

# DETERMINAÇÃO DE DOSE ABSORVIDA EM FEIXES DE ELÉTRONS UTILIZANDO CÂMARAS DE IONIZAÇÃO DE PLACAS PARALELAS\*

Roseli T. Bulla<sup>1</sup>, Linda V.E. Caldas<sup>2</sup>

**Resumo** **OBJETIVO:** O objetivo deste trabalho foi estabelecer um procedimento para a determinação dos fatores de calibração e de doses absorvidas em feixes de elétrons. **MATERIAIS E MÉTODOS:** Foram utilizados um irradiador de <sup>60</sup>Co e um acelerador linear Varian, modelo Clinac 2100C, com feixes de fótons e de elétrons. Foram estudadas câmaras de ionização do tipo dedal e de placas paralelas. **RESULTADOS:** Os sistemas de medidas foram submetidos aos testes preliminares (estabilidade de resposta e corrente de fuga), com resultados muito bons. Quatro métodos de calibração de câmaras de ionização para utilização em feixes de elétrons foram testados. Para a determinação da dose absorvida em feixes de elétrons foram aplicadas três metodologias propostas pela Agência Internacional de Energia Atômica, com a obtenção de resultados concordantes em quase todos os casos. **CONCLUSÃO:** A maior parte das câmaras de ionização estudadas mostrou-se viável, com desempenho dentro dos limites internacionais estabelecidos.

*Unitermos:* Dose absorvida; Câmaras de ionização; Feixes de elétrons; Calibração de instrumentos.

**Abstract** *Determination of absorbed dose in electron beams using parallel-plane ionization chambers.*

**OBJECTIVE:** The objective of this paper was to establish a procedure for the determination of calibration factors and absorbed doses in electron beams. **MATERIALS AND METHODS:** An irradiator with a <sup>60</sup>Co source and a linear accelerator Varian, Clinac 2100C, with photon and electron beams, were utilized. Thimble type and parallel-plane ionization chambers were tested. **RESULTS:** The measurement systems showed very good results in the preliminary tests (response stability and leakage current). The ionization chambers used for electron beam dosimetry were calibrated using four different methods. For the determination of absorbed dose, three methodologies recommended by the International Atomic Energy Agency were applied. **CONCLUSION:** The majority of the ionization chambers tested showed good results according to the established international limits.

*Key words:* Absorbed dose; Ionization chambers; Electron beams; Calibration of instruments.

## INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a radioterapia desenvolveu-se muito a partir da terapia com raios X de ortovoltagem e com cobalto a uma especialidade clínica avançada, empregando feixes de fótons e de elétrons de energias altas com auxílio de computadores no planejamento de tratamentos<sup>(1)</sup>. A aplicação dos feixes de radiação de aceleradores lineares em radioterapia com doses altas de radiação exige que haja exatidão na distribuição da dose absorvida no volume do tumor, mostrando que uma variação na distribuição de 5%<sup>(2,3)</sup> nessa exatidão pode representar o controle ou a falha

de alguns tratamentos. Com isso, surgiu a necessidade de se controlar periodicamente o desempenho dos feixes por meio de procedimentos de dosimetria.

A maioria das recomendações dos protocolos nacionais e internacionais<sup>(4-11)</sup> sobre dosimetria clínica tem reconhecido as vantagens do uso de câmaras de ionização de placas paralelas para dosimetria de feixes terapêuticos de elétrons para maior exatidão dosimétrica. As características de construção destas câmaras permitem que o efeito de perturbação seja reduzido e que elas também sejam ideais para medidas em objetos simuladores<sup>(4,6,11-14)</sup>. Para utilização das câmaras de ionização nas medidas de dosimetria de feixes de radiação (nível radioterapia) é necessário que elas sejam previamente calibradas em feixes padrões de radiação, para se obter uma resposta com um alto grau de confiança nos laboratórios específicos para este fim.

A Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) publicou as recomendações para a determinação de dose absor-

vida em feixes de fótons e elétrons inicialmente em 1987<sup>(6)</sup>, que foram testadas em diversos países. As recomendações<sup>(12-18)</sup> dos pesquisadores e metrologistas da área são que as câmaras de ionização de placas paralelas utilizadas em dosimetria de feixes de elétrons podem ser calibradas em feixes de radiação gama de <sup>60</sup>Co, tomando-se certas precauções e estabelecendo-se os parâmetros físicos dos feixes e dos sistemas de medidas, já que não há aceleradores de elétrons na grande maioria dos laboratórios de calibração. É, portanto, necessário que cada laboratório de calibração estabeleça as suas condições adequadas e o seu procedimento para esta atividade.

Com este intuito, foi realizado um estudo para se estabelecer um procedimento para a determinação do fator de calibração em termos de dose absorvida no ar em feixes de radiação gama de <sup>60</sup>Co do Laboratório de Calibração de Instrumentos do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (LCI-Ipen/São Paulo) e com feixes de elétrons de altas energias do Hospital

\* Trabalho realizado no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Comissão Nacional de Energia Nuclear (Ipen-CNEN) e no Hospital Israelita Albert Einstein, São Paulo, SP.

1. Mestre em Ciências na área de Tecnologia Nuclear.

2. Doutora em Ciências na área de Física Nuclear.

Endereço para correspondência: Dra. Linda V.E. Caldas. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Avenida Professor Lineu Prestes, 2242, Cidade Universitária. São Paulo, SP 05508-000. E-mail: lcaldas@ipen.br

Recebido para publicação em 18/7/2003. Aceito, após revisão, em 28/7/2003.

