

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
SECRETARIA DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE CAMPOS DE
RAIOS X DE ENERGIA BAIXA**

Vanusa Maria Feliciano Jacomino

**Dissertação apresentada ao Instituto de
Pesquisas Energéticas e Nucleares como
parte dos requisitos para a obtenção do
grau de "Mestre - Área de Concentração
em Tecnologia Nuclear".**

Orientador: Dr. Achilles Alfonso Suarez

**São Paulo
1982**

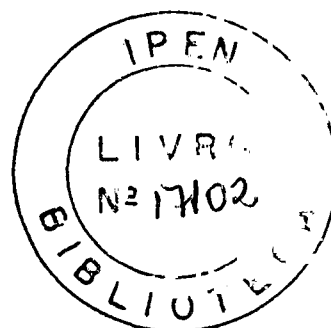
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
SECRETARIA DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE CAMPOS DE
RAIOS X DE ENERGIA BAIXA

Vanusa Maria Feliciano Jacomino

Dissertação apresentada ao Instituto de
Pesquisas Energéticas e Nucleares como
parte dos requisitos para a obtenção do
grau de "Mestre na Área de Concentração
em Tecnologia Nuclear".

Orientador: Dr. Achilles Alfonso Suarez



SÃO PAULO
1982

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
I. P. E. N.

*Aos meus pais
e ao Luiz*

AGRADECIMENTOS

AGRADEÇO

- À Superintendência do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) pela oportunidade oferecida.

- Ao Dr. Achilles Alfonso Suarez, orientador deste trabalho, pelas discussões, sugestões e amizade durante a sua realização.

- Ao Dr. Gian-Maria A.A. Sordi, pelo seu apoio e incentivo.

- Ao Dr. Ilkka K. Uotilla (*In Memorium*) pela ajuda na montagem do sistema de calibração e pelo grande apoio fornecido na fase inicial deste trabalho.

- À Dra. Linda V.E. Caldas pelas sugestões oferecidas durante o transcorrer do trabalho e pela leitura e discussão do manuscrito.

- Ao PRONUCLEAR pela ajuda financeira, sem a qual a pesquisa não teria sido realizada.

- Aos Srs. Marcos Xavier e Laerte Facunte pela confecção das figuras.

- À Srta. Dirce Umisedo pelo serviço de datilografia.

- Aos colegas e amigos pelo estímulo e apoio durante o desenvolvimento do trabalho.

RESUMO

Determinação das características de campos de raios X de energia baixa

Um arranjo experimental foi desenvolvido para a calibração de dosímetros a nível de terapia, em campos de raios X de energia baixa (< 50 keV).

Após o posicionamento e o alinhamento deste sistema de calibração, foram determinados os parâmetros principais que caracterizam um feixe de radiação X, tais como: diferença de potencial, camada semi-redutora, energia eqüivalente, coeficiente de homogeneidade e taxa de exposição para diversas condições de operação da máquina de raios X, usando-se uma câmara de ionização do tipo superficial (padrão secundário).

Foi também desenvolvida uma técnica especial de correção, levando-se em conta a dificuldade na obtenção da camada semi-redutora em campos de raios X de energia baixa, com dosímetros que apresentam uma resposta dependente da energia do feixe.

Uma vez estabelecidas as características do campo de radiação, realizou-se a calibração de uma câmara de ionização do tipo superficial (padrão terciário), a ser utilizada posteriormente em medidas de rotina.

ABSTRACT

Determination of the characteristics of low energy X-ray fields.

An experimental set-up for therapy level calibration dosimeters in low energy X-ray fields (< 50 keV) has been developed.

After positioning and alignment of this calibration system, the main parameters characterizing an X-ray beam have been determined, such as: potential difference, half-value layer, equivalent energy, homogeneity coefficient and exposure rate for several operational conditions of the X-ray machine, using a superficial ionization chamber (secondary standard).

A special correction technique, taking into account the difficulty in obtaining the half-value layer in low energy X-ray fields, has been developed with dosimeters presenting a beam energy dependent response.

Once the radiation field characteristics has been established, a superficial ionization chamber (tertiary standard), to be used in routine measurements, was calibrated.

ÍNDICE

	Página
1. Introdução	01
2. Fundamentos Teóricos	
2.1. - Produção e propriedades da radiação....	05
2.2. - Espectro da radiação X	05
2.3. - Interação da radiação X com a matéria...	09
2.4. - Medida da radiação X	10
2.5. - Especificação e medida da qualidade de um feixe de raios X	16
2.6. - Medida da camada semi-redutora	18
2.7. - Distribuição radial da taxa de exposição de um feixe de radiação	20
3. Materiais e Métodos Utilizados	
3.1. - Sistema experimental para a calibração de dosímetros	22
3.2. - Medida da uniformidade do feixe de radia ção	33
3.3. - Método utilizado para a determinação da camada semi-redutora	37
3.4. - Determinação da filtração total	38
3.5. - Medida de espectros do sistema de radia ção X	40

	Página
3.5.1. - Arranjo experimental	40
3.5.2. - Características do detector de NaI(Tl) e do equipamento eletrônico associado a ele	42
3.5.3. - Calibração do sistema espectral	42
3.6. - Calibração de uma câmara de ionização ..	44
4. Resultados e discussões	
4.1. - Uniformidade do feixe de radiação	52
4.2. - Camada semi-redutora	56
4.3. - Método de correção para obtenção da camada semi-redutora	58
4.4. - Distribuição espectral do feixe de radiação	69
4.5. - Taxa de exposição	75
4.6. - Testes efetuados antes da calibração da câmara de ionização 2532/3 (padrão terciário)	75
4.6.1. - Resultados dos testes efetuados com a câmara de ionização tipo padrão secundário	75
4.6.2. - Resultado dos testes efetuados com a câmara de ionização tipo 2532/3 (padrão terciário).....	77
4.6.3. - Fatores de calibração	79

	Página
5. Conclusão geral	82
Apêndice A	84
Apêndice B	87
Bibliografia	90

1. INTRODUÇÃO

Após a descoberta dos raios X por Wilhelm C. Roentgen em 1895, surgiu uma série de aplicações das radiações, e entre elas a sua utilização na Medicina para auxiliar os médicos em terapia e em diagnóstico. Desde então, grandes progressos têm ocorrido neste campo, existindo atualmente três especialidades em que a radiação é utilizada como ferramenta de auxílio na preservação da saúde do homem: a Radioterapia, Radiodiagnóstico e a Medicina Nuclear.

Principalmente em Radioterapia, onde a radiação é utilizada para a cura do câncer, é necessário conhecer-se com precisão a quantidade de energia absorvida por unidade de massa de tecido irradiado, ou seja, a dose absorvida.

Uma variação de apenas $\pm 5\%$ ⁽⁷⁾ na dose absorvida poderá provocar mudanças consideráveis no efeito das radiações no tumor, podendo ocorrer uma rápida diminuição na probabilidade de cura à medida que este valor se afasta de um valor recomendado⁽⁸⁾. Logo, é necessário uma quantificação tão exata quanto possível desta grandeza, sendo o ramo da Ciência relativo a este estudo denominado de Dosimetria.

Vários efeitos podem ser utilizados para a dosimetria das radiações ionizantes, entre eles pode-se citar: a termoluminescência, a formação de imagens latentes em chapas fotográficas, a ionização e as reações químicas. Porém, entre eles, o efeito físico "ionização do ar" é o mais bem estudado

do, e é a partir deste efeito que se pode definir uma das grandezas físicas mais importantes em dosimetria, a exposição. Esta grandeza descreve justamente a habilidade que um feixe de raios X ou gama tem para ionizar o ar. Uma vez conhecida a exposição, pode-se determinar a dose absorvida em um meio de interesse com o auxílio da relação⁽¹⁶⁾.

$$D = X \cdot f_{\lambda} \quad , \text{ onde:}$$

D: é a dose absorvida

X: é a exposição

f_{λ} : é o fator de conversão da exposição em dose absorvida, cujo valor depende da energia da radiação e do tipo de material que está sendo irradiado.

As medidas de rotina, realizadas em Centros de Radioterapia para a determinação da exposição e conseqüentemente da dose de radiação a ser recebida pelos pacientes, são usualmente feitas com câmaras de ionização do tipo padrão terciário (comumente denominadas instrumentos de campo). Estes dosímetros devem ter sua resposta previamente calibrada em função de uma câmara de ionização do tipo padrão secundário. A resposta deste, por sua vez, deve ser calibrada em função de um instrumento capaz de determinar a unidade de exposição conforme a sua definição física, ou seja, em função de um dosímetro do tipo padrão primário (geralmente câmaras de ar livre). A calibração destes dosímetros, tanto o padrão secundário como o terciário, deve ser feita para diversos valores de energia equívalente de um feixe de radiação liberado por uma máquina de raios X, e quando necessário para a energia do ^{60}Co .

No entanto, antes de um equipamento de raios X ser utilizado para a calibração de instrumentos de campo, é nece

cessário que seja feito um estudo das características⁽¹¹⁾ do feixe de radiação emitido por esta máquina. Este estudo deve abranger não só a determinação da taxa de exposição a uma dada distância, mas também de parâmetros que especifiquem a natureza deste feixe de raios X, isto é, a qualidade da radiação. Esta última informação é necessária para uma melhor estimativa do poder de penetração do feixe em algum material de interesse.

Na prática, a qualidade de um feixe de radiação é caracterizada⁽²⁵⁾ pela diferença de potencial aplicada entre os eletrodos do tubo de raios X, pela filtração adicional e pela camada semi-redutora. Porém, alguns laboratórios especificam outras grandezas, tais como: o coeficiente de homogeneidade, a energia eqüivalente do feixe de radiação e quando necessário a distribuição espectral dos fótons do feixe de raios X.

Entretanto, erros consideráveis⁽¹⁷⁾ podem ser introduzidos na determinação da camada semi-redutora com dosímetros cuja resposta dependa acentuadamente da energia do feixe de radiação. Neste caso, é necessário a aplicação de correções às leituras observadas com a câmara de ionização, levando em conta a dependência de seu fator de calibração^(*) com a energia eqüivalente do feixe. Esta dependência é função da espessura da janela de entrada de uma câmara de ionização, e é tanto mais pronunciada quanto menor a energia do feixe⁽¹⁴⁾.

No presente trabalho desenvolveu-se uma técnica especial de correção, considerando-se a variação do coeficien-

(*) Fator de calibração: é o fator pelo qual o valor indicado em um dosímetro, corrigido para as condições ambientais, deve ser multiplicado de forma a se obter a exposição em C/kg.

te de atenuação linear do feixe, à medida que absorvedores de alumínio de espessuras diferentes são interpostos na trajetória de um feixe de raios X de energia baixa ($< 50 \text{ keV}$). Uma vez aplicadas as correções apropriadas, os valores de camada semi-redutora encontrados apresentaram uma variação de até 5% em relação aos não corrigidos.

A primeira etapa do trabalho constituiu-se na instalação de um arranjo experimental para a calibração de instrumentos de campo a nível de terapia com feixes de raios X de energia baixa. O arranjo é composto por obturador, diafragma, filtros e suportes que permitem uma alta reprodutibilidade no posicionamento e alinhamento do feixe. A seguir foi feito um estudo das características do feixe de radiação.

Uma vez estabelecidas as características do feixe, mediu-se a taxa de exposição para diversos valores de tensão e corrente do tubo de raios X, usando-se uma câmara de ionização superficial do tipo padrão secundário.

Como aplicação dos resultados encontrados no presente trabalho foi realizada a calibração de uma câmara de ionização do tipo padrão terciário, que será posteriormente utilizada nas medidas de rotina no Laboratório de Padronização do IPEN.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. Produção e propriedades da radiação X

A radiação X é produzida quando elétrons acelerados são freados por um material, geralmente de número atômico alto (por exemplo, tungstênio). Basicamente, um tubo de raios X consiste de um tubo de vidro, em cujo interior existem dois eletrodos: o catodo (-) e o anodo (+), ou seja, filamento e alvo. Fazendo-se passar uma corrente I pelo filamento, este é aquecido e, por efeito termoiônico obtêm-se elétrons livres que são acelerados em direção ao alvo.

A energia (E) adquirida por esses elétrons é dada pelo produto da sua carga (e) e a diferença de potencial (ΔV) aplicada entre os eletrodos.

Os elétrons, ao incidirem sobre o alvo, interagem com os átomos existentes neste último, podendo transferir-lhes até toda a sua energia cinética. Como resultado dessas interações é originada a radiação X.

2.2. Espectro da radiação X

O espectro da radiação X é formado por duas partes distintas, resultantes de diferentes mecanismos de interação dos elétrons emitidos pelo filamento com os átomos do

material do alvo. Estes elétrons ao penetrarem no alvo podem perder energia basicamente por dois processos diferentes: colisão e radiação.

A perda de energia por colisão envolve a interação entre o campo Coulombiano do elétron incidente e o campo Coulombiano dos átomos contidos no alvo. Como resultado deste tipo de interação, um ou mais dos elétrons atômicos podem ser transferidos para uma das órbitas superiores de energia, ou serem ejetados do átomo (processo conhecido como ionização).

Elétrons ao retornarem às órbitas mais internas, para preencherem as vagas deixadas anteriormente, cedem energia sob a forma de raios X característicos. Esta radiação é que forma o chamado espectro de linhas.

A outra componente do espectro é resultante da perda de energia dos elétrons por radiação. Neste processo, o elétron ao passar pelas proximidades do núcleo é desacelerado, e a diminuição em sua energia cinética aparece sob a forma de radiação eletromagnética ("Bremsstrahlung").

Neste mecanismo de desaceleração, o elétron pode perder energia desde um valor extremamente baixo até toda a sua energia cinética. Conseqüentemente, os fótons produzidos também irão possuir qualquer valor de energia, desde zero até um valor máximo. Tem-se então, um espectro contínuo de raios X e superposto a ele, o espectro de raios X característicos.

Em 1923, Kramers⁽¹⁵⁾ mostrou que o espectro teórico resultante do bombardeamento, por elétrons, do alvo de

um tubo de raios X do tipo potencial constante^(*), é descrito pela seguinte equação diferencial:

$$N(E)dE = IZ (E_0 - E) dE, \text{ onde}$$

- $N(E)$: é o número de fótons por unidade de intervalo de energia entre E e $E + dE$.
- Z : é o número atômico do material do alvo.
- I : é a corrente do tubo.
- E_0 : é a energia máxima dos fótons, correspondente à diferença de potencial aplicada entre os eletrodos do tubo.

A distribuição de $N(E)dE$ diminui linearmente desde um valor máximo, quando $E = 0$, até zero quando $E = E_0$, como pode ser visto na curva A da figura 2.1.

Na prática, a filtração inerente do alvo e a própria janela do tubo absorvem parte dos fótons de energia baixa. Este tipo de espectro não é útil para fins terapêuticos, uma vez que ele apresenta uma distribuição apreciável em energia dos fótons (curva B da figura 2.1). Adicionando-se filtros na trajetória do feixe de radiação, estes reduzem significativamente a largura do espectro (curva C da figura 2.1) por absorverem preferencialmente os fótons de

(*) Segundo a ORGANIZATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION (ISO)⁽²⁰⁾, geradores de raios X do tipo potencial constante são aqueles que possuem uma flutuação periódica ("ripple") igual ou menor do que 10%, para todas as correntes do tubo.

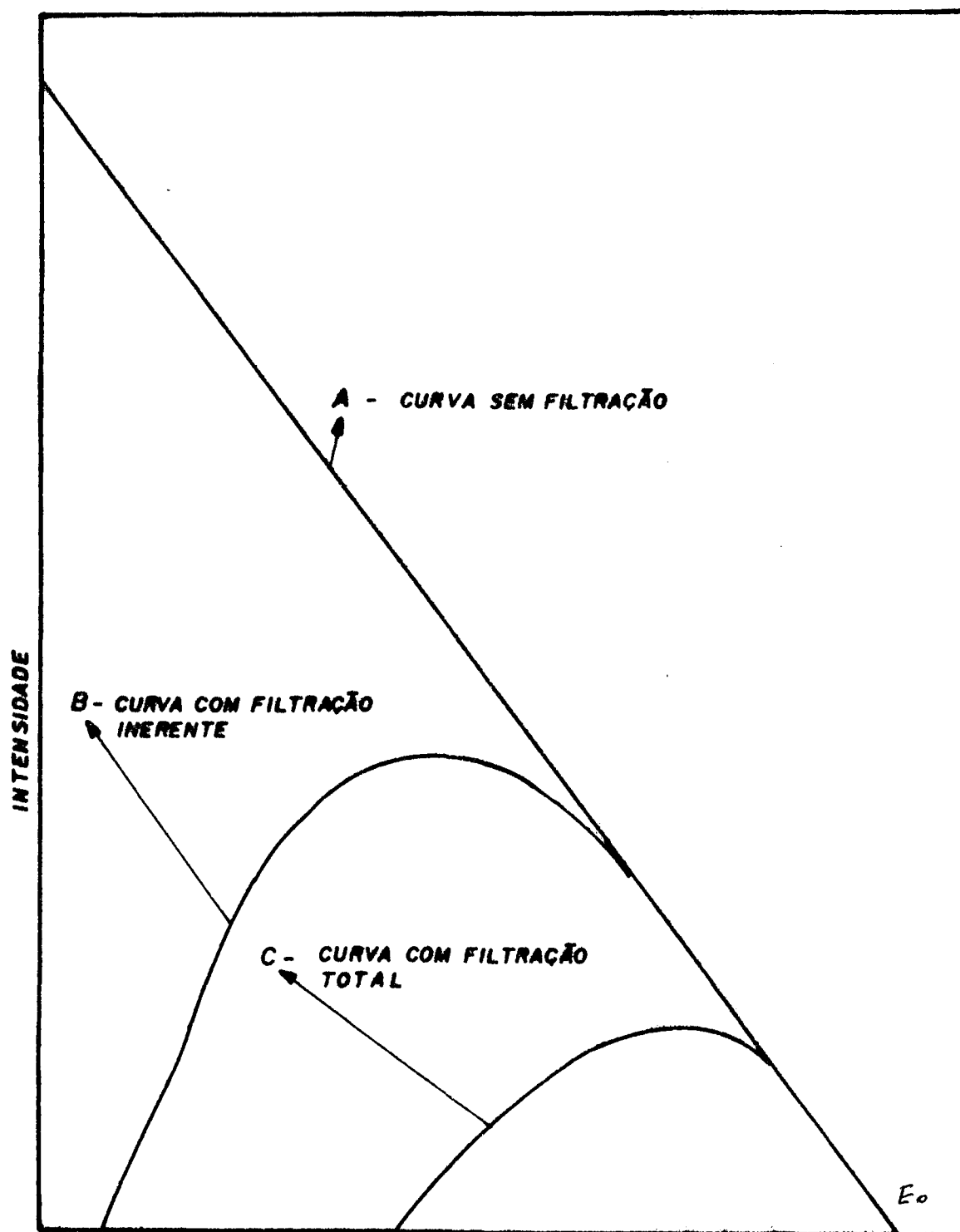


FIG. 2.1 - ESPECTROS CONTÍNUOS TÍPICOS DE
TUBO DE RAIOS X

ENERGIA

energia mais baixa. Como consequência, obtêm-se um espectro estreito, mais útil para aplicações terapêuticas.

O espectro dos fótons produzidos por uma máquina de raios X depende⁽²¹⁾ do tipo de tubo utilizado, do material do alvo, da filtração inerente e adicional e da diferença de potencial aplicada entre os eletrodos do tubo, fatores estes que podem modificar a forma do espectro do feixe primário.

2.3. Interação da radiação X com a matéria

Os raios X, ao passarem pela matéria, sofrem uma redução em sua intensidade. Parte de sua energia é absorvida pelo material e parte é espalhada. Para feixes monoenergéticos, em condições de boa geometria⁽²⁷⁾, a intensidade (I) do feixe de radiação, após passar por uma espessura (x) de absorvedor, é dada pela relação:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

sendo,

I_0 : a intensidade do feixe incidente

μ : o coeficiente de atenuação linear, cujo valor depende da energia dos fótons incidentes e do número atômico do material absorvedor.

Os principais mecanismos de interação⁽⁹⁾ dos raios X com a matéria são: efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares. O coeficiente de atenuação linear (μ) é dado pela soma dos coeficientes de atenuação devido ao efeito fotoelétrico (τ), ao espalhamento Compton (σ)

e a produção de pares (π).

$$\mu = \tau + \sigma + \pi$$

No caso de radiações eletromagnéticas com energia menor do que 0,5 MeV e em elementos de número atômico alto, o mecanismo principal de interação dos raios X com a matéria, é o efeito fotoelétrico. Para feixes de energia intermediária (0,5 a 10 MeV), independente do número atômico do absorvedor, o processo predominante é o espalhamento Compton. Para o caso de feixes de radiações de energia alta (> 10 MeV) e em elementos de número atômico alto, o processo de produção de pares ocorre com maior probabilidade.

2.4. Medida da radiação X

A exposição⁽¹²⁾ (X) é definida como sendo o quociente de dQ por dm, onde dQ é o valor absoluto da carga total dos íons de mesmo sinal produzidos no ar, quando todos os elétrons (négatronos ou pósitronos), liberados pelos fótons em um pequeno volume cuja massa é dm, são completamente freados no ar.

$$X = \frac{dQ}{dm}$$

Unidade no Sistema Internacional: C/kg

Unidade Especial: Roentgen (R)

$$1R = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

Esta definição exige que todos os íons formados

ao longo da trajetória dos elétrons secundários, liberados por um feixe de fótons, em um pequeno volume de ar, ao redor de um certo ponto de interesse, sejam coletados e a carga total medida. No entanto, os elétrons secundários, produzidos pela radiação primária, podem perder energia por ionização no ar, fora do volume em que foram gerados. É necessário então, que se trabalhe em condições tais que permitam uma compensação entre o número de íons produzidos fora do volume de medida (por elétrons postos em movimento no interior do mesmo) e o número de íons produzidos no seu interior (por elétrons gerados fora do volume). Todos esses elétrons secundários devem ser provenientes de um mesmo feixe de radiação primária, cuja atenuação no ar seja desprezível. Quando estas condições forem satisfeitas, para cada elétron que deixa o volume de medida, incide sobre ele um outro elétron com as mesmas características. Tem-se então, a chamada condição de equilíbrio eletrônico⁽¹⁾.

