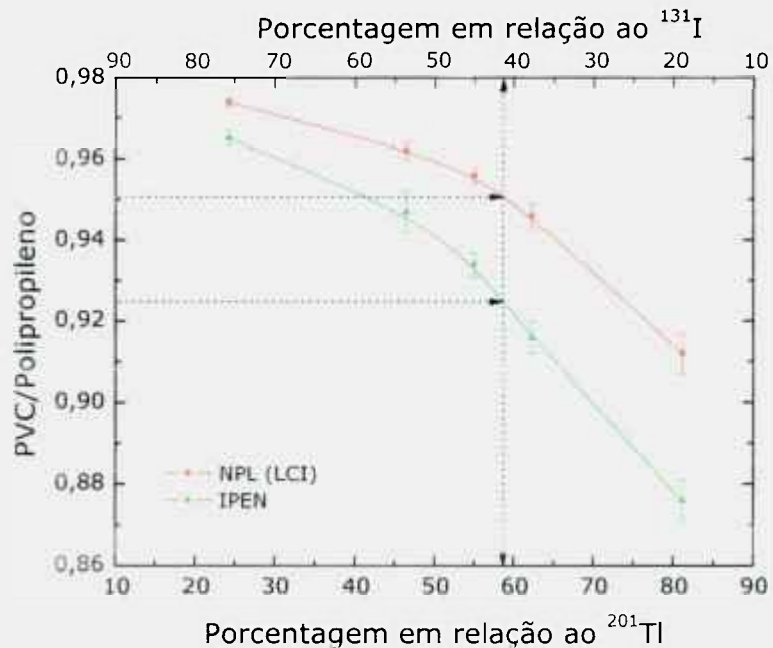


FIGURA 4.28 Razão entre a resposta das medidas para os absorvedores de PVC e polipropileno em diferentes percentuais de impurezas de  $^{131}\text{I}$  e  $^{201}\text{Tl}$ , para os activímetros NPL(LCI) e IPEN: 1ª simulação.

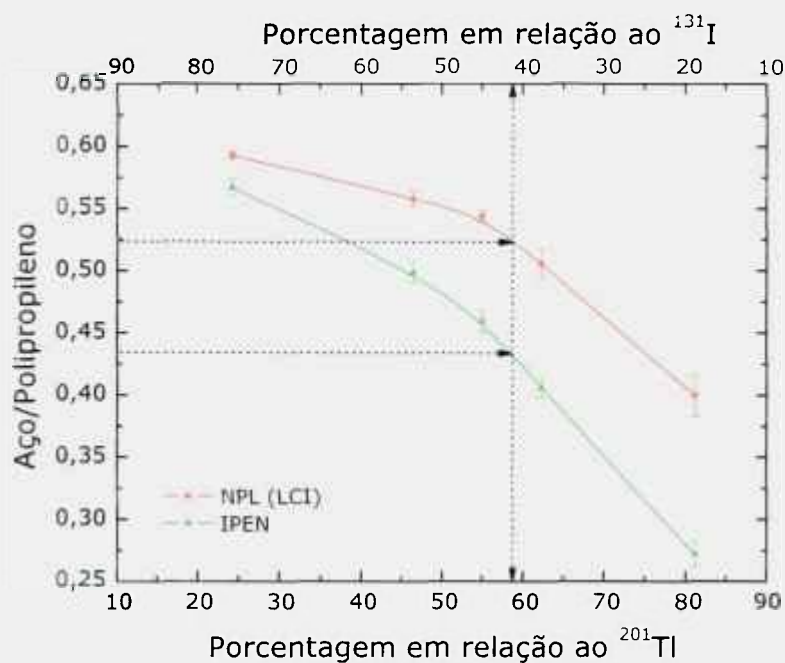


FIGURA 4.29 Razão entre a resposta das medidas para os absorvedores de aço e polipropileno em diferentes percentuais de impurezas de  $^{131}\text{I}$  e  $^{201}\text{Tl}$ , para os activímetros NPL(LCI) e IPEN: 1ª simulação.

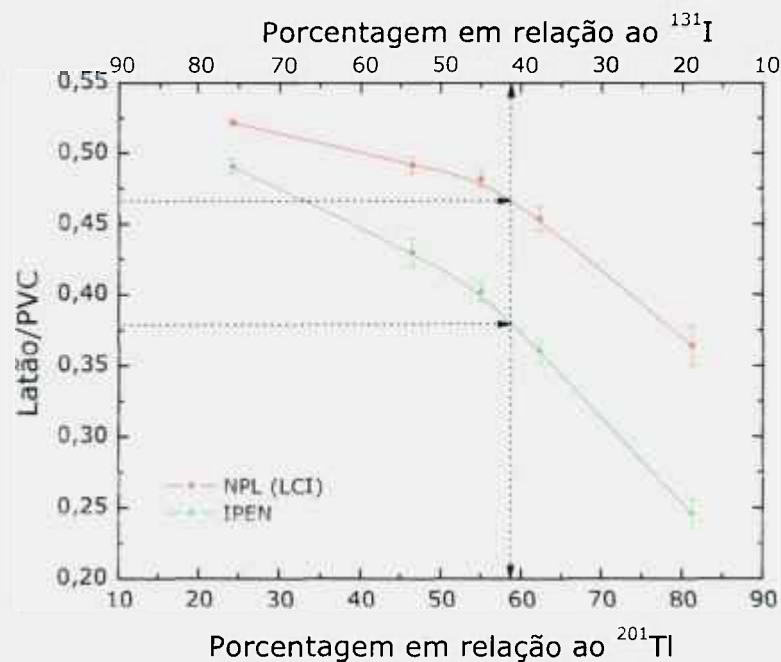


FIGURA 4.30 Razão entre a resposta das medidas para os absorvedores de latão e aço em diferentes percentuais de impurezas de  $^{131}\text{I}$  e  $^{201}\text{Tl}$ , para os activímetros NPL(LCI) e IPEN: 1ª simulação.

Nessa primeira simulação, as porcentagens de 41,3% para o  $^{131}\text{I}$  e de para o 58,7% de  $^{201}\text{Tl}$  foram confirmadas para todas as razões de absorvedores estudadas. Na TAB. 4.43 são apresentados os valores nominais de  $^{131}\text{I}$  e de  $^{201}\text{Tl}$  misturados na amostra pelo CR/IPEN e as razões entre os valores obtidos e os nominais. Observa-se que a diferença máxima foi de apenas 0,3%, mostrando a utilidade dos sistemas nesta aplicação.

TABELA 4.43 Porcentagens de  $^{131}\text{I}$  e de  $^{201}\text{Tl}$  presentes na amostra na primeira simulação realizada.

Radionuclídeo	Valor obtido (%)	Valor nominal (%)	Razão
$^{131}\text{I}$	41,3	41,4	0,998
$^{201}\text{Tl}$	58,7	58,5	1,003

As FIG. 4.31 a 4.36 apresentam os resultados obtidos para os sistemas tandem com os absorvedores de aço/PVC, latão/PVC, latão/polipropileno, PVC/polipropileno, aço/polipropileno e latão/aço, respectivamente, para uma segunda avaliação do sistema tandem estabelecido na presença de impurezas de concentrações desconhecidas.

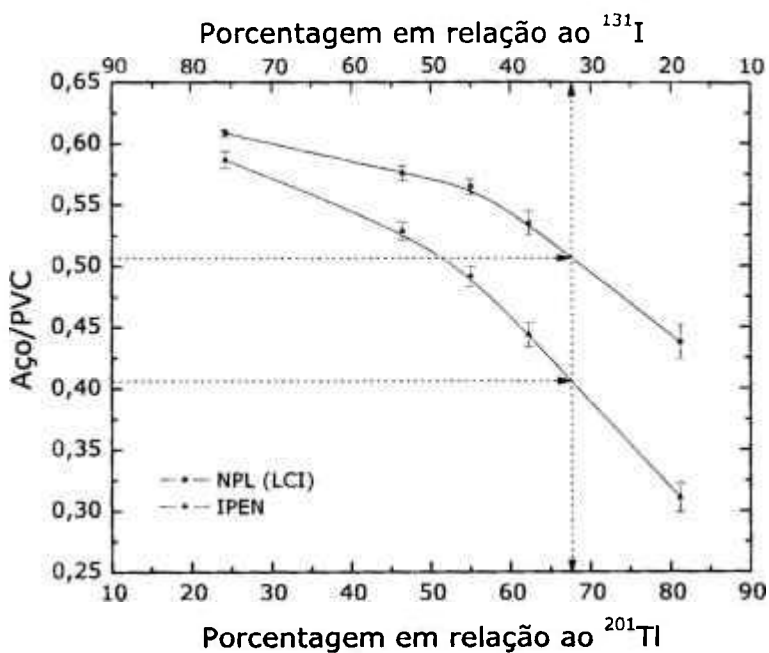


FIGURA 4.31 Razão entre a resposta das medidas para os absorvedores de aço e PVC em diferentes percentuais de impurezas de  $^{131}\text{I}$  e  $^{201}\text{Tl}$ , para os activímetros NPL(LCI) e IPEN: 2ª simulação.

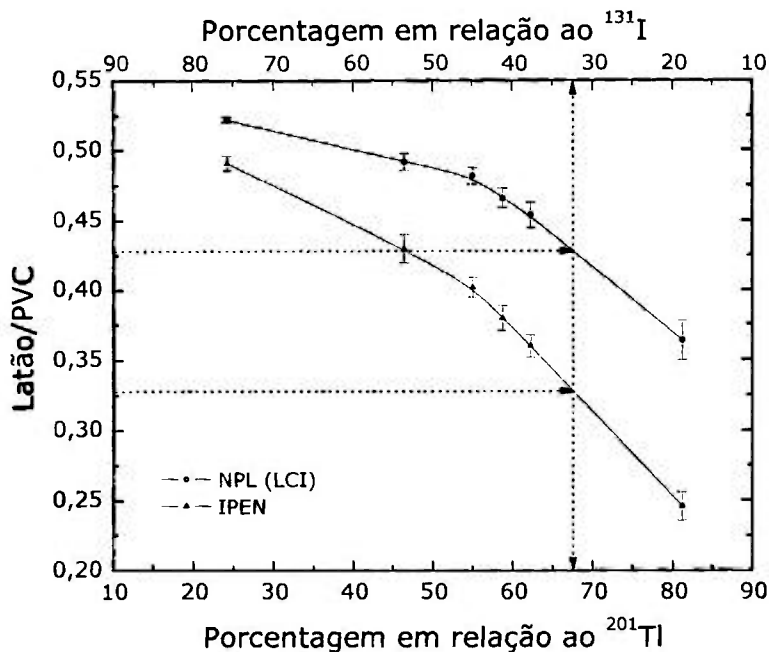


FIGURA 4.32 Razão entre a resposta das medidas para os absorvedores de latão e PVC em diferentes percentuais de impurezas de  $^{131}\text{I}$  e  $^{201}\text{Tl}$ , para os activímetros NPL(LCI) e IPEN: 2ª simulação.

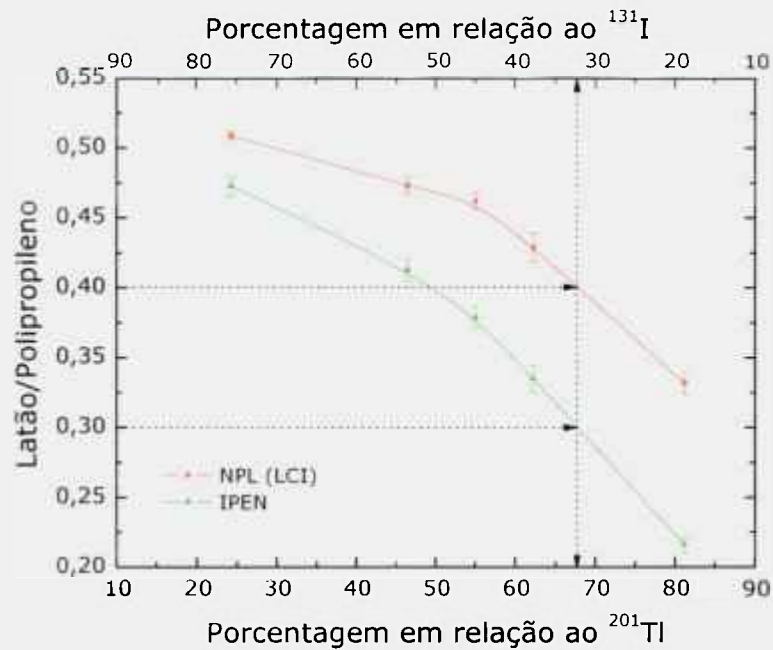


FIGURA 4.33 Razão entre a resposta das medidas para os absorvedores de latão e polipropileno em diferentes percentuais de impurezas de  $^{131}\text{I}$  e  $^{201}\text{Tl}$ , para os activímetros NPL(LCI) e IPEN: 2ª simulação.

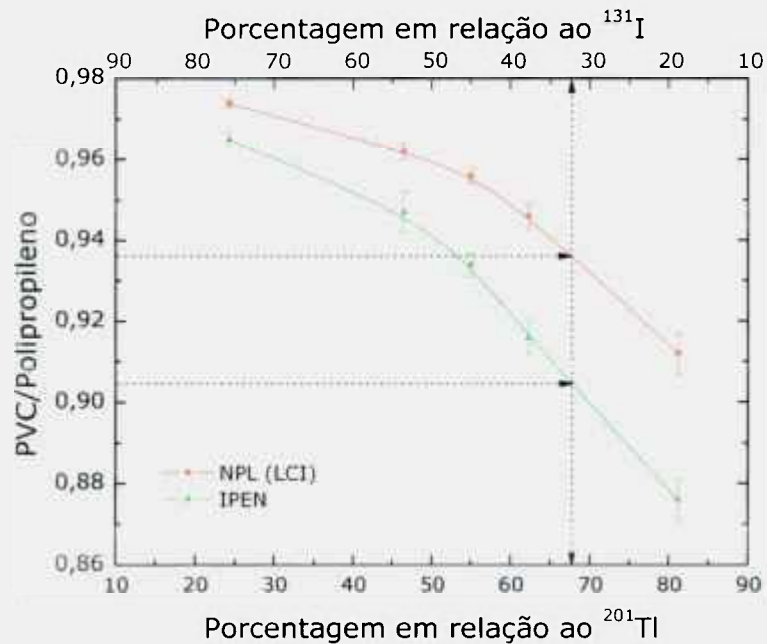


FIGURA 4.34 Razão entre a resposta das medidas para os absorvedores de PVC e polipropileno em diferentes percentuais de impurezas de  $^{131}\text{I}$  e  $^{201}\text{Tl}$ , para os activímetros NPL(LCI) e IPEN: 2ª simulação.

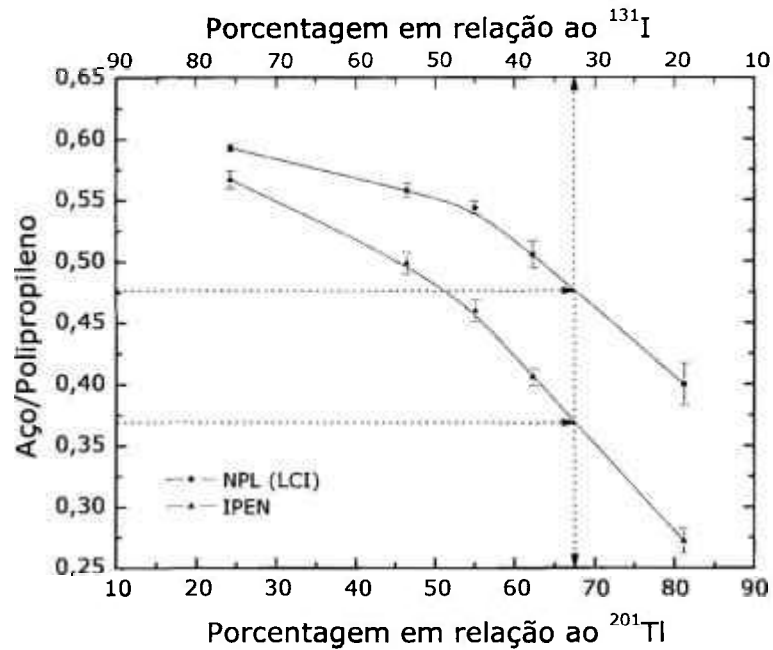


FIGURA 4.35 Razão entre a resposta das medidas para os absorvedores de aço e polipropileno em diferentes percentuais de impurezas de  $^{131}\text{I}$  e  $^{201}\text{Tl}$ , para os activímetros NPL(LCI) e IPEN: 2ª simulação.

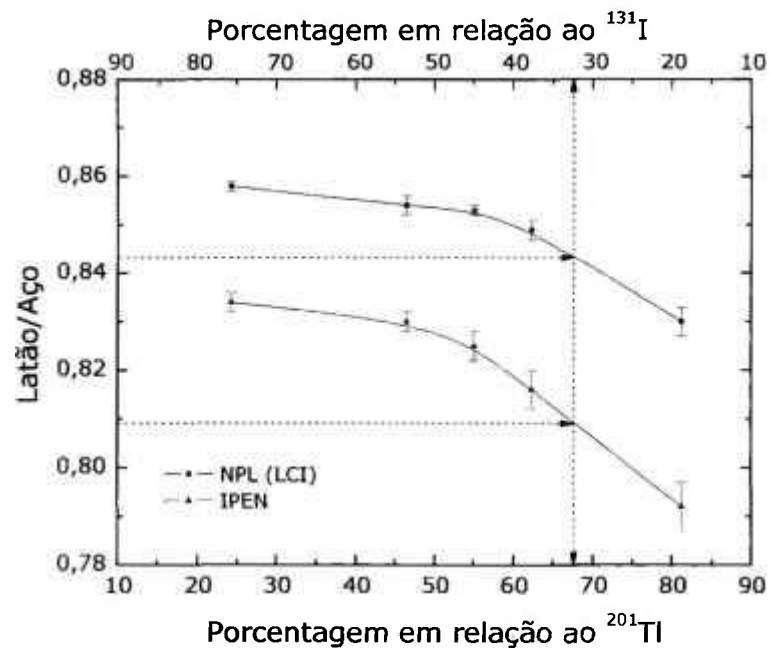


FIGURA 4.36 Razão entre a resposta das medidas para os absorvedores de latão e aço em diferentes percentuais de impurezas de  $^{131}\text{I}$  e  $^{201}\text{Tl}$ , para os activímetros NPL(LCI) e IPEN: 2ª simulação.

Nessa segunda simulação os valores das proporções dos mesmos radioisótopos foram de 32,4% de  $^{131}\text{I}$  e de 67,7% de  $^{201}\text{Tl}$ , também confirmados em todos os casos de duplas de absorvedores avaliadas. Na TAB. 4.44 são apresentados os valores nominais de  $^{131}\text{I}$  e de  $^{201}\text{Tl}$  misturados na amostra pelo CR/IPEN.

TABELA 4.44 Porcentagens de  $^{131}\text{I}$  e de  $^{201}\text{Tl}$  presentes na amostra na segunda aplicação realizada.

Radionuclídeo	Valor obtido (%)	Valor nominal (%)	Razão
$^{131}\text{I}$	32,4	32,5	0,997
$^{201}\text{Tl}$	67,7	67,6	1,001

Os sistemas tandem formados por absorvedores de aço/PVC, latão/polipropileno, aço/polipropileno e latão/PVC confirmaram mais uma vez, pelo comportamento de seus resultados nas simulações realizadas, que constituem as combinações ideais para a formação de sistemas tandem. Essas quatro combinações de absorvedores para sistemas tandem apresentaram ainda comportamentos similares em relação às variações percentuais máximas das razões obtidas. O desvio padrão máximo obtido para as razões obtidas nas duas simulações foi de apenas 0,3%.

Apesar dos sistemas tandem formados pelos absorvedores de latão/aço e PVC/polipropileno terem apresentado curvas tandem inadequadas (FIG. 4.16 e 4.4.18), neste estudo mostraram-se úteis, pois as variações percentuais são desprezíveis na presença de impurezas.