Israelita Albert Einstein (HIAE). Todos os métodos de calibração de câmaras de ionização de placas paralelas utilizadas nos procedimentos de dosimetria de feixes de elétrons de energias altas (aceleradores clínicos) apresentados neste trabalho mostraram-se viáveis e dentro dos limites estabelecidos pelas normas internacionais. Por meio destes fatores de calibração obtêm-se as doses absorvidas num ponto de referência da câmara de ionização.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Antes da calibração de instrumentos, deve-se verificar se os arranjos experimentais e os sistemas de medidas estão em boas condições de funcionamento e se os resultados das medidas estão dentro dos limites de variação recomendados<sup>(3)</sup>. Com esta finalidade, tanto os feixes de radiação gama e de elétrons como as câmaras de ionização utilizadas neste estudo foram submetidas a testes de qualificação técnica e operacionais, antes dos experimentos relativos à calibração.

### Sistemas de radiação

Para a irradiação gama foi empregado um irradiador com uma fonte de <sup>60</sup>Co, Philips, modelo XR2000, do LCI-Ipen. Para a irradiação com elétrons foi empregado um acelerador linear, Varian, modelo Clinac 2100C, pertencente ao HIAE, com dois fei-

xes de fótons com energias nominais de 6 e 18 MeV e cinco feixes de elétrons com energias nominais de 4, 6, 9, 12 e 16 MeV.

As condições ambientais, tanto da sala de calibração como de radioterapia, foram controladas por meio de um sistema de ar condicionado, um desumidificador, e com auxílio de um barômetro portátil, de um termômetro digital e de um higrômetro.

### Sistemas de medidas

Os sistemas de medidas usados neste trabalho têm as câmaras de ionização acopladas aos seus respectivos eletrômetros; suas especificações estão apresentadas na Tabela 1. O sistema de referência utilizado foi uma câmara Nuclear Enterprises (NE), tipo dedal, modelo 2505, série 2080, com rastreabilidade ao Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI), Rio de Janeiro, RJ.

O tempo de estabilização dos sistemas constituídos pelas câmaras e seus eletrômetros foi de 30 minutos antes do início das medidas.

Foram utilizados dois eletrômetros Keithley, modelo 35614 EBS, e um Physikalisch-Technische Werkstätten (PTW), modelo 10002.

### Fontes radioativas de controle

Nos testes de controle de qualidade periódicos dos sistemas de medidas para a verificação do seu desempenho e da con-

fiabilidade foram utilizadas fontes radioativas de controle de <sup>90</sup>Sr. Para as câmaras de ionização de placas paralelas foi utilizada uma fonte de controle PTW, modelo 8921, com atividade nominal de 33 MBq (1994). Para as câmaras de ionização tipo dedal foi utilizada uma fonte de controle NE, modelo 2503/03, com atividade nominal de 370 MBq (1976). Estas fontes radioativas pertencem ao LCI-Ipen/SP.

### Objetos simuladores

Foram utilizados os seguintes objetos simuladores (“phantoms”):

a) Simulador de água da IAEA, com dimensões de 30 × 30 × 30 cm<sup>3</sup>, sendo que o material das suas paredes e dos suportes para as câmaras de ionização é de acrílico (PMMA); pertence ao Ipen.

b) Simulador sólido, projetado e confeccionado no Ipen, com dimensões de 30 × 30 × 20 cm<sup>3</sup>, sendo que o material das placas e das placas-suportes das câmaras de ionização é de PMMA; pertence ao Ipen.

c) Simulador de água, PTW, com dimensões de 40 × 40 × 40 cm<sup>3</sup>, sendo que o material das suas paredes e dos suportes para as câmaras de ionização é de PMMA; pertence ao HIAE.

## RESULTADOS

Os testes de qualificação têm por objetivo assegurar o bom desempenho dos sis-

**Tabela 1** Características das câmaras de ionização utilizadas neste trabalho. As câmaras D e F não são impermeáveis, podendo-se utilizar apenas o objeto simulador sólido. Os demais sistemas possuem câmaras impermeáveis, podendo-se utilizar o simulador tanto sólido como de água.

Características	Câmaras					
	A	B	C	D	E	F
Fabricante	NE	PTW	PTW	Ipen	PTW	Victoreen
Tipo	Dedal Farmer	Dedal Farmer	Placas paralelas Markus	Placas paralelas	Placas paralelas Markus	Placas paralelas Holt
Modelo	2505	23.333	23.343	—	23.343	NA 30-404
Série	2019	1408	2395	—	1369	—
Volume nominal (cm <sup>3</sup> )	0,6	0,6	0,055	0,056	0,055	1,0
Parede: Material	Grafite	PMMA	PMMA	PMMA	PMMA	Poliestireno grafitado
Espessura (g/cm <sup>2</sup> )	0,065	0,053	—	—	—	—
Capa de equilíbrio eletrônico: Material	PMMA	PMMA	PMMA	PMMA	PMMA	Incorporado à câmara
Espessura (g/cm <sup>2</sup> )	0,551	0,551	0,500	0,500	0,500	—
Eletrodo: Diâmetro (mm)	—	—	6,0	6,0	6,0	25
Espaçamento (mm)	—	—	2	2	2	2
Janela: Material	—	—	Poliétileno grafitado	Mylar aluminizado	Poliétileno grafitado	Sem informação
Espessura (mg/cm <sup>2</sup> )	—	—	102	0,2	102	416

temas antes, durante e após as medidas realizadas.

### Testes preliminares

Nos **sistemas de calibração** os testes realizados referem-se à disposição dos sistemas e de seus acessórios, ao seu alinhamento, às dimensões e à uniformidade do campo de radiação.