Uma medida direta da exposição requer o uso de câmaras de ar livre⁽¹⁴⁾. Estas câmaras além de constituírem um dosímetro do tipo padrão primário, são também do tipo absoluto, já que elas são construídas e usadas posteriormente sem que haja a necessidade de sua calibração em campos de radiação com propriedades bem conhecidas. A medida da exposição com uma câmara de ar livre está diretamente relacionada ao princípio de equilíbrio eletrônico.

A utilização desta câmara está restrita a energias menores que 300 keV, pois acima deste valor suas dimensões para que ocorra equilíbrio eletrônico devem ser excessivamente grandes (por exemplo, a 3 MeV a distância de ar ne

cessária para que haja equilíbrio eletrônico é da ordem de 14 metros). Para contornar este problema, um outro tipo de câmara⁽²⁾ foi desenvolvido, para poder servir como padrão primário em medidas de exposição de feixes de fótons de energia alta. É o caso da câmara de ionização do tipo cavitária, cujo princípio de funcionamento baseia-se na teoria de Bragg-Gray⁽⁴⁾, e que permite medidas de exposição de raios X e gama até 3 MeV.

As câmaras de ionização do tipo padrão primário não são convenientes para as medidas de rotina, sendo geralmente usadas apenas em Laboratórios de Padronização Primária. Para as medidas rotineiras foi desenvolvido um outro tipo de câmara, cuja utilização apresenta fácil manuseio e grande versatilidade; a câmara de ionização tipo dedal⁽³⁾. O seu funcionamento baseia-se não apenas no princípio de equilíbrio eletrônico, mas também na teoria de Bragg-Gray. A combinação destes dois princípios torna possível a determinação da exposição no intervalo entre 40 keV e 3 MeV, usando-se apenas um instrumento de medida.

Este tipo de câmara de ionização não mede diretamente a exposição e, por isso, precisa ser calibrada em relação a um dosímetro do tipo padrão primário e é portanto, denominada padrão secundário. Sua calibração é feita para diversos valores de energia equivalente de um feixe de raios X, pelo método de substituição⁽⁵⁾. Este método, consiste basicamente em irradiar-se primeiramente a câmara de ionização tipo padrão primário e, a seguir, a câmara a ser calibrada, nas mesmas condições anteriores.

A partir deste procedimento, obtém-se um fator

de calibração, isto é, um fator pelo qual a leitura obtida com a câmara de ionização tipo padrão secundário, corrigida para as condições ambientais, deve ser multiplicada para obter-se a exposição em C/kg. A figura 2.2 mostra a variação do fator de calibração com a energia do feixe de radiação, para três câmaras diferentes destinadas à medida da exposição com: a) raios X de energia baixa; b) raios X de energia média e c) raios X de energia alta.

Como pode ser observado na figura 2.2, o valor do fator de calibração depende da energia do feixe de radiação. Logo, é importante utilizar-se uma câmara de ionização conveniente para cada intervalo de energia de interesse, sendo isto particularmente importante ao se trabalhar com raios X de energia baixa (< 50 keV). Neste caso, as seguintes considerações⁽¹⁰⁾ devem ser levadas em conta: 1) O principal mecanismo de interação da radiação X com a matéria é o efeito fotoelétrico, cujo coeficiente de absorção varia rapidamente tanto com a energia do fóton (aproximadamente com $(h\nu)^{-3}$, como com o número atômico do material absorvedor (aproximadamente com Z^5). Como consequência, a maioria dos detectores utilizados apresentam uma resposta bastante dependente da energia do feixe de radiação. 2) Em energias baixas há uma atenuação apreciável do feixe de raios X pelo ar, sendo portanto necessário usar-se distâncias pequenas entre o alvo (foco) do tubo de raios X e o detector. Portanto, neste caso, as taxas de exposição envolvidas serão muito altas, conduzindo a problemas de recombinação dos íons originados no volume sensível das câmaras de ionização.

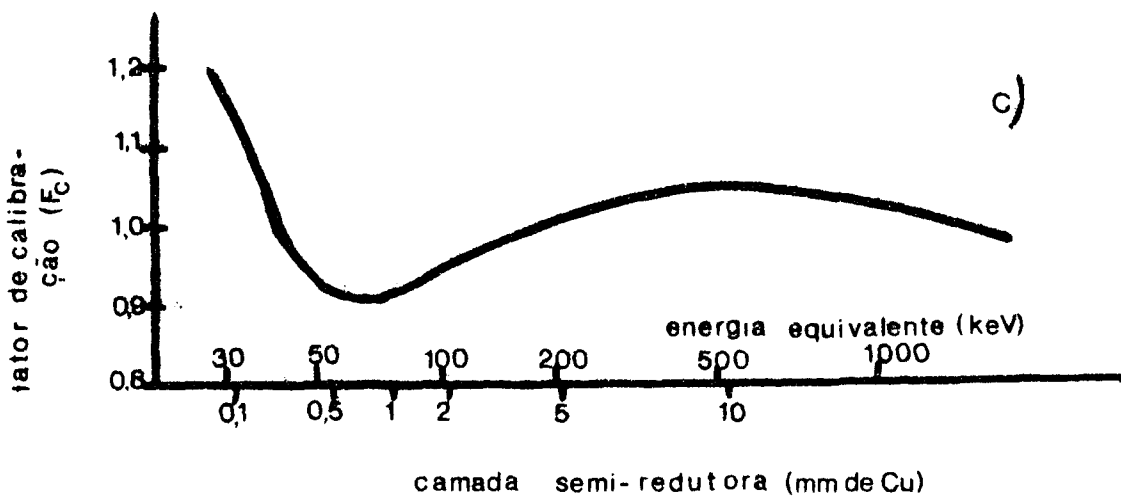
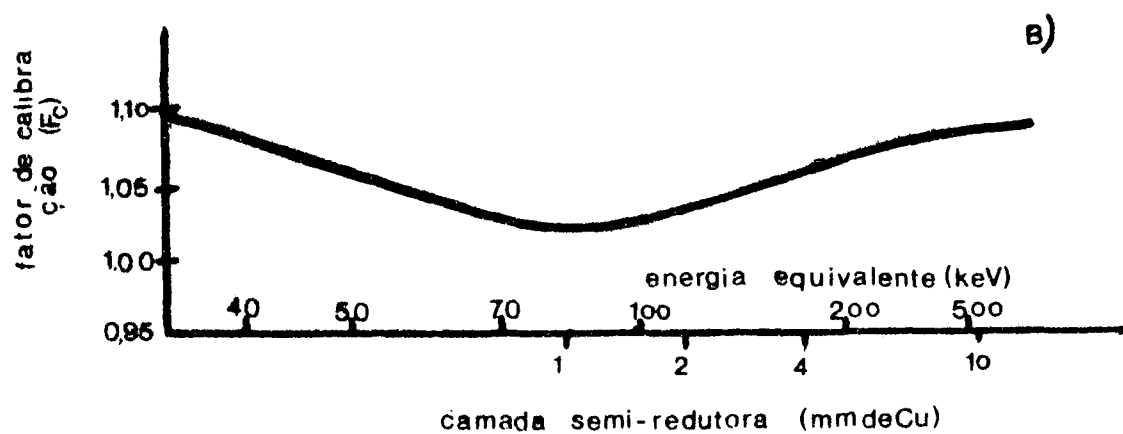
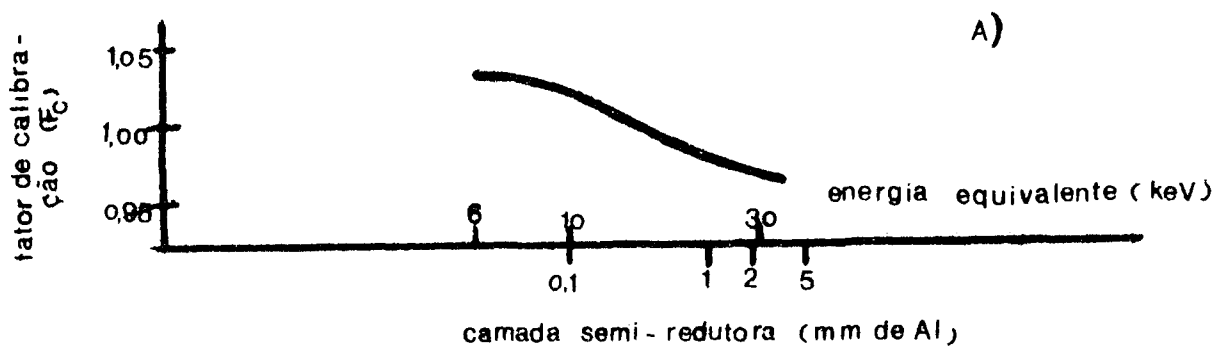


Fig. 2.2. - Variação da resposta de uma câmara de ionização com a qualidade da radiação para câmaras destinadas a uso com:

- a) raios X de energia baixa
- b) raios X de energia média
- c) raios X de energia alta.

Logo, na construção de câmaras de ionização a serem utilizadas em energia baixas, certos cuidados⁽¹¹⁾ deve, ser levados em conta no sentido de se minimizar a absorção da radiação pelas paredes da câmara, além disso, deve-se ter garantia da saturação da corrente de ionização para taxas de exposição altas. Para energias menores que 50 keV é comum utilizar-se câmaras de ionização de placas paralelas do tipo superficial⁽²³⁾, de paredes bem finas.

Geralmente, neste tipo de câmara, as suas próprias paredes constituem os eletrodos, distanciados um do outro de aproximadamente 5 mm⁽²³⁾. Desta forma, a probabilidade dos íons positivos e negativos, formados ao longo das trajetórias dos elétrons secundários, liberados na cavidade de ar existente entre os eletrodos da câmara, sofrerem recombinações antes de atingirem o eletrodo coletor, será muito pequena. Isto garante que todos os íons produzidos dentro do volume sensível da câmara serão coletados, isto é, tem-se a saturação da corrente de ionização, mesmo em taxas de exposição altas.

2.5. Especificação e medida da qualidade de um feixe de raios X

Uma especificação completa⁽¹¹⁾ de um feixe de raios X, em um certo ponto de interesse, deve incluir não apenas uma indicação das grandezas físicas associadas a este feixe, tal como a taxa de exposição, mas também informações sobre a natureza da radiação presente no feixe (normalmente referida como a qualidade do feixe). Tal informação é necessária para um melhor conhecimento do poder de penetração do feixe em um determinado meio de interesse.

A qualidade de um feixe de raios X é comumente caracterizada pelos seguintes parâmetros: diferença de potencial aplicada entre os eletrodos do tubo de raios X, camada semi-redutora, coeficiente de homogeneidade e energia equivalente.

Estas especificações são suficientes para muitas aplicações. Entretanto, em alguns casos⁽²⁵⁾, a distribuição espectral dos fótons do feixe de raios X também deve ser conhecida. Por exemplo, quando a qualidade do feixe de radiação utilizada para a calibração de um instrumento de campo em relação a um dosímetro do tipo padrão secundário for diferente da usada para a calibração deste último no Laboratório de Padronização Primária. Neste caso, o conhecimento de ambos os espectros de energia pode servir como um auxílio na estimativa da incerteza introduzida durante a calibração do instrumento de campo, devido ao uso de feixes de raios X de qualidades diferentes.

Apesar do espectro de energia fornecer informações bastante completas sobre a qualidade de um feixe de raios X e sobre o número e a energia dos fótons presentes neste feixe, a sua determinação só é possível mediante a utilização de espectrômetros apropriados para este fim.

Na prática, estas medidas envolvem processos complexos, dificultando a sua realização em forma rotineira. Conseqüentemente, um método indireto de determinação do poder de penetração de um feixe de raios X em alguns materiais foi desenvolvido, e baseia-se na lei da atenuação dos raios X. Este método consta da determinação da camada semi-redutora (CSR). Esta é definida como sendo a espessura de material absorvedor necessária para causar uma redução de 50% na taxa de exposição inicial (sem absorvedor) de um feixe de radiação X.

A descrição da qualidade de um feixe de radiação apenas em termos da camada semi-redutora não é suficiente. Isto porque muitas vezes pode ocorrer de se obter um mesmo valor de camada semi-redutora para diferentes combinações de filtro adicional e diferença de potencial aplicada entre os eletrodos de um tubo de raios X, apesar dos espectros de energia dos feixes de radiação em cada caso, não serem semelhantes. Esta diferença pode ser caracterizada por meio do coeficiente de homogeneidade (h) desses feixes. Ele é definido como sendo a razão entre a primeira e a segunda camada semi-redutora, sendo esta última a espessura adicional de material absorvedor necessária para reduzir a taxa de exposição a 25% de seu valor inicial. Tem-se:

$h = 1$, para feixes monoenergéticos e,

$h < 1$, para feixes heterogêneos.

Conhecendo-se a camada semi-redutora é possível fazer-se uma comparação entre os espectros causados por feixes heterogêneos e homogêneos (monoenergéticos). Para isto é necessário a determinação da energia eqüivalente, que é definida como sendo a energia de um feixe monoenergético que possui a mesma camada semi-redutora de um feixe heterogêneo.

2.6. Medida da camada semi-redutora

A determinação⁽¹⁶⁾ da camada semi-redutora é feita, medindo-se a redução na taxa de exposição provocada por absorvedores de espessuras diferentes, que são interpostos na trajetória do feixe.

Estes absorvedores usados para a medida da camada semi-redutora devem possuir um grau de pureza mínimo de 99,9%⁽⁶⁾. Porém, em energias baixas, verificou-se que o valor da camada semi-redutora obtido com um material puro pode diferir de até 10% em relação ao valor encontrado com um material impuro, se houver, por exemplo, uma impureza de 1% de cobre em um absorvedor de alumínio. Daí a importância de que os absorvedores utilizados para medida da camada semi-redutora de feixes de raios X de energia baixa, possuam um grau de pureza mínimo de 99,99%⁽⁶⁾.

A determinação experimental da camada semi-redutora deve ser feita, usando-se uma câmara de ionização com resposta independente da qualidade do feixe de radiação. Além disso, certas considerações devem ser levadas em conta, de forma a se minimizar ao máximo possível a influência da radiação espalhada pelos absorvedores, já que ela contribui para

um aumento no valor da camada semi-redutora. Para diminuir esta contribuição, as seguintes condições⁽¹⁶⁾ devem ser satisfeitas:

- 1) O tamanho do campo de radiação, na posição de fixação da câmara de ionização, deve ser suficiente apenas para circundar a câmara, permitindo a sua irradiação completa (o diâmetro do feixe não deve exceder de 1 cm ao redor da câmara).
- 2) a distância entre o foco do tubo de raios X e os absorvedores deve ser igual à metade⁽²⁶⁾ da distância entre o foco e a câmara de ionização.
- 3) A distância entre o foco e o detector deve ser grande (aproximadamente 50 cm, para o caso de energias baixas e 100 cm, para energias altas).

Observa-se⁽²⁷⁾ que quanto menor a distância foco-câmara, maior será o valor da camada semi-redutora obtida, porque quanto maior esta distância, menor será a fração de radiação espalhada pelos absorvedores, que contribui para a exposição total.

No entanto, na prática, muitas vezes não é possível satisfazer-se a todas estas condições, devido às limitações inerentes da própria instalação do tubo de raios X. Portanto, é necessária a utilização de um sistema de medida, que leve em conta todos os fatores vistos acima e por meio do qual seja possível obter uma única camada semi-redutora, independentemente das condições geométricas usadas. Em 1960, Trout⁽²⁸⁾, desenvolveu três técnicas de medida com as quais foi possível obter-se com precisão um único valor de camada semi-redutora. Uma das técnicas, a ser utilizada neste trabalho, consta na determinação da camada semi-redutora pa-

ra um campo de radiação de diâmetro igual a zero, pois neste caso, a contribuição da radiação espalhada pelos absorvedores é nula.

2.7. Distribuição radial da taxa de exposição de um feixe de radiação

A distribuição da taxa de exposição, em relação ao eixo central de um campo de radiação circular, deve ser simétrica. Para verificação desta simetria é necessário um mapeamento do campo de radiação ao longo de duas linhas perpendiculares entre si e pertencentes a um mesmo plano normal ao eixo central do feixe. Esta simetria poderá deixar de existir, quando os elétrons emitidos pelo filamento do tubo de raios X forem defletidos por um campo magnético antes de atingirem o alvo, ou quando os fótons não forem emitidos na direção perpendicular ao tubo de raios X⁽¹⁹⁾.

Geralmente a taxa de exposição decresce simetricamente em todas as direções que circundam o eixo central do feixe de radiação. Os parâmetros que devem ser levados em conta para esse decréscimo são:

- a) Lei do inverso do quadrado da distância.
- b) Efeito da filtração oblíqua.

O efeito da filtração oblíqua⁽¹¹⁾ ocorre como consequência da absorção dos raios X pelo material do próprio alvo em que são gerados, uma vez que nem todos os elétrons emitidos pelo filamento irão interagir com os átomos existentes na sua superfície. Este efeito causa um decréscimo na taxa de exposição no sentido do cátodo para o anodo.

Essa absorção dos raios X, dentro do próprio alvo, aumenta à medida que o ângulo entre a direção de emergência da radiação X e a normal à superfície do alvo (ângulo de inclinação do alvo) diminui.

c) Características do tubo

As próprias características do tubo de raios X, tais como o ângulo de inclinação do alvo e a diferença de potencial aplicada entre os eletrodos podem contribuir para a falta de simetria do campo de radiação⁽¹⁷⁾.

A falta de uniformidade do campo pode, ainda ocorrer quando a intensidade máxima dos fótons não coincidir com o centro geométrico do campo. Neste caso, verifica-se que a intensidade aumenta no sentido do anodo para o catodo. Este efeito pode ser corrigido, girando-se o tubo de raios X até a direção apropriada, ou utilizando-se filtros em forma de cunha.

3. MATERIAIS E MÉTODOS UTILIZADOS

3.1. Sistema experimental para a calibração de dosímetros

A primeira parte do trabalho constituiu-se no posicionamento e alinhamento do arranjo experimental a ser utilizado na calibração de dosímetros a nível de terapia. Na figura 3.1. pode-se ver o sistema de calibração que consta de:

1. fonte:

Empregou-se um gerador de raios X RIGAKU DENKI do tipo potencial constante, acoplado a um tubo PHILIPS, modelo PW 2184/00, com janela de 1mm de berílio e alvo de tungstênio. O ângulo de inclinação em relação à direção de emergência dos raios X é de 26 graus e as dimensões do alvo (foco) são de $6 \times 9 \text{ mm}^2$. O tubo pode ser operado nas seguintes condições: entre 20 e 60 kV e entre 2 e 80 mA; sua potência máxima de operação é de 3kW. A figura 3.2. mostra um diagrama esquemático do tubo utilizado e, na figura 3.3. tem-se as regiões de operação recomendadas pelo fabricante para um prolongamento maior da vida do tubo.

Para a determinação correta da distância do foco ao ponto de referência para a fixação dos dosímetros, foi necessário tirar duas gamagrafias do tubo de raios X, que forneceram informações sobre o valor da distância do foco à janela de berílio; o valor encontrado foi 14 mm.

