

APLICAÇÃO DE METODOLOGIA DOSIMÉTRICA DE FEIXES TERAPÊUTICOS DE RAIOS X COM SISTEMA TANDEM

Carla Eri Sartoris¹, Linda V.E. Caldas²

Resumo Um sistema Tandem, constituído por um par de câmaras de ionização comerciais (uma cilíndrica e uma de placas paralelas), foi estabelecido para aplicação em instituição hospitalar, em substituição ao procedimento convencional de determinação de camadas semi-redutoras utilizando-se absorvedores. Os resultados obtidos mostram a possibilidade de utilização deste sistema em procedimentos de dosimetria para os feixes de ortovoltagem utilizados em radioterapia, como complemento de um programa de controle de qualidade. *Unitermos:* Raios X. Câmaras de ionização. Controle de qualidade.

Abstract Application of a dosimetric methodology of therapeutic X-ray beams with a Tandem system. We developed a Tandem system using a pair of ionization chambers (a cylindrical and a parallel-plate type) to perform X-ray measurements in a medical Institution, in substitution of the routine conventional procedure of determination of half-values layers using absorbers. The results obtained indicate the possibility of application of this method in dosimetric procedures of orthovoltage beams (radiotherapy) as a complementary procedure in a quality control program.

Key words: X-rays. Ionization chambers. Quality control.

INTRODUÇÃO

O intuito da radioterapia, hoje em dia, é fornecer a maior dose possível ao tumor, mantendo a dose em tecidos normais adjacentes em níveis baixos, a ponto de não causar danos⁽¹⁾. As doses ministradas aos pacientes são determinadas segundo normas e recomendações⁽²⁻¹⁴⁾.

Existe uma tendência mundial de substituição dos feixes de raios X de energias baixas e intermediárias por feixes de elétrons de aceleradores lineares⁽¹⁾, mas, em termos de Brasil, esta é uma realização ainda relativamente distante, apesar de ter ocorrido, nos últimos dez anos, uma mudança significativa no parque radioterápico. Tem-se ainda um número significativo de equipamentos de ortovoltagem em funcionamento no País.

A utilização de feixes de raios X com finalidade terapêutica requer o conhecimento de suas características, pois estas variam com o equipamento utilizado. Portanto, é extremamente importante o conhe-

cimento preciso da quantidade de radiação a que se vai expor um paciente⁽⁶⁾, a fim de que o tratamento tenha um resultado satisfatório.

Para isto são utilizados procedimentos de dosimetria, com equipamentos como câmaras de ionização e eletrômetros, que em conjunto são denominados dosímetros clínicos, devidamente calibrados em instituições credenciadas.

Esses procedimentos de dosimetria são recomendados por instituições como, por exemplo, a Agência Internacional de Energia Atômica (International Atomic Energy Agency – IAEA), por intermédio de suas publicações, e também por legislações nacionais.

Um dos procedimentos básicos consiste na determinação das camadas semi-redutoras e das energias efetivas dos feixes disponíveis no equipamento em questão. Para a determinação das camadas semi-redutoras é seguido um procedimento de medidas do feixe, utilizando-se o método convencional com a adição de absorvedores externos ao feixe, que implica um tempo grande de medidas. O controle de qualidade vem assumindo, há anos, um papel importante em todas as áreas, inclusive na área de dosimetria, nível hospitalar.

No Laboratório de Calibração de Instrumentos do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Ipen) foram propostos inicialmente sistemas Tandem compos-

tos por câmaras de ionização de placas paralelas desenvolvidas neste Instituto⁽¹⁵⁻¹⁷⁾. Galhardo e Caldas estudaram o comportamento de sistemas Tandem de câmaras de ionização comerciais^(18,19) de configurações diferentes.

Este trabalho tem por objetivo propor uma alternativa à metodologia convencional rotineira na determinação das camadas semi-redutoras em feixes de raios X de energias intermediárias, pelo uso de um sistema Tandem, composto de câmaras comerciais de dois tipos diferentes, e ainda acompanhar sua estabilidade ao longo do tempo. O sistema Tandem é formado por duas câmaras disponíveis no Serviço de Radioterapia. O intuito deste procedimento é otimizar o tempo de medição, possibilitando que a metodologia possa ser realizada com maior frequência, uma vez que o tempo necessário, neste caso, é bastante reduzido em relação ao método convencional. A metodologia proposta neste trabalho poderá facilmente ser implantada num programa de controle de qualidade permanente.

MATERIAL E MÉTODOS

As medidas com raios X de energias intermediárias (60 a 250 kV) foram realizadas no Serviço de Radioterapia do Instituto de Radiologia (InRad) do Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina da

1. M.Sc., Instituto Brasileiro do Controle do Câncer (IBCC), São Paulo, SP.

2. Doutora, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Comissão Nacional de Energia Nuclear (Ipen-CNEN), São Paulo, SP.