#### **4.2 Dosimetria Termoluminescente**

Neste item são apresentados e discutidos os resultados obtidos na caracterização das propriedades dosimétricas dos três tipos de detectores de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon estudados para o estabelecimento da monitoração individual de trabalhadores que manuseiam radiofármacos emissores de radiação beta nos

Serviços de Medicina Nuclear. Serão mostrados e discutidos os testes principais do equipamento de medida, curvas de emissão TL, reprodutibilidade de resposta, curvas de calibração, limites mínimos detectáveis, dependência energética e angular.

#### **4.2.1 Estabilidade do sistema leitor TL**

Para se estabelecer a confiabilidade dos sistemas de medida TL e uma metodologia dosimétrica para monitoração beta com as pastilhas de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon, inicialmente foi necessário verificar a estabilidade do sistema de medidas. Assim, a sensibilidade deste sistema foi verificada, diariamente, sempre antes e após cada série de leituras com os diferentes materiais utilizados para o estudo da TL.

O teste de estabilidade a curto prazo, ou teste de repetitividade, representa o estudo do grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando, efetuadas sob as mesmas condições de medição. A repetitividade pode ser expressa, quantitativamente, em função das características de dispersão dos resultados. O sistema leitor TL possui uma fonte radioativa selada de  $^{14}\text{C}$  ativada com  $\text{CaF}_2(\text{Eu})$  (denominada "lâmpada padrão"), localizada internamente, que emite fluorescência numa intensidade considerada constante e permite a verificação da estabilidade do sistema leitor de TL e a correção das medições realizadas para um mesmo valor de referência da lâmpada padrão. O teste é realizado sem amostra e sem aquecimento do sistema e consiste da obtenção de uma série de dez leituras de TL consecutivas num tempo pré-determinado, cujo valor médio corresponde a uma medida. Dez medições sucessivas foram realizadas a cada série de leituras dos detectores no sistema leitor TL. O desvio padrão percentual para a repetitividade de resposta foi de 1,02%, considerado perfeitamente satisfatório.

A repetição desse tipo de medição ao longo do tempo, sob condições modificadas, constitui o teste de estabilidade de longo prazo, ou teste de reprodutibilidade. Essa estabilidade pode ser verificada por meio de um gráfico onde se registra a variação das medições obtidas comparadas com a média das

medições realizadas com o sistema de medida. Na FIG. 4.37 observa-se que a estabilidade a longo prazo encontra-se dentro de uma variação máxima de  $\pm 2,0\%$  em relação ao valor de referência. O valor de referência ( $L_0$ ) é determinado como a média de dez medidas consecutivas (médias das medições  $\bar{L}$ ) obtidas com a lâmpada padrão, isto é,  $L_0 = \sum \bar{L}/10$ .

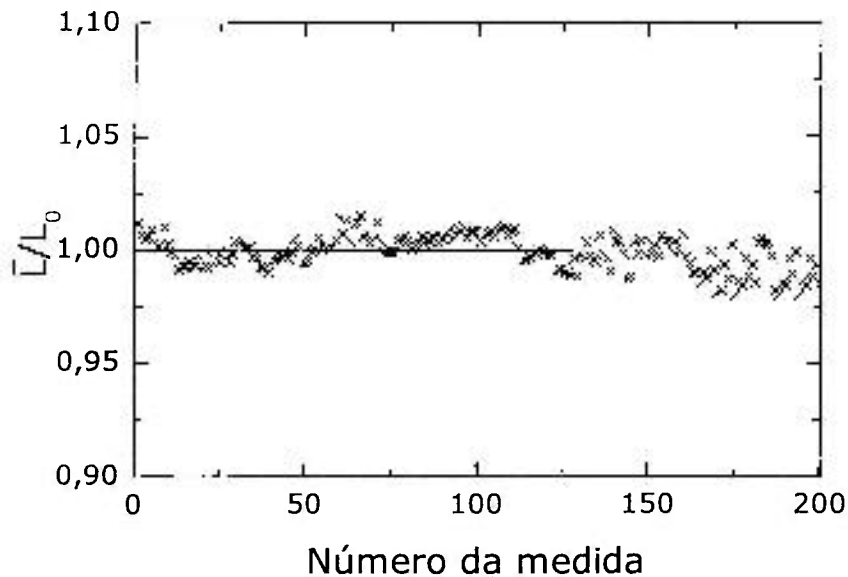


FIGURA 4.37 Estudo da estabilidade do sistema leitor TL ao longo do tempo.

$\bar{L}$ : média das leituras;  $L_0$ : valor de referência.

#### 4.2.2 Curvas de emissão TL

As curvas de emissão TL foram obtidas irradiando-se os três tipos de amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon com radiação beta da fonte de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  (10 mGy), de 1850 MBq, à distância de 30 cm do centro da fonte à superfície do objeto simulador. Nas FIG. 4.38 a 4.40 são mostradas as curvas de emissão obtidas para os diferentes tipos de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon estudados.

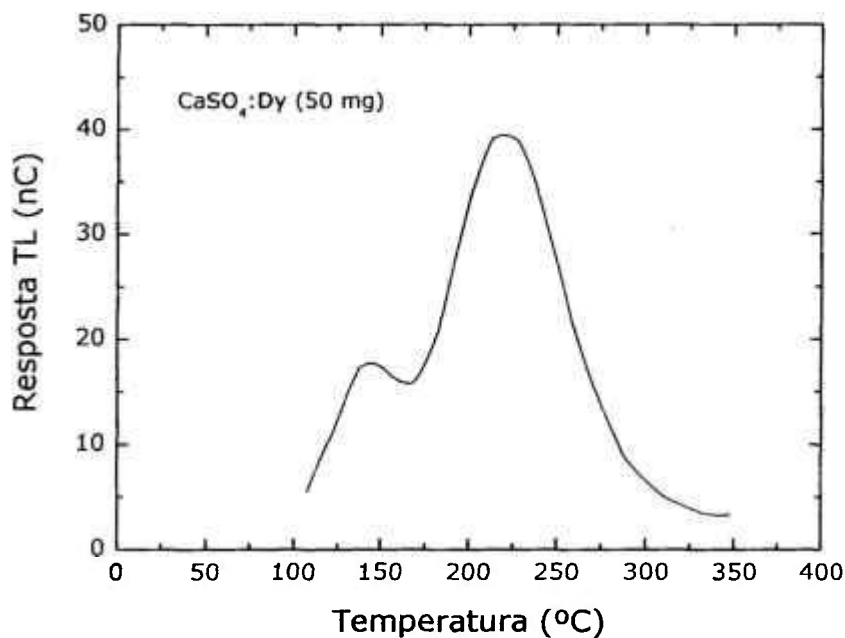


FIGURA 4.38 Curva de emissão TL do CaSO<sub>4</sub>:Dy + Teflon (50 mg) irradiado com 10 mGy (<sup>90</sup>Sr+<sup>90</sup>Y).

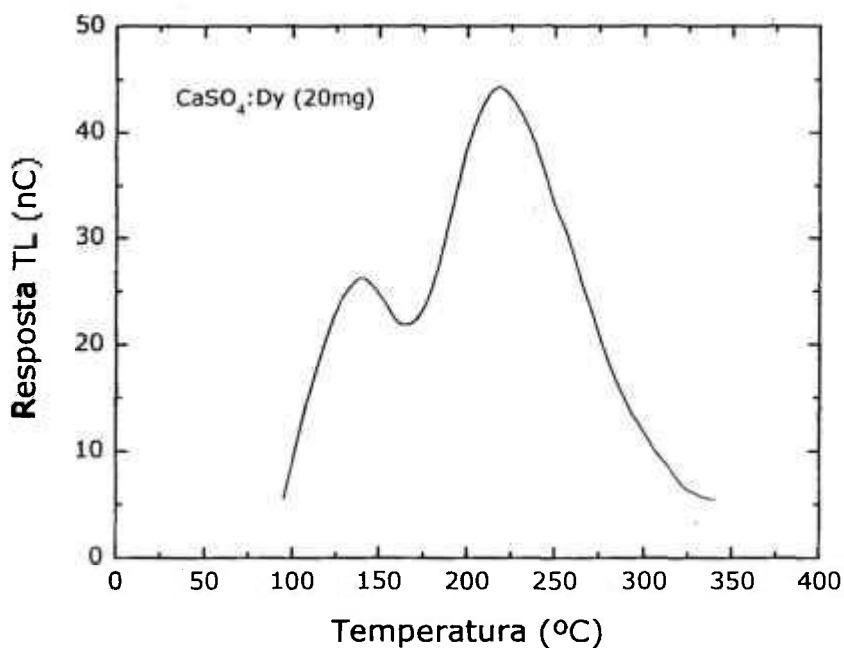


FIGURA 4.39 Curva de emissão TL do CaSO<sub>4</sub>:Dy + Teflon (20 mg) irradiado com 10 mGy (<sup>90</sup>Sr+<sup>90</sup>Y).

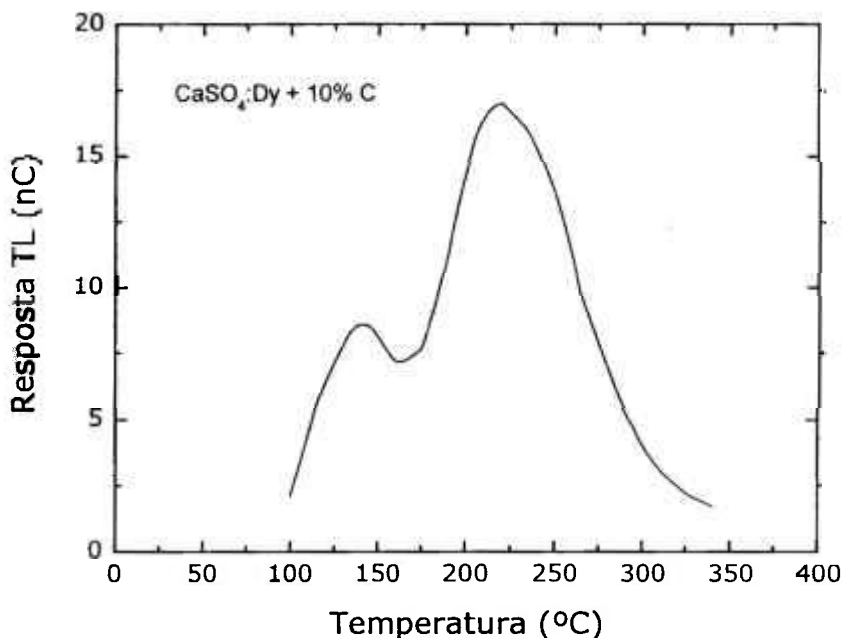


FIGURA 4.40 Curva de emissão TL do CaSO<sub>4</sub>:Dy + Teflon + 10 % C irradiado com 10 mGy (<sup>90</sup>Sr+<sup>90</sup>Y).

Os dosímetros de CaSO<sub>4</sub>:Dy + Teflon (50mg) e de CaSO<sub>4</sub>:Dy + Teflon (20mg) mostraram-se mais sensíveis que os de CaSO<sub>4</sub>:Dy + Teflon + 10% C para uma mesma dose absorvida (10 mGy).

As curvas de emissão TL para todos os materiais TL estudados apresentaram o mesmo comportamento, sendo observados dois picos, um em torno de 145°C e o outro, mais intenso, próximo a 220°C (pico dosimétrico). Esses picos de temperatura são comparáveis aos obtidos por Campos e Lima [1986].

#### 4.2.3 Reprodutibilidade da resposta TL

O estudo da reprodutibilidade da resposta TL das amostras de CaSO<sub>4</sub>:Dy + Teflon foi realizado para cada tipo de dosímetro, determinando-se o desvio padrão médio relativo de medições TL sucessivas.

As amostras foram irradiadas em feixes de radiação gama de  $^{60}\text{Co}$  e de  $^{137}\text{Cs}$  (descritas na secção 3.2.1), sob as mesmas condições experimentais. No estudo da reprodutibilidade utilizando-se a fonte de  $^{60}\text{Co}$ , as amostras foram irradiadas com 2 mGy, sendo o procedimento repetido seis vezes. Para o caso da fonte de  $^{137}\text{Cs}$ , as amostras foram irradiadas dez vezes, sendo que as amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$  (50 mg) e de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$  (20 mg) com 1,2 mGy, e as de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon} + 10\% \text{ C}$  com 7,0 mGy. As amostras foram irradiadas com doses diferentes devido à sensibilidade diferente dos detectores. A reprodutibilidade individual da resposta TL para cada tipo de amostra é apresentada na Tabela 4.45.

TABELA 4.45 Variações percentuais máximas (s) obtidas no estudo da reprodutibilidade da resposta TL das amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$  em feixes de radiação gama.

Material	s (%)	
	$^{60}\text{Co}$	$^{137}\text{Cs}$
$\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$ (50 mg)	3,1	4,4
$\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$ (20 mg)	2,6	5,9
$\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon} + 10\% \text{ C}$	3,2	7,8

A melhor reprodutibilidade foi obtida para a fonte de  $^{60}\text{Co}$ , por essa fonte apresentar algumas vantagens em suas condições geométricas com relação à fonte de  $^{137}\text{Cs}$ . No irradiador de  $^{60}\text{Co}$ , a taxa de exposição era maior que a do irradiador de  $^{137}\text{Cs}$  (Item 3.2.1.1). No caso de  $^{60}\text{Co}$ , as amostras foram irradiadas, no ar, num campo de 14 cm de diâmetro a uma distância fonte-detector de 71 cm, enquanto que no irradiador de  $^{137}\text{Cs}$  as amostras foram posicionadas a apenas 2,2 cm da fonte e irradiadas em um compartimento fechado, aumentando a contribuição de retroespalhamento nas amostras.

Para comparação, os valores obtidos por Campos e Lima [1987] e Campos [1993] foram de 3,0% e 2,2% para os dosímetros de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  (20 mg) e  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon} + 10\% \text{ C}$ , respectivamente, em feixes de  $^{60}\text{Co}$ .

#### 4.2.4 Curvas de calibração

As curvas de calibração dos três tipos diferentes de dosímetros de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon foram obtidas em função da dose absorvida, utilizando-se fontes de radiação gama e beta.

##### 4.2.4.1 Feixes de radiação gama

Os detectores foram irradiados com feixe de  $^{60}\text{Co}$  no intervalo de 0,1 mGy a 10 mGy, no caso das amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon (50mg) e de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon (20mg), enquanto que os dosímetros de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon + 10% C, por serem menos sensíveis, foram irradiados no intervalo de 1 mGy a 20 mGy. Os resultados obtidos são apresentados nas FIG. 4.41 a 4.43. Nesse estudo foram utilizadas cinco amostras de cada material, de maneira que cada ponto de medição (dose absorvida) corresponde à leitura média dos detectores, devidamente corrigidos para a leitura TL da amostra não irradiada e lâmpada padrão. As incertezas associadas às medições foram de no máximo 0,45% para as amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon + 10% C.

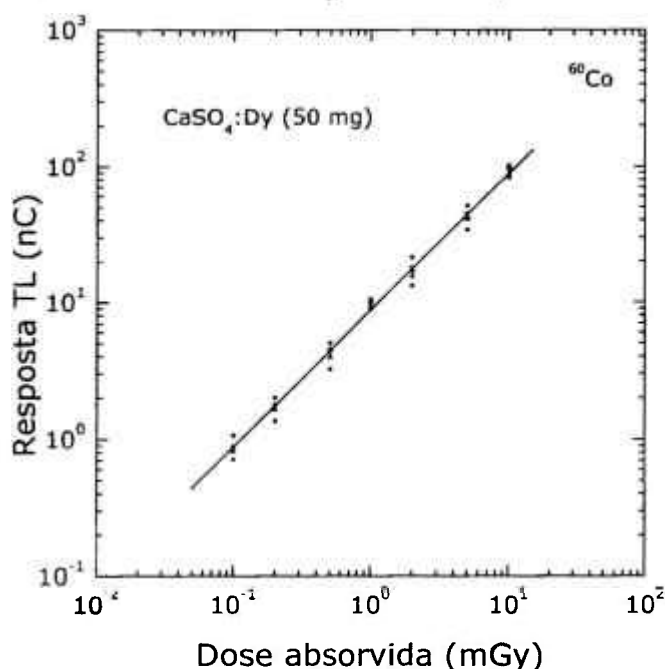


FIGURA 4.41 Curva de calibração das amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon (50 mg) obtida em feixe de radiação gama.

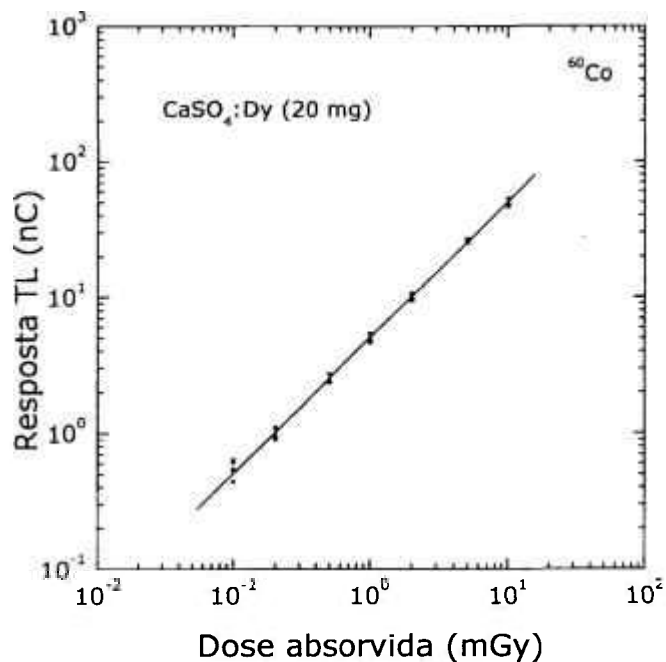


FIGURA 4.42 Curva de calibração das amostras de CaSO<sub>4</sub>:Dy + Teflon (20 mg), obtida em feixe de radiação gama.

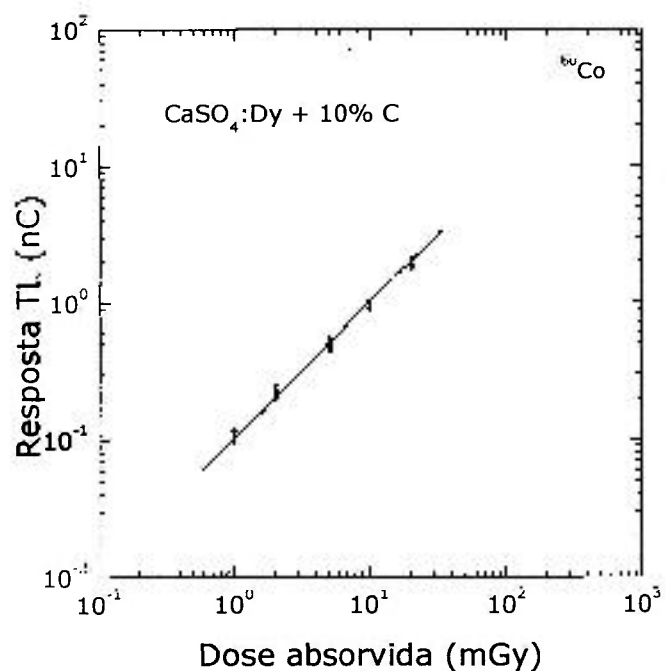


FIGURA 4.43 Curva de calibração das amostras de CaSO<sub>4</sub>:Dy + Teflon + 10% C, obtida em feixe de radiação gama.

Os três tipos de detectores estudados apresentam comportamentos lineares em função da dose absorvida. Conclui-se que todos os dosímetros são adequados para uso em monitoração de  $^{60}\text{Co}$  no respectivo intervalo testado. A linearidade da resposta TL do  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$  (50 mg) é similar ao resultado de Campos e Lima [1986].

#### 4.2.4.2 Feixes de radiação beta

Os detectores foram irradiados com  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  (1850 MBq) no intervalo de 6 mGy a 200 mGy. As irradiações foram realizadas à distância de calibração de 30 cm. Foram utilizadas cinco amostras de cada material, de modo que cada ponto de medida (dose absorvida) corresponde à leitura média dos detectores. As curvas de calibração obtidas, para os diferentes tipos de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$ , são mostradas na FIG. 4.44.