Os **sistemas de medida** devem ser testados no que diz respeito à estabilidade a curto e a longo prazo, e à corrente de fuga. Todos os testes foram realizados com o auxílio das fontes radioativas de controle. No teste de repetibilidade das câmaras analisadas — **sistemas A e C** —, os valores foram satisfatórios dentro de 0,5%, limite recomendado pelas normas internacionais para estes tipos de câmaras de ionização<sup>(19)</sup>. Realizando-se os testes de repetibilidade periodicamente, sempre sob as mesmas condições geométricas, tem-se o teste de estabilidade a longo prazo. As medidas de estabilidade a longo prazo das câmaras de ionização dos **sistemas A e C** (Figuras 1 e 2) apresentaram-se perfeitamente dentro das exigências dos protocolos internacionais.

As medidas de corrente de fuga dos **sistemas A e C** têm-se mantido dentro dos limites estabelecidos, sempre menores que 0,3%; isto era esperado, já que as câmaras de ionização, os cabos de conexão e os eletrômetros são mantidos em local seco e com sílica gel, para se evitar a produção de cargas devido à presença de umidade, que

pode ser um dos principais responsáveis pela produção da corrente de fuga.

Outros **testes operacionais** devem ser aplicados às câmaras de ionização, pois na prática as condições de referência exigidas pelos protocolos TRS 277<sup>(6)</sup> e TRS 381<sup>(13)</sup> não são verificadas. Os testes adicionais foram: determinação da eficiência de coleção de íons, efeito de polaridade e variação com a energia da radiação incidente. As câmaras analisadas apresentaram desempenho excelente.

Todas as medidas obtidas, além da correção para as condições ambientais de temperatura e pressão, foram ainda corrigidas considerando-se o decaimento radioativo das fontes de controle.

### Determinação da dose absorvida

Em radioterapia, a intensidade de radiação se expressa em unidades bem definidas de kerma no ar ou dose absorvida num meio definido. Para tanto, existe a necessidade de se controlar periodicamente o desempenho dos feixes por meio de procedimentos de dosimetria.

O formalismo para a dosimetria de feixes de elétrons com câmara de ionização preenchida com ar, adotado pela maioria dos protocolos de dosimetria e metrologistas da área<sup>(4-13,20,21)</sup>, compreende um procedimento de duas etapas: 1) determinação do fator de calibração de dose absorvida no ar, a partir da calibração da câmara em um laboratório padrão; 2) aplicação da relação de Bragg-Gray modificada por Spencer-

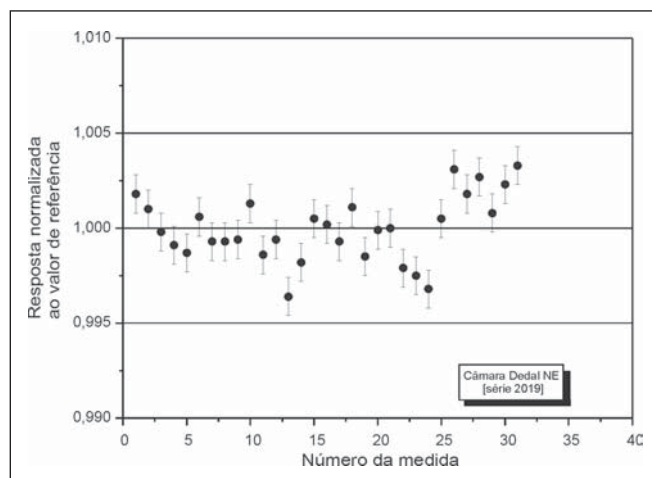
Attix para a determinação da dose absorvida na água no feixe do usuário.

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 objetos simuladores sólidos de material plástico sejam utilizados na calibração do feixe de elétrons. Os objetos simuladores sólidos apresentam uma facilidade maior de manuseio e excelente reprodutibilidade geométrica, sendo recomendados, principalmente, para dosimetria de feixes de elétrons com energias menores que 10 MeV, em que o alcance dos elétrons é pequeno e o emprego conjunto da câmara de ionização de placas paralelas e do objeto simulador sólido é recomendado. No caso da dose absorvida na água, determinada por intermédio de câmaras de ionização cilíndricas ou de câmaras de placas paralelas, utiliza-se a equação 1, conforme o formalismo dos atuais protocolos de dosimetria.

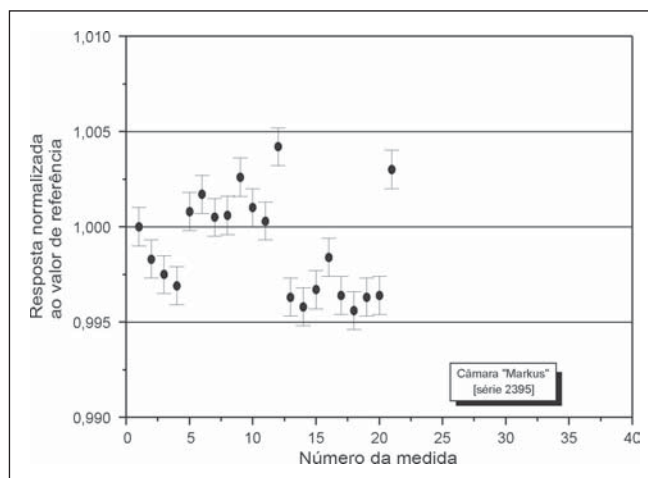
Pela equação de Bragg-Gray<sup>(6)</sup>, a dose absorvida em água ( $D_w$ ) num ponto de interesse (i.e., num ponto efetivo de medida da câmara,  $P_{ef}$ ), e numa profundidade de referência para cada energia, é dada por:

$$D_w(P_{ef}) = M \cdot N_{D,ar} \cdot (S_{\acute{a}gua,ar}) \cdot P_u \cdot P_{cel} \quad (1)$$

onde:  $M$  é a leitura do eletrômetro para o dosímetro, corrigida para as condições ambientais;  $N_{D,ar}$  é o fator de calibração da câmara de ionização em termos de dose



**Figura 1.** Teste de estabilidade a longo prazo da câmara de ionização do **sistema A** (0,6 cm<sup>3</sup>); medidas realizadas num período de 38 meses. Foi obtido um desvio-padrão menor que 0,15%.