Endereço para correspondência: Dra. Linda V.E. Caldas. Diretoria de Segurança Radiológica, Ipen-CNEN. Travessa "R", 400, Cidade Universitária. São Paulo, SP, 05508-900. E-mail: lcaldas@net.ipen.br

Recebido para publicação em 25/6/2001. Aceito, após revisão, em 17/7/2001.

Universidade de São Paulo (HC-FMUSP), utilizando-se duas câmaras de ionização, uma cilíndrica e outra de placas paralelas, acopladas a um único eletrômetro.

As medidas relativas à calibração das câmaras, com feixes de raios X de energias intermediárias, foram realizadas no Laboratório de Calibração de Instrumentos do Ipen, Comissão Nacional de Energia Nuclear, São Paulo, SP.

1. Fontes de radiação

Foram utilizados um sistema de raios X (Pantak, modelo HF320) e uma fonte de controle de ⁹⁰Sr (Physikalisch-Technische Werkstätten – PTW, tipo 8, modelo 74321) pertencentes ao Ipen, para a realização, respectivamente, da calibração e dos testes de estabilidade dos dosímetros clínicos.

No HC-FMUSP foram utilizados um sistema de raios X (Siemens, modelo Stabilipan II, série PTB08035) e uma fonte de controle de ⁹⁰Sr (PTW, modelo 8921). Na Tabela 1 são apresentadas as características deste sistema de raios X.

Tabela 1 Caracterização dos feixes de radiação do sistema de raios X do HC-FMUSP

Tensão (kV)	Filtração adicional (mm)	Corrente (mA)
60	2,0 (Al)	20
80	2,0 (Al)	20
120	0,2 (Cu)	20
160	0,5 (Cu)	20
200	1,0 (Cu)	20
250	Thoraues I	15

As camadas semi-redutoras, as energias efetivas e as taxas de kerma no ar deste sistema foram determinadas no presente trabalho.

2. Sistemas de medidas

Foram utilizados dosímetros clínicos compostos por uma câmara de ionização cilíndrica (PTW, modelo 2606, série 1154), com volume de 0,6 cm³, e uma câmara de ionização de placas paralelas (PTW, modelo Markus, série 1197), com volume de 0,055 cm³, acopladas a um eletrômetro (Victoreen, modelo 500, série 1029), pertencentes ao HC-FMUSP.

Todas as medidas efetuadas durante a realização deste trabalho foram corrigidas

para os fatores ambientais de temperatura e pressão.

Para a determinação das camadas semi-redutoras dos feixes de radiação foi utilizado um sistema rígido de absorvedores de alumínio e cobre, marca Siemens.

RESULTADOS

Os resultados dos testes realizados com as câmaras de ionização pertencentes ao Serviço de Radioterapia do Instituto de Radiologia do HC-FMUSP serão apresentados, neste capítulo, para verificar as suas condições de funcionamento, como parte do programa de controle de qualidade do Serviço de Radioterapia. Um sistema Tandem foi estudado quanto à estabilidade a longo prazo para energias intermediárias de raios X.

1. Calibração das câmaras de ionização com radiação X

Inicialmente, as câmaras de ionização cilíndrica e de placas paralelas foram calibradas no Laboratório de Calibração de Instrumentos do Ipen, em feixes padronizados de radiação X entre 35 e 115 keV, embora apenas a câmara cilíndrica seja recomendada para esta faixa de energia em determinações de dose absorvida. A técnica utilizada foi a da substituição.

Faz parte do procedimento inicial de calibração de dosímetros clínicos com radiação X os testes de repetibilidade (estabilidade a curto prazo) e de fuga de cor-

rente da câmara de ionização padrão do Ipen, com a utilização da fonte de controle de ⁹⁰Sr. Os dados obtidos foram dentro do esperado, isto é, o teste de repetibilidade mostrou um resultado adequado de estabilidade e a fuga de corrente foi desprezível.

As Tabelas 2 e 3 mostram os parâmetros das qualidades de radiação e os fatores de calibração determinados para as câmaras de ionização cilíndrica e de placas paralelas do HC-FMUSP.

2. Testes do programa de controle de qualidade

A seguir são discutidos os testes realizados com as câmaras de ionização do HC-FMUSP, que fazem parte do programa de controle de qualidade de um Serviço de Radioterapia, segundo recomendações de vários autores^(20,21) e da IAEA⁽²²⁻²⁵⁾, ou seja, teste de repetibilidade, teste de estabilidade a longo prazo e teste de fuga. Todos estes testes foram realizados no Serviço de Radioterapia do HC-FMUSP.