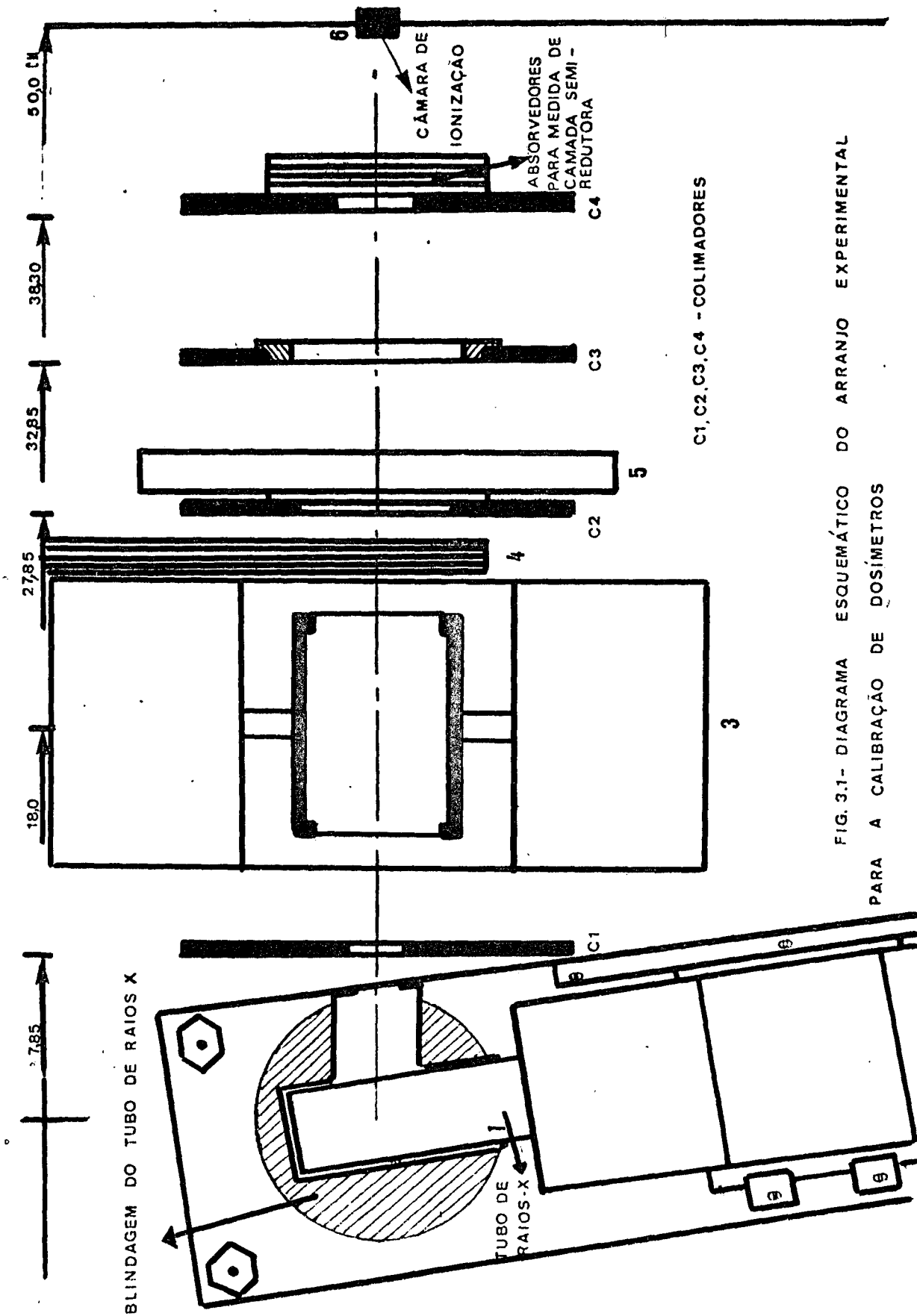


FIG. 3.1- DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO ARRANJO EXPERIMENTAL PARA A CALIBRAÇÃO DE DOSÍMETROS

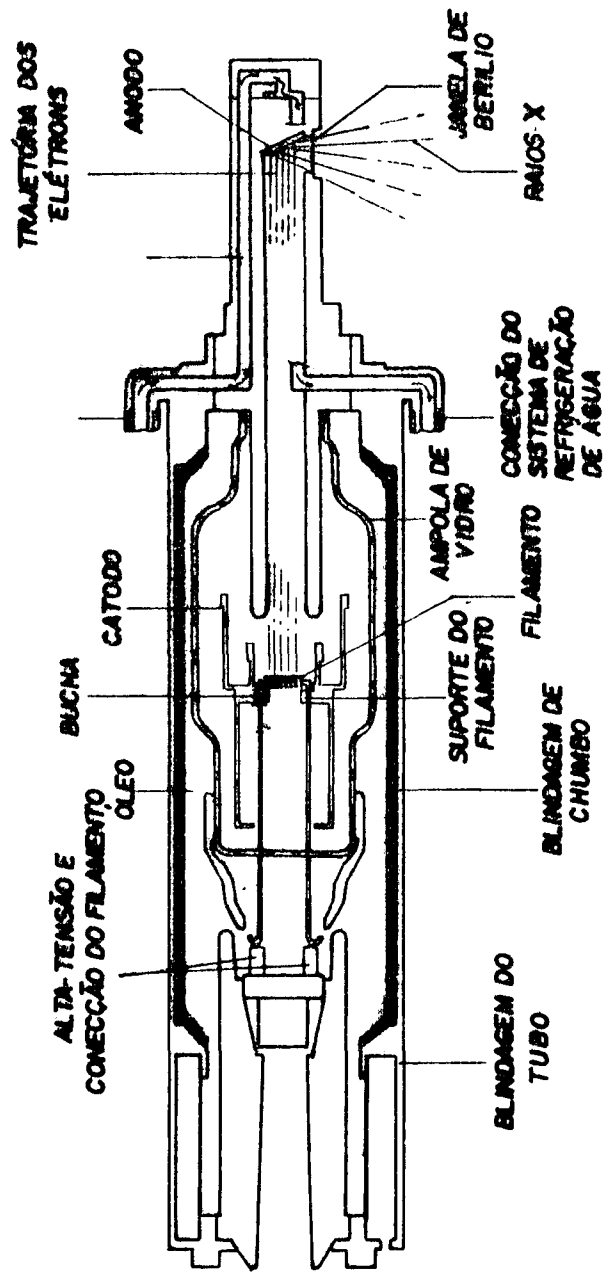


FIG. 32 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO TUBO DE RAIOS X

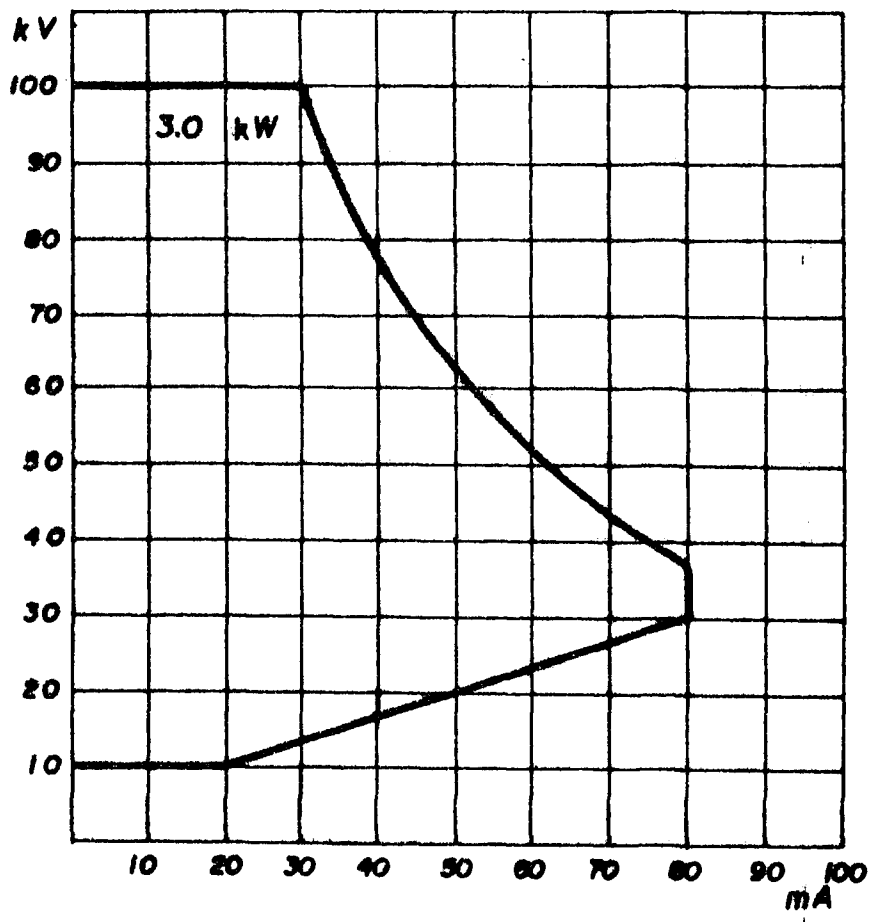


FIG.3.3- CURVA DE OPERAÇÃO DO
TUBO DE RAIOS X

2. Colimadores

São utilizados para definir o tamanho do campo de radiação na posição em que a câmara de ionização do tipo padrão secundário e a câmara a ser calibrada são posicionadas. O colimador C.4, mostrado na figura 3.1., é usado para reduzir o efeito de penumbra na região de fixação dos dosímetros.

Foram usados colimadores de latão, com espessura de 7 mm e diâmetros variando de 1,97 a 10,97 cm.

3. Obturador

Tem a função de reduzir a intensidade do feixe a níveis permissíveis em proteção radiológica, para não ser necessário desligar-se a máquina de raios X a cada final de irradiação, garantindo assim uma maior estabilidade do feixe.

Empregou-se um obturador de chumbo PTW (PHYSIKALISCH TECHNISCHE WERKSTÄTTEN; Alemanha Federal) com transmissão menor que 0,1%.

4. Filtros adicionais

Foram utilizados filtros de alumínio PTW com 99,99% de pureza. A escolha de suas espessuras foi feita, levando-se em conta as condições em que a câmara de ionização do tipo padrão secundário foi calibrada pelo Laboratório Primário, National Physical Laboratory (NPL), Inglaterra.

5. Câmara monitora

Tem a função de detectar possíveis alterações na intensidade do feixe, durante a calibração dos dosímetros; o rendimento de uma máquina de raios X não permanece constante durante todo o período de irradiação, devido às flutuações existente na tensão da rede. Sua utilização é particularmente

importante, quando o método usado para a calibração for o da substituição.

Foi empregada uma câmara de transmissão PTW, modelo Tch 786/k, tipo 24390, com janela de grafite, conectada a um eletrômetro PTW, modelo DU4, que possui um contador eletrônico para a determinação da exposição total. Após o contador registrar a exposição, uma chave de contacto é ativada, fazendo com que o obturador se feche, não permitindo passagem de radiação. Isto significa que a exposição à radiação da câmara de transmissão termina automaticamente, logo após atingir um número prefixado de unidades no eletrômetro.

Esta câmara de transmissão não é do tipo selado, necessitando portanto de correções para as condições ambientais.

Todas as medidas de corrente de ionização, usando-se câmaras de ionização, foram normalizadas em relação às da câmara de transmissão.

6. Câmara de ionização

Para as medidas de uniformidade do feixe de radiação, foi empregada uma câmara de ionização de placas paralelas, especial para radiações de energia baixa, tipo superficial 2532/3, acoplada a um eletrômetro modelo BALDWIN FARMER, tipo 2502/3, ambos da Nuclear Enterprises, Inglaterra. A figura 3.4. mostra o esquema desta câmara e, na figura 3.5., tem-se a sua curva de dependência energética, isto é, os valores do fator de calibração em função das diversas energias de um feixe de radiação X. Na tabela 3.1. pode-se observar as características principais deste tipo de câmara.

Para a determinação da camada semi-redutora e da

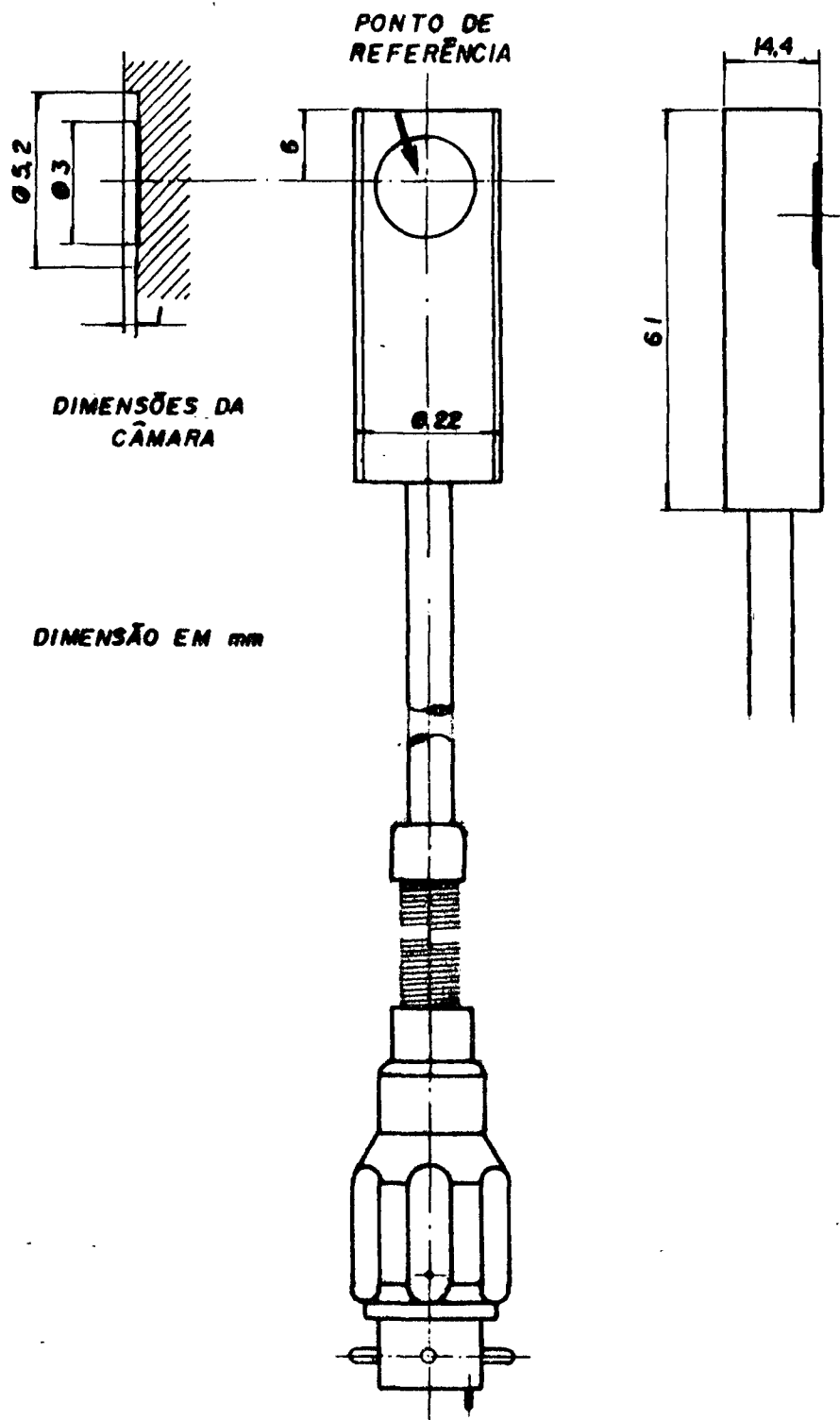


FIG. 3.4 - CÂMARA DE IONIZAÇÃO SUPERFICIAL TIPO 2532/3

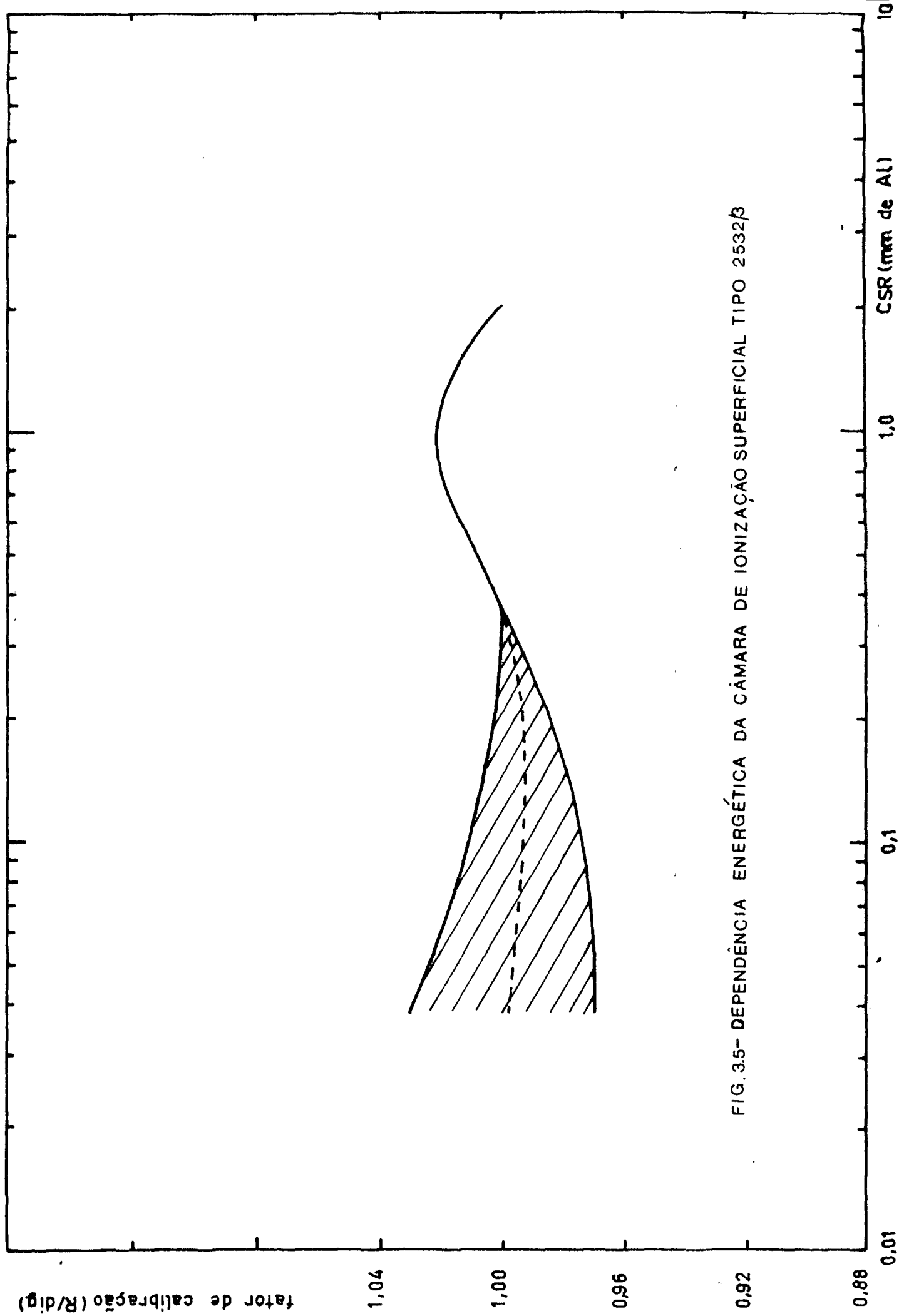


FIG. 3.5- DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA DA CÂMARA DE IONIZAÇÃO SUPERFICIAL TIPO 2532 β

Tabela 3.1. - Especificação da câmara superficial
tipo 2532

Característica	Especificação
Volume	0,03 cm ³
tipo	conectado por cabo
categoria	não selada
potencial de polarização	- 300 V
espessura da janela	2,3 mg/cm ²
intervalo de energia	10 keV a 100 keV
intervalo de exposição	0 - 2,58 C/kg (10.000 R) 0 - 0,258 C/kg (1.000 R) quando utilizada com um dosímetro Farmer
ponto de referência	vide figura 3.4.

taxa de exposição a uma determinada distância do foco para diferentes valores tanto de corrente, como de diferença de potencial aplicada ao tubo de raios X, utilizou-se o sistema padrão secundário. Este consta de uma câmara de ionização de placas paralelas, tipo superficial 2536/3B, associada a um eletrômetro tipo 2560, ambos NUCLEAR ENTERPRISES, com certificado de calibração emitido pelo Laboratório Primário (NPL, Inglaterra).

A câmara tipo padrão secundário foi calibrada usando-se as seguintes condições⁽¹⁸⁾:

a) Distância entre o foco e a câmara de ionização de 50 cm.

b) Campo de radiação com diâmetro de 8 cm.

As qualidades de radiação utilizadas durante a calibração estão relacionadas na tabela 3.2.. O gerador de raios X utilizado foi do tipo potencial constante, acoplado a um tubo com janela de espessura de 1 mm de berílio.

Para cada qualidade de radiação, a câmara de ionização do tipo padrão primário (câmara de ar livre para energias baixas) e a câmara de ionização do tipo padrão secundário foram irradiadas alternativamente. Os seus pontos de referência de medida foram posicionados em relação ao eixo central do feixe de raios X, ambos à mesma distância (50 cm) do foco de tubo.

Todas as medidas foram normalizadas em relação às obtidas com a câmara de transmissão.

A incerteza associada aos valores dos fatores de calibração emitidos pelo Laboratório Primário é de $\pm 7\%$, para um nível de confiança de 99%, e a incerteza sistemática as-

Tabela 3.2. - Fatores de calibração da câmara superficial tipo 2536/3B para diversas qualidades do feixe de radiação

diferença de potencial (kV)	espessura dos filtros adicionais (mm de Al)	camada semi-redutora (mm de Al)	fator de calibração (R/dig)
8,8	--	0,024	0,972
11,9	0,050	0,050	0,961
16,0	0,20	0,10	0,950
25,0	0,445	0,25	0,935
40,4	0,685	0,50	0,917
49,5	1,02	1,00	0,902

Estes fatores de calibração são válidos nas seguintes condições ambientais:

- Temperatura = 20°C
- Pressão = 760 mm de Hg
- Umidade relativa do ar (U.R. do ar) = 50%

sociada ao processo de calibração é de $\pm 1,5\%$.

A tabela 3.3. mostra algumas das características da câmara de ionização tipo 2536/3B (padrão secundário) e, na figura 3.6., pode-se observar um diagrama esquemático desta câmara.

No presente trabalho, tentou-se reproduzir as mesmas condições de calibração do sistema padrão secundário usado no Laboratório Primário. Porém, dentro das condições de operação do gerador de raios X do IPEN, só foi possível realizar-se calibrações de instrumentos de campo (padrões terciários) para os seguintes valores de diferença de potencial aplicada aos eletrodos do tubo de raios X: 25; 40 e 50 kV, já que o gerador não opera a 8,8; 11,9 e 16 kV.

7. Suporte das câmaras de ionização

Para fixação das câmaras de ionização, utilizou-se um suporte feito de um material de número atômico baixo (alumínio). Este suporte foi posicionado a uma distância de 50 cm do foco do tubo de raios X, fora do feixe de radiação, evitando assim o espalhamento da radiação na posição de medição.

O alinhamento do ponto de referência da câmara de ionização com o eixo central do campo de radiação foi realizado com o auxílio de um sistema óptico (Laser).

3.2. - Medida da uniformidade do feixe de radiação

Inicialmente, mediu-se a uniformidade do feixe, supondo-se que a direção de emissão dos fótons fosse perpendi

Tabela 3.3. - Especificações da câmara superficial
tipo 2536/3B

Característica	Especificação
Volume	0,3 cm ³
tipo	Conectado por cabo
categoria	não selada
potencial de polarização	- 200 V
espessura da janela	2,3 mg/cm ²
intervalo de energia	10 keV - 100 keV
intervalo de exposição	0 - 0,258 C/kg (1.000 R) 0 - 0,0258 C/kg (100 R) quando usada com o eletrômetro NPL tipo 2560
ponto de referência	vide figura 3.6.