**Figura 2.** Teste de estabilidade a longo prazo da câmara de ionização do **sistema C** (0,055 cm<sup>3</sup>); medidas realizadas num período de 30 meses. Foi obtido um desvio-padrão menor que 0,20%.

absorvida no ar;  $S_{\text{água,ar}}$  é a razão entre os poderes de freamento da água para o ar;  $P_u$  é o fator de perturbação da câmara de ionização;  $P_{\text{cel}}$  é o fator que leva em conta a “não equivalência de ar” do material no eletrodo central de uma câmara.

Quando as medidas forem realizadas num objeto simulador sólido (plástico), a leitura do eletrômetro  $M_{\text{plástico}}$  tem que ser convertida num valor correspondente às leituras dentro de um simulador de água, por meio da expressão:

$$M_{\text{água}} = M_{\text{plástico}} \cdot h_m \quad (2)$$

onde:  $h_m$  é o fator que corrige a fluência dos elétrons, devido à troca do material do simulador pela parede da câmara e pela cavidade, dado no protocolo IAEA TRS 381<sup>(13)</sup>.

Neste trabalho, antes da aplicação do protocolo TRS 381<sup>(13)</sup> para a determinação da dose absorvida em feixes de elétrons, foi realizado um estudo para se estabelecer um procedimento para a determinação do fator de calibração em termos de dose absorvida no ar, em feixes de radiação gama de  $^{60}\text{Co}$  e de elétrons de energias altas. Os quatro métodos testados foram:

• **Método I – Calibração no ar.** Neste método o procedimento aplica o mesmo formalismo utilizado para as câmaras cilíndricas e calibra-se a câmara de ionização de placas paralelas em termos de kerma no ar,  $k_{\text{ar}}$ , no feixe de radiação gama do  $^{60}\text{Co}$ . Na calibração, a câmara é posicionada de tal maneira que o centro de sua cavidade de ar esteja no ponto onde  $k_{\text{ar}}$  é conhecido com uma capa de equilíbrio eletrônico (~0,5 g/cm<sup>2</sup>) em comparação a uma câmara de ionização cilíndrica de referência com o fator de calibração em kerma no ar conhecido,  $N_k^{\text{Ref}}$ . A partir do fator  $N_k$  determinado, o fator  $N_D$  é calculado utilizando-se a expressão:

$$N_{D,\text{ar}}^{\text{pp}} = N_k^{\text{pp}} \cdot (1 - g) \cdot (k_{\text{att}} \cdot k_m) \quad (3)$$

onde:  $N_k$  é o fator de calibração em termos de kerma no ar;  $N_{D,\text{ar}}$  é o fator de calibração em termos de dose absorvida no ar;  $pp$  e  $Ref$  são índices que se referem às câmaras de ionização de placas paralelas em estudo e às câmaras de ionização de referência;  $g$  é a fração da energia liberada que é dissipada como “Bremsstrahlung” (radiação de freamento) no ar e é aproximadamente 0,3% para radiação gama do  $^{60}\text{Co}$ ;

$k_{\text{att}}$  é o fator de correção que leva em conta a atenuação (absorção e espalhamento) nas paredes de uma câmara de ionização irradiada durante a calibração;  $k_m$  é o fator de correção que leva em conta a “não equivalência de ar” (na calibração) dos materiais da parede e capa de equilíbrio eletrônico da câmara de ionização.

• **Método II – Calibração no simulador de água.** Neste método, o estudo foi realizado com feixes de radiação gama de  $^{60}\text{Co}$  e de elétrons de energias altas. A câmara de placas paralelas foi calibrada em comparação a uma câmara de ionização cilíndrica previamente calibrada e com  $N_{D,\text{ar}}$  conhecido numa profundidade de referência (para os feixes de elétrons de energia nominal de 16 MeV foi de 2 g/cm<sup>2</sup> e para feixes de radiação gama de  $^{60}\text{Co}$  foi de 5 g/cm<sup>2</sup>) em um simulador de água. O fator  $N_{D,\text{ar}}^{\text{pp}}$  desconhecido é obtido por:

$$N_{D,\text{ar}}^{\text{pp}} = N_{D,\text{ar}}^{\text{Ref}} \cdot \frac{M^{\text{Ref}}}{M^{\text{pp}}} \cdot \frac{P_{\text{wall}}^{\text{Ref}} \cdot P_{\text{cel}}^{\text{Ref}} \cdot P_{\text{dis}}^{\text{Ref}}}{P_{\text{wall}}^{\text{pp}}} \quad (4)$$

onde:  $N_{D,\text{ar}}^{\text{pp}}$  é o fator de calibração da câmara em termos de dose absorvida no ar;  $M^{\text{Ref}}$  e  $M^{\text{pp}}$ : ( $M = \bar{M}_0 \cdot f_{T,p} \cdot k_h \cdot P_s$ ) são leituras das câmaras de ionização cilíndrica e de placas paralelas, respectivamente, corrigidas para as condições de referência ambientais ( $f_{T,p}$ ): pressão, temperatura e umidade relativa do ar ( $k_h$ ), e para o efeito de correção da recombinação ( $P_s$ );  $P_{\text{wall}}^{\text{Ref}}$  é o fator de correção da parede da câmara cilíndrica de referência;  $P_{\text{cel}}^{\text{Ref}}$  é o fator que leva em conta a “não equivalência de ar” do material no eletrodo central de uma câmara de ionização;  $P_{\text{dis}}^{\text{Ref}}$  é o fator de deslocamento do ponto efetivo da câmara e é igual a  $1 - 0,004 \cdot r$ , onde  $r$  é o raio interno da câmara de referência em mm;  $P_{\text{wall}}^{\text{pp}}$  é o fator de correção da parede da câmara de placas paralelas.

