

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

BR 9023024
INIS-BR-1952

**MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO DE FATORES DE CORREÇÃO INDUZIDOS
PELA IRRADIAÇÃO DE CABOS DAS CÂMARAS DE IONIZAÇÃO
EM CAMPOS GRANDES**

LETÍCIA LUCENTE CAMPOS RODRIGUES

Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do grau de
Doutor em Tecnologia Nuclear.

Orientador: Dra. Linda V. E. Caldas

SÃO PAULO
1988



Agradecimentos

Agradeço de modo especial à Dra. Linda V. E. Caldas pela sugestão, orientação, leitura e discussão deste trabalho.

Os meus agradecimentos se estendem:

Ao Luiz Antonio R. da Rosa, pelas discussões e sugestões durante todo o desenrolar deste trabalho;

Ao Laboratório de Calibração do IPFN, pelo apoio técnico na utilização dos equipamentos de medida e a todos os colegas;

Ao Hospital A. C. Camargo (SP), pela cessão de suas instalações, possibilitando a obtenção de dados experimentais com radiação-X e gama e, em especial, aos físicos Adelino José Pereira e Elizabeth Fancio;

Ao Hospital das Clínicas da Universidade de São Paulo (SP), pela cessão de suas instalações, possibilitando a obtenção de dados experimentais com fótons de energia alta e elétrons e, em especial, ao físico Homero Lavieri Martins;

Ao Hospital Sírio-Libanês (SP), pela cessão de suas instalações, possibilitando a obtenção de dados experimentais com elétrons e fótons de energia alta e, em especial, aos médicos Daer Cotalt e João Luiz Fernandes e ao físico Paulo Motta Craveiro, este último, pelo auxílio nas medidas, sugestões e discussões;

Ao Dr. Gian Maria A. Sordi pelas sugestões e discussões;

Ao Sr. João Zarif pelo interesse demonstrado e indispensável colaboração;

À Dolores Benite Pisani pela dedicação dispensada na elaboração das referências bibliográficas;

À Susana L. Campos Teixeira pela dedicação dispensada na datilografia e montagem da tese;

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (SP), na pessoa do Superintendente Dr. Cláudio Rodrigues, pela possibilidade oferecida de realização deste trabalho;

Ao Antonio, meu marido, pelo carinho, apoio, incentivo e compreensão durante todo o tempo dedicado a este trabalho;

A meus pais e amigos: pelo constante apoio e incentivo;

Enfim, a todos que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

ÍNDICE

RESUMO	V
ABSTRACT	VI
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	
1- Considerações Gerais	1
2- Irradiações de Corpo Inteiro	2
3- Importância da Determinação da Dose Absorvida	6
4- Objetivos do Presente Trabalho	8
CAPÍTULO II - FUNDAMENTOS TEÓRICOS	
1- Definição de Dose Absorvida	9
2- Definição de Exposição	10
3- Câmara de Ionização Tipo Dedal	10
4- Câmara Cavitária	11
5- Eletrômetros Integradores de Corrente	13
6- Fonte de Referência	15
CAPÍTULO III - EFEITOS DA RADIAÇÃO IONIZANTE EM MATERIAIS ISOLANTES	
1- Interação da Radiação com Materiais Eletricamente Isolantes	18
2- Condutividade Induzida por Radiação em Dielétricos	19
2.1 - Fotocondutividade em Cristais Isolantes	19
2.2 - Condutividade Induzida por Radiação em Plásticos Sintéticos	20
3- Corrente Compton	22
4- Irradiação de Cabos de Câmaras de Ionização	26
4.1 - Dependência da Resposta de Uma Câmara de Ionização com o Tamanho de Campo	29
CAPÍTULO IV - CALIBRAÇÃO E DOSIMETRIA	
1- Calibração de Dosímetros Clínicos	30
2- Controle de Qualidade de Dosímetros Clínicos	32
2.1 - Teste de Fuga	32
2.2 - Linearidade do Eletrômetro	32
2.3 - Reprodutibilidade	33
2.4 - Estabilidade a Curto e Longo Prazos	33

