

CNEN/SP

**ipen** Instituto de Pesquisas  
Energéticas e Nucleares

AUTARQUIA ASSOCIADA A UNIVERSIDADE  
DE SÃO PAULO

# DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DOSIMÉTRICO PARA FEIXES DE ELÉTRONS DE ENERGIAS ALTAS

**CLEBER NOGUEIRA DE SOUZA**

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

Orientador:  
Dra. Linda V. Ehlin Caldas

São Paulo  
1994

## Abstract

Two parallel- plates ionization chambers were projected, constructed and evaluated for use in high energy electron beams. They were constructed using the two plastic materials recommended for clinical dosimetry protocols, i.e., acrylic and polystyrene. Both chambers have cylindrical shape with entrance windows in aluminized Mylar and they are open to air. The acrylic chamber has a 2 mm air gap, and the polystyrene chamber has a 1 mm air gap.

Pre- and post-irradiation leakage, repeatability and long term stability were determined for these two ionization chambers. The ionic recombination and polarity effects, besides angular and energy dependencies, were also verified. The results obtained are within values recommended by IEC (1982) for this kind of ionization chamber.

The ionization chambers were calibrated in a 20 MeV electron beam and gamma radiation of Cobalto-60. The wall correction factors for the gamma radiation of Cobalt-60 were 1.014 and 1.000 for the acrylic and polystyrene chambers, respectively. The ionization chambers do not present energy dependence for the 6-20 MeV electron beam range. These results are comparable to commercially available ionization chambers.

The polystyrene parallel-plate ionization chamber was utilized to test a method that applies the electron backscattering effect to verify the electron beam energy. This method did not present enough sensitivity for electron beam energies higher than 9 MeV. For other electron beam energies, this method should be applied with care due to reproducibility problems.

Another method of electron energy verification was evaluated. This method uses two depths reading ratio. This method presented adequate sensitivity for a routine quality control program. The recommended depths, considering sensitivity and time for setup, were: 1 cm for the first depth for all energies, and 2 cm for 6 MeV, 4 cm for 9 and 12 MeV, and 7.5 cm for 16 and 20 MeV.



CNEVSP

**ipen**

Instituto de Pesquisas  
Energéticas e Nucleares

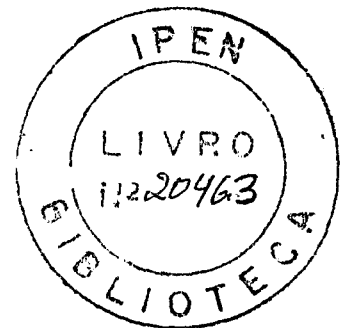
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE  
DE SÃO PAULO

## DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DOSIMÉTRICO PARA FEIXES DE ELÉTRONS DE ENERGIAS ALTAS

CLEBER NOGUEIRA DE SOUZA

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

Orientador: Dra. Linda V. Ehlin Caldas



São Paulo

1994

*À Carla,  
metade do meu ser.*

## Resumo

Duas câmaras de ionização de placas paralelas foram projetadas, construídas e avaliadas para a dosimetria de feixes de elétrons de altas energias. Cada uma das câmaras foi construída com um dos dois materiais plásticos recomendados pelos protocolos de dosimetria clínica: acrílico e poliestireno. Ambas as câmaras de ionização têm forma cilíndrica e são abertas às condições atmosféricas. A janela de entrada de cada uma delas é em Mylar aluminizado. A câmara de ionização em acrílico tem uma distância entre o eletrodo coletor e a janela de entrada de 2 mm, enquanto que na câmara de ionização em poliestireno esta distância é de 1 mm.

Para cada uma das câmaras de ionização foram verificadas corrente de fuga pré- e pós-irradiação, repetibilidade e estabilidade a longo prazo. Os efeitos de recombinação iônica e de polaridade, além das dependências angular e energética em feixes de elétrons, foram também verificados. Todos os resultados destas avaliações se enquadram dentro dos valores recomendados para câmaras de ionização deste tipo.

As câmaras de ionização foram calibradas em feixes de elétrons de 20 MeV e em feixe de radiação gama do Cobalto-60. Os fatores de correção de parede para o feixe de radiação gama do Cobalto-60 foram de 1,014 e 1,000 para as câmaras em acrílico e poliestireno, respectivamente. As câmaras de ionização não apresentam dependência energética na faixa de energia entre 6 e 20 MeV para feixes de elétrons. Estes resultados foram comparados aos de outras câmaras de ionização de placas paralelas importadas, e se comparam aos das melhores câmaras disponíveis no mercado.

A câmara de ionização de placas paralelas em poliestireno foi utilizada para teste de um método que aplica o efeito de retroespalhamento de elétrons para verificação da energia destes feixes. Este método de verificação de energia não apresentou sensibilidade adequada para feixes de elétrons com energia superior a 9 MeV. Para feixes de energias inferiores, o método deve ser aplicado com cuidados na reprodutibilidade da montagem.

Um outro método de verificação de energia de feixes de elétrons que emprega a razão entre leituras a duas profundidades foi também avaliado. Este método apresentou sensibilidade adequada para seu uso em um programa de controle de qualidade de rotina. As profundidades mais práticas de serem utilizadas, considerando a sensibilidade e o menor tempo a dispender para a verificação de feixes de energias nominais de 6, 9, 12, 16 e 20 MeV, foram: 1 cm para a primeira profundidade de medida para todos os feixes, e para a segunda profundidade, 2 cm para o feixe de 6 MeV, 4 cm para os feixes de 9 e 12 MeV e 7,5 cm para os feixes de 16 e 20 MeV.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço de forma especial à Dra. Linda V. E. Caldas pela orientação segura e dedicada, e pelas sugestões oportunas e discussões deste trabalho.

Ao Dr. Cláudio H. Sibata pelas discussões, incentivo e a oportunidade de desfrutar de sua inteligência e generosidade.

À Dra. Letícia L. L. Campos pela amizade e estímulo.

À amiga Maria Inês C. C. Guimarães pelo indispensável apoio.

Ao Marcos Xavier pelo auxílio técnico na construção das primeiras câmaras de ionização.

À Área de Física Médica do Centro de Engenharia Biomédica/Unicamp por nos ter possibilitado o acesso aos equipamentos radioterápicos desta universidade, e em especial ao físico Antônio Carlos Alexandre, M.Sc., pelo apoio inicial em nosso projeto de estágio no exterior.

Ao Roswell Park Cancer Institute, Buffalo/N.Y., na pessoa do Dr. Kyu H. Shin pela oportunidade de estágio em sua instituição e pela bolsa de estudo complementar ofertada, o que nos possibilitou o tempo necessário para conclusão deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo suporte financeiro para a realização deste trabalho.

# Sumário

Resumo .....	i
Abstract.....	ii
Agradecimentos .....	iv
Sumário .....	v
Lista de Figuras .....	vii
Lista de Tabelas .....	ix
Lista de Símbolos .....	x
Introdução.....	1
Capítulo 1 .....	4
Dosimetria de Feixes Clínicos de Elétrons.....	4
1.1. Grandezas Físicas Básicas .....	4
1.1.1. Fluência.....	4
1.1.2. Dose Absorvida.....	5
1.2. Teoria da Cavidade .....	7
1.2.1. Teoria de Bragg-Gray (NCRP, 1961) .....	7
1.2.2. Teoria de Spencer-Attix.....	9
1.3. Calibração de Câmaras de Ionização de Cavidade de Ar .....	10
1.3.1. Calibração de Câmaras de Ionização no Ar, $N_X$ .....	12
1.3.2. Determinação da Dose Absorvida para a Água no Feixe do Usuário.....	13
1.4. Feixes Clínicos de Elétrons .....	16
1.4.1. Distribuição da Dose Absorvida no Eixo Central do Feixe .....	16
1.4.2. Determinação da Energia de Feixes de Elétrons .....	17
1.4.3. Retroespalhamento em Feixes de Elétrons .....	22
1.5. Plásticos Equivalentes a Água para Dosimetria de Feixes de Elétrons .....	23
1.5.1. Conversão de Dose .....	23
1.5.2. Transformação de Alcance na Determinação de Energia.....	24
Capítulo 2 .....	27
Materiais e Métodos.....	27
2.1. Sistema de Medidas .....	27
2.1.1. Câmaras de Ionização e Eletrômetros Utilizados.....	27
2.1.2. Sistema de Aquisição de Dados Automático.....	29
2.2. Sistemas de Irradiação.....	31
2.2.1. Sistema de Irradiação Gama de Cobalto-60 .....	31
2.2.2. Sistema de Irradiação de Feixes de Elétrons.....	31



Capítulo 3 .....	35
Construção de Câmaras de Ionização de Placas Paralelas para Dosimetria de Feixes de Elétrons .....	35
3.1. Introdução .....	35
3.2. Objetivos .....	36
3.3. Câmara de Ionização em Acrílico (Câmara A).....	37
3.4. Câmara de Ionização em Poliestireno (Câmara P).....	42
 Capítulo 4 .....	 45
Avaliação das Câmaras de Ionização de Placas Paralelas .....	45
4.1. Testes Operacionais.....	45
4.1.1. Estabilidade de Curto e Médio Prazos .....	46
4.1.2. Corrente de Fuga .....	47
4.2. Eficiência de Coleção de Íons .....	47
4.3. Dependência Angular .....	50
4.3.1. Teste de Dependência Angular da Câmara de Ionização Cilíndrica de Referência .....	52
4.3.2. Teste de Dependência Angular das Câmaras de Ionização de Placas Construídas .....	53
4.4. Efeito de Polaridade .....	56
4.4.1. Influência da Profundidade e Energia no Efeito de Polaridade .....	57
4.4.2. Influência do Tamanho de Campo no Efeito de Polaridade .....	61
4.5. Efeito da Irradiação do Cabo na Resposta das Câmaras - $Q_{real}$ .....	64
 Capítulo 5 .....	 66
Calibração das Câmaras de Ionização de Placas Paralelas .....	66
5.1. Introdução .....	66
5.2. Calibração em Feixe de Radiação Gama de Cobalto-60 .....	69
5.3. Calibração em Feixe de Elétrons de 20 MeV .....	71
5.4. Comparação Entre os Métodos de Calibração das Câmaras .....	71
5.5. Estudo do Fator de Correção de Fluência.....	76
 Capítulo 6 .....	 80
Verificação da Energia de Feixes de Elétrons .....	80
6.1. Introdução .....	80
6.2. Objetivos .....	82
6.3. Estudo do Fator de Retroespalhamento.....	83
6.4. Avaliação da Sensibilidade do Método da Razão Entre Leituras à Duas Profundidades .....	94
 Capítulo 7 .....	 101
Conclusões e Recomendações .....	101
 Referências Bibliográficas .....	 104

## Lista de Figuras

Figura 1.1: Curva de dose no eixo central para um feixe de elétrons com os parâmetros que caracterizam o feixe.....	19
Figura 2.1: Curvas de dose em profundidade em água dos feixes de elétrons do acelerador linear 2100C.....	34
Figura 3.1: Representação esquemática da câmara construída em acrílico.....	38
Figura 3.2. Representação esquemática de um cabo triaxial com três camadas semicondutoras.....	42
Figura 3.3: Representação esquemática da câmara construída em poliestireno.....	44
Figura 4.1: Teste de estabilidade de longo prazo das câmaras de ionização de placas paralelas: (a) câmara A e (b) câmara P.....	48
Figura 4.2: Variação da eficiência de coleção de íons, determinada pelo método de BOAG & CURRANT (1980), com a voltagem para o feixe de radiação pulsada de elétrons de 20 MeV para as câmaras em acrílico e poliestireno à taxa de dose de 400 cGy/minuto.....	52
Figura 4.3: Dependência angular da câmara em poliestireno para os feixes de elétrons de (a) 6 MeV e (b) 20 MeV.....	56
Figura 4.4: Dependência angular da câmara em acrílico para os feixes de elétrons de (a) 6 MeV e (b) 20 MeV.....	57
Figura 4.5: Efeito de polaridade, $F_{pol+}$ , para a câmara em acrílico para diferentes energias de feixes de elétrons.....	59
Figura 4.6: Efeito de polaridade, $F_{pol+}$ , para a câmara em poliestireno para diferentes energias de feixes de elétrons.....	60
Figura 4.7: Razões entre as respostas sob polaridades opostas de diferentes câmaras de ionização de placas paralelas comerciais publicadas.....	61
Figura 4.8: Influência do tamanho de campo sobre o efeito de polaridade para a câmara em acrílico para as energias de de elétrons de 6 , 9 e 20 MeV.....	63
Figura 4.9: Influência do tamanho de campo sobre o efeito de polaridade para a câmara em poliestireno para as energias de feixes de elétrons de 6 , 9 e 20 MeV.....	64
Figura 4.10: Representação esquemática da montagem utilizada para avaliação do efeito de irradiação do cabo da câmara de ionização: (a) cabo não protegido e (b) cabo protegido.....	66

Figura 5.1: Representação esquemática da montagem para a calibração das câmaras de ionização em feixe de radiação gama do Co-60 para um tamanho de campo de 10x10 cm <sup>2</sup> à SSD= 100 cm e profundidade d= 5 cm.....	71
Figura 5.2: Representação esquemática da montagem para a calibração das câmaras de ionização em feixe de elétrons de diferentes energias para um tamanho de cone localizador de 15x15 cm <sup>2</sup> à SSD= 100 cm e profundidade d variável, de acordo, com a energia do feixe.....	73
Figura 6.1: Representação esquemática da montagem para medida do efeito de retroespalhamento em chumbo.....	86
Figura 6.2: Variação do fator de retroespalhamento com a energia dos feixes de elétrons na superfície espalhadora em chumbo. Para cada curva foi utilizada a energia inicial do feixe à superfície.....	87
Figura 6.3: Representação esquemática da montagem utilizada para dosimetria do feixe degradado por placas de poliestireno.....	89
Figura 6.4: Variação do fator de retroespalhamento com a energia média na superfície do simulador para diferentes profundidades do espalhador.....	92
Figura 6.5: Curva da sensibilidade do fator de retroespalhamento à degradação dos feixes de elétrons.....	93
Figura 6.6: Curva da sensibilidade da razão entre leituras à duas profundidades à degradação dos feixes de elétrons.....	94
Figura 6.7: Curva comparativa da sensibilidade do método de verificação de energia a duas profundidades para diferentes regiões da curva em profundidade: $d_1$ = profundidade antes de $d_{max}$ , $d_2$ = $d_{max}$ , $d_3$ = profundidade imediatamente após $d_{max}$ , $d_4$ = profundidade antes de $d_{50}$ e $d_5$ = profundidade após $d_{50}$ - para o feixe de energia nominal de 6 MeV .....	98
Figura 6.8: Curva comparativa da sensibilidade do método de verificação de energia a duas profundidades para diferentes regiões da curva em profundidade: $d_1$ = profundidade antes de $d_{max}$ , $d_2$ = $d_{max}$ , $d_3$ = profundidade imediatamente após $d_{max}$ , $d_4$ = profundidade antes de $d_{50}$ e $d_5$ = profundidade após $d_{50}$ - para o feixe de energia nominal de 20 MeV .....	99

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Características físicas das câmaras de ionização utilizadas.....	29
Tabela 2.2: Parâmetros clínicos dos feixes de elétrons utilizados neste estudos.....	35
Tabela 3.1: Características físicas das câmaras de ionização de placas paralelas construídas.....	45
Tabela 5.1: Valores numéricos dos parâmetros de correção das câmaras cilíndrica e plano-paralela utilizadas como referência nos diferentes feixes.....	70
Tabela 5.2: Razões entre os fatores de calibração das câmaras de ionização de placas paralelas determinados em feixe de Cobalto-60 e elétrons de 20 MeV contra as câmaras cilíndrica e Memorial-Holt.....	74
Tabela 5.3: Razões entre os fatores de calibração da câmara de ionização de placas paralelas Memorial-Holt em feixe de fótons do Cobalto-60 e feixes de elétrons de energia superior a 18 MeV determinados por diferentes autores por intercomparação com câmara cilíndrica.....	74
Tabela 5.4: Valores de $N_{\text{gas}}$ ( $\times 10^7$ Gy/C) para os métodos utilizados e de $N_{\text{gas}}$ normalizado para o valor determinado em feixes de elétrons de 20 MeV .....	76
Tabela 5.5: Fator de correção de fluência para diversas câmaras de ionização de placas paralelas para diversas energias (MeV) de feixes de elétrons .....	80
Tabela 6.1: Parâmetros do feixe de 6 MeV em função da inserção de degradadores em poliestireno .....	90
Tabela 6.2: Parâmetros do feixe de 20 MeV em função da inserção de degradadores em poliestireno .....	91
Tabela 6.3: Profundidades utilizadas para avaliar a sensibilidade do método de verificação de energia a duas profundidades para as diferentes energias de feixes de elétrons.....	97

## Lista de Símbolos

$A$ : número de massa atômica

$a$ : vetor unitário de direção perpendicular ao elemento de superfície  $ds$

$$A_{ion} = P_{ion}^{-1}$$

$D$ : dose absorvida

$d$ : profundidade

$da$ : seção reta de uma esfera

$D_{\text{água}}$ : dose absorvida para a água

$D_{cav}$ : dose absorvida na cavidade de ar

$d_m$ : elemento de massa

$d_{max}$ : profundidade de ionização máxima

$D_{max}$ : dose absorvida máxima

$D_{plástico}$ : dose absorvida para o plástico

$D_{parede}$ : dose absorvida na parede vizinha da cavidade de ar

$D_s$ : dose absorvida superficial 0,5 mm de profundidade

$ds$ : elemento de superfície

$d\vec{s}$ : elemento de área

$D_x$ : componente de raios-X em feixes de elétrons

$d_o$ : profundidade de referência

$d_{50}$ : profundidade correspondente metade da ionização máxima

$e$ : carga eletrônica

$E$ : energia das partículas

$\bar{E}$ : energia média do espectro de fluência planar

$E_{max}$ : energia máxima do espectro de elétrons

$E_p$ : energia mais provável do espectro de energia dos elétrons

$(E_p)_o$ : energia mais provável do espectro de energia dos elétrons na superfície

$(E_p)_z$ : energia mais provável na profundidade  $z$

$\bar{E}_o$ : energia média do espectro de energia dos elétrons na superfície

$\bar{E}_z$ : energia média na profundidade  $z$

$F_{pol}$ : fator de correção da polaridade de câmara de ionização

$FR$ : fator de retroespalhamento

$g$ : fração da energia das partículas carregadas transformadas em *bremstrahlung* no ar

$G_o$ : gradiente de dose normalizado

$k_{at}$ : correção para atenuação de absorção e espalhamento dos fótons na parede da câmara e capa de *build-up*

$k_{cel}$ : correção da não equivalência do material do eletrodo coletor de uma câmara de ionização cilíndrica  
 $k_m$ : correção para não equivalência ao ar dos materiais da parede da câmara e da capa de *build-up*  
 $M$ : leitura do eletrômetro (carga)  
 $m$ : massa do material  
 $m_{cav}$ : massa da cavidade  
 $N$ : número de partículas incidentes  
 $N_D$ : fator de dose absorvida de uma câmara de ionização preenchida com ar (de acordo com AAPM, 1983)  
 $N_{gas}$ : fator de dose absorvida de uma câmara de ionização preenchida com ar (de acordo com AIEA, 1987)  
 $N_x$ : fator de calibração da câmara de ionização  
 $P_{cel}$ : correção para a não equivalência do material do eletrodo coletor da câmara ao ar  
 $P_{ff}$ : fator de correção de fluência das partículas  
 $P_{ion}$ : correção de recombinação de íons  
 $P_{parede}$ : correção para a composição da parede da câmara e do meio  
 $P_{rep}$ : fator de correção do efeito de gradiente da dose absorvida  
 $Q$ : carga de um único sinal produzida pela radiação ionizante  
 $Q_{real}$ : ionização média real  
 $Q_-$ : leitura (carga) da câmara de ionização polaridade negativa  
 $Q_+$ : leitura (carga) da câmara de ionização polaridade positiva  
 $R_{cil}$ : razão entre as respostas da câmara de ionização cilíndrica para o qualquer ângulo de incidência e o ângulo de incidência  $0^\circ$   
 $R_p$ : alcance prático  
 $R_{pp}$ : razão entre as respostas da câmara de ionização de placas paralelas para qualquer ângulo de incidência e o ângulo de incidência  $0^\circ$   
 $R_t$ : alcance terapêutico  
 $r_o$ : comprimento médio de percurso de um elétron  
 $R_{50}$ : profundidade correspondente metade da dose máxima  
 $R_{85}$ : profundidade correspondente 85% da dose máxima  
 $R_{100}$ : profundidade de dose máxima em água  
 $\bar{s}$ : comprimento de percurso médio na esfera  
 $\bar{S}_{col}$ : poder de freamento de colisão  
 $\bar{S}_{col,\Delta}$ : poder de freamento de colisão restrito  
 $\bar{S}_{cav}^m$ : razão entre os poderes de freamento de massa dos meios  
 $\bar{S}_{cav}^{parede}$ : razão entre os poderes de freamento do material da parede e da cavidade  
 $V$ : volume da esfera

X: exposição

$\bar{W}$ : energia média necessária para produzir uma ionização em uma molécula da cavidade de ar

Z: número atômico

z: profundidade

$\alpha$ : fração da ionização dentro da câmara devido aos elétrons originados da parede

$\Delta$ : valor da energia de corte

$\Delta\%$ : variação percentual da dependência angular das câmaras de ionização

$\bar{\varepsilon}_v$ : energia média depositada

$\Phi$ : fluência das partículas primárias

$\Phi_{E,\Omega}$ : fluência diferencial em energia e ângulo

$\Phi_{\text{plástico}}^{\text{água}}$ : razão da fluência de elétrons em  $d_{\text{max}}$  na água para aquela no plástico

$\Gamma$ : largura da distribuição de energia na metade do valor máximo

$(\mu_{en}/\rho)_{\text{parede,ar}}$ : razão dos coeficientes de absorção de energia da parede para o ar

$(\mu_{en}/\rho)_{\text{capa,ar}}$ : razão dos coeficientes de absorção de energia da capa de build-up para o ar

$\rho$ : densidade

$\rho(\vec{r})$ : densidade do material no ponto  $r$

$\vec{\Psi}(\vec{r})$ : fluência vetorial em energia no ponto  $r$

## Introdução

O emprego de radiação ionizante com objetivos terapêuticos (radioterapia) ocorre em aproximadamente 60% dos tumores malignos que acometem a população (PEREZ & BRADY, 1992). Nesta prática, quantidades grandes de radiação são aplicadas utilizando técnicas cuidadosamente planejadas. Estas técnicas requerem uma dosimetria exata e confiável, pois existem evidências de que, pelo menos para alguns tipos de tumores, uma variação da dose absorvida no tumor de  $\pm 5\%$  pode ser a diferença entre falha e controle local da doença (ICRU, 1976).

Para a maior parte dos tratamentos, os feixes de radiação externa são liberados utilizando fótons e elétrons entre 1 e 50 MeV (ICRU, 1976). A determinação exata da intensidade do feixe nas distâncias usuais de irradiação é necessária para se estabelecer a dose liberada no ponto de interesse. Além disto, os perfis de dose absorvida como uma função da profundidade ao longo do eixo do raio central e através do feixe são necessários para se caracterizar suficientemente o feixe e fornecer as informações necessárias para o planejamento de um tratamento por radiação.

A dosimetria das radiações ionizantes consiste de medidas de exposição ou da dose absorvida resultantes da interação da radiação com a matéria. O método mais comum para tais medidas em feixes de radiação X, radiação gama ou de elétrons utiliza câmaras de ionização preenchidas com ar. Dois outros métodos podem ser usados



para se determinar a dose absorvida com a exatidão adequada para radioterapia: dosímetro de sulfato ferroso (ou de Fricke) e calorímetro. Entretanto, ambos os métodos são dispendiosos economicamente e requerem cuidados práticos inadequados para seu uso de rotina (ALMOND, 1967). O método ionométrico, pela sua simplicidade, facilidade de utilização e exatidão em medidas de exposição e na determinação da dose absorvida, vem sendo o mais utilizado e recomendado pelos protocolos internacionais de dosimetria clínica de feixes de fótons e elétrons (NACP, 1980; NACP, 1981; AAPM, 1983; ICRU, 1984; SEFM, 1984; HPA, 1985; IAEA, 1987; SEFM, 1987).

Nos últimos anos, o nível de exatidão na determinação da dose absorvida por este método, de forma geral, aumentou com a adoção de cálculos aperfeiçoados da razão do poder de freamento de massa dos materiais e de grandezas básicas relacionadas ( $\overline{W}/e$  e  $g$ ) (ICRU, 1984). Para uma maior exatidão das medidas em feixes de elétrons com energias inferiores a 15 MeV, em especial, as câmaras de ionização de placas paralelas têm sido recomendadas como as mais adequadas pelos protocolos de dosimetria clínica. Esta recomendação se baseia no fato de que este tipo de câmara de ionização, se projetada com dimensões internas e externas específicas, e utilizada em simulador do mesmo material de que é construída, requer um número menor de fatores de correção para determinação da dose absorvida do que as câmaras de ionização cilíndricas, em geral, empregadas. Além disto, seu ponto efetivo de medida é bem definido na superfície interna da janela de entrada.

Atualmente, em nosso país, o interesse por uma câmara de ionização deste tipo tem aumentado, uma vez que tem crescido a disponibilidade de equipamentos de radioterapia que produzem feixes de elétrons. Embora vários projetos nacionais de câmaras de ionização já tenham sido realizados, estes se restringiram a aplicações em dosimetria de fótons (CAMPOS, 1982; RODRIGUES *et al.*, 1986; AUSTERLITZ *et al.*, 1987) e de radiação beta (SILVA, 1985). Mais recentemente, um outro projeto de câmara de ionização de placas paralelas para dosimetria de feixes de raios X foi

concluído (ALBUQUERQUE, 1989). Nenhum destes projetos, no entanto, foi direcionado, especificamente, para a dosimetria de feixes de elétrons de alta energia.

O presente trabalho pretendeu projetar, construir e avaliar as características operacionais de uma câmara de ionização de placas paralelas, que possibilitasse a dosimetria e calibração de feixes de elétrons de alta energia, utilizando materiais, preferencialmente nacionais, e que resultasse em um instrumento de baixo custo, acoplável aos diversos tipos de eletrômetros disponíveis nos serviços de radioterapia do país. Além disto, este trabalho pretendeu testar um novo método para avaliação da energia média de feixes de elétrons.

# Capítulo 1

## Dosimetria Clínica de Feixes de Elétrons

Este capítulo aborda os fundamentos teóricos a respeito da dosimetria clínica de feixes de elétrons de alta energia. São apresentadas definições de algumas grandezas básicas e os parâmetros e procedimentos adotados pelos protocolos recentes na dosimetria de elétrons.

### 1.1. Grandezas Dosimétricas Básicas

#### 1.1.1. Fluência

Fluência  $\Phi$  é a razão entre o número das partículas incidentes  $dN$  em uma esfera e a secção reta  $da$  desta esfera (ICRU, 1980):

$$\Phi = \frac{dN}{da} \quad (1.1)$$

Uma definição mais geral de  $\Phi$  pode ser obtida (CHILTON, 1978; CHILTON 1979). Multiplicando ambos os fatores da equação anterior pelo comprimento de corda médio

da esfera,  $\bar{l} = 4V / a$ , onde  $V$  é o volume da esfera e  $a$  a área da esfera, teremos que  $\bar{l}dN$  corresponderá ao comprimento de percurso médio  $d\bar{s}$  na esfera, e  $\bar{l}da$  corresponderá ao volume  $dV$  da esfera. Assim obtém-se:

$$\Phi = \frac{d\bar{s}}{dV} \quad (1.2)$$

A fluência é agora definida como o a razão entre o comprimento médio de traço e a unidade de volume, e independe da forma do volume.

O conceito de fluência é generalizado definindo uma fluência diferencial em energia e ângulo  $\Phi_{E,\Omega}(\vec{r})$  no ponto  $\vec{r}$ , de tal forma que  $\Phi_{E,\Omega}(\vec{r})dEd\Omega$  contém todas as partículas com energia entre  $E$  e  $E + dE$  com ângulos sólidos no intervalo  $\Omega$  e  $\Omega + d\Omega$ . Dessa maneira, a fluência diferencial em energia é definida como:

$$\Phi_E(\vec{r}) = \iint E\Phi_{E,\Omega}(\vec{r})dEd\Omega \quad (1.3)$$

A fluência vetorial em energia  $\vec{\Psi}$  no ponto  $\vec{r}$  pode ser definida da seguinte maneira:

$$\vec{\Psi}(\vec{r}) = \iint \Omega E\Phi_{E,\Omega}(\vec{r})dEd\Omega \quad (1.4)$$

### 1.1.2. Dose Absorvida

A grandeza dose absorvida  $D$  em um ponto em um determinado material é definida como a razão entre o valor limite da energia média  $\bar{\epsilon}_v$  depositada pela radiação ionizante num material e a massa  $m$  do material, quando o volume de interesse ou a massa se aproxima de zero (ICRU, 1980):

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (1.5)$$

O produto interno de  $\vec{\Psi}(\vec{r})$  e um elemento de área  $d\vec{s}$  resulta no fluxo líquido de energia através da área na direção do vetor  $d\vec{s}$ , ou seja, a energia média depositada representa a diferença líquida entre a energia transportada para dentro e a energia transportada para fora do elemento de massa  $dm$ , não levando em consideração as transformações nucleares (ROSSI & ROESCH, 1962). Uma equação pode ser obtida para a energia média depositada  $\bar{\epsilon}_v$  aplicando a fluência vetorial em energia:

$$\bar{\epsilon}_v = -\iint_V \vec{\Psi}(\vec{r}) d\vec{s} \quad (1.6)$$

onde  $d\vec{s} = ds \cdot \hat{a}$ , sendo  $\hat{a}$  o vetor unitário de direção perpendicular ao elemento de superfície  $ds$  e apontando para fora do volume  $V$ .

Aplicando o teorema de Gauss à equação (1.6), que estabelece, neste caso, que a energia depositada pode ser expressa pela divergência da fluência vetorial de energia, e considerando um elemento de volume suficientemente pequeno, a equação (1.5) permite que se obtenha (SVENSSON & BRAHME, 1981),

$$D(\vec{r}) = \frac{-1}{\rho(\vec{r})} \text{div} \vec{\Psi}(\vec{r}) \quad (1.7)$$

Considerando que  $\Phi(\vec{r})$  contenha a fluência total dos elétrons e aplicando a equação (1.4), a dose absorvida torna-se:

$$D(\vec{r}) = \frac{-1}{\rho(\vec{r})} \iiint \left[ \Omega \Phi_{E,\Omega}(\vec{r}) \text{grad}(E) + E \Omega \text{grad}(\Phi_{E,\Omega}) \right] dE d\Omega \quad (1.8)$$

Considerando  $E$  uma variável dependente das coordenadas  $ds$  da partícula e depois da integração de  $\bar{\Omega}$ , a equação (1.8) torna-se:

$$D(\vec{r}) = - \int \left[ \frac{1}{\rho(\vec{r})} \frac{dE}{ds} \Phi_E(\vec{r}) + \frac{E}{\rho(\vec{r})} \frac{d\Phi_E(\vec{r})}{ds} \right] \quad (1.9)$$

onde o sinal negativo compensa o fato de que uma perda de energia ao longo do traço da partícula  $ds$  resulta em deposição de energia positiva. Esta relação mostra que a deposição de energia por uma partícula pode ocorrer de duas formas diferentes: (i) como uma perda quase contínua de energia (primeiro termo) e (ii) como uma perda instantânea de energia de fim de traço (segundo termo).

## 1.2. Teoria da Cavidade

A medida absoluta de dose absorvida pode ser realizada por três diferentes métodos: (i) calorimetria, (ii) dosimetria química por sulfato ferroso (Fricke) e (iii) dosimetria por intermédio de ionização em cavidade de ar. A maioria dos laboratórios padrão emprega a dosimetria em cavidade de ar como o método de referência. Neste método, a carga elétrica produzida em uma cavidade de ar permite a determinação da dose absorvida utilizando a relação de Bragg-Gray.