• **Método III – Calibração no simulador sólido.** A metodologia empregada é a mesma que a do método II, fazendo-se correção na leitura da medida,  $M_{\text{plást}}$ , realizada num simulador de placas sólidas, o qual deve ser de mesmo material da câmara de placas paralelas.

• **Método IV – Calibração no simulador sólido com radiação gama de  $^{60}\text{Co}$ .** A calibração é feita na situação de dose máxima num simulador sólido. A câmara de placas paralelas é colocada com a su-

perfície frontal da cavidade numa profundidade de referência de 0,5 g/cm<sup>2</sup> do simulador de placas, em comparação a uma câmara cilíndrica previamente calibrada no ar livre no seu ponto de referência. Com  $N_k^{\text{pp}}$  calculado pela equação 3, obtém-se  $N_{D,\text{ar}}^{\text{pp}}$  por:

$$N_{D,\text{ar}}^{\text{pp}} = N_k^{\text{pp}} \cdot (1 - g) \cdot k_{pp} \quad (5)$$

onde:  $k_{pp} = (k_{\text{att}} \cdot k_m \cdot B_m)$ ;  $B_m$  é o fator que corrige o retroespalhamento do material do simulador ao redor da câmara. O fator de retroespalhamento para um campo de  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ , descrito por Johns e Cunningham<sup>(21)</sup>, é igual a 1,035.

Os resultados deste estudo estão perfeitamente dentro do que as recomendações internacionais sugerem para uma calibração deste tipo de câmara. O mesmo aplica-se em relação à incerteza total associada ao fator de calibração da câmara, tanto em termos de dose absorvida no ar em feixes de radiação gama de  $^{60}\text{Co}$  como de elétrons, em termos de dose absorvida na água. Foram utilizadas as condições de referência dos feixes de radiação para se minimizar os erros e reproduzir as condições de calibração recomendadas pelo protocolo TRS 381<sup>(13)</sup> (Tabela 2). Os resultados são apresentados na Tabela 3. Nas calibrações, a câmara de ionização de referência de trabalho utilizada, com fator de calibração conhecido, foi a câmara NE, modelo 2505, série 2080.

Segundo alguns autores<sup>(17,22,23)</sup>, as variações entre câmaras de mesmo modelo podem ser significantes e afetar a confiabilidade dos valores de  $N_D$  derivados de calibração em  $^{60}\text{Co}$  no ar.

Assim, a dose absorvida  $D_w$  determinada em um ponto de interesse em um meio numa profundidade de referência usando câmaras de placas paralelas em feixes de elétrons, segundo o protocolo internacional TRS 381<sup>(13)</sup>, pode-se obter por três metodologias:

**Primeira metodologia:** Determinar a dose absorvida em feixes de elétrons do usuário numa profundidade de referência num simulador de água (ou PMMA) usando a câmara de placas paralelas calibrada em termos de dose absorvida no ar ( $N_{D,\text{ar}}^{\text{pp}}$ ), pela intercomparação com uma câmara cilíndrica de referência de trabalho num simulador em feixes de elétrons; a câmara



cilíndrica de referência de trabalho tem um fator de calibração  $N_{D,ar}^{Ref}$  conhecido, determinado em feixes de  $^{60}\text{Co}$ . A seqüência de calibração de uma câmara de placas paralelas está representada na Figura 3.

**Segunda metodologia:** Determinar a dose absorvida em feixes de elétrons do usuário numa profundidade de referência num simulador de água (ou PMMA) usando a câmara de placas paralelas calibrada

pela intercomparação com uma câmara cilíndrica de referência de trabalho num simulador em feixes de  $^{60}\text{Co}$ ; a câmara cilíndrica de referência de trabalho tem um fator de calibração  $N_{D,ar}^{Ref}$  conhecido, determinado em feixes de  $^{60}\text{Co}$ . A seqüência de calibração de uma câmara de placas paralelas está representada na Figura 4.

**Tabela 2** Condições de referência para os feixes de radiação gama de  $^{60}\text{Co}$  e para os feixes de elétrons.

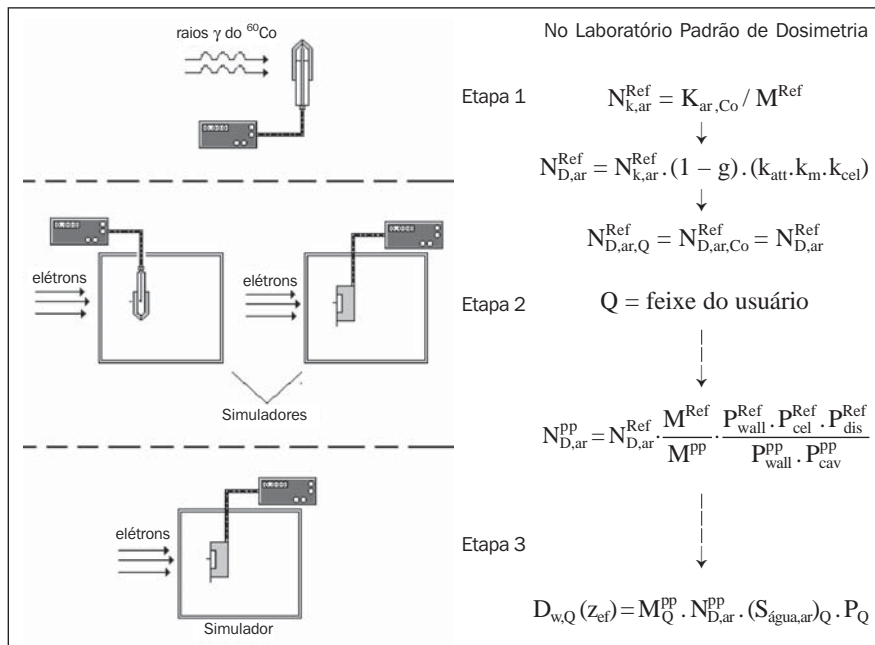
	$^{60}\text{Co}$ (Ipen)	Elétrons (HIAE)
Simulador de água – dimensões (cm <sup>3</sup> )	30 × 30 × 30	40 × 40 × 40
Simulador sólido* – dimensões (cm <sup>3</sup> )	30 × 30 × 20	30 × 30 × 20
Campo de radiação (cm <sup>2</sup> )	10 × 10	10 × 10
Distância fonte–câmara ou fonte–superfície (cm)	100	100
Profundidade de referência no simulador (cm)	5 <sup>†</sup>	2 <sup>†</sup>