3- Dosimetria do Feixe	35
3.1 - Método Direto	35
3.2 - Método Indireto	36

CAPÍTULO V - SISTEMAS DE MEDIDA E IRRADIAÇÃO

1- Sistemas de Medida	38
1.1 - Eletômetro	38
1.2 - Câmaras de Ionização	38
1.3 - Fonte de Referência	40
1.4 - Barômetros, Termômetro e Higrômetro	40
2- Sistemas de Irradiação	40
2.1 - Sistema de Radiação-X de Energias Baixas	41
2.2 - Sistema de Radiação-X para Energias Intermediárias	41
2.3 - Sistema de Radiação-X de Energias Altas	42
2.4 - Fonte de Radiação Gama de ¹³⁷Cs	42
2.5 - Fonte de Radiação Gama de ⁶⁰Co	42
2.6 - Sistema de Radiação de Elétrons	42
3- Arranjos de Irradiação	43
3.1 - Arranjo Utilizado para Irradiações nos Sistemas de Raios-X e com as Fontes de ⁶⁰Co e ¹³⁷Cs	43
3.2 - Arranjo Utilizado para Irradiações nos Sistemas de Raios-X de Energias Intermediárias	43
3.3 - Arranjo Utilizado para Irradiação nos Sistemas de Raios-X de Energias Altas e Elétrons, com Campos Convencionais	45
3.4 - Arranjo Utilizado para Irradiação nos Sistemas de Raios-X de Energias Altas e Elétrons, com Campos Grandes	45

CAPÍTULO VI - RESULTADOS

1- Correções e Testes Preliminares	46
1.1 - Correção Devido às Condições Ambientais	46
1.2 - Tempo de Estabilização	46
1.3 - Teste de Fuga na Ausência de Radiação	46
1.4 - Reprodutibilidade	46
1.5 - Estabilidade a Curto Prazo	47
1.6 - Estabilidade a Longo Prazo	47
1.7 - Linearidade do Eletrometro	47
1.8 - Efeito Haste	50
2- Efeito da Irradiação dos Cabos das Câmaras	50
2.1 - Irradiações com Fótons	53
2.1.1 - Irradiação de Cabos	53

2.1.1.1 - Sensibilidade das Diferentes Câmaras	53
2.1.1.2 - Dependência com o Tamanho de Cabo Irradiado	55
2.1.1.3 - Dependência com a Taxa de Exposição	58
2.1.1.4 - Dependência com a Energia da Radiação Incidente	61
2.1.2 - Irradiação de Conectores	63
2.1.2.1 - Sensibilidade das Diferentes Câmaras	63
2.1.2.2 - Dependência com o Comprimento de Cabo Irradiado	64
2.1.2.3 - Dependência com a Taxa de Exposição	65
2.1.2.4 - Dependência com a Energia da Radiação Incidente	67
2.1.3 - Irradiação de Cabos de Extensão	70
2.1.3.1 - Sensibilidade das Diferentes Câmaras	70
2.1.3.2 - Dependência com o Comprimento de Cabo de Extensão Irradiado	71
2.1.3.3 - Dependência com a Taxa de Exposição	71
2.1.3.4 - Dependência com a Energia da Radiação Incidente	71
2.1.4 - Comparação dos Efeitos de Irradiação de Cabos e Conectores com Fótons	74
2.2 - Irradiações com Elétrons	75
2.2.1 - Irradiação de Cabos	75
2.2.1.1 - Sensibilidade das Diferentes Câmaras	75
2.2.1.2 - Dependência com o Comprimento de Cabo Irradiado	76
2.2.1.3 - Dependência com a Dose Absorvida	76
2.2.1.4 - Dependência com a Energia da Radiação Incidente	76
2.2.2 - Comparação dos Efeitos de Irradiação de Cabos das Câmaras com Elétrons	79
2.3 - Efeito da Radiação Espalhada	80
3- Medida de Corrente de Fuga Induzida por Radiação	81
3.1 - Irradiações com Fótons	81
3.1.1 - Irradiação de Cabos	81
3.1.1.1 - Sensibilidade das Diferentes Câmaras	82
3.1.1.2 - Dependência com o Comprimento de Cabo Irradiado	83
3.1.1.3 - Dependência com o Tempo de Irradiação	85
3.1.1.4 - Dependência com a Taxa de Exposição	85
3.1.1.5 - Dependência com a Energia da Radiação Incidente	87
3.1.2 - Irradiação de Conectores	87
3.1.2.1 - Dependência com a Taxa de Exposição	90
3.1.2.2 - Dependência com a Energia da Radiação Incidente	90
3.1.3 - Irradiação de Cabos de Extensão	93
3.1.4 - Comparação dos Fatores de Fuga de Cabo, Conector e Cabo de Extensão Irradiados com Fótons	93
3.2 - Irradiações com Elétrons	94
3.2.1 - Irradiações de Cabos	95
3.2.1.1 - Sensibilidade das Diferentes Câmaras	95
3.2.1.2 - Dependência com o Comprimento de Cabo Irradiado	96