### 1.2.1. Teoria de Bragg-Gray (NCRP, 1961)

Para se determinar a dose absorvida em um meio, exposto à radiação ionizante, um objeto sensível à radiação deve ser introduzido neste meio. Este objeto, de maneira geral, constituir-se-á em uma descontinuidade no meio, uma vez que estes vão diferir em densidade e número atômico. De acordo com a teoria de Bragg-Gray, esta descontinuidade pode ser um gás, um líquido ou um sólido, e é referida, de maneira geral, como uma cavidade. Considerando uma pequena cavidade de gás inserida em um meio, onde se pretende determinar a dose absorvida, a carga  $Q$  de um único sinal produzida pela ionização em uma pequena massa da cavidade  $m_{cav}$  pode ser medida e relacionada à energia média  $\bar{W}$  necessária para produzir uma ionização em uma molécula da cavidade. Assim, a dose absorvida na cavidade  $D_{cav}$  pode ser dada pela equação:

$$D_{cav} = \frac{Q}{m_{cav}} \bar{W} \quad (1.10)$$

Para a determinação da dose absorvida em um outro meio, a teoria de Bragg-Gray utiliza as seguintes hipóteses básicas: (i) a fluência de elétrons na parede vizinha à pequena massa da cavidade é igual à fluência na cavidade e (ii) considera-se que a cavidade é pequena o suficiente para que o espectro de energia dos elétrons não seja perturbado. Além disto, a Teoria de Bragg-Gray postula que a energia da radiação ionizante é absorvida por intermédio de uma dissipação contínua de energia (*continuous slowing down approximation - CSDA*). Isto significa que cada quantum de energia transferido é absorvido localmente. O primeiro termo da equação geral de dose absorvida - eq. (1.9), representa este fenômeno:

$$D_{cav} = \int_0^{E_{max}} \frac{S_{col}}{\rho} \Phi_E^{parede} dE \quad (1.11)$$

sendo  $S_{col}/\rho$  o poder de freamento de massa total e  $\Phi$  a fluência das partículas primárias, isto é, os fótons e os primeiros elétrons gerados. Para a determinação da dose na parede vizinha à cavidade  $D_{parede}$  tem-se a seguinte relação, conhecida como relação de Bragg-Gray:

$$\frac{D_{parede}}{D_{cav}} = \frac{\int (S_{col}/\rho)_{parede} \Phi dE}{\int (S_{col}/\rho)_{cav} \Phi dE} = \bar{S}_{cav}^{parede} \quad (1.12)$$

$\bar{S}_{cav}^{parede}$  representa a razão entre os poderes de freamento médio de cada meio ponderado pela fluência dos elétrons primários. Na aplicação desta teoria, em dosimetria com câmara de ionização, o material da cavidade é um gás.

### 1.2.2. Teoria de Spencer-Attix

Os resultados experimentais demonstram que a Teoria de Bragg-Gray não prediz exatamente a ionização em cavidades de ar, principalmente se as paredes das cavidades forem de materiais de número atômico alto (ATTIX *et al.*, 1958). SPENCER & ATTIX (1955) apresentaram uma outra abordagem para a teoria da cavidade que concorda melhor com os resultados experimentais.

Esta teoria da cavidade parte das mesmas hipóteses básicas da Teoria de Bragg-Gray; entretanto, o espectro dos elétrons gerados na vizinhança do meio é dividido em duas faixas de energia, segundo um parâmetro de energia de corte,  $\Delta$ . Assim, existe um grupo de elétrons lentos que apresenta energia menor que  $\Delta$  e um alcance nulo, depositando sua energia no local onde é gerado. Existe um outro grupo de elétrons rápidos com energia maior ou igual a  $\Delta$ , que pode atravessar a cavidade e transportar sua energia além do local onde são produzidos.

A dose absorvida em um ponto no meio é dada, neste caso, por:

$$D = \int_{\Delta}^{E_{\max}} (S_{col,\Delta} / \rho) \Phi_E dE \quad (1.13)$$

$(S_{col,\Delta} / \rho)$  é o poder de freamento de massa por colisão, restrito a perdas de energia menores que a energia de corte  $\Delta$ . Somente os elétrons produzidos com energia menor que  $\Delta$  contribuem para a dose no local onde são produzidos. O valor de  $\Delta$  foi arbitrariamente considerado como a energia cinética dos elétrons que apresentam um alcance projetado suficiente para apenas atravessar a cavidade; no entanto, a teoria não é muito sensível ao valor de  $\Delta$  (SVENSSON & BRAHME, 1986).



### 1.3. Calibração de Câmaras de Ionização de Cavidade de Ar

O método mais comumente utilizado para dosimetria das radiações é por ionização de um gás. Neste método, o instrumento que mede a ionização do gás consiste em uma cavidade de ar envolvida por uma parede, em geral, de carbono ou outro material que apresente número atômico semelhante ao ar. A carga gerada neste volume de ar é coletada e medida por intermédio de um eletrômetro acoplado, e relacionada à dose absorvida por intermédio da relação de Bragg-Gray, eq. (1.12).

Em dosímetros deste tipo é necessário que algumas correções sejam aplicadas à ionização medida. Isto acontece por duas razões: (i) para que a câmara de ionização apresente uma sensibilidade conveniente, seu tamanho pode ser tal que ocorra uma variação da dose absorvida ao longo da mesma, por causa da atenuação do feixe e (ii) a fluência de elétrons no volume de ar poderá ser diferente daquela do meio por causa das diferenças entre a composição e a densidade dos meios (BOAG, 1966).

O efeito de atenuação do feixe pode ser corrigido aplicando-se um fator de correção do gradiente de dose (CUNNINGHAM & SONTAG, 1980). Uma outra maneira de corrigir o efeito de atenuação consiste na troca do centro geométrico da câmara como ponto referência de medida para um ponto efetivo de medida deslocado deste centro,  $P_{ef}$  (DUTREIX & DUTREIX, 1966). De acordo com cálculos teóricos (ATTIX, 1986), o ponto efetivo de medida estaria deslocado de 0,85 do raio  $r$  da câmara na direção do foco de radiação. Entretanto, uma discussão recentemente apresentada sugere o valor de  $0,50.r$  como o mais adequado para dosimetria de elétrons (AAPM, 1991). Este tipo de correção não se aplica para câmaras de ionização de placas paralelas, pois, para estas, o seu ponto efetivo de medida é definido na superfície interna da janela de entrada (SKAGGS, 1949).

A perturbação da fluência dos elétrons ocorre porque são diferentes o número de elétrons e comprimentos de traços de elétrons na cavidade de ar de uma câmara de ionização e no mesmo volume de material do meio. Estas diferenças são devidas a dois

efeitos. O primeiro efeito é causado pelo fato que o número de elétrons espalhados do meio para dentro da cavidade é maior que o número de elétrons espalhados pelo ar para fora da cavidade. Dessa maneira, a dose no gás é maior do que seria produzida pela fluência não perturbada no material do meio. O segundo efeito origina-se do fato de que o comprimento de traço dos elétrons que atravessam a cavidade é menor que em um mesmo volume do meio, pois no gás os elétrons sofrem menos espalhamento e seus traços apresentam trajetória mais retilínea (HARDER, *Apud* ATTIX, 1986). Estes dois efeitos dependem da geometria e das dimensões da câmara de ionização, e, praticamente, não ocorrem em câmaras de ionização de placas paralelas.

Assim a dose absorvida  $D_m$  em um um ponto de interesse  $P$  em um meio  $m$ , a partir da dose absorvida  $D_{cav}$  em uma cavidade de ar, pode ser dada pela relação de Bragg-Gray - (eq. 1.12), corrigida da seguinte forma:

$$D_m = D_{cav} \cdot \bar{S}_{cav}^m \cdot P_{rep} \quad (1.14)$$

onde  $\bar{S}_{cav}^m$  é a razão entre os poderes de freamento de massa médio nos dois meios,  $P_{rep}$  corrige o efeito de gradiente da dose absorvida e para a perturbação de fluência de elétrons (AAPM, 1983).

O formalismo para dosimetria de feixes de elétrons com câmara de ionização preenchida com ar, adotado pela maioria dos protocolos recentes de dosimetria (NACP, 1980; NACP, 1981; AAPM, 1983; ICRU, 1984; SEFM, 1984; HPA, 1985; IAEA, 1987; SEFM, 1987; AAPM, 1991), compreende um procedimento de duas etapas: (i) a determinação do fator de calibração de dose absorvida para o ar, a partir da calibração da câmara em um laboratório padrão e (ii) a aplicação da relação de Bragg-Gray modificada por Spencer-Attix para a determinação da dose absorvida para a água no feixe do usuário.

### 1.3.1. Determinação do Fator de Calibração de Câmaras de Ionização no Ar, $N_x$

Em um laboratório padrão, a medida absoluta da carga por unidade de massa, produzida em uma câmara de ionização de referência, determina a exposição no feixe de radiação. Na maioria dos laboratórios padrão, utiliza-se um feixe de radiação gama de Cobalto-60 e a seguinte relação determina a exposição,  $X$ , para a câmara de referência (NACP, 1980; NACP, 1981; AAPM, 1983; ICRU, 1984; SEFM, 1984; HPA, 1985; IAEA, 1987; SEFM, 1987; AAPM, 1991):

$$X = \frac{Q}{m_{cav}} \prod_i k_i \quad (1.15)$$

onde  $Q$  é a carga coletada por unidade de massa de ar da cavidade da câmara  $m_{cav}$  e  $k_i$  encerra vários fatores de conversão e correção - entre os quais, atenuação dos fótons da radiação gama na parede da câmara de referência, não equivalência da parede da câmara de referência ao ar, conteúdo de umidade do ar, temperatura e pressão ambientais, perdas por recombinação de íons.

O fator de calibração da câmara de ionização do usuário,  $N_x$ , no feixe de calibração é determinado por:

$$N_x = \frac{X}{M} \quad (1.16)$$

onde  $M$  é a leitura do eletrômetro para o dosímetro, normalizado para a temperatura e pressão de referência. De acordo com o protocolo de dosimetria adotado, o fator de calibração da câmara a ser utilizado pode ser em *kerma* no ar,  $N_K$ . A relação entre  $N_x$  e  $N_K$  é dada por:

$$N_x = \frac{N_K(1-g)}{(\overline{W}/e)} \quad (1.17)$$

onde  $(\bar{W}/e)$  é o quociente da energia média necessária para produzir um par de íons pela carga eletrônica, e  $g$  é a fração de energia das partículas carregadas transformada em *bremstrahlung* no ar. Alguns laboratórios padrão fornecem a calibração da câmara em *kerma* no ar.

### 1.3.2. Determinação da Dose absorvida para a Água no Feixe do Usuário

O fator da dose absorvida em uma câmara de ionização preenchida com ar,  $N_D$ , que equivale ao  $N_{gas}$  no protocolo americano, é derivado diretamente do fator de calibração da câmara,  $N_K$  ou  $N_X$ , determinado pelo laboratório padrão, conforme a seguinte expressão:

$$N_D = N_K \cdot (1 - g) \cdot A_{ion} \cdot k_{at} \cdot k_{cel} \cdot k_m = N_X \cdot (\bar{W}/e) \cdot A_{ion} \cdot k_{at} \cdot k_{cel} \cdot k_m \quad (1.18)$$

onde  $A_{ion}$  corresponde à eficiência de coleção de íons,  $k_{at}$  é um fator teórico e considera a absorção e espalhamento dos fótons primários na parede da câmara e na capa de equilíbrio eletrônico,  $k_{cel}$  é uma correção para a não equivalência do material do eletrodo coletor de uma câmara cilíndrica ao ar, e  $k_m$  leva em conta a não equivalência ao ar dos materiais da parede da câmara e da capa de equilíbrio eletrônico no feixe de calibração do Cobalto-60, e é dado por:

$$k_m = \alpha \cdot \left( \bar{S}_{col,\Delta} / \rho \right)_{parede}^{ar} \cdot \left( \bar{\mu}_{en} / \rho \right)_{parede}^{ar} + (1 - \alpha) \cdot \left( \bar{S}_{col,\Delta} / \rho \right)_{capa}^{ar} \cdot \left( \bar{\mu}_{en} / \rho \right)_{ar}^{capa} \quad (1.19)$$

onde  $\left( \bar{S}_{col,\Delta} / \rho \right)_{parede}^{ar}$  é a razão entre os poderes de freamento médio restrito do ar e do material da parede da câmara (a média é tomada sobre o espectro de energia total dos elétrons no ponto de medida, de acordo com a teoria de SPENCER & ATTIX, 1955),  $\left( \bar{S}_{col,\Delta} / \rho \right)_{capa}^{ar}$  tem o mesmo significado de  $\left( \bar{S}_{col,\Delta} / \rho \right)_{parede}^{ar}$  mas considera o material da capa de equilíbrio eletrônico,  $\left( \bar{\mu}_{en} / \rho \right)_{ar}^{parede}$  é a razão entre os

coeficientes de absorção de energia da parede e do ar,  $(\bar{\mu}_{en}/\rho)_{ar}^{capa}$  é a razão dos coeficientes de absorção de energia da capa de equilíbrio eletrônico e do ar,  $\alpha$  é a fração da ionização dentro da câmara devido aos elétrons originados na parede da câmara, e  $(1 - \alpha)$  é a fração da ionização dentro da câmara originada na capa de equilíbrio eletrônico.

A determinação de  $N_D$  para as câmaras de ionização de placas paralelas não é padronizada e diferentes procedimentos são recomendados pelos protocolos de dosimetria. Os protocolos AAPM (1983) e SEFM (1984, 1987) seguem a abordagem proposta do NACP (1980, 1981). Neste caso, o fator  $N_D$  da câmara de ionização plano-paralela é obtido a partir da comparação do valor da dose absorvida determinado em um feixe de elétrons de energia alta com uma câmara de referência cilíndrica, que possui um valor de  $N_D$  conhecido. Uma intercomparação similar em um simulador em um feixe de radiação gama do Cobalto-60 também permite o cálculo de  $N_D$  para este tipo de câmara, desde que se considere a correção apropriada para a diferença entre a composição da câmara e o material do simulador (MATTSSON *et al.*, 1981; HPA, 1985; ATTIX, 1990). No protocolo holandês (*Apud* PLAETSEN *et al.*, 1994), o fator  $N_D$  para uma câmara de placas paralelas é derivado de  $N_K$  empregando a equação (1.18) sem o fator de correção  $k_{cel}$ . Na abordagem deste protocolo, o fator  $N_K$  para a câmara é determinado em um feixe de Cobalto-60 no ar com uma cobertura adicional de 0,54 g/cm<sup>2</sup> de grafite como material de equilíbrio eletrônico. WITTKAMPER *et al.* (1992) avaliaram o valor do produto  $k_{at}.k_m$  para a câmara de ionização plano-paralelas NACP desenvolvida pela Nordic Association of Clinical Physics (NACP, 1981) e PTW/Markus, desenvolvida por MARKUS (1976). Segundo ANDREO *et al.* (1992) e NYSTRÖM & KARLSSON (1993), entretanto, as variações entre câmaras de mesmo modelo podem ser significantes e afetar a confiabilidade dos valores de  $N_D$  derivados de calibração em Cobalto-60 no ar aplicando a equação (1.18). Recentemente, ROGERS (1992) calculou os valores do produto  $k_{at}.k_m$  das câmaras de ionização plano-paralelas mais comumente empregadas utilizando simulações pelo Método de Monte Carlo.

Na dosimetria clínica, a água é o material padrão de referência e de uso para a determinação da dose absorvida por sua constância em composição, homogeneidade e facilidade de obtenção. Entretanto, a maioria dos protocolos permite que simuladores sólidos de material plástico sejam utilizados na calibração do feixe de elétrons. Os simuladores sólidos apresentam uma maior facilidade de manuseio e excelente reprodutibilidade geométrica, sendo recomendados, principalmente, para dosimetria de feixes de elétrons com energias menores que 10 MeV, onde o alcance dos elétrons é pequeno e o emprego conjunto de câmara de ionização de placas paralelas e simulador sólido é recomendado.

A seguinte equação fornece a dose absorvida para o material plástico,  $D^{plástico}$ , na qualidade de feixe do usuário na profundidade de referência  $d_0$ :

$$D^{plástico}(d_0) = M \cdot N_D \cdot (\bar{S}_{col,\Delta} / \rho)_{ar}^{plástico} \cdot P_{ion} \cdot P_{parede} \cdot P_{repl} \cdot P_{cel} \quad (1.20)$$

onde  $M$  é a leitura do eletrômetro corrigida para as condições ambientais de referência,  $P_{ion} = A_{ion}^{-1}$  corrige para a perda na ionização por recombinação,  $P_{parede}$  é um fator que leva em conta as diferenças de composição entre a parede da câmara e o meio, e  $P_{rep}$  é uma correção que considera a mudança na fluência dos elétrons devido a troca do material do simulador pela parede da câmara e pela cavidade e o efeito de gradiente da dose absorvida, e  $P_{cel}$  corrige para a não equivalência do material do eletrodo coletor ao ar em câmaras cilíndricas.

A dose absorvida na água  $D^{água}$  é em seguida calculada por:

$$D^{água}(d_0) = D^{plástico}(d_0) \cdot (\bar{S}_{col} / \rho)_{plástico}^{água} \cdot \Phi_{plástico}^{água} \quad (1.21)$$

onde  $(\bar{S}_{col} / \rho)_{plástico}^{água}$  é a razão do poder de freamento de massa de colisão médio irrestrito da água para aquele do plástico e  $\Phi_{plástico}^{água}$  é a razão de fluência de elétron em  $R_{100}$  (profundidade de dose máxima) na água para aquela em  $R_{100}$  no plástico.

## 1.4. Feixes de Elétrons Clínicos

As propriedades dosimétricas de um feixe de elétrons clínicos depende significativamente de sua distribuição espectral. Todavia, embora um feixe de elétrons seja quase monoenergético antes de atingir a janela do acelerador, uma degradação em energia ocorre, durante seu percurso até a superfície do simulador, devido à sua interação com vários objetos existentes neste caminho, que são: janela de saída, folhas de espalhamento, câmaras monitoras, ar e outros materiais.

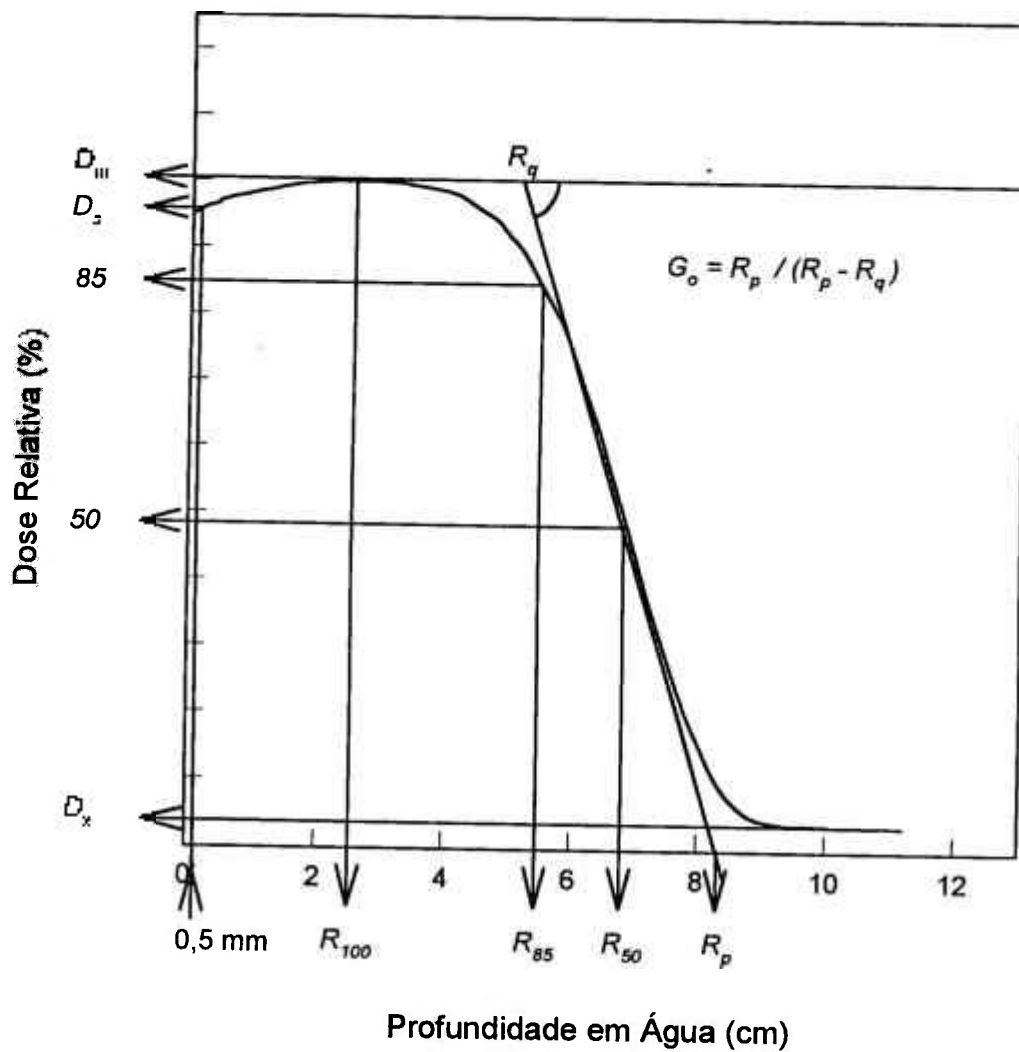
### 1.4.1. Distribuição da Dose Absorvida no Eixo Central do Feixe

O interesse básico na aplicação clínica de feixes de elétrons reside na forma de sua curva de dose absorvida em função da profundidade. Nesta curva, uma região de dose mais ou menos uniforme é seguida por uma região de queda rápida da dose absorvida. A faixa de energia de elétrons útil clinicamente é de 6 a 20 MeV, onde esta forma característica da curva de dose absorvida em profundidade permanece (KHAN, 1994).

De acordo com o ICRU (1984) vários parâmetros devem ser utilizados para caracterizar uma curva de dose profunda no eixo central de feixes de elétrons, Fig. 1.1.

A dose superficial relativa  $D_s$  é definida a 0,5 mm de profundidade. Esta profundidade é a recomendada, devido às dificuldades de se determinar a dose absorvida exata na interface ar-simulador; além disto, esta é a profundidade aproximada das camadas sensíveis da pele.

Os feixes de elétrons apresentam um componente de *bremstrahlung* que depende da energia do feixe e da construção do acelerador.  $D_x$  é a dose relativa extrapolada além do alcance máximo dos elétrons e representa este componente dos raios-X.



**Figura 1.1:** Curva de dose no eixo central para um feixe de elétrons com os parâmetros que caracterizam o feixe.



$R_f (R_{85})$  é o alcance terapêutico que é uma medida da porção clinicamente útil do perfil da dose absorvida em profundidade. Ele representa a profundidade que deve abranger o volume alvo, coincidindo com a profundidade da isodose de 85%.

$R_{100}$  é a profundidade de dose máxima em água. Esta profundidade depende do tamanho de campo, da distribuição angular e da energia do feixe na superfície. É influenciada pela contaminação de elétrons espalhados nas paredes do colimador.

A profundidade que corresponde à metade da dose máxima é o  $R_{50}$ . A profundidade que corresponde à metade da ionização máxima é representada por  $d_{50}$  e é menor que  $R_{50}$ .

O alcance prático  $R_p$  é definido como a profundidade do ponto onde a tangente do ponto de inflexão da porção descendente da curva intercepta o *background* de *bremstrahlung*. O *background* de *bremstrahlung* corresponde à parte final da curva de dose absorvida em profundidade produzida pelo *bremstrahlung* dos elétrons nos colimadores e no meio irradiado.  $R_p$  é praticamente o mesmo seja ele determinado por intermédio da curva de dose profunda ou pela curva de ionização em profundidade.

O gradiente de dose normalizado  $G_o$  é uma medida da inclinação da porção descendente da curva de dose profunda e está relacionado, diretamente, à largura do espectro de energia do feixe (BRAHME & SVENSSON, 1976). Ele é definido como a razão entre  $R_p$  e a diferença entre  $R_p$  e  $R_q$ , sendo  $R_q$  a profundidade na qual a tangente da curva no ponto de inflexão encontra o nível da dose máxima,  $D_m$ .

#### 1.4.2. Determinação da Energia de Feixes de Elétrons

A caracterização completa do espectro de energia de um feixe de elétrons inclui os seguintes parâmetros:  $E_{max}$  - a energia máxima do espectro de elétrons,  $\bar{E}$  - a energia média do espectro de elétrons,  $E_o$  - a energia mais provável e  $\Gamma$  - a largura da distribuição de energia na metade do valor máximo. No entanto, somente os dois primeiros parâmetros, determinados na superfície do simulador, são suficientes na

dosimetria clínica (NACP, 1980; NACP, 1981; AAPM, 1983; ICRU, 1984; SEFM, 1984; HPA, 1985; IAEA, 1987; SEFM, 1987; AAPM, 1991). O conhecimento destes dois parâmetros é necessário nos seguintes momentos: (i) para a avaliação inicial das características do equipamento, (ii) para a avaliação da dose absorvida onde são necessários fatores dependentes da energia, e (iii) no controle de qualidade, quando é feita a verificação periódica da energia do feixe.

A energia de um feixe de elétrons pode ser determinada pelas seguintes técnicas:

1. Espectrometria magnética: esta é uma técnica básica com a qual os outros métodos deveriam ser comparados. O equipamento necessário não é facilmente disponível e o método não é adequado para uso de rotina;

2. Limiar de ativação: este método exige um longo tempo de máquina, além disto é somente aplicável se a energia do feixe puder ser variada em pequenos passos. O número de pontos de energia que podem ser checados é limitado pelo número de elementos com os limiares adequados;

3. Limiar de radiação de Cerenkov: é um método básico, entretanto não é disponível para uso de rotina;

4. Medidas de alcance em simulador com câmaras de ionização, dosímetro Fricke e filme, embora requeiram uma quantidade de tempo apreciável, é a técnica mais prática e conveniente para o uso clínico.

Conforme recomendação dos vários protocolos de dosimetria publicados, o método correntemente utilizado para se determinar a energia de feixes de elétrons em aplicações clínicas se baseia em medidas de alcance. O protocolo nórdico (NACP, 1981) recomenda a determinação de  $(E_p)_0$ , energia mais provável na superfície do simulador, pelo método desenvolvido por MARKUS (Apud NACP, 1981). Neste método,  $(E_p)_0$  é determinada a partir da medida do alcance prático do feixe, medido em água, conforme a seguinte relação:

$$(E_p)_0 = C_1 + C_2 R_p + C_3 R_p^2 \quad (1.22)$$

onde  $R_p$  é o alcance prático em centímetros, e  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$  são 0,22 MeV, 1,98 MeV/cm e 0,0025 MeV/cm<sup>2</sup>, respectivamente, para a água.

BRAHME & SVENSSON (1976) demonstraram que  $\bar{E}_0$ , a energia média na superfície do simulador, está relacionada com  $R_{50}$  - a profundidade na qual a dose é 50% da dose máxima, pela seguinte relação:

$$\bar{E}_0 = C_4 \cdot R_{50} \quad (1.23)$$

onde  $C_4 = 2,33$  MeV/cm para a água. Entretanto, os cálculos realizados por ROGERS & BIELAJEW (1986) pelo método de Monte Carlo mostraram que 2,4 MeV/cm seria o valor mais adequado.

O valor determinado por BRAHME & SVENSSON (1976) é recomendado pelo protocolo AAPM (1983), e será utilizado neste estudo para a determinação das energias dos feixes.

HARDER (*Apud* KHAN, 1994) demonstrou que a energia mais provável e a energia média do espectro reduzem-se linearmente com a profundidade. A seguinte relação expressa este fato:

$$(E_p)_z = (E_p)_0 \cdot (1 - z / R_p) \quad (1.24)$$

e aproximadamente,

$$\bar{E}_z = \bar{E}_0 (1 - z / R_p) \quad (1.25)$$

onde  $z$  é a profundidade. Este método, utilizando a equação (1.25), é recomendado pelos protocolos atuais para a determinação da energia média do feixe de elétrons em profundidade, e será adotado neste trabalho quando a determinação da energia do feixe de elétrons em profundidade se fizer necessária.

Outros métodos para verificação ou determinação da energia de feixes de elétrons têm sido sugeridos. FREIM & FELDMAN (1988) aperfeiçoaram um método

prático, frequentemente empregado para verificação da energia em feixes de elétrons (ALMOND, 1967; AAPM, 1975). Neste método a razão entre leituras a duas diferentes profundidades é empregada como referência para verificação da variação da energia do feixe. Estes autores utilizam as profundidades de  $d_{max}$  e uma outra na região entre 30% e 70% da ionização máxima. Aplicando a fórmula de Brahme & Svensson (eq. 1.23), valores de  $C_4$  são determinados para cada energia, de acordo com as profundidades selecionadas entre a região de 30% e 70%. Dessa maneira, a energia pode ser determinada por duas medidas. Este autores sugerem a necessidade de uma verificação periódica dos dados básicos para se checar as energias dos feixes ou sempre que uma mudança radical na calibração ou energia do feixe for observada.

Recentemente, BLAIS & PODGORSK (1992) apresentaram um novo método para determinação de energia de feixes de elétrons a partir da determinação do poder de espalhamento angular de massa. Neste método, são realizadas medidas de espalhamento de um feixe estreito de elétrons no ar, a partir de um feixe clínico largo. As medidas de espalhamento do feixe são relacionadas ao poder de espalhamento angular de massa, que está relacionado à energia cinética do feixe. Este método é baseado em princípios físicos básicos, entretanto apresenta a desvantagem de requerer a construção de aparato especial para produção do feixe estreito.

Mais recentemente, DAS & BUSHE (1994) apresentaram um novo método de determinação de  $\bar{E}_0$ , energia média na superfície do simulador, que emprega a razão entre as leituras de transmissão e de retroespalhamento em material metálico. A inconveniência deste método reside na utilização simultânea de dois sistemas de medidas - 2 eletrômetros, 2 câmaras e dois cabos triaxiais, além de exigir uma dose alta para se obter leituras razoáveis para a transmissão.

A utilização de métodos de medida de alcance do feixe de elétrons na determinação da energia do feixe apresenta uma exatidão conveniente para a dosimetria clínica, como atesta a recomendação de todos os protocolos de dosimetria atuais. Têm surgido ainda outros métodos secundários de medida de energia, utilizando o método de alcance como referência. Entretanto, até o momento, não existe nenhum

método prático, que utilizando um equipamento simples de rotina permita que a energia do feixe seja determinada ou verificada com rapidez.

#### **1.4.3. Retroespalhamento em Feixes de Elétrons**

Quando um feixe de elétrons atinge um material sólido, a maioria dos elétrons penetra no material, mas alguns são refletidos de volta. Alguns destes são produto das colisões e são classificados como elétrons secundários. Estes elétrons são geralmente lentos com uma energia abaixo de 50 eV. A maioria dos elétrons retroespalhados, no entanto, faz parte do feixe original que penetrou em maior ou menor extensão no material, sofreu colisões elásticas ou inelásticas ou ambas, e retornou (WRIGHT & TRUMP, 1962).

Em feixes clínicos de elétrons, os estudos sobre retroespalhamento não são muitos. OKUMURA *et al.* (1971) e WEATHERBURN *et al.* (1975) estudaram os efeitos de intensificação de dose em tecido adjacente a proteções internas de metal. SAUNDERS & PETERS (1974) reportaram um estudo sobre retroespalhamento de elétrons para materiais de diferentes números atômicos para a faixa de energia de 3 a 8 MeV. KHAN *et al.* (1976) estenderam este estudo para 13 MeV. GAGNON & CANDIFF (1980) realizaram um estudo semelhante para energias entre 13 e 20 MeV. KLEVENHAGEN *et al.* (1982) estudaram o retroespalhamento para a faixa de energia de 3 a 35 MeV em simulador de poliestireno. Neste estudo, a intensificação de dose na interface pode ser determinada a partir do conhecimento do número atômico e espessura da heterogeneidade.

Existe uma relação direta entre a energia do feixe de elétrons e o efeito de retroespalhamento, conforme atestam as referências citadas acima. Até o momento ainda não foi testado um método que aproveite este fenômeno e permita determinar ou verificar a energia de feixes de elétrons.

## 1.5. Plásticos Equivalentes a Água para Dosimetria de Feixes de Elétrons

Na dosimetria clínica, água é o material recomendado por todos os protocolos de dosimetria para simular as propriedades de atenuação do tecido humano. É também o meio de referência para o qual a calibração de dose é especificada. Em dosimetria de elétrons, a maioria dos protocolos permite que simuladores plásticos (em acrílico ou poliestireno) sejam empregados (NACP, 1980; NACP, 1981; AAPM, 1983; ICRU, 1984; SEFM, 1984; HPA, 1985; IAEA, 1987; SEFM, 1987; AAPM, 1991). Isto ocorre, principalmente, para feixes de elétrons com energias inferiores a 10 MeV, para os quais o alcance dos elétrons é pequeno e os simuladores plásticos permitem que uma melhor reprodutibilidade geométrica seja alcançada. Para esta faixa de energia é recomendado o emprego de câmaras de ionização de placas paralelas. O uso de simulador plástico do mesmo material que estas câmaras impede a introdução de incertezas dosimétricas advindas das diferenças de espalhamento entre o material destas e a água. A respeito disto, HUNT *et al.* (1988) verificaram uma redução em torno de 1% nas respostas das câmaras Markus e NACP em medidas em água, comparadas às medidas em acrílico e polistireno, para as respectivas câmaras, em feixes de elétrons de energias inferiores a 10 MeV.