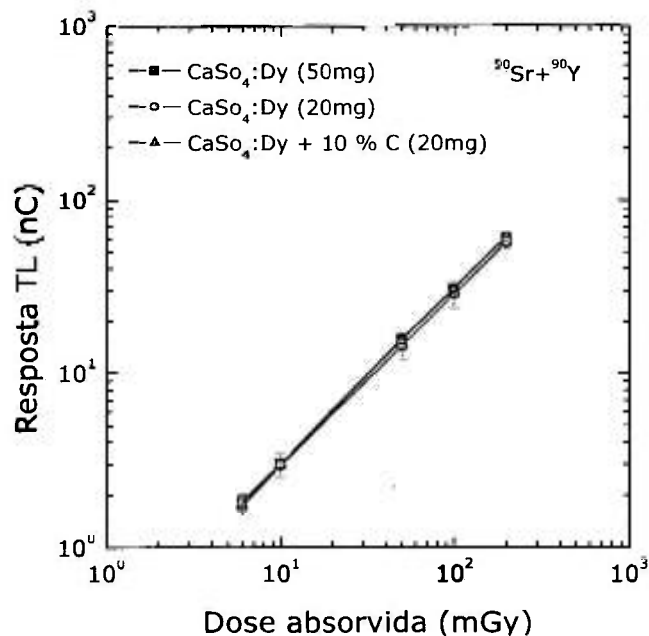


FIGURA 4.44 Curvas de calibração das amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$ , obtidas em feixe de radiação beta ( $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ ).

As curvas de calibração, similarmente às obtidas com radiação gama, também apresentaram comportamentos lineares da resposta TL dos três tipos de

dosímetros de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$ , em função da dose absorvida, no intervalo de 6 mGy a 200 mGy. Todos os detectores são considerados adequados para uso em monitoração de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  no respectivo intervalo testado. As incertezas associadas às medições foram de no máximo 5%. A linearidade da resposta TL do  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$  (20mg) e do  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon} + 10\% \text{C}$  é coincidente com os resultados de Campos e Lima [1987], de Campos [1993] e similar aos resultados de Caldas [1980] no caso de  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$  (60 $\mu\text{m}$ ).

#### 4.2.4.3 Calibração individual dos detectores

Os detectores foram calibrados individualmente para radiação gama e beta. Nos dois casos foram determinados os fatores de calibração para os vinte dosímetros utilizados de cada amostra. Os detectores foram irradiados com 1 mGy no feixe de  $^{60}\text{Co}$ , e no caso das fontes de  $^{147}\text{Pm}$ ,  $^{204}\text{Tl}$  e  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ , com 8,5 mG, 1,8 mGy e 3,5 mGy, respectivamente.

O fator de calibração de cada detector foi determinado pela razão do valor da dose absorvida pelo valor da leitura TL corrigida para a lâmpada padrão e para o valor da leitura de "dose zero" (leitura TL para amostra não irradiada). Os fatores de calibração variaram de 0,062 a 0,076 (0,06%) para os detectores de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$  (50 mg), para radiação de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ , e de 9,220 a 9,687 (0,02%) para os detectores de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon} + 10\% \text{C}$ , para radiação de  $^{60}\text{Co}$ .

#### 4.2.5 Limites mínimos detectáveis

O limite mínimo detectável foi determinado para cada tipo de dosímetro testado, estudando-se a variação do sinal obtido pela resposta TL dos detectores não irradiados. Para a determinação da "dose zero" dos diferentes tipos de amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$ , foram realizadas seis séries de medidas para cada uma das 20 amostras de cada tipo, sob as mesmas condições experimentais.

Os limites mínimos detectáveis ( $D_{min}$ ) foram determinados neste trabalho, utilizando-se a expressão definida por Oberhofer [1981]:

$$D_{min} = [\overline{TL}(OR) + 3\sigma] \times F_c$$

onde:  $\overline{TL}(OR)$  é o valor médio das leituras das amostras não irradiadas,  $\sigma$  é o desvio padrão da média e  $F_c$  é o fator de calibração de cada detector para radiação beta.

Os valores dos limites mínimos detectáveis obtidos para as amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$  são apresentados na TAB. 4.46.

Tabela 4.46 Limites mínimos detectáveis para as amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$ , para radiação beta.

Material	Limite mínimo detectável ( $\mu\text{Gy}$ )	
	Valor obtido	Valor da literatura
$\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$ (50 mg)	$14,0 \pm 1,4$	10*
$\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$ (20 mg)	$24,0 \pm 2,6$	30**
$\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon} + 10\% \text{ C}$	$58,0 \pm 7,0$	23***

Fonte: \* [CAMPOS e LIMA, 1986]; \*\* [CAMPOS e LIMA, 1987]; \*\*\* [CAMPOS, 1993].

Os valores obtidos para os limites mínimos detectáveis são comparáveis aos obtidos por Campos e Lima [1986; 1987] e Campos [1993] para os mesmos tipos de amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$ .

#### 4.2.6 Dependência energética

O estudo da resposta TL em função da energia da radiação incidente é fundamental para a escolha do dosímetro adequado para monitoração de trabalhadores ocupacionalmente expostos à radiação beta. A dependência energética de todos os detectores de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$  foi verificada utilizando-se as fontes padrão de radiação beta de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  (3,5 mGy),  $^{204}\text{Tl}$  (1,8 mGy) e  $^{147}\text{Pm}$  (8,5 mGy). As respostas TL foram normalizadas para a resposta da radiação de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ . As medições foram ainda normalizadas para uma mesma

dose absorvida (3,5 mGy). A FIG. 4.45 apresenta a dependência energética dos três detectores de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon estudados.

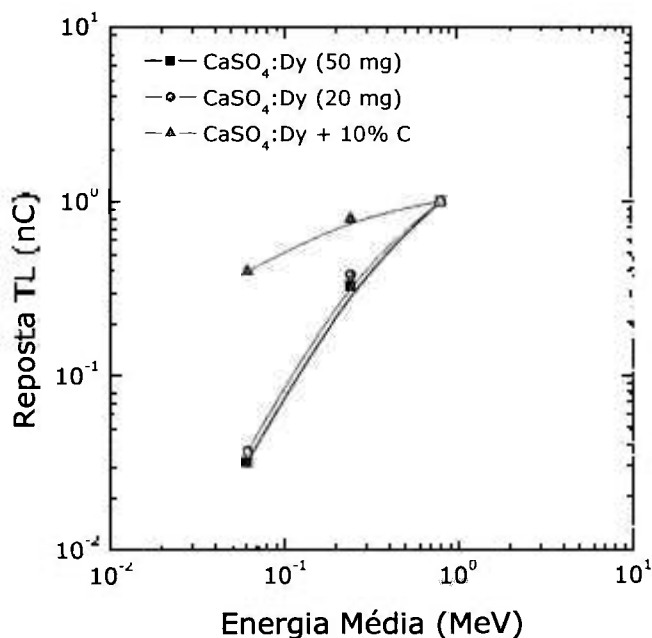


FIGURA 4.45 Dependência energética da resposta TL das amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon para radiação beta.

As amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon (50 mg) e de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon (20 mg) apresentaram praticamente a mesma dependência energética alta, enquanto as amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon + 10% C apresentaram uma dependência com a energia de 60% no intervalo estudado. Os resultados são comparáveis aos obtidos para  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$  (60 $\mu\text{m}$ ) e  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$  (70 $\mu\text{m}$ ) por Caldas [1980], e para LiF (0,9 mm) e LiF (0,4 mm) por Christensen [1986]. Os detectores de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon + 10% C apresentaram dependência energética similar ao  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$  (60 $\mu\text{m}$ ) e  $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$  (70 $\mu\text{m}$ ) [CALDAS, 1980], enquanto que os detectores de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon (50 mg) e de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon (20 mg) apresentaram dependência energética similar ao LiF (0,9 mm) e LiF (0,4 mm) [CHRISTENSEN, 1986].

Entretanto, a dependência energética não é tão importante quando se conhece as características da fonte com que se trabalha.

#### 4.2.7 Dependência angular

A dependência angular de um detector TL é importante para a escolha adequada do material para a monitoração individual. A resposta TL para todos os detectores foi investigada variando-se o ângulo de incidência entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$  em campos de radiação beta de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  (3,5 mGy).

Para as irradiações, as amostras foram posicionadas no objeto simulador descrito no item 3.2.5 e as medidas foram realizadas para os ângulos de  $0^\circ$ ,  $2^\circ$ ,  $4^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$ , mantendo-se a distância entre a fonte e o centro do objeto simulador constante e igual a 30 cm. Para a determinação do ângulo de irradiação, o objeto simulador foi posicionado sobre um transferidor e rotacionado em torno do seu eixo central.

A Figura 4.46 apresenta a resposta TL dos três tipos de detectores estudados em função do ângulo de incidência da radiação.

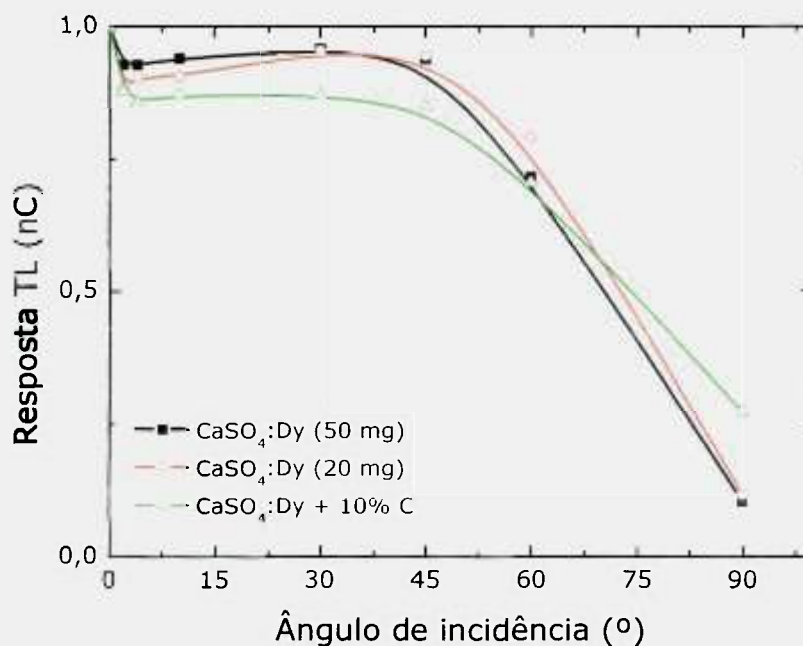


FIGURA 4.46 Dependência angular da resposta TL das amostras de CaSO<sub>4</sub>:Dy+Teflon para  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  (3,5 mGy).

As pastilhas de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon + 10% C mostraram-se menos sensíveis que os outros dois materiais no estudo na dependência angular. A resposta TL não apresentou praticamente dependência angular entre  $0^\circ$  e  $45^\circ$ , mas uma dependência angular acentuada a partir de  $45^\circ$  para todos os materiais estudados. Este é o comportamento esperado para a maioria dos dosímetros TL.

### **4.3 Monitoração Beta**

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos no estabelecimento de uma metodologia dosimétrica para monitoração beta. Foi projetado e construído um arranjo experimental para a irradiação de amostras TL com fontes beta, sendo determinadas as curvas de calibração e as doses absorvidas. Foi ainda proposto um dosímetro específico para monitoração beta. Foram realizadas aplicações, em laboratório e em campo, do uso desse protótipo para monitoração beta.

#### **4.3.1 Desenvolvimento de um arranjo experimental**

Nesta seção é descrito o arranjo experimental especialmente projetado e construído para irradiação de amostras TL com fontes de radiação beta. Serão apresentados o projeto e a caracterização desse arranjo experimental.

Foi projetado um arranjo experimental para o estabelecimento de uma metodologia dosimétrica para monitoração beta, de modo que se pudesse variar a distância fonte-superfície da amostra, quando se utilizava o objeto simulador (Item 3.2.5), e manter o centro da fonte de radiação alinhado com o centro do objeto simulador (FIG. 3.16 e 3.17).

O arranjo foi construído em Lucite e consiste basicamente de um trilho e uma base para o encaixe da fonte de radiação, que pode deslizar suavemente sobre esse trilho, permitindo a variação da distância da fonte ao detector (FIG. 4.47 e 4.48). As dimensões do trilho são 520 mm de comprimento, 50 mm de largura e 15 mm de altura. Em uma das extremidades desse trilho existe um encaixe para o objeto simulador descrito na secção 3.2.5 e na outra extremidade foram colocados dois níveis perpendiculares, para assegurar o alinhamento no posicionamento do sistema durante as irradiações. No centro do trilho foi acondicionada uma régua (Lucite), de modo que o “zero” da régua coincida com o ponto da superfície do objeto simulador onde são posicionadas as amostras a serem irradiadas. Durante as irradiações, as amostras foram sempre posicionadas sobre o objeto simulador e cobertas com um filme plástico com  $1,2 \text{ mg.cm}^{-2}$  de densidade superficial. Os detalhes do projeto da base móvel podem ser visualizados na FIG. 4.47b, c e d.

A caracterização desse arranjo experimental foi realizada utilizando-se uma fonte depositada de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ , preparada pelo LMN/IPEN (FIG. 4.47a). Nesse tipo de fonte, o radionuclídeo é depositado sobre um suporte de polietileno e coberto com uma folha de policarbonato (Makrofol) de  $2 \mu\text{m}$ . Na FIG. 4.47c é mostrada a fonte encaixada na base que desliza sobre o trilho. A atividade da fonte foi de 14,05 kBq, com uma incerteza total de  $\pm 5\%$  (01/02/2004).

A fim de se adquirir confiabilidade na utilização do arranjo experimental foram realizados alguns testes, descritos a seguir, utilizando-se a fonte depositada de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  (LMN/IPEN).

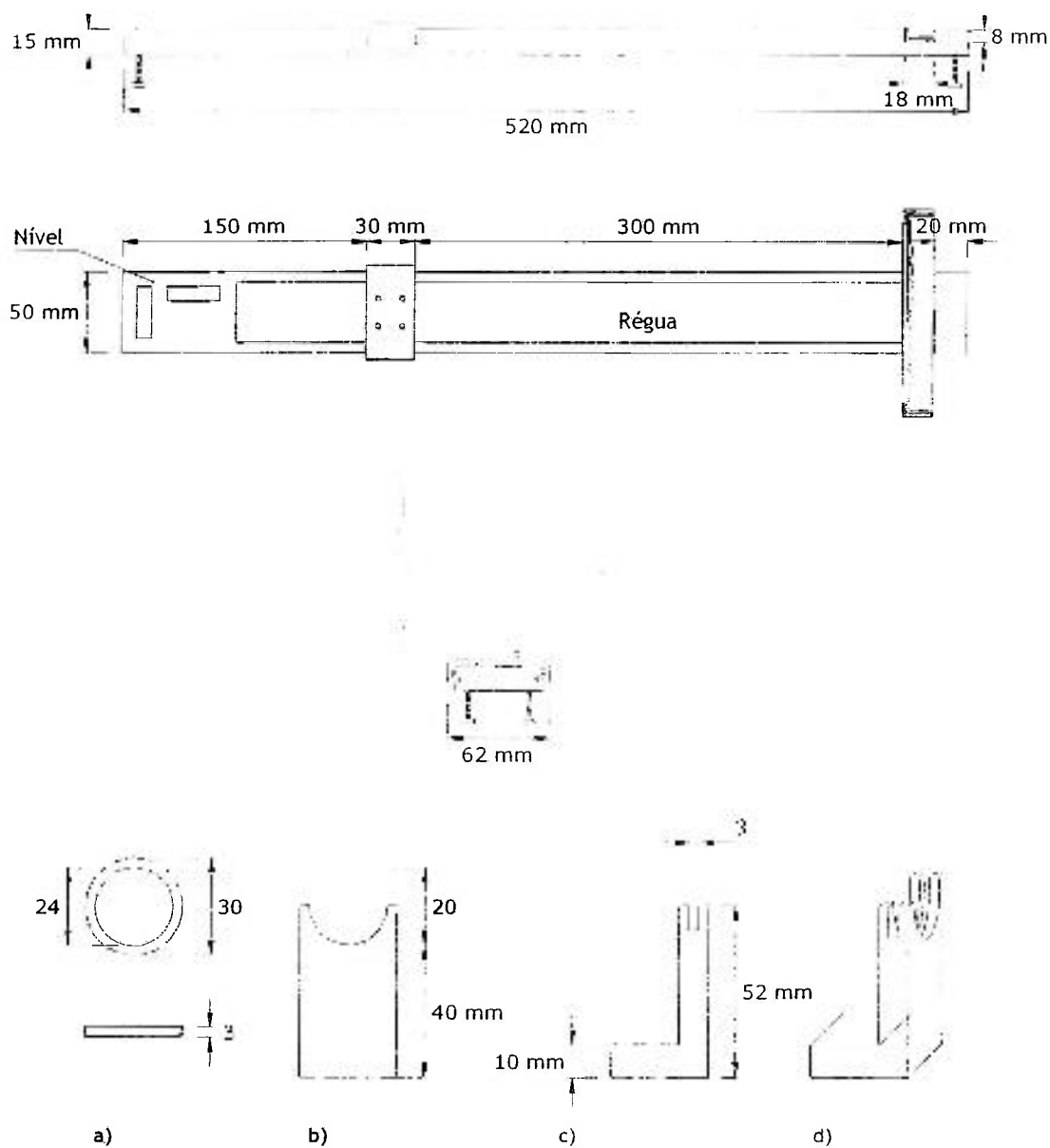


FIGURA 4.47 Esquema do arranjo experimental para irradiação com fontes beta. a) dimensões da fonte depositada preparada pelo LMN/IPEN; b) detalhe frontal do suporte com a fonte depositada encaixada; c) detalhe lateral do suporte; d) vista em perspectiva do suporte.

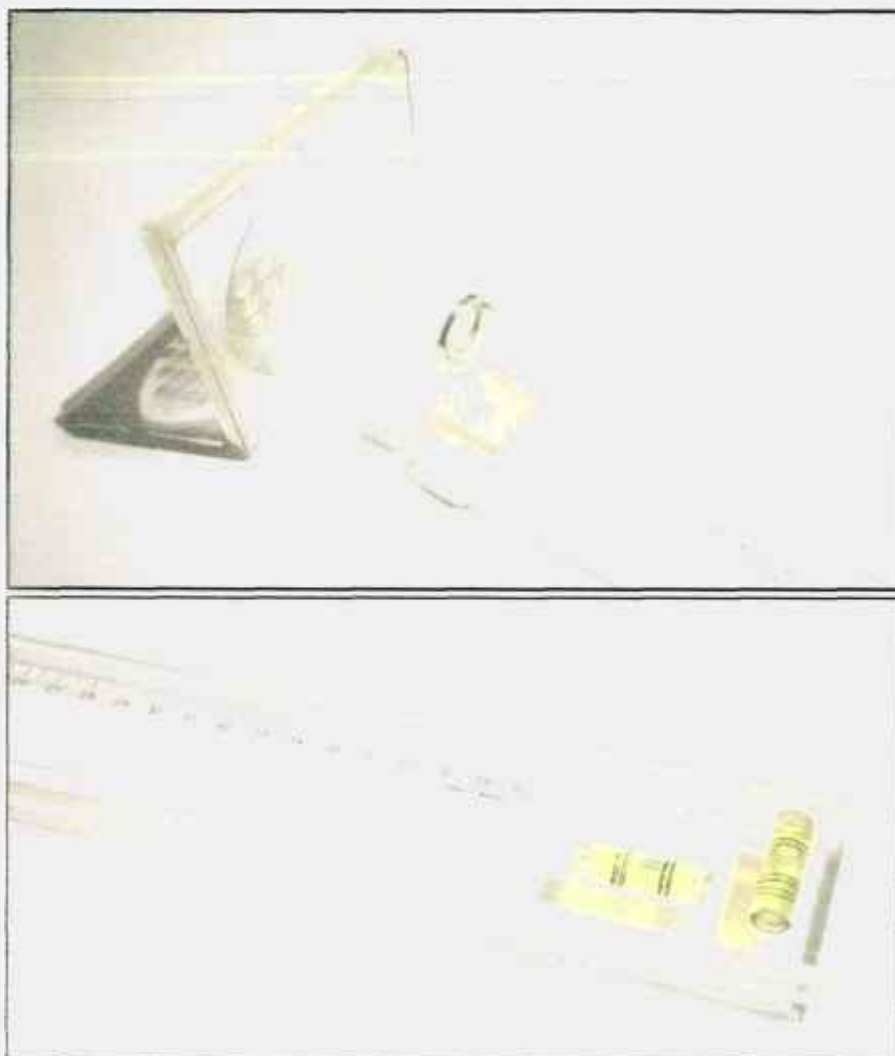


FIGURA 4.48 Arranjo experimental para irradiação com fontes beta.