3.2.1.3 - Dependência com a Dose Absorvida	96
3.2.1.4 - Dependência com a Energia da Radiação Incidente.....	96
3.2.2 - Comparação dos Efeitos de Irradiação de Cabos das Câmaras com Elétrons	96
4- Irradiação de Cabos das Câmaras em Campos Grandes	99

CAPÍTULO VII - DISCUSSÕES

1- Comportamento do Efeito da Irradiação de Cabos, Conectores e Cabos de Extensão das Câmaras de Ionização com Fótons	101
2- Comportamento do Efeito da Irradiação de Cabos das Câmaras com Elétrons	102
3- Efeito da Radiação Espalhada no Fator de Cabo.....	103
4- Comportamento da Corrente de Fuga Induzida pela Irradiação de Cabos, Conectores e Cabos de Extensão das Câmaras de Ionização com Fótons	103
5- Comportamento da Corrente de Fuga Induzida pela Irradiação dos Cabos da Câmaras com Elétrons.....	104
6- Irradiações em Campos Grandes	104

CAPÍTULO VIII - CONCLUSÕES

1- Determinação do Fator de Haste.....	106
2- Determinação do Fator de Cabo	107

APÊNDICE

PROTOCOLOS DE DOSIMETRIA	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114

“Método para Determinação de Fatores de Correção Induzidos pela Irradiação de Cabos das Câmaras de Ionização em Campos Grandes”

Letícia Lucente Campos Rodrigues

Resumo

Foi desenvolvido um método simples a ser recomendado para os físicos hospitalares seguirem durante a realização da dosimetria de campos grandes de radiação utilizados em radioterapia, para a avaliação do efeito de irradiação de cabos, conectores e cabos de extensão das câmaras de ionização e para a determinação dos fatores de correção adequados para cada sistema de medida ou geometria.

Todos os testes relevantes de controle de qualidade foram rigorosamente efetuados de acordo com as recomendações da “International Electrotechnical Commission” para três dosímetros clínicos.

Foi pesquisado o efeito da irradiação de cabos, conectores e cabos de extensão com fótons e elétrons, sob diferentes condições experimentais, por meio de medidas da sensibilidade das câmaras a uma radiação de referência de ^{90}Sr . Foi também medida a corrente de fuga induzida por radiação, irradiando-se cabos, conectores e cabos de extensão com fótons e elétrons. Todos esses testes foram efetuados sob condições padrões de dosimetria. Finalmente foram efetuadas medidas do efeito de irradiação de cabos sob as condições de dosimetria de campos grandes. Em cada caso determinou-se um fator de cabo e um fator de fuga respectivamente, pela relação de leituras da câmara com e sem a presença de radiação.

"Method for Determination of Correction Factors Induced by the Irradiation of Ionization Chamber Cables in Large Fields".

Leticia Lucente Campos Rodrigues

Abstract

A simple method was developed to be suggested to hospital physicists in order to be followed during large radiation field dosimetry, to evaluate the effects of cables, connectors and extension cables irradiation and to determine correction factors for each system or geometry.

All quality control tests were performed according to the International Electrotechnical Commission for three clinical dosimeters.

Photon and electron irradiation effects for cables, connectors and extension cables were investigated under different experimental conditions by means of measurements of chamber sensitivity to a standard radiation source of ^{90}Sr . The radiation induced leakage current was also measured for cables, connectors and extension cables irradiated by photons and electrons. All measurements were performed at standard dosimetry conditions. Finally, measurements were performed in large fields. Cable factors and leakage factors were determined by the relation between chamber responses for irradiated and unirradiated cables.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1- Considerações Gerais

A Física sofreu profundas modificações no final do século XIX e no início do século XX. Sem dúvida, a descoberta dos raios-X em 1895 por Wilhelm Konrad Roentgen foi responsável por muitas dessas alterações.

A aplicação médica desse tipo de radiação foi rapidamente vislumbrada e antes do final do século os médicos já se utilizavam dos raios-X para diagnosticar a fratura de ossos. Embora existam dúvidas quanto à primeira utilização terapêutica dos raios-X, estes foram utilizados por Grubbé em 1896 no tratamento do câncer e de ulcerações (40).

A partir de 1945, com o desenvolvimento de máquinas de supervoltagem e unidades de teleterapia com isótopos, houve uma mudança drástica na prática da radioterapia.