2.1. Teste de repetibilidade

O teste de repetibilidade consiste na realização de uma série de medidas utilizando-se a fonte de controle de ⁹⁰Sr, posicionada de forma reproduzível em relação a cada uma das câmaras de ionização, obtendo-se uma indicação de referência no eletrômetro para dez medidas consecutivas. O desvio padrão porcentual não deve exceder a 0,5% para os instrumentos de campo⁽²⁶⁾.

Tabela 2 Fatores de calibração da câmara cilíndrica PTW, modelo 2606, série 1154, determinados no Laboratório de Calibração de Instrumentos do Ipen. Escala (R): 0,6 cm³ “low”.

Tensão (kV)	Energia efetiva (keV)	Camada semi-redutora (mmCu)	Fator de calibração (mGy.nC ⁻¹)	Incerteza (%)
100	35	0,15	48,83	1,0
135	55	0,47	48,73	1,0
180	76	0,95	48,79	1,0
250	115	2,39	48,81	1,0

Tabela 3 Fatores de calibração da câmara de placas paralelas PTW, modelo Markus, série 1197, determinados no Laboratório de Calibração de Instrumentos do Ipen. Escala (R): carga.

Tensão (kV)	Energia efetiva (keV)	Camada semi-redutora (mmCu)	Fator de calibração (mGy.nC ⁻¹)	Incerteza (%)
100	35	0,15	0,569	1,0
135	55	0,47	0,486	1,0
180	76	0,95	0,456	1,0
250	115	2,39	0,444	1,0

Para cada medida realizada são anotados os valores de temperatura e pressão para efeito de correção para as condições ambientais. Ao final da série de medidas são calculados as médias dos valores medidos e os correspondentes desvios-padrão, a fim de compará-los com os limites admissíveis em norma⁽²⁶⁾.

Os desvios-padrão obtidos neste trabalho variaram de 0,10% a 0,47% para a câmara de ionização de placas paralelas, série 1197, e de 0,10% a 0,41% para a câmara de ionização cilíndrica, série 1154, mostrando-se, portanto, abaixo dos limites recomendados.

2.2. Teste de estabilidade a longo prazo

O teste de reprodutibilidade ou de estabilidade a longo prazo consiste de várias medidas, a longo prazo, do teste de repetibilidade das câmaras. Os valores obtidos neste teste são dispostos numa figura orientada cronologicamente, normalizados para a data de referência, pelo fator de decaimento da fonte. Esta figura indica a estabilidade do conjunto câmara-eletrômetro, em relação às condições geométricas iniciais, uma vez que as medidas são comparadas com o valor de referência (L_0), que é obtido pela média das dez primeiras medidas. Conforme já citado, a variação máxima estabelecida em norma⁽²⁶⁾ é de $\pm 1\%$ do valor de referência.

Nas Figuras 1 e 2 são apresentados os dados obtidos com as câmaras cilíndrica e de placas paralelas, respectivamente, durante um período de 19 meses. Todos os dados foram corrigidos para as condições ambientais de referência. Pode-se verificar que as duas câmaras mostram resultados com incertezas abaixo dos limites recomendados.

Pode-se observar que a resposta das duas câmaras se manteve dentro dos limites admissíveis, denotando viabilidade e confiabilidade no uso delas.

2.3. Teste de corrente de fuga

No presente trabalho os valores obtidos nos testes de corrente de fuga sempre mantiveram-se abaixo dos limites admissíveis⁽²⁶⁾. Os valores máximos obtidos nestes testes foram de 0,44% para a câmara cilíndrica e de 0,35% para a câmara de placas paralelas.

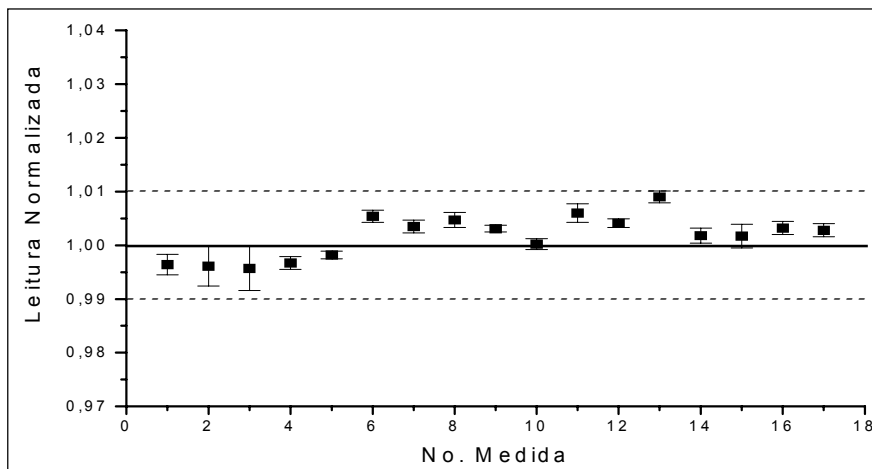


Figura 1. Teste de estabilidade a longo prazo da câmara cilíndrica PTW, série 1154.