#### 4.3.1.1 Determinação da atividade e da taxa de dose absorvida da fonte de $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ (LMN/IPEN).

A taxa de dose absorvida da fonte depositada de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  (14,05 kBq) foi determinada a partir dos dados obtidos com a fonte de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  (1850 MBq), do conjunto padrão secundário do LCI/IPEN.

Um conjunto de detectores de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$  (50mg), devidamente identificados, foi irradiado inicialmente com a fonte de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  do LCI/IPEN, com taxa de dose absorvida no ar de  $518,4 \mu\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$ , à distância fonte-detector de 11 cm (TAB. 3.4 e 3.5), com 3,5 mGy (na faixa linear da curva de calibração

obtida no Item 4.2.4.2, FIG. 4.44). A partir das leituras TL médias obtidas para esses detectores, com as duas fontes de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ , determinou-se a dose absorvida e a taxa de dose absorvida no ar, relativos à fonte de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  do LMN, denominada a partir daqui como fonte de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  (LMN/IPEN), de  $0,32 \text{ mGy}$  e  $4,40 \mu\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$ , respectivamente.

Uma outra verificação realizada para assegurar a confiabilidade do arranjo experimental foi a determinação da atividade da fonte de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  (LMN/IPEN), também a partir dos dados obtidos com a fonte de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  (LCI/IPEN).

Pelos resultados obtidos para a taxa de dose absorvida no ar, e corrigindo-se a atividade da fonte de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  (LCI/IPEN) para o decaimento radioativo (04/03/2004), foi determinada a atividade da fonte de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  (LMN/IPEN). O valor médio obtido para a atividade da fonte depositada foi de  $(14,23\pm 0,51) \text{ kBq}$ , que corresponde a um desvio padrão percentual de apenas 3,5%. Ao se comparar o valor da atividade obtido com o fornecido pelo LMN/IPEN, tem-se uma diferença de apenas 1,3%.

A determinação da atividade da fonte depositada de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  (LMN/IPEN) foi mais um teste realizado, que permitiu confirmar a reprodutibilidade do posicionamento dos detectores e das fontes no arranjo experimental.

#### **4.3.1.2 Reprodutibilidade**

A determinação da reprodutibilidade da resposta TL dos três tipos de detectores de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$  foi um dos testes realizados para a caracterização do arranjo experimental desenvolvido neste projeto para a dosimetria com fontes de radiação beta. As amostras foram posicionadas no objeto simulador que foi encaixado no arranjo experimental. Foram irradiadas cinco amostras de cada material estudado utilizando-se a fonte de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  (LMN/IPEN) à distância fonte-superfície de 11 cm. Esse procedimento foi repetido dez vezes consecutivas para cada tipo de detector, reproduzindo-se a posição de

cada amostra no objeto simulador. A reprodutibilidade individual da resposta TL, para cada tipo de amostra, obtida determinando-se o desvio padrão de medidas sucessivas, é apresentada na TAB. 4.47.

TABELA 4.47 Variações percentuais máximas (s) obtidas no teste de reprodutibilidade da resposta TL das amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon em feixe de radiação beta de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  (LMN/IPEN) no arranjo experimental.

Material	s (%)
$\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ (50 mg)	3,0
$\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ (20 mg)	2,9
$\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ + 10% C	3,9

Os valores obtidos para a reprodutibilidade da resposta de todos os detectores demonstram uma confiabilidade excelente no arranjo experimental.

#### 4.3.1.3 Curvas de calibração

As curvas de calibração foram determinadas para os três tipos de dosímetros de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon, numa faixa de dose absorvida entre 5,4  $\mu\text{Gy}$  e 2,6 mGy, inferior ao intervalo de dose absorvida verificado no item 4.2.4, permitindo uma complementação das curvas de calibração obtidas anteriormente, para cada tipo de dosímetro, utilizando-se a fonte de referência  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  do LCI/IPEN (FIG. 4.44). Para a obtenção das curvas de calibração foram irradiadas cinco amostras de cada material com a fonte de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  (LMN/IPEN). Nas FIG. 4.49 a 4.51 são mostradas as curvas de calibração no intervalo total estudado, 10  $\mu\text{Gy}$  a 200 mGy, no caso de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon (50 mg), 5,4  $\mu\text{Gy}$  a 200 mGy, no caso de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon (20 mg) e 0,13 mGy a 200 mGy, no caso de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon + 10% C.

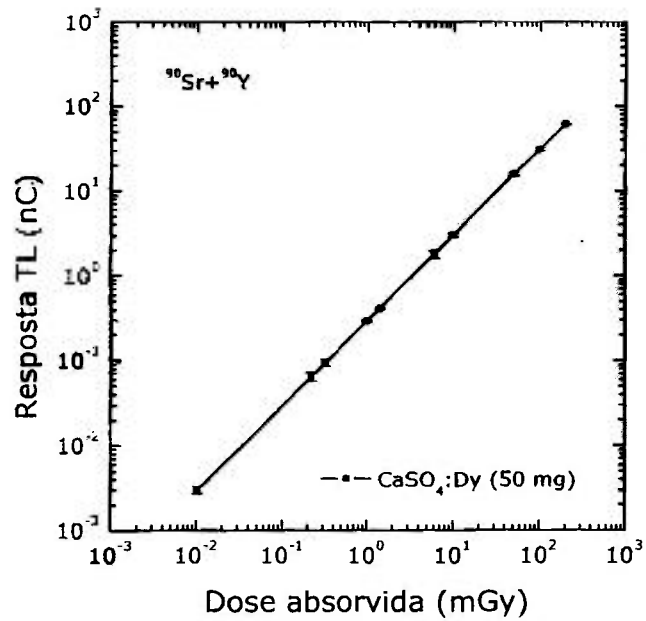


FIGURA 4.49 Curva de calibração das amostras de CaSO<sub>4</sub>:Dy + Teflon (50mg), obtida com as fontes de <sup>90</sup>Sr+<sup>90</sup>Y (LCI/IPEN) e <sup>90</sup>Sr+<sup>90</sup>Y (LMN/IPEN).

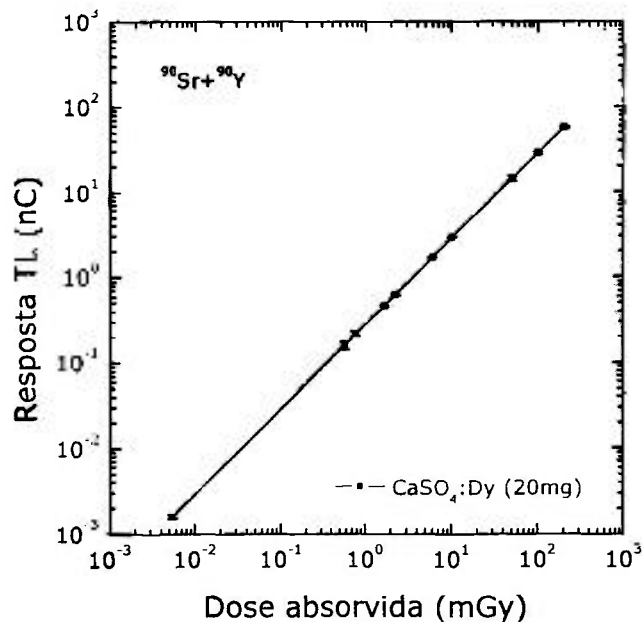


FIGURA 4.50 Curva de calibração das amostras de CaSO<sub>4</sub>:Dy + Teflon (20mg), obtida com as fontes de <sup>90</sup>Sr+<sup>90</sup>Y (LCI/IPEN) e <sup>90</sup>Sr+<sup>90</sup>Y (LMN/IPEN).

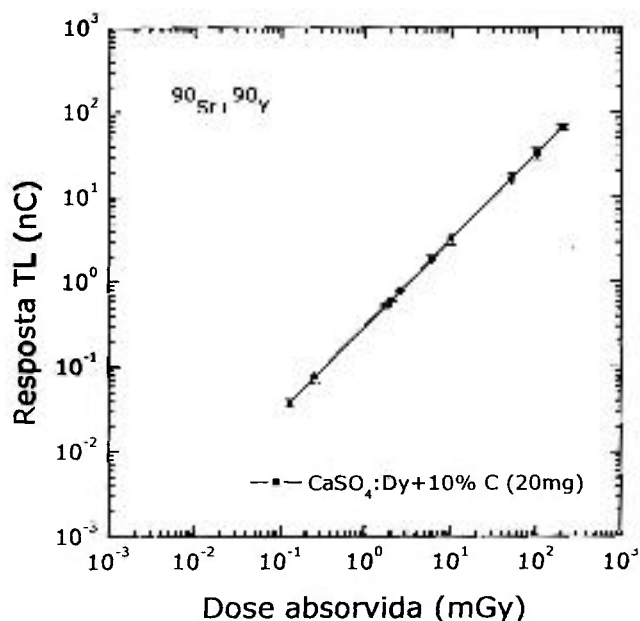


FIGURA 4.51 Curva de calibração das amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon} + 10\% \text{ C}$ , obtida com as fontes de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  (LCI/IPEN) e  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  (LMN/IPEN).

As curvas de calibração apresentaram comportamentos lineares para a resposta TL, para os três tipos de detectores estudados, em função da dose absorvida, nos respectivos intervalos estudados.

#### 4.3.2 Aplicação da dosimetria TL em monitoração beta

Para a caracterização do sistema dosimétrico para monitoração beta foram utilizadas fontes de radiação beta de  $^{153}\text{Sm}$  e  $^{32}\text{P}$  (TAB. 3.2 e 3.3). Estes dois radionuclídeos já foram utilizados na caracterização do sistema tandem.

O  $^{153}\text{Sm}$  emite radiação beta de 800 keV (72%) e uma energia média de 290 keV, que permite um alcance médio de 3,2 mm no osso. É utilizado no tratamento de metástases ósseas.

O  $^{32}\text{P}$  é um emissor de radiação beta com energia de 1710 keV (100%) e energia média de 695,5 keV, o que possibilita um alcance máximo de 8 mm no tecido. É empregado no tratamento da policitemia Vera e na área de agronomia (fertilizantes; estudo de solos).

A seguir será descrito o procedimento utilizado para a determinação das doses absorvidas dos detectores TL irradiados com as fontes de  $^{153}\text{Sm}$  e  $^{32}\text{P}$  para a obtenção de suas curvas de calibração.

#### **4.3.2.1 Determinação das doses absorvidas ( $^{153}\text{Sm}$ , $^{32}\text{P}$ )**

As soluções de  $^{153}\text{Sm}$  e de  $^{32}\text{P}$  foram produzidas pelo CR/IPEN e em seguida foram preparadas pelo LMN/IPEN como fontes depositadas. As características e dimensões de uma fonte depositada estão descritas no item 4.3.1 e na FIG. 4.47, respectivamente.

As atividades das fontes de  $^{153}\text{Sm}$  e de  $^{32}\text{P}$  foram de 517,2 kBq (04/05/2004) e de 1,08 MBq (19/04/2004), com incertezas totais de  $\pm 5\%$ , determinadas pelo LMN/IPEN.

Para a determinação das taxas de dose absorvida e das curvas de calibração das duas fontes de radiação, os detectores foram posicionados no objeto simulador, devidamente encaixado no arranjo experimental. As irradiações foram realizadas à distância fonte-superfície de 1 cm. Foram utilizadas cinco amostras de cada material, de modo que cada ponto de medida (dose absorvida) correspondesse à leitura média dos detectores.

Como as fontes de  $^{153}\text{Sm}$  e de  $^{32}\text{P}$  não foram calibradas no LMN/IPEN em termos da taxa de dose absorvida, as curvas de calibração da resposta TL das amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$  em função da dose absorvida foram obtidas

utilizando-se as curvas de calibração para  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  (FIG. 4.49 a 4.51) e as curvas de dependência energética deste material (FIG. 4.45).

Inicialmente, a partir das medidas TL obtidas com os diferentes tipos de detectores, corrigidas para o fator de calibração ( $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ ), foram determinadas as doses absorvidas ( $D_i$ ) pelas curvas de calibração obtidas com a fonte de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  (FIG. 4.49 a 4.51). A partir das doses  $D_i$  ( $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ ) foram determinados os valores de TL para o  $^{153}\text{Sm}$  e para o  $^{32}\text{P}$ , corrigindo-os pelo fator de calibração do  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ .

A seguir foram determinados, utilizando-se as curvas de dependência energética (FIG. 4.45), os fatores de correção para as fontes de  $^{153}\text{Sm}$  e  $^{32}\text{P}$ . Os fatores de correção determinados, para a fonte de  $^{153}\text{Sm}$ , para cada tipo de amostra, foram de 1,30; 1,72 e 1,75, para os detectores TL de  $\text{CaSO}_4: \text{Dy} + \text{Teflon}$  (50mg),  $\text{CaSO}_4: \text{Dy} + \text{Teflon}$  (20mg) e  $\text{CaSO}_4: \text{Dy} + \text{Teflon} + 10\% \text{ C}$ , respectivamente. Para a fonte de  $^{32}\text{P}$ , os fatores de correção foram de 1,07; 1,21 e 1,26 para os detectores TL de  $\text{CaSO}_4: \text{Dy} + \text{Teflon}$  (50mg),  $\text{CaSO}_4: \text{Dy} + \text{Teflon}$  (20mg) e  $\text{CaSO}_4: \text{Dy} + \text{Teflon} + 10\% \text{ C}$ , respectivamente. Estes fatores foram determinados utilizando-se a FIG. 4.45; a partir das energias do  $^{153}\text{Sm}$  e do  $^{32}\text{P}$ , no eixo das abscissas, foi determinado no eixo das ordenadas o fator de correção para cada material utilizado. Aplicando-se os fatores de correção para cada energia e para cada tipo de detector, foram determinadas as doses absorvidas no caso das fontes de  $^{153}\text{Sm}$  e  $^{32}\text{P}$ .

#### 4.3.2.2 Curvas de calibração

Nas FIG. 4.52 a 4.54 são mostradas as curvas de calibração para a fonte de  $^{153}\text{Sm}$ , e nas FIG. 4.55 a 4.57 as curvas de calibração para a fonte de  $^{32}\text{P}$ , descritas no item 4.3.2.1, para os diferentes tipos de pastilhas TL de  $\text{CaSO}_4: \text{Dy} + \text{Teflon}$ .

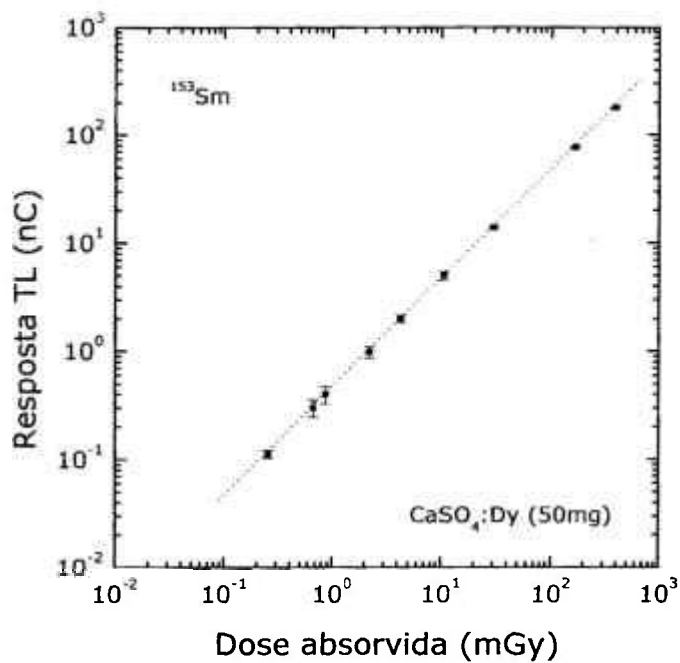


FIGURA 4.52 Curva de calibração das amostras de CaSO<sub>4</sub>:Dy + Teflon (50mg) para a radiação beta do <sup>153</sup>Sm.

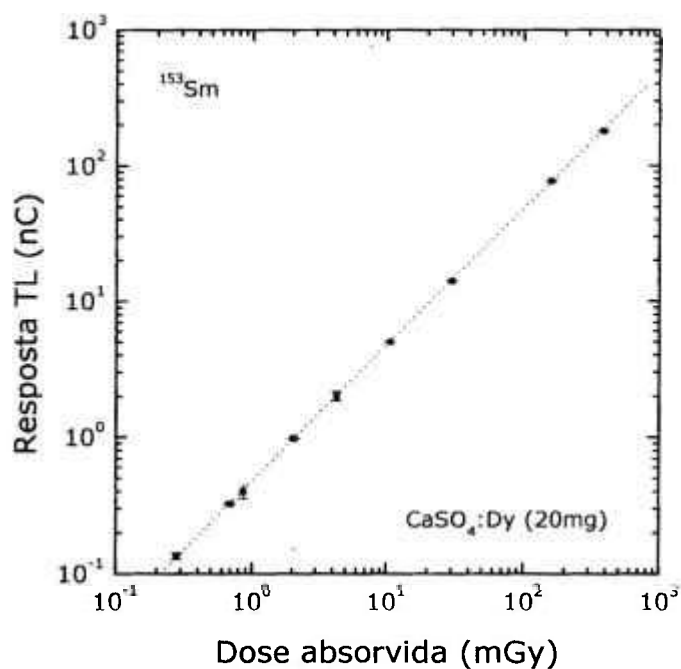


FIGURA 4.53 Curva de calibração das amostras de CaSO<sub>4</sub>:Dy + Teflon (20mg) para a radiação beta do <sup>153</sup>Sm.

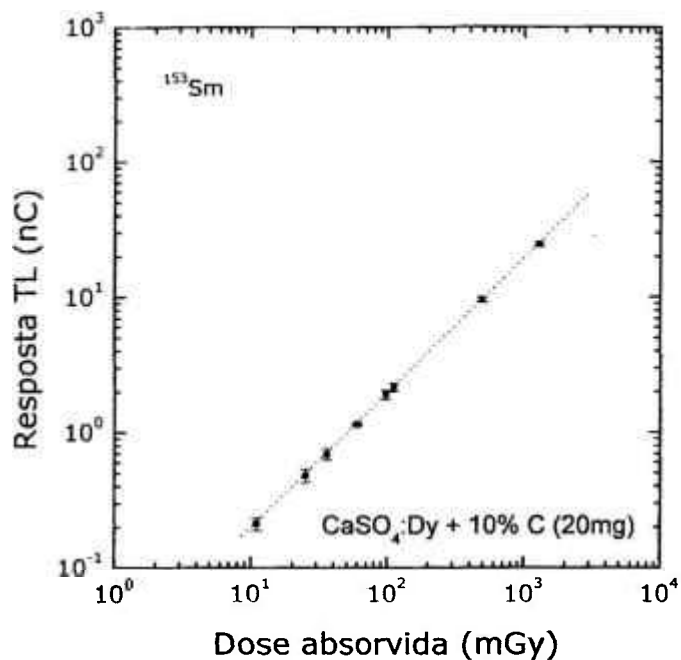


FIGURA 4.54 Curva de calibração das amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon} + 10\% \text{C}$  para a radiação beta do  $^{153}\text{Sm}$ .