\* Simulador sólido – conjunto de placas de PMMA de 30 × 30 × 1 cm<sup>3</sup> cada; este material foi escolhido devido às características da câmara de placas paralelas, modelo PTW/Markus; <sup>†</sup> No simulador sólido ou de placas de PMMA esta profundidade é equivalente a 4,74 cm, pois 1 mm de água corresponde a 0,874 mm de PMMA<sup>(13)</sup>.

**Tabela 3** Fatores de calibração, em termos de dose absorvida no ar, das câmaras de ionização de placas paralelas, determinados em feixes de radiação de  $^{60}\text{Co}$  e de elétrons –  $N_{D,ar}$  (mGy/nC) – nos simuladores de água e de PMMA, conforme Tabela 2. As câmaras dos **sistemas D e F** não são impermeáveis.

Câmaras de ionização	Métodos	$N_{D,ar}$ (mGy/nC)						
		Método I (ar)*	Método II (água)		Método III (PMMA)		Método IV (PMMA)	
		Feixes	$^{60}\text{Co}$	$^{60}\text{Co}$	Elétrons	$^{60}\text{Co}$	Elétrons	$^{60}\text{Co}$
Dedal NE	Sistema A	39,78	40,32	—	—	42,05	—	—
Dedal PTW	Sistema B	44,70	46,03	45,90	—	45,74	45,90	—
Placas paralelas Markus	Sistema C	473,61	473,38	467,83	—	473,52	468,06	472,55
Placas paralelas Ipen	Sistema D	316,05	—	—	—	314,05	317,19	316,63
Placas paralelas Markus	Sistema E	428,70	447,35	452,84	—	439,06	455,84	462,40
Placas paralelas Holt	Sistema F	—	—	—	—	25,91	25,76	26,50

\* Com capa de equilíbrio eletrônico de 0,5 g/cm<sup>2</sup>.



**Figura 3.** Seqüência de calibração de uma câmara de placas paralelas como descrito na **primeira metodologia**, para a determinação da dose absorvida na água em feixes de elétrons.

**Terceira metodologia:** Determinar a dose absorvida em feixes de elétrons do usuário numa profundidade de referência num simulador de água (ou PMMA) usando a câmara de placas paralelas calibrada em termos de kerma no ar ( $N_k^{PP}$ ), pela intercomparação com uma câmara cilíndrica de referência com o fator de calibração  $N_k^{Ref}$  conhecido, determinado numa calibração em ar livre com feixes de  $^{60}\text{Co}$ . Por meio de cálculos, obtém-se o fator de calibração em termos de dose absorvida no ar ( $N_{D,ar}^{PP}$ ). A seqüência de calibração de uma câmara de placas paralelas está representada na Figura 5.

A Tabela 4 apresenta os resultados das doses absorvidas em feixes de elétrons obtidas pelas três metodologias.

As medidas com a câmara Holt do **sistema F** foram realizadas num simulador de PMMA, embora a recomendação do protocolo TRS 381<sup>(13)</sup> seja de um simulador com o material de poliestireno (semelhante ao material da câmara), não disponível no laboratório.

Na **primeira metodologia** os resultados obtidos foram satisfatórios, segundo as recomendações dos protocolos, em especial ao protocolo TRS 381<sup>(13)</sup>, com variação máxima menor que 1,0% nas taxas de dose absorvida em diferentes câmaras.

Na **segunda metodologia**, comparando-se os dados obtidos de dose absorvida com diferentes câmaras de mesma classificação (dedal ou placas paralelas), pode-se notar uma variação máxima de 1,9% em água e 5,1% em PMMA, observando-se que o efeito de retroespalhamento no simulador sólido é mais significativo. Este valor está fora dos limites aceitáveis. Como mostra o trabalho de Andreo *et al.*<sup>(17)</sup>, ainda há a necessidade de se estudar qual o melhor valor do fator  $h_m$  que corrige a fluência dos elétrons, devido à troca do material do simulador.