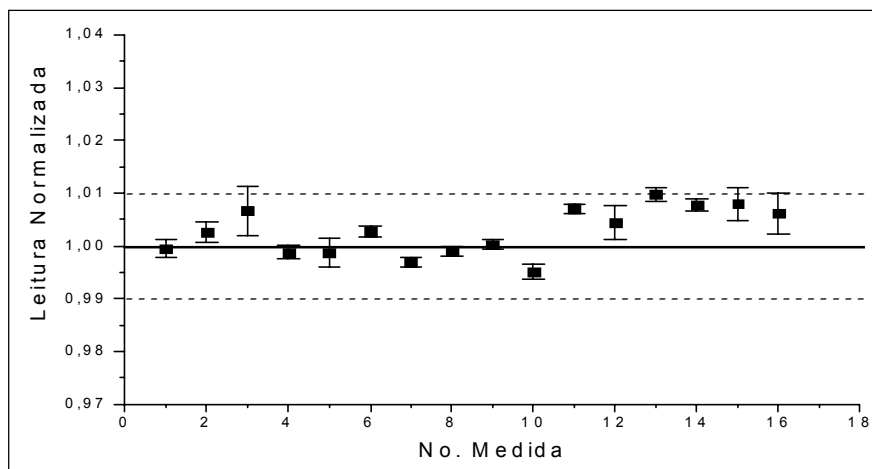


Figura 2. Teste de estabilidade a longo prazo da câmara de placas paralelas PTW, série 1197.

3. Determinação das camadas semi-redutoras

O procedimento para a determinação das camadas semi-redutoras, utilizando-se o método convencional (Figura 3), consiste da colocação, no feixe de radiação, de placas de absorvedores, cujas espessuras vão aumentando até que a intensidade do feixe seja reduzida a um terço da intensidade inicial.

Para cada uma das energias do feixe de radiação do equipamento utilizado o procedimento foi repetido, obtendo-se os valores das camadas semi-redutoras. A câmara de ionização foi posicionada a 100 cm do foco da radiação X, onde o campo de irradiação foi de 4 cm de diâmetro.

Os dados das camadas semi-redutoras determinadas (e energias efetivas), com a utilização do sistema de absorvedores da

Tabela 4 Determinação das camadas semi-redutoras obtidas utilizando-se o método convencional, com as placas absorvedoras Siemens.

Tensão (kV)	Filtração adicional (mm)	Camada semi-redutora (mm)	Energia efetiva (keV)
60	2 (Al)	2,18 (Al)	29,8
80	2 (Al)	2,53 (Al)	31,9
120	0,2 (Cu)	0,41 (Cu)	57,2
160	0,5 (Cu)	1,03 (Cu)	61,3
200	1 (Cu)	1,91 (Cu)	111,7
250	Thoraeus I	3,24 (Cu)	146,5

Siemens, encontram-se na Tabela 4. O desvio padrão porcentual máximo das medidas realizadas foi de 0,6%.

As energias efetivas foram determinadas utilizando-se valores tabelados⁽²⁷⁾ para o coeficiente de atenuação linear (μ/p), aplicando-se a formulação matemática que