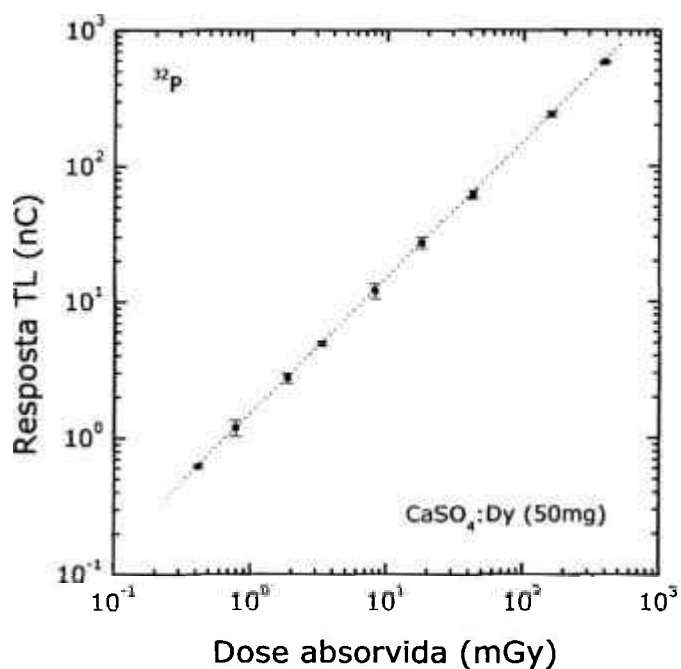


FIGURA 4.55 Curva de calibração das amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon} (50\text{mg})$  para a radiação beta do  $^{32}\text{P}$ .

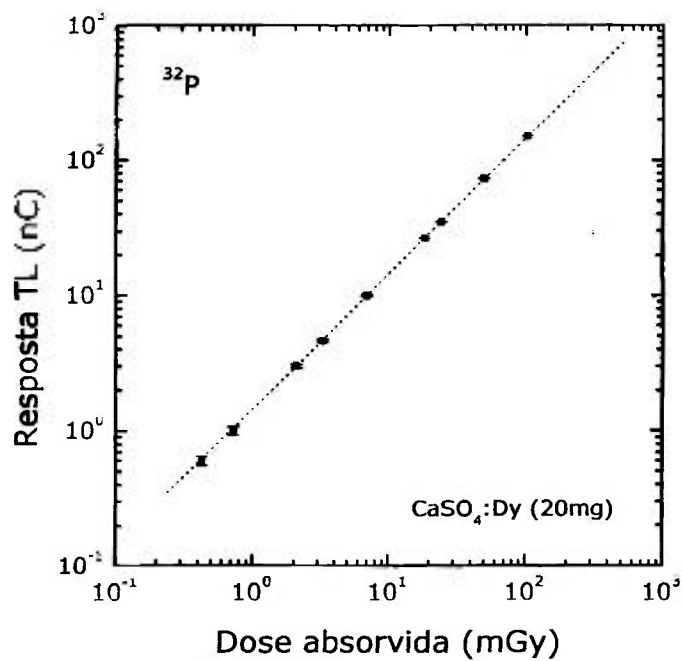


FIGURA 4.56 Curva de calibração das amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon (20mg) para a radiação beta do  $^{32}\text{P}$ .

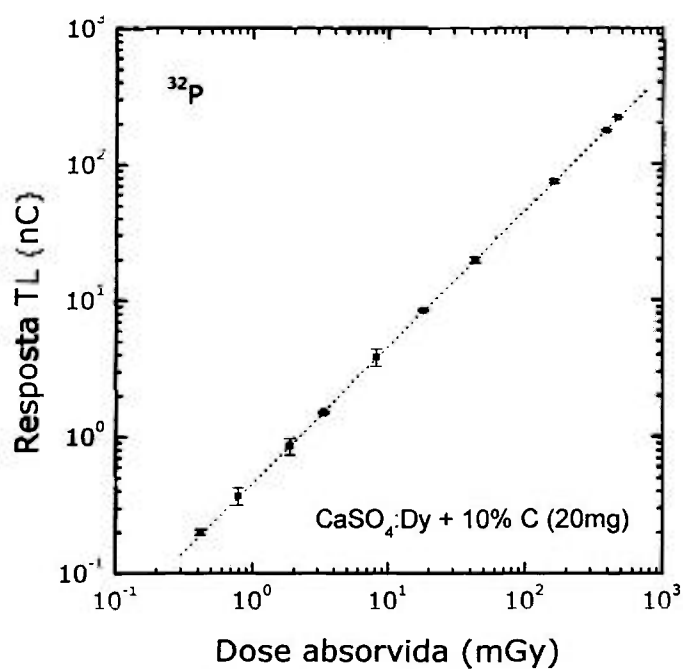


FIGURA 4.57 Curva de calibração das amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon + 10% C para a radiação beta do  $^{32}\text{P}$ .

As curvas de calibração obtidas para a radiação beta do  $^{153}\text{Sm}$  e do  $^{32}\text{P}$ , semelhante às obtidas para o  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ , apresentaram comportamentos lineares da resposta TL para os três tipos de dosímetros de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon estudados, em função da dose absorvida, no intervalo entre aproximadamente  $10\ \mu\text{Gy}$  e  $1\ \text{Gy}$ .

### 4.3.3 Dosímetro de pulso

Neste item será apresentado o protótipo do dosímetro de pulso proposto para monitoração beta específica. São apresentadas aplicações do dosímetro em laboratório e testes realizados com trabalhadores ocupacionalmente expostos à radiação beta.

#### 4.3.3.1 Protótipo do porta-dosímetro

Para a montagem do dosímetro de pulso foi utilizado inicialmente um relógio, tipo Minolta, sendo retirado todo o conteúdo da máquina, deixando-se apenas a pulseira com a estrutura circular que serve de base para o funcionamento do relógio. A máquina do relógio foi substituída por uma placa de PVC expandido, com 32 mm de diâmetro e 3 mm de espessura (FIG. 4.58). Os detectores foram posicionados facilmente sobre a placa, que era encaixada e removida facilmente da estrutura do relógio (FIG. 4.59). A estrutura circular do relógio permite um encaixe sob leve pressão da placa de PVC expandido.

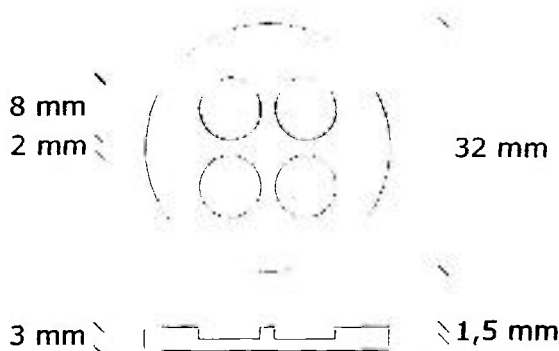


FIGURA 4.58 Suporte de PVC expandido para irradiação das amostras no porta-dosímetro com radiação beta.

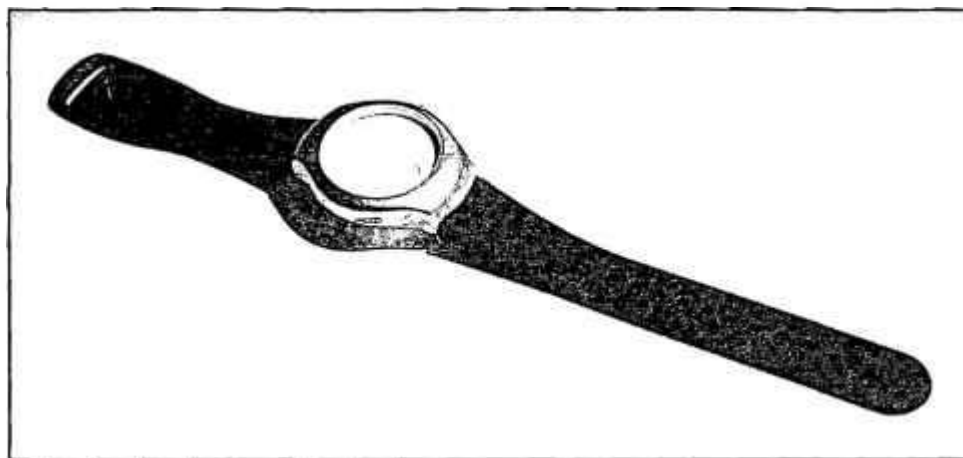


FIGURA 4.59 Protótipo do dosímetro de pulso com aro metálico.

Para a caracterização do material da estrutura circular metálica do relógio foi realizada a análise por energia dispersiva de raios X, no EDAX acoplado a um microscópio eletrônico de varredura, Ametek, pelo Centro de Ciência e Tecnologia de Materiais do IPEN. O material dessa estrutura é uma liga metálica constituída por 82,62% de níquel, 10,55% de cobre e 6,83% de estanho.

Para a irradiação dos detectores TL no protótipo, as amostras foram sempre cobertas pelo filme plástico descrito no item 3.2.5. Para garantir uma maior segurança e a fim de manter os detectores fixos no protótipo e também protegidos de agentes externos, foi utilizada ainda uma folha de poliestireno preto, com  $64,0 \text{ mg.cm}^{-2}$  de densidade superficial. Essa folha de poliestireno preto é a mesma utilizada pelo LMD/IPEN na monitoração da radiação X e gama.

Uma vantagem do dosímetro de pulso proposto é que seu material e formato o tornam confortável e de fácil utilização para quaisquer usuários.

#### 4.3.3.2 Curvas de calibração

Foram obtidas as curvas de calibração utilizando-se, além do filme plástico (FIG. 4.52 a 4.57), como cobertura dos detectores TL, a folha de poliestireno preto, com  $64,0 \text{ mg.cm}^{-2}$  de densidade superficial. As amostras foram irradiadas utilizando-se a folha de poliestireno preto com o objetivo de se avaliar a possibilidade de sua utilização no protótipo de porta-dosímetro. As curvas de calibração obtidas são mostradas, com e sem a folha extra de poliestireno, nas FIG. 4.60 a 4.62 para o  $^{153}\text{Sm}$ , e nas FIG. 4.63 a 4.65 para o  $^{32}\text{P}$ .

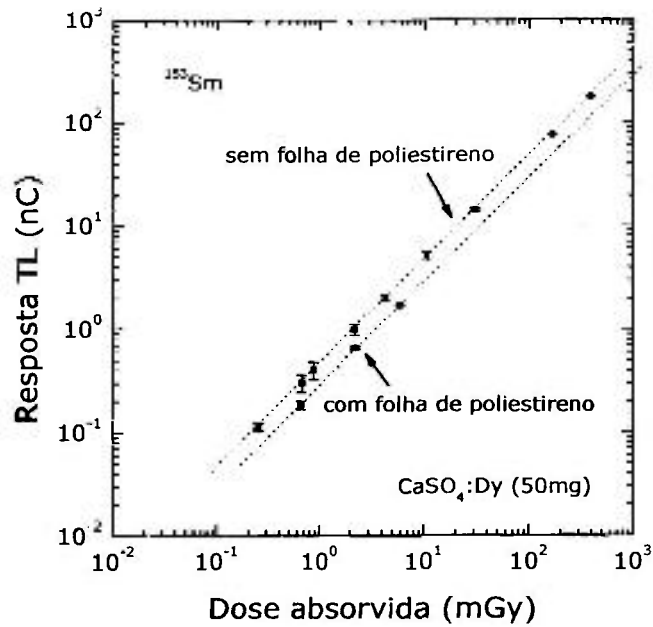


FIGURA 4.60 Curvas de calibração das amostras de CaSO<sub>4</sub>:Dy + Teflon (50mg), com e sem a folha de poliestireno preto, para a radiação beta do <sup>153</sup>Sm.

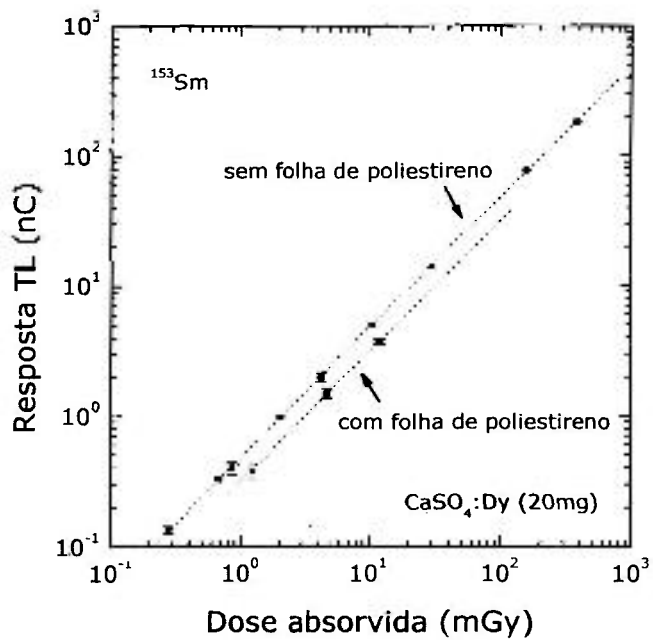


FIGURA 4.61 Curvas de calibração das amostras de CaSO<sub>4</sub>:Dy + Teflon (20mg), com e sem a folha de poliestireno preto, para a radiação beta do <sup>153</sup>Sm.

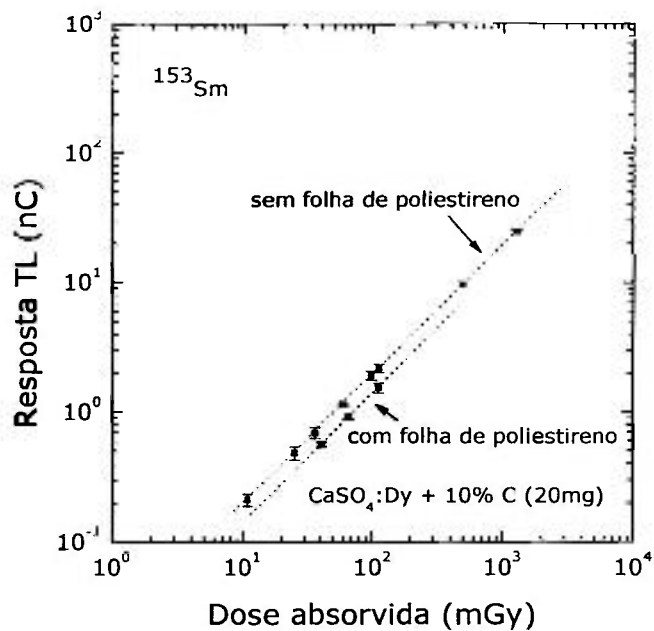


FIGURA 4.62 Curvas de calibração das amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon} + 10\% \text{ C}$ , com e sem a folha de poliestireno preto, para a radiação beta do  $^{153}\text{Sm}$ .

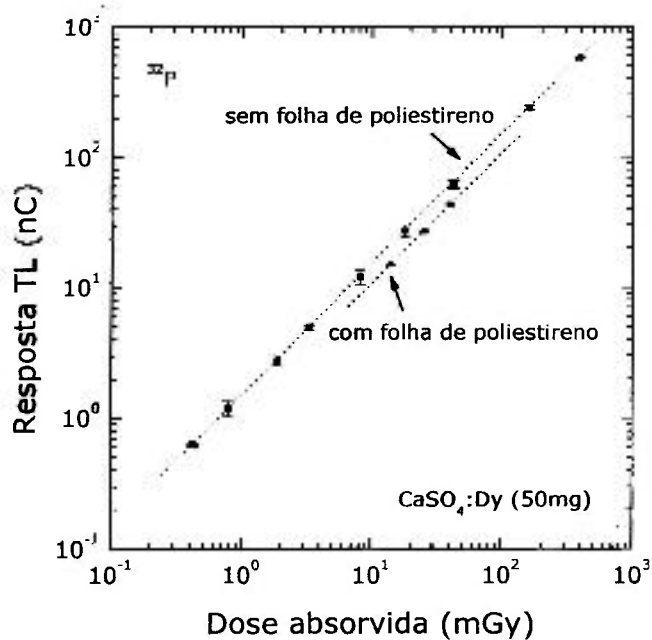


FIGURA 4.63 Curvas de calibração das amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon (50mg)}$ , com e sem a folha de poliestireno preto, para a radiação beta do  $^{32}\text{P}$ .

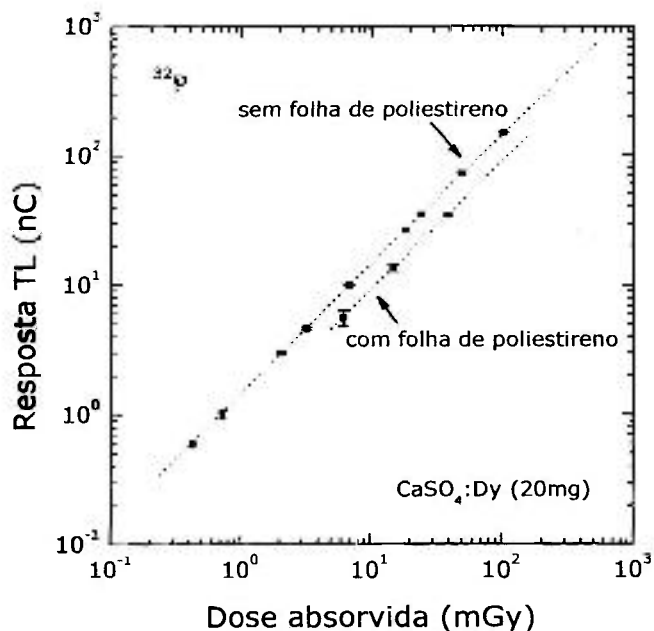


FIGURA 4.64 Curvas de calibração das amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon (20mg), com e sem a folha de poliestireno preto, para a radiação beta do  $^{32}\text{P}$ .

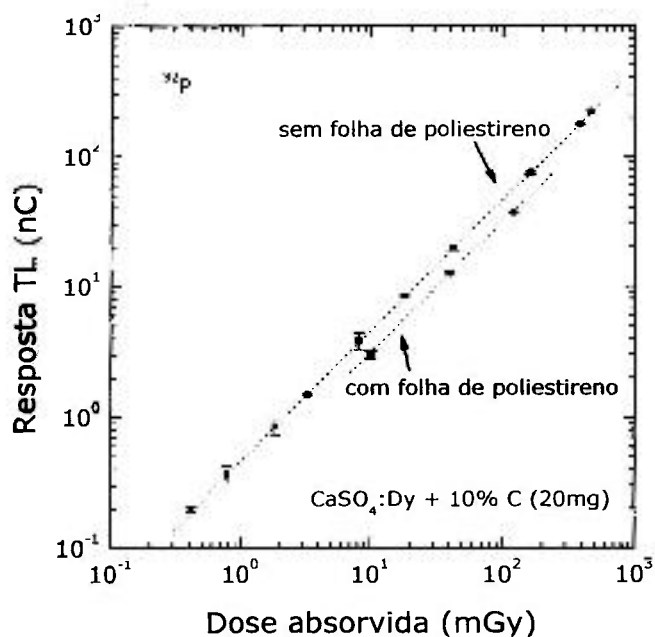


FIGURA 4.65 Curvas de calibração das amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon + 10% C, com e sem a folha de poliestireno preto, para a radiação beta do  $^{32}\text{P}$ .

As curvas de calibração obtidas para a radiação beta do  $^{153}\text{Sm}$  e do  $^{32}\text{P}$  utilizando-se a folha de poliestireno preta também apresentaram comportamentos lineares da resposta TL em função da dose absorvida, no intervalo entre 0,1 mGy a 1 Gy, para os três tipos de dosímetros avaliados.

#### 4.3.3.3 Aplicações do dosímetro de pulso

A fim de simular as condições de uso do dosímetro proposto foram realizadas aplicações do seu uso em laboratório. As irradiações foram realizadas fixando-se o porta-dosímetro sobre o objeto simulador de modo que o centro do dosímetro coincidissem com o centro da fonte de radiação utilizada (FIG. 4.66). Foram realizadas irradiações sempre utilizando-se quatro detectores TL, de cada material avaliado, à distância fonte-superfície do porta-dosímetro de 10 mm, de modo que cada ponto de medida TL correspondesse à leitura média dos detectores. As curvas de calibração obtidas nessas condições, com e sem a folha de poliestireno são mostradas nas FIG. 4.67 a 4.69 para a fonte de  $^{153}\text{Sm}$  e nas FIG. 4.70 a 4.72 para a fonte de  $^{32}\text{P}$ .