Na **terceira metodologia** nota-se que os valores obtidos com o **sistema E** não

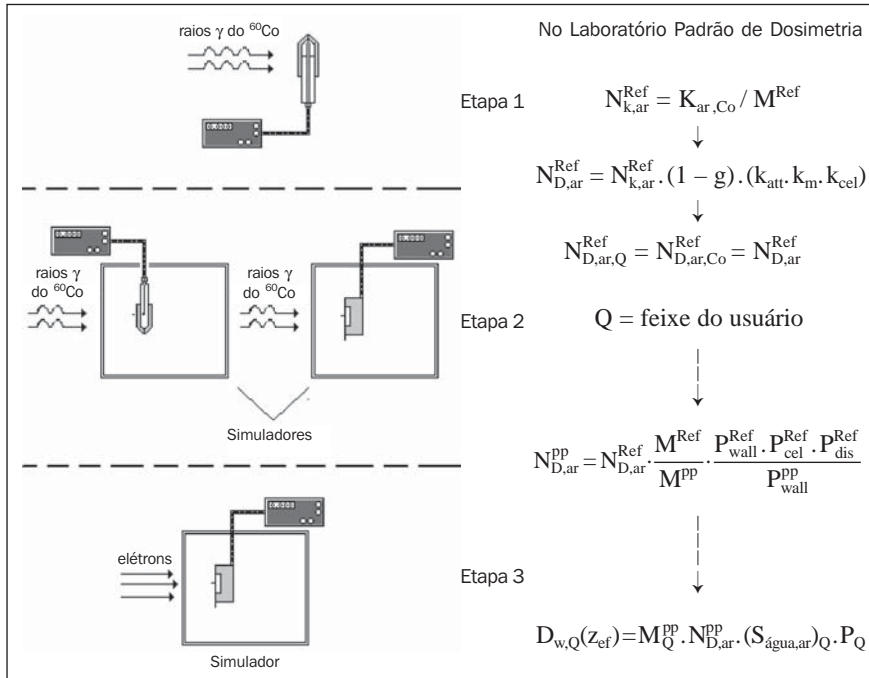


Figura 4. Seqüência de calibração para uma câmara de placas paralelas como descrito na **segunda metodologia**, para a determinação da dose absorvida na água em feixes de elétrons.

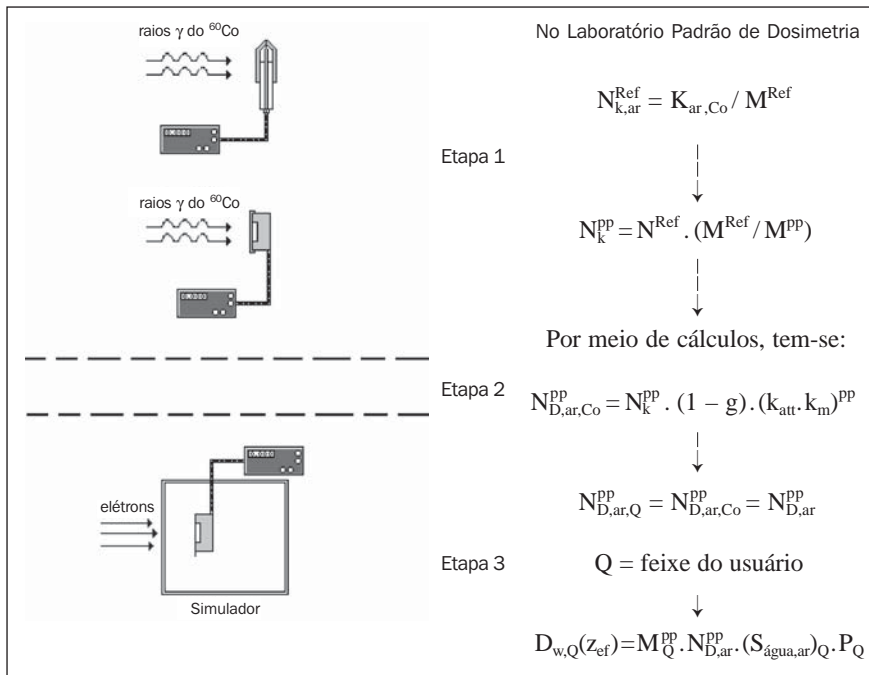


Figura 5. Seqüência de calibração de uma câmara de placas paralelas como descrito na **terceira metodologia**, para a determinação da dose absorvida na água em feixes de elétrons.

estão condizentes com os demais sistemas. McEwen *et al.*<sup>(24)</sup> relataram também falta de concordância do desempenho da câmara de ionização tipo Markus com outras câmaras em feixes de elétrons. A variação máxima entre os outros sistemas do presen-

te trabalho foi de 3,0%. A câmara dedal PTW neste caso apresentou valor fora dos limites aceitáveis. A análise do **sistema F**, nesta metodologia, foi realizada com o fator de calibração  $N_{D,ar}^{PP}$ , obtido na calibração em feixes de radiação gama de  $^{60}\text{Co}$

pelo método IV, já que essa câmara não possui capa de equilíbrio eletrônico para calibrá-la pelo método I; mostrou uma variação porcentual de 2,1% em comparação com os outros sistemas.

A incerteza global associada ao fator de calibração de dose absorvida foi estimada em 3,5% (nível de confiança de 95%) nos resultados obtidos por estas metodologias com câmaras de placas paralelas, mostrando-se viáveis e dentro do limite de incerteza recomendado pelo protocolo da IAEA<sup>(13)</sup>. No presente trabalho foram levadas em conta, para a determinação da incerteza global, as incertezas relativas às medidas, ao fator de calibração, ao posicionamento das câmaras, às condições ambientais e aos fatores de correção.

### CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo mostraram que a maior parte das câmaras de ionização testadas mostraram-se viáveis e com desempenho dentro dos limites estabelecidos. Foi observada influência significativa do efeito de retroespalhamento quando se utiliza um simulador de placas sólidas.

### Agradecimentos

As autoras agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro parcial no desenvolvimento deste projeto; ao Sr. Marcos Xavier, pelo suporte técnico; à Dra. Laura Natal Rodrigues, por sugestões importantes no texto; ao Hospital Israelita Albert Einstein, pela oportunidade de utilização dos equipamentos de radiação; e em especial ao físico José Carlos Cruz, pelas discussões proveitosas.