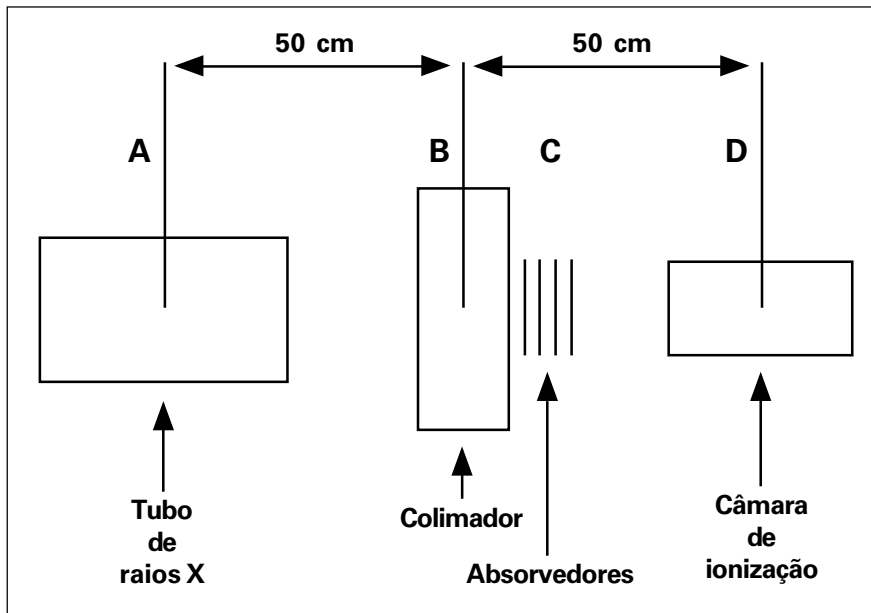


Figura 3. Esquema de arranjo experimental utilizado para a determinação das camadas semi-redutoras dos feixes de radiação X no HC-FMUSP.

relaciona este coeficiente (μ/ρ) com a densidade do material do absorvedor.

4. Linearidade da resposta das câmaras de ionização

A linearidade da resposta das câmaras de ionização utilizadas foi estudada, irradiando-as com doses absorvidas entre 50 e 500 cGy. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 4 e 5, respectivamente, para as câmaras de ionização cilíndrica e de placas paralelas.

Pode-se observar comportamentos lineares no caso das duas câmaras em função das doses de irradiação. A dependência energética pode ser também constatada. Por exemplo, embora as duas câmaras tenham apresentado curvas muito semelhantes, na Figura 5, referente à câmara de placas paralelas, pode-se notar uma diferença na resposta entre as tensões utilizadas. Este fato ocorre mais sutilmente na Figura 4, referente à câmara cilíndrica, ou seja, só a partir de 250 cGy (que é uma dose absorvida maior que a normalmente utilizada nos procedimentos de dosimetria em radioterapia) passa a existir uma diferença mais acentuada entre as curvas. Estes resultados mostram a necessidade de se conhecer muito bem as características das câmaras a serem utilizadas nos procedimentos de dosimetria dos feixes terapêuticos.

5. Dependência energética das câmaras de ionização

O estudo da dependência energética das câmaras de ionização mostra o quão sensíveis são os instrumentos utilizados, em relação à energia efetiva da radiação incidente. As câmaras foram expostas aos feixes de raios X, variando-se a tensão entre 80 e 250 kV.

As curvas de dependência energética apresentaram a adequação da formação de um sistema Tandem, em que a câmara de placas paralelas apresenta uma dependência energética acentuada de 40,2%, enquanto a câmara cilíndrica de apenas 8,8%, para o caso de irradiação das câmaras com 200 cGy.

6. Curvas Tandem

A razão entre as medidas realizadas com as duas câmaras para cada qualidade da ra-

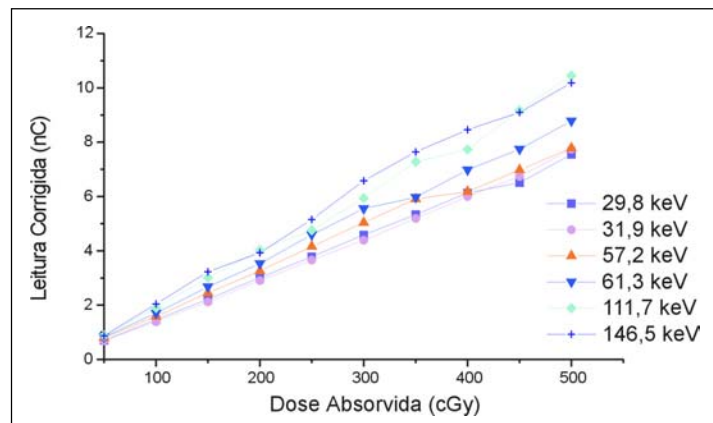


Figura 4. Linearidade de resposta da câmara de ionização cilíndrica, série 1154, em função da dose absorvida de diferentes qualidades de radiação X.

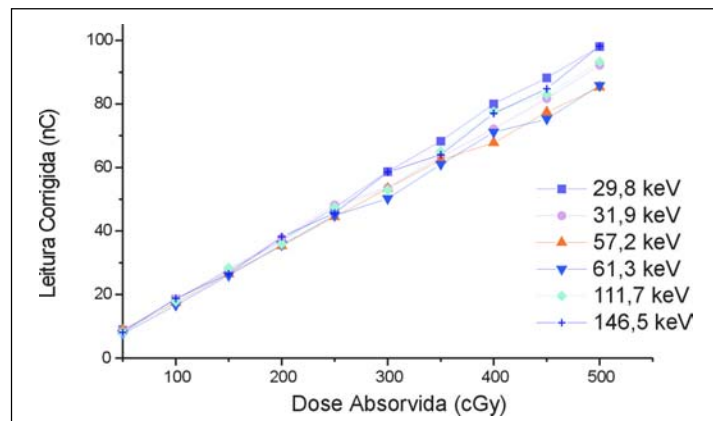


Figura 5. Linearidade de resposta da câmara de ionização de placas paralelas, série 1197, em função da dose absorvida de diferentes qualidades de radiação X.

dição X resulta nas curvas Tandem. Na Figura 6 são apresentadas as curvas Tandem obtidas para 100 e 200 cGy, na faixa de energia de 31,9 a 146,5 keV.