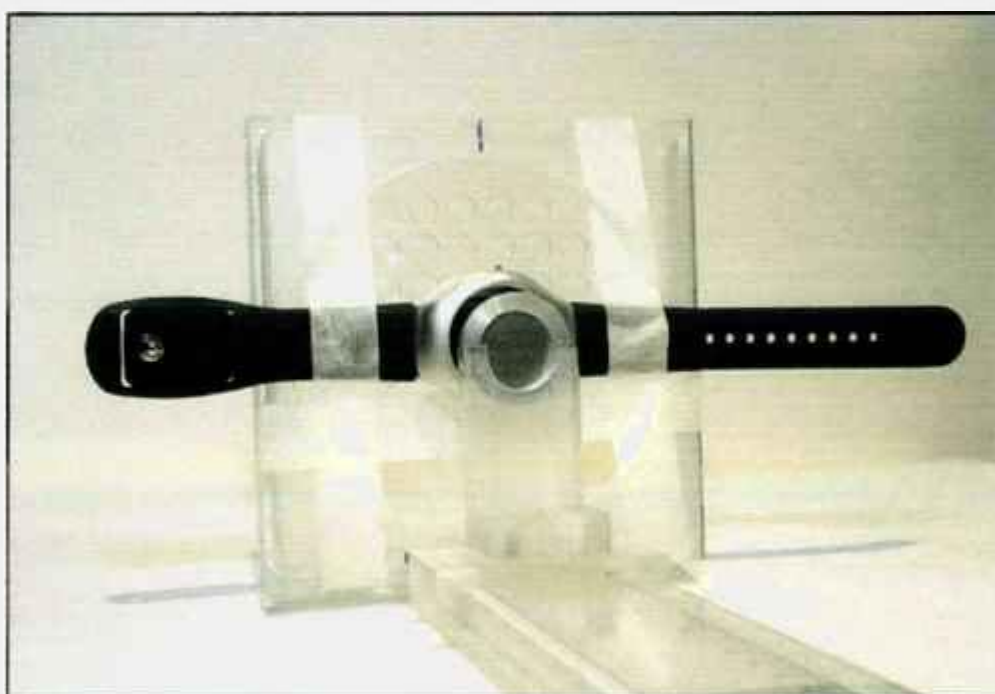


FIGURA 4.66 Porta-dosímetro de pulso no arranjo experimental durante simulações da monitoração beta específica em laboratório.

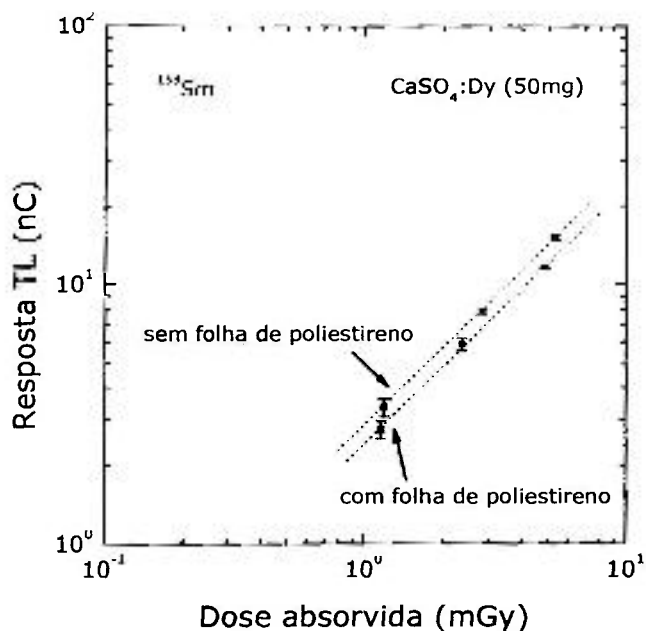


FIGURA 4.67 Curvas de calibração das amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon (50mg), no porta-dosímetro (aro metálico) de pulso, com e sem a folha de poliestireno preto, para a radiação beta de  $^{153}\text{Sm}$ .

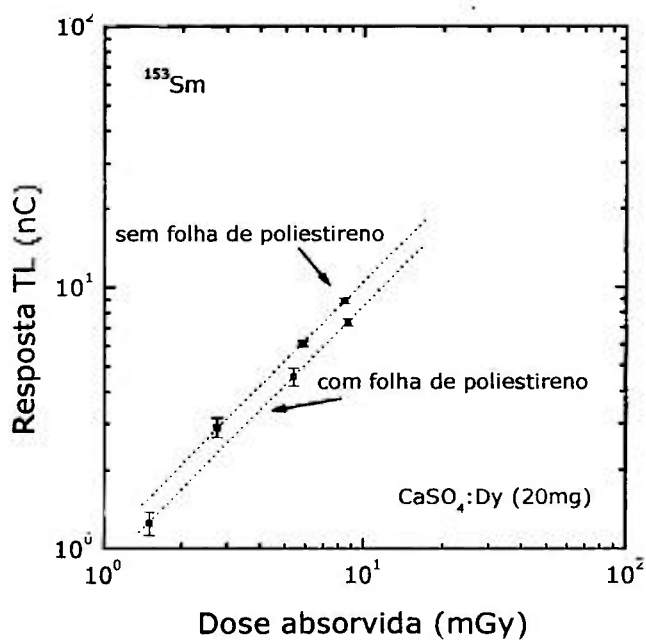


FIGURA 4.68 Curvas de calibração das amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon (20mg), no porta-dosímetro (aro metálico) de pulso, com e sem a folha de poliestireno preto, para a radiação beta de  $^{153}\text{Sm}$ .

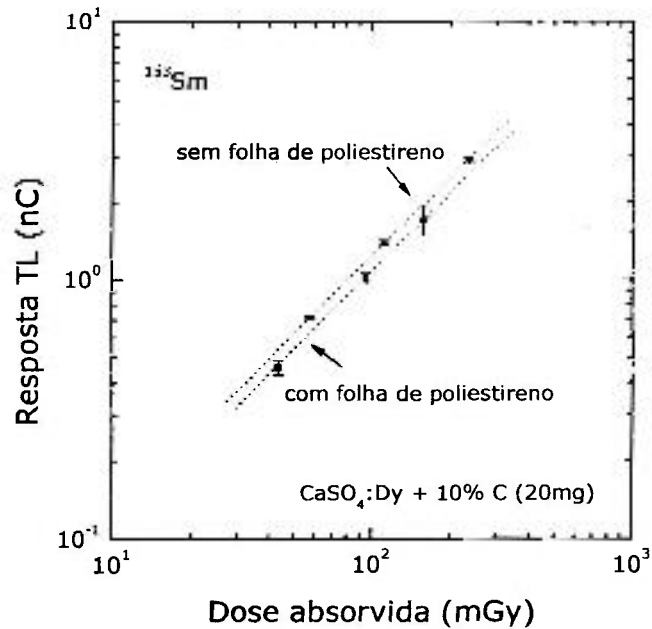


FIGURA 4.69 Curvas de calibração das amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon} + 10\% \text{C}$ , no porta-dosímetro (aro metálico) de pulso, com e sem a folha de poliestireno preto, para a radiação beta de  $^{153}\text{Sm}$ .

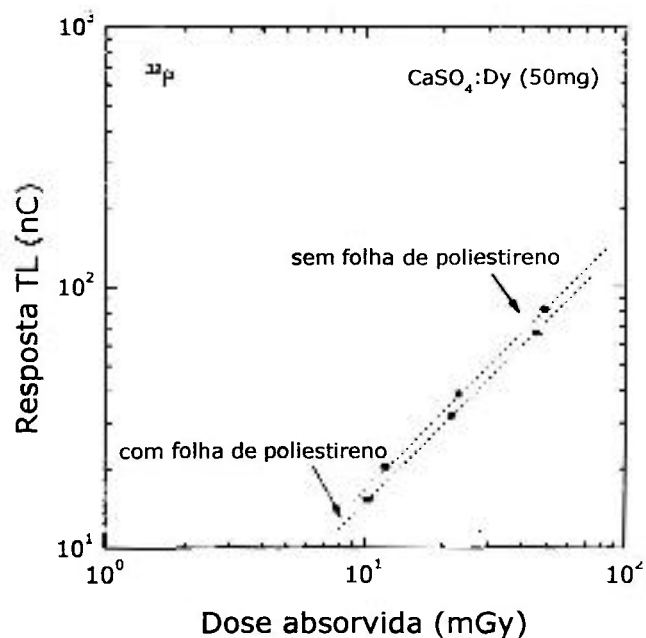


FIGURA 4.70 Curvas de calibração das amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon} (50\text{mg})$ , no porta-dosímetro (aro metálico) de pulso, com e sem a folha de poliestireno preto, para a radiação beta de  $^{32}\text{P}$ .

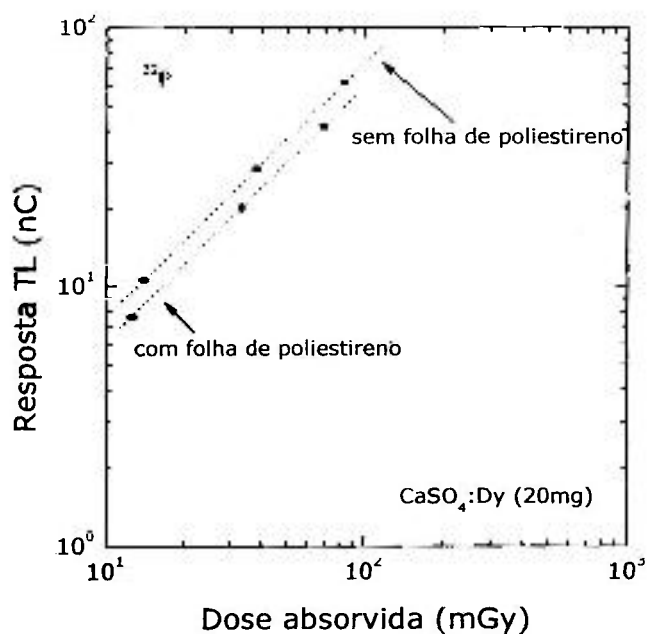


FIGURA 4.71 Curvas de calibração das amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon (20mg), no porta-dosímetro (aro metálico) de pulso, com e sem a folha de poliestireno preto, para a radiação beta de  $^{32}\text{P}$ .

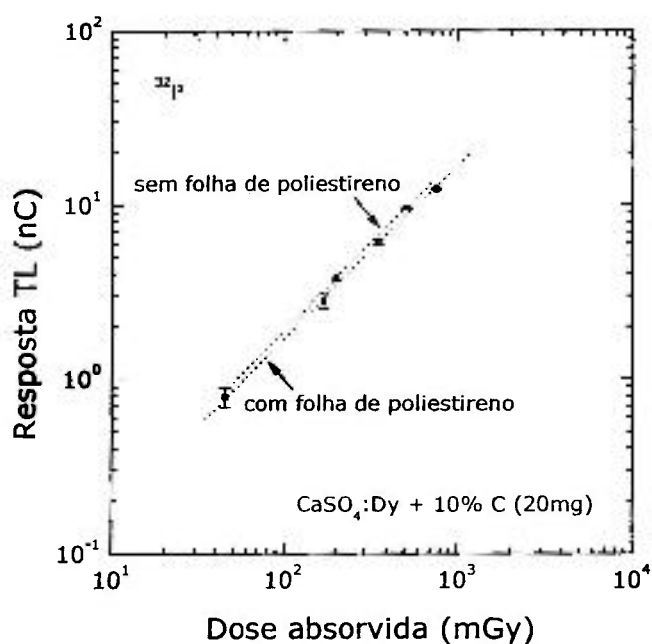


FIGURA 4.72 Curvas de calibração das amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon + 10% C, no porta-dosímetro (aro metálico) de pulso, com e sem a folha de poliestireno preto, para a radiação beta de  $^{32}\text{P}$ .

A linearidade da resposta TL foi obtida em todos os casos. Comparando-se as curvas de calibração obtidas quando os detectores foram irradiados no objeto simulador com as obtidas quando eles foram irradiados no porta-dosímetro com aro de metal, foi observado um aumento na resposta TL no caso de irradiação no protótipo. Este fato pode indicar a ocorrência de espalhamento da radiação pelas bordas metálicas do relógio. Esse espalhamento deve ser levado em consideração para a determinação da dose absorvida ou as amostras devem ser calibradas diretamente no protótipo.

Para se verificar a influência e o espalhamento produzido por essa liga metálica foi projetado e construído uma outra estrutura circular para o porta-dosímetro em PVC, de modo a se utilizar o mesmo suporte de PVC expandido na irradiação dos detectores no porta-dosímetro (FIG. 4.73 e 4.74).

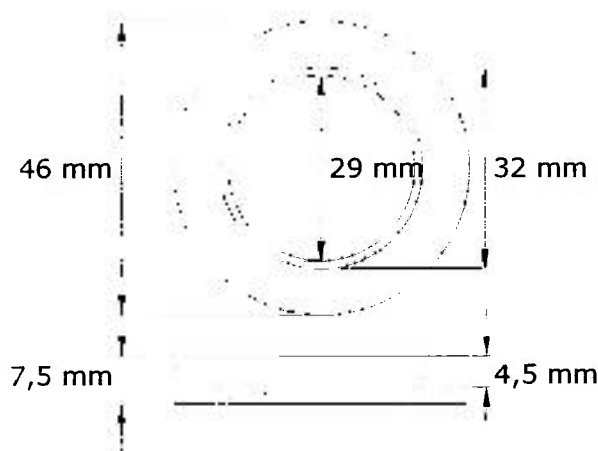


FIGURA 4.73 Aro de PVC utilizado no porta-dosímetro.

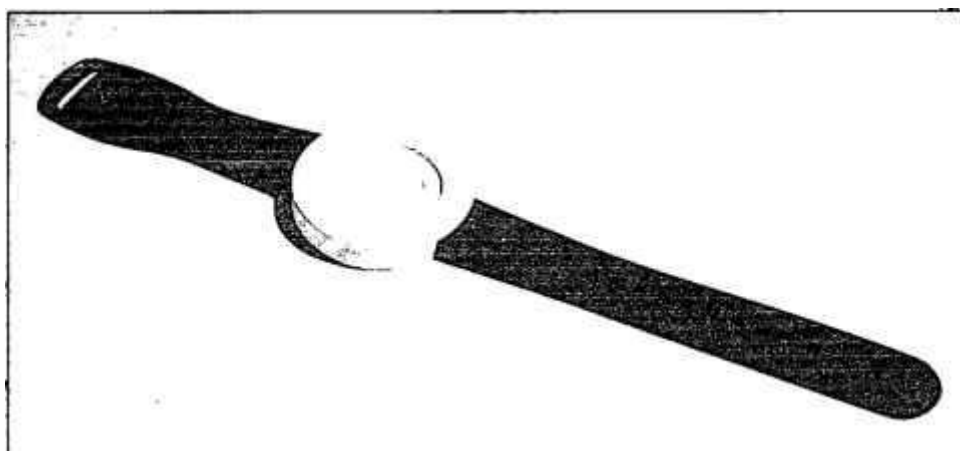


FIGURA 4.74 Protótipo do porta-dosímetro de pulso com aro de PVC.

#### 4.3.3.4 Atenuação e espalhamento no porta-dosímetro

Para o estudo da atenuação da radiação pelos materiais utilizados para cobrir e manter os detectores TL no porta-dosímetro e a influência do espalhamento da radiação nas bordas dele, foram utilizadas fontes depositadas de  $^{153}\text{Sm}$ , com atividade de 3,83 MBq (15/09/2004) e de  $^{32}\text{P}$ , com atividade de 6,14 MBq (14/09/2004), com uma incerteza total de  $\pm 5\%$ , ambas preparadas pelo LMN/IPEN. Foram realizadas ainda irradiações com a fonte de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$  (LCI/IPEN).

Foram utilizados, neste estudo, o objeto simulador, o porta-dosímetro com aro metálico e com aro de PVC. Foram realizadas medidas utilizando-se o filme plástico de  $1,2 \text{ mg.cm}^{-2}$  de densidade superficial, o poliestireno preto de  $64,0 \text{ mg.cm}^{-2}$  de densidade superficial, e também uma folha de poliéster aluminizado de  $1,7 \text{ mg.cm}^{-2}$  de densidade superficial. O poliéster aluminizado foi incluído no estudo com o objetivo de compará-lo com o poliestireno preto, com relação à atenuação da radiação.

Nas TAB. 4.48 a 4.50 são apresentados os fatores de atenuação obtidos para cada fonte de radiação, com os diferentes plásticos de cobertura, nos diferentes materiais. Os resultados apresentados são valores médios obtidos a partir das leituras TL, corrigidas, dos três tipos de detectores utilizados. Os fatores de atenuação foram definidos como a razão entre as respostas TL utilizando-se os diferentes materiais (plástico fino; plástico fino + poliestireno preto; plástico fino + poliéster aluminizado) como cobertura dos detectores, e os valores obtidos utilizando-se apenas o plástico fino.

Comparando-se os fatores de atenuação obtidos para as fontes de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ ,  $^{32}\text{P}$  e  $^{153}\text{Sm}$ , para os diferentes materiais, foi observado que em todos os casos o fator de atenuação é maior quando se utiliza o porta-dosímetro com aro metálico. Para o aro de PVC, os fatores de atenuação são comparáveis aos obtidos quando os detectores foram irradiados apenas sobre o objeto simulador de Lucite, podendo a diferença obtida neste caso ser considerada desprezível.

TABELA 4.48 Fatores de atenuação do plástico fino, do plástico fino com o poliestireno e do plástico fino com o poliéster aluminizado para as fontes de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ ,  $^{32}\text{P}$  e  $^{153}\text{Sm}$ , para medições realizadas no objeto simulador e no porta-dosímetro com aro metálico e de PVC, com  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon (50mg).

Fonte	Material	Plástico fino	Plástico fino e poliestireno	Plástico fino e poliéster aluminizado
$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$	Lucite	1,000±0,038	1,018±0,028	1,025±0,010
	Aro de metal	1,000±0,088	1,079±0,019	1,083±0,030
	Aro de PVC	1,000±0,058	1,021±0,017	1,027±0,018
$^{32}\text{P}$	Lucite	1,000±0,058	1,052±0,003	1,049±0,014
	Aro de metal	1,000±0,042	1,128±0,012	1,130±0,032
	Aro de PVC	1,000±0,018	1,062±0,012	1,065±0,015
$^{153}\text{Sm}$	Lucite	1,000±0,028	1,114±0,009	1,123±0,012
	Aro de metal	1,000±0,036	1,285±0,020	1,272±0,028
	Aro de PVC	1,000±0,057	1,124±0,018	1,132±0,021

TABELA 4.49 Fatores de atenuação do plástico fino, do plástico fino com o poliestireno e do plástico fino com o poliéster aluminizado para as fontes de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ ,  $^{32}\text{P}$  e  $^{153}\text{Sm}$ , para medições realizadas no objeto simulador e no porta-dosímetro com aro metálico e de PVC, com  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon (20mg).

Fonte	Material	Plástico fino	Plástico fino e poliestireno	Plástico fino e poliéster aluminizado
$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$	Lucite	1,000±0,036	1,012±0,029	1,021±0,007
	Aro de metal	1,000±0,086	1,083±0,014	1,087±0,026
	Aro de PVC	1,000±0,078	1,014±0,022	1,016±0,024
$^{32}\text{P}$	Lucite	1,000±0,065	1,053±0,012	1,047±0,014
	Aro de metal	1,000±0,035	1,182±0,011	1,201±0,027
	Aro de PVC	1,000±0,032	1,063±0,015	1,065±0,026
$^{153}\text{Sm}$	Lucite	1,000±0,029	1,118±0,016	1,120±0,013
	Aro de metal	1,000±0,042	1,286±0,009	1,293±0,024
	Aro de PVC	1,000±0,078	1,122±0,020	1,142±0,023

TABELA 4.50 Fatores de atenuação do plástico fino, do plástico fino com o poliestireno e do plástico fino com o poliéster aluminizado para as fontes de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ ,  $^{32}\text{P}$  e  $^{153}\text{Sm}$ , para medições realizadas no objeto simulador e no porta-dosímetro com aro metálico e de PVC, com  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon} + 10\% \text{ C}$ .