### 1.5.1. Conversão de Dose

Todos os protocolos de dosimetria recomendam a profundidade de máxima dose para calibração do feixe de elétrons (NACP, 1980; NACP, 1981; AAPM, 1983; ICRU, 1984; SEFM, 1984; HPA, 1985; IAEA, 1987; SEFM, 1987; AAPM, 1991). Na conversão da dose determinada em plástico para a dose em água, em  $R_{100}$ , duas correções devem ser aplicadas: (i) a razão entre os poderes de freamento de massa de colisão irrestrito médio da água para aquele do plástico e (ii) um fator de correção que leva em conta a diferença na fluência de elétrons em  $d_{max}$  no plástico e na água

(eq. 1.21). Para a transferência completa de uma curva de dose em profundidade em plástico para a curva de dose em água, um fator de correção de fluência em função da profundidade não é fornecido por nenhum dos protocolos em uso, atualmente.

Um fator de escala aplicado para medidas de alcance não deve ser usado na região de equilíbrio eletrônico de dose, pois a distribuição de dose profunda é influenciada pelo espectro de elétrons incidentes no simulador. Apesar disto, alguns protocolos recomendam o uso de relações de transformação de escala do alcance para correção de toda a curva de profundidade (ICRU 1984 e HPA 1985); o protocolo HPA (1985) recomenda um fator único igual a 0,97 para transferência de curva de dose em profundidade do acrílico e do poliestireno para a água.

O método correto para a transformação da curva de ionização em profundidade de um material para outro é aquele que corrige para cada profundidade a razão entre as fluências dos elétrons. Recentemente, a AAPM (1991) publicou um conjunto de informações e sugestões a respeito de dosimetria de elétrons, onde são fornecidos fatores de correção de fluência para várias energias de feixes de elétrons em diferentes profundidades em simuladores de acrílico e poliestireno.

### **1.5.2. Transformação de Alcance na Determinação de Energia**

Todos os protocolos de dosimetria clínica recomendam a determinação de parâmetros de energia do feixe a partir de medidas de alcance. Entretanto, quando se estiver utilizando um simulador sólido, deve ser feita uma correção do alcance medido para a determinação da energia do feixe. Isto é necessário porque as relações empíricas que relacionam energia e alcance foram determinadas somente para a água.

Existem várias relações de transformação de escala recomendadas para o cálculo de alcance em água a partir de alcance medido em plástico. De acordo com o protocolo nórdico (NACP, 1981), que utiliza a fórmula segundo a qual os alcances práticos  $R_p$  são proporcionais ao recíproco das densidades eletrônicas,  $\langle Z/A \rangle$ , dos diferentes materiais:

$$\frac{(\rho R_p)_a}{(\rho R_p)_m} = \left(\frac{Z}{A}\right)_a \quad (1.27)$$

onde  $Z$  é o número atômico,  $A$  é o número de massa e  $\rho$  é a densidade. Esta relação foi verificada experimentalmente por MATTSSON *et al.* (1981) para outros alcances ( $R_{100}$ ,  $R_{85}$  e  $R_{50}$ ) obtendo uma exatidão suficiente para sua utilização clínica.

De acordo com o HPA (1985), o fator 0,97 multiplicado pela densidade de massa e o alcance dos elétrons medidos em acrílico ou poliestireno fornece a profundidade correspondente em água.

O protocolo americano (AAPM, 1983) recomenda que a profundidade de  $d_{50}$  seja multiplicada pelos fatores 0,965 e 1,11 para as medidas em poliestireno e acrílico, respectivamente.

O ICRU 35 (1984) recomenda a seguinte relação, que leva em conta a energia do feixe, quando se estiver determinando o fator de escala para a transformação do alcance prático:

$$(R_p)_a = (R_p)_m \frac{(r_0/\rho)_a}{(r_0/\rho)_m} \quad (1.28)$$

onde  $r_0$  é o alcance correspondente ao CSDA (comprimento médio de percurso de um elétron e é calculado pela integração do recíproco do poder de freamento total).

GROSSWENDT & ROOS (1989), a partir dos valores de  $R_p$  e  $R_{50}$  de curvas de dose em profundidade calculadas pelo método de Monte Carlo, compararam os diferentes procedimentos de transformação de escala para materiais sólidos em feixes de elétrons. Foram obtidos desvios de 10 e 16% para alcances e energias, respectivamente. A partir dos ajustes de seus resultados, estes autores chegaram às seguintes relações entre alcance e energia:



$$E_{p,0} = a_1 + a_2 \cdot (\rho \cdot R_p) \quad (1.29)$$

$$\bar{E}_o = b_1 + b_2 \cdot (\rho \cdot R_{50}) - \frac{b_3}{(\rho \cdot R_{50})} \quad (1.30)$$

onde  $E_{p,0}$ ,  $\bar{E}_o$  e  $\rho$  têm os significados usuais e os coeficientes  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  e  $b_3$  foram determinados para cada material.

Recentemente, MOTA (1993) apresentou a seguinte relação de alcance e energia, a partir de cálculos pelo método de Monte Carlo:

$$\frac{\bar{E}_o}{\rho \cdot d_{50}} = a_1 + a_2 \cdot (\rho \cdot d_{50}) + a_3 \cdot (\rho \cdot d_{50})^2 \quad (1.31)$$

onde  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$  foram determinados para água, poliestireno, acrílico e alumínio.

Um material substituiria diretamente a água caso ele apresentasse a mesma densidade eletrônica e o mesmo número atômico efetivo. Isto nunca ocorre mesmo para os materiais plásticos - acrílico e poliestireno, recomendados pelos protocolos.

Em feixes de elétrons, para a transferência da dose absorvida determinada em plástico para a dose absorvida em água devem ser aplicadas duas correções. A primeira correção é a razão do poder de freamento de massa de colisão irrestrito médio para a água para aquele do plástico. A segunda correção leva em conta a diferença na fluência de elétrons na profundidade no plástico comparado com aquela na profundidade na água. Apesar disto, seria conveniente e prático ter-se um material que permitisse a obtenção de curvas de dose profunda ou de isodose relativas escaladas diretamente para a água.

# Capítulo 2

## Materiais e Métodos

Este capítulo apresenta todos os equipamentos, tanto de medida quanto de emissão de radiação, utilizados neste estudo.

### 2.1. Sistema de Medidas

#### 2.1.1. Câmaras de Ionização e Eletrômetros Utilizados

Foram utilizadas quatro câmaras de ionização: uma câmara cilíndrica fabricada pela Nuclear Enterprises Ltd. (NEL), Inglaterra, modelo 2571, no. de série 674, uma câmara de placas paralelas fabricada Victoreen, E.U.A., modelo 30-404 (Memorial-Holt), no. de série 260, uma câmara de placas paralelas comercializada pela Victoreen, E.U.A., modelo 30-329 (PTW/Markus), no. de série 1515, e uma câmara cilíndrica de 0,125 cm<sup>3</sup>, E.U.A., no. de série 158, pertencente a um sistema automático de aquisição de dados computadorizado (Multidata™). A Tabela 2.1 apresenta as características físicas das três primeiras câmaras.

**Tabela 2.1.** Características físicas das câmaras de ionização comerciais utilizadas.

<b>Câmara</b>	<b>NEL 2571</b>	<b>Memorial-Holt</b>	<b>PTW/Markus</b>
<b>Tipo, volume</b>	cilíndrica, Farmer 0,6 cm <sup>3</sup>	plano-paralela, 1 cm <sup>3</sup>	plano-paralela, 0,055 cm <sup>3</sup>
<b>Dimensões da cavidade</b>	comprimento diâmetro	distância entre placas diâmetro	2 mm 6 mm
<b>Parede da cavidade</b>	material espessura	parede frontal espessura	polietileno c/ cobertura de grafite 2,3 mg/cm <sup>2</sup>
<b>Eletrodo coletor</b>	material diâmetro	material diâmetro	poliestireno c/ cobertura de grafite 5 mm
<b>Anel de guarda</b>		largura	0,7 mm

Um eletrômetro fabricado pela NEL, modelo Farmer 2570, no. de série 662, foi utilizado para a determinação das curvas de saturação das câmaras construídas. Este dosímetro fornece uma tensão de polarização positiva ou negativa variável para os seguintes valores: 32,5; 65; 130 e 260 V. Para a maior parte das medidas realizadas com as câmaras sob teste, estas foram conectadas a um eletrômetro Keithley, E.U.A., modelo 35617EBS, no. de série 55450. As medidas de calibração intercomparativas nos feixes de radiação gama de Cobalto-60 e de elétrons foram feitas utilizando-se as câmaras cilíndrica NEL 2571 e a câmara Memorial-Holt, acopladas ao eletrômetro Keithley 35617EBS. Ambas as câmaras e o eletrômetro foram calibrados no laboratório padrão secundário K & S Associates, Inc., Tennessee/E.U.A. Este laboratório utiliza instrumentos rastreados pelo National Institute for Standards and Technology (NIST). Um outro dosímetro Keithley, E.U.A., modelo 35040, no. de série 59171, foi também usado em alguns experimentos.

Para as medidas relativas com o sistema Multidata™ de aquisição de dados foram empregadas a câmara PTW/Markus para as medidas em profundidade e a câmara cilíndrica do próprio sistema Multidata™ para as leituras de referência no ar. A câmara PTW/Markus foi protegida contra água por uma janela de acrílico de 0,8 mm de espessura.

### **2.1.2. Sistema de Aquisição de Dados Automático**

Foi utilizado um sistema de aquisição de dados computadorizado Multidata™, E.U.A., pertencente ao Roswell Park Cancer Institute, Buffalo/E.U.A. Este sistema é composto por um simulador de água com as dimensões 67 x 64 x 59 cm<sup>3</sup> para comprimento, largura e profundidade, respectivamente. Uma sonda de medida, um diodo ou uma câmara de ionização é instalada no dispositivo de varredura, que permite movimento tridimensional. Existe um sistema local, instalado no próprio tanque de água, que permite posicionar a sonda. A precisão de posicionamento é de 1/16 mm. Uma outra sonda é instalada em uma posição fixa no campo de irradiação, mas fora do

simulador, e funciona como a leitura de referência. O simulador permanece sobre uma plataforma suspensa sobre um reservatório de água ambulante. Este reservatório possui uma bomba hidráulica que permite encher e esvaziar o tanque com água, e além disto pode elevar a plataforma suspensa entre 65 e 105 cm de altura.

Um eletrômetro com canal de entrada duplo acompanha o sistema. Este eletrômetro aceita todas as câmaras de ionização e detectores de estado sólido. Uma chave simples reverte o sinal de polarização e muda a tensão de polarização à metade dos 300 V usuais, ou seleciona o eletrômetro para o uso dos detectores do tipo diodo.

A unidade de controle do sistema é um computador do tipo AT-386 acoplado a um monitor VGA e a um registrador. O programa de controle de aquisição de dados apresenta a posição do detector de varredura e a intensidade do feixe em tempo real. A resolução interna de dados é de 1/16 mm. Os modos de varredura da sonda podem ser simples, diagonal e oblíquo. O espaçamento dos pontos de medidas pode ser escolhido. É possível um número ilimitado de pontos de medida. A análise do campo de radiação pode ser feita imediatamente às medidas em termos de percentagem de dose profunda, perfil do feixe (largura, homogeneidade e simetria) ou isodose com 0,1% de resolução. É possível a manipulação dos dados para edição e/ou suavização das curvas ou transformação de escala. O sistema possui rotinas para extrapolação, interpolação e ajuste de curva.

Além disto, é possível a aplicação dos protocolos de dosimetria de feixes de elétrons (NACP, 1980; NACP, 1981; AAPM, 1983; ICRU, 1984; SEFM, 1984; HPA, 1985; IAEA, 1987; SEFM, 1987; AAPM, 1991). Os parâmetros, como razão de poder de freamento e correção de fluência podem ser fornecidos em forma de tabelas.  $R_p$  é determinado pelo método de ajuste dos mínimos quadrados, bem como é registrado o nível *background* de *bremsstrahlung*. Também a energia média e a energia mais provável na superfície é determinada. Podem ser aplicadas correções de deslocamento do ponto efetivo de medida da câmara e de divergência do feixe. É possível converter dados gráficos em dados tabelados.

## **2.2. Sistemas de Irradiação**

### **2.2.1. Sistema de Irradiação Gama de Cobalto-60**

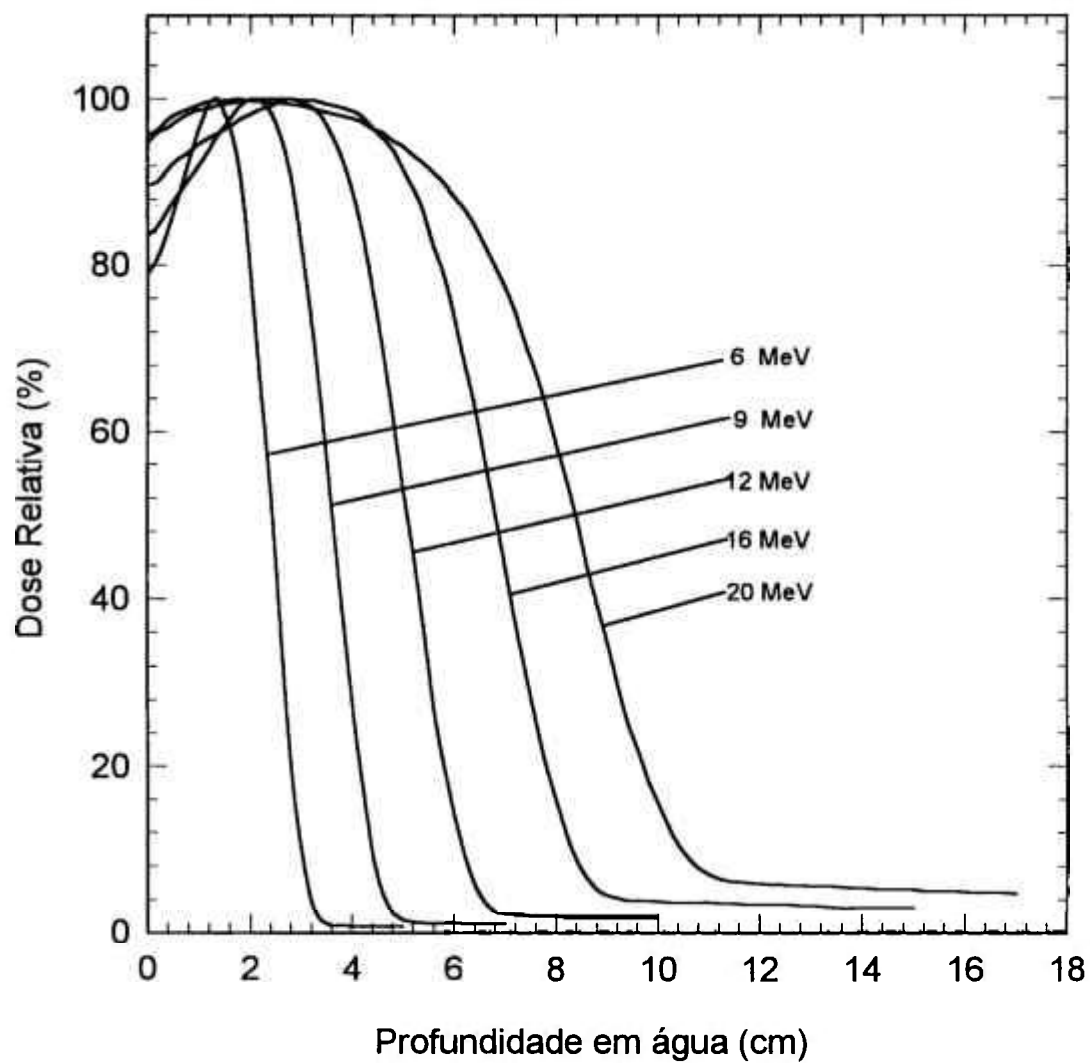
Para a irradiação gama de Cobalto-60 foi empregada uma "bomba de cobalto" da Theratronics, Canadá, modelo Theratron T-1000, no. de série 22, pertencente ao Roswell Park Cancer Institute, Buffalo/E.U.A. Esse equipamento apresenta uma geometria isocêntrica em torno de um ponto a 100 cm da fonte. Os tamanhos de campo podem variar de 4x4 a 40x40 cm<sup>2</sup>. O diâmetro desta fonte é de 1,5 cm com uma atividade de 190,5 TBq, em dezembro/93.

Este irradiador foi utilizado para duas situações: (i) para intercomparação entre as câmaras de placas paralelas, Memorial-Holt e as câmaras desenvolvidas, e a câmara cilíndrica NEL 2571, e (ii) para o estudo de estabilidade a curto e longo prazos das câmaras construídas. Em ambas as situações um tamanho de campo de 10x10 cm<sup>2</sup> foi definido a uma distância fonte-superfície do simulador de 100 cm.

### **2.2.2. Sistema de Irradiação de Feixes de Elétrons**

Alguns testes iniciais com as câmaras de ionização de placas paralelas desenvolvidas foram realizados em um acelerador linear de elétrons fabricado pela Siemens Inc., E.U.A., modelo Mevatron-74, no. de série 1448, pertencente à Universidade Estadual de Campinas. Para a maioria dos testes realizados, entretanto, os feixes de elétrons utilizados foram obtidos de um acelerador linear de elétrons fabricado pela Varian Associates, E.U.A., modelo Clinac 2100C, no. de série 287, pertencente ao Roswell Park Cancer Institute (RPCI), Buffalo/E.U.A. Este equipamento apresenta as seguintes características (VARIAN, 1991): produz dois feixes de fótons com energias nominais de 6 e 18 MV e cinco feixes de elétrons com energias nominais de 6, 9, 12, 16 e 20 MeV. Seu cabeçote é capaz de girar 360° em torno de um

isocentro localizado a 100 cm do alvo. O tamanho do campo nos feixes de fótons é continuamente variável de 0x0 cm<sup>2</sup> a 40x40 cm<sup>2</sup> a 100 cm do alvo. Para os feixes de elétrons existem cinco tamanhos de cones definidores de campo: 6x10, 10x10, 15x15, 20x20 e 25x25 cm<sup>2</sup>. Um klystron de 5,5 MW é utilizado como gerador de radiofrequência. A estabilidade da energia dos feixes é garantida por um campo magnético que direciona o feixe em 270° e permite uma definição de abertura de energia dentro de +/-3%. Um sistema duplo de câmaras de ionização independentes mede precisamente a intensidade de radiação tanto dos feixes de fótons como dos feixes de elétrons. Este sistema de dosimetria é selado tanto para fótons como para elétrons. Nos feixes de elétrons são empregadas duas folhas espalhadoras. Existem cinco opções de taxas de dose: 80, 160, 240, 320 e 400 cGy/min. Todo o controle do equipamento é feito por computador. A Figura 2.1. apresenta as curvas de dose em profundidade dos feixes utilizados. Na Tabela 2.2. são apresentados os parâmetros característicos de cada feixe, conforme definidos no item 1.4.1.



**Figura 2.1:** Curvas de dose em profundidade em água dos feixes de elétrons do acelerador linear Clinac 2100C, medidas com o sistema Multidata™.



**Tabela 2.1:** Parâmetros clínicos dos feixes de elétrons do acelerador linear Cílinac 2100C (conforme definidos no item 1.4) utilizados neste estudo.

Energia Nominal (MeV)	$\bar{E}_0$ (MeV)	$E_{p,0}$ (MeV)	$R_{1,00}$ (cm)	$R_{8,5}$ (cm)	$R_{3,0}$ (cm)	$D_s$ (%)	$D_x$ (%)	$G_0$
<b>6</b>	5,41	5,91	1,20	1,91	2,32	79,2	0,4	2,47
<b>9</b>	8,26	8,84	2,10	2,93	3,54	83,9	0,7	2,53
<b>12</b>	11,44	12,17	2,80	4,16	4,91	89,8	1,1	2,80
<b>16</b>	15,59	16,31	2,60	5,48	6,69	95,1	2,4	2,96
<b>20</b>	19,59	20,64	1,80	6,38	8,41	95,9	3,9	2,63

## **Capítulo 3**

### **Construção de Câmaras de Ionização de Placas Paralelas para Dosimetria de Feixes de Elétrons**

Neste capítulo, são apresentados os detalhes do projeto de construção e as dificuldades encontradas no desenvolvimento das câmaras de ionização construídas.

#### **3.1. Introdução**

A câmara de ionização de placas paralelas é o dosímetro adequado para medidas de dose absorvida, pois pode ser utilizado em regiões de gradiente de dose em profundidade intenso sem necessidade de qualquer correção de leitura. Isto ocorre, por exemplo, em feixes de fótons para medidas de dose na região de equilíbrio eletrônico nas proximidades da superfície do simulador. Em feixes de elétrons, a câmara de ionização de placas paralelas é a mais adequada para a medida em toda a curva em profundidade. Para a dosimetria de feixes de elétrons de energias inferiores a 15 MeV, todos os protocolos de dosimetria clínica especificam o emprego de câmaras de ionização de placas paralelas. Estas câmaras, desde que cuidadosamente

projetadas, são as indicadas para esta faixa de energia porque possuem um ponto de referência de resposta bem definido - na superfície interna da janela de entrada (SKAGGS, 1949), não necessitam de correção pelo fator de fluência ( $P_{rep}$ ) por não perturbarem a fluência do feixe de elétrons, e quando utilizadas em um simulador de mesmo material apresentam um fator de  $P_{parede}$  igual a 1 (AAPM, 1983).

Em termos de construção, é reconhecido que as câmaras de ionização de placas paralelas com altura e diâmetro da ordem de 2 e 20 mm, respectivamente, e possuindo anel de guarda de largura adequada, apresentam fator de correção unitário de fluência (AAPM, 1983; NACP, 1980). Em relação ao anel de guarda, MATTSSON *et al.* (1981) demonstraram a necessidade de uma largura mínima de 3 mm. Segundo RUBACH *et al.* (1986), para separações entre eletrodos de 1 e 2 mm, o anel de guarda deve apresentar uma largura mínima de 4 mm e 6 mm, respectivamente. Além disto, a câmara deve ser feita predominantemente de um único material (ATTIX, 1990). Se isto ocorrer, o fator de correção de parede  $P_{parede}$  será 1. De acordo com os cálculos de Monte Carlo realizados por ROGERS (1992), este último fator depende fortemente das características de construção da câmara.

Atualmente, as câmaras correntemente em uso e que apresentam um anel de guarda maior que 3 mm são a câmara NACP, a câmara Shonka e a câmara Memorial-Holt. A câmara Markus, embora bastante comercializada, apresenta uma largura de anel de guarda em torno de 0,7 mm, o que segundo alguns autores provocaria perturbação na fluência dos elétrons (CASSON & KILEY, 1987).

### 3.2. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foi a construção de uma câmara de ionização de placas paralelas de acordo com os requisitos necessários para a sua aplicação em dosimetria de feixes de elétrons de energias altas. Além disto, seria desejável que, na medida do possível, fossem utilizados materiais de fabricação nacional. Isto permitiria,

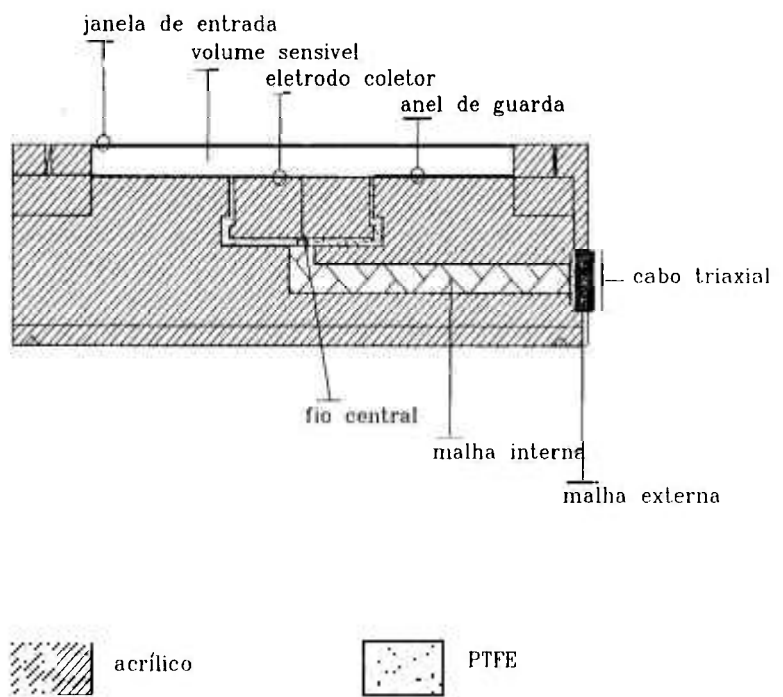
eventualmente, a substituição das câmaras importadas deste tipo. A viabilidade de construção de detectores nacionais para vários tipos de radiação já foi demonstrada por outros autores (CAMPOS, 1982; SILVA, 1985; RODRIGUES *et al.*, 1986; AUSTERLITZ *et al.*, 1987; CALDAS & ALBUQUERQUE, 1991).

Três câmaras de ionização de placas paralelas com o corpo em acrílico e idênticas dimensões internas e externas, diferindo, entretanto, nos materiais do eletrodo coletor e anel de guarda, foram inicialmente construídas. Os materiais do eletrodo coletor para cada uma das respectivas câmaras foram os seguintes: acrílico, grafite e alumínio. Isto foi feito para testar a possibilidade do uso do sistema Tandem como método para verificação de energia de feixes de elétrons. Este sistema consiste no uso de dois dosímetros com dependências energéticas diferentes, e já foi utilizado anteriormente com dosímetros termoluminescentes (DA ROSA & NETTE, 1988) e com câmaras de ionização de placas paralelas (CALDAS, 1991) em feixes de fótons. Nos testes realizados em feixes de elétrons com as câmaras de ionização construídas, o sistema Tandem não apresentou a necessária dependência energética.

Duas outras câmaras foram construídas em acrílico e poliestireno, por serem estes materiais recomendados pelos protocolos atuais de dosimetria, além de serem de fácil aquisição. As características operacionais e o desempenho de cada uma das câmaras foram testados em feixes de elétrons de várias energias.

### **3.3. Câmara de Ionização em Acrílico (Câmara A)**

No primeiro projeto, foi construída uma câmara de ionização de placas paralelas com o corpo em acrílico. Este material apresenta um fator de conversão de profundidade para o cálculo de energia média do feixe igual a 1,11 e fator de correção de espalhamento em relação à água variável com a energia do feixe de 1,01 a 0,999 (AAPM, 1991). A Figura 3.1 apresenta o esquema desta câmara.



**Figura 3.1:** Representação esquemática da câmara construída em acrílico.

O eletrodo coletor e o anel de guarda foram feitos também em acrílico e pintados com grafite, para tornar a superfície condutora. A espessura e o diâmetro do eletrodo coletor foram de 3 mm e 7 mm, respectivamente. O anel de guarda apresentou uma largura de 6 mm. PTFE (politetrafluoro-etileno) foi utilizado como material isolante entre o eletrodo coletor e o anel de guarda por apresentar uma resistividade volumétrica superior a  $10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$  e ser pouco higroscópico. No que se refere à janela de entrada, ela deve ser fina de tal forma que a quantidade de material introduzido no feixe seja mínima e permita medidas a pequenas profundidades (MATTSSON *et al.*, 1981). Assim, como material da janela de entrada foi utilizada Mylar aluminizada na forma de folha com densidade superficial de  $0,2 \text{ mg/cm}^2$ . A vantagem deste material é que ao mesmo tempo que é fino o suficiente para não perturbar o espectro das partículas carregadas incidentes, é feito condutor pela cobertura de alumínio. Testes a respeito do uso de Mylar aluminizada como material para janela de câmaras de ionização de placas paralelas foram realizados por KUBO & KENT (1986) para duas câmaras comerciais e confirmam as vantagens citadas acima. A distância entre o eletrodo coletor e a janela de entrada é de aproximadamente 2 mm. A altura externa da câmara é de 17,5 mm. A câmara não é selada, necessitando de correções nas medidas para temperatura e pressão de referência, 293,15 K e 101,3 kPa, respectivamente.

Para a conexão desta câmara a um eletrômetro, foram utilizados cabo triaxial e conectores de fabricação nacional inicialmente. Estes dois componentes foram fornecidos pelo Instituto de Radioproteção e Dosimetria/CNEN, R.J.

Os testes iniciais relativos à reprodutibilidade, repetibilidade e corrente de fuga realizados em feixe de radiação gama de Cobalto-60 foram satisfatórios, dentro dos valores recomendados (IEC, 1982). Entretanto, nos testes seguintes, em feixes de elétrons, um efeito de polaridade indesejável foi verificado.

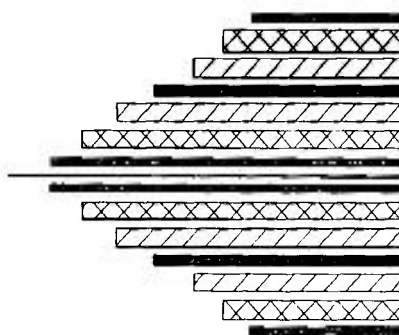
Este efeito de polaridade consiste na diferença que ocorre entre leituras às polaridades negativa e positiva. De acordo com as recomendações internacionais este





efeito não deve ultrapassar 1% para o campo de referência (IEC, 1982). BOAG (1966) apresentou várias razões para o efeito de polaridade em dosimetria de feixes de elétrons: distorção do espaço de carga do campo elétrico entre os eletrodos ou o freamento de alguns elétrons primários pelo eletrodo coletor da câmara. Além disto, conforme HUMPHRIES & PURDY (1992), um sinal pode ser induzido em um cabo triaxial se este não for construído de forma adequada.

Um cabo triaxial é composto, em princípio, por três condutores concêntricos isolados por três dielétricos concêntricos, Fig. 3.2. A qualidade de baixo ruído de um cabo está relacionada ao acréscimo de uma camada semi-condutora no dielétrico que separa as partes condutoras. Se esta camada não existir ou se não for suficientemente uniforme, a radiação poderá induzir um sinal no cabo que é essencialmente independente da magnitude e do sinal da tensão de polarização da câmara. Isto significa que este sinal induzido é aditivo em uma polaridade e subtrativo na outra (HUMPHRIES & PURDY, 1992).

Assim, para se avaliar este problema, o efeito de polaridade foi verificado em campos de 6x6, 10x10, 15x15, 20x20 e 25x25 cm<sup>2</sup>. Para o feixe de elétrons de energia nominal de 6 MeV, o efeito de polaridade variou de 1,2% para o menor campo, a 2,7% para o maior campo medido na profundidade de máxima ionização, o que está fora das recomendações (IEC, 1982).

A fim de se solucionar este problema, trocou-se o cabo original por um cabo fabricado pela Nuclear Enterprises Ltd., Inglaterra. A preferência por este cabo ocorreu por ser um cabo de qualidade reconhecida e por apresentar dimensões externas similares ao cabo anterior, o que permitia ajustá-lo ao orifício de entrada do cabo da câmara sem a necessidade de nenhuma adaptação do projeto original. Com esta troca, o efeito de polaridade reduziu-se, atingindo um máximo de 1,7% para o maior campo para a energia de 6 MeV, e em torno de 1% para os campos menores que 15x15 cm<sup>2</sup>.



-  isolante
-  malha condutora
-  camada semicondutora
-  condutor central

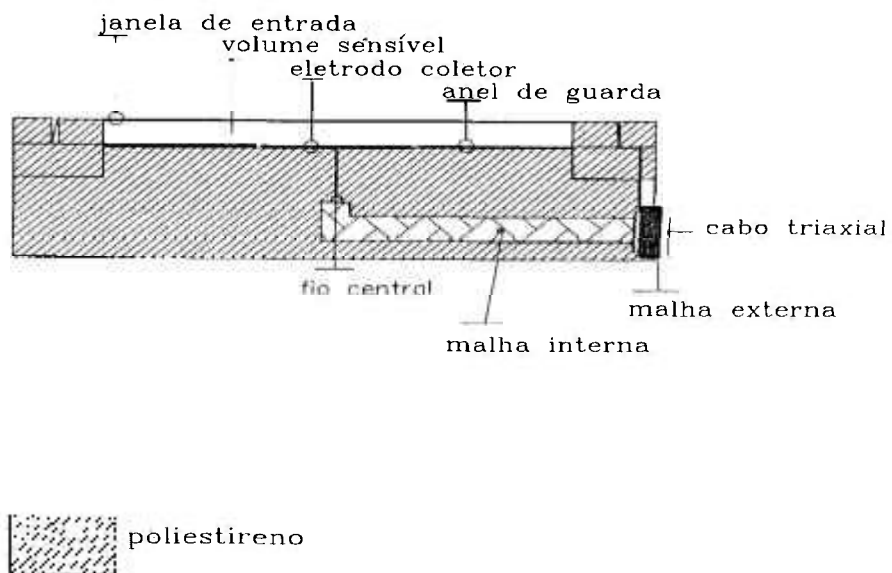
**Figura 3.2.** Representação esquemática de um cabo triaxial com duas camadas semicondutoras.