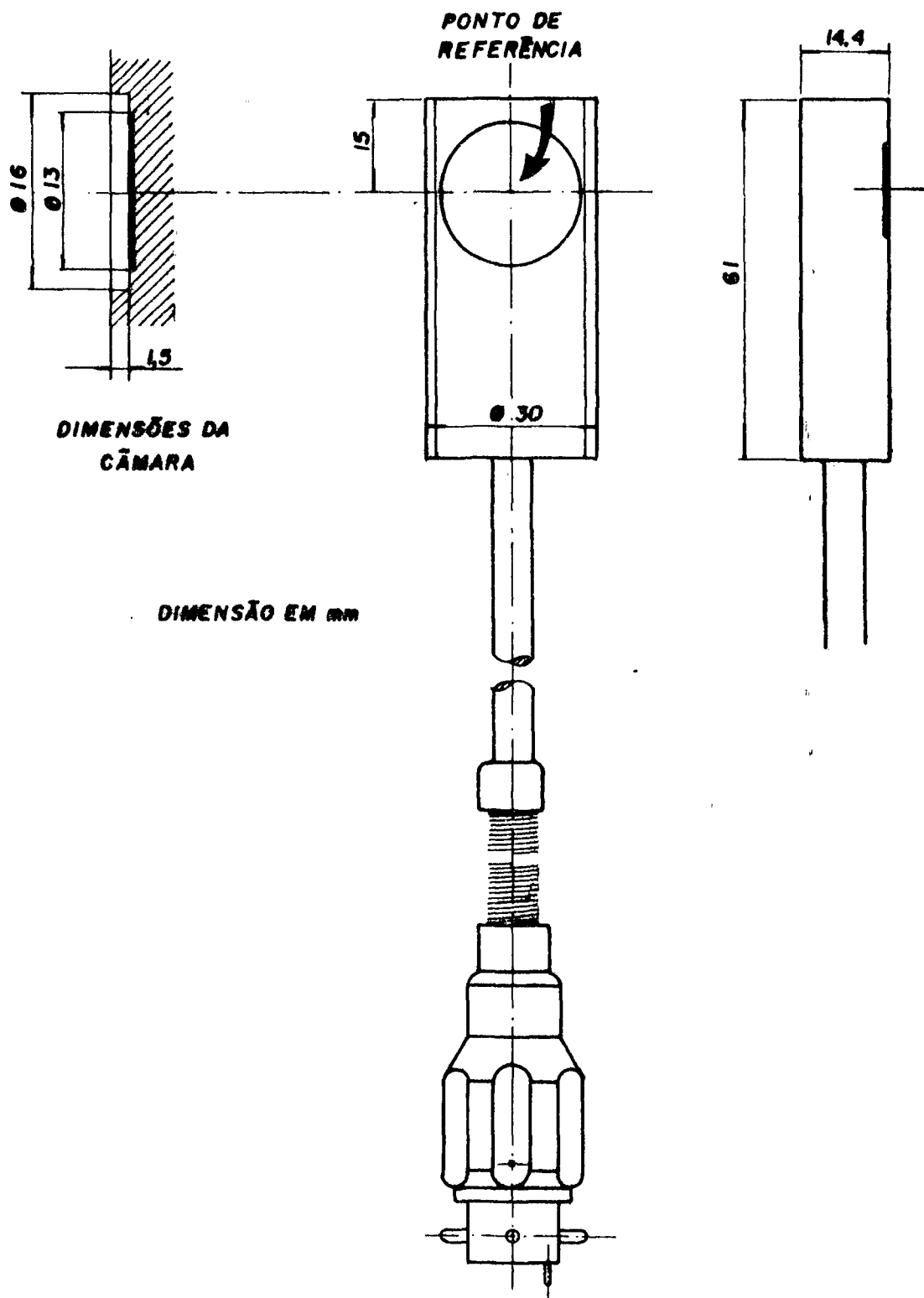


FIG.3.6 - CÂMARA DE IONIZAÇÃO SUPERFICIAL TIPO 2536/3B

cular ao eixo central do tubo. Com os resultados obtidos, foi possível posicionar-se corretamente o tubo de raios X em relação a todo o sistema experimental usado para a calibração de dosímetros.

Para a determinação da uniformidade do feixe, posicionou-se a câmara de ionização superficial (padrão terciário), no ar, à distância de 50 cm do foco do tubo. A posição desta câmara foi variada em intervalos de 1 cm no plano horizontal até se atingir a região de penumbra, tendo todos os dados sido normalizados em relação aos obtidos na posição central (ponto de referência) do campo de radiação. Em cada ponto, mediu-se o intervalo de tempo necessário para atingir-se um valor prefixado (500 dígitos) no eletrômetro associado à câmara de ionização. O diâmetro do campo de radiação, na posição de fixação da câmara de ionização, foi de 24 cm. As condições de operação da máquina de raios X foram:

a) Diferença de potencial de 25 kV, corrente de 40 mA e filtro adicional de 0,45 mm de Al.

b) Diferença de potencial 50 kV, corrente de 20 mA e filtro adicional de 1,01 mm de Al.

Após as medidas, observou-se que a máxima intensidade do feixe não coincidia com o centro geométrico do campo de radiação, mas encontrava-se dirigida para o lado do catodo. Foi necessário girar o tubo de raios X de 7,8 graus no sentido anti-horário.

Com a nova geometria, mediu-se novamente a uniformidade do feixe no plano horizontal, à distância de 50 cm do foco, e com diâmetro do campo de radiação de 12 cm, na posição de fixação da câmara de ionização. As condições de ope-

ração do sistema de raios X foram as mesmas que as utilizadas anteriormente.

Após o posicionamento correto do tubo, o restante do sistema experimental (obturador, colimadores, filtros adicionais e câmara de transmissão) foi alinhado com o auxílio de um Laser, colocado à distância de 400 cm do alvo. Para verificar se o foco do Laser coincidia com o centro geométrico do campo de radiação, tirou-se várias radiografias a essa distância. Com o Laser posicionado de forma correta em relação ao campo de radiação, o alinhamento do arranjo experimental pode ser testado mais facilmente.

3.3. Método utilizado para determinação da camada semi-redutora

O método⁽²⁸⁾ empregado para a determinação da camada semi-redutora constituiu-se de uma técnica de extrapolação para um campo de diâmetro igual a zero, resultando em um único valor. Este método consiste em usar-se dois ou mais colimadores de diâmetros diferentes, variando-se assim o tamanho do campo de radiação na posição de fixação do detector. Os outros parâmetros geométricos, tais como a distância do foco aos absorvedores e a distância do foco ao detector, são mantidos constantes durante as medidas.

Mediu-se a transmissão do feixe de radiação, usando-se a câmara de ionização do tipo padrão secundário, posicionada, no ar, à distância de 50 cm do foco do tubo de raios X para as seguintes combinações de diferença de potencial e

filtro adicional:

- a) 25 kV e 0,45 mm de Al
- b) 40 kV e 0,69 mm de Al
- c) 50 kV e 1,01 mm de Al

Estes valores são os mesmos que os utilizados pelo Laboratório Primário para a calibração do padrão secundário.

Inicialmente, mediu-se a intensidade do feixe sem absorvedor e, a seguir, foram sendo colocados absorvedores de alumínio de 99,99% de pureza e de diferentes espessuras, que foram posicionados a aproximadamente 38,30 cm do foco, entre as câmaras de transmissão e de ionização (vide figura 3.1.). As medidas com a câmara de ionização foram sendo tomadas até uma espessura máxima de absorvedor, correspondendo a uma leitura menor que 10% de seu valor inicial (sem absorvedor).

Em cada caso, determinou-se a curva de transmissão do feixe (intensidade do feixe em função da espessura dos absorvedores) com três colimadores de diâmetros diferentes: 1,97; 2,63 e 4,38 cm. A extrapolação para o campo de diâmetro igual a zero foi feita com o auxílio de um gráfico de valores de camada semi-redutora em função do diâmetro dos colimadores usados, obtendo-se um único valor de camada semi-redutora independente das condições experimentais usadas.

3.4. - Determinação da filtração total

A filtração total do feixe compreende a filtra-

ção adicional e a filtração fixa, esta última abrangendo tanto a filtração inerente do tubo como da câmara de transmissão. A filtração total pode diferir de um tubo para outro; logo o poder de penetração dos feixes de radiação, gerados em cada caso, também poderá ser diferente.

A filtração inerente⁽⁶⁾ do tubo resulta dos vários componentes que o constituem, tais como a espessura da janela de berílio e do sistema de refrigeração. Para uma determinada energia de radiação, ela é expressa em termos da espessura de filtro de alumínio que, na ausência dos elementos constituintes, forneceria o mesmo valor de primeira camada semi-redutora que a obtida sem nenhuma filtração inerente, ou seja, com o feixe de radiação que realmente emerge do tubo.

O método⁽⁶⁾ de determinação da filtração fixa do sistema de calibração, constituiu-se em medidas da intensidade do feixe para obtenção do valor de primeira camada semi-redutora, variando-se a espessura dos filtros adicionais. A curva resultante, de camada semi-redutora em função de espessura dos filtros adicionais, é extrapolada para o valor de camada semi-redutora igual a zero. O ponto, no qual a curva intercepta no gráfico o eixo dos valores de filtração adicional, corresponde justamente à filtração fixa requerida.

Mediu-se a camada semi-redutora para 25; 40 e 50 kV, pelo método da extrapolação descrito no item 3.3, usando-se os mesmos três colimadores com diâmetros de 1,97; 2,63 e 4,38 cm. As medidas foram feitas com a câmara de ionização superficial do tipo padrão secundário, posicionada no ar, à distância de 50 cm do foco, normalizando-se as leituras em relação às aquelas obtidas com a câmara de transmissão. Para

cada condição, determinou-se a camada semi-redutora em função das seguintes espessuras de filtros adicionais de alumínio: 0,45; 0,47; 0,56; 0,69 e 1,01 mm de Al. O mesmo foi feito sem o uso de filtro adicional.

3.5. Medida de espectros do sistema de radiação X

Um arranjo experimental ⁽²¹⁾ foi montado para a determinação da energia máxima do feixe de radiação, por meio de medidas de espectros com um detector de NaI(Tl). Com esses espectros foi possível fazer-se um estudo qualitativo da distribuição espectral do feixe em função das diversas espessuras de absorvedores utilizadas para a determinação da camada semi-redutora.

3.5.1. Arranjo experimental

O arranjo experimental usado para as medidas de espectro do sistema de raios X pode ser visto na figura 3.7.. Para evitar uma taxa de contagem excessiva no detector de NaI(Tl), este foi posicionado à distância de 369 cm do tubo de raios X. Além disso, utilizou-se quatro colimadores de chumbo com 5 mm de espessura e diâmetros variando de 0,15 a 4 mm, com a finalidade tanto de colimar como de reduzir a intensidade do feixe. Para reduzir o efeito de atenuação dos fótons pela camada de ar existente entre o tubo de raios X e o detector de NaI(Tl), foi colocado entre eles um tubo de PVC de 5 x 320 cm², sendo feito vácuo de 3 mm de Hg em seu interior, de forma que a distância efetiva foco-detector fosse da ordem de 50 cm.

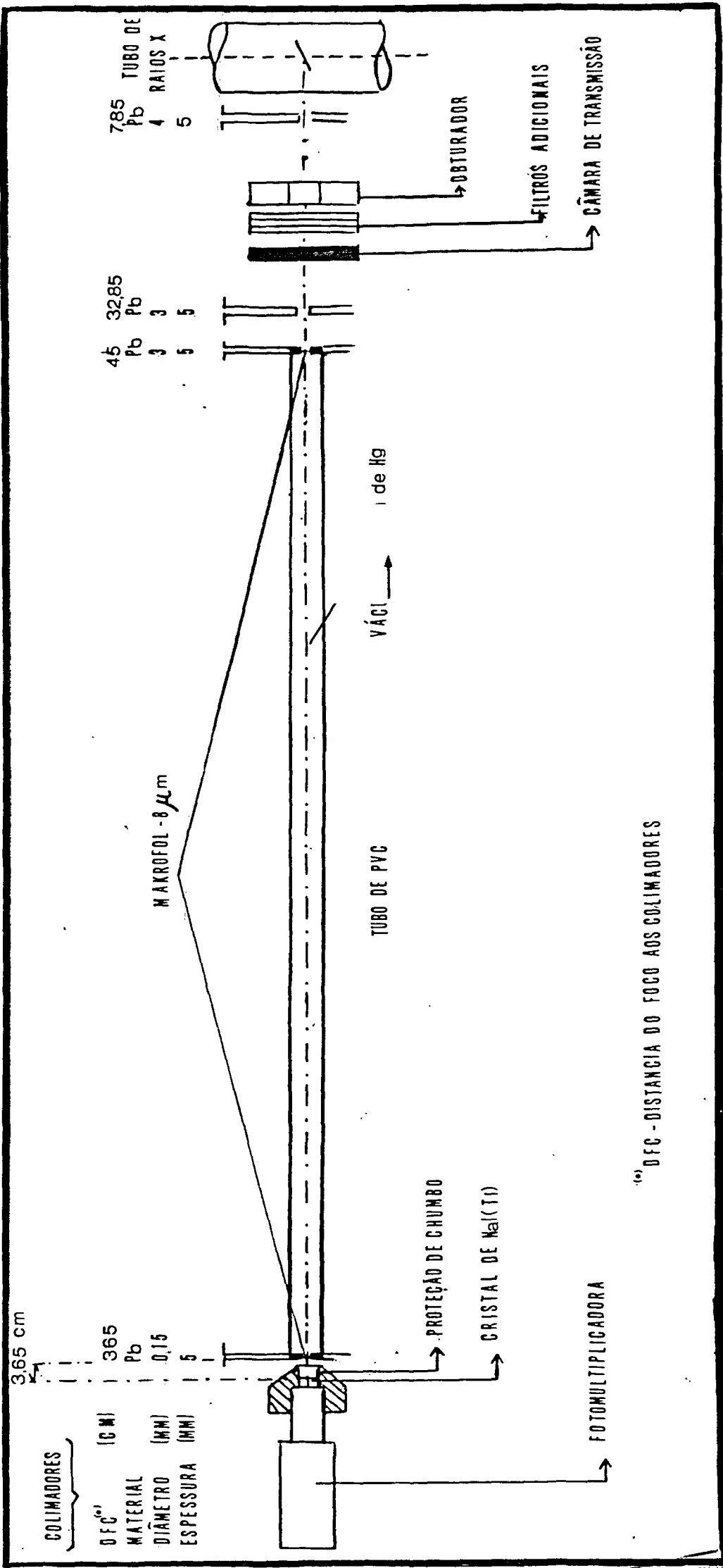


FIG.3.7 - ARRANJO EXPERIMENTAL PARA A MEDIDA DE ESPECTROS DO FEIXE DE RAIOS X .

INSTITUTO DE PESQUISA ATOMICA "CEPIS"
 I.P.E.M.
 SÃO CARLOS - SP

3.5.2. Características do detector de NaI(Tl) e do equipamento eletrônico associado a ele.

O detector consta de um cristal de NaI(Tl) com diâmetro de 5 cm e com espessura de 0,5 cm, associado a uma fotomultiplicadora. A espessura de sua janela de entrada é de 0,125 mm de Al (34 mg/cm^2) de Alumínio.

Para o ajuste da impedância entre o detector e o amplificador, usou-se um pré-amplificador ORTEC (modelo 113) e, acoplado a este um amplificador ORTEC (modelo 451). O sinal do amplificador foi introduzido num analisador multicanal HEWLETT-PACKARD (modelo 5401 A) de 8096 canais.

3.5.3. Calibração do sistema espectrométrico

A calibração em energia do sistema espectrométrico (detector, pré-amplificador, amplificador e analisador) foi feita com uma fonte radioativa de energias bem determinadas. Utilizou-se uma fonte padrão de ^{241}Am , tomando-se como referência os picos de absorção de energia de 16 e 59,5 keV, por serem os que apresentam intensidade maior com relação aos outros picos. Na figura 3.8. pode-se observar o espectro de energia do ^{241}Am .

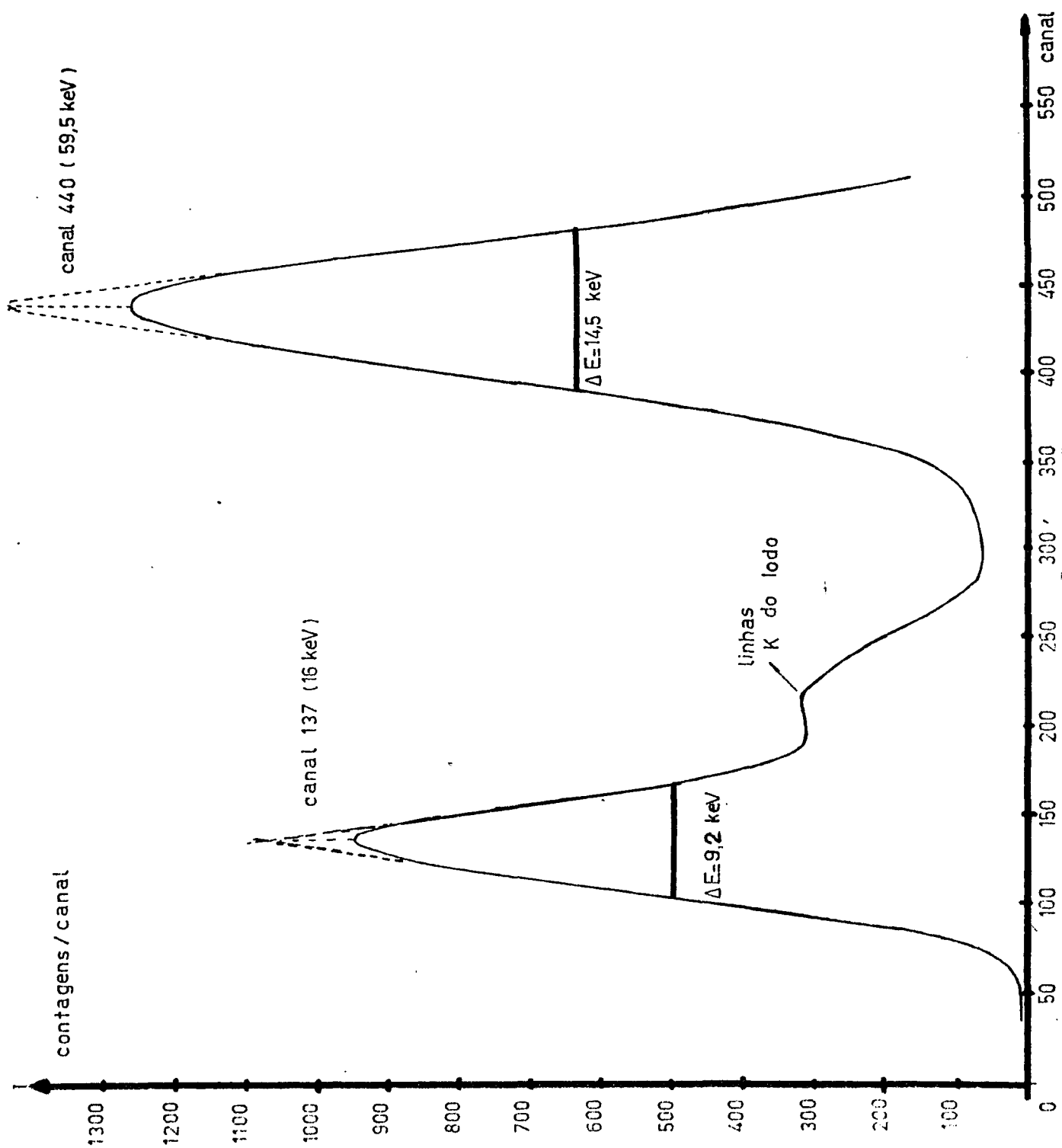


FIG.3.8 - ESPECTRO DE ENERGIA DO AMERICÍO -241

A parte final do espectro de energia de um feixe de raios X apresenta uma região que pode ser considerada linear facilitando portanto a determinação ⁽²²⁾ da energia máxima deste feixe. O valor desta energia máxima foi obtido extrapolando-se linearmente a parte final do espectro, ajustada pelo método dos mínimos quadrados, até o nível de radiação de fundo. A energia máxima do feixe de radiação foi medida para valores de diferença de potencial variando entre 20 e 50 kV, mantendo-se constante o valor da corrente do tubo.

3.6. Calibração de uma câmara de ionização

Após a determinação de todos os parâmetros necessários para caracterizar o feixe de raios X, fez-se a calibração da câmara de ionização do tipo padrão terciário (descrito no item 3.1.6.), a ser utilizada em medidas de rotina no Laboratório de Calibração do IPEN, como aplicação dos resultados encontrados no presente trabalho.

A calibração foi feita pelo método da substituição ⁽⁵⁾. Para uma dada combinação de diferença de potencial e filtração adicional, mediu-se inicialmente a taxa de exposição usando-se a câmara de ionização tipo padrão secundário, posicionada no ar, à distância de 50 cm do foco. A seguir, mediu-se a taxa de exposição com a câmara de ionização do tipo padrão terciário nas mesmas condições anteriores. Logo após, a primeira câmara foi novamente exposta à radiação e uma outra série de leituras foi realizada. Todas as medidas

obtidas foram normalizadas em relação às encontradas com a câmara de transmissão, de forma a levar-se em conta possíveis alterações na intensidade do feixe durante as irradiações.

Antes do procedimento da calibração propriamente dita, alguns testes específicos foram feitos com as duas câmaras, para verificação do seu perfeito funcionamento. Os seguintes testes foram efetuados:

1) Tempo de estabilização

O tempo de estabilização⁽⁵⁾ é o intervalo de tempo necessário para que todas as características do instrumento, especificadas pelo fabricante, atinjam valores estáveis, logo após o potencial de polarização ter sido aplicado entre os eletrodos da câmara de ionização.

Método:

Inicialmente deve-se manter a câmara de ionização em um potencial de polarização nulo durante aproximadamente 1 hora. Logo após este intervalo de tempo, o potencial de polarização é aplicado entre os eletrodos da câmara de ionização, ao mesmo tempo em que ela é submetida a uma determinada exposição à radiação. As leituras de corrente de ionização são realizadas em intervalos regulares de 5 minutos, durante pelo menos 30 minutos.