Pode-se observar a inclinação das curvas, adequada para os sistemas Tandem. As medidas realizadas para a energia de 29,8 keV (60 kV) não apresentaram a confiabilidade necessária para a sua apresentação, devido à instabilidade proporcionada pela rede elétrica.

7. Estabilidade do sistema Tandem

Foram realizadas diversas medidas para a obtenção das razões entre as respostas das duas câmaras durante o ano de 2000, espaçadas de um a dois meses, para se verificar a estabilidade do sistema, apenas para a faixa de energia mais utilizada nos procedimentos terapêuticos, de 31,9 a 111,7 keV (80 a 200 kV).

As Tabelas 5 e 6 apresentam o estudo da estabilidade do sistema Tandem para as doses de 100 e 200 cGy, respectivamente, para a faixa de energia citada. Verifica-se, nessas Tabelas, que os valores máximos de desvios padrões percentuais não ultrapassam 5%. Estes valores variaram de 0,2% a 2,7% para as medidas de 100 cGy, e de 0,1% a 3,1% para as medidas de 200 cGy.

A reprodutibilidade das razões entre as medidas das duas câmaras ao longo do tempo constitui o teste de estabilidade do sistema Tandem. Na Tabela 7 estão apresentados os coeficientes de variação da série de valores Lc/Lp das cinco medidas realizadas para cada energia, das Tabelas 5 e 6, para as doses absorvidas de 100 e 200 cGy.

Observa-se que o coeficiente de variação na resposta do sistema Tandem apresentou-se no máximo de 5,5%. Pode-se considerar esses resultados satisfatórios, levando-se em conta, principalmente, que todas as medidas foram realizadas em épocas diferentes, em equipamento de raios X de uso rotineiro e contínuo para pacientes, utilizando dosímetros clínicos de uso muito frequente e ainda com razoável dificuldade de posicionamento reprodutível dessas câmaras de ionização nos feixes de radiação.

Dessa forma, pode-se concluir que o sistema Tandem proposto apresenta possibilidade de uso nos procedimentos periódicos de dosimetria de feixes terapêuticos, em programas de controle de qualidade.

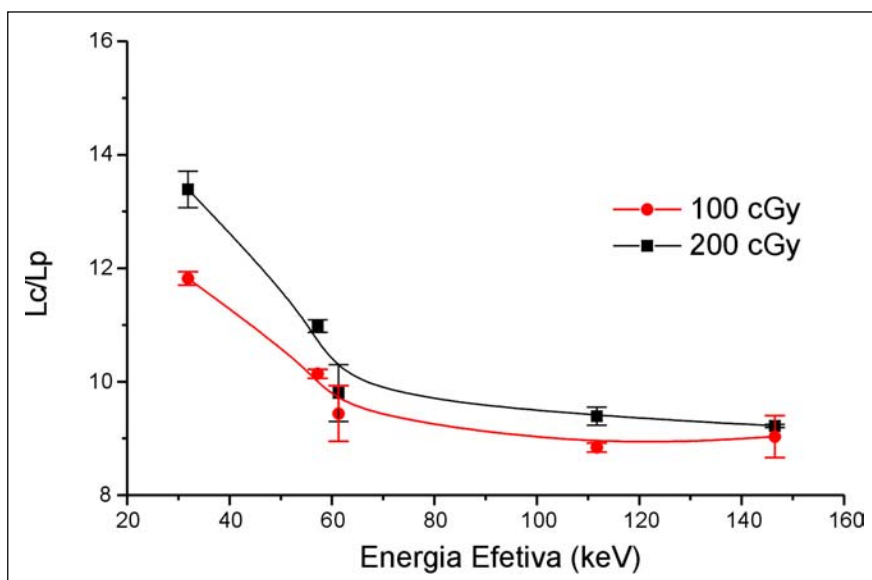


Figura 6. Curvas Tandem: relação (Lc/Lp) entre as respostas das câmaras cilíndrica (1154) e de placas paralelas (1197) em função da energia da radiação X, para 100 e 200 cGy.

Tabela 5 Estabilidade do sistema Tandem. Dados obtidos de irradiações das câmaras de ionização com 100 cGy.

Nº da medida	Energia efetiva (keV)							
	31,9		57,2		61,3		111,7	
	Lc/Lp	Δ(%)	Lc/Lp	Δ(%)	Lc/Lp	Δ(%)	Lc/Lp	Δ(%)
1ª	13,39	1,5	10,98	2,2	9,80	2,7*	9,39	0,9
2ª	11,82	1,0	10,14	0,4	9,44	2,7	8,84	0,4
3ª	*	*	11,06	2,2	9,87	0,6	9,19	0,9
4ª	12,84	1,8	11,12	0,7	10,02	2,0	9,69	0,2
5ª	12,26	0,2	11,07	0,1	9,57	0,2	8,78	0,4

Lc/Lp, razão entre as medidas das câmaras cilíndrica e de placas paralelas; Δ, incerteza associada à razão Lc/Lp, obtida por propagação de erros.

*Medidas não realizadas por problemas técnicos.

Tabela 6 Estabilidade do sistema Tandem. Dados obtidos de irradiações das câmaras de ionização com 200 cGy.

Nº da medida	Energia efetiva (keV)							
	31,9		57,2		61,3		111,7	
	Lc/Lp	Δ(%)	Lc/Lp	Δ(%)	Lc/Lp	Δ(%)	Lc/Lp	Δ(%)
1ª	13,06	3,1	10,81	2,8	*	*	8,93	1,7
2ª	12,44	0,1	10,43	1,3	9,73	1,0	8,70	1,5
3ª	12,46	3,0	11,55	2,8	8,79	2,7	9,36	0,9
4ª	13,64	3,1	11,45	0,7	10,01	0,2	9,65	1,7
5ª	12,41	0,3	10,47	0,8	9,70	0,4	9,11	0,6

Lc/Lp, razão entre as medidas das câmaras cilíndrica e de placas paralelas; Δ, incerteza associada à razão Lc/Lp, obtida por propagação de erros.

*Medidas não realizadas por problemas técnicos.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostram que a utilização do sistema Tandem proposto neste trabalho, para energias intermediárias, permite a verificação rotineira das

condições do feixe de radiação X de forma simples e rápida, não necessitando da utilização de absorvedores.

Pode-se obter um sistema Tandem utilizando-se qualquer combinação possível de uma câmara de ionização cilíndrica e

Tabela 7 Estabilidade do sistema Tandem. Coeficientes de variação da série de valores Lc/Lp das medidas realizadas.

Energia efetiva (keV)	Coeficiente de variação (%)	
	100 cGy	200 cGy
31,9	5,4	4,2
57,2	3,8	4,8
61,3	2,4	5,5
111,7	4,1	4,0

uma de placas paralelas, ambas comerciais. Deve-se levar em conta que uma delas deve ter dependência energética acentuada na faixa de energia a que vai ser exposta, e que o sistema seja composto por, pelo menos, uma câmara recomendada e calibrada para a faixa de energia em questão, para a determinação das taxas de dose ou de dose absorvida. A utilização desse sistema implica diminuição do tempo necessário para os procedimentos de dosimetria do feixe.

O sistema proposto apresentou bons resultados em feixes de ortovoltagem, mostrando sua viabilidade de utilização.

Neste trabalho a questão principal era a reprodutibilidade das medidas, isto é, obter boa estabilidade de resposta do sistema Tandem, o que foi conseguido. Portanto, não há a necessidade de confecção de gráficos, cuja finalidade é apenas visibilizar o comportamento dos dados, pois os valores a serem comparados são das razões entre as próprias medidas, corrigidas para as condições ambientais de referência.

O usuário deverá obter os dados para o sistema Tandem com o seu próprio sistema de câmaras e equipamento de raios X, testando-o várias vezes e comparando-o com os resultados de medidas convencionais, antes de implantá-lo no serviço.

Embora seja um método extremamente fácil, recomenda-se que a determinação das camadas semi-redutoras pelo método convencional seja realizada anualmente, usando o sistema Tandem para as verificações de rotina, com o intuito de agilizar o tempo de aquisição dos dados.

Agradecimentos

As autoras agradecem à Direção do HC-FMUSP e à equipe do seu Serviço de Radioterapia, pela autorização de utilização dos equipamentos, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro parcial.

REFERÊNCIAS

- Williams JR, Thwaites DI. Radiotherapy physics in practice. 2nd ed. Oxford: Oxford Univ Press, 2000.
- Andreo P. Dose determination with plane-parallel ionization chambers in therapeutic electron and photon beams. *SSDL-Newsletter* 1999;40:4-16.
- Andreo P, Burns D, Hohlfield K, et al. An international code of practice for radiotherapy dosimetry based on standards of absorbed dose to water. *Proceedings of World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering*. Chicago (CD-ROM), 2000.
- International Atomic Energy Agency. Absorbed dose determination in photon and electron beams. *Technical Reports Series no. 277*. Vienna: IAEA, 1987.
- International Atomic Energy Agency. Radiation dose in radiotherapy from prescription to delivery. *TECDOC 734*. Vienna: IAEA, 1994.
- International Atomic Energy Agency. Review of data and methods recommended in the international code of practice. *IAEA Technical Reports Series No. 277 – Absorbed dose determination in photon and electron beams*. TECDOC 897. Vienna: IAEA, 1996.
- International Atomic Energy Agency. The use of plane parallel ionization chambers in high energy electron and photon beams. *Technical Reports Series no. 381*. Vienna: IAEA, 1997.
- Ma C. AAPM TG-61 report on kilovoltage X-ray dosimetry: I. Formalisms and applications. *Proceedings of World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering*. Chicago (CD-ROM), 2000.
- Massey JR. Manual de dosimetria en radioterapia. Organismo Internacional de Energía Atómica. *Technical Reports Series no. 110*. Vienna: IAEA, 1971.
- Peixoto JGP, Andreo P. Comparison of dosimetry protocols for radiotherapy kV X-rays. *Proceedings of World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering*. Chicago (CD-ROM), 2000.
- Peixoto JGP, Andreo P. Determination of absorbed dose to water in reference conditions for radiotherapy kilovoltage X-rays between 10 and 300 kV: a comparison of the data in the IAEA, IPEMB, DIN and NSC dosimetry protocols. *Phys Med Biol* 2000;45:563-75.
- Podgorsak EB, Gosselin M, Evans MDC. Su-

- perficial and orthovoltage X-ray beam dosimetry. *Med Phys* 1998;25:1206-11.
- Rosser K. Measurements of absorbed dose to water for medium energy X-rays. *SSDL-Newsletter* 1999;41:4-11.
- Seuntjens J. AAPM TG-61 report on kilovoltage X-ray dosimetry: II. Calibration procedures and correction factors. *Proceedings of World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering*. Chicago (CD-ROM), 2000.
- Albuquerque MPP. Projeto, construção e calibração de câmaras de ionização de placas paralelas para radiação X. [Dissertação de mestrado]. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares/Universidade de São Paulo, 1989.
- Albuquerque MPP, Caldas LVE. New ionization chambers for beta and X-radiation. *Nucl Instrum Meth Phys Res* 1989;A280:310-3.
- Caldas LVE. A sequential Tandem system of ionization chambers for effective energy determination of X radiations fields. *Radiat Prot Dosim* 1991;36:47-50.
- Galhardo EP. Caracterização de sistemas Tandem de câmaras de ionização comerciais para dosimetria de feixes de raios X (nível radioterapia). [Dissertação de mestrado]. São Paulo: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares/Universidade de São Paulo, 1998.
- Galhardo EP, Caldas LVE. Metodologia para dosimetria de campos de radiação X – nível radioterapia – utilizando sistemas Tandem de câmaras de ionização comerciais. *Radiol Bras* 2000;33:227-31.
- Alfonso-Laguardia R, Aguirre F, Brunetto M, Gutt F, Andreo P. A regional quality assurance programme for the physical aspects of radiotherapy. *Proceedings of World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering*. Chicago (CD-ROM), 2000.
- Hendee WR. The rate of evolution of radiation therapy planning and delivery systems in exceeding the evolution rate of quality assurance processes. *Med Phys* 1999;26:1439-42.
- International Atomic Energy Agency. Calibration of dose meters used in radiotherapy. *Technical Reports Series no. 185*. Vienna: IAEA, 1979.
- International Atomic Energy Agency. Calibration of dose meters used in radiotherapy. *Technical Reports Series no. 374*. Vienna: IAEA, 1994.
- International Atomic Energy Agency. Quality assurance in radiotherapy. *TECDOC 989*. Vienna: IAEA, 1997.
- International Atomic Energy Agency. Design and implementation of a radiotherapy programme: clinical, medical physics, radiation protection and safety aspects. *TECDOC 1040*. Vienna: IAEA, 1998.
- International Eletrotechnical Commission – IEC Standard. Medical electrical equipment dosimeters with ionization chambers as used in radiotherapy. 1982 (731© CEI 1982).
- Johns HE, Cunningham JR. The physics of radiology. 4th ed. Springfield, Illinois: Charles C. Thomas Publ., 1983.