### 3.4. Câmara de Ionização em Poliestireno (Câmara P)

O segundo objetivo deste trabalho foi o de testar um novo método para verificação da energia de feixes de elétrons, por intermédio de medidas de retroespalhamento do feixe em um material de alto número atômico. Para isto era desejável que a câmara a ser utilizada neste teste apresentasse uma espessura reduzida, isto é, uma distância entre eletrodos tão reduzida quanto possível, de maneira que as medidas de retroespalhamento próximas à superfície do simulador pudessem ocorrer e serem relacionadas à energia média do feixe. Assim, uma segunda câmara foi feita em poliestireno de alto impacto. Este material apresenta um fator de conversão de profundidade para o cálculo de energia média do feixe igual a 0,99 e fator de correção de espalhamento em relação à água entre 1,016 e 1,004 (AAPM, 1991). A Fig. 3.3. apresenta o diagrama esquemático desta câmara.

O eletrodo coletor e o anel de guarda foram construídos em poliestireno com uma pintura de grafite fixada sobre uma das superfícies, a fim de torná-la condutora. A largura do anel de guarda e o diâmetro do eletrodo coletor foram 4 e 10 mm, respectivamente. O isolamento entre o anel de guarda e eletrodo coletor foi feito por intermédio de um rebaixo na superfície do material de aproximadamente 1/10 mm de largura. A janela de entrada foi feita a partir de folha de Mylar aluminizada com densidade superficial de 0,2 mg/cm<sup>2</sup>. A distância entre a janela e o eletrodo coletor foi de 1 mm. A câmara foi construída em uma placa de poliestireno de aproximadamente 3 mm de espessura. A câmara não é selada, necessitando de correções nas medidas para temperatura e pressão de referência de 293,15 K e 101,3 kPa, respectivamente. Para a conexão da câmara a um eletrômetro foi utilizado um cabo triaxial Microdot, com um diâmetro externo de aproximadamente 3 mm. As características físicas das duas câmaras construídas são apresentadas na Tabela 3.1.



**Figura 3.3:** Representação esquemática da câmara construída em poliestireno.

**Tabela 3.1:** Características físicas das câmaras de ionização de placas paralelas construídas.

Característica	Câmara A	Câmara P
Material	acrílico $(C_5H_8O_2)_n$	poliestireno $[(C_8H_8)_n+TiO_2]$
Densidade	1,18 g.cm <sup>-3</sup>	1,05 g.cm <sup>-3</sup>
Volume nominal	0,056 cm <sup>3</sup>	0,078 cm <sup>3</sup>
Espessura da cavidade	2,0 mm	1,0 mm
Material da janela	Mylar aluminizada	Mylar aluminizada
Espessura da janela	0,2 mg.cm <sup>-2</sup>	0,2 mg.cm <sup>-2</sup>
Material do eletrodo coletor	cobertura de grafite	cobertura de grafite
Diâmetro do eletrodo coletor	6 mm	10 mm
Material do anel de guarda	pintura de grafite	pintura de grafite
Largura do anel de guarda	7 mm	4 mm

## **Capítulo 4**

### **Avaliação das Câmaras de Ionização de Placas Paralelas**

Neste capítulo, são apresentados todos os testes de desempenho das câmaras de ionização e as avaliações em feixes de elétrons de várias energias.

#### **4.1. Testes Operacionais**

A aplicação terapêutica da radiação requer que a dose dentro do volume do tumor não apresente uma variação maior que  $\pm 5\%$  (ICRU, 1976). Uma variação que exceda este valor pode comprometer o tratamento seja por recidiva da doença por falta da dose necessária, seja por comprometimento de tecidos sãos, vizinhos ao tumor, por excesso de dose. As câmaras de ionização, sendo os dosímetros recomendados para a calibração dos feixes de radiação de uso clínico, precisam apresentar um desempenho condizente com esta exigência.

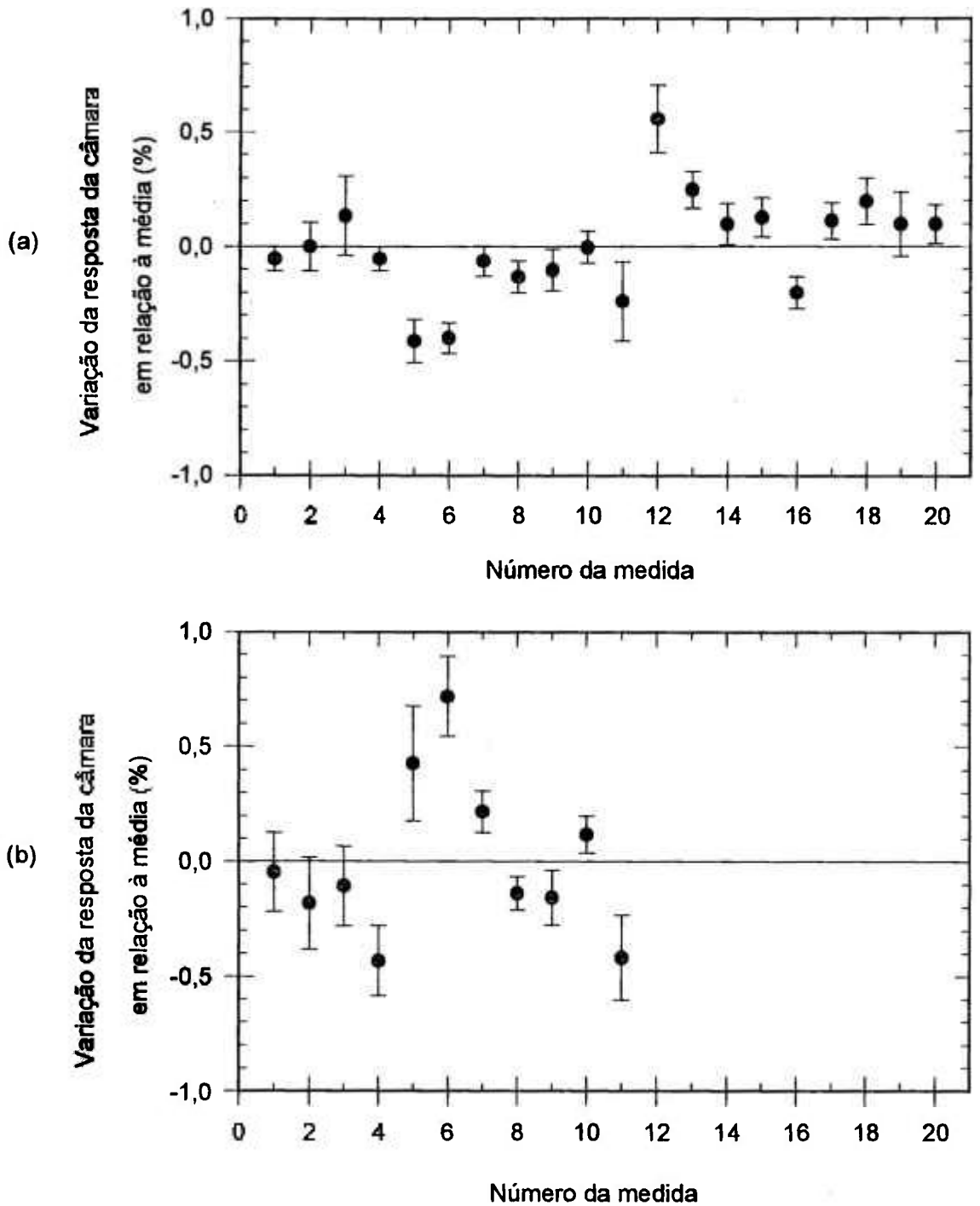
Para a avaliação do desempenho deste tipo de dosímetro, vários testes de qualificação técnica devem ser aplicados após sua fabricação. Alguns destes testes devem sempre ser realizados pelo próprio usuário, antes e após o envio destes dosímetros para calibração nos laboratórios padrão, a fim de garantir a confiabilidade, a

consistência e a estabilidade do fator de calibração utilizado. Ao usuário cabe também a realização de testes de rotina. A partir da análise dos resultados destes testes, acumulados ao longo da utilização do dosímetro, pode-se avaliar alterações de sensibilidade ou do próprio fator de calibração do sistema dosimétrico.

#### **4.1.1. Estabilidade de Curto e Médio Prazos**

As medidas de estabilidade de curto prazo ou repetibilidade consistem em medidas consecutivas para um valor de leitura de referência no eletrômetro. De acordo com as recomendações internacionais (IEC, 1982), o desvio padrão de 10 medidas consecutivas não deve ultrapassar 0,5%. Este teste foi realizado em um feixe de Cobalto-60 em um campo de 10x10 cm<sup>2</sup> a uma distância de 100 cm da fonte. As câmaras foram posicionadas a uma profundidade de 5 cm em simuladores do mesmo material das respectivas câmaras. A repetibilidade das respostas das câmaras construídas em irradiação em feixe de radiação gama de Cobalto-60 apresentou-se sempre menor que 0,5%.

A repetição deste tipo de medida ao longo do tempo, sob as mesmas condições geométricas, constitui o teste de estabilidade de longo prazo ou reprodutibilidade. No presente trabalho o teste será chamado de estabilidade de médio prazo, porque o prazo máximo de teste não ultrapassou 20 meses para a câmara A e para câmara P não foi além de 11 meses. O tempo utilizado em cada irradiação foi de 2 minutos. Para todas as medidas um tempo mínimo de 30 minutos foi aguardado para a estabilização do dosímetro. Todas as leituras foram corrigidas para a temperatura e pressão de referência e para o decaimento da fonte. As Figuras 4.1.a e 4.1.b mostram estes resultados, que foram obtidos com uma frequência mensal de dezembro de 1992 a junho de 1994 para a câmara A e de agosto de 1993 a junho de 1994 para a câmara P. Observa-se que a reprodutibilidade das leituras encontra-se dentro de +/-1% em



**Figura 4.1:** Teste de estabilidade de médio prazo das câmaras de ionização de placas paralelas: (a) câmara A e (b) câmara P.

relação ao valor de referência, estando de acordo com as recomendações internacionais (IEC, 1982).

#### **4.1.2. Corrente de Fuga**

Corrente de fuga é qualquer sinal coletado pelo dosímetro que não seja causado pela ionização produzida pela radiação no volume sensível da câmara. Esta corrente pode ser causada por algum problema no eletrômetro, no cabo, nos conectores ou na própria câmara (BOAG, 1987). Se a origem for na câmara, provavelmente haverá umidade ou algum tipo de detrito instalado nas partes internas da câmara. De maneira geral, para se evitar os problemas de fuga, estes equipamentos devem ser manuseados com cuidado e devem ser guardados em ambiente seco.

Dois tipos de medida de fuga foram realizados: *fuga de pré-irradiação* e *fuga de pós-irradiação*. O teste de fuga de pré-irradiação foi feito da seguinte forma: a câmara foi irradiada, obtendo-se uma leitura no eletrômetro. A câmara foi então deixada em um ambiente livre de radiação por um período mínimo de cinco vezes o tempo de irradiação. Após este tempo a variação da leitura inicial foi verificada (IEC, 1982). A corrente de fuga para ambas as câmaras foi sempre menor que  $\pm 0,5\%$  (limite recomendado pelo IEC, 1982).

A fuga de pós-irradiação consiste na produção de uma corrente após a irradiação ter terminado. O teste consiste na leitura de corrente 5 segundos após uma irradiação de 10 minutos (IEC, 1982). Neste caso, a corrente de fuga transiente, para ambas as câmaras, reduziu-se a menos de 0,5% do valor da corrente produzida pela irradiação. Este valor encontra-se dentro dos limites recomendados ( $\pm 1\%$ ).

#### **4.2. Eficiência de Coleção de Íons**

O número de íons formados pela radiação incidente e coletados em uma câmara

de ionização varia com a tensão aplicada entre seus eletrodos. A curva de saturação de uma câmara, isto é, a carga coletada versus o potencial de coleção aplicado, apresenta uma região inicial de crescimento rápido da corrente com o potencial de coleção e uma outra região seguinte de crescimento suave. Uma curva de saturação ideal ocorreria caso fosse possível coletar todos os íons formados na cavidade, entretanto, isto não acontece em feixes de intensidade de alta ionização devido ao efeito de recombinação entre os íons de sinais opostos dentro da cavidade (BOAG, 1966).

A eficiência de coleção de íons,  $f$ , de uma câmara de ionização operando sob condições específicas de radiação é uma medida do número de recombinações que ocorrem na mesma. Esta eficiência pode ser calculada pela razão entre a carga total de um sinal coletada a uma certa tensão e a carga total liberada dentro da câmara para um dado evento ionizante. A carga total coletada é simplesmente a leitura assinalada pelo eletrômetro, enquanto a carga total liberada é o número real de ionizações, e está relacionada à intensidade do campo de radiação na posição da câmara.

A correção deste efeito de recombinação é, dentre as várias correções necessárias em dosimetria com câmara de ionização, uma das mais significativas. De fato, conforme BURNS & ROSSER (1990), para feixes de radiação pulsada esta correção pode superar 2%. Assim, é importante que um estudo preciso das características de recombinação de uma câmara de ionização seja feito, para que a dose absorvida, determinada a partir de medidas com este tipo de dosímetro, tenha a exatidão adequada para sua aplicação na dosimetria clínica.

BOAG & CURRANT(1980) apresentaram um método gráfico para determinação da eficiência de coleção de íons de uma câmara de ionização. Neste método, os gráficos que relacionam o inverso da leitura de corrente contra o inverso da tensão aplicada ( $1/V$ ), para feixes de radiação contínua, e o inverso da leitura de corrente contra o inverso do quadrado da tensão aplicada ( $1/V^2$ ), para feixes de radiação pulsada, devem ser lineares. A extrapolação para zero de  $1/V$  ou  $1/V^2$  fornece o valor da corrente de saturação. Este método foi seguido neste trabalho.



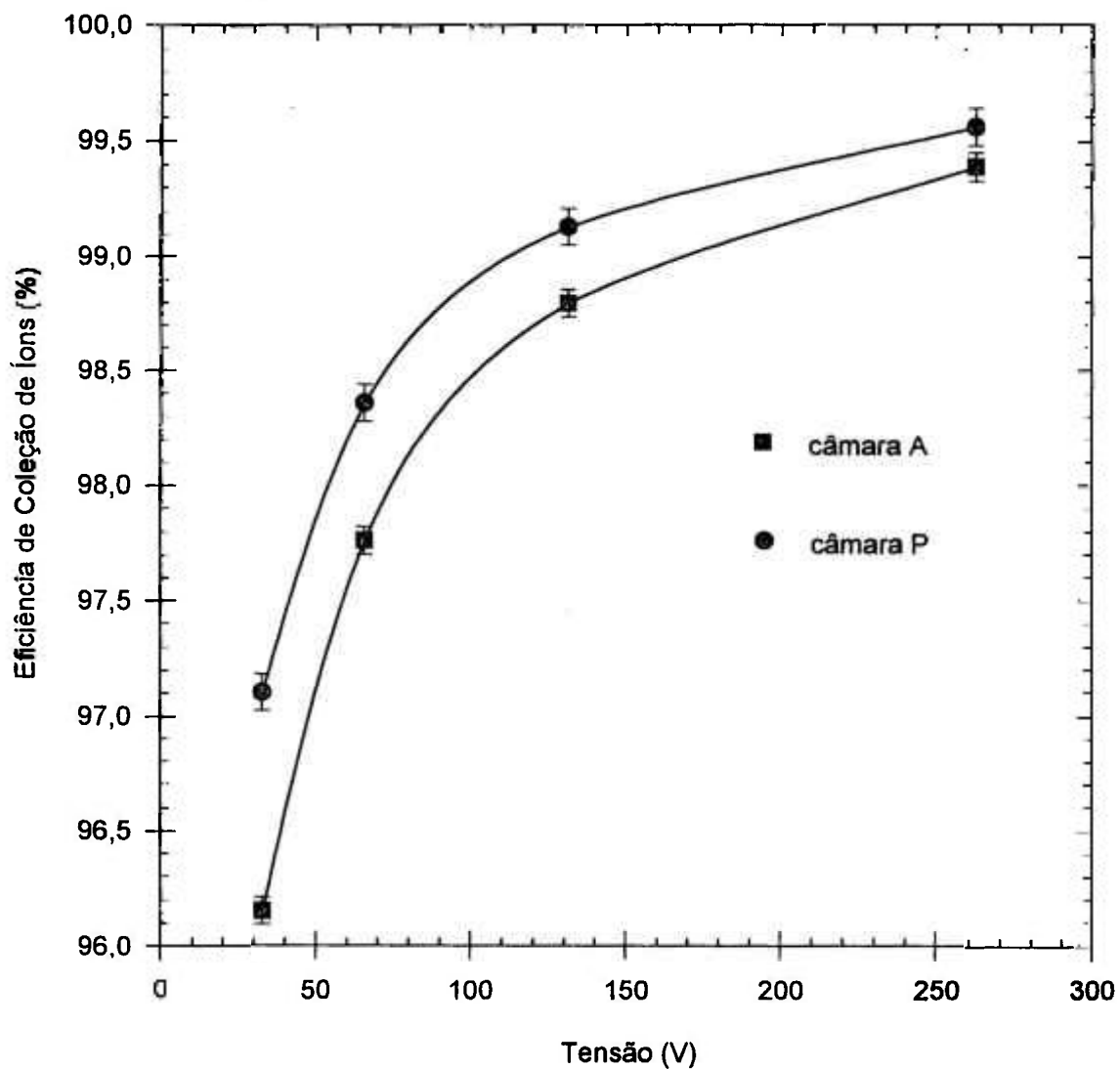
As câmaras sob teste foram irradiadas em feixes de elétrons de energias de 6, 9, 12, 16 e 20 MeV, e para taxas de dose absorvida em  $D_m$  para um tamanho de campo de 15x15 cm<sup>2</sup> de 400, 320, 240, 160 e 80 cGy/min. à distância foco-superfície de 100 cm, e conectadas a um eletrômetro Farmer 2570. Para todas as medidas, as câmaras foram mantidas na profundidade de máxima ionização. Para cada ponto de medida, cinco leituras foram realizadas.

A Fig. 4.2 apresenta a curva de eficiência de íons para as duas câmaras sob feixes de elétrons de 20 MeV a uma taxa de dose absorvida em  $D_m$  de 400 cGy/min. Para todas as outras energias as curvas são, praticamente, idênticas. A eficiência de coleção de íons nestas condições foi de aproximadamente 99,41 e 99,57% para as câmaras em acrílico e em poliestireno, respectivamente, à tensão de polarização de 260 V. A variação da eficiência de coleção de íons com a taxa de dose para a câmara em poliestireno foi menor que 0,15%, enquanto que para a câmara em acrílico foi menor que 0,20%. Para o feixe de radiação gama de Cobalto-60 a eficiência de coleção de íons para ambas as câmaras foi melhor que 99,87%.

### 4.3. Dependência Angular

Na dosimetria de feixes de fótons e elétrons, a câmara de ionização é, geralmente, posicionada oposta à fonte com sua superfície perpendicular ao eixo de incidência do feixe. A razão básica para isto reside no fato de que esta é a geometria de referência para calibração de câmaras, quando se determina seu fator de calibração para medidas de exposição ou se realiza a avaliação de dose absorvida.

Em dosimetria clínica, no entanto, uma pequena variação do ângulo de incidência do feixe, em relação à superfície da câmara, pode ocorrer ao se posicionar o equipamento irradiador. Além disto, existem situações clínicas nas quais o feixe precisa



**Figura 4.2:** Variação da eficiência de coleção de íons, determinada pelo método de BOAG & CURRANT (1980), com a voltagem para o feixe de radiação de elétrons de 20 MeV para as câmaras em acrílico e poliestireno à taxa de dose de 400 cGy/minuto.

apresentar uma certa inclinação em relação à superfície irradiada, por exemplo, na técnica de irradiação de corpo inteiro (AAPM, 1987). Tal obliquidade do feixe pode alterar a distribuição da dose em profundidade em relação à geometria de referência (BIGGS, 1984).

Vários estudos demonstraram que a maioria dos detectores utilizados em dosimetria de feixes de fótons e elétrons apresentam dependência angular (BRAHME, 1985; CHRISTENSEN *et al.*, 1986; CALDAS & ALBUQUERQUE, 1991). Dessa maneira, é importante que este tipo de teste seja realizado, a fim de que, nas condições clínicas em que tal situação ocorra, este efeito seja levado em consideração.

Uma vez que a obliquidade do feixe de irradiação incidente pode causar modificações na distribuição de ionização em profundidade (ULIN & STERNICK, 1989), verificou-se a dependência da resposta de uma câmara cilíndrica de 0,6 cm<sup>3</sup>, fabricada pela NEL, modelo 2571, em relação à orientação do feixe, para efeito de comparação com a câmara de ionização de placas paralelas. Ambas as câmaras foram conectadas a um eletrômetro Keithley, modelo 35EBS617, a uma tensão de polarização de -300 V.

#### **4.3.1. Teste de Dependência Angular da Câmara de Ionização Cilíndrica de Referência**

Neste teste, a coluna do acelerador foi mantida fixa na posição vertical, enquanto a câmara foi girada dentro de uma cavidade perfurada em um bloco de poliestireno, à qual a câmara se ajustava exatamente. Dessa maneira, vários ângulos de incidência do feixe foram simulados. A carga coletada sob todas as orientações, na profundidade de ionização máxima, para todos os feixes de elétrons utilizados, apresentou uma variação máxima de  $\pm 0.5\%$ .

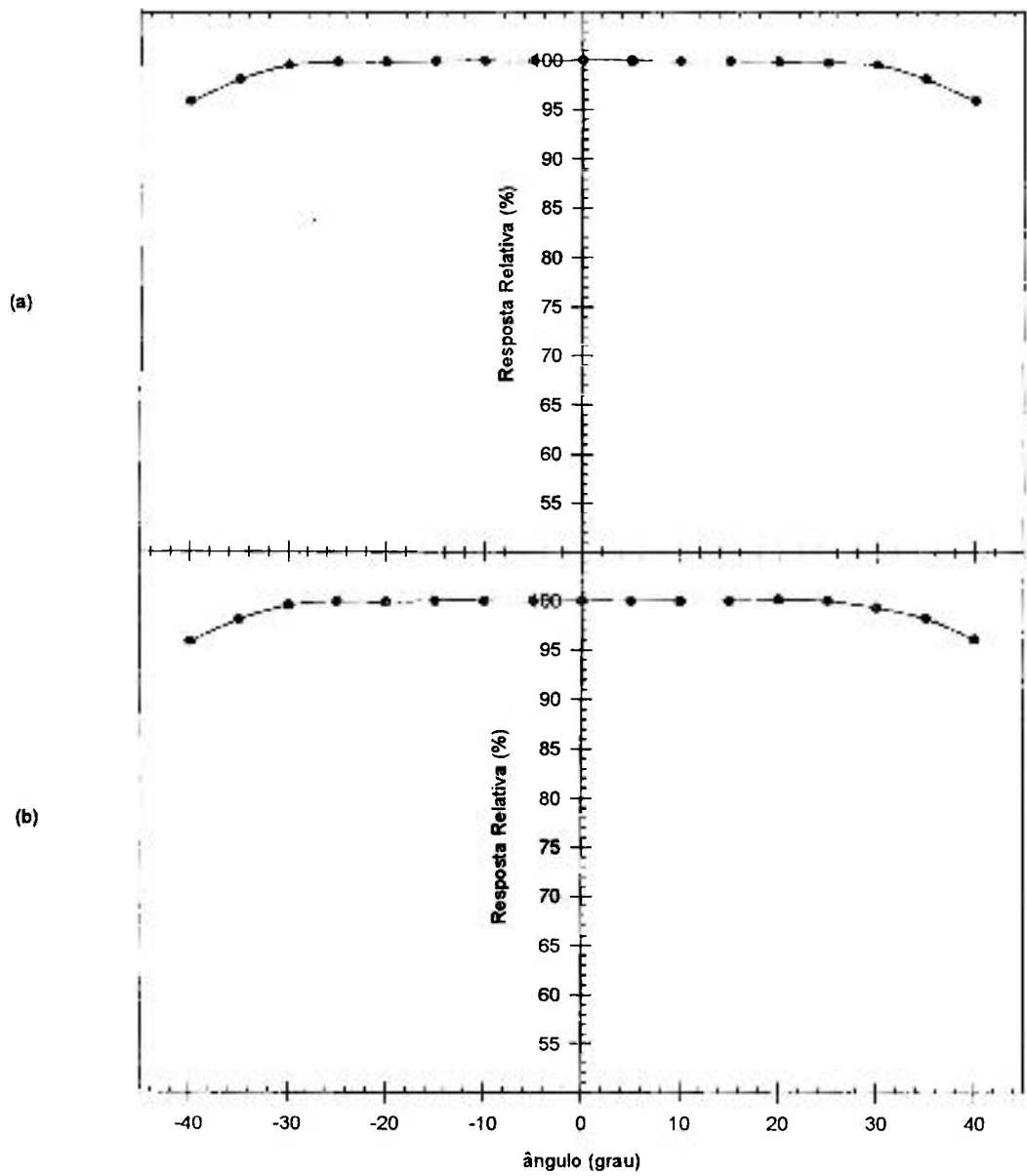
#### 4.3.2. Teste de Dependência Angular das Câmaras de Ionização Construídas

Para a verificação da dependência angular das câmaras de ionização sob testes, por intermédio de uma comparação com a câmara cilíndrica, foram utilizados dois simuladores, sendo um de poliestireno para a câmara de poliestireno e um outro de acrílico para a câmara de acrílico. Em ambos os simuladores, foi construída uma placa com uma perfuração para acoplar a câmara cilíndrica, sem capa de equilíbrio eletrônico. Os pontos de referência de todas as câmaras foram tomados na profundidade de máxima ionização para feixes de 6, 9, 12, 16 e 20 MeV. Um cone de localização de 15x15 cm<sup>2</sup> foi utilizado para delimitar o campo de radiação. Para facilitar a angulação da coluna do acelerador, uma distância de 10 cm foi mantida entre a superfície inferior do cone e a superfície do simulador. A distância foco-superfície, na posição horizontal, ficou fixa em 110 cm, para todas as energias. O ângulo de incidência do feixe foi definido como o ângulo  $\phi$  entre o eixo central do feixe e a normal à superfície irradiada, e foi variado de 0° a 40° em intervalos de 5°.

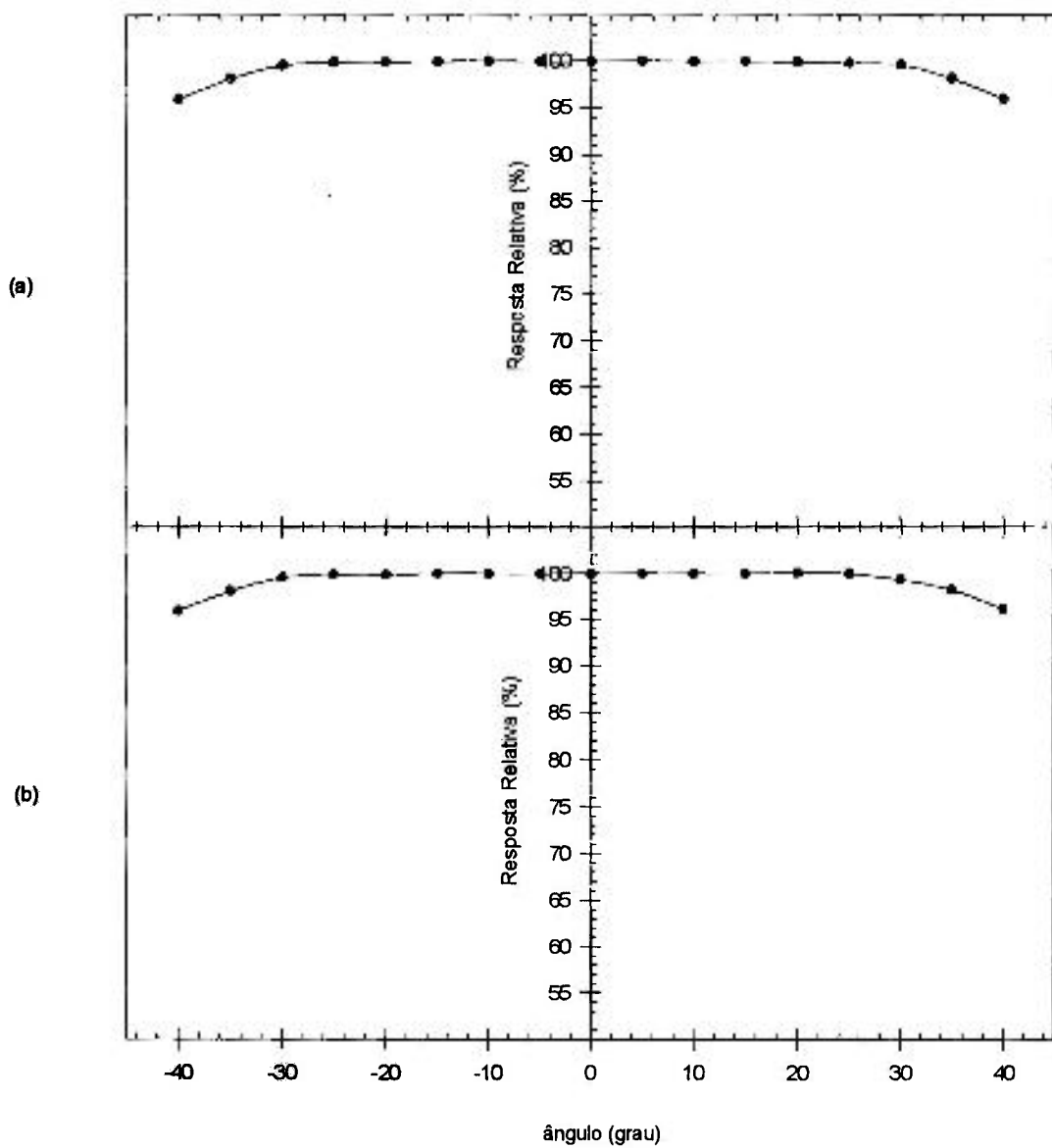
Foram determinadas as razões  $R_{pp}$  e  $R_{cil}$  entre as respostas das câmaras para os ângulos de incidência do feixe  $\phi$  e as leituras medidas para o ângulo de incidência 0°, para as câmaras de ionização de placas paralelas e cilíndrica, respectivamente. Para cada ângulo de incidência do feixe, cinco leituras foram realizadas para cada uma das três câmaras utilizadas. A resposta relativa  $\Delta\%$  expressa a dependência angular das câmaras da seguinte forma:

$$\Delta\% = 100 \frac{(R_{pp} - R_{cil})}{R_{cil}} + 100$$

As Figs. 4.3 e 4.4 mostram a dependência angular das câmaras de ionização de placas paralelas P e A a partir dos  $\Delta\%$ 's obtidos para as energias de 6 e 20 MeV. O desvio padrão máximo destes resultados foi de 0,28%. Pode-se dizer que para a



**Figura 4.3:** Dependência angular da câmara de ionização P em poliestireno para os feixes de elétrons de (a) 6 MeV e (b) 20 MeV.



**Figura 4.4:** Dependência angular da câmara de ionização A em acrílico para os feixes de elétrons de (a) 6 MeV e (b) 20 MeV.

que para a câmara P o limite angular de utilização direta, sem correção de resposta, é de aproximadamente 30°, enquanto que para a câmara A este limite é de aproximadamente 25°, onde as variações das respostas são menores que 1%. Este resultado se repete para as energias de 9, 12 e 16 MeV para cada câmara. Assim, para a utilização destas câmaras nestas geometrias especiais é necessário que um fator de correção de resposta seja introduzido.

#### 4.4. Efeito de Polaridade

O efeito de polaridade pode ser observado pela diferença no número de ionizações produzidas na cavidade da câmara de ionização, quando o sinal da tensão de polarização da mesma é invertido. BOAG (1966) apresentou as seguintes causas para a ocorrência do efeito de polaridade: distorção do espaço de carga do campo elétrico entre os eletrodos e o freamento de alguns elétrons primários pelo eletrodo coletor da câmara. Neste último caso, esta carga pode ser adicionada ou subtraída da ionização verdadeira se o efeito não for balanceado pela ejeção dos elétrons de recuo do eletrodo coletor.