2) Existência de corrente de fuga na ausência de radiação

A corrente de fuga não é proveniente de ionização provocadas no volume sensível da câmara, mas no sistema que a constitui. Sua existência contribui para um aumento nos valores das medidas da corrente de ionização.

Método:

Para a verificação da existência da corrente de fuga, é necessário usar a câmara de ionização acoplada ao seu respectivo eletrômetro e proceder da mesma maneira, que durante as medidas normais, porém sem submeter a câmara de ionização à radiação⁽¹⁶⁾. O potencial de polarização, neste caso, deve ser aplicado à câmara de ionização pelo menos uma hora antes de ser efetuada a primeira medida.

A existência de corrente de fuga nas câmaras de ionização tipo padrão secundário e terciário foi verificada, submetendo-se cada uma delas primeiramente a uma determinada quantidade de radiação emitida por uma fonte de ^{90}Sr , denominada fonte de controle. No primeiro caso, a câmara de ionização foi submetida à radiação de uma fonte de ^{90}Sr PTW (modelo S-1253) com atividade de $1,11 \times 10^7$ Bq (0,3 m Ci), e no segundo caso, a uma fonte de ^{90}Sr (modelo Nr-74321) de $3,33 \times 10^7$ Bq (0,8 m Ci).

A irradiação das câmaras foi feita durante 5 minutos, retirando-se, a seguir, a fonte radioativa da presença da câmara, sem desligar o potencial de polarização aplicado entre os seus eletrodos. Sob estas condições (sem nenhuma radiação), o tempo de leitura foi aproximadamente 4 vezes maior (20 minutos). Finalmente, sem desligar o eletrômetro, uma segunda medida foi realizada, após os 20 minutos posteriores, totalizando 45 minutos de duração do teste.

3) Teste de fuga dos eletrômetro:

Durante as medidas de corrente de ionização, uma determinada quantidade de carga elétrica é armazenada em um capacitor existente no eletrômetro⁽⁵⁾. A taxa de fuga desta carga poderá limitar o valor da corrente de ionização mínima

medida. Portanto é também necessário verificar a existência de corrente de fuga no eletrômetro. Esse valor pode diferir razoavelmente daquele obtido com o conjunto da câmara de ionização conectada ao eletrômetro.

Método:

A câmara de ionização, ligada ao eletrômetro, é submetida inicialmente a uma certa quantidade de radiação durante 5 minutos, da mesma forma descrita no teste anterior. Logo após este intervalo de tempo, a câmara de ionização, juntamente com o seu cabo de conexão são separados do eletrômetro, porém sem desligá-lo. Após 20 minutos, faz-se uma medida da quantidade de carga elétrica armazenada no capacitor existente no eletrômetro. A diferença entre esse valor e o obtido anteriormente com a câmara de ionização exposta a uma certa quantidade de radiação, não pode ser superior a 0,5%. Caso contrário, significa que existe uma determinada taxa de fuga da carga armazenada no capacitor. Essa fuga pode também ser proveniente de problemas associados aos componentes eletrônicos existentes no eletrômetro.

4) Estabilidade a curto prazo

Este teste foi realizado mediante a exposição das câmaras de ionização superficial tipo padrão secundário e terciário à radiação pelas suas respectivas fontes de controle. Na figura 3.10, pode-se ver o esquema da montagem utilizada.

Foi feita uma série de 12 leituras do intervalo de tempo necessário para a produção de uma quantidade de carga prefixada nos eletrômetros, associados a cada uma das câmaras de ionização em questão.

A precisão associada a cada uma das séries de medida foi expressa por meio dos limites de confiança, entre os quais o valor médio está situado com um determinado grau de probabilidade, denominado nível de confiança.

Os limites de confiança L, referidos ao valor médio \bar{x} foram determinados supondo-se que o conjunto de leituras obtido obedecia à distribuição de Student. A seguir é descrito o procedimento ⁽¹⁵⁾ adotado:

Tem-se:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{onde,}$$

n : é o número de valores observados (x_i) para uma dada série de medidas

\bar{x} : é o valor médio

Os limites de confiança L, referidos a esse valor médio (\bar{x}) são dados por:

$$L(P,n) = \bar{x} \pm t \sigma_{\bar{x}} \quad \text{sendo,}$$

P : o nível de confiança

t : o fator de Student, cujo valor depende de P e n.

$\sigma_{\bar{x}}$: o desvio padrão da média.

$$\sigma_{\bar{x}} = \left(\frac{1}{(n-1)n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)^{1/2}$$

No presente trabalho, foi estabelecido um nível

de confiança de 95%. Isto significa que se for obtida pelo mesmo método, uma outra série de medidas com um número n de valores observados, a probabilidade de que o novo valor médio (\bar{x}) esteja no intervalo compreendido entre $\bar{x} - t\sigma_{\bar{x}}$ e $\bar{x} + t\sigma_{\bar{x}}$ é de 95%. A tabela 3.4. mostra os valores de t para os diferentes níveis de confiança (P) em função do número de valores observados n .

5) Estabilidade a longo prazo

A finalidade deste teste é a verificação da aplicabilidade dos valores do fator de calibração, fornecidos pelo Laboratório Primário, após um determinado período de tempo. Em outras palavras, tem a função de verificar se a sensibilidade do instrumento à radiação permanece constante.

Este teste deve ser aplicado à câmara de ionização tipo padrão secundário pelo menos uma vez ao mês. Se as alterações encontradas forem superiores a 1%, a câmara deve ser enviada ao Laboratório de Padronização Primária para a recalibração.

Também neste teste a câmara de ionização é exposta a uma certa quantidade de radiação proveniente da sua respectiva fonte de controle de ^{90}Sr .

A estabilidade a longo prazo foi verificada por meio de um grupo de medidas repetida (10) durante um período de 12 meses. Em cada caso, todas as leituras foram corrigidas para as condições ambientais, assim como para o fator de decaimento da fonte.

Tabela 3.4. - Valores de t para diversos números de leituras

Número de leituras n	Valores de t para	
	P = 95%	P = 99%
3	4,3	9,9
4	3,2	5,8
5	2,8	4,6
6	2,6	4,0
8	2,4	3,5
10	2,1	2,9
∞	2,0	2,6

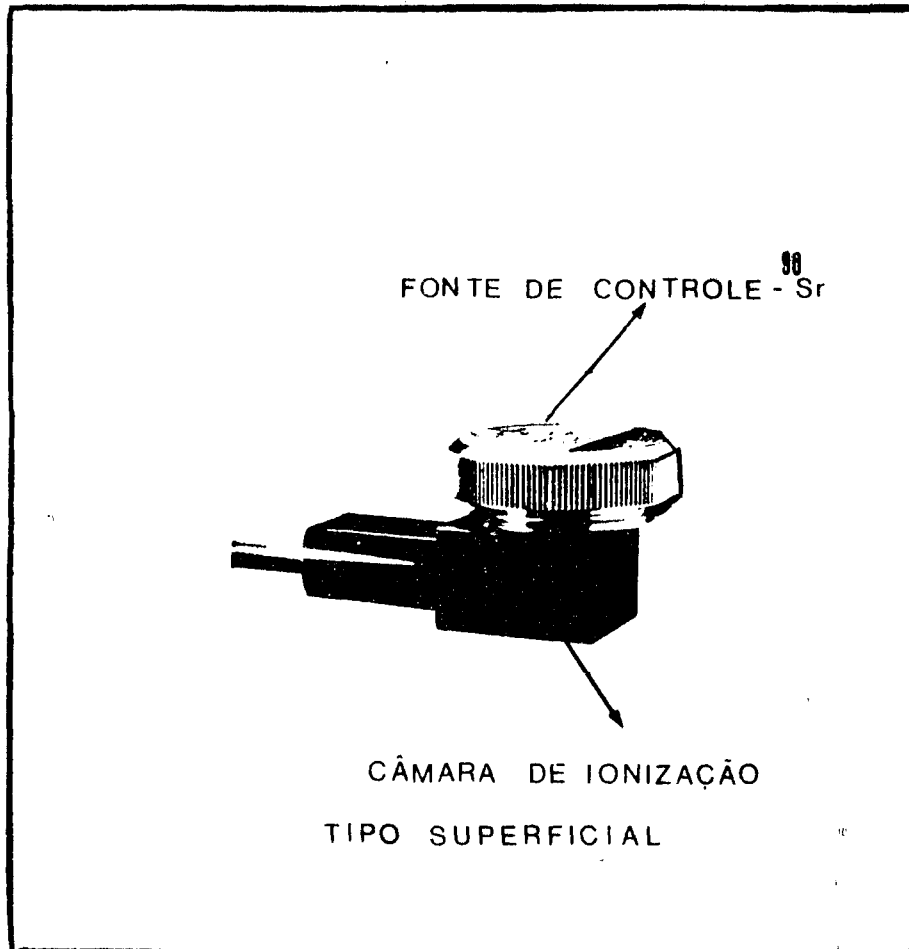


Fig. 3.9 . - Montagem utilizada para medida de estabilidade a curto e a longo prazo.

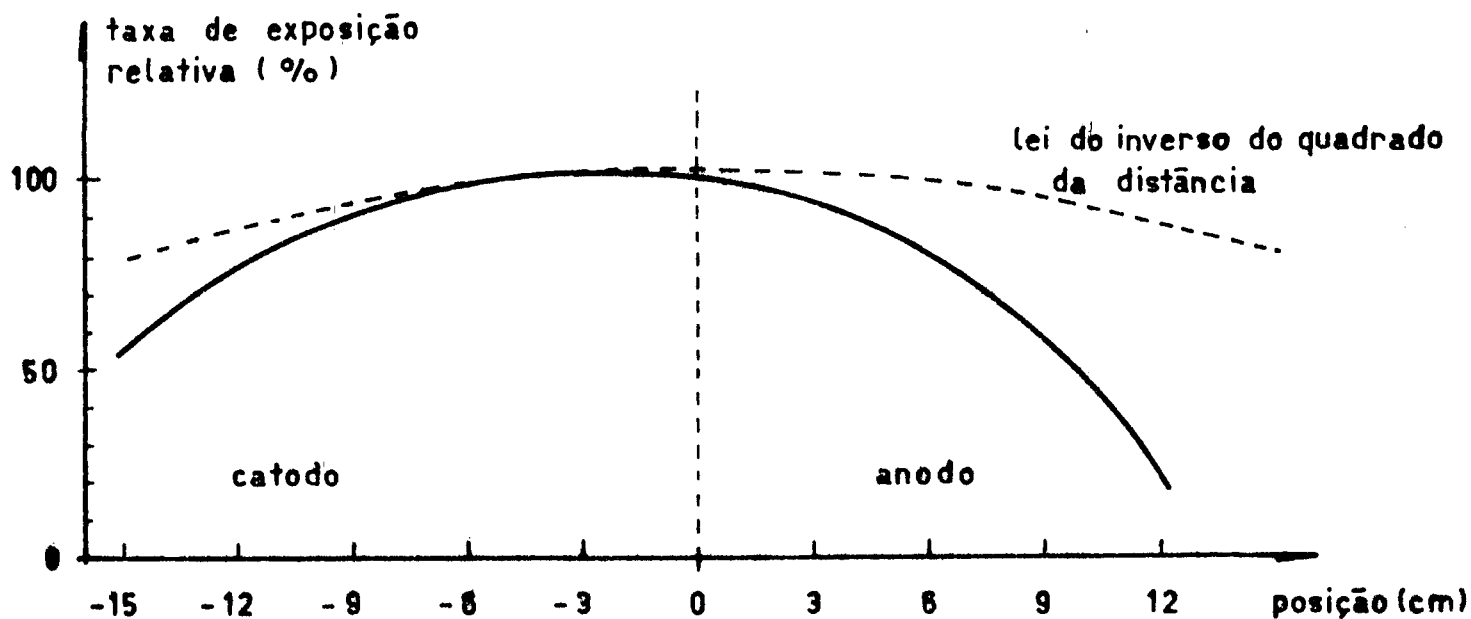
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Uniformidade do feixe de radiação

Na figura 4.1. tem-se a distribuição da taxa de exposição ao longo do campo de radiação no plano horizontal, para a máquina de raios X operando a 50 kV e a 20 mA com filtro adicional de 1.01mm de Al, e para 25 kV e a 40 mA com filtro adicional de 0,45 mm de Al. Estas medidas foram feitas inicialmente, supondo-se que a direção de emissão dos fótons fosse perpendicular ao eixo central do campo de radiação. Observa-se que a máxima intensidade do feixe não coincide com o centro geométrico do campo de radiação, mas encontra-se dirigida para o lado do catodo. Além disso, os valores encontrados apresentam uma variação de até 20%, em relação aos obtidos teoricamente usando-se a lei do inverso do quadrado da distância. Portanto, concluiu-se ser necessário girar o tubo de raios X de 7,8 graus no sentido anti-horário.

Nas figuras 4.2. e 4.3. pode-se ver a distribuição da taxa de exposição ao longo do campo de radiação no plano horizontal e vertical, respectivamente, para as mesmas condições anteriores de operação da máquina de raios X. Nota-se que com este novo ajuste do tubo, os dados experimentais mostram-se em concordância com os encontrados teoricamente. Pode-se ainda observar uma simetria na distribuição da taxa de

1) 50 kV.



2) 25 kV

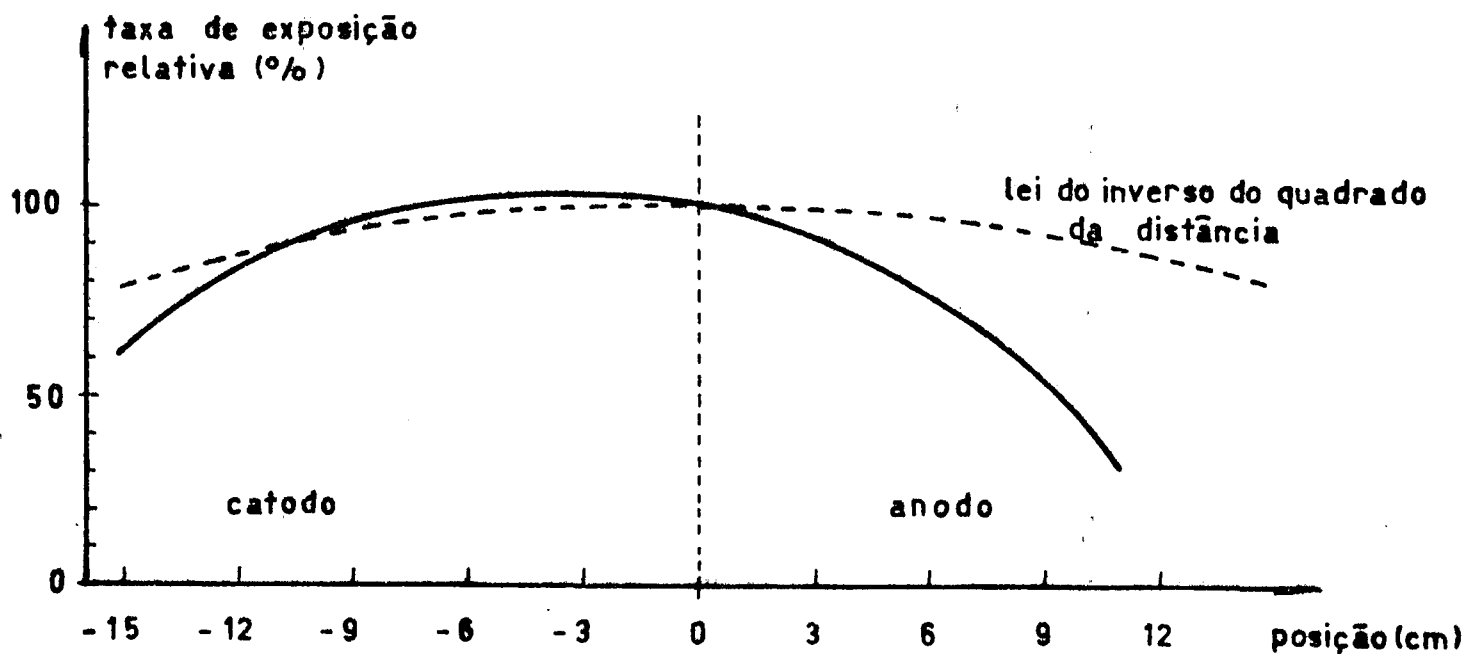


FIG.4.1- UNIFORMIDADE DO FEIXE DE RAIOS X.

(PLANO HORIZONTAL)

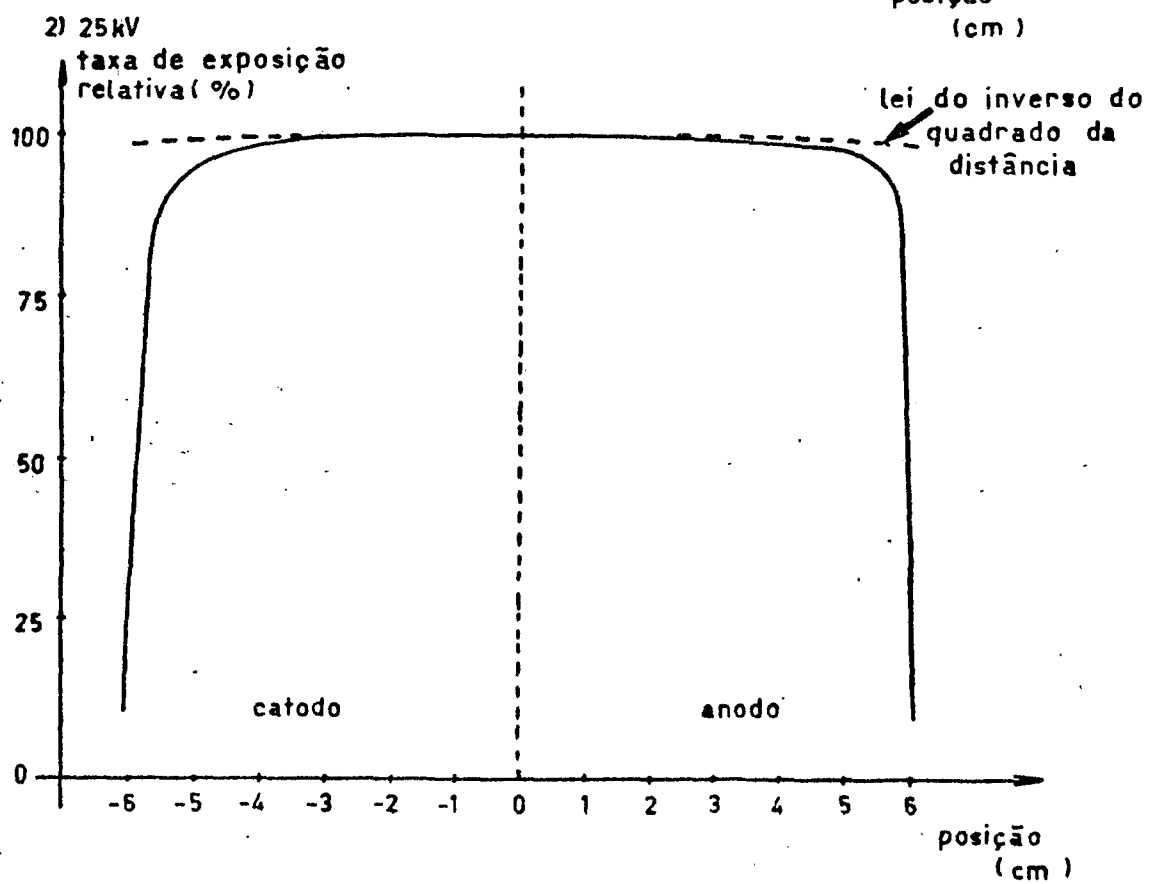
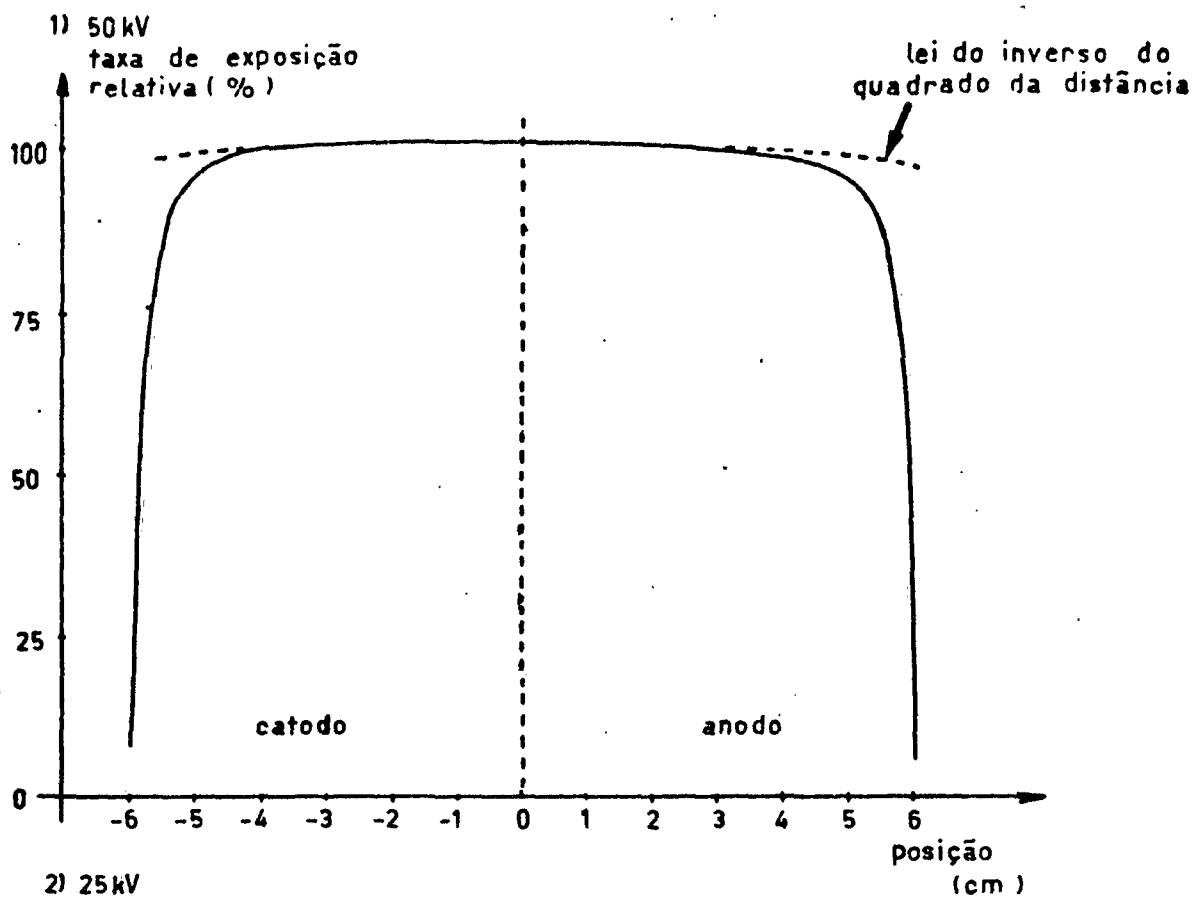


FIG.4.2 - UNIFORMIDADE DO FEIXE DE RADIAÇÃO.