Fonte	Material	Plástico fino	Plástico fino e poliestireno	Plástico fino e poliéster aluminizado
$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$	Lucite	1,000±0,037	1,024±0,005	1,014±0,010
	Aro de metal	1,000±0,076	1,111±0,009	1,112±0,030
	Aro de PVC	1,000±0,067	1,025±0,008	1,026±0,018
$^{32}\text{P}$	Lucite	1,000±0,035	1,101±0,022	1,111±0,016
	Aro de metal	1,000±0,042	1,194±0,014	1,197±0,026
	Aro de PVC	1,000±0,026	1,118±0,014	1,101±0,024
$^{153}\text{Sm}$	Lucite	1,000±0,032	1,104±0,017	1,113±0,013
	Aro de metal	1,000±0,039	1,198±0,005	1,208±0,021
	Aro de PVC	1,000±0,067	1,132±0,021	1,134±0,023

Nas TAB. 4.48 a 4.50, comparando-se os valores obtidos utilizando como cobertura dos detectores TL o plástico fino e o poliestireno com os obtidos utilizando-se o plástico fino e o poliéster aluminizado, observa-se em geral um aumento pequeno (no máximo 1,8%) nos valores, do que se conclui que a utilização dos dois materiais é adequada.

Nas TAB. 4.51 a 4.53 são apresentados os fatores de espalhamento obtidos para cada fonte de radiação, com os diferentes plásticos de cobertura, nos diferentes materiais. Os resultados apresentados são valores médios obtidos a partir das leituras TL, corrigidas, dos três tipos de detectores utilizados. Os fatores de espalhamento foram definidos como a razão entre as respostas TL utilizando-se os diferentes materiais (Lucite; aro metálico; aro de PVC) como objeto simulador, e os valores obtidos irradiando-se os detectores apenas no objeto simulador de Lucite.

TABELA 4.51 Fatores de espalhamento do plástico fino, do plástico fino com o poliestireno e do plástico fino com o poliéster aluminizado para as fontes de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ ,  $^{32}\text{P}$  e  $^{153}\text{Sm}$ , para medições realizadas no objeto simulador e no porta-dosímetro com aro metálico e de PVC, com  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon (50mg).

Fonte	Material	Plástico fino	Plástico fino e poliestireno	Plástico fino e poliéster aluminizado
$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$	Lucite	1,000±0,018	1,000±0,013	1,000±0,021
	Aro de metal	1,047±0,031	1,055±0,047	1,030±0,014
	Aro de PVC	1,024±0,015	1,036±0,028	1,028±0,031
$^{32}\text{P}$	Lucite	1,000±0,036	1,000±0,009	1,000±0,025
	Aro de metal	1,431±0,024	1,478±0,022	1,455±0,018
	Aro de PVC	1,399±0,021	1,452±0,033	1,437±0,022
$^{153}\text{Sm}$	Lucite	1,000±0,025	1,000±0,018	1,000±0,016
	Aro de metal	1,651±0,018	1,670±0,018	1,661±0,014
	Aro de PVC	1,638±0,037	1,653±0,014	1,646±0,017

TABELA 4.52 Fatores de espalhamento do plástico fino, do plástico fino com o poliestireno e do plástico fino com o poliéster aluminizado para as fontes de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ ,  $^{32}\text{P}$  e  $^{153}\text{Sm}$ , para medições realizadas no objeto simulador e no porta-dosímetro com aro metálico e de PVC, com  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon (20mg).

Fonte	Material	Plástico fino	Plástico fino e poliestireno	Plástico fino e poliéster aluminizado
$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$	Lucite	1,000±0,042	1,000±0,019	1,000±0,014
	Aro de metal	1,204±0,035	1,248±0,016	1,226±0,014
	Aro de PVC	1,198±0,029	1,224±0,020	1,222±0,024
$^{32}\text{P}$	Lucite	1,000±0,035	1,000±0,011	1,000±0,022
	Aro de metal	1,644±0,028	1,675±0,020	1,645±0,017
	Aro de PVC	1,625±0,031	1,660±0,0013	1,631±0,038
$^{153}\text{Sm}$	Lucite	1,000±0,032	1,000±0,009	1,000±0,011
	Aro de metal	1,405±0,024	1,431±0,006	1,415±0,031
	Aro de PVC	1,392±0,009	1,420±0,012	1,405±0,017

TABELA 4.53 Fatores de espalhamento do plástico fino, do plástico fino com o poliestireno e do plástico fino com o poliéster aluminizado para as fontes de  $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ ,  $^{32}\text{P}$  e  $^{153}\text{Sm}$ , para medições realizadas no objeto simulador e no porta-dosímetro com aro metálico e de PVC, com  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon} + 10\% \text{ C}$ .

Fonte	Material	Plástico fino	Plástico fino e poliestireno	Plástico fino e poliéster aluminizado
$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$	Lucite	1,000±0,017	1,000±0,009	1,000±0,011
	Aro de metal	1,168±0,036	1,193±0,011	1,182±0,028
	Aro de PVC	1,160±0,042	1,179±0,012	1,169±0,037
$^{32}\text{P}$	Lucite	1,000±0,029	1,000±0,015	1,000±0,021
	Aro de metal	1,735±0,041	1,754±0,012	1,746±0,031
	Aro de PVC	1,714±0,019	1,738±0,010	1,734±0,019
$^{153}\text{Sm}$	Lucite	1,000±0,024	1,000±0,007	1,000±0,018
	Aro de metal	1,276±0,026	1,281±0,016	1,277±0,023
	Aro de PVC	1,272±0,043	1,278±0,019	1,273±0,022

Quanto ao espalhamento da radiação pelas bordas do porta-dosímetro, nas TAB. 4.48 a 4.50 também se observa um aumento nos valores obtidos quando se utiliza o porta-dosímetro com aro metálico comparado com o porta-dosímetro com aro de PVC. Observa-se, também, que esse aumento é praticamente o mesmo (máximo de 2,2%) quando se compara os resultados em relação ao material (plástico fino + poliestireno preto e plástico fino + poliéster aluminizado) utilizado como cobertura dos detectores. No entanto, conclui-se disto que o porta-dosímetro com aro de PVC é o mais adequado para utilização na monitoração de trabalhadores ocupacionalmente expostos a radiofármacos emissores de radiação beta nos Serviços de Medicina Nuclear.

#### 4.3.3.5 Radiação gama e beta do $^{153}\text{Sm}$

Uma fonte de  $^{153}\text{Sm}$ , como já foi visto (TAB. 3.3), emite além de radiação beta, raios gama de 103,2 keV. Com o objetivo de se determinar as

doses absorvidas devidas à radiação beta e à radiação gama, foi realizado um estudo visando identificar esses componentes.

Inicialmente, foi realizado um teste utilizando-se o medidor de radiação portátil, tipo Geiger-Müller, MIP 10A, Eurisys Mesures, e a fonte padrão de  $^{57}\text{Co}$  do conjunto do LCI/IPEN (TAB. 3.1). Foi escolhida a fonte de  $^{57}\text{Co}$ , por ser a fonte padrão com energia mais próxima à da radiação gama do  $^{153}\text{Sm}$ . O objetivo do teste (FIG. 4.75) foi determinar a espessura adequada de alumínio para ser utilizada no porta-dosímetro de modo a barrar a radiação beta do  $^{153}\text{Sm}$  e atenuar ao mínimo a radiação gama. A TAB. 4.54 apresenta os valores obtidos no ensaio.

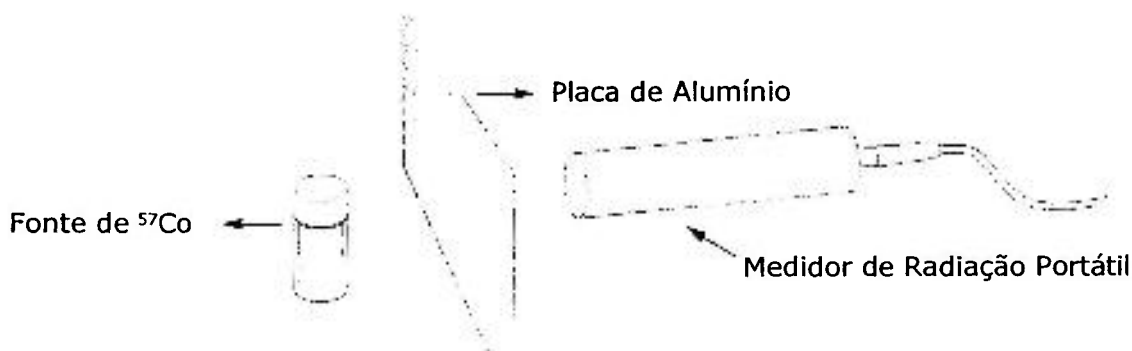


FIGURA 4.75 Representação esquemática do teste para determinação da espessura de alumínio necessária para blindar a radiação beta do  $^{153}\text{Sm}$ .

TABELA 4.54 Teste para verificação da atenuação da radiação de  $^{57}\text{Co}$ , que emite radiação gama de energia próxima à da fonte de  $^{153}\text{Sm}$ .

Espessura da blindagem (mm Al)	Valores obtidos (cps)
sem filtro	30
0,50	30
0,75	28 a 30
1,00	28 a 30

Não foi possível observar atenuação da radiação gama da fonte de  $^{57}\text{Co}$  através da blindagem de 0,5 mm de Al testado. Assim, a espessura de 0,5 mm Al foi considerada suficiente para blindar a energia beta do  $^{153}\text{Sm}$  e não atenuar sua radiação gama.

Para a determinação da contribuição da radiação gama, as medições foram realizadas utilizando-se o porta-dosímetro com aro de PVC e os detectores de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$  (50 mg) e de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$  (20 mg). Os detectores foram posicionados sobre a placa de PVC expandido (FIG. 4.58), sendo que dois deles foram mantidos cobertos com a placa de 0,5 mm Al de espessura (FIG. 4.76), durante as irradiações. Todos os detectores foram irradiados durante 8 min, à distância fonte-detector de 11 cm. As irradiações foram realizadas utilizando-se o plástico fino, o poliestireno preto e a folha de poliéster aluminizado. Os detectores de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon} + 10\%\text{C}$  não foram utilizados por serem menos sensíveis.



FIGURA 4.76 Porta-dosímetro, com aro de PVC, com filtro de 0,5 mm Al para determinação da contribuição da radiação gama.

Na TAB. 4.55 são apresentados os valores da resposta TL relativa, utilizando-se para cobrir e manter os detectores no porta-dosímetro o plástico fino, o poliestireno preto e o poliéster aluminizado, para as amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}+\text{Teflon}$  (50 mg) e  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}+\text{Teflon}$  (20 mg), além do filtro de 0,5 mm Al.

TABELA 4.55 Resposta TL relativa de radiação beta e gama do  $^{153}\text{Sm}$ .

Detector	Filtro de Al	Resposta TL (u.a.)			Tipo de radiação
		Plástico fino	Plástico fino + poliestireno preto	Plástico fino + poliéster aluminizado	
CaSO <sub>4</sub> :Dy+	Sim	0,067±0,021	0,085±0,023	0,080±0,020	γ
Teflon (50mg)	Não	5,193±0,018	6,473±0,019	6,329±0,021	β + γ
CaSO <sub>4</sub> :Dy+	Sim	0,137±0,023	0,124±0,021	0,128±0,019	γ
Teflon (20 mg)	Não	9,581±0,019	9,776±0,018	9,656±0,021	β + γ

A contribuição à dose devida à radiação gama (1,4%) é considerada desprezível, pois está dentro da incerteza das medidas, podendo-se, desse modo, dispensar a utilização do filtro de Al em monitoração de radiação do  $^{153}\text{Sm}$ .

#### 4.3.3.6 Utilização do protótipo de dosímetro

O porta-dosímetro de pulso com aro metálico foi testado por trabalhadores ocupacionalmente expostos à radiação beta do  $^{153}\text{Sm}$ , do CMN/USP. Para a realização dos testes em campo foi utilizado o porta-dosímetro com aro metálico em virtude do aro de PVC ter sido projetado e construído posteriormente e pela possibilidade de aplicação de fatores de correção devido ao espalhamento da radiação pelo aro metálico.

O teste em campo consistiu na simulação de um procedimento terapêutico com  $^{153}\text{Sm}$ , sem paciente presente. Foram simulados a preparação, o manuseio e a administração do radiofármaco ao paciente de tal modo que correspondessem exatamente a um procedimento terapêutico.

Os mesmos porta-dosímetros foram utilizados durante todo o período em que foram realizados os procedimentos terapêuticos com  $^{153}\text{Sm}$ . Foi realizado um procedimento por dia, durante seis dias consecutivos, envolvendo sempre os

três profissionais: o físico, que tem as atribuições de receber o radiofármaco, determinar a atividade total da amostra no frasco de penicilina e em seguida calcular a atividade a ser administrada ao paciente; o biomédico com as atribuições de retirar a quantidade da atividade calculada do frasco diretamente na seringa e em seguida verificar se a atividade retirada estava correta no activímetro; e o auxiliar de enfermagem, que administra a dose terapêutica ao paciente. A sequência da realização do manuseio do  $^{153}\text{Sm}$  durante cada procedimento terapêutico realizado é mostrada na FIG. 4.77.



FIGURA 4.77 Sequência dos procedimentos de preparação de uma dose terapêutica com  $^{153}\text{Sm}$  num Serviço de Medicina Nuclear: a) trabalhador abrindo a blindagem de chumbo para retirar a ampola contendo o  $^{153}\text{Sm}$ ; b) determinação da atividade total da amostra no activímetro; c) introdução da seringa no frasco da amostra; d) retirada da quantidade a ser administrada ao “paciente”; e) determinação da atividade do  $^{153}\text{Sm}$  retirado no activímetro; f) seringa com  $^{153}\text{Sm}$  preparada para ser administrada ao “paciente”; g) simulação da administração da dose terapêutica ao “paciente”.

Cada porta-dosímetro de pulso utilizado continha duas amostras de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$  (50mg) e duas de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy} + \text{Teflon}$  (20mg). Esses dois tipos de detectores foram escolhidos por terem apresentado maior sensibilidade durante todo o estudo realizado. Foi também entregue ao Serviço de Medicina Nuclear um dosímetro de controle, para ser mantido num local fora da área de manuseio de radionuclídeos, para se determinar a radiação de fundo.

Para a realização da simulação dos procedimentos terapêuticos foi utilizada uma fonte de  $^{153}\text{Sm}$ , produzida pelo CR/IPEN, calibrada com uma atividade de 3700 MBq para 03/09/2004 às 12h, num volume de 2,59 ml. A atividade específica da amostra de  $^{153}\text{Sm}$  foi de  $88,30 \mu\text{Bq} \cdot \text{mg}^{-1}$ . A quantidade de  $^{153}\text{Sm}$  retirada para a realização de cada simulação foi de 1,2 ml correspondente à necessidade de uma pessoa com aproximadamente 70 kg, sendo a atividade retirada determinada no activímetro CRC15, Capintec, no CMN/USP. As simulações foram iniciadas em 03/09/2004 às 08:30h e foram repetidas durante seis dias úteis consecutivos. As atividades de  $^{153}\text{Sm}$  manuseadas em cada procedimento são apresentadas na TAB. 4.56.

TABELA 4.56 Atividade inicial do  $^{153}\text{Sm}$  e data da realização de cada simulação.

Número	Procedimento		Atividade inicial no frasco (MBq)
	Data	Horário	
1	02/09/2004	08:30h	5560
2	03/09/2004	08:20h	4230
3	06/09/2004	11:35h	1280
4	08/09/2004	12:30h	680
5	09/09/2004	09:00h	490
6	10/09/2004	07:45h	350

Os detectores utilizados nos procedimentos terapêuticos com o radiofármaco  $^{153}\text{Sm}$  foram avaliados no sistema Harshaw Nuclear Systems no LCI/IPEN; a leitura TL obtida para cada detector foi corrigida para a lâmpada

padrão, leitura de “dose zero” e fator de calibração de cada detector. As leituras TL foram ainda corrigidas para a dose de radiação de fundo obtida com o dosímetro de controle.

Os valores das doses absorvidas do dosímetro de controle e pelos trabalhadores ocupacionalmente envolvidos na realização das simulações com  $^{153}\text{Sm}$  são apresentados na TAB. 4.57. Embora as simulações tenham sido realizadas durante seis dias consecutivos, pode-se dizer que a dose recebida pelos trabalhadores envolvidos equivale à dose recebida durante um mês de manuseio com  $^{153}\text{Sm}$ , uma vez que a quantidade máxima de procedimentos realizados mensalmente no CMN/USP não ultrapassa esse número de procedimentos.

TABELA 4.57 Resultados das doses equivalentes na pele dos trabalhadores ocupacionalmente expostos a  $^{153}\text{Sm}$ , durante a simulação realizada.

Usuário	Dosímetro	Dosé equivalente na pele (mSv)
Dosímetro de controle	CaSO <sub>4</sub> :Dy+Teflon (20 mg)	0,17±0,01
	CaSO <sub>4</sub> :Dy+Teflon (50 mg)	0,17±0,01
Físico	CaSO <sub>4</sub> :Dy+Teflon (20 mg)	0,59±0,02
	CaSO <sub>4</sub> :Dy+Teflon (50 mg)	0,61±0,02
Biomédico	CaSO <sub>4</sub> :Dy+Teflon (20 mg)	0,45±0,02
	CaSO <sub>4</sub> :Dy+Teflon (50 mg)	0,43±0,02
Auxiliar de enfermagem	CaSO <sub>4</sub> :Dy+Teflon (20 mg)	1,93±0,03
	CaSO <sub>4</sub> :Dy+Teflon (50 mg)	1,96±0,02

Os valores da dose equivalente na pele são idênticos aos da dose absorvida, porque o fator de peso da radiação beta é igual a 1 [ICRP 60, 1991].

Analisando os dados apresentados na TAB. 4.57, observa-se que o auxiliar de enfermagem recebeu uma dose equivalente pessoal na pele mais alta do que o físico e o biomédico. Este fato pode ser justificado em virtude do auxiliar de enfermagem estar próximo à fonte injetando o radiofármaco no paciente, sem qualquer blindagem adicional para as extremidades, e por um tempo de exposição maior, de acordo com o procedimento, o que ocasiona dificuldade na otimização nesse procedimento.

Comparando-se os valores apresentados na TAB. 4.57 com o limite de dose equivalente anual na pele de 500 mSv (41,67 mSv/mês) recomendado pelo relatório ICRP 60 [1991], verifica-se que a dose média recebida pelo físico foi de 0,60 mSv, pelo biomédico de 0,43 mSv e pelo auxiliar de enfermagem de 1,95 mSv, que equivalem respectivamente a 1,4%, 1,0% e 4,7% do limite mensal.

Os resultados apresentados na TAB. 4.57 indicam que as doses equivalentes na pele recebidas pelos trabalhadores ocupacionalmente expostos à radiação beta do  $^{153}\text{Sm}$  devem ser levadas em consideração, uma vez que esses valores representam as doses recebidas pelos trabalhadores apenas no manuseio do  $^{153}\text{Sm}$ .

Pode-se concluir que as doses equivalentes mensais na pele dos trabalhadores em Serviços de Medicina Nuclear são valores subestimados da dose, que eles recebem por meio da monitoração individual gama; pois não são consideradas as doses relativas aos radiofármacos emissores de radiação beta, nos casos em que eles são também manuseados durante as atividades.

## 5 CONCLUSÕES

Para a caracterização e o estabelecimento de sistemas tandem de activímetros foi estudado inicialmente o desempenho de três tipos de activímetros, sendo realizados os principais testes de controle de qualidade. Os resultados obtidos mostraram comportamentos satisfatórios, com variações dentro dos limites recomendados por normas nacionais e internacionais.

Os sistemas tandem de activímetros propostos foram amplamente testados quanto a sua viabilidade de utilização, apresentando sempre comportamentos excelentes em todos os testes. Os resultados obtidos mostraram que a razão entre as medições, utilizando-se os diferentes absorvedores, em função da energia, se manteve constante para cada activímetro e cada fonte medida, confirmando a estabilidade dos sistemas tandem. O uso do sistema tandem é especialmente importante e recomendado para os programas de controle de qualidade dos Serviços de Medicina Nuclear, pois ele poderá servir tanto para confirmar o material recebido, como para indicar a presença de impurezas nos radiofármacos, se as razões entre as medidas forem diferentes das obtidas no laboratório em condições ideais; evita-se assim que os exames sejam repetidos e o aumento da exposição à radiação dos trabalhadores envolvidos.

Entre os sistemas tandem propostos e estudados, as combinações recomendadas são as formadas com materiais plásticos e metálicos. Todas as curvas tandem estabelecidas pelas combinações entre os absorvedores de latão e PVC, latão e polipropileno, aço e PVC, e aço e polipropileno apresentaram inclinações adequadas; quanto maior a inclinação da curva, mais fácil fica a interpretação do que se quer medir por interpolação. Entretanto, cada usuário deverá obter os dados para formar os próprios sistemas tandem, com os radiofármacos utilizados na sua rotina. Não são necessários gráficos, já que os

valores a serem comparados são as razões das medições obtidas com os absorvedores; os gráficos têm apenas a utilidade de facilitar a visualização do comportamento dos sistemas.

Para o estabelecimento da monitoração individual de trabalhadores expostos a radiofármacos emissores de radiação beta, nos Serviços de Medicina Nuclear, foram estudadas as características dosimétricas dos detectores de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon (50 mg), de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon (20 mg) e de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon + 10% C (20 mg). Esses três tipos de detectores mostraram-se adequados para monitoração beta. Entretanto, os resultados obtidos enfatizam a importância de se utilizar detectores finos para determinação da dose na pele. O detector considerado ideal, para monitoração específica de radiofármacos emissores de radiação beta, não só por sua espessura, mas também por sua sensibilidade TL é o de  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  + Teflon (20mg).

Foi desenvolvido um dosímetro de pulso, para monitoração específica de radionuclídeos emissores de radiação beta, utilizando-se diferentes materiais para o aro, e para a cobertura e a fixação dos detectores TL no porta-dosímetro. Para o estabelecimento da dosimetria com fontes emissoras de radiação beta foi ainda projetado e construído um arranjo experimental que foi amplamente testado quanto à confiabilidade de sua utilização no estudo. Para o estabelecimento do porta-dosímetro foram utilizados PVC e uma liga metálica como aro do porta-dosímetro, e poliestireno e poliéster aluminizado como materiais de fixação e cobertura dos detectores. No estudo da escolha do material para o porta-dosímetro para monitoração individual, o mais adequado foi o de PVC, utilizando-se a folha tanto de poliestireno preto como de poliéster aluminizado, por apresentarem resultados comparáveis.

Como uma aplicação em laboratório, foram determinadas as curvas de calibração para fontes de radiação beta de  $^{153}\text{Sm}$  e  $^{32}\text{P}$  no arranjo experimental utilizando-se o objeto simulador e o porta-dosímetro desenvolvidos.

Como uma aplicação em campo, os dosímetros foram testados num Serviço de Medicina Nuclear durante uma simulação com manuseio de

radiofármacos emissores de radiação beta. Foi constatado que a exposição dos trabalhadores à radiação beta deve ser considerada, confirmando a grande necessidade de monitoração individual para radiofármacos emissores de radiação beta em todos os Serviços de Medicina Nuclear.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, M. P. P.; CALDAS, L. V. E. New ionization chambers for beta and X-radiation. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, v. A280, p. 310-313, 1989.

AMERSHAM – AMERSHAM BUCHLER, GmbH & Co KG. Certificado de calibração nº 249390, fonte de  $^{57}\text{Co}$ , Inglaterra, 1997a.

AMERSHAM – AMERSHAM BUCHLER, GmbH & Co KG. Certificado de calibração nº 249399, fonte de  $^{133}\text{Ba}$ , Inglaterra, 1997b.

AMERSHAM – AMERSHAM BUCHLER, GmbH & Co KG. Certificado de calibração nº 249393, fonte de  $^{137}\text{Cs}$ , Inglaterra, 1997c.

AMERSHAM – AMERSHAM BUCHLER, GmbH & Co KG. Certificado de calibração nº 249397, fonte de  $^{60}\text{Co}$ , Inglaterra, 1997d.

BARTH, I.; RIMPLER, A.; MIELCAREL, J. Beta-radiation exposure of medical personnel. . In: 11<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL RADIATION PROTECTION ASSOCIATION (IRPA 11), 23 – 28 May, 2004, Madrid. *Proceedings...* Spain, 2004. 1 CD-ROM.

BECKER, K. *Solid state dosimetry*. Cleveland: CRC, 1973.

BENATAR, N. A.; CRONIN, B. F.; O'DOHERTY, M. J. Radiation dose rates from patients undergoing PET: implications for technologists and waiting areas. *Eur. J. Nucl. Med.*, v. 27, p. 583-589, 2000.

BERUS, D.; COBENS, P.; BULS, N. VAN DEN BROECK, M.; VAN HOLSBEECK, G; VANHAVERE, F. Extremity doses of workers in nuclear medicine: mapping

hand doses in function of manipulation. In: 11<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONGRESS OF THE INTERNATIONAL RADIATION PROTECTION ASSOCIATION (IRPA 11), 23 – 28 May, 2004, Madrid. *Proceedings...* Spain, 2004. 1 CD-ROM.

BREDA, F.J.; PEREZ, H.E.D.; VIEIRA, J.M. *Projeto, construção e testes de uma câmara de ionização de poço para detecção de radiação beta e gama*. In: Anais do 3º Congresso Geral de Energia Nuclear, 22-27 Abril, 1990. Rio de Janeiro, p.75-81.

BOYD, R. E.; SILVESTER, D. F. *Radioisotope production: nuclear medicine in clinical diagnosis and treatment*. Churchill, Livingstone, 2ª ed, v. 2, 1998.

BUCHPIGUEL, C. A. A medicina nuclear no próximo milênio. *Radiol. Bras.*, v. 32, n.5, p.V-VI, 1999.

CALDAS, L. V. E. *Alguns métodos de calibração e de dosimetria da radiação beta*. São Paulo: 1980. Tese (Doutoramento) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo.

CALDAS, L. V. E. A sequential tandem system of ionisation chambers for effective energy determination of radiation fields. *Radiat. Prot. Dosim.*, v. 36, n. 1, p.47-50, 1991.

CAMPOS, L. L.; LIMA, M. F. Dosimetric properties of CaSO<sub>4</sub>:Dy Teflon pellets produced at IPEN. *Radiat. Prot. Dosim.*, v. 14, n. 4, p. 333-335, 1986.

CAMPOS, L. L.; LIMA, M. F. Thermoluminescent CaSO<sub>4</sub>:Dy Teflon pellets for beta radiation detection. *Radiat. Prot. Dosim.*, v. 18, n. 2, p. 95-97, 1987.

CAMPOS, L. L. Graphite mixed CaSO<sub>4</sub>:Dy TL dosimeters for beta radiation dosimetry. *Radiat. Prot. Dosim.*, v. 48, n. 2, p. 205-207, 1993.

CASTRONOVO, Jr. F. P.; SCHLEIPMAN, R. Radiation exposure from gallium-67-citrate patients. *J. Nucl. Med. Tech.*, v. 27, p. 57-61, 1999.

CHANDRA, R. *Introductory physics of nuclear medicine*. Pennsylvania: Lea & Febiger, 1992.

CHIESA, C.; SANCTIS, V., CRIPP, F., SCHIAVINI, M.; FRAIGOLA, C. E.; BOGNI, A.; PASCALI, C.; DECISE, D.; MARCHESINI, R.; BOMBARDIERI, E. Radiation dose to technicians per nuclear medicine procedure: comparison between technetium-99m, gallium-67 and iodine-131 radiotracers and fluorine-18 fluorodeoxyglucose. *Eur. J. Nucl. Med.*, v. 24, p. 1380-1389, 1997.

CHRISTENSEN, P., PROKIÉ, M. Energy and angular response of TL dosimeters for beta ray dosimetry. *Radiat. Prot. Dosim.*, v. 17, p. 83-87, 1986.

CHRUSCIELEWSKI, W.; OLSZEWSKI, J.; JANKOWSKI, J.; CYGAN, M. Hand exposure in nuclear medicine workers. *Radiat. Prot. Dosim.*, v. 101, n. 1-4, p. 229-232, 2002.

CLARKE, E. A.; THOMSON, W. H.; NOTGHI, A.; HARDING, L. K. Radiation doses from nuclear medicine patients to an imaging technologist: relation to ICRP recommendations for pregnant workers. *Nucl. Med. Commun.*, v. 13, p. 795-798, 1992.

CLARKE, R. H. Changing philosophy in ICRP: the evolution of protection ethics and principles. *Intern. J. Low Radiat.*, v. 1, n. 1, p. 39-49, 2003.

CNEN - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Requisitos de radioproteção e segurança para serviços de medicina nuclear*. Abril, 1996 (CNEN-NE-3.05).

CNEN - COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. *Serviços de radioproteção*. Agosto, 1988 (CNEN-NE-3.02).

COSTA, A. M.; CALDAS, L. V. E. Response characteristics of a tandem ionization chamber in standard X-ray beams. *Appl. Radiat. Isot.*, v. 58, n. 4, p. 495-500, 2003a.

COSTA, A. M.; CALDAS, L. V.E. *A special ionization chamber for quality control of diagnostic and mammography X-ray equipment. Radiat. Prot. Dosim.*, v. 104, n. 1, p. 41-45, 2003b.

DALE, J.; WILLIAMS G. A. beta-gamma ionization chamber for substandards of radioactivity – II. *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, v. 10, p. 72-78, 1961.

DA ROSA, L. A. R.; NETTE, H. P. Thermoluminescent dosimeters for exposure assessment in gamma or X radiation fields with unknown spectral distribution. *Appl. Radiat. Isot.*, v. 39, n. 3, p. 197-197, 1988.

DEBERTIN, K.; SCHRADER, H. Intercomparisons for quality assurance of activity measurements with radionuclide calibrators. *Nucl. Inst. Meth. Phys. Res.*, p. 241-245, 1992.

DELACROIX, D.; GUERRE, J. P.; LEBLANC, P.; HICKMAN, C. Radionuclide and radiation protection data handbook 1998. *Rad. Prot. Dosim.*, v. 76, n. 1-2, 1998.

DYTZ, A.S.; CALDAS, L.V.E. *Utilização de filtros para controle de qualidade em calibradores de doses*. In: V Regional Congress on Radiation Protection and Safety; 29 Abril 29 – 04 Maio, 2001. Recife, PE, Brasil.

GALHARDO, E. P.; CALDAS, L. V. E. Metodologia para dosimetria em campos de radiação X – nível radioterapia – utilizando sistemas tandem de câmaras de ionização comerciais. *Radiol. Bras.*, v. 33, p. 231-237, 2000.

GONZÁLEZ, L.; VAÑO, E.; CORDEIRO, C. A.; CARRERAS, J. L. Preliminary safety evaluation of a cyclotron facility for positron emission tomography imaging. *Eur. J. Nucl. Med.*, v. 26, n. 8, p. 894-899, 1999.

GORBICS, S.G.; ATTIX, F.H. LiF and CaF<sub>2</sub>:Mn thermoluminescent in tandem. *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, v. 19, p. 81-89, 1968.

GREAVES, C. D.; TINDALE, W. B. Dose rate measurements from radiopharmaceuticals: implications for nuclear medicine staff and for children with radioactive parents. ***Nucl. Med. Commun.***, v. 20. p. 179-187, 1999.

HÖFERT, M.; TUYN, J. W. N.; JENKINS, T. M. Personnel exposure from positron emitters. ***Radiat. Prot. Dosim.***, v. 14, n. 2, p. 101-104, 1986.

HOROWITZ, Y. S.; YOSSIAN, D. Computerised glow curve deconvolution: application to thermoluminescence dosimetry. ***Radiat. Prot. Dosim.***, v. 60, n. 1, p. 1-111, 1995.

ICRP 60 – INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. ***1990 Recommendations of the international commission on radiological protection***. Oxford Pergamon Press, England, 1991 (ICRP Publication 60).

ICRP – INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. ***2005 Recommendations of the international commission on radiological protection***. (In press).

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ***Quality control of nuclear medicine instruments***. IAEA, Vienna, 1991 (IAEA-TECDOC-602).

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ***International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources***. IAEA, Vienna, 1994 (Safety Series nº 115).

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ***Guia para a expressão da incerteza da medição***. Terceira edição brasileira em língua portuguesa. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

IWAHARA, A. ***Rastreabilidade e garantia da qualidade em medições de radionuclídeos utilizados na medicina nuclear***. Rio de Janeiro: 2001. Tese (Doutoramento) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

KENNEY, G.N.; CAMERON, J.R. *X-ray beam quality measurement utilizing TL dosimeters*. Progress Report, AEC Contract AT 11-1-1105. Madison, WI: Wisconsin University, 1963. (TID-19112).

LAGOUTINE, F.; COURSOLO, N.; LEGRAND, J. *Table de radionucléides*. Laboratoire de Métrologie des Rayonnements Ionisants, Commissariat à l'Énergie Atomique, Bureau National de Métrologie, 1983.

LUNDBERG, T. M.; GRAY, P. J.; BARTLETT, M. L. Measuring and minimizing the radiation dose to nuclear medicine technologists. *J. Nucl. Med. Tech.*, v. 30, p. 25-30, 2002.

MAHESH, K.; WENG, P. S.; FURETTA, C. *Thermoluminescence in solids and its applications*. Ashford: Nuclear Technology Publishing, 1989.

McKEEVER, S. W. S. *Thermoluminescence of solids*. London: Cambridge University Press, 1985.

McKEEVER, S. W. S.; MOSCOVITCH, M.; TOWNSEND, P. D. *Thermoluminescence dosimetry materials: properties and uses*. Ashford: Nuclear Technology Publishing, 1995.

MEGHZIFENE A.; SHORTT, K. R. Calibration factor or calibration coefficient? *SSDL – Newsletter*, n. 46, p.33, 2002.

MENDES, L. C. G.; FONSECA, L. M. B.; CARVALHO, A. C. P. Proposta de um método de inspeção de radioproteção aplicada em instalações de medicina nuclear. *Radiol. Bras.*, v. 37, n. 2, p. 115-123, 2004.

NEVES, M.; KLING, A.; LAMBRECHT, R.M. Radionuclide production for therapeutic radiopharmaceuticals. *Appl. Radiat. Isot.*, v. 57, p. 657-664, 2002

NCRP – NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS. **A handbook of radioactivity measurements procedures**. Report NCRP nº 58. NCRP, Bethesda, MD, 1985.

NIST – NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. **Radionuclide half-life measurements**. Disponível em: <<http://physics.nist.gov/PhysRefData/HalfLife/halfLife.html>>. Acesso em: 04 de agosto de 2004.

OBERHOFER, M. **Applied thermoluminescence dosimetry**. Bristol: Adam Hilger Ltd, England, 1981.

OROPESA, P.; HERNÁNDEZ, A. T.; SERRA, R.; MARTINEZ, E.; VARELA, C. Comparisons of activity measurements with radionuclide calibrators. **Appl. Radiat. Isot.**, v. 59, p. 383-387, 2003.

PHELPS, M. E.; COLEMAN, R. E. Nuclear medicine in the new millennium. **J. Nucl. Medic.**, v. 41, n. 1, p. 1-4, 2000.

PTB - PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT. **Certificado de calibração**, PTB-6.21 N/B, fonte de  $^{147}\text{Pm}$ , Alemanha, 1990a.

PTB - PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT. **Certificado de calibração**, PTB-6.21 N/B, fonte de  $^{204}\text{Tl}$ , Alemanha, 1990b.

PTB - PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT. **Certificado de calibração**, 6.61/25/81 SB, fonte de  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$  (74 MBq), Alemanha, 1981a.

PTB - PHYSIKALISCH-TECHNISCHE BUNDESANSTALT, **Certificado de calibração**, 6.61/37/81 SB, fonte de  $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$  (1850 MBq), Alemanha, 1981b.

PIESCH, E. Application of TLD to personnel dosimetry. In: Oberhofer, M.; Scharmann, A. **Applied Thermoluminescence Dosimetry**. Luxembourg: Adam Hilger LTD, 1981.

SANDLER, M.P.; COLEMAN, R.E.; WACKERS, F.J.TH.; PATTON, J.A.; GOTTSCHALK, A.; HOFFER, P.B. **Diagnostic nuclear medicine**. Pensilvânia, 2ª ed. New York: Williams & Wilkins, 1995.

SARTORIS, C. E.; CALDAS, L. V. E. Aplicação de metodologia dosimétrica de feixes terapêuticos de raios X com sistema tandem. **Radiol. Bras.**, v. 34, n. 6, p. 337-342, 2001.

SCHARMANN, A.; BÖHM, M. Basic concepts of thermoluminescence. In: OBERHOFER, M.; SCHARMANN, A. **Health physics and radiation protection**. v. 2. Techniques and management of personnel thermoluminescence dosimetry services. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1993.

SCHRADER, H. **Activity measurements with ionization chambers**. Monographie BIPM-4. Bureau International des Poids et Mesures, Sèvres, France, 1997.

SCHRADER, H., WEIß, H. M. Calibration of radionuclide calibrators. **Int. J. Nucl. Med. Biol.**, v. 10, p. 121, 1983.

SCOTT, A. M. The state of the art in nuclear medicine. In: THE THIRD CONFERENCE ON NUCLEAR SCIENCE AND ENGINEERING IN AUSTRALIA. A nuclear renaissance. **Proceedings...** Australia, 1999. p. 71-73.

SELTZER, S. M. Calculated response of intrinsic germanium detectors to narrow beams of photons with energies up to ~300 keV. **Nucl. Instr. Meth.**, v. 188, p. 133-151, 1981.

SLOBODA, R. S.; SCHMID, M. G.; WILLIS, C. P. Technologist radiation exposures from nuclear medicine imaging procedures. **J. Nucl. Med. Tech.**, v. 15, p. 16-24, 1987.

SPURNY, Z.; MILU, C.; RACOVEANU, N. Comparison of X-ray beams using thermoluminescent dosimeters. **Phys. Med. Biol.**, v. 18, n. 2, p. 276-278, 1973.

TSOPELAS, C.; COLLINS, P. J.; BLEFARI, C. A. A simple and effective technique to reduce staff exposure during the preparation of radiopharmaceuticals. *J. Nucl. Med. Technol.*, v. 31, p. 37-40, 2003.

TYLER, D. K.; WOODS, M. J. Syringe calibration factors for the NPL secondary standard radionuclide calibrator for selected medical radionuclides. *Appl. Radiat. Isot.*, v. 59, p. 367-372, 2003.

WALKER, J. S. Permissible dose: a history of radiation protection in the twentieth century. *J. Nucl. Med.*, v. 43, n. 2, p. 281-283, 2002.

WILLIAMS, A.; BIRDSEYE, R. A. Calibration factors for the type 1383A  $\beta$ - $\gamma$  ionization chamber for low-energy  $\gamma$ -emitters. *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, v. 18, p. 202-203, 1967.

WOODS, M.J. Design considerations for the U.K. secondary standard radionuclide calibrator – Type 271 + 671. *Trans. Amer. Nucl. Soc.*, v. 53, p. 17, 1986.

WOODS, M. J. Calibration figures for the type 1383A ionization chamber. *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, v. 21, p. 752-753, 1970.

WOODS, M. J.; MUNSTER, A. S.; SEPHTON, J. P.; LUCAS, S. E. M.; PATON WALSH, C. Calibration of the NPL secondary standard radionuclide calibrator for  $^{32}\text{P}$ ,  $^{89}\text{Sr}$  and  $^{90}\text{Y}$ . *Nucl. Instr. Meth.*, v. A369, p. 698-702, 1996.

WOODS, M. J.; KEIGHTLEY, J. D.; CIOCANEL, M.; PATON WALSH, C. NPL secondary standard radionuclide calibrator: new calibration figures for  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{153}\text{Sm}$  and  $^{188}\text{Re}$ . *Appl. Radiat. Isot.*, v. 49, n. 9-11, p. 1191-1193, 1998.