### REFERÊNCIAS

1. Klevenhagen SC. Physics of electron beam therapy. Bristol: Adam Hilger, 1985.
2. International Commission on Radiation Units and Measurements. Radiation dosimetry: electron beams with energies between 1 and 60 MeV. Bethesda, MD: ICRU Report 24, 1976.
3. International Commission on Radiation Units and Measurements. Measurement of absorbed dose in a phantom irradiated by a single beam of X or gamma rays. Bethesda, MD: ICRU Report 23, 1973.
4. American Association of Physicists in Medicine. A protocol for the determination of absorbed dose from high-energy photon and electron beams. Med Phys 1983;10:741-71.

**Tabela 4** Dose absorvida corrigida em feixes de elétrons em simuladores de água da PTW e de PMMA, com o fator  $N_{D,ar}^{RP}$  obtido pelo feixe de radiação de  $^{60}\text{Co}$ , conforme a Tabela 2. As câmaras dos **sistemas D e F** não são impermeáveis. Todos os valores obtidos foram normalizados para os do sistema de referência NE, modelo 2505, série 2080.

Câmaras de ionização	Simulador	$D_{\text{corr}}$ (Gy)					
		Primeira metodologia		Segunda metodologia		Terceira metodologia	
		Água	PMMA	Água	PMMA	Água	PMMA
Dedal NE	Sistema A	1,042	1,045	1,062	1,072	1,042	1,045
Dedal PTW	Sistema B	1,041	1,047	1,044	1,043	1,014	1,020
Placas paralelas Markus	Sistema C	1,033	1,037	1,047	1,052	1,048	1,051
Placas paralelas Ipen	Sistema D	—	1,041	—	1,023	—	1,040
Placas paralelas Markus	Sistema E	1,034	1,037	1,027	1,001	0,982	0,978
Placas paralelas Holt	Sistema F	—	1,041	—	1,050	—	1,073

- Haybittle JL, Bradshaw AL, Burns JE, Morris WT, Pitchford WG. Code of practice for electron beam dosimetry in radiotherapy. *Phys Med Biol* 1985;30:1169–94.
- International Atomic Energy Agency. Absorbed dose determination in photon and electron beams. an international code of practice. Vienna, Austria: IAEA, Technical Reports Series No. 277, 1st ed. 1987, 2nd ed. 1997.
- International Commission on Radiation Units and Measurements. Radiation dosimetry: electron beams with energies between 1 and 50 MeV. Bethesda, MD: ICRU Report 35, 1984.
- Nordic Association of Clinical Physics. Procedures in external radiation therapy dosimetry with electron and photon beams with maximum energies between 1 and 50 MeV. *Acta Radiol Oncol* 1980;19:55–79.
- Nordic Association of Clinical Physics. Electron beams with mean energies at the phantom surface below 15 MeV. Supplement to the recommendations by the Nordic Association of Clinical Phys- ics (NACP) 1980. *Acta Radiol Oncol* 1981;20:401–15.
- Sociedad Española de Física Médica. Procedimientos recomendados para la dosimetria de fotones y electrones de energías comprendidas entre 1 MeV y 50 MeV en radioterapia de haces externos. Madrid, Spain: SEFM Publicación n.1, 1984.
- Sociedad Española de Física Médica. Suplemento al documento Procedimientos recomendados para la dosimetria de fotones y electrones de energías comprendidas entre 1 MeV y 50 MeV en radioterapia de haces externos. Madrid, Spain: SEFM Publicación n.2, 1987.
- Mattsson LO, 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* 1981;20:385–99.
- International Atomic Energy Agency. The use of plane parallel ionization chambers in high energy electron and photon beams. An international code of practice for dosimetry. Vienna, Austria: IAEA, Technical Reports Series No. 381, 1997.
- Almond PR, Attix FH, Humphries LJ, *et al.* The calibration and use of plane-parallel ionization chambers for dosimetry of electron beams: an extension of the 1983 AAPM protocol report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 39. *Med Phys* 1994;21:1251–60.
- Andreo P. Dose determination with plane-parallel ionization chambers in therapeutic electron and photon beams. *SSDL - Newsletter* 1999;40:4–16.
- Andreo P, Lindborg L, Medin J. On the calibration of plane-parallel ionization chambers using  $^{60}\text{Co}$  beams. *Med Phys* 1991;18:326–7.
- Andreo P, Rodrigues LN, Lindborg L, Kraepelien T. On the calibration of plane-parallel ionization chambers for electron beam dosimetry. *Phys Med Biol* 1992;37:1147–65.
- Laitano RF, Guerra AS, Pimpinella M, Nyström H, Karlsson M, Svensson H. Correction factors for calibration of plane-parallel ionization chambers with a  $^{60}\text{Co}$  gamma-ray beam. *Phys Med Biol* 1993;38:39–54.
- International Electrotechnical Commission. Standard medical electrical equipment dosimeters with ionization chambers as used in radiotherapy. Genève, Swiss: IEC-731-82, 1982.
- Khan FM, Doppke KP, Hogstrom KR, *et al.* Clinical electron-beam dosimetry: report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 5. *Med Phys* 1991;18:73–109.
- Johns HE, Cunningham IR. The physics of radiology. 4th ed. Springfield, IL: Charles C. Thomas, 1983.
- Attix FH. A proposal for the calibration of plane-parallel ion chambers by accredited dosimetry calibration laboratories. *Med Phys* 1990;17:931–3.
- Nyström H, Karlsson M. Correction factors applied to plane-parallel ionization chambers. *Phys Med Biol* 1993;38:311–22.
- McEwen MR, Williams AJ, DuSautoy AR. Determination of absorbed dose calibration factors for therapy level electron beam ionization chambers. *Phys Med Biol* 2001;46:741–55.