(PLANO HORIZONTAL)

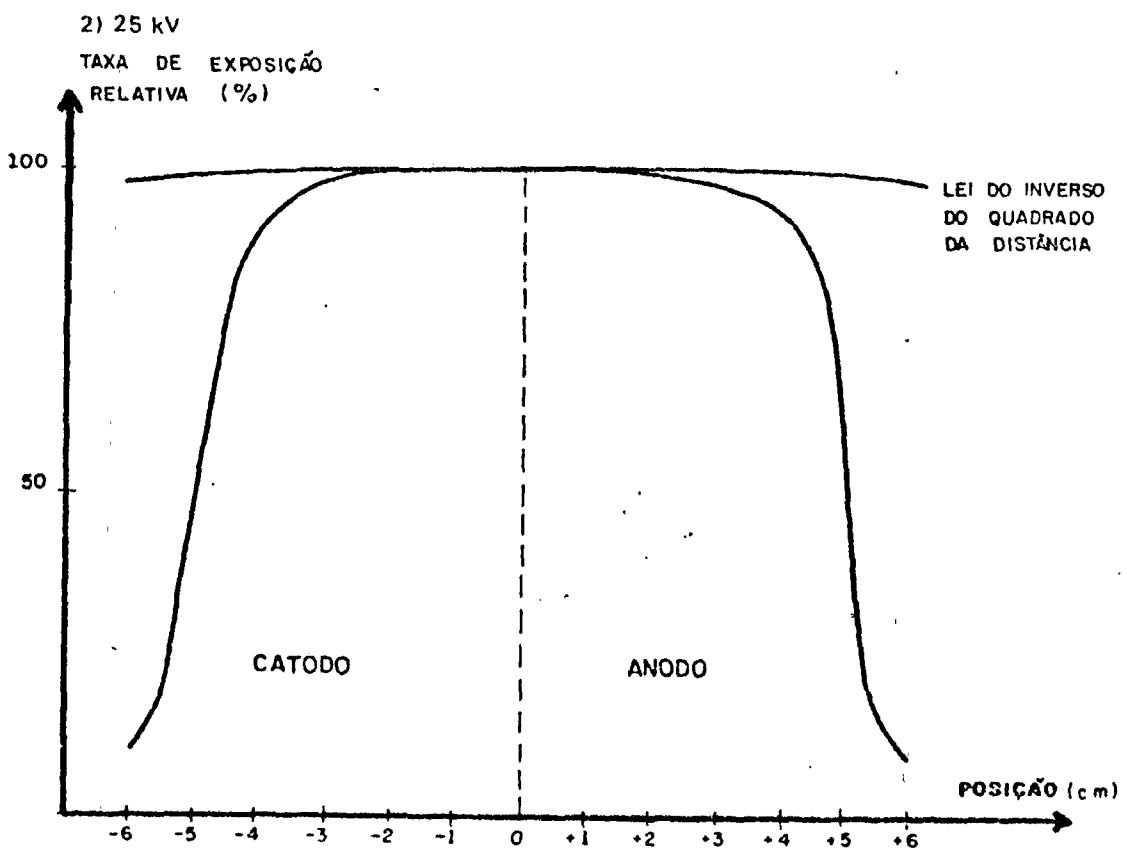
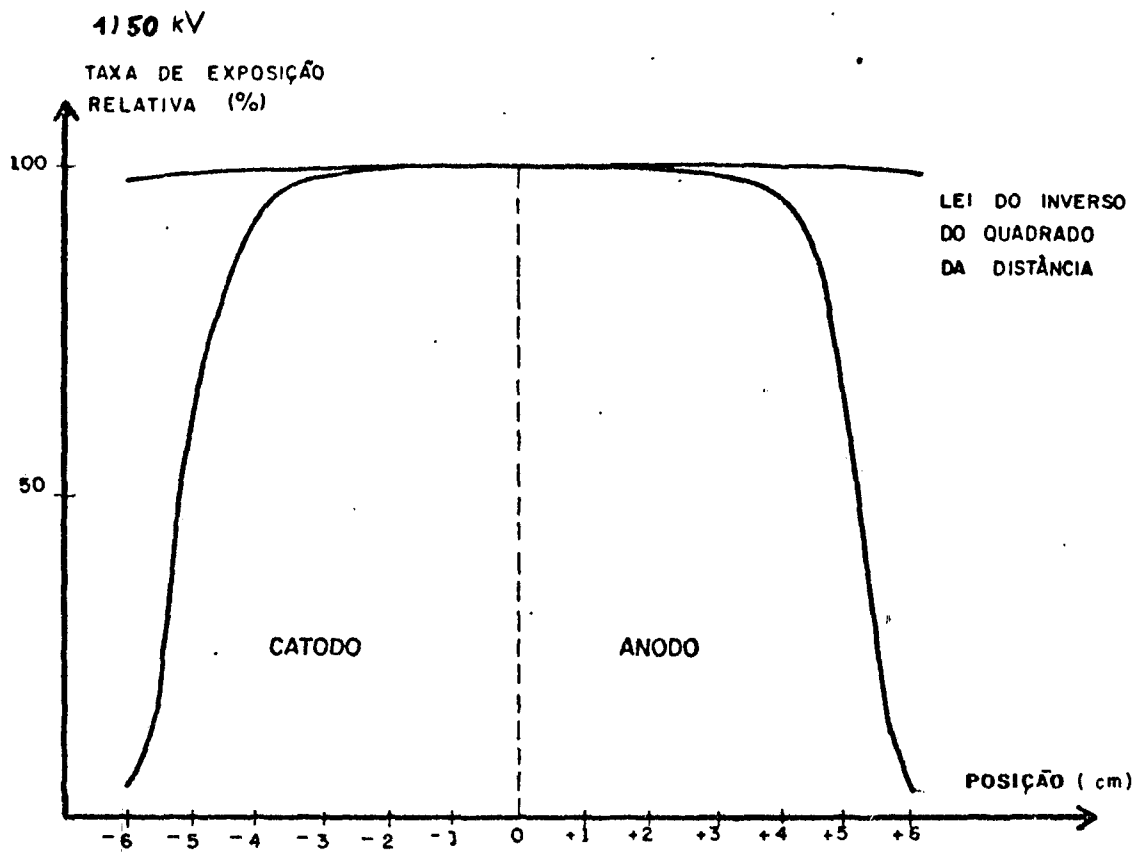


FIG.4.3-UNIFORMIDADE DO FEIXE DE RADIAÇÃO

(PLANO VERTICAL)

exposição, uma vez que os resultados obtidos para cada posição, distanciados de um mesmo valor, em relação ao centro do campo de radiação, apresentam-se concordantes entre si dentro de $\pm 3\%$ ⁽¹⁶⁾.

4.2. Camada semi-redutora

Foram feitas as medidas para a determinação da camada semi-redutora nas mesmas condições em que a câmara de ionização tipo padrão secundário havia sido calibrada no Laboratório de Padronização Primária (NPL, Inglaterra). A câmara foi posicionada no ar, à distância de 50 cm de foco do tubo de raios X, para as seguintes combinações de diferença de potencial e filtro adicional: 25 kV e 0,45 mm de Al, 40 kV e 0,69 mm de Al e 50 kV e 1,01 mm de Al. Para cada caso, mediu-se a transmissão do feixe com três colimadores de diâmetros diferentes, como já foi explicado no item 3.3.

A tabela 4.1. apresenta os resultados dos valores da primeira e segunda camadas semi-redutoras, obtidos para 25; 40 e 50 kV, em função dos diferentes diâmetros de colimadores utilizados. Observa-se que a diferença no valor das camadas semi-redutoras, para cada um dos colimadores em questão, não é grande (variação máxima de 3,0%, para o caso de 50 kV). Para explicar este fato, basta lembrar que no caso de raios X de energia baixa, o principal mecanismo de interação da radiação com a matéria é o efeito fotoelétrico; portanto a probabilidade de um fóton interagir com os elétrons dos átomos do meio absorvedor (alumínio) e ser espalhado é

TAB.- 4.1.- Camadas semi-redutoras (CSR) para diferentes valores de diâmetro de colimador.

1.- diferença de potencial: 25 kV
 filtro adicional: 0,45 mm de Al

diâmetro do colimador (cm)	1a. CSR (mm de Al)	2a. CSR (mm de Al)
1,97	0,261	0,387
2,63	0,262	0,388
4,38	0,262	0,390

2.- diferença de potencial: 40 kV
 filtro adicional: 0,69 mm de Al

diâmetro do colimador (cm)	1a. CSR (mm de Al)	2a. CSR (mm de Al)
1,97	0,589	0,953
2,63	0,590	0,955
4,38	0,599	0,959

3.- diferença de potencial: 50 kV
 filtro adicional: 1,01 mm de Al

diâmetro do colimador (cm)	1a. CSR (mm de Al)	2a. CSR (mm de Al)
1,97	0,922	1,463
2,63	0,943	1,466
4,38	0,950	1,500

pequena.

4.3. Método de correção para obtenção da camada semi-redutora

A câmara de ionização do tipo padrão secundário, utilizada para as medidas de camada semi-redutora, apresenta uma dependência energética muito grande. Para feixes de radiação X com camada semi-redutora entre 0,024 e 1,00 mm de Al, a variação máxima da resposta da câmara é de 8%. Portanto, foi necessária a aplicação de certos fatores de correção às leituras observadas com a câmara de ionização levando-se em conta a variação de sua resposta, à medida que os absorvedores de alumínio utilizados para a determinação da camada semi-redutora iam sendo interpostos na trajetória do feixe de radiação, causando uma alteração em sua energia equivalente.

O método de correção desenvolvido neste trabalho supõe que a curva de calibração do dosímetro seja muito bem conhecida. Na figura 4.4. tem-se a curva de calibração da câmara de ionização 2536/3B (padrão secundário), dada em termos dos fatores de calibração em função de diversos valores de camada semi-redutora. Com auxílio desta curva é possível fazer com que a leitura observada experimentalmente seja convertida no valor real da exposição.

Inicialmente, é necessária a obtenção da curva de transmissão das leituras observadas sem correções em função da espessura dos absorvedores de alumínio interpostos na trajetória do feixe. A seguir, uma série de camadas semi-re-

fator de
calibração (R/dig.)

eletrômetro
tipo: 2560
série nº 139

câmara de ionização
tipo: 2536/3B
série: R 17135 B

T = 20°C p = 760 mm de Hg U.R. do ar = 50 %

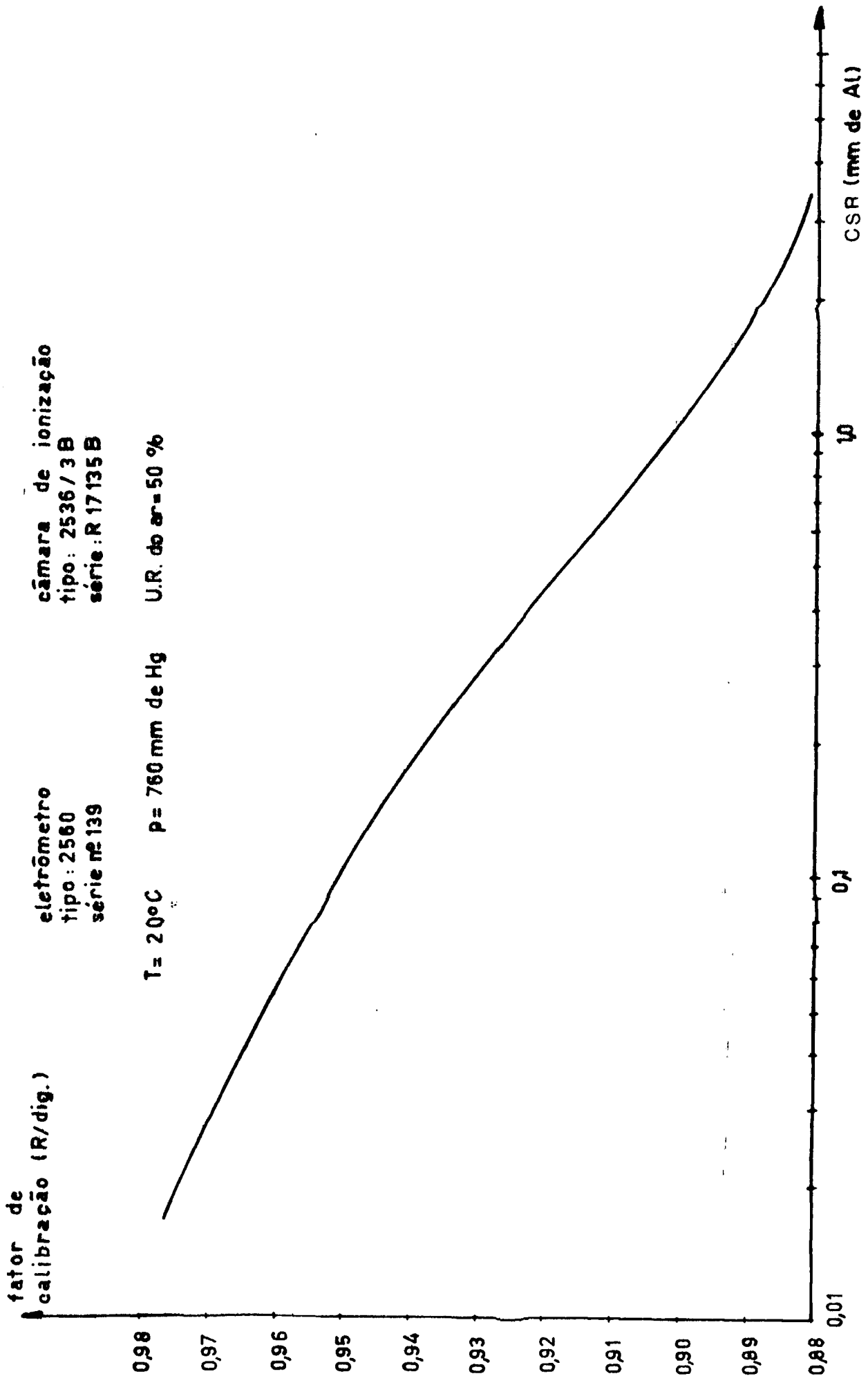


FIG. 4.4 - DEPENDÊNCIA ENERGÉTICA DA CÂMARA DE IONIZAÇÃO TIPO 2536/3B

dutoras aparentes é determinada, para as diferentes espessuras de absorvedores. Os fatores de calibração, correspondentes a estas camadas semi-redutoras, são então obtidos da curva de calibração do dosímetro e aplicados às leituras observadas experimentalmente. Obtém-se assim uma segunda curva de transmissão, dada em termos da taxa de exposição em função das espessuras dos absorvedores. Esta curva fornece, por sua vez, o valor real da camada semi-redutora, considerando-se as variações na resposta da câmara, devido às alterações da energia equivalente do feixe.

No presente trabalho, a primeira etapa para a determinação destas camadas semi-redutoras aparentes constituiu-se de um ajuste, pelo método dos mínimos quadrados, usando-se um programa SAS ("STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM") (24), das leituras observadas com a câmara de ionização (normalizadas em relação às da câmara de transmissão) em função das espessuras dos absorvedores.

O melhor ajuste foi o de um polinômio do terceiro grau, ou seja, uma equação da forma:

$$\ln\left(\frac{y_i}{y_t}\right) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$$

sendo:

y_i : leitura observada com a câmara de ionização

y_t : leitura observada com a câmara de transmissão

x : espessura dos absorvedores em mm de Al.

a_0, a_1, a_2, a_3 : coeficientes

Na tabela 4.2., tem-se como exemplo os coefici-

entes da equação; determinados para a condição de diferença de potencial de 25 kV e filtro adicional de 0,45 mm de Al, para cada um dos colimadores usados na determinação da camada semi-redutora.

Com as equações resultantes, foi possível a obtenção do coeficiente de atenuação linear para cada ponto experimental em questão. A partir destes dados, foram determinados os valores das camadas semi-redutoras aparentes necessários para a obtenção dos fatores de calibração.

A etapa seguinte constituiu-se de um ajuste semelhante ao anterior, da curva de calibração da câmara de ionização tipo padrão secundário. Neste caso, o melhor ajuste foi o de um polinômio de segundo grau, ou seja, uma equação da forma:

$$f_{C_i} = a'_0 + a'_1 (\ln C_i) + a'_2 (\ln C_i)^2$$

f_{C_i} : fator de calibração para uma determinada camada semi-redutora aparente i .

C_i : camada semi-redutora aparente.

a'_0, a'_1, a'_2 : coeficientes.

Na tabela 4.3., tem-se a relação dos coeficientes a'_0, a'_1 e a'_2 . Usando-se esta equação e os valores das camadas semi-redutoras aparentes obtidos anteriormente para cada espessura de absorvedor, determinou-se os fatores de calibração para cada ponto.

Finalmente, foi feito um ajuste do comportamento do logaritmo das leituras obtidas com a câmara de ioniza-

TAB.- 4.2.- Coeficientes da equação $\ln\left(\frac{Y_i}{Y_t}\right) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3$ para a diferença de potencial de 25 kV e filtro adicional de 0,45 mm de Al.

1.-) a_0

diâmetro do colimador (cm)	coeficiente (adimensional)
1,97	- (2,875 \pm 0,001)
2,63	- (2,863 \pm 0,002)
4,38	- (2,845 \pm 0,004)

2.-) a_1

diâmetro do colimador (cm)	coeficiente (mm) ⁻¹
1,97	- (3,188 \pm 0,010)
2,63	- (3,165 \pm 0,011)
4,38	- (3,165 \pm 0,025)

3.-) a_2

diâmetro do colimador (cm)	coeficiente (mm) ⁻²
1,97	(2,343 \pm 0,016)
2,63	(2,263 \pm 0,019)
4,38	(2,250 \pm 0,040)

4.-) a_3

diâmetro do colimador (cm)	coeficiente (mm) ⁻³
1,97	- (1,118 \pm 0,007)
2,63	- (1,086 \pm 0,008)
4,38	- (1,003 \pm 0,017)

Tabela 4.3. - Relação dos coeficientes a'_0 , a'_1 e a'_2 da

$$\text{equação: } f_{c_i} = a'_0 + a'_1 (\ln C_i) + a'_2 (\ln C_i)^2$$

	coeficientes (R/dígito)	incerteza (R/dígito)
a'_0	0,905	0,001
a'_1	- 0,020	0,002
a'_2	0,001	$5,47 \times 10^{-4}$

ção, normalizadas em relação às da câmara de transmissão multiplicadas pelos fatores de calibração correspondentes a cada espessura de absorvedor, em função desta última. Neste caso, o melhor ajuste encontrado foi novamente um polinômio de terceiro grau, isto é, uma equação da forma:

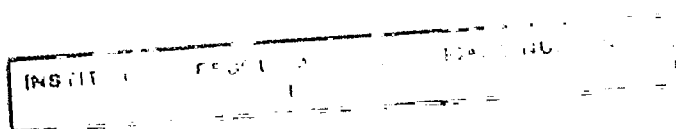
$$\ln \left(\frac{y_i \cdot f_{c_i}}{y_t} \right) = a''_0 + a''_1 x + a''_2 x^2 + a''_3 x^3$$

sendo:

f_{c_i} : o fator de calibração obtido para cada espessura (x) do material absorvedor

$a''_0, a''_1, a''_2, a''_3$: coeficientes

Por meio destas equações, determinou-se finalmen



te a espessura do material absorvedor necessária para reduzir a taxa de exposição à metade de seu valor inicial, ou seja, a camada semi-redutora, para cada condição de interesse.

A tabela 4.4. mostra os resultados dos valores corrigidos e os não corrigidos das camadas semi-redutoras obtidas para cada uma das qualidades utilizadas do feixe de radiação, usando-se diferentes colimadores. Na tabela 4.5., tem-se os resultados finais da primeira e segunda camadas semi-redutoras, determinadas por meio do método de extrapolação para o campo de diâmetro igual a zero, descrito no item 3.3.

Observa-se que a diferença percentual (ΔCSR) entre o valor corrigido e o não corrigido é mais significativa para energias baixas, como consequência da resposta da câmara de ionização depender com a energia equivalente do feixe de radiação de forma mais pronunciada nesta região.

Os valores das camadas semi-redutoras para as condições tanto de 40 kV e filtro adicional de 0,69 mm de Al e de 50 kV e filtro adicional de 1,01 mm de Al, determinados após as correções adequadas, mostraram-se discordantes em relação ao fornecidos pelo Laboratório de Padronização Primária (NPL). Enquanto os valores corrigidos, de primeira camada semi-redutora, obtidos no presente trabalho sob as condições descritas (25, 40 e 50 kV) foram de 0,249; 0,556 e 0,878 mm de Al, os fornecidos pelo Laboratório Primário foram de 0,25; 0,50 e 1,00 mm de Al. Pode-se notar respectivamente, diferenças de 0,40, 10,07 e 13,90% entre eles.