A evolução progressiva dos modelos resultou em uma variedade de unidades de terapia, as quais tem sido substituídas por máquinas de terapia do tipo padrão.

O trabalho conjunto de físicos, médicos e outros profissionais, conseguiu desenvolver o controle da radiação até os padrões atuais.

Em 1951, H.E.Johns iniciou a teleterapia com ^{60}Co , que atualmente é o equipamento mais empregado de megavoltagem (40). Também em 1951, R.Harvey e J.S.Laughlin iniciaram a terapia com feixes de elétrons de alta energia (6 a 24 MeV), que possui potencial terapêutico muito grande. É indiscutível a vantagem de sua utilização, em detrimento dos feixes de raios-X de energia da ordem de algumas centenas de keV, para tratamento de lesões superficiais (41).

Algumas das máquinas de alta energia disponíveis hoje para utilização em radioterapia são mostradas na Tabela I - 1 (38).

A máquina Teleisotope foi incluída na tabela, embora não seja um acelerador de partículas. Nesses sistemas a fonte de radiação é um isótopo, o qual emite radiação gama.

Tabela 1 - 1

Máquinas de Radiação de Alta Energia Utilizadas em Radioterapia⁽³⁶⁾

Máquina	Tipo de Radiação	Energia (MeV)
Betatron	Elétrons	15 a 40
Acelerador linear	Elétrons	4 a 8
Gerador eletrostático Van de Graaf	Elétrons Prótons Partículas α Dêuterons	2 a 4
Teleisotopo	⁶⁰ Co ¹³⁷ Cs	1,25 0,67

2- Irradiações de Corpo Inteiro

A terapia com Irradiações de Corpo Inteiro "Total Body Irradiation" (I C I) já vem sendo utilizada por 5 décadas; a sua primeira aplicação foi feita por Chaoul e Lange em 1923. Dados publicados mostram que I C I são empregadas como terapia clínica rotineira em várias doenças, como por exemplo em pacientes com sarcoma de Ewing e câncer muito avançado com doses de 1 a 3 Gy (100 a 300 rad) dadas de uma só vez. I C I são também aplicadas em pacientes com leucemia linfoblástica aguda, irradiados com doses de 8 a 10 Gy (800 a 1000 rad) fracionadamente antes do transplante de medula óssea⁽¹¹⁾. No tratamento das metástases ósseas disseminadas são utilizadas irradiações de meio corpo (I M C)⁽²⁹⁾. Para o tratamento de lesões superficiais como a micose fungóide é utilizada a técnica de terapia com Elétrons de Toda a Superfície do Corpo "Total Skin Electron Therapy" (T E T S)^(3, 41).

Existe uma grande variedade de técnicas e diferentes métodos e critérios para o cálculo das doses aplicadas. Os aspectos físicos da técnica de I C I em diferentes instituições variam consideravelmente com relação à geometria do feixe, posição do paciente, características da fonte de radiação, arquitetura da sala e uniformidade da dose no paciente^(1, 2, 13, 21, 38, 41, 42, 49, 55). Na Fig. 1 - 1 é mostrada uma ilustração esquemática de uma técnica de I C I com fótons usando campos opostos bilaterais⁽³⁸⁾. Na Fig. 1 - 2 é mostrado o arranjo geométrico da técnica de tratamento com elétrons, usando campos simétricos⁽³⁾.

Como todos os métodos consistem no emprego de campos grandes de irradiação e distâncias fonte-superfície (D F S) superiores a 110 cm, é fundamental que os parâmetros dosimétricos para cada aparelho utilizado sejam especificamente avaliados.

Na Tabela 1 - 2 é feita uma comparação das técnicas de I C I para transplante de medula óssea em diferentes instituições⁽³⁸⁾.