Para que este efeito seja corrigido, a abordagem internacionalmente aceita consiste em se tomar o valor médio entre as leituras à polaridade negativa ( $Q_-$ ) e à polaridade positiva ( $Q_+$ ). O resultado é tomado como a ionização média real,  $Q_{real}$  (BOAG, 1966):

$$Q_{real} = \frac{|Q_-| + |Q_+|}{2}$$

O fator de correção para as leituras,  $F_{pol+}$ , pode ser expresso pela seguinte fórmula (HAVERCROFT & KLEVENHAGEN, 1994):

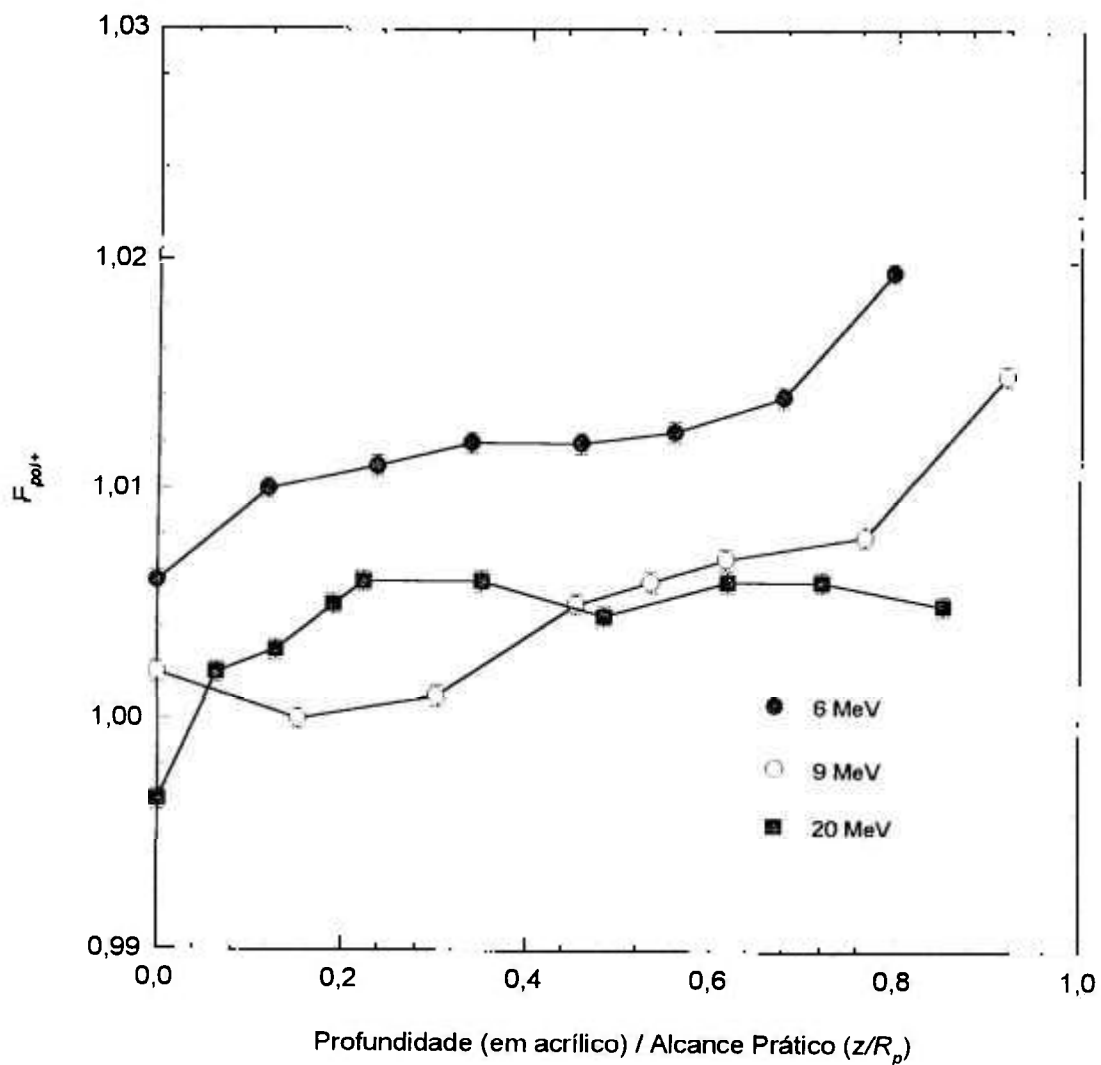
$$F_{pol+} = \frac{|Q_+| + |Q_-|}{2|Q_+|}$$

#### 4.4.1. Influência da Profundidade e Energia no Efeito de Polaridade

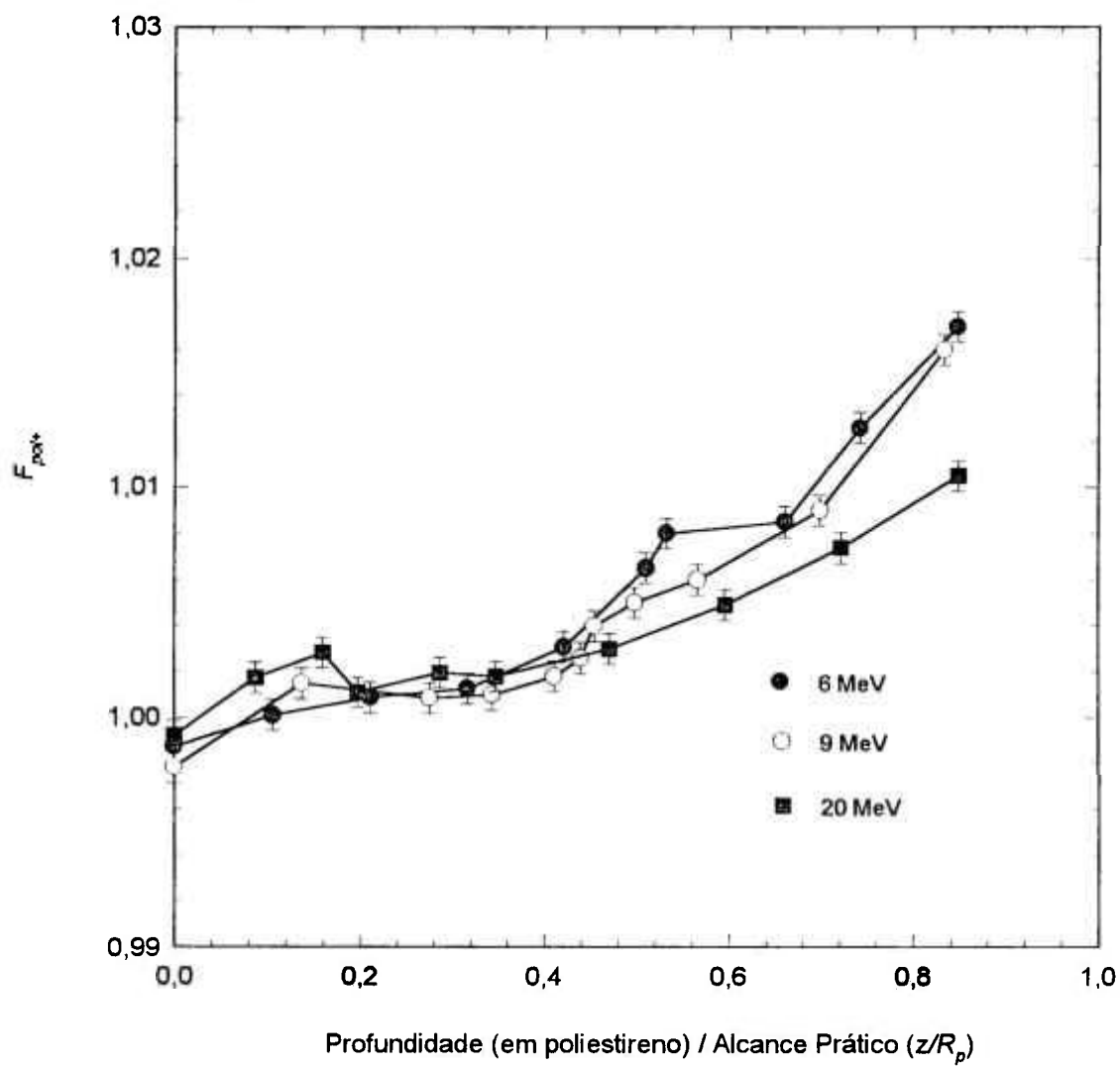
Para este estudo as câmaras foram irradiadas em feixes de elétrons de 6, 9, 12, 16 e 20 MeV em um simulador em profundidade, a partir da superfície, para um tamanho de campo de 10x10 cm<sup>2</sup> à distância foco-superfície (DFS) de 100 cm a uma taxa de dose de 400 cGy/min. Foram utilizados os mesmos simuladores anteriores para ambas as câmaras. Placas de diferentes espessuras dos materiais das respectivas câmaras foram superpostas a cada uma, de forma a variar a sua profundidade de localização. Para cada nova placa acrescentada, a DFS era corrigida para 100 cm.

As Figs. 4.5 e 4.6 apresentam os resultados para o efeito de polaridade para as energias de 6, 9 e 20 MeV em função da razão entre a profundidade de medida,  $z$ , e o alcance prático,  $R_p$ , para ambas as câmaras. O tamanho de campo empregado foi de 10x10 cm<sup>2</sup>. Para cada ponto de medida 5 leituras foram feitas para cada sinal de tensão de polarização. Pode-se observar que o efeito de polaridade é pequeno à profundidade menor que  $d_{max}$  e tende a crescer além desta profundidade, apresentando valores extremos no limite do alcance máximo dos elétrons. Estes resultados foram observados por outros autores (GERBI & KHAN, 1987; HAVERCROFT & KLEVENHAGEN, 1994), em algumas câmaras de placas paralelas comerciais. De acordo com GERBI & KHAN (1987), o pequeno efeito de polaridade observado abaixo de  $D_m$  deve-se a uma situação próxima de equilíbrio entre a ejeção de elétrons do eletrodo coletor e os elétrons que são parados àquelas profundidades. A profundidades maiores que  $D_m$ , a deposição de carga negativa no eletrodo coletor dos elétrons desacelerados aumenta e não é completamente compensada pela ejeção de elétrons secundários. Isto faz com que o efeito de polaridade aumente. A Figura 4.7 apresenta resultados publicados por GERBI & KHAN (1987) da razão entre leituras às polaridades negativa e positiva para algumas câmaras comerciais para feixe de elétrons de 9 MeV, em relação aos resultados obtidos no presente trabalho. Pode-se observar

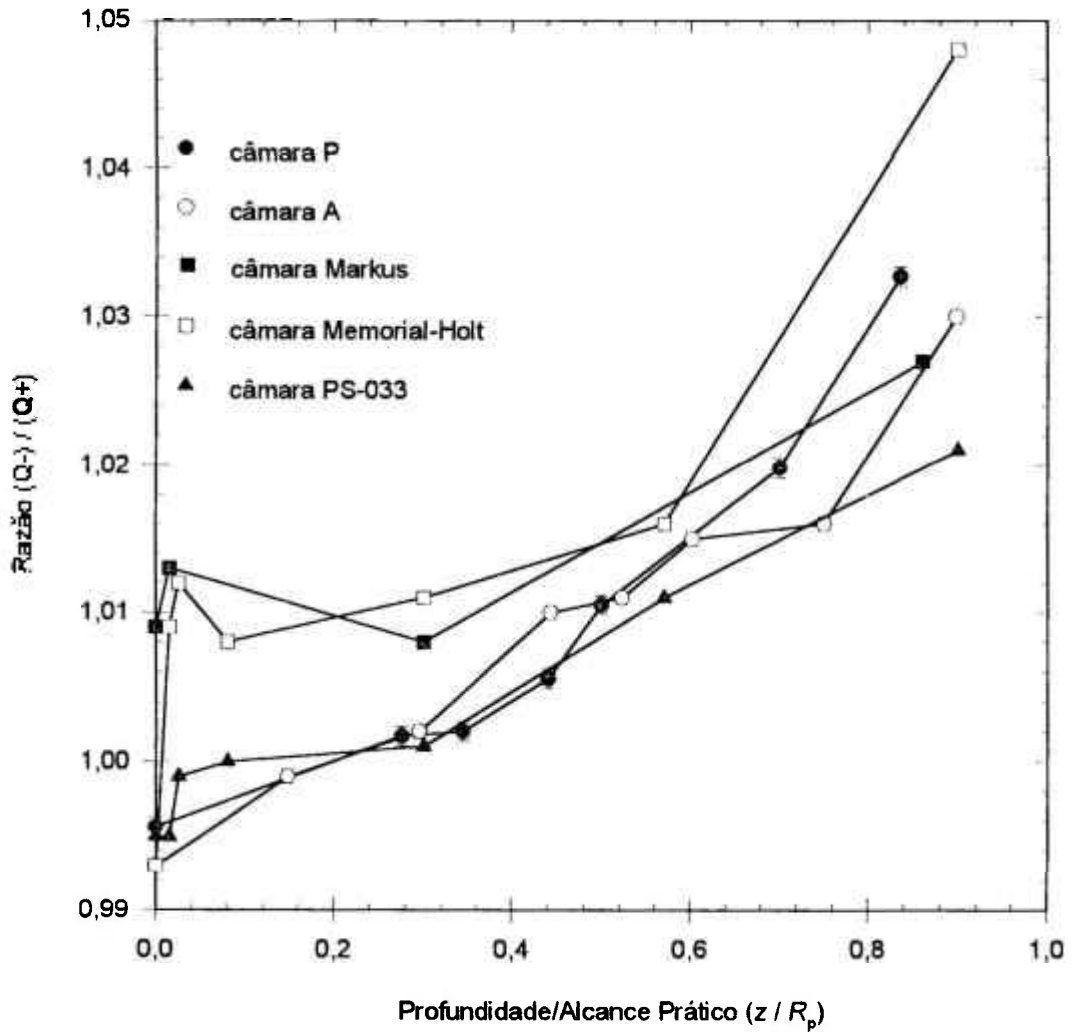




**Figura 4.5:** Efeito de polaridade para a câmara A em acrílico para diferentes energias de feixes de elétrons.



**Figura 4.6:** Efeito de polaridade para a câmara P em poliestireno para diferentes energias de feixes de elétrons.



**Figura 4.7:** Razões publicadas entre as respostas sob polaridades opostas de diferentes câmaras de ionização de placas paralelas comerciais (GERBI & KHAN, 1987), em comparação com as câmaras de ionização construídas no presente trabalho (A e P).

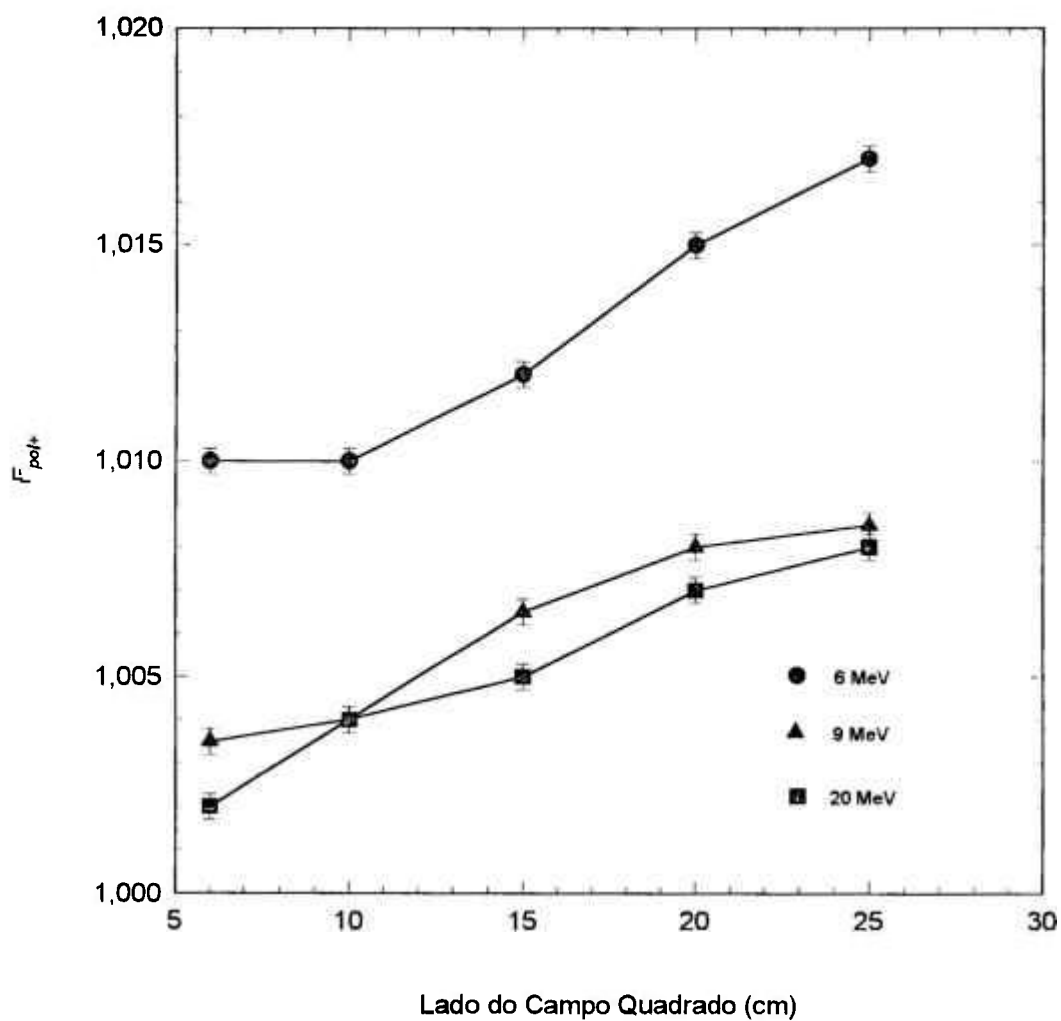
que os resultados de polaridade das câmaras construídas são similares aos de outras câmaras de ionização de placas paralelas.

#### **4.4.2. Influência do Tamanho de Campo no Efeito de Polaridade**

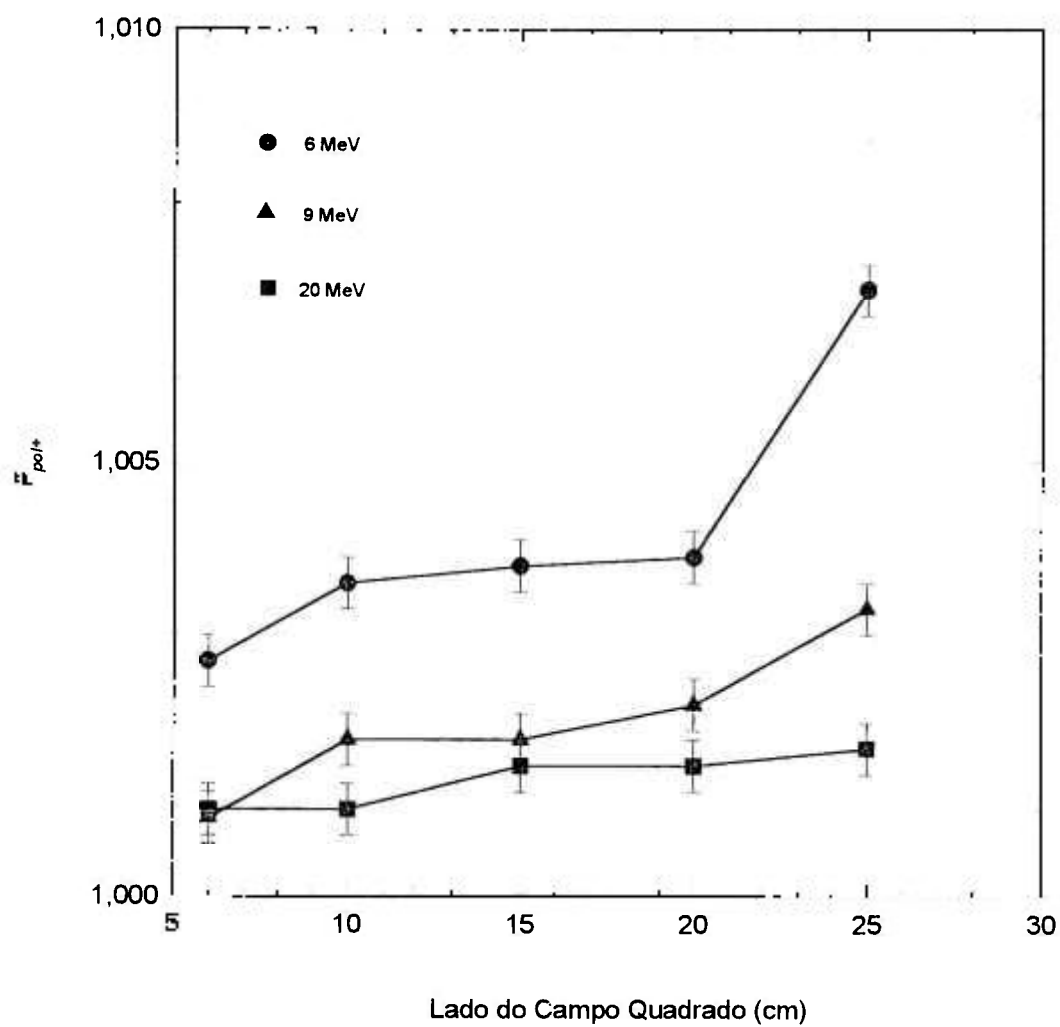
A resposta das câmaras de ionização pode apresentar uma influência do tamanho do campo irradiado sobre o efeito de polaridade. Isto acontece devido à interação da radiação com o material dielétrico do cabo que a conecta ao eletrômetro. Estas interações contribuem para uma leitura falsa nas medidas realizadas durante a dosimetria de feixes de radiação (dosimetria clínica).

As calibrações feitas com câmaras de ionização ocorrem em uma geometria fixa de referência, onde parte do cabo de conexão é exposto à radiação. Entretanto, quando uma geometria diferente é necessária nas várias situações que ocorrem na dosimetria clínica, diferentes tamanhos de cabo podem ser irradiados. Dessa forma, uma alteração significativa das medidas pode ocorrer, fornecendo resultados incorretos. Avaliações deste tipo já foram feitas por alguns autores em câmaras cilíndricas (CAMPOS & CALDAS, 1991a; CAMPOS & CALDAS, 1991b) e para a câmara de placas paralelas Markus em feixes de 9 e 22 MeV de elétrons (AGET & ROSENWALD, 1991).

Neste teste, foram utilizados campos quadrados com os seguintes tamanhos laterais 6, 10, 15, 20 e 25 cm. Para cada ponto de medida, cinco leituras foram realizadas. As Figuras 4.8 e 4.9 apresentam estes resultados para as câmaras A em acrílico e P em poliestireno, respectivamente. Pode-se observar que o efeito tende a se reduzir com o aumento da energia. Para a câmara em acrílico este efeito é menor que 1% para a energia de 20 MeV e se aproxima de 1,8% para a energia de 6 MeV no maior campo utilizado. Para a câmara em poliestireno este efeito é menor, não ultrapassando 0,8% para a pior condição, energia menor e campo maior.



**Figura 4.8:** Influência do tamanho de campo sobre o efeito de polaridade para a câmara A em acrílico para diferentes energias de feixes de elétrons.

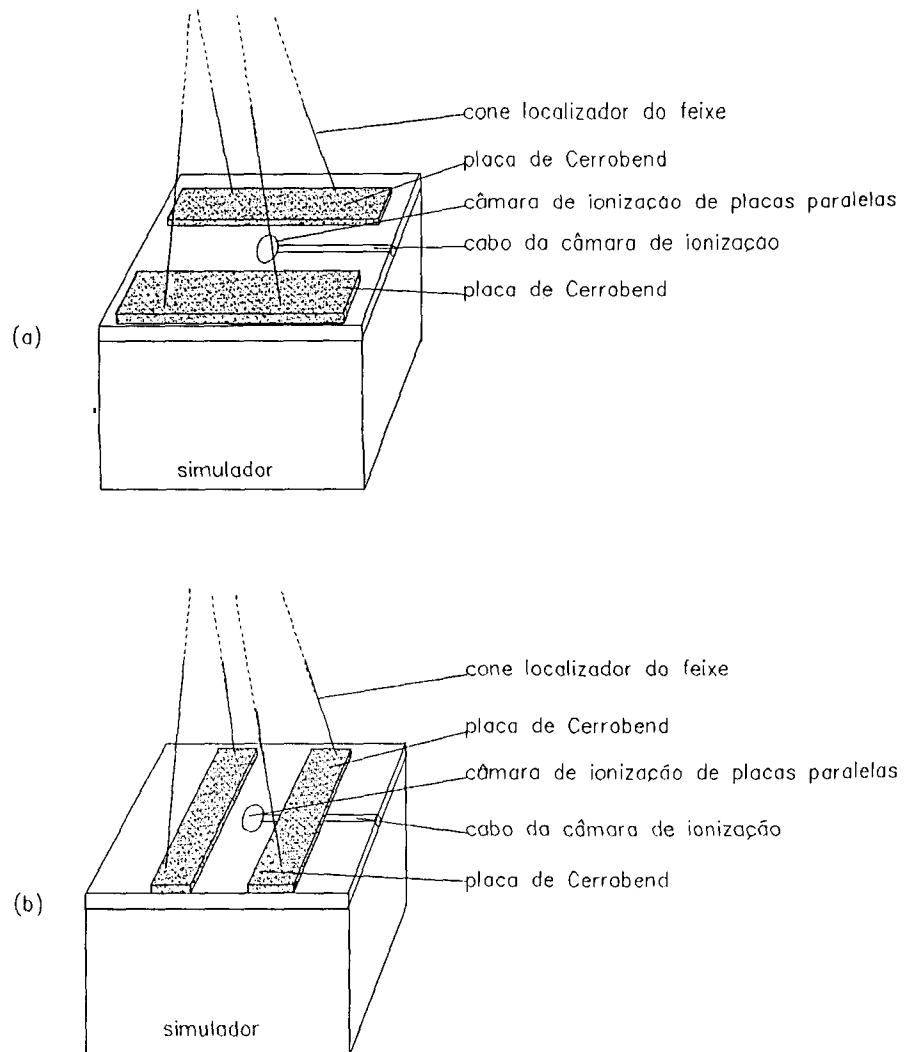


**Figura 4.9:** Influência do tamanho de campo sobre o efeito de polaridade para a câmara de P em poliestireno para diferentes energias de feixes de elétrons.

#### 4.5. Efeito da Irradiação do Cabo na Resposta das Câmaras - $Q_{real}$

Devido à irradiação do cabo, pode haver uma variação da resposta real da câmara de ionização,  $Q_{real}$ , com o tamanho do campo irradiado. CAMPOS & CALDAS (1991b) apresentaram um estudo a este respeito para várias câmaras cilíndricas. Este efeito foi aqui verificado tomando-se a resposta real da câmara como a média entre as leituras às polaridades positiva e negativa. Foram utilizados campos retangulares da seguinte forma: (a) para a condição de cabo protegido, o lado menor do campo ficava paralelo ao cabo de conexão, e (b) para a condição de cabo não protegido, o lado menor do campo ficava perpendicular ao cabo de conexão. Dessa forma campos com dimensões de 6x25, 25x6, 10x25, 25x10, 15x25, 25x15, 20x25 e 25x20 cm<sup>2</sup> foram empregados, por intermédio da proteção do lado menor com placas da liga metálica *Cerrobend* com espessura suficiente para bloquear em 95% a intensidade do feixe de maior energia. A Figura 4.10 apresenta um diagrama da geometria utilizada. A razão entre as respostas para as condições de cabo protegido e de cabo não protegido expressa o efeito do tamanho de cabo irradiado na resposta da câmara de ionização.

Para ambas as câmaras, o efeito de irradiação do cabo sobre  $Q_{real}$  para as energias utilizadas foi menor que 0,5% para as duas condições testadas. Este resultado mostra que o efeito da irradiação do cabo existe e que uma correção é necessária quando campos maiores que o campo de referência são utilizados.



**Figura 4.10.:** Representação esquemática da montagem utilizada para avaliação do efeito de irradiação do cabo da câmara de ionização: (a) cabo não protegido e (b) cabo protegido.



# Capítulo 5

## Calibração das Câmaras de Ionização de Placas Paralelas

Este capítulo apresenta os resultados a respeito da calibração das câmaras de ionização em feixe de radiação gama de Cobalto-60 e em feixe de elétrons de 20 MeV. Os resultados a respeito da dependência energética das câmaras de ionização são também apresentados.

### 5.1. Introdução

Para a dosimetria de feixes de elétrons, especialmente em energias inferiores a 15 MeV, são recomendadas câmaras de ionização com a geometria plano-paralela. As câmaras deste tipo reduzem a perturbação da fluência dos elétrons que ocorre quando um material de baixa densidade é introduzido em um meio. Para uma câmara de ionização de placas paralelas com as dimensões da cavidade e do anel de guarda adequadamente projetados, o fator de perturbação é considerado igual a 1 (MATTSSON *et al.*, 1981). Além disto, o ponto efetivo de medida destas câmaras é bem definido na superfície interna da janela de entrada (SKAGGS, 1949).

No caso da dose absorvida na água, determinada por intermédio de câmaras de ionização cilíndricas ou câmaras plano-paralelas, utiliza-se a mesma equação (eq. 1.21), conforme o formalismo dos atuais protocolos de dosimetria. De acordo com este formalismo, um fator de dose absorvida para o ar,  $N_D$  ou  $N_{gas}$ , específico para a câmara é empregado (item 1.3.2.).

Os três métodos que podem ser empregados para a determinação de  $N_D$  para câmaras de ionização de placas paralelas têm sido discutidos por vários autores (MATTSSON *et al.*, 1981; ATTIX, 1990; ANDREO *et al.*, 1992).

O primeiro método consiste na calibração da câmara de ionização de placas paralelas contra uma câmara cilíndrica, com  $N_D$  conhecido, em um feixe de elétrons de energia superior a 18 MeV à profundidade de dose absorvida máxima  $D_m$ . Em feixes de elétrons desta faixa de energia, o fator de perturbação de fluência de elétrons de câmaras cilíndricas é considerado igual a 1.

Um outro método (NACP, 1981) aplica o mesmo formalismo utilizado para câmaras cilíndricas e calibra-se a câmara de ionização de placas paralelas em termos de kerma no ar,  $K_{ar}$ , no feixe de radiação gama de Cobalto-60. A câmara é posicionada de tal maneira que o centro de sua cavidade de ar esteja no ponto onde  $K_{ar}$  é conhecido. A razão entre  $K_{ar}$  e a resposta da câmara fornece o valor de  $N_K$  para a câmara. A partir do fator  $N_K$  determinado,  $N_D$  é calculado de acordo com a equação (1.18). Neste método é necessário que sejam conhecidos os fatores  $k_{at}$  e  $k_m$  (equação 1.18) da câmara de placas paralelas.

O terceiro método de calibração utiliza também um feixe de radiação gama de Cobalto-60 (NACP, 1981). A calibração é feita contra uma câmara cilíndrica de  $N_D$  conhecido em profundidade (p.e., 5 g/cm<sup>2</sup>) em um simulador de mesmo material da câmara de placas paralelas, o que permite considerar o fator  $P_{parede}$  (eq. 1.20) igual a 1.

O protocolo americano (AAPM, 1983) fornece o valor do produto de  $k_{at}$  e  $k_m$  de várias câmaras de ionização empregadas em dosimetria de fótons e elétrons, incluindo a câmara de ionização de placas paralelas Memorial-Holt. Assim, se  $N_K$  desta câmara

for conhecido (aplicando-se o segundo método citado),  $N_D$  ou  $N_{gas}$  poderá ser calculado. Dessa forma, esta câmara poderia ser utilizada para a determinação de  $N_D$  de outras câmaras de ionização de placas paralelas de construção similar, por intercomparação. Considerando esta alternativa, quatro condições experimentais foram realizadas para a determinação do fator  $N_{gas}$  das câmaras sob teste:

(i) calibração em um feixe de elétrons de 20 MeV contra uma câmara cilíndrica de  $N_{gas}$  conhecido;

(ii) calibração em um feixe de elétrons de 20 MeV contra uma câmara de ionização de placas paralelas de fator de calibração conhecido,  $(N_{gas})^{conhecido}$ ;

(iii) calibração em um feixe de radiação gama de Cobalto-60 contra uma câmara cilíndrica com  $(N_{gas})^{conhecido}$ ;

(iv) calibração em um feixe de radiação gama de Cobalto-60 contra uma câmara de placas paralelas de  $(N_{gas})^{conhecido}$ .

A equação utilizada para a determinação do fator de calibração da câmaras de placas paralelas,  $(N_{gas})^{pp}$  foi:

$$(N_{gas})^{pp} = \frac{(N_{gas})^{conhecido} \cdot (M \cdot P_{ion} \cdot P_{rep} \cdot P_{parede} \cdot P_{cel})}{(M \cdot P_{ion} \cdot P_{rep} \cdot P_{parede})^{pp}} \quad (5.1)$$

onde os índices *pp* e *conhecido* se referem às câmaras de ionização de placas paralelas em estudo e às câmaras de ionização com fatores de calibração conhecidos, respectivamente. Todos os outros fatores têm os mesmos significados dados na equação (1.20). A Tabela 5.1. apresenta os valores dos fatores de correção e de calibração das câmaras utilizadas como referência.

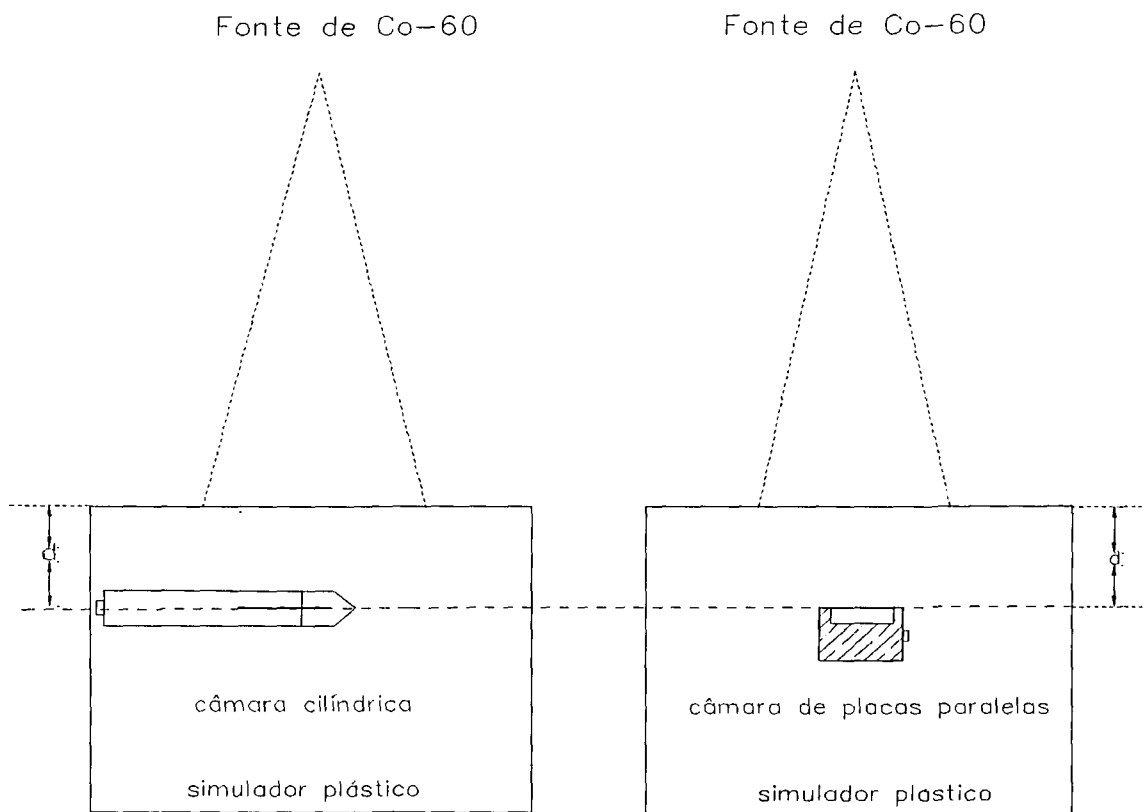
**Tabela 5.1:** Valores numéricos dos parâmetros de correção das câmaras cilíndrica e plano-paralela utilizadas como referência nos diferentes feixes de radiação.

Câmara	Co-60					Elétrons, 20 MeV			
	$A_{parede}$	$P_{parede}$	$P_{rep}$	$P_{cel}$	$N_X$ ( $10^9$ R/C)	$N_{gas}$ ( $10^7$ Gy/C)	$P_{parede}$	$P_{rep}$	$P_{cel}$
NEL, 2571	0,990	0,988	0,992	1,000	4,748	4,051	1,000	0,991	1,008
Memorial-Holt	1,008	1,000	1,000	1,000	3,201	2,732	1,000	1,000	1,000

## 5.2. Calibração em Feixe de Radiação Gama de Cobalto-60

Para esta condição foram comparados os comportamentos da câmara A em acrílico contra a câmara cilíndrica fabricada pela NEL, modelo 2571, no. de série 674, sem capa de equilíbrio eletrônico, ambas a uma profundidade igual a 5 cm, em um simulador de acrílico. A câmara P em poliestireno foi calibrada contra a mesma câmara cilíndrica, além da câmara Memorial-Holt, no. de série 260, instaladas em um simulador de poliestireno à mesma profundidade anterior. A incerteza total associada aos fatores de calibração ( $N_X$ ) das câmaras de referência é de  $\pm 2\%$  para um nível de confiança de 95%. A figura 5.1 apresenta um diagrama da montagem experimental utilizada.

O fator de calibração determinado para a câmara em acrílico foi de  $3,171 \times 10^8$  Gy/C. A câmara em poliestireno apresentou fatores de calibração iguais a  $3,122 \times 10^8$  Gy/C e  $3,109 \times 10^8$  Gy/C na intercomparação com as câmaras cilíndricas e Memorial-Holt, respectivamente. O fator de calibração determinado para a câmara Memorial-Holt em intercomparação com a câmara cilíndrica foi de  $2,744 \times 10^7$  Gy/C.



**Figura 5.1:** Representação esquemática da montagem para calibração das câmaras de ionização em feixe de radiação gama de Cobalto-60 para um tamanho de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  à DFS= 100 cm e profundidade  $d = 5$  cm.

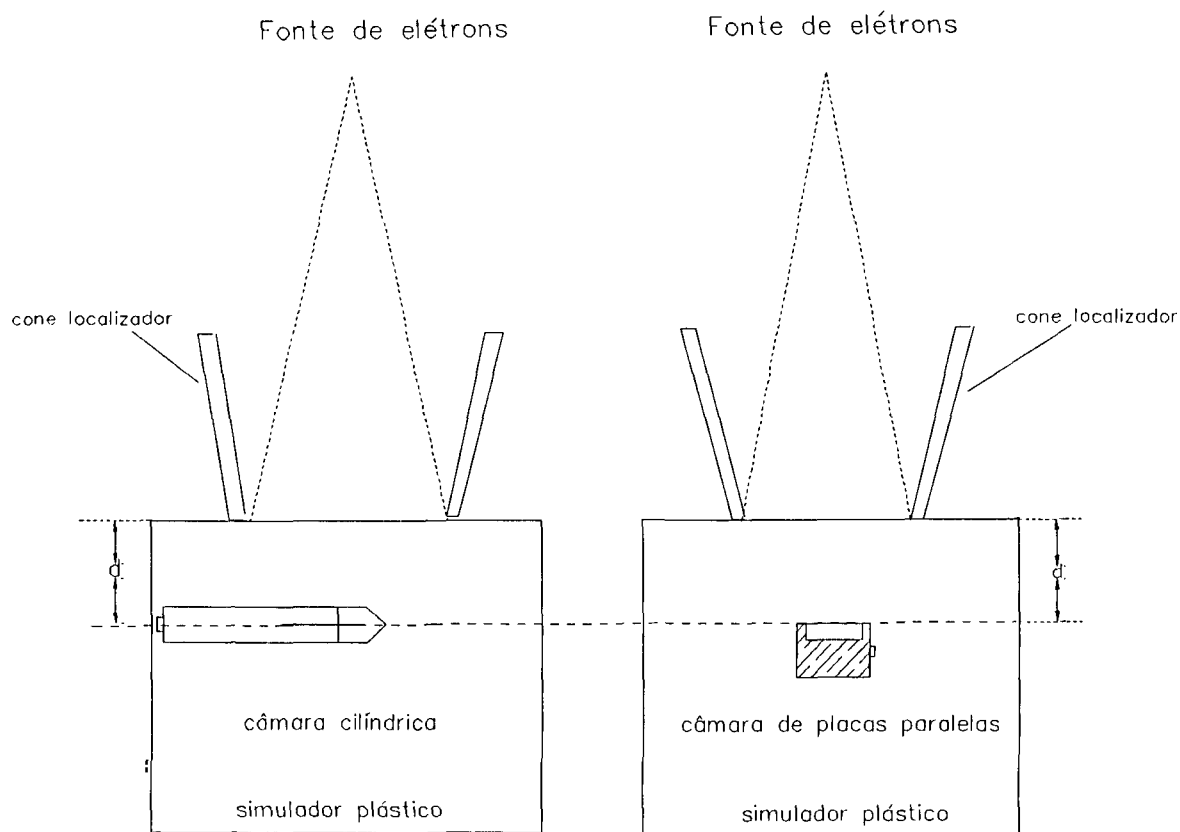
### 5.3. Calibração em Feixe de Elétrons de 20 MeV

Para esta condição foi utilizado um feixe de elétrons com energia nominal de 20 MeV. O comportamento da câmara em acrílico foi comparado com o da câmara cilíndrica sem capa de equilíbrio eletrônico, ambas a uma profundidade igual a 2 cm ( $D_m$  para este feixe de elétrons) em um simulador de acrílico. A câmara em poliestireno foi intercomparada contra a câmara cilíndrica e a câmara Memorial-Holt, instaladas em um simulador de poliestireno a profundidade de 2 cm. A Figura 5.2 apresenta um diagrama da montagem experimental utilizada.

O fator de calibração determinado para a câmara em acrílico foi de  $3,215 \times 10^8$  Gy/C. A câmara em poliestireno apresentou fatores de calibração iguais a  $3,107 \times 10^8$  Gy/c e  $3,125 \times 10^8$  Gy/C na intercomparação com as câmaras cilíndricas e Memorial-Holt, respectivamente. O fator de calibração determinado para a câmara Memorial-Holt em intercomparação com a câmara cilíndrica foi de  $2,716 \times 10^7$  Gy/C.

### 5.4. Comparação entre os Métodos de Calibração das Câmaras

A Tabela 5.2 apresenta as razões entre os fatores de calibração das câmaras de ionização de placas paralelas determinados em feixes de radiação gama de Cobalto-60 e os fatores de calibração determinados em feixe de elétrons de 20 MeV. Os valores de  $N_{gas}$  determinados no feixe de Cobalto-60 em relação à mesma determinação em feixes de elétrons são maiores para as câmaras P e a câmara Memorial-Holt, na intercomparação com a câmara cilíndrica. Para a câmara A, entretanto, ocorre o inverso, isto é, o  $N_{gas}$  determinado em feixe de Cobalto-60 é menor em 1,4%. Para a câmara P o fator encontrado está dentro de  $\pm 0,5\%$ , considerando as calibrações contra a câmara cilíndrica e câmara Memorial-Holt.



**Figura 5.2:** Representação esquemática da montagem para calibração das câmaras de ionização em feixe de elétrons de diferentes energias para um tamanho de cone localizador de  $15 \times 15 \text{ cm}^2$  à DFS= 100 cm e profundidade  $d$  variável, de acordo, com a energia do feixe.

**Tabela 5.2:** Razões entre os fatores de calibração das câmaras de ionização de placas paralelas determinados em feixes de radiação gama de Cobalto-60 e de elétrons de 20 MeV contra as câmaras cilíndrica e Memorial-Holt.

Câmara	Contra C. 2571	Contra C. M.-Holt
Câmara A	0,986	-
Câmara P	1,005	0,995
Câmara M.-Holt	1,010	-

Vários autores têm encontrado resultados diferentes para as calibrações das câmaras de ionização de placas paralelas em feixes de radiação gama de Cobalto-60 em relação à calibração em feixes de elétrons de energia superior a 18 MeV por intercomparação com uma câmara de ionização cilíndrica. A Tab. 5.3 apresenta estes resultados para a câmara Memorial-Holt.

**Tabela 5.3:** Razões entre os fatores de calibração da câmara de ionização de placas paralelas Memorial-Holt em feixes de radiação gama de Cobalto-60 e de elétrons de energia superior a 18 MeV, determinados por diferentes autores por intercomparação com uma câmara cilíndrica.

Autores	Razão entre calibrações
KRITHIVAS & RAO (1986)	0,995
KUBO <i>et al.</i> (1986)	1,017
KUBO (1991)	1,019
REFT & KUCHNIR (1991)	1,014
LATTANO <i>et al.</i> (1993)	1,006
KUBO (1993)	1,017
Este estudo	1,010

KRITHIVAS & RAO (1986) justificaram estas diferenças para uma câmara Memorial-Holt testada em termos do  $P_{rep}$  para os feixes de elétrons. Estes



autores consideraram que de fato existiria uma perturbação da fluência de elétrons com estas câmaras nos feixes de elétrons. Os fatores de correção de perturbação foram determinados para várias energias de elétrons por intercomparação com uma câmara cilíndrica. Assim, os autores determinaram  $P_{rep} = 1,005$  para elétrons de 22 MeV. Recentemente, REFT & KUCHNIR (1991) apresentaram resultados similares para várias câmaras de placas paralelas. ROGERS (1992), em publicação posterior na qual calcula vários fatores para câmaras de ionização de placas paralelas por intermédio do método de Monte Carlo, sugere um erro de interpretação daqueles autores. Em consequência, KUCHNIR & REFT (1992) publicaram, em seguida, uma reinterpretação de seus resultados. De acordo com estes autores, a câmara Memorial-Holt apresentaria um fator  $P_{parede} = 1,007$ . ROGERS (1992) recomenda  $P_{parede} = 1$  para a câmara Memorial-Holt com uma incerteza estimada em torno de 1% ( $1\sigma$ ), de acordo com cálculos pelo método de Monte Carlo.

Em sua avaliação por simulação das câmaras de ionização de placas paralelas pelo Método de Monte Carlo, ROGERS (1992) avaliou os fatores de correção para a calibração destas câmaras em feixe de radiação gama de Cobalto-60 no ar. Para a câmara Memorial-Holt os valores calculados de  $k_m$  e  $k_{parede}$  foram 0,966 e 1,0097, respectivamente. O produto destes fatores é menor em aproximadamente 0,3% daqueles empregados pelo protocolo americano. De acordo com o autor, as incertezas sistemáticas estimadas destes valores calculados são de 1% ( $1\sigma$ ).

A aplicação destes novos valores calculados de  $k_m$  e  $k_{parede}$  não altera as razões entre os métodos de calibração apresentadas na Tab. 5.2; entretanto, uma pequena alteração ocorre em termos absolutos. A Tab. 5.4 apresenta a comparação entre os valores absolutos de todos os fatores de calibração determinados para as câmaras de ionização Memorial-Holt, A e P. Estes dados são resultados da média de três conjuntos de medidas, realizadas em dias diferentes. Uma variação média de  $\pm 0,5\%$  ( $1\sigma$ ) pode ser considerada representativa da incerteza experimental associada a estas medidas. Portanto, para o valor de  $N_{gas}$  normalizado, a incerteza experimental associada é de  $\pm 0,7\%$ .

**Tabela 5.4:** Valores de  $N_{gas}$  ( $\times 10^7$  Gy/C) para os métodos utilizados e de  $N_{gas}$  normalizado para o valor determinado em feixes de elétrons de 20 MeV.

	Câmara Memorial-Holt		Câmara Poliestireno		Câmara Acrílico	
	$N_{gas}$	$N_{gas}$ normalizado	$N_{gas}$	$N_{gas}$ normalizado	$N_{gas}$	$N_{gas}$ normalizado
Em $^{60}\text{Co}$ contra C. 2571	2,744	1,010	31,22	1,005	31,71	0,986
Apartir de $N_X$ -AAPM	2,732 <sup>a</sup>	1,006	31,09 <sup>c</sup>	1,001	-	-
Apartir de $N_X$ -ROGERS (1992)	2,724 <sup>b</sup>	1,003	30,99 <sup>d</sup>	0,998	-	-
Em elétrons de 20 MeV contra C. 2571	2,716	1,000	31,07	1,000	32,15	1,000

- <sup>a</sup>  $N_{gas}$  calculado a partir dos valores de  $k_m$  e  $k_{parede}$  fornecidos pelo protocolo da AAPM.  
<sup>b</sup>  $N_{gas}$  calculado a partir dos valores de  $k_m$  e  $k_{parede}$  calculados por ROGERS (1992).  
<sup>c</sup>  $N_{gas}$  obtido a partir da intercomparação com a câmara Memorial-Holt com  $N_{gas}$  determinado a partir de  $N_X$  utilizando valores de  $k_m$  e  $k_{parede}$  fornecidos pelo protocolo da AAPM.  
<sup>d</sup>  $N_{gas}$  obtido a partir da intercomparação com a câmara Memorial-Holt com  $N_{gas}$  determinado a partir de  $N_X$  utilizando os valores de  $k_m$  e  $k_{parede}$  calculados por ROGERS (1992).

Tomando-se a correção dos cálculos realizados por ROGERS (1992), a aplicação do produto  $k_m \cdot k_{at}$  para a determinação de  $N_{gas}$  a partir de  $N_X$ , fornecido pelo laboratório padrão secundário, para a câmara de ionização Memorial-Holt resulta em uma diferença entre as calibrações em feixes de radiação gama de Cobalto-60 e de elétrons para esta câmara de aproximadamente 0,3%.

Em relação à câmara P em poliestireno, embora as determinações teóricas ou experimentais de cada fator pertinente para sua calibração em feixe de radiação gama de Cobalto-60 não tenham sido feitas, a consistência dos resultados obtidos em relação à câmara Memorial-Holt e a similaridade existente entre suas estruturas internas permitem concluir que aqueles fatores devem ser menores para esta câmara construída.

A câmara de ionização em acrílico apresentou uma diferença entre as calibrações para Cobalto-60 e elétrons de 20 MeV maior que 1%. Isto pode ser justificado pelo fato de que esta câmara apresenta uma estrutura interna mais

inomogênea que a câmara em poliestireno. Uma avaliação teórica da sua resposta em feixes de radiação gama de Cobalto-60 e de elétrons com base na teoria de Bragg-Gray, como a realizada por ROGERS (1992), poderia consubstanciar este resultado.

Ambos os métodos de calibração de câmaras de ionização de placas paralelas em feixe de radiação gama de Cobalto-60 seguem o formalismo utilizado para as câmaras cilíndricas. Considerando a confirmação dos resultados obtidos por ROGERS (1992), estes métodos podem ser recomendados, quando não estão disponíveis feixes de elétrons de energia alta. Além disto, obter-se-ia uma dosimetria de elétrons mais homogênea entre os usuários, uma vez que os fatores  $N_k$  ou  $N_{gas}$  ( $N_D$ ) seriam fornecidos pelo laboratório padrão e os fatores específicos da câmara tornar-se-iam comuns para todos os usuários.

### 5.5. Estudo do Fator de Correção de Fluência

Conforme discutido anteriormente (item 1.3.), a inserção de uma câmara num meio irradiado provoca uma perturbação na determinação da dose absorvida, devido à diferença entre a densidade de massa do meio e do ar. Os protocolos de dosimetria apresentam os valores de correção de fluência para câmaras cilíndricas de acordo com o raio das mesmas. No caso do protocolo americano (AAPM, 1983), o fator de correção de fluência está embutido no fator  $P_{rep}$ . Para as câmaras de ionização de placas paralelas, entretanto, não há necessidade deste tipo de correção. Este fato, porém, vem sendo discutido por diversos autores.

CASSON & KILEY (1987), por intermédio de comparação com uma câmara cilíndrica tipo Farmer, determinaram fatores de correção de fluência para a câmara Markus diferentes da unidade para energias baixas de elétrons. Estes autores concluíram que a causa provável para isto seria a pequena largura do anel de guarda desta câmara, em torno de 0,7 mm. KUBO *et al.* (1986) publicaram medidas similares a este respeito, e encontraram um valor de  $P_{rep} = 0,953$  para a câmara Markus em um

feixe de 4 MeV. Recentemente, GOSVAMI & KASE (1989) determinaram fatores de correção de fluência para a câmara Markus para energias de elétrons de 3,1 a 18,8 MeV. Seus resultados confirmaram os valores encontrados pelos outros autores. KRITHIVAS & RAO (1986) fizeram medidas similares com a câmara Memorial-Holt para energias de feixes de elétrons de 6 a 22 MeV. Estes autores não encontraram diferenças maiores que 1% para as doses determinadas com uma câmara cilíndrica e com a câmara de ionização de placas paralelas investigada.

Recentemente, KUCHNIR & REFT (1992) apresentaram uma reavaliação de dados prévios por eles publicados ( REFT & KUCHNIR, 1991) a respeito dos fatores de correção de fluência para as câmaras NACP, Memorial-Holt, Markus, Capintec e Exradin. Segundo estes autores, somente as duas primeiras câmaras apresentam fatores de correção em torno de 0,5% para a faixa de energia entre 4,7 e 20,6 MeV. As outras câmaras apresentam fatores de correção substancialmente maiores que 1% para energias mais baixas. Em relação à câmara Markus seus resultados confirmaram os resultados anteriores de outros autores.

A dependência energética ou o fator de correção de fluência das câmaras de ionização  $A$  e  $P$  foram avaliados por intercomparação com a câmara de ionização cilíndrica NEL 2571. Foram feitas irradiações com o mesmo número de unidades da câmara monitora de dose para cada feixe com cada uma das câmaras de ionização localizadas em  $D_m$  para cada um dos feixes testados. A montagem para estas medidas foi a mesma utilizada na Fig. 5.2. As doses absorvidas foram determinadas por intermédio de cada uma das câmaras de ionização, sendo que os valores de  $N_{gas}$  adotados para as câmaras de ionização plano-paralelas foram aqueles calculados para o feixe de elétrons de 20 MeV, por intercomparação com a câmara de ionização cilíndrica. A seguinte expressão foi utilizada:

$$\frac{D^{cil}}{D^{pp}} = \frac{(M \cdot N_{gas} \cdot P_{rep} \cdot P_{cel})^{cil}}{(M \cdot N_{gas} \cdot P_{rep})^{pp}} \quad (5.2)$$

onde os índices *cil* e *pp* se referem às câmaras cilíndrica e plano-paralelas, e os outros fatores têm os significados conhecidos. Os valores empregados para o fator  $P_{cel}$  para a câmara cilíndrica foi 1,008 para todas as energias, e para o fator  $P_{rep}$  os valores empregados foram 0,956; 0,962; 0,972; 0,982 e 0,991 para os feixes de 6, 9, 12, 16 e 20 MeV, respectivamente (AAPM, 1983). Para as câmaras plano-paralelas  $P_{rep}$  foi assumido unitário, inicialmente.

A Tabela 5.5 apresenta todos os fatores de correção de fluência obtidos para as câmaras de ionização desenvolvidas no presente trabalho e para algumas câmaras comerciais do mesmo tipo, publicados por outros autores. Pode-se perceber que as câmaras construídas A e P apresentam uma correção de fluência menor ou igual a 0,5% para quase todas as energias testadas. A câmara A, para a energia de 9 MeV, não apresenta resultado similar; mesmo assim, o fator de correção de fluência é menor que 1%. Em relação às câmaras comerciais, os valores do fator de correção de fluência para os modelos idênticos, em geral, concordam dentro de 1% para as medidas realizadas por diferentes autores. Isto ocorre para as câmaras Memorial-Holt, Markus e Capintec. Pode-se dizer que, para as câmaras Memorial-Holt, SHM, NACP e Attix (medidas limitadas a duas energias somente), a correção de fluência não ultrapassa 1% para a faixa de energia apresentada. As câmaras Markus, Capintec e Extradin, entretanto, apresentam uma dependência da correção de fluência maior para as energias de elétrons mais baixas. Para a câmara Markus, um dos grupos de autores (KUBO *et al.*, 1986) verificou a necessidade de correção de fluência superior a 2% para as energias inferiores a 13 MeV. A câmara Capintec apresenta a maior correção de fluência entre todas as câmaras que é de 3,6% (KUCHNIR & REFT, 1992).

A partir destas comparações, pode-se concluir que as câmaras construídas apresentam diferenças entre calibrações em feixes de Cobalto-60 e elétrons de energia alta e fatores de correção de fluência com a energia tão baixos quanto as melhores câmaras comerciais de placas paralelas disponíveis.

**Tabela 5.5: Fatores de correção de fluência para diversas câmaras de ionização de placas paralelas para diversas energias (MeV) de feixes de elétrons.**

Energia (MeV)	6	9	12	13	15	16	17	18	20	22
Câmara A	0,995	1,007	1,001	-	-	1,004	-	-	1,000	-
Câmara P	0,998	0,997	0,999	-	-	1,000	-	-	1,000	-
M.-Holt <sup>a</sup>	1,001	0,990	0,986	-	0,997	-	-	1,000	-	1,005
M.-Holt <sup>b</sup>	0,992	0,998	0,998	-	1,000	-	-	1,000	-	-
M.-Holt <sup>c</sup>	1,004	1,003	0,995	-	0,997	-	-	0,994	-	1,000
Markus <sup>b</sup>	0,980	0,990	0,997	-	1,000	-	-	1,000	-	-
Markus <sup>d</sup>	0,971	0,980	-	0,982	-	-	1,000	-	0,997	-
Markus <sup>c</sup>	0,976	0,993	0,994	-	0,998	-	-	0,991	-	1,000
Capintec <sup>b</sup>	0,966	0,983	0,993	-	0,997	-	-	1,000	-	-
Capintec <sup>c</sup>	0,964	0,985	0,976	-	0,986	-	0,991	-	1,000	-
Exradin <sup>c</sup>	0,984	0,992	0,992	-	0,994	-	0,989	-	1,000	-
SHM <sup>b</sup>	1,010	1,004	1,001	-	1,000	-	-	1,000	-	-
NACP <sup>f</sup>	0,997	0,994	0,990	-	0,996	-	0,993	-	1,000	-
Aux <sup>e</sup>	-	0,994	-	-	-	-	-	1,000	-	1,000

<sup>a</sup> G. KRITHIVAS & S. N. RAO, 1986.      <sup>d</sup> G. C. GOSWAMI & K. R. KASE, 1989.

<sup>b</sup> KUBO et al., 1986.

<sup>e</sup> H. KUBO, 1993.

<sup>f</sup> KUCHNIR & REFT, 1991.

# Capítulo 6

## Verificação da Energia de Feixes de Elétrons

Neste capítulo, um novo método para verificação da energia de feixes de elétrons é testado e um método prático usual de verificação de energia é analisado. A sensibilidade dos dois métodos é também avaliada.

### 6.1. Introdução

Na calibração de feixes de elétrons, é necessário que a energia média do feixe na superfície do meio irradiado seja conhecida. Esta informação é básica para que os fatores de correção e de conversão das leituras com câmaras de ionização sejam selecionados para a determinação da dose absorvida .

A energia dos feixes de elétrons é determinada, de maneira geral, por medidas de alcance. Para isto, usa-se, em geral, um simulador de água com um sistema automático para movimento da câmara de ionização ou diodo, ou um simulador sólido onde a profundidade possa ser varrida. Entretanto, enquanto que em um acelerador linear

somente uma ou duas energias de feixes de fótons são disponíveis, o número de feixes de elétrons com energias diferentes pode ser superior a cinco, o que significa um tempo longo para esta verificação.

Os aceleradores lineares de elétrons modernos apresentam sistemas internos para a manutenção qualitativa e quantitativa de seus feixes; entretanto, os diferentes parâmetros dos feixes como rendimento, simetria, uniformidade e energia devem ser verificados regularmente (AAPM, 1984; KUTCHER *et al.*, 1994). É recomendado que a energia seja verificada, no mínimo, mensalmente. Segundo estas recomendações, a variação da energia não deve resultar em um deslocamento na posição da isodose de 85% em mais que 2 mm (KUTCHER *et al.*, 1994).

ROSENOW *et al.* (1991) apresentaram outro método que faz uso de um instrumento para a verificação de uniformidade e simetria de feixes, THEBES (Therapy Beam Evaluation System Model 7000), Victoreen, Inc., E.U.A., que é utilizado, em alguns serviços de radioterapia. Este equipamento constitui-se de um arranjo de várias câmaras de ionização em paralelo. Neste método, uma cunha de poliestireno, especialmente projetada, instalada sobre o arranjo de câmaras, permite que as diferentes profundidades sejam simuladas, horizontalmente. As leituras de ionização assim obtidas são registradas em gráfico contra a distância ao longo do eixo do instrumento, o que simula a curva de ionização em profundidade. A distância entre o ponto no eixo do arranjo de câmaras atingido pela tangente da porção descendente da curva de ionização em profundidade obtida e o eixo central do feixe é relacionada à energia, por intermédio de uma curva de calibração.

RAMSAY *et al.* (1991) apresentaram o teste de um novo instrumento para verificação de energia de feixes de elétrons. Este equipamento é fabricado pela PTW-Freiburg, Alemanha, e é denominado Geske monitor. Ele consiste de um arranjo vertical de nove câmaras de ionização plano-paralelas, conectado a um eletrômetro convencional. A primeira câmara está sob uma espessura de absorvedor de alumínio de 5 mm, com as câmaras subsequentes interpostas a espessuras do mesmo absorvedor de 7 mm. Desde



que a perda média de energia em alumínio é de aproximadamente 4,5 MeV/cm, os feixes com energias de 6, 9, 12, 16 e 20 MeV são completamente absorvidos depois de atravessar as câmaras de números 2, 3, 5, 7 e 8, respectivamente. A carga medida pelo eletrômetro é, dessa forma, uma função do número de câmaras irradiadas pelo feixe.

Recentemente, DAS *et al.* (1994) apresentaram um novo método para determinação da energia de feixes de elétrons empregando medidas de transmissão e de retroespalhamento em material de número atômico alto. O logaritmo da razão entre as leituras de transmissão e de retroespalhamento em chumbo relaciona-se à energia do feixe por meio de uma curva de calibração.

As variações na razão entre as leituras a duas profundidades indicam as mudanças no valor da energia do feixe (ALMOND, 1967). Esta razão é, frequentemente, empregada como um método prático de verificação de energia nos procedimentos de controle de qualidade de rotina em feixes de elétrons (AAPM, 1975). Neste método, uma profundidade pode ser a profundidade de máxima ionização, também utilizada para a verificação do rendimento do feixe, e a segunda profundidade deve se situar na porção descendente da curva de ionização. O limite em geral adotado para a variação da razão entre leituras às diferentes profundidades é de  $\pm 3\%$ . Entretanto, não existe nenhuma informação na literatura a respeito da conveniência deste valor como limite a partir do qual deve ser feita a verificação exata da variação da energia do feixe pelo método tradicional de medida de alcance.

## 6.2. Objetivos

De acordo com os dados publicados (KLEVENHAGEN *et al.*, 1982; TABATA & ITO, 1992), existe uma relação entre o retroespalhamento em profundidade e a energia média de feixes de elétrons incidentes na superfície do meio. Se o efeito de retroespalhamento for suficientemente sensível à energia do feixe, este efeito poderia ser empregado como um método para a verificação da energia em feixes de elétrons.

O objetivo desta parte do presente trabalho foi o de verificar a viabilidade de um método de verificação de energia de feixes de elétrons a partir de medidas de retroespalhamento com uma câmara de ionização de placas paralelas contra um método geralmente utilizado em dosimetria clínica, que emprega a razão entre as leituras a duas profundidades diferentes.

### 6.3. Estudo do Fator de Retroespalhamento

A câmara de poliestireno foi especialmente construída a fim de ser utilizada neste estudo. Com uma distância entre as placas de aproximadamente 1 mm e espessura total de 3 mm, esta câmara permite que, mesmo com a janela de entrada em geometria inversa oposta ao feixe incidente, sejam feitas medidas próximas à superfície do simulador, isto é, a 3 mm de profundidade. Isto possibilita relacionar o efeito de retroespalhamento, de forma praticamente direta, à energia do feixe na superfície do simulador. Na sua construção, o poliestireno foi empregado por ser recomendado como material para dosimetria e apresentar um fator de conversão de escala de profundidade para a água de 0,99 (NACP, 1980; AAPM, 1991), ou seja, com este material a profundidade de leitura pode ser relacionada diretamente à profundidade em água.

De acordo com AAPM (1991), a espessura de chumbo necessária para frear todos os elétrons primários de um feixe de radiação é linear com a energia do feixe, e apresenta um coeficiente angular igual a 0,05 cm-Pb/MeV. Assim, para uma energia de feixe de 20 MeV, uma espessura de chumbo igual a 1 cm é suficiente para frear todos os elétrons primários. Como material de retroespalhamento foi utilizada uma placa de chumbo com 2 cm de espessura. Um fator de retroespalhamento  $FR$  foi definido como a razão entre a leitura da câmara de ionização na posição adjacente ao material retroespalhador e a leitura na mesma profundidade no simulador homogêneo.

A Figura 6.1. apresenta o diagrama da montagem utilizada. A câmara P foi instalada com sua janela de entrada oposta ao feixe de elétrons e imediatamente

adjacente à superfície da peça de chumbo empregada. Profundidades diferentes foram simuladas por superposição de placas de poliestireno sobre a câmara. A distância foco-superfície foi mantida fixa em 100 cm e um tamanho de campo de  $15 \times 15 \text{ cm}^2$  foi usado.

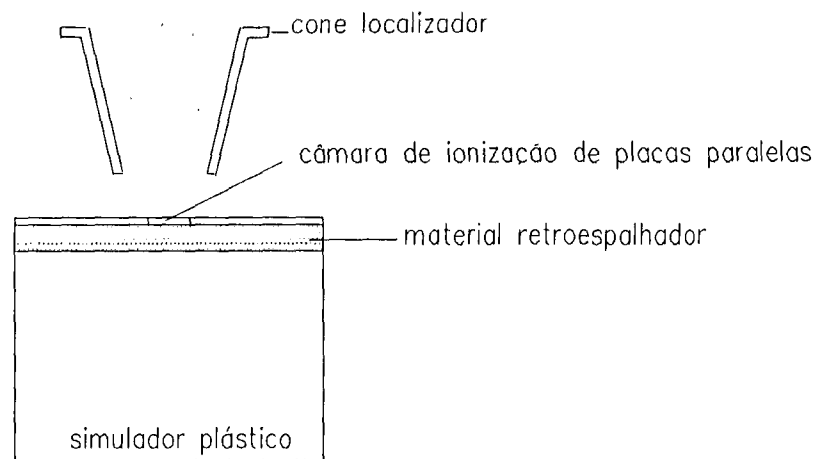
As energias de feixes testadas foram as originais do acelerador linear Clinac 2100C de 6, 9, 12, 16 e 20 MeV. Antes dos experimentos, as características dos feixes foram determinadas por intermédio de medidas de alcance, obtidas com um sistema de aquisição de dados automático Multidata™. A fim de se testar a sensibilidade do método, as energias originais dos feixes foram alteradas por intermédio de degradadores de feixes na forma de placas de poliestireno de espessuras diferentes. As características dos feixes degradados foram também obtidas com o sistema de aquisição de dados automático.

A Figura 6.2 apresenta as medidas de retroespalhamento em função da energia média do feixe de elétrons na superfície espalhadora em chumbo, localizada em diferentes profundidades para cada um dos feixes de elétrons originais. Cada ponto de medida representa a média de cinco leituras, que apresentaram um desvio padrão máximo de  $\pm 0,5\%$ . Para a determinação das energias dos feixes em diferentes profundidades foi utilizada a fórmula de Harder (eq. 1.25).

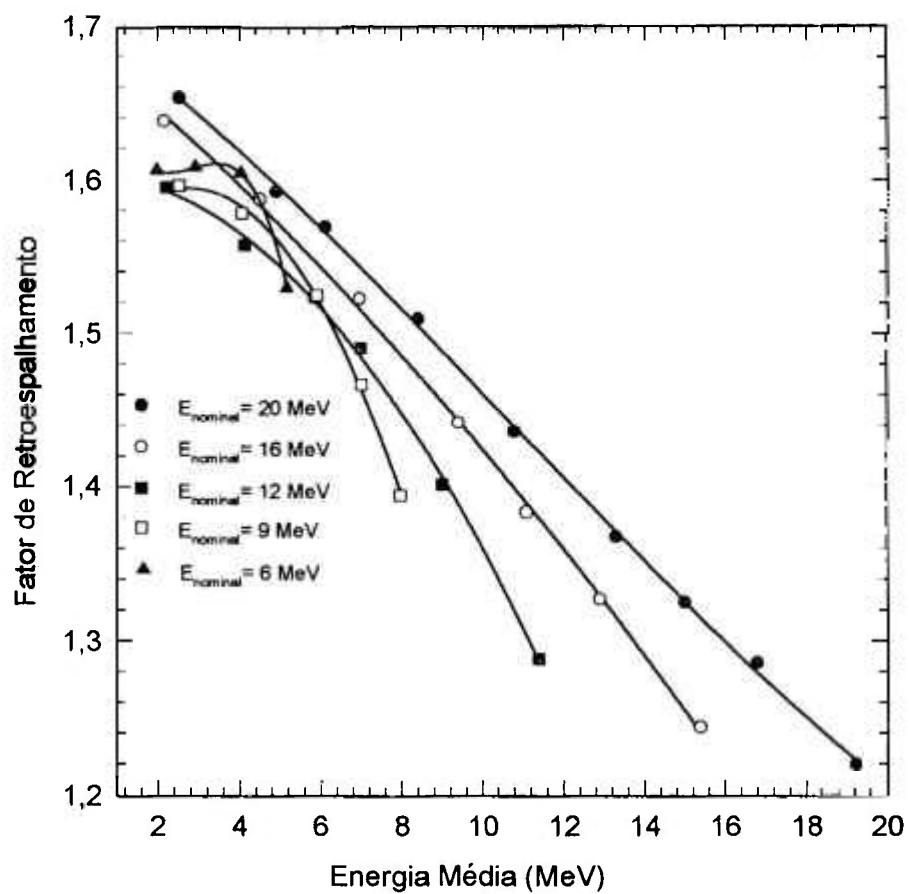
A primeira profundidade de medida foi 3 mm e corresponde às energias médias de 19,3; 15,4; 11,4; 8,0 e 5,2 MeV para os feixes de energias nominais de 20, 16, 12, 9 e 6 MeV, respectivamente. Para estas condições, os valores respectivos de *FR* foram 1,220; 1,244; 1,288; 1,394 e 1,530. Com o aumento da profundidade de medida, os valores de *FR* aumentaram, alcançando um valor máximo, para a menor energia nominal utilizada - 6 MeV, de 1,604 para uma energia correspondente em profundidade de 1,98 MeV. O valor de *FR* reduz-se com o aumento da energia; entretanto, suas variações tornam-se menos aparentes na região de energias mais altas.

A fim de selecionar uma profundidade comum a todos os feixes, que pudesse ser utilizada para determinação da energia por medidas de retroespalhamento, foram testadas profundidades até 2,0 cm. Esta profundidade corresponde, aproximadamente, à profundidade de dose máxima para todos os feixes, a menos do feixe de 6 MeV, que se

feixe de elétrons



**Figura 6.1.:** Representação esquemática do arranjo experimental para as medidas do efeito de retroespalhamento em chumbo utilizando câmara P.



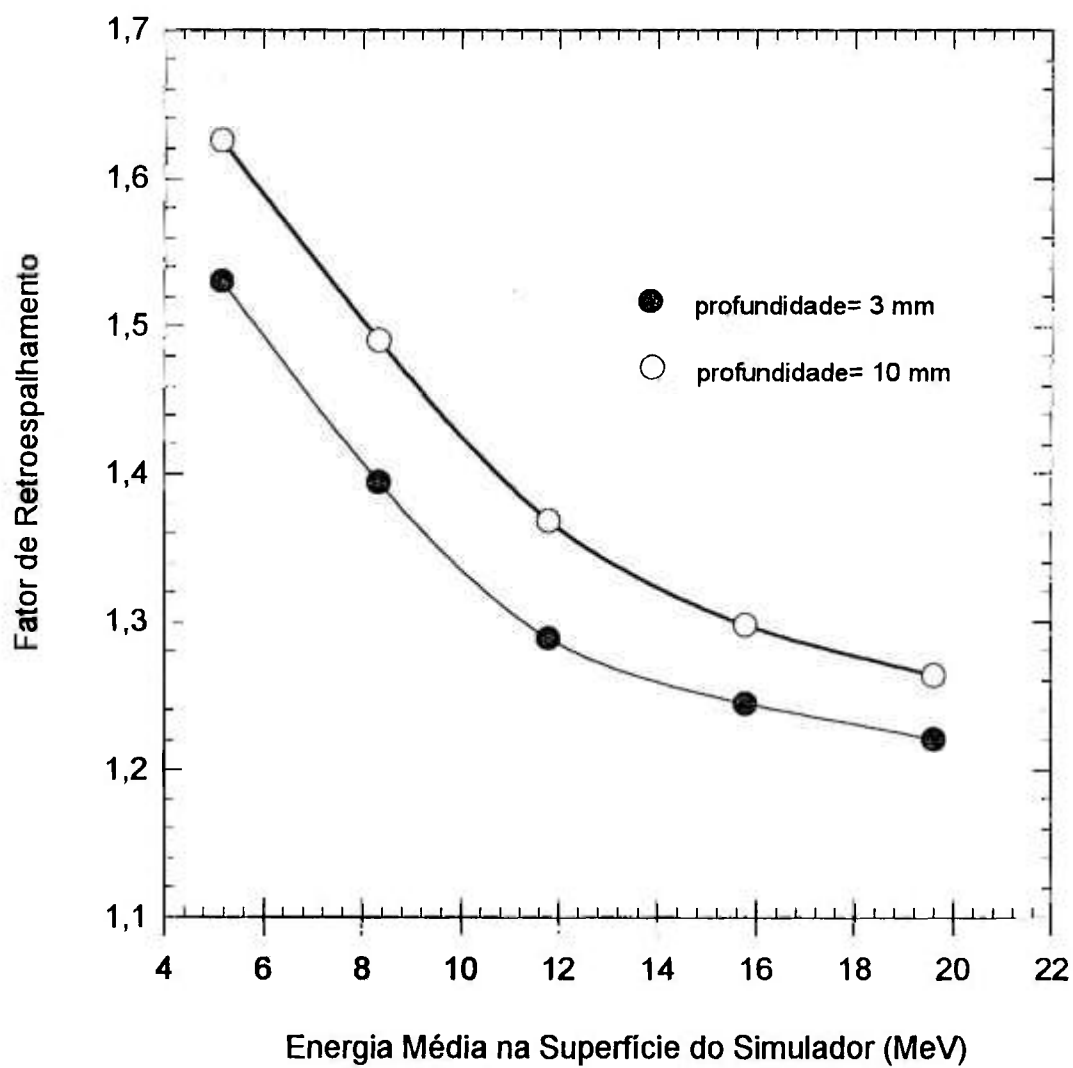
**Figura 6.2:** Variação do fator de retroespalhamento com a energia dos feixes de elétrons na superfície espalhadora em chumbo. Para cada curva foi utilizada a energia inicial do feixe na superfície.

encontra em torno de 1,2 cm. A Figura 6.3 apresenta estes resultados para as profundidades de 3 e 10 mm. A forma da curva é similar para qualquer profundidade testada. Isto significa que, dentro desta faixa de profundidade, a relação entre os fatores de retroespalhamento para as diferentes energias é, praticamente, a mesma. Assim, a menor profundidade medida, 3 mm, foi escolhida para a avaliação da sensibilidade do método.

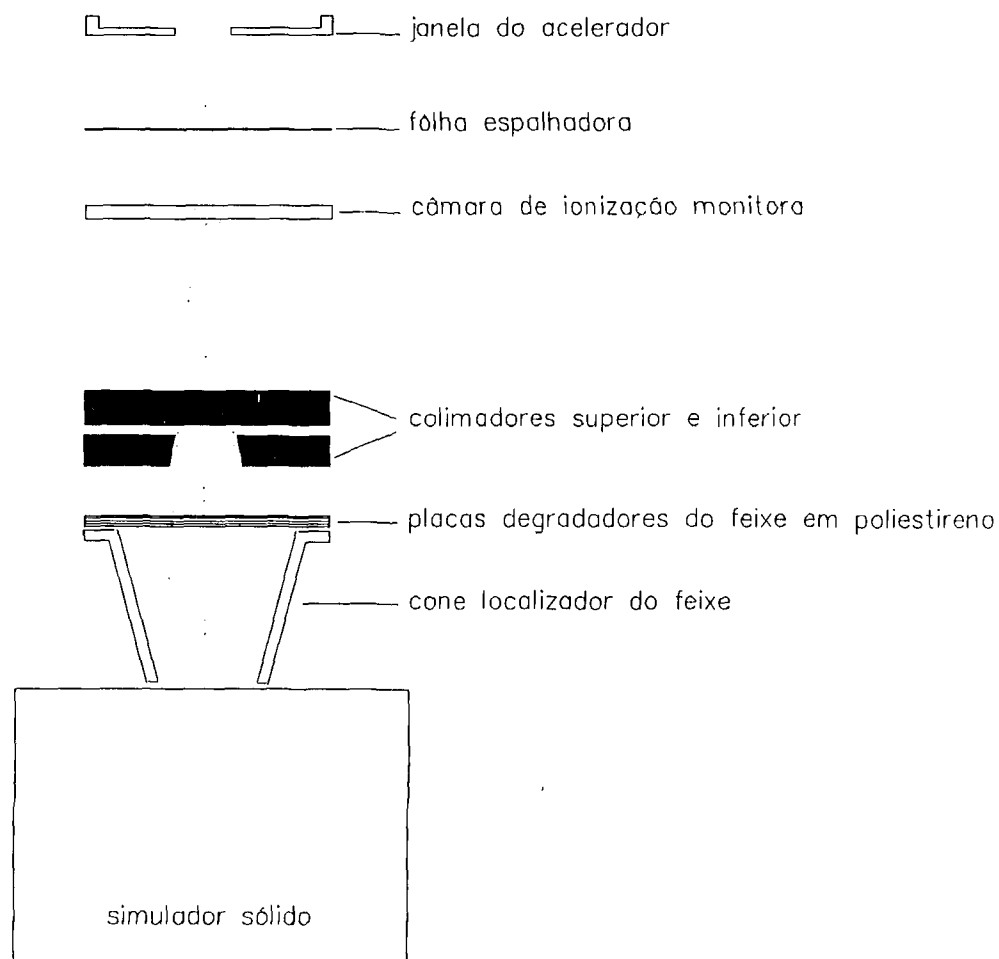
A sensibilidade do método foi testada por intermédio da degradação dos feixes por espessuras de poliestireno de 1,34; 2,69; 4,01; 5,16 e 7,16 mm. A Fig. 6.4 mostra o esquema do arranjo experimental empregado. Nas Tabelas 6.1 e 6.2 são apresentados os parâmetros relevantes para os feixes de 6 e 20 MeV, e incluem a profundidade do alcance terapêutico dos feixes, 85% da dose absorvida máxima, que é o parâmetro sugerido para a verificação da constância da energia do feixe (KUTCHER *et al.*, 1994).

Uma vez que o método de rotina empregado na dosimetria clínica para a verificação rápida da energia dos feixes de elétrons tem sido o método que utiliza a razão entre leituras a duas profundidades, a sensibilidade deste método foi comparada com a do método ora em estudo. As duas profundidades selecionadas para cada feixe foram as utilizadas correntemente nos testes de controle de qualidade no Roswell Park Cancer Institute: (i) 1,00 e 2,84 cm para o feixe de 6 MeV, (ii) 1,00 e 3,77 cm para o feixe de 9 MeV, (iii) 1,00 e 5,64 cm para o feixe de 12 MeV, (iv) 1,00 e 6,62 cm para o feixe de 16 MeV e (v) 1,00 cm e 7,60 cm para o feixe de 20 MeV. Nas Figuras 6.5 e 6.6, são apresentadas as sensibilidades normalizadas das medidas de retroespalhamento com a energia e a sensibilidade das medidas da razão entre leituras a duas profundidades para os feixes de 6 a 20 MeV.

Pode-se observar que o método por *FR* é relativamente insensível para pequenas mudanças na energia, tornando-se menos sensível ainda para energias de elétrons mais altas. A mudança percentual na resposta do método para a introdução de uma espessura de degradador do feixe que resultasse em um deslocamento de 2 mm na curva de dose absorvida foi de 0,7; 1,1; 1,7; 2,4 e 3,3% para as energias de 20, 16, 12, 9 e 6 MeV,



**Figura 6.3:** Variação do fator de retroespalhamento com a energia média de feixes de elétrons na superfície do simulador para diferentes profundidades do espalhador.



**Figura 6.4.:** Representação esquemática do arranjo experimental utilizado para dosimetria dos feixes de elétrons degradados em energia por placas de poliestireno.

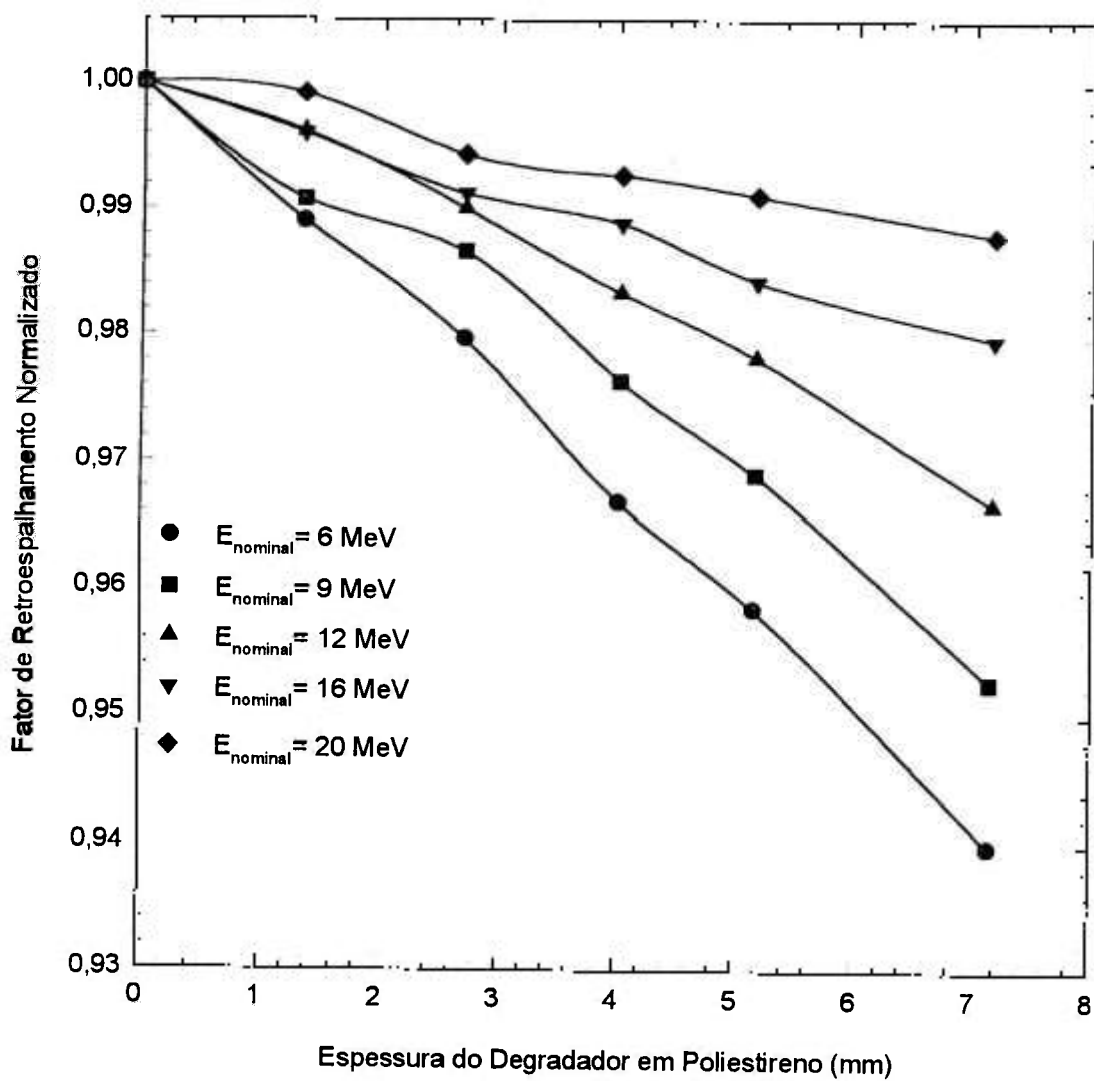


**Tabela 6.1:** Parâmetros do feixe de elétrons de 6 MeV em função da inserção de degradadores em poliestireno.

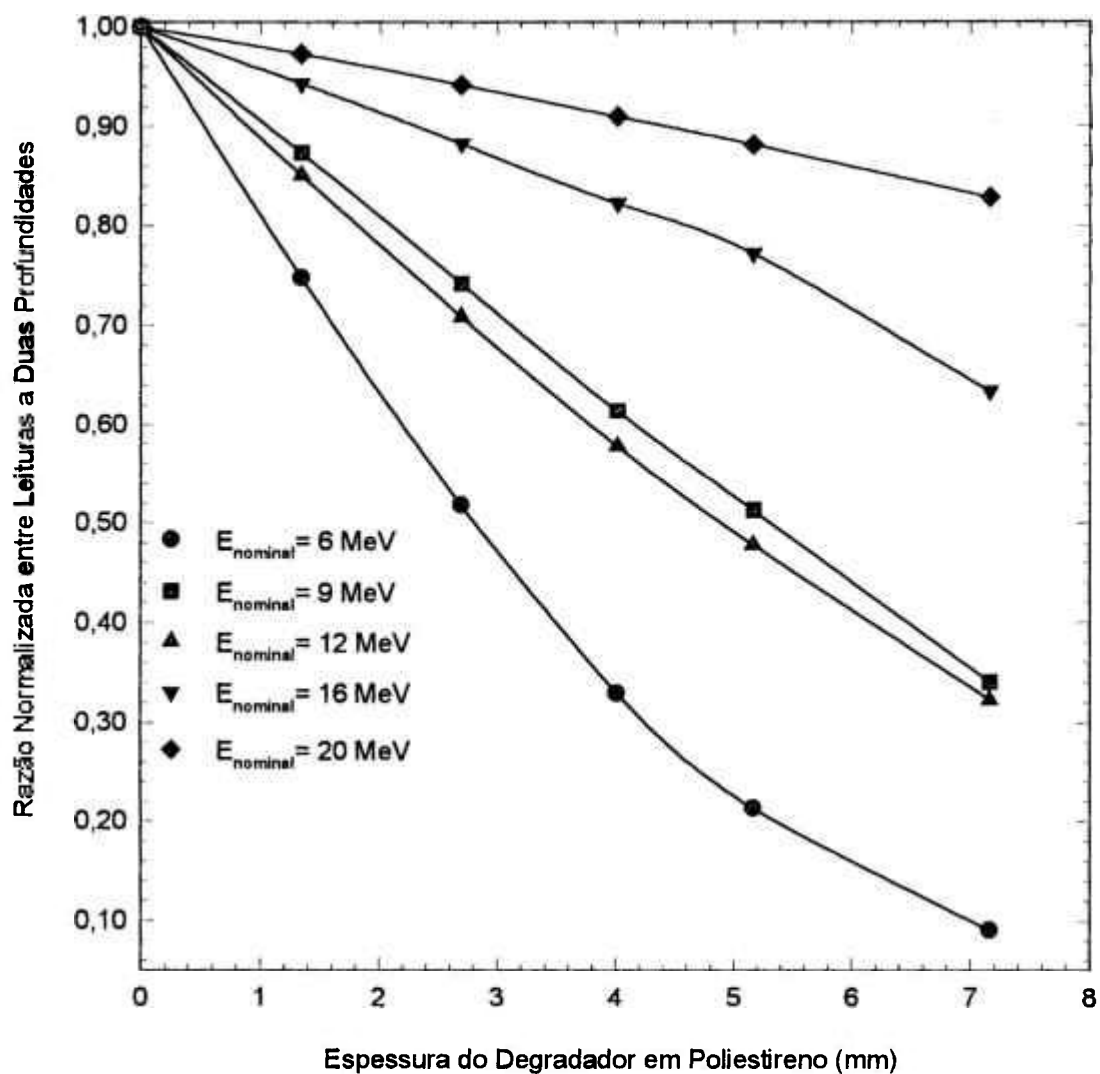
Degradador (mm, poliestireno)	0	1,34	2,69	4,01	5,16	7,16
$R_{100}$ (cm)	1,2	1,1	1,1	1,0	0,9	0,9
$R_{85}$ (cm)	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4
$R_{50}$ (cm)	2,3	2,2	2,1	1,9	1,9	1,8
$R_p$ (cm)	2,9	2,8	2,6	2,5	2,4	2,2
$\bar{E}_o$ (MeV)	5,4	5,1	4,8	4,5	4,3	4,1
$E_{p,0}$ (MeV)	5,9	5,7	5,4	5,2	5,0	4,6

**Tabela 6.2:** Parâmetros do feixe de elétrons de 20 MeV em função da inserção de degradadores em poliestireno.

Degradador (mm, poliestireno)	0	1,34	2,69	4,01	5,16	7,16
$R_{100}$ (cm)	2,0	2,6	2,6	2,6	2,4	2,3
$R_{95}$ (cm)	6,9	6,8	6,8	6,6	6,6	6,3
$R_{50}$ (cm)	8,4	8,3	8,2	8,0	7,9	7,7
$R_p$ (cm)	10,2	10,1	9,9	9,8	9,7	9,5
$\bar{E}_o$ (MeV)	19,7	19,4	19,2	18,8	18,6	18,1
$E_{p,0}$ (MeV)	20,7	20,5	20,1	19,8	19,6	19,2



**Figura 6.5:** Curva da variação do fator de retroespalhamento à degradação dos feixes de elétrons.



**Figura 6.6:** Curva da variação da razão entre as leituras a duas profundidades à degradação dos feixes de elétrons.

respectivamente. Para a mesma situação, o método das duas profundidades apresentou variações de 8,9; 11,3; 29,4; 38,6 e 79,9%. Este deslocamento de 2 mm na curva de dose em profundidade equivalente a 85% da dose máxima significou uma redução na energia de cada um dos feixes em torno de 0,5 MeV, em relação à energia média na superfície do simulador.

O limite da variação entre leituras a duas profundidades, em geral, adotado nos testes de controle de qualidade de energia é de +/-3%. O decréscimo resultante nas energias dos feixes para esta variação foi de 0,25; 0,16; 0,12; 0,01 e 0,004 MeV para os feixes de energias nominais de 20, 16, 12, 9 e 6 MeV, respectivamente.

A aplicação da variação do efeito de retroespalhamento de elétrons para verificação da energia de elétrons não apresenta sensibilidade adequada para uso de rotina em feixes com energia maior que 9 MeV. Para feixes com energia menor ou igual a 9 MeV, este método deve ser aplicado com cuidado para evitar que possíveis erros na reprodutibilidade dos procedimentos superem a faixa de sensibilidade do método.

Em relação ao método da razão entre duas profundidades, os resultados obtidos para as profundidades utilizadas demonstram que este método apresenta sensibilidade conveniente para seu emprego de rotina. No entanto, deve ser feita uma avaliação mais cuidadosa da sensibilidade deste método, de acordo com as profundidades de medidas selecionadas, para se estabelecer um limite prático para a variação da razão entre as leituras com a variação da energia do feixe. Isto porque o limite de variação geralmente empregado de  $\pm 3\%$  pode não significar variação na energia.

#### **6.4. Avaliação da Sensibilidade do Método da Razão entre Leituras a Duas Profundidades**

A fim de avaliar melhor o método da razão entre leituras a duas profundidades, um estudo a respeito da sensibilidade do mesmo foi feito para as diferentes regiões da curva

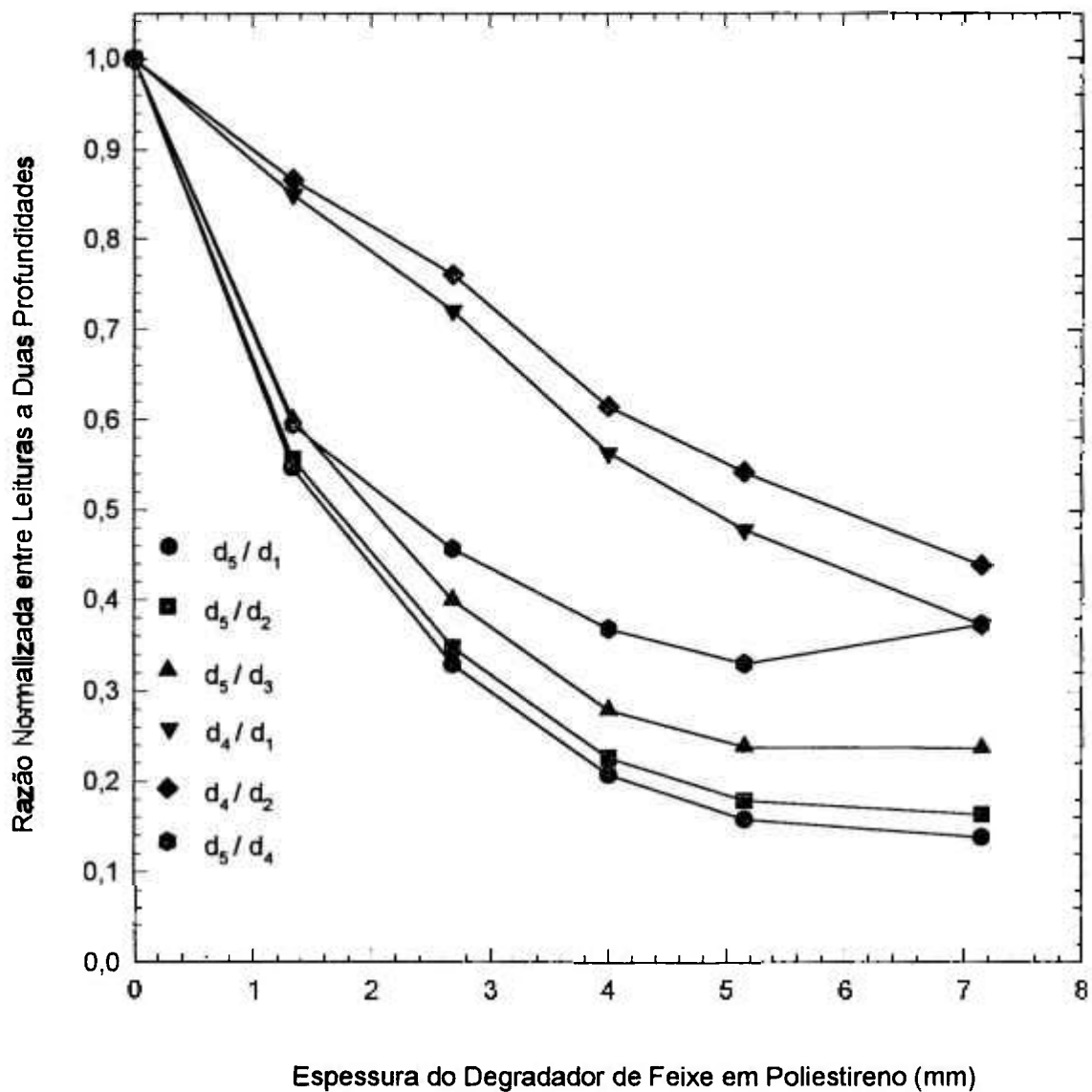
de ionização em profundidade de feixes de elétrons de 6, 9, 12, 16 e 20 MeV disponíveis. As regiões avaliadas foram definidas como: (i)  $d_1$  antes de  $d_{max}$  (profundidade de ionização máxima), (ii)  $d_2$  em  $d_{max}$ , (iii)  $d_3$  imediatamente após  $d_{max}$ , (iv)  $d_4$  antes de  $d_{50}$  (profundidade de 50% da ionização máxima) e (v)  $d_5$  depois de  $d_{50}$ . As seguintes razões entre leituras a diferentes profundidades foram testadas e simbolizadas da seguinte forma: (i)  $d_5/d_1$ , (ii)  $d_5/d_2$ , (iii)  $d_5/d_3$ , (iv)  $d_4/d_1$ , (v)  $d_4/d_2$  and (vi)  $d_5/d_4$ . A Tabela 6.3 apresenta as profundidades de ionização utilizadas para as energias de feixe de elétrons empregadas.

As Figuras 6.7 e 6.8 apresentam estes resultados para os feixes de 6 e 20 MeV, respectivamente. A sensibilidade do método tende a reduzir-se com o aumento da energia do feixe, por exemplo, para o feixe de 6 MeV para a maior espessura de degradador utilizada o maior e menor valor da razão entre leituras foram 0,439 e 0,139, e para o feixe de 20 MeV foram 0,843 e 0,600, respectivamente. As duas profundidades que apresentaram menor sensibilidade de resposta para degradação dos feixes foram aquelas representadas pelas razões  $d_4/d_2$ , seguida das razões  $d_4/d_1$ , para todos os feixes testados. A razão para isto reside no fato de que os valores das leituras relativas de  $d_1$  e  $d_2$ , que representam uma região próxima a  $d_{max}$  e a própria região de  $d_{max}$ , respectivamente, não variam de forma significativa. De fato  $d_1$  tende a aumentar seu valor relativo, no caso do feixe de 6 MeV. No caso do feixe de 20 MeV, praticamente, não há variação nas leituras relativas para a profundidade de  $d_2$ , e  $d_1$  varia menos que 1% para a condição de maior degradação do feixe. As profundidades seguintes, em ordem crescente de variação de resposta relativa foram  $d_3$ ,  $d_4$  e  $d_5$ . Como nenhuma comparação foi feita entre as razões de leituras para as profundidades próximas de  $d_{max}$ , i.e.,  $d_1$ ,  $d_2$  e  $d_3$ ,  $d_4$  é a profundidade seguinte que apresenta menor variação de resposta, justificando então as menores sensibilidades das duas razões de resposta, inicialmente, discutidas.

A razão entre profundidades dependentes de  $d_5$  para as energias menores - 6 e 9 MeV, apresentaram as melhores sensibilidades de resposta até a espessura de degradador aproximada de 2,5 mm. A partir daí, entretanto, mostram uma tendência de saturação ou insensibilidade à variação da energia. Isto se justifica, uma vez que, sendo

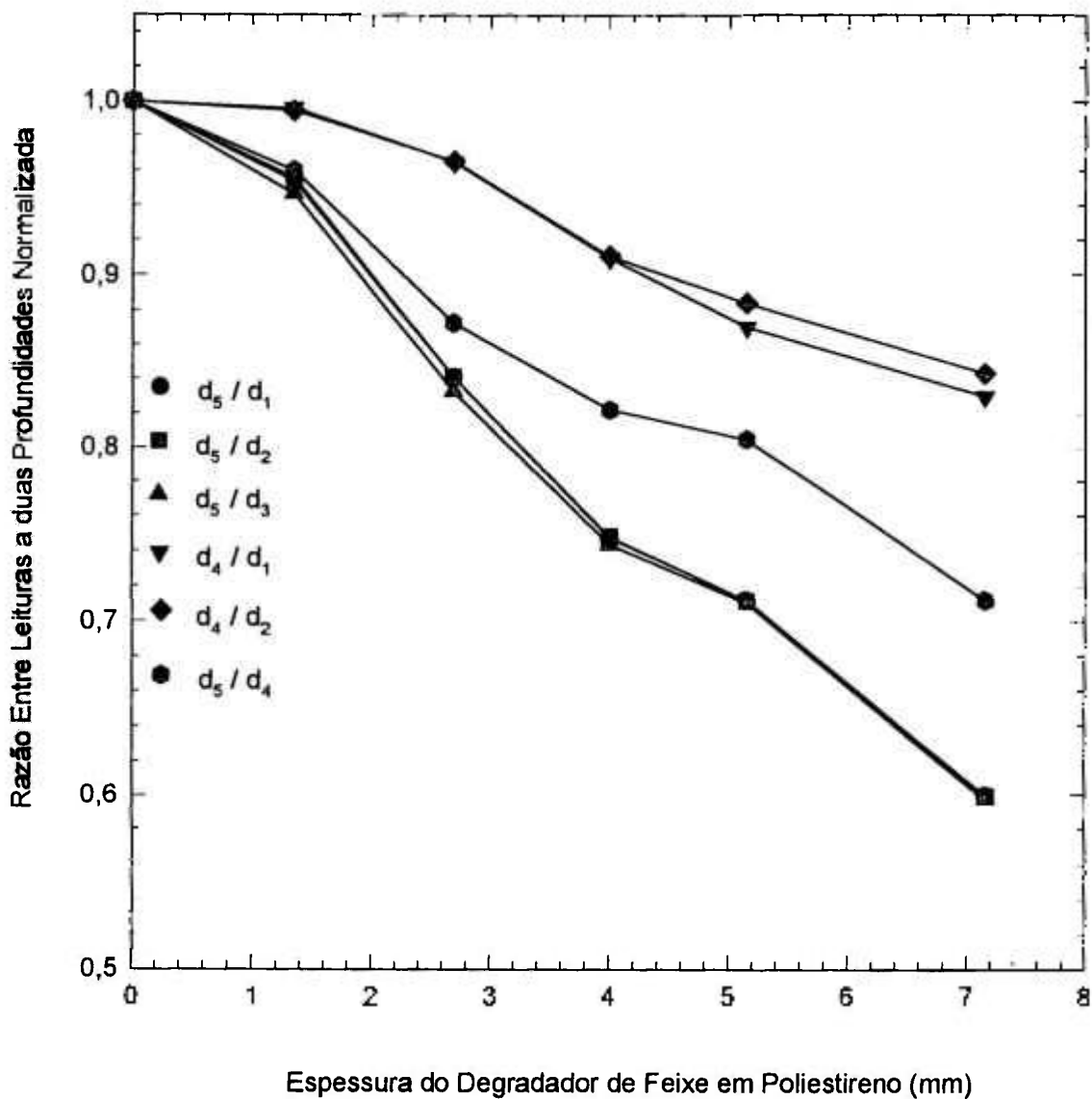
**Tabela 6.3:** Profundidades da curva de ionização utilizadas para se avaliar a sensibilidade do método de verificação de energia a duas profundidades para diferentes energias de feixes de elétrons.

Profundidade	6 MeV	9 MeV	12 MeV	16 MeV	20 MeV
$d_1$	0,6 cm	1,0 cm	1,0 cm	1,0 cm	1,0 cm
$d_2$	1,2 cm	2,0 cm	2,4 cm	1,9 cm	1,6 cm
$d_3$	1,7 cm	2,5 cm	3,5 cm	3,0 cm	2,6 cm
$d_4$	2,0 cm	3,2 cm	4,4 cm	5,9 cm	7,2 cm
$d_5$	2,7 cm	4,0 cm	5,3 cm	7,2 cm	9,0 cm



**Figura 6.7:** Curva comparativa da sensibilidade do método de verificação de energia a duas profundidades para diferentes regiões da curva em profundidade:  $d_1$ = profundidade antes de  $d_{max}$ ,  $d_2=d_{max}$ ,  $d_3$ = profundidade imediatamente após  $d_{max}$ ,  $d_4=d_{50}$  e  $d_5$ = profundidade após  $d_{50}$  - para o feixe de energia nominal de 6 MeV.





**Figura 6.8:** Curva comparativa da sensibilidade do método de verificação de energia a duas profundidades para diferentes regiões da curva em profundidade:  $d_1$ = profundidade antes de  $d_{max}$ ,  $d_2 = d_{max}$ ,  $d_3$ = profundidade imediatamente após  $d_{max}$ ,  $d_4 = d_{50}$  e  $d_5$ = profundidade após  $d_{50}$  - para o feixe de energia nominal de 20 MeV.

$d_5$  a maior profundidade de medida, esta apresenta uma maior sensibilidade na sua resposta relativa à degradação do feixe. Entretanto, a medida que a energia do feixe se altera, esta profundidade tende para a região onde predomina os componentes de radiação-X do feixe de elétrons -  $D_X$ , que apresenta variações mínimas de resposta. Isto é melhor percebido considerando a resposta apresentada pelas duas maiores espessuras de degradação para o feixe de 6 MeV para a razão  $d_5/d_4$ . Para esta condição, houve uma reversão da tendência de crescimento nos valores das respostas às duas profundidades. Neste caso, a variação da resposta de  $d_4$ , em relação à menor espessura de degradador do feixe anterior, foi maior que a variação da resposta de  $d_5$ , resultando em uma razão entre resposta para a espessura de degradador de 7,16 mm menor que a razão entre resposta à espessura de degradador de 5,16 mm.

A maior sensibilidade inicial de resposta é apresentada pelas razões entre leituras às profundidades de  $d_5/d_1$ . Neste caso, para uma variação de 1% na razão entre leituras corresponderam à uma redução na energia de 0,7; 0,6; 2,0; 2,0 e 6,0% para os feixes de 6, 9, 12, 16 e 20 MeV, respectivamente.

Todos os pares de regiões da curva em profundidade para a determinação da razão entre leituras, aqui estudadas, podem ser utilizados, dentro de certos limites, para a verificação da energia dos feixes de elétrons pelo método da razão entre leituras. Entretanto, um compromisso deve ser definido entre a sensibilidade pretendida e o valor da variação de energia desejada. Assim, embora o par de profundidades  $d_5$  e  $d_1$  apresente a maior sensibilidade para as energias estudadas, para as energias mais baixas isto acontece para uma faixa de degradação de energia estreita, isto é, até a espessura aproximada de degradador de 2,5 mm; a partir daí a razão entre leituras praticamente não se altera. Os pares de profundidades  $d_4/d_1$  e  $d_4/d_2$ , embora menos sensíveis às pequenas variações de energia, apresentam um comportamento quase linear com a espessura dos degradadores testados.

Considerando o limite para o deslocamento da profundidade de 85% da dose em 2 mm como o critério de controle de qualidade dos feixes de elétrons, as razões que incluem a profundidade  $d_5$  não são adequadas para os feixes de energias de 6 e

9 MeV. Isto acontece porque as espessuras de degradador que provocam este deslocamento são superiores ao limite de espessura a partir do qual a razão entre leituras é insensível à variação de energia para estes feixes. Para as outras energias isto não ocorre.

Assim, um conjunto de profundidades com sensibilidade conveniente e prática para uso de rotina seria aquele que apresentasse o maior número de profundidades comuns para os diferentes feixes. Neste caso, a primeira profundidade poderia ser 1 cm para todos os feixes, a segunda profundidade poderia ser 2 cm para o feixe de 6 MeV, 4 cm para os feixes de 9 e 12 MeV, e 7,5 cm para os feixes de 16 e 20 MeV. Para estas profundidades, a sensibilidade do método relacionada ao deslocamento de 2 mm na curva de dose de 85% varia de 5% a 44% para os feixes testados.

## **Capítulo 7**

### **Conclusões e Recomendações**

Duas câmaras de ionização de placas paralelas foram projetadas e construídas para dosimetria de feixes de elétrons de energia alta. Para cada uma das câmaras foi utilizado um dos dois materiais plásticos recomendados para uso em dosimetria de elétrons pelos protocolos atuais foi utilizado. Ambos os materiais plásticos, acrílico e poliestireno, são de fácil aquisição no mercado nacional.

As câmaras foram submetidas a todos os testes de desempenho recomendados pelas normas internacionais (IEC, 1992). Os resultados de todos estes testes apresentaram-se dentro dos limites estabelecidos por estas normas, demonstrando a viabilidade do projeto. Em dosimetria de elétrons, um dos principais parâmetros que estabelece a qualidade da câmara de placas paralelas é o possível efeito de polaridade que a mesma apresente. Na comparação da magnitude deste efeito com o de outras câmaras comerciais do mesmo tipo, as câmaras de ionização de placas paralelas construídas apresentaram resultados similares e dentro dos limites estabelecidos pelas normas internacionais (IEC, 1992).

No estudo a respeito da influência do efeito da irradiação do cabo das câmaras de ionização, ficou demonstrado a qualidade do cabo de conexão utilizado é um item importante na dosimetria de feixes de elétrons com câmaras de ionização de placas paralelas. Para as câmaras construídas, uma pequena correção da resposta real da

câmara,  $Q_{real}$  é necessária quando campos maiores que o campo de referência são utilizados.

No estudo de dois métodos possíveis de calibração de câmaras de ionização de placas paralelas, uma das câmaras de ionização, câmara P, apresentou uma diferença entre os fatores de calibração obtidos para os métodos utilizados, que foram em feixe de radiação gama de Cobalto-60 e em feixe de elétrons de 20 MeV, de 0,5%. Para a câmara A, uma diferença de 1,4% foi obtida entre os dois métodos de calibração. Esta diferença encontrada entre os fatores de calibração se relaciona diretamente à homogeneidade de construção das câmaras. Para as câmaras de ionização de placas paralelas, o fator  $P_{parede}$  corrige este efeito para o feixe de radiação gama de Cobalto-60 em relação ao feixe de elétrons de alta energia. Assim, para a câmara de ionização P  $P_{parede} = 0,995$  e para a câmara A este fator  $P_{parede} = 1,014$ .

A resposta das câmaras de ionização construídas para a mesma dose absorvida sob diferentes energias de feixes de elétrons demonstrou que as mesmas, praticamente, não apresentam necessidade de correção de fluência.

A aplicação do método de calibração de uma câmara de ionização de placas paralelas pelo usuário em feixes de elétrons esbarra, eventualmente, na indisponibilidade de um feixe de elétrons com energia superior a 18 MeV, que permita a intercomparação com uma câmara cilíndrica. A calibração destas câmaras de ionização nos laboratórios padrão de calibração esbarra também na indisponibilidade, de maneira geral, de feixes de elétrons de energia alta. Desde que os fatores de correção para as câmaras de ionização de placas paralelas estejam disponíveis, os métodos de calibração que utilizem feixes de radiação gama de Cobalto-60 podem ser considerados a melhor opção. Isto porque, a dosimetria dos feixes de elétrons ocorreria de uma forma mais homogênea entre os usuários, uma vez que os fatores  $N_D$ ,  $N_{gas}$  ou  $N_x$  das câmaras seriam fornecidos pelo laboratório padrão e os fatores específicos das câmaras torna-se-iam comuns para todos os usuários.

Um método de verificação da energia de feixes de elétrons que utiliza o retroespalhamento do feixe foi testado e sua sensibilidade foi avaliada. De acordo com

os resultados obtidos, este método não é suficientemente sensível para as energias superiores a 9 MeV. Para as energias abaixo de 9 MeV, este método deve ser aplicado com cuidados na reprodutibilidade dos procedimentos, pois podem ocorrer variações em torno de  $\pm 2\%$  num esquema de controle de qualidade.

Na avaliação do método de verificação da energia de feixes de elétrons que utiliza a razão entre leituras a duas profundidades, ficou demonstrado sua praticidade e sensibilidade para emprego em um programa rotineiro de controle de qualidade. É recomendado, entretanto, que as profundidades sejam selecionadas de acordo com uma avaliação preliminar de sensibilidade do método a variação da energia dos feixes, e que o limite para a variação da resposta das razões entre leituras seja definido a partir desta avaliação. Duas profundidades podem ser consideradas as mais convenientes para aplicação deste método, desde que sua sensibilidade seja avaliada: a profundidade próxima mas anterior à  $d_{max}$  e a profundidade próxima à  $d_{50}$ , anterior ou posterior. A conjugação destas regiões permite que um maior número de profundidades comuns aos diferentes feixes seja utilizado. Isto resulta em uma execução mais rápida e sujeita a menos erros de montagem do método, pois a primeira profundidade pode ser comum a todos os feixes e igual a 1 cm, enquanto que a segunda profundidade poderia ser 2 cm para o feixe de 6 MeV, 4 cm para os feixes de 9 e 12 MeV, e 7,5 cm para os feixes de 16 e 20 MeV.

## Referências Bibliográficas

- (1) AAPM (American Association of Physicists in Medicine). American Association of Physicists in Medicine Task Group 10: code of practice for X-ray therapy linear accelerators, *Med. Phys.*, **2**: 110-121, 1975.
- (2) AAPM (American Association of Physicists in Medicine). A protocol for the determination of absorbed dose from high-energy photon and electron beams. *Med. Phys.*, **10**: 741-771, 1983.
- (3) AAPM (American Association of Physicists in Medicine). Physical aspects of quality assurance in radiation therapy, New York, N.Y., 1984 (Report: 13).
- (4) AAPM (American Association of Physicists in Medicine). Total Skin Electron Therapy: Technique and Dosimetry. , New York, N.Y., 1987 (Report: 23).
- (5) AAPM (American Association of Physicists in Medicine). Clinical electron-beam dosimetry: Report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 25. *Med. Phys.*, **18**: 73-109, 1991.
- (6) AGET, H. & ROSENWALD, J. Polarity effect for various ion chambers with multiple irradiation conditions in electron beams. *Med. Phys.*, **18**: 67-75, 1991.
- (7) ALBUQUERQUE, M. P. P. Projeto, Construção e Calibração de Câmaras de Ionização de Placas Paralelas para Radiação-X. São Paulo, 1989. (Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares/CNEN).

- (8) ALMOND, P. The physical measurements of electron beams from 6 to 18 MeV: absorbed dose and energy calibration. *Phys. Med. Biol.*, **12**: 13-24, 1967.
- (9) ANDREO, P.; RODRIGUES, L. N.; LINDBORG, L.; KRAEPELIEN, T. On the calibration of plane-parallel ionization chambers for electron beam dosimetry. *Phys. Med. Biol.*, **37**: 1147-1165, 1992.
- (10) ATTIX, F. H. *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*, New York, N.Y., John Wiley & Sons, 1986.
- (11) ATTIX, F. H. A proposal for the calibration of plane-parallel ion chamber by accredited dosimetry calibration laboratories. *Med. Phys.*, **17**: 931-933, 1990.
- (12) ATTIX, F. H.; DE LA VERGNE, L.; RITZ, V. H. Cavity ionization as a function of wall material. *J.Res.*, **60**: 235-240, 1958.
- (13) AUSTERLITZ, C., SIBATA, C. H.; DE ALMEIDA, C. E. A graphite transmission ionization chamber. *Med. Phys.*, **14**: 1056-1059, 1987.
- (14) BIGGS, P.J. The effects of beam angulation on central axis per cent depth dose for 4-29 MeV electrons. *Phys. Med. Biol.*, **29**: 1089-1096, 1984.
- (15) BLAIS, N. & PODGORSK, E. B.. The mass angular scattering power method for determining the kinetic energies of electron beams. *Phys. Med. Biol.*, **37**: 1931-1942, 1992.
- (16) BOAG, J. W. Ionization Chambers. *In*: ATTIX, F.H., ROESCH, W.C., TOCHILIN, E., eds. *Radiation Dosimetry*, Academic Press, New York, N.Y., Academic Press, v. 2, 1966 .



- (17) BOAG, J. W. Ionization Chambers. In: KASE, K.R.,BJARNGARD, B.E., ATTIX, F.H. eds. *The dosimetry of ionizing radiation*, New York, N.Y. Academic Press, 1987.
- (18) BOAG, J. W. & CURRANT, J. Current collection and ionic recombination in small cylindrical ionization chambers exposed to pulsed radiation. *Brit. J. Radiol.*, **53**: 471-478, 1980.
- (19) BRAHME, A. Correction for the angular dependence of a detector in electron and photon beams. *Acta Radiol. Oncol.*, **24**: 301-304, 1985.
- (20) BRAHME, A. & SVENSSON, H. Specification of electron beam quality from the central-axis depth absorbed-dose distribution. *Med. Phys.*, **3**: 95-102, 1976.
- (21) BURNS, J. E. & ROSSER, K. E. Saturation correction for the NE 2560/1 dosimeter in photon dosimetry. *Phys. Med. Biol.*, **35**: 687-693, 1990.
- (22) CALDAS, L. V. E. A Tandem system of ionizing chambers for effective energy determination of unknown X-radiation fields. *Rad. Prot. Dosim.*, **36**: 47-50, 1991.
- (23) CALDAS, L. V. E. & ALBUQUERQUE, M. P. P. New ionization chambers for beta and X-radiation. *Radiat. Prot. Dosim.*, **37**: 55-57, 1991.
- (24) CAMPOS, C. A. A. *Construção, calibração e testes de uma câmara de ionização para medidas de exposição na região de 40 a 1250 keV*. Rio de Janeiro, 1982 (Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Rio de Janeiro).
- (25) CAMPOS, L. L. & CALDAS, L. V. E. Induced effects in ionization chambers cables for photon and electron irradiation. *Med. Phys.*, **18**: 522-526, 1991a.

- (26) CAMPOS, L. L. & CALDAS, L. V. E. Absorbed dose dependence of correction factors for ionization chamber cable irradiation effects. *Phys. Med. Biol.*, **36**: 339-344, 1991b.
- (27) CASSON, K. & KILEY, J. P. Replacement correction factors for electron measurements with a parallel-plate chamber. *Med. Phys.*, **14**: 216-217, 1987.
- (28) CHILTON, A. B. Note on the fluence concept. *Health Phys.*, **34**: 715-716, 1978.
- (29) CHILTON, A. B. Further comments on an alternative definition of fluence. *Health Phys.*, **36**: 637-638, 1979.
- (30) CHRISTENSEN, P. & PROKIE, M. Energy and angular response of TL dosimeters for beta ray dosimetry. *Radiat. Prot. Dosim.*, **17**: 83-87, 1986.
- (31) CUNNINGHAM, J. R. & SONTAG, M. C. Displacement correction used in absorbed dose determination. *Med. Phys.*, **7**: 672-676, 1980.
- (32) 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.*, **39**: 191-197, 1988.
- (33) DAS, I. J. & BUSHE, H. S. Backscattering and transmission through a high Z as a measure of electron beam energy. *Med. Phys.*, **21**: 315-319, 1994.
- (34) DUTREIX, J. & DUTREIX, A. Etude comparée d'une série de chambres d'ionisation dans des faisceaux d'électrons de 20 et 10 MeV. *Biophysik*, **3**: 249-253, 1966.

- (35) FREIM, J. O. & FELDMAN, A. Energy determination for electron beam calibration. *Phys. Med. Biol.*, **33**: 361-365, 1988.
- (36) GAGNON, W. F. & CUNDIFF, J. H. Dose enhancement from backscattered radiation at tissue-metal interfaces irradiated with high energy electrons. *Br. J. Radiol.*, **53**: 466-470, 1980.
- (37) GERBI, B. J. & KHAN, F.M. The polarity effect for commercially available plane-parallel ionisation chambers. *Med. Phys.*, **14**: 210-205, 1987.
- (38) GOSWAMI, G. C. & KASE, K.R. Measurement of replacement factors for a parallel-plate chamber. *Med. Phys.*, **16**: 791-793, 1989.
- (39) GROSSWENDT, B. & ROOS, M. Electron beam absorption in solid and water phantoms: depth scaling and energy-range relations. *Phys. Med. Biol.*, **34**: 509-518, 1989.
- (40) HAVERCROFT, J.M. & KLEVENHAGEN, S. C. Polarity effect of plane-parallel ionization chambers in electron irradiation. *Phys. Med. Biol.*, **39**: 299-304, 1994.
- (41) HPA (Hospital Physicists Association). Code of practice for electron beam Dosimetry in radiotherapy. *Phys. Med. Biol.*, **30**: 1169-1194, 1985.
- (42) HUMPHRIES, L. J. & PURDY, J. A. Ion chamber dosimetry instrumentation, beam scanning systems and calibration phantoms for radiation dosimetry. *In Advances in Radiation Oncology Physics: dosimetry, treatment planning, and brachytherapy.* J. A. Purdy ed., American Institute of Physics, Inc., 1992 (Medical Physics Monograph no. 19).

- (43) HUNT, M. A., KUTCHER, G. J., BUFFA, A. Electron backscatter corrections for parallel-plate chambers. *Med. Phys.*, **15**: 96-102, 1988.
- (44) IAEA (International Atomic Energy Agency) Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams: An International Code of Practice, Vienna, 1987 (IAEA Technical Report Series no. 277 ).
- (45) ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements). Radiation Dosimetry: Electron Beams with Energies Between 1 and 60 MeV, Bethesda, Maryland, 1976 ((ICRU Report 24).
- (46) ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements). Radiation Quantities and Units, Bethesda, Maryland. 1980 (ICRU Report 33).
- (47) ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements). Radiation Dosimetry: Electron Beams with energies Between 1 and 50 MeV, Bethesda, Maryland, 1984 (ICRU Report 35).
- (48) ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements). Stopping Powers for Electrons and Positrons, Bethesda, Maryland, 1984 (ICRU Report 37).
- (49) IEC (International Electrotechnical Commission). Medical electrical equipment: dosimeters with ionization chamber as used in radiotherapy. Geneva, 1982 (IEC-731-82).
- (50) ISPM (Institute of Physical Sciences in Medicine). Addendum to the code of practice for electron beam dosimetry in radiotherapy (1985): interim additional recommendations. *Phys. Med. Biol.*, **37**: 1477-1483, 1992.

- (51) KHAN, F. M. Replacement correction ( $P_{repl}$ ) for ion chamber dosimetry. *Med. Phys.*, **18**: 1244-1246, 1991.
- (52) KHAN, F. M. *The Physics of Radiation Therapy*. 2o. ed., Williams & Wilkins., Baltimore, Md., 1994.
- (53) KHAN, F. M.; MOORE, V. C.; LEVITT, S. H. Field shaping in electron beam therapy. *Brit. J.*, **49**: 883-886, 1976.
- (54) KLEVENHAGEM, S. C.; LAMBERT, G. D.; ARBABI, A. Backscattering in electron beam therapy for energies between 3 and 35 MeV. *Phys. Med. Biol.*, **27**: 363-373, 1982.
- (55) KRITHIVAS, G. & RAO, S. N.  $N_{gas}$  determination for a parallel-plane ion chamber. *Med. Phys.*, **13**: 674-677, 1986.
- (56) KUBO, H.  $N_{gas}$  values of the Memorial parallel-plate chambers determined in  $^{60}Co$  and high-energy electron beams. *Med. Phys.*, **18**: 749-752, 1991.
- (57) KUBO, H. Evaluations of two solid water parallel-plate chambers in high-energy photon and electron beams. *Med. Phys.*, **20**: 341-345, 1993.
- (58) KUBO, H. & KENT, L. J. Determination of  $N_{gas}$  and  $P_{repl}$  factors from commercially available parallel-plate chambers: AAPM Task Group 21 Protocol. *Med. Phys.*, **13**: 908-912, 1986.

- (59) KUBO, H.; KENT, L. J.; KRITHIVAS, G. Determinations of  $N_{\text{gas}}$  and  $P_{\text{repl}}$  factors from commercially available parallel-plate chambers: AAPM Task Group 21 protocol. *Med. Phys.*, **13**: 908-912, 1986.
- (60) KUCHNIR, F. T. & REFT, C. S. Experimental values for  $P_{\text{wall},x}$  and  $P_{\text{repl}}$  for five parallel-plate ion chambers - A new analysis of previously published data. *Med. Phys.*, **19**: 367, 1992.
- (61) KUTCHER, G. J.; COIA, L.; GILLIN, M.; HANSOM, W. F.; LEIBEL, S.; MORTON, R. J.; PALTA, J. R.; PURDY, J. A.; REINSTEIN, L. E.; SVENSSON, G. K.; WELLER, M., WINGFIELD, L. Comprehensive Q.A. for radiation oncology: Report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 40. *Med. Phys.*, **21**: 581-618, 1994.
- (62) LAITANO, R. F.; GUERRA, A. S.; PIMPINELLA, M.; NYSTRÖM, A; KARLSSON, M.; SVENSSON, H. Corrections factors for calibration of plane-parallel ionization chambers with a  $^{60}\text{Co}$  gamma-ray beam. *Phys. Med. Biol.*, **38**: 39-54, 1993.
- (63) MATTSSON, L. O.; JOHANSSON, K.-A.; SVENSSON, H. Calibration and use of plane-parallel ionization chambers for the determination of absorbed dose in electron beams. *Acta Radiol. Oncol.*, **20**: 385-399, 1981.
- (64) MOTA, H. C. *Contribuição à Dosimetria de Feixes Clínicos de Elétrons Utilizando a Técnica de Monte Carlo*. Rio de Janeiro, 1993 (Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Biofísica Carlos Chagas Filho).

- (65) NACP (Nordic Association of Clinical Physics). Procedures in External radiation therapy with electron and photon beams with maximum energies between 1 and 50 MeV. *Acta Radiol. Oncol.*, **19**: 55-79, 1980.
- (66) NACP (Nordic Association of Clinical Physics). Electron beams with mean energies at the phantom surface below 15 MeV. *Acta Radiol. Oncol.*, **20**: 401-415, 1981.
- (67) NCRP National Council on Radiation Protection and Measurements. Stopping powers for use with cavity chambers. National Bureau of Standards, 1961 (Report 27, ou Handbook 79).
- (68) NYSTRÖM, H. & KARLSSON, M. Correction factors parallel to plane-parallel ionization chambers. *Phys. Med. Biol.*, **38**: 311-322, 1993.
- (69) OKUMURA, Y.; MORI, T.; KITAGAWA, T. Modification of dose distribution in high-energy electron beam treatment. *Radiology*, **99**: 683-686, 1971.
- (70) PEREZ, C. A. & BRADY, L. W. Preface. In PEREZ, C. A. & BRADY, L. W. eds. *Principles and practice of radiation oncology*. 2 ed., J. B. Lippincott Company, Philadelphia, p. xi., 1992.
- (71) PLAETSEN, V. D.; SEUNTJENS, A.; THIERENS, J. Verification of absorbed doses determined with thimble and parallel-plate ionization chambers in clinical electron beams using ferrous sulphate dosimetry. *Med. Phys.*, **21**: 37-44, 1994.
- (72) RAMSAY, E. B.; REINSTEIN, L. E.; MEEK, A. G. Tests of an electron monitor for routine quality control measurements of electron energies. *Med. Phys.*, **18**: 1247-1250, 1991.

- (73) REFT, C. S. & KUCHNIR, F. T. Measurement of the replacement correction factor for parallel-plate chambers in electron fields. *Med. Phys.*, **18**: 1237-1243, 1991.
- (74) RODRIGUES, L. N.; CARDOSO, D. O.; RAMOS, M. M. O. Comportamento de uma câmara de ionização tipo dedal equivalente a ar. *Ciência e Cultura*, **38** (Supl., 430): 1986.
- (75) ROGERS, D. O. Calibration of parallel-plate chambers: Resolution of several problems by using Monte Carlo calculations. *Med. Phys.*, **19**: 889-899, 1992.
- (76) ROGERS, D. W. O. & BIELAJEW, A. F. Differences in electron depth-dose curves calculated with EGS and ETRAN and improved energy-range relationship. *Med. Phys.*, **13**: 687-694, 1986.
- (77) ROSENOW, U. F.; ISLAM, M. K.; GABALLA, H.; RASHID, H. Energy constancy checking for electron beams using a wedge-shaped solid phantom combined with a beam profile scanner, *Med. Phys.*, **18**: 19-25, 1991.
- (78) ROSSI, H. & ROESCH, W. Field equations in dosimetry. *Radiat. Res.*, **16**: 783-795, 1962.
- (79) RUBACH, A.; CONRAD, F.; BICHEL, H. Dose build-up curves for cobalt-60 irradiation: a systematic error occurring with pancake chamber measurements. *Phys. Med. Biol.*, **31**: 441-448, 1986.
- (80) SAUNDERS, J. E. & PETERS, V. G. Back-scattering from metals in superficial therapy using high energy electrons. *Br. J. Radiol.*, **47**: 467-470, 1974.



- (81) SEFM (Sociedad Española de Física Médica). Procedimientos recomendados para la dosimetría de fotones y electrones de energías comprendidas entre 1 MeV y 50 MeV en radioterapia de haces externos, Madrid, Spain, 1984 (Publicación no. 1).
- (82) SEFM (Sociedad Española de Física Médica). Suplemento al documento Procedimientos recomendados para la dosimetría de fotones y electrones de energías comprendidas entre 1 MeV y 50 MeV en radioterapia de haces externos, Madrid, Spain, 1987 (Publicación no. 2).
- (83) SILVA, I. *Projeto e Construção de uma Câmara de Ionização de Extrapolação para Dosimetria Beta*, Belo Horizonte, M.G., 1985 (Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais).
- (84) SKAGGS, L. S. Depth dose of electrons from the betatron. *Radiology*, **53**: 868-874, 1949.
- (85) SPENCER, L. V. & ATTIX, F. H. A theory of cavity ionization. *Rad. Res.*, **3**: 239-245, 1955.
- (86) SVENSSON, H. & BRAHME, A. Fundamental of Electron Beam Dosimetry. In: Florence C.H. Chu e John S. Laughlin eds. *Proceedings of the Symposium on Electron Beam Therapy*, New York, N.Y., 1981.
- (87) SVENSSON, H. & BRAHME, A. Recent Advances in Electron and Photon Dosimetry. In: *Radiation Dosimetry Physical and Biological Aspects*. Plenum Press, New York, N.Y., 1986.

- (88) TABATA, T. & ITO, R. Simple calculation of the electron-backscatter factor. *Med. Phys.*, **19**: 1423-1426, 1992.
- (89) ULIN, K. & STERNICK, E. S. .An isodose shift technique for obliquely incident electron beams. *Med. Phys.*, **16**: 905-910, 1989.
- (90) VARIAN . Operator manual for Clinac 2100C, Palo Alto, California, 1991.
- (91) WEATHERBURN, H.; MCMILLIAN, K. T. P.; STEDEFORD, G.; DURRANT, K .R. Physical measurements and clinical observations on the backscatter of 10 MeV electrons from lead shielding. *Br. J. Radiol.*, **48**: 229-230, 1975.
- (92) WITTKÄMPER, F. W.; AALBERS, A. H. L.; MIJNHEER, B. J. Experimental determination of wall correction factors part II: NACP and Markus plane-parallel ionization chambers. *Phys. Med. Biol.*, **37**: 995-1004, 1992.
- (93) WRIGHT, K. A. & TRUMP, J. G. Backscattering of megavolt electrons from thick targets. *J. Appl. Phys.*, **33**: 687-690, 1962.