Para que o valor da camada semi-redutora não diferisse mais do que 2%⁽⁵⁾ do valor encontrado pelo Laboratório Primário, a espessura dos filtros adicionais foi ajusta-

TAB.- 4.4.- Camadas semi-redutoras não corrigidas e corrigidas para as diferentes qualidades do feixe de radiação utilizadas, em função dos diâmetros dos colimadores.

a.-) diferença de potencial: 25 kV
 filtro adicional: 0,45 mm de Al

diâmetro do colimador (cm)	1a. CSR (mm de Al)		2a. CSR (mm de Al)	
	não corrigida	corrigida	não corrigida	corrigida
1,97	0,261	0,254	0,387	0,378
2,63	0,262	0,255	0,388	0,378
4,38	0,262	0,259	0,390	0,385

b.-) diferença de potencial: 40 kV
 filtro adicional: 0,69 mm de Al

diâmetro do colimador (cm)	1a. CSR (mm de Al)		2a. CSR (mm de Al)	
	não corrigida	corrigida	não corrigida	corrigida
1,97	0,589	0,567	0,953	0,936
2,63	0,590	0,568	0,955	0,939
4,38	0,599	0,579	0,959	0,948

c.-) diferença de potencial: 50 kV
 filtro adicional: 1,01 mm de Al

diâmetro do colimador (cm)	1a. CSR (mm de Al)		2a. CSR (mm de Al)	
	não corrigida	corrigida	não corrigida	corrigida
1,97	0,922	0,901	1,463	1,410
2,63	0,943	0,907	1,466	1,426
4,38	0,950	0,928	1,500	1,430

TAB.- 4.5.- Camadas semi-redutoras obtidas para o campo de diâmetro igual a zero.

diferença de potencial (kV)	filtro adicional (mm de Al)	1a. CSR (mm de Al)		Δ CSR (%)
		não corrigida	corrigida	
25	0,45	(0,261 \pm 0,005)	(0,249 \pm 0,005)	4,60
40	0,69	(0,580 \pm 0,006)	(0,556 \pm 0,005)	4,14
50	1,01	(0,909 \pm 0,018)	(0,878 \pm 0,016)	3,41

diferença de potencial (kV)	filtro adicional (mm de Al)	2a. CSR (mm de Al)		Δ CSR (%)
		não corrigida	corrigida	
25	0,45	(0,385 \pm 0,010)	(0,371 \pm 0,009)	3,64
40	0,69	(0,949 \pm 0,009)	(0,926 \pm 0,009)	2,42
50	1,01	(1,427 \pm 0,019)	(1,402 \pm 0,018)	1,75

da da maneira descrita a seguir, até encontrar-se o valor conveniente.

Inicialmente, foram realizadas as medidas de camada semi-redutora para 25; 40 e 50 kV, variando-se a espessura dos filtros adicionais entre 0,45 e 1,01 mm de Al. Neste caso, também foram aplicados os devidos fatores de correção às leituras observadas experimentalmente, em função das espessuras dos absorvedores, como descrito anteriormente.

Na figura 4.5., pode-se ver o comportamento dos valores da camada semi-redutora corrigida, em função da espessura do filtro adicional. Observa-se que quanto maior a espessura dos filtros adicionais, maior é o valor da camada semi-redutora. Este tipo de comportamento já era esperado pois, quando feixes heterogêneos são filtrados, existe uma predominância de absorção dos fótons de energia baixa, deixando o feixe de raios X resultante mais penetrante. Por conseguinte, o valor da camada semi-redutora aumenta.

Pela figura 4.5., pode-se verificar que a espessura do filtro adicional, necessária para se obter o valor da camada semi-redutora igual a 0,50 mm de Al (40 kV); 1,00 mm de Al (50 kV) e 0,25 mm de Al (25 kV), é de 0,62; 1,15 e 0,45 mm de Al respectivamente.

Usando-se estes resultados, foi também possível a determinação da filtração fixa do sistema de calibração, definida no item 3.4.. Dentro do erro experimental, os valores da filtração fixa para 25; 40 e 50 kV mostraram-se semelhantes. A filtração fixa do sistema de calibração é determinada para o ponto de camada semi-redutora igual a zero (vide figura 4.5.), independendo portanto da energia do feixe de

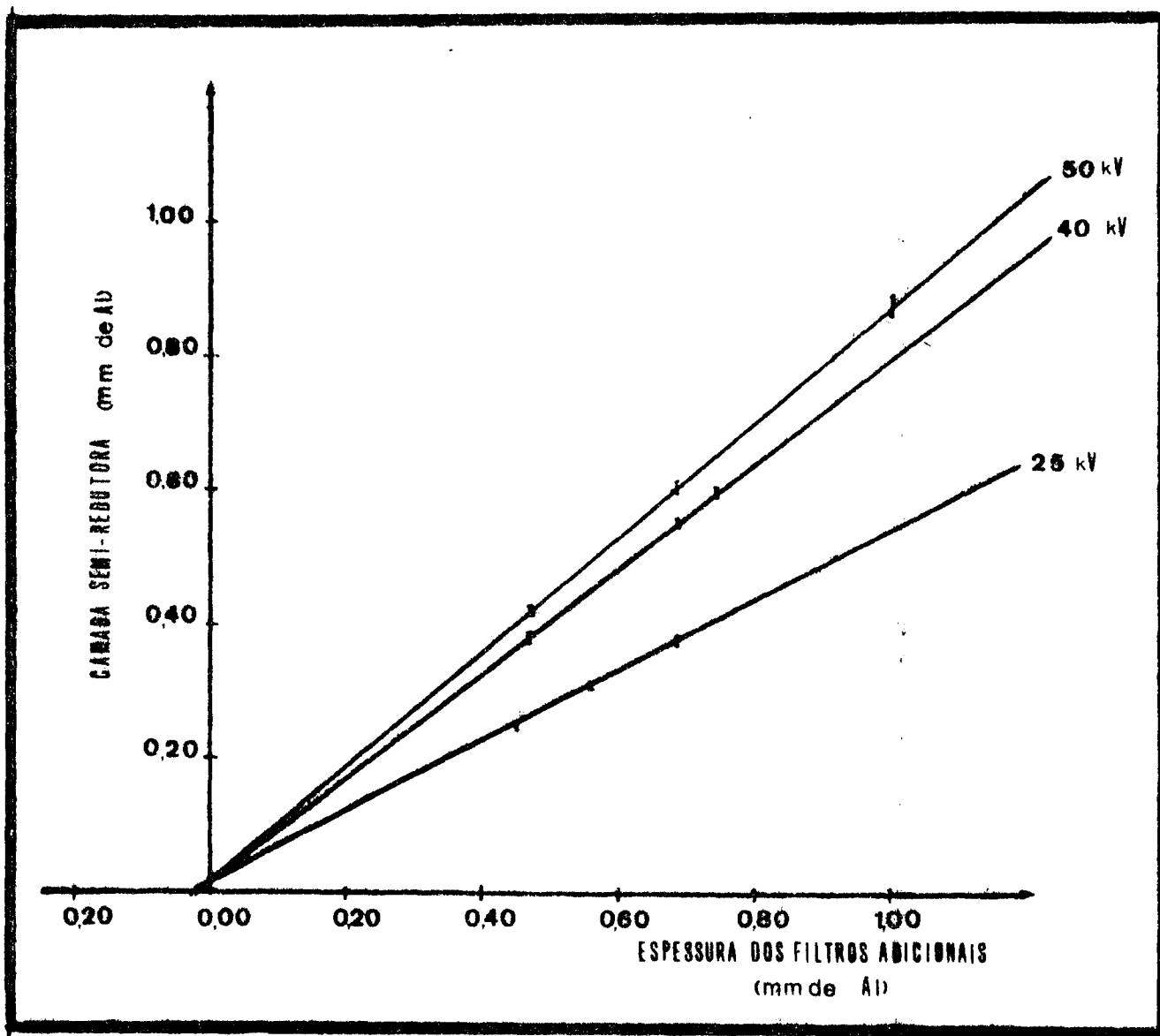


FIG.4.5 - Variação da camada semi-redutora com a espessura dos filtros adicionais

radiação. Logo esses valores devem ser realmente muito próximos. A seguir, tem-se a relação dos valores desta filtração, obtidos para cada valor de diferença de potencial aplicada entre os eletrodos do tubo de raios X.

1) 25 kV: $(0,024 \pm 0,018)$ mm de Al

2) 40 kV: $(0,022 \pm 0,017)$ mm de Al

3) 50 kV: $(0,022 \pm 0,024)$ mm de Al

Com os novos valores de espessura dos filtros adicionais, mediu-se novamente a camada semi-redutora para 40 kV e 50 kV utilizando-se os três colimadores de diâmetros de 1,97; 2,63 e 4,38 cm. Verificou-se que os valores de camada semi-redutora encontrados com as novas espessuras de filtro adicional mostraram-se concordantes com os encontrados pelo Laboratório Primário (vide tabela 3.2.). Na tabela 4.6., tem-se os resultados finais dos parâmetros necessários para caracterizar o feixe de radiação.

4.4. Distribuição espectral do feixe de radiação

Mediu-se o espectro de energia do feixe de raios X com um detector de NaI(Tl), sob as mesmas condições usadas na determinação da camada semi-redutora com a câmara de ionização tipo padrão secundário.

Nas figuras 4.6. e 4.7., são mostradas as distribuições espectrais do feixe não corrigidas para a eficiência do detector de NaI(Tl), com o sistema de raios X operando a 50 kV e a 25 kV, para as diferentes espessuras de absorvedores de alumínio utilizadas na determinação da camada se

TAB. - 4.6. - Parâmetros necessários para caracterização do feixe de raios X

di ferença de poten- cial nominal (kV)	filtro adicional (mm de Al)	1a. CSR (mm de Al)	2a. CSR (mm de Al)	energia equivalente (keV)	coeficiente de homogeneidade (h)
25	0,45	(0,249 ± 0,005)	(0,371 ± 0,009)	14	(0,67 ± 0,02)
40	0,62	(0,504 ± 0,005)	(0,786 ± 0,009)	18	(0,64 ± 0,01)
50	1,15	(1,008 ± 0,010)	(1,583 ± 0,011)	24	(0,637 ± 0,008)

mi-redutora, e com apenas o filtro adicional. Para 50 kV, as descontinuidades observadas no espectro de energia, nas regiões de 3 a 5 keV e de 30 a 50 keV, podem ser explicadas levando-se em conta que nestas regiões ocorrem variações no coeficiente de absorção de energia do iodo, dada a existência do degrau de absorção L (3,93 a 5,19 keV) e K (28,32 a 36,16 keV). Para 25 kV, apenas com a filtração inerente do sistema experimental, pode-se também observar uma descontinuidade no espectro na região de 3 a 5 keV, podendo ser explicada pelo mesmo motivo visto acima.

Pelas figuras 4.6 e 4.7 é possível observar que com o aumento da espessura dos absorvedores, os fótons de energia baixa são eliminados do feixe, causando uma modificação acentuada na forma do espectro. Conseqüentemente, a energia média do feixe tende a aumentar, resultando em um feixe de radiação mais penetrante.

Para a determinação da energia máxima do feixe de radiação, mediu-se o espectro de energia para vários valores de diferença de potencial aplicada ao tubo de raios X. O valor da energia máxima foi obtido como descrito no ítem 3.5..

Na figura 4.8., tem-se a relação entre as energias máxima e nominal, para os diferentes valores de diferença de potencial em que os espectros de energia foram medidos. Pode-se observar que todos os valores, com exceção do correspondente ao 50 keV, estão deslocados de pelo menos 1 keV.

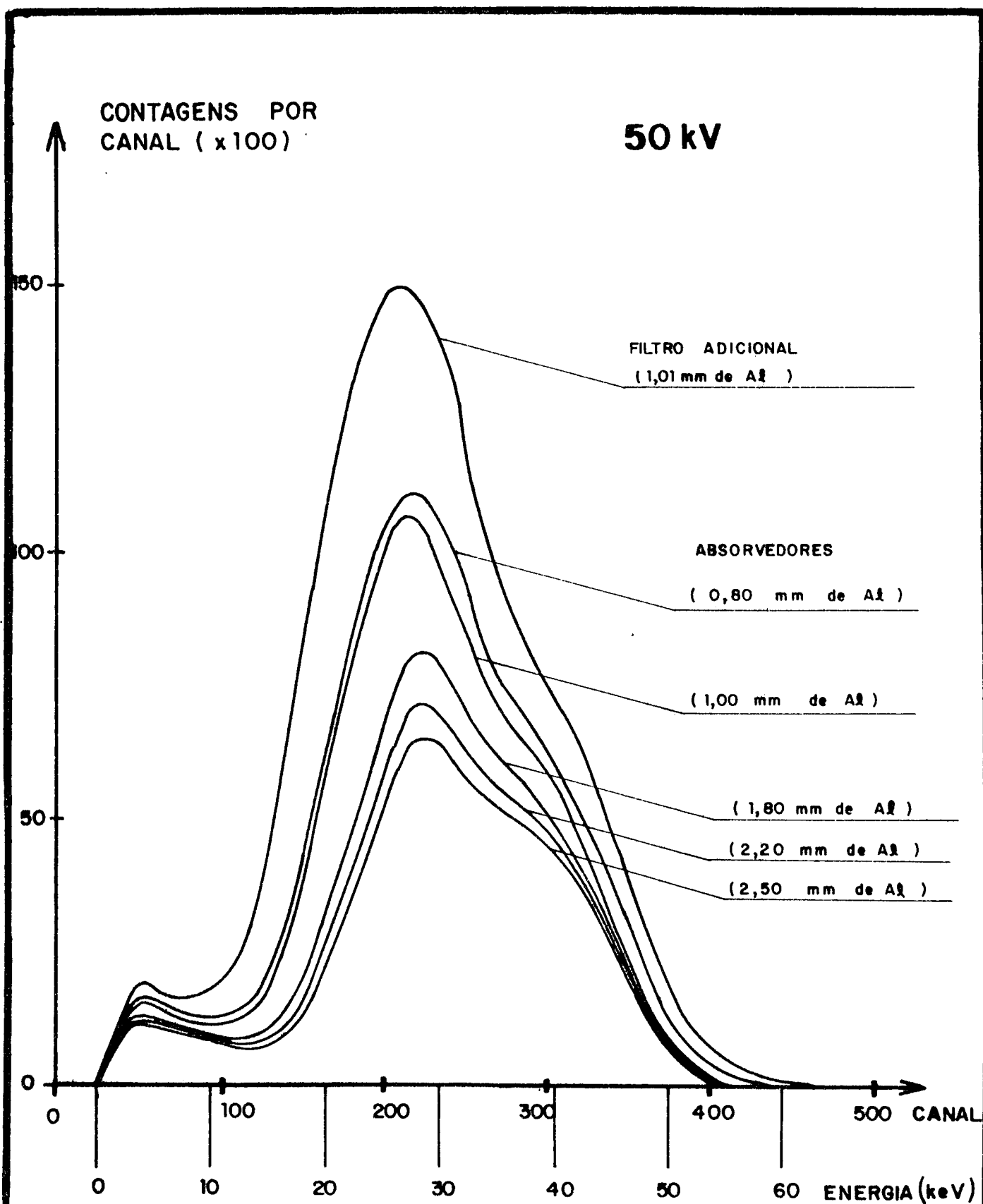


FIG.4.6- ESPECTRO DE ENERGIA DO FEIXE DE RAIOS X.

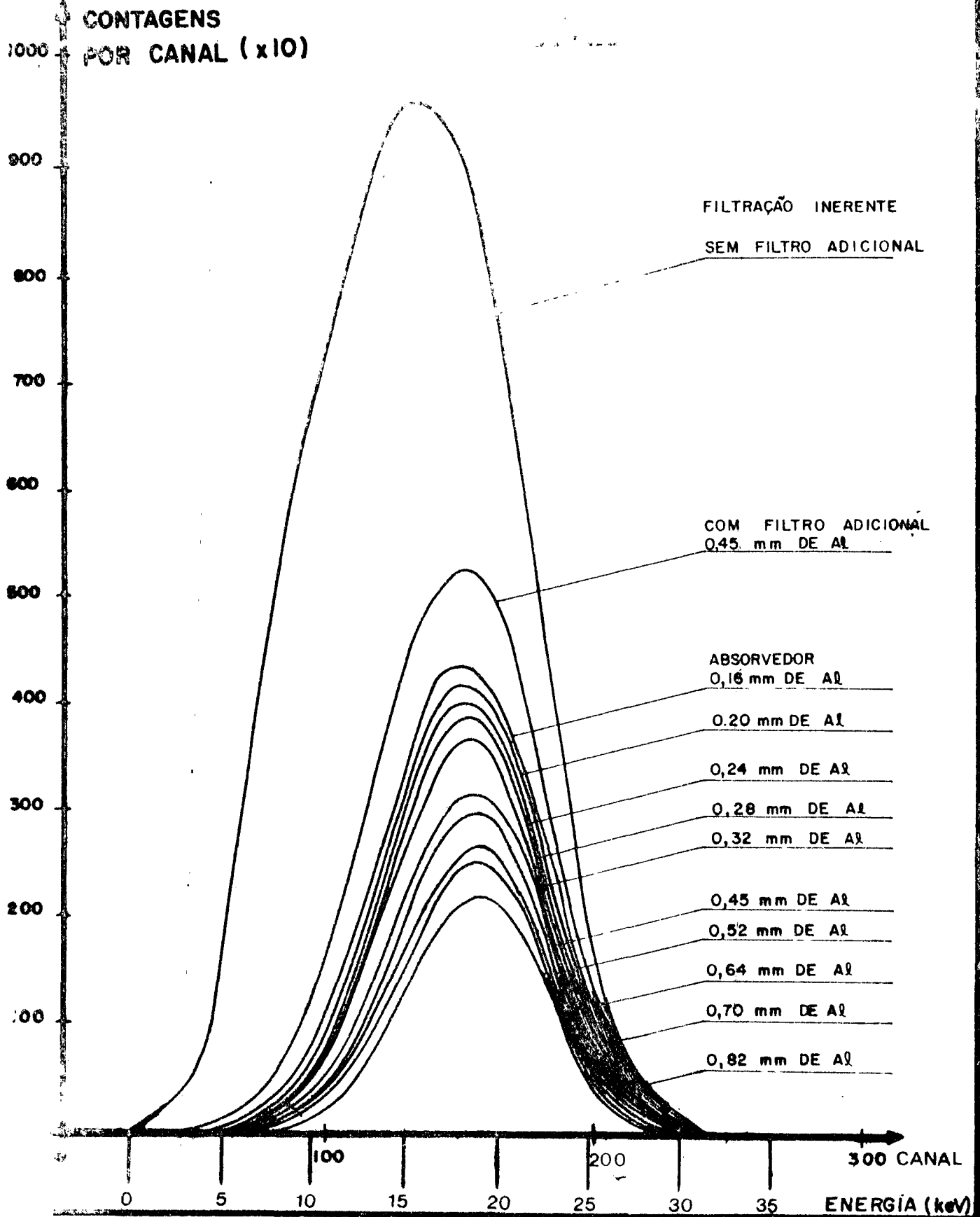


FIG 4.7 – ESPECTRO DE ENERGIA DO FEIXE DE RAIOS X

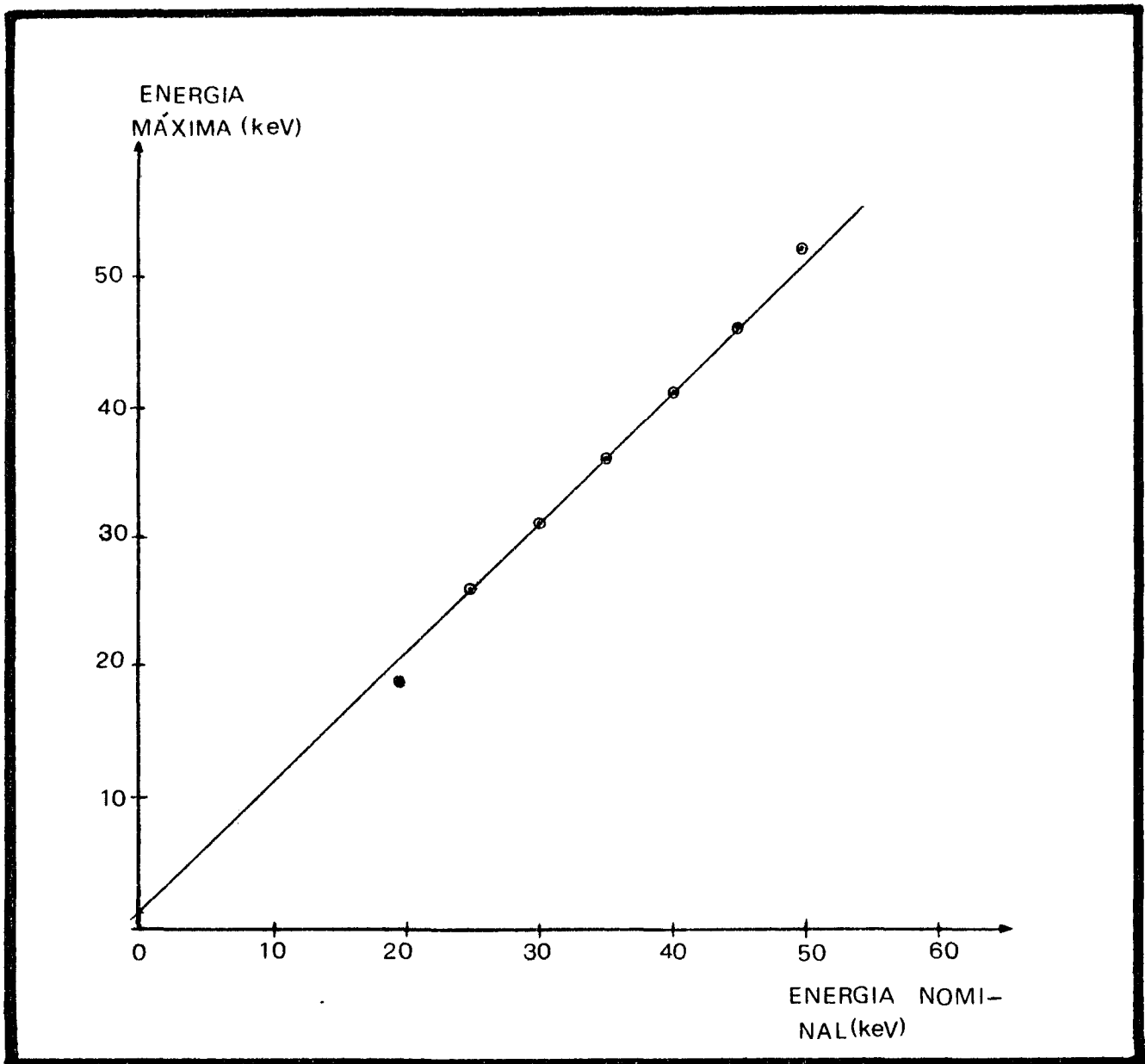


Fig. 4.3 - Relação entre a energia máxima e a energia nominal do feixe de radiação X.