Tabela I - 2

Comparação das Técnicas de I C I para Transplante de Medula Óssea. ⁽³⁹⁾

Instituição	Dose Nominal Gy	Taxa de Dose no Plano Mediano do Paciente Gy.min ⁻¹	Equipamento, Distância Fonte-Superfície cm	Tamanho de Campo cm x cm
Colégio Médico Hahnemann (EUA)	10	4,2 . 10 ⁻¹	6MV raios-X 436	Ø 150
Escola de Medicina Harward (EUA)	8	5,0 . 10 ⁻²	4 MV raios-X 297	40 x 150
Universidade de Minnesota (EUA)	7,5	2,6 . 10 ⁻¹	10 MV raios-X 411	125 x 125
Hospital M.D.Anderson (EUA)	10	5,0 . 10 ⁻²	25 MV-raios-X 407	160/diagonal
Instituto do Câncer,Ontário (Canadá)	10	4,5 . 10 ⁻¹	25 MV raios-X 450	40 x 190
Universidade da Pensilvânia (EUA)	8	9,0 . 10 ⁻²	6 MV raios-X 375 - 425	100 x 120
Hospital Real Marsden (Inglaterra)	10	2,5 . 10 ⁻²	⁶⁰ Co 410	110 x 110
Universidade da Califórnia (EUA)	10	7 . 10 ⁻²	⁶⁰ Co 310	125 x 125
	8 - 10	7 . 10 ⁻²	⁶⁰ Co 310	125 x 125
	3 anemia aplástica	7 . 10 ⁻²	⁶⁰ Co 310	125 x 125
Universidade de Washington (EUA)	10	8 . 10 ⁻²	⁶⁰ Co 220	90 x 90
Hospital Erasto Gúrtner (Brasil)	10 - 12	4 - 6 . 10 ⁻²	4 MV raios-X 300	180/diagonal

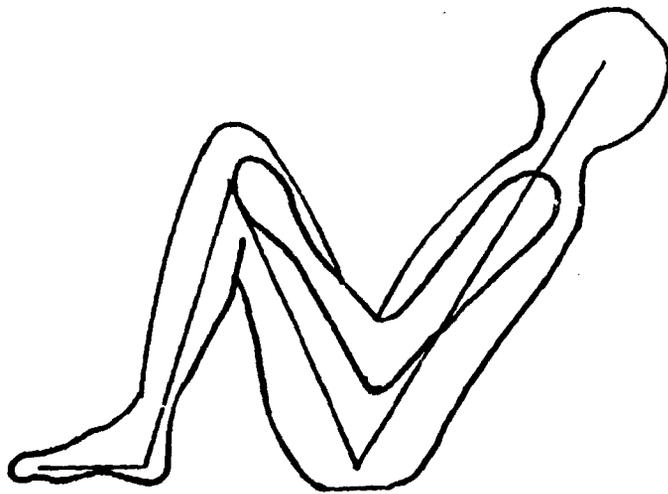
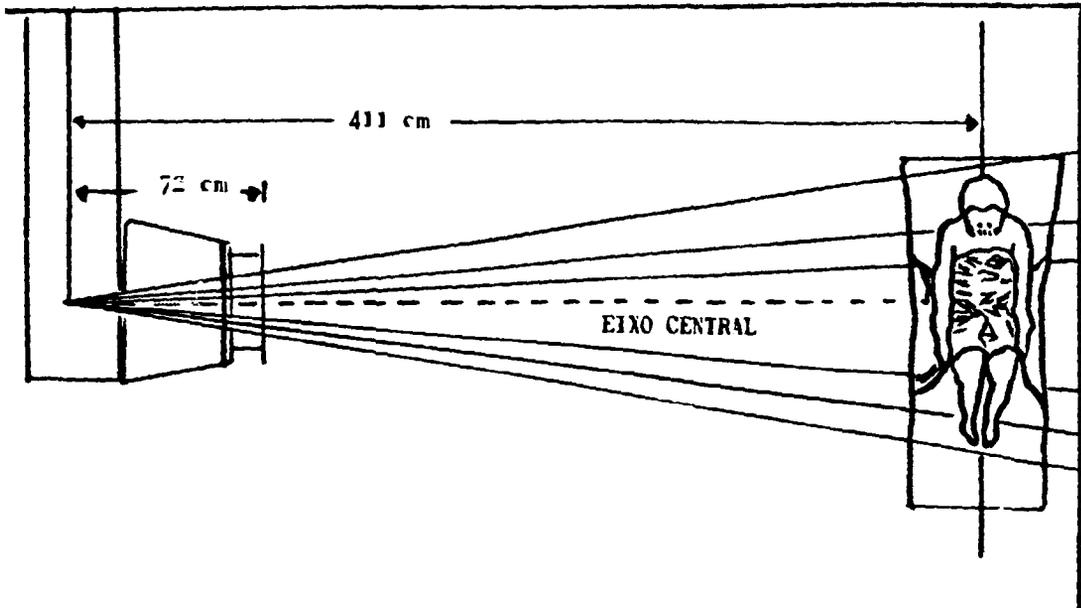


Fig. I-1- Ilustração esquemática da técnica de irradiação de corpo inteiro usando campos opostos bilaterais (38).