4.5. Taxa de exposição

Uma vez estabelecidas as características do feixe de raios X, mediu-se a sua taxa de exposição para diversos valores de diferença de potencial e corrente do tubo, sem filtro adicional. As medidas foram feitas com câmara de ionização tipo padrão secundário, posicionada no ar, à distância de 50 cm do foco.

Verificou-se que a variação da taxa de exposição com a diferença de potencial e com a corrente do tubo de raios X pode ser expressa pela seguinte relação:

$$\bar{x} = \frac{1,24 \times 10^{-3} (\Delta V)^{1,5} I}{d^2}, \text{ sendo}$$

\bar{x} = a taxa de exposição em (C/kg)/s

ΔV : a diferença de potencial aplicada entre os eletrodos do tubo de raios X expressa em kilovolts.

I: a corrente do tubo expressa em miliamperes.

d: a distância entre a câmara de ionização e o foco de raios X expressa em centímetros.

4.6. Testes efetuados antes da calibração da câmara de ionização 2532/3 (padrão terciário)

4.6.1. - Resultados dos testes efetuados com a câmara de ionização tipo padrão secundário

a) Tempo de estabilização

Para uma diferença de potencial de -200 V, o limite máximo de variação da resposta da câmara foi de 0,08% após 30 minutos.

b) Corrente de fuga da câmara de ionização

Para uma diferença de potencial de -200 V, a contribuição da corrente de fuga em relação à corrente de ionização obtida com a câmara de ionização submetida à radiação proveniente da fonte de controle de ^{90}Sr de $1,11 \times 10^7 \text{Bq}$ (0,3 mCi) foi de 0,15 %.

c) Corrente de fuga no eletrômetro

A contribuição da corrente de fuga em relação à corrente de ionização obtida com a câmara de ionização submetida à radiação foi de 0,39%.

d) Estabilidade a curto prazo

A tabela 4.7 apresenta os resultados da estabilidade a curto prazo, medida com a câmara de ionização tipo padrão secundário.

e) Estabilidade a longo prazo

Na figura 4.9, tem-se os valores médios para todos os grupos de medida da estabilidade a longo prazo, obtida durante um período de 12 meses.

Tabela 4.7. - Resultado do teste de estabilidade a curto prazo da câmara de ionização tipo padrão secundário

número de medidas (n)	tempo médio (s)	desvio padrão da média (s)	limites de confiança
10	129,95	0,05	(129,95 ± 0,15)

4.6.2. - Resultados dos testes efetuados com a câmara de ionização tipo 2532/3 (padrão terciário).

a) Tempo de estabilização

Para uma diferença de potencial de -300 V, o limite máximo de variação na resposta da câmara foi de 0,5%.

b) Corrente de fuga na câmara de ionização.

Para uma diferença de potencial de -300V, a contribuição da corrente de fuga em relação à corrente de ionização obtida com a câmara de ionização submetida à radiação proveniente da fonte de controle de ^{90}Sr , de $3,33 \times 10^7$ Bq (0,9 mCi) foi de 0,3%.

c) Corrente de fuga de eletrômetro

A contribuição da corrente de fuga em relação à

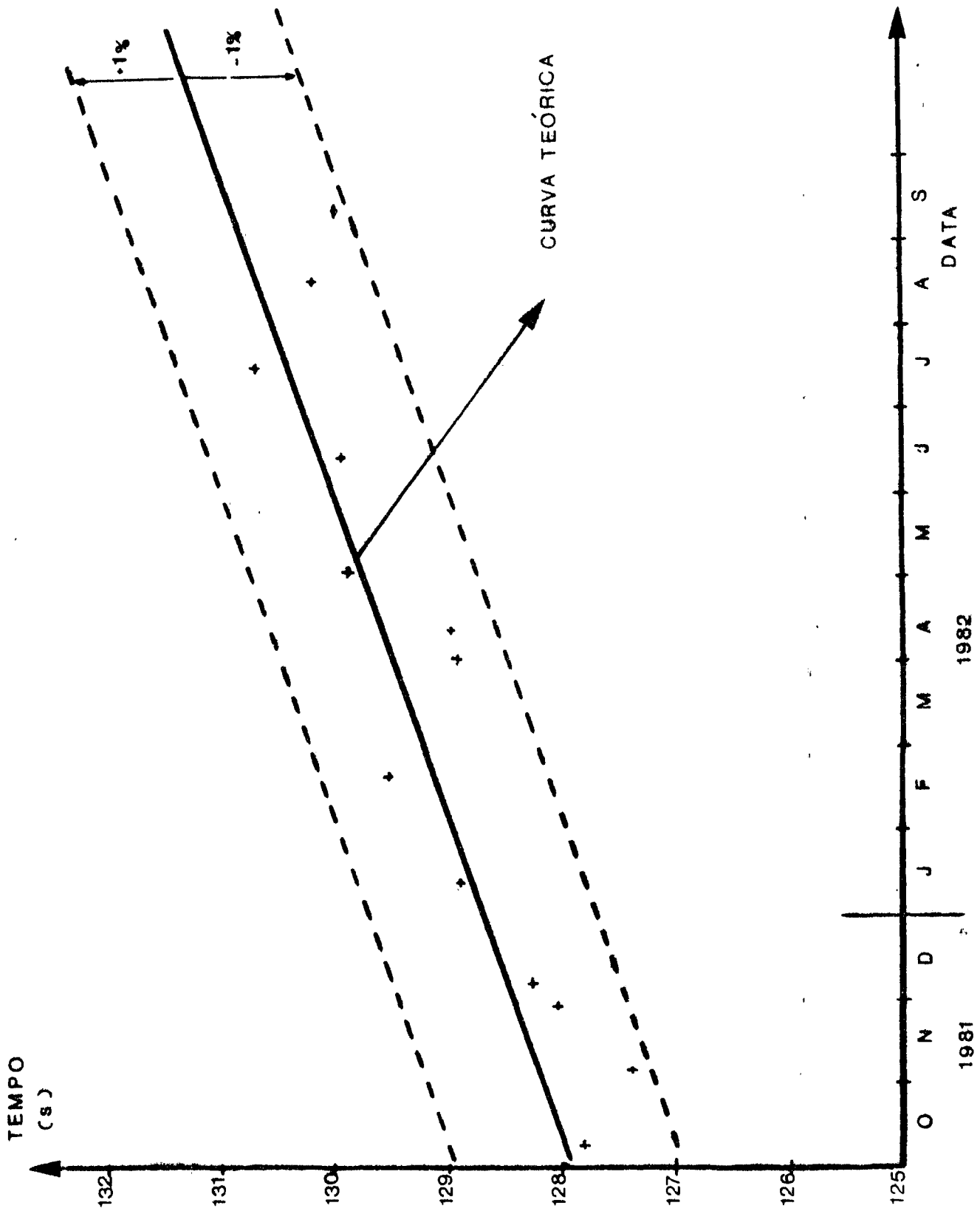


FIG. 4.9 - ESTABILIDADE A LONGO PRAZO DA CÂMARA 2536/3B

corrente de ionização observada com a câmara de ionização e com a fonte de controle foi de 0,5%.

d) Estabilidade a curto prazo

Na tabela 4.8, tem-se os resultados da estabilidade a curto prazo, medida com a câmara de ionização tipo 2532/3 (padrão terciário).

Tabela 4.8 - Estabilidade a curto prazo da câmara de ionização tipo 2532/3 (padrão terciário)

número de medidas (n)	tempo médio (s)	desvio padrão da média (s)	limites de confiança
10	126,33	0,16	(126,33 \pm 0,45)

4.6.3. - Fatores de Calibração

A tabela 4.9. apresenta os fatores de calibração da câmara de ionização tipo 2532/3 (padrão terciário), para as diferentes qualidades do feixe de radiação, e na tabela 4.10 tem-se uma comparação entre os fatores de calibração obtidos no presente trabalho e os fornecidos pelo fabricante (Nuclear Enterprises Ltd.).

TAB. - 4.9 - Fatores de calibração da câmara de ionização 2532/3 (padrão terciário)

Qualidade do feixe		CSR (mm de Al)	Eeq (keV)	DFC (cm)	D (cm)	fc (R/dfigito)	μ (%)
V (kV)	a (mm de Al)						
25	0,45	0,25	14	50	7,0	0,99	2,2
40	0,62	0,50	18	50	7,0	1,02	2,1
50	1,15	1,00	24	50	7,0	1,03	1,8

V - diferença de potencial nominal

a - filtração adicional

CSR - Camada semi-redutora

Eeq - energia equivalente

DFC - distância foco-câmara

D - diâmetro do campo de radiação no local de medida

fc - fator de calibração

μ - erro percentual de fc devido ao procedimento de calibração

TAB. 4.10 - Comparação entre os fatores de calibração da câmara de ionização 2532/3 (padrão terciário) obtidos no presente trabalho e os fornecidos pelo fabricante (Nuclear Enterprises Ltd).

Camada semi-redutora (mm de Al)	Fator de calibração (R/dígito) IPEN	Fator de calibração (R/dígito) Nuclear Enterprises Ltd.	Variação máxima (%)
0,25	0,99	0,996	0,61
0,50	1,02	1,008	1,18
1,00	1,03	1,024	0,58

CONCLUSÃO GERAL

Verificou-se que um erro relativamente grande pode ser introduzido na determinação da camada semi-redutora com dosímetros cuja resposta dependa acentuadamente da qualidade de um feixe de radiação. Para minimizar este erro é necessário a aplicação de certos fatores de correção que levem em conta esta dependência energética. A amplitude destes fatores de correção irá depender das características da câmara de ionização usada para as medidas de camada semi-redutora. Para o dosímetro utilizado no presente trabalho (câmara de ionização superficial tipo 2536/3B associada a um eletrômetro tipo 2560, ambos da Nuclear Enterprises Ltd.), observou-se que a variação máxima entre o valor corrigido e o não corrigido da camada semi-redutora pode ser até de 4,60%.

Como foi visto, a determinação da taxa de exposição (expressa em (C/kg)/s) e conseqüentemente da dose absorvida em um certo material de interesse baseia-se no conhecimento da curva de calibração de um dosímetro, ou seja, do seu fator de calibração em função da camada semi-redutora medida para diversos valores de energia de um feixe de raios X. Logo, um erro da ordem de 5% no valor da camada semi-redutora pode não ser aceito, dependendo das aplicações a que se destinam esse feixe.

A técnica de correção apresentada no presente

trabalho, em combinação com o método de determinação da camada semi-redutora (método da extrapolação para um campo de diâmetro igual a zero), pode ser usada para fornecer a precisão necessária com a qual a camada semi-redutora para feixes de energia baixa deve ser obtida e mostrou resultados altamente satisfatórios.

APÊNDICE A

Incerteza associada ao fator de calibração

O fator de calibração (f_c) é obtido a partir do valor médio de uma série de medidas corrigidas para um certo número de efeitos sistemáticos conhecidos. A incerteza⁽⁵⁾ no fator de calibração é dada, por sua vez, em termos da combinação das incertezas sistemáticas e estatísticas envolvidas nas medidas, nas constantes físicas e nos fatores de conversão que contribuem para a sua determinação. No presente trabalho, tem-se:

1) Incertezas sistemáticas (Δx_j) associadas aos diversos fatores físicos que contribuem para a obtenção do fator de calibração:

	$\pm \Delta x_j$ (%)
a) incerteza sistemática associada ao fator de calibração do padrão secundário	1,5
b) correção para a densidade do ar	0,1
c) determinação da distância do foco à câmara	0,2
d) variação na taxa de exposição devido à incerteza na distância	0,4

2) Erro estatístico associado à determinação do fator de calibração.

O fator de calibração (f_{c_T}) é dado por:

$$f_{c_T} = \frac{R_S}{R_T} \times f_{c_S}$$

onde:

R_S : valor médio das leituras obtidas com a câmara de ionização do tipo padrão secundário, normalizadas em relação às da câmara de transmissão.

R_T : valor médio das leituras obtidas com a câmara de ionização tipo padrão terciário (câmara de ionização tipo 2532/3) sob teste, normalizadas em relação às da câmara de transmissão.

f_{c_S} : fator de calibração da câmara de ionização do tipo padrão secundário.

f_{c_T} : fator de calibração da câmara de ionização do tipo padrão terciário, a ser determinado.

O desvio padrão relativo ($\frac{\sigma_{f_{c_T}}}{f_{c_T}}$) associado ao fa

tor de calibração da câmara de ionização tipo padrão terciário é dado por:

$$\frac{\sigma_{f_{c_T}}}{f_{c_T}} = \left\{ \left(\frac{\sigma_S}{R_S} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{R_T} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{f_{c_S}}}{f_{c_S}} \right)^2 \right\}^{1/2}$$

A incerteza no fator de calibração emitido pelo Laboratório de Padronização Primária é de 0,7% para um nível

de confiança de 99%, ou:

$$\sigma(f_{c_S}) = 0,0023 \text{ R/dígito}$$

σ_S : desvio padrão das leituras obtidas com a câmara de ionização do tipo padrão secundário, durante o procedimento da calibração, para as diferentes qualidades do feixe de radiação de interesse

σ_T : desvio padrão das leituras obtidas com a câmara da ionização do tipo padrão terciário.

O erro percentual (μ) associado ao fator de calibração (f_{c_T}) é dado por:

$$\mu = ((tv)^2 + 1,13 \sum_{j=1}^4 (\Delta x_j)^2)^{1/2}$$

sendo:

t: fator de Student. Para um nível de confiança de 95% e um número de medidas (n) igual a 5, $t = 2,8$.

v: desvio padrão relativo da média, em percentagem.

$$v = \frac{\sigma_{f_{c_T}} \cdot 100}{f_{c_T} \sqrt{n}}$$

onde n é o número de leituras obtidas com a câmara de ionização tipo padrão terciário.

APÊNDICE B

Correção no fator de calibração para as condições ambientais.

Em geral as câmaras de ionização não são seladas. A leitura do instrumento correspondente a uma determinada exposição depende, portanto, das condições ambientais, ou seja, da pressão atmosférica e da temperatura ambiente. Esses dois parâmetros controlam a massa de gás existente no interior deste tipo de câmara de ionização. Logo, o fator de calibração (fc) só pode ser aplicado diretamente sob as condições de calibração. Se as medidas de corrente de ionização forem realizadas a uma pressão e a temperatura diferentes dos valores usados durante a calibração, será necessário aplicar-se uma correção da forma:

$$I_{P_0, T_0} = I_{P, T} \cdot \phi(P, T)$$

onde,

$$\phi(P, T) = \frac{P_0}{P} \cdot \frac{(T + 273,15)}{(T_0 + 273,15)}$$

P₀: pressão de referência

T₀: temperatura de referência

P: pressão ambiente

T: temperatura ambiente

I_{P_0, T_0} : valor corrigido da leitura observada $I_{P, T}$ do instrumento.

As condições de referência utilizadas no presente trabalho foram: $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$ e $P_0 = 760$ mm de Hg.

Portanto, tem-se:

$$I_{P_0, T_0} = I_{P, T} \frac{760}{P} \cdot \frac{T + 273,15}{293,15}$$

O barômetro utilizado para o controle da pressão ambiente foi do tipo "coluna de mercúrio", necessitando portanto de correção tanto para a aceleração da gravidade local como para a dilatação do mercúrio.

Para essa correção usa-se a expressão⁽²⁹⁾:

$$P_c = P_{at} (1 - 0,0019 - 0,00018 \theta)$$

Sendo:

P_{at} : altura da coluna do mercúrio medida no barômetro

P_c : altura da coluna de mercúrio corrigida, ou seja, altura que seria obtida se a temperatura da coluna fosse de 0°C e a aceleração da gravidade fosse de $980,665 \text{ cm/s}^2$.

θ : temperatura da coluna de mercúrio

O termo 0,0019 leva em conta o efeito da latitu

de e da altitude de São Paulo, para o valor da aceleração da gravidade. O termo $0,00018 \theta$ leva em conta a dilatação do mercúrio,

BIBLIOGRAFIA

- (1) - ATTIX, F.H. Electronic equilibrium in free-air chambers and a proposed new chamber design. Washington, D.C., U.S. Naval Research Laboratory, Aug. 1961. (NRL - 5646).
- (2) - ATTIX, F.H. & ROESCH, C.W. Radiation dosimetry. 2. ed. New York, Academic, 1968. v.1, p.4.
- (3) - BOAG, J.W. Ionization chambers. In: ATTIX, F.H. & ROESCH, W.C. Radiation dosimetry. 2.ed. New York, Academic, 1966. v.2, p.2-44.
- (4) - BURLIN, I.E. Cavity-chamber theory. In: ATTIX, F.H. & ROESCH, W.C. Radiation dosimetry. 2. ed. New York, Academic, 1968. v.1, p. 332-88.
- (5) - CALIBRATION of dose meters used in radiotherapy. Vienna. International Atomic Energy Agency, 1979. (Technical Reports Series, 185).
- (6) - CALIBRATION of radiological instruments at protection and therapy levels. London, British Calibration Service, Jan. 1977. (British Calibration Service, 6601).

- (7) - CAMPOS, C.A. Construção, calibração e teste de uma câmara de ionização para medidas de exposição de raios X e gama na região de 40 keV até 2 meV. Rio de Janeiro, 1982. (Dissertação de Mestrado, Centro Biomédico, Universidade do Rio de Janeiro). p.2.
- (8) - EISENLOHR, H. The function and position of the Secondary Standard Dosimetry Laboratories within the metrology system. International training course on calibration methods for radiation measuring devices. Munique, 1980. (IAEA/WHO/GSF).
- (9) - EVANS, R.D. The atomic nucleus. New York, McGraw-hill, 1955. p.672-728.
- (10) - GREENING, J.R. Low energy X- ray dosimetry. In: ATTIX, F.H. & ROESCH, W.C. Topics in radiation dosimetry. New York, Academic, 1972. (Suppl. 1), p.262-3.
- (11) - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. Physical aspects of irradiation. Washington, D.C., 1964. (ICRU-10b).
- (12) - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. Radiation quantities and units. Washington, D.C., 1980. (ICRU-33).
- (13) - JONES, D.E.A. The suitability of materials used for measurements of half-value thickness of X-ray beams.

Brit. J. Radiol, 34:801-6, 1961.

- (14) - JONHS, H.E. & CUNNINGHAM, J.R. The physical of radiology.
3. ed. Illinois, Charles C. Thomas, 1974. p.201-14.
- (15) - KRAMERS, H.A. On the theory of X-ray absorption and the
continuous X-ray spectrum. Phil. Mag., 46:836, 1923.
- (16) - MASSEY, J.B. Manual of dosimetry in radiotherapy.
Vienna, International Atomic Energy Agency, 1970.
(Technical Reports Series, 110).
- (17) - MORRISON, M.T.; REED, G.W. A note on determination of
half-value layers of soft X-rays. Brit. J. Radiol.,
25: 270-2, 1952.
- (18) - NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. Certificate of calibration
of an X-ray exposure meter. Teddington, Middlesex,
England, Jan. 1980.
- (19) - NEWBERY, G.R.; BEWLEY, D.R. The performance of the medical
research council 8 MeV linear accelerator. Brit. J.
Radiol., 28: 241-51, 1955.
- (20) - ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION. X and
γ reference radiations for calibrating and determining
the energy response of exposure meters. Geneva, Sep.
1973. (ISO/TC 85/SC 2).

- (21) - PEAPLE, L.H.J.; BURT, A.K. The measurement of spectra from X-ray machines. Phys. Med. Biol., 14:73-85, 1969.
- (22) - PIRES, J.E. Determinação do ripple de geradores de raios X "a potencial constante" pelo método espectro métrico. Rio de Janeiro, 1982. (Dissertação de Mes trado, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas).
- (23) - PROPER, J.; OOSTERKAMP, W.J. Fre-air and thimble ionization chambers for grenz ray dosimetry. Acta. Radiol., 37:33-43, 1958.
- (24) - SAS INSTITUTE. SAS user's guide: statistical analysis system - GLM procedure. Worth Caroline, 1980. p. 245-69.
- (25) - SEELENTAG, W.W.; PANZER, W.; DREXLER, G.; PLATZ, L.; SANTNER, F. A catalogue of spectra used for calibration of dosimeters. Munique, 1979. (GSF - Bericht 5 - 560).
- (26) - SEEMANN, H.E. Secondary radiation intensity as a function of certain geometrical variables. Am. J. Roentgenal. & Rad. Therapy, 39:628 - 33, 1938.
- (27) - TROUT, D.E. Course Manual for X ray measurements. Corvallis, Oregon, U.S. Department of Health Education Welfare, Jul. 1977. (PB 273 012).

- (28) - TROUT, D.E.; KELLEY, J.P.; LUCAS, A.C. Determination of half-value layer. Amer. J. Roentgen., 84: 729 - 39, 1960.
- (29) - WEAST, R. Handbook of chemistry and physics, 1969 - 70. 50th ed. Cleveland, Ohio, 1970. p. E33 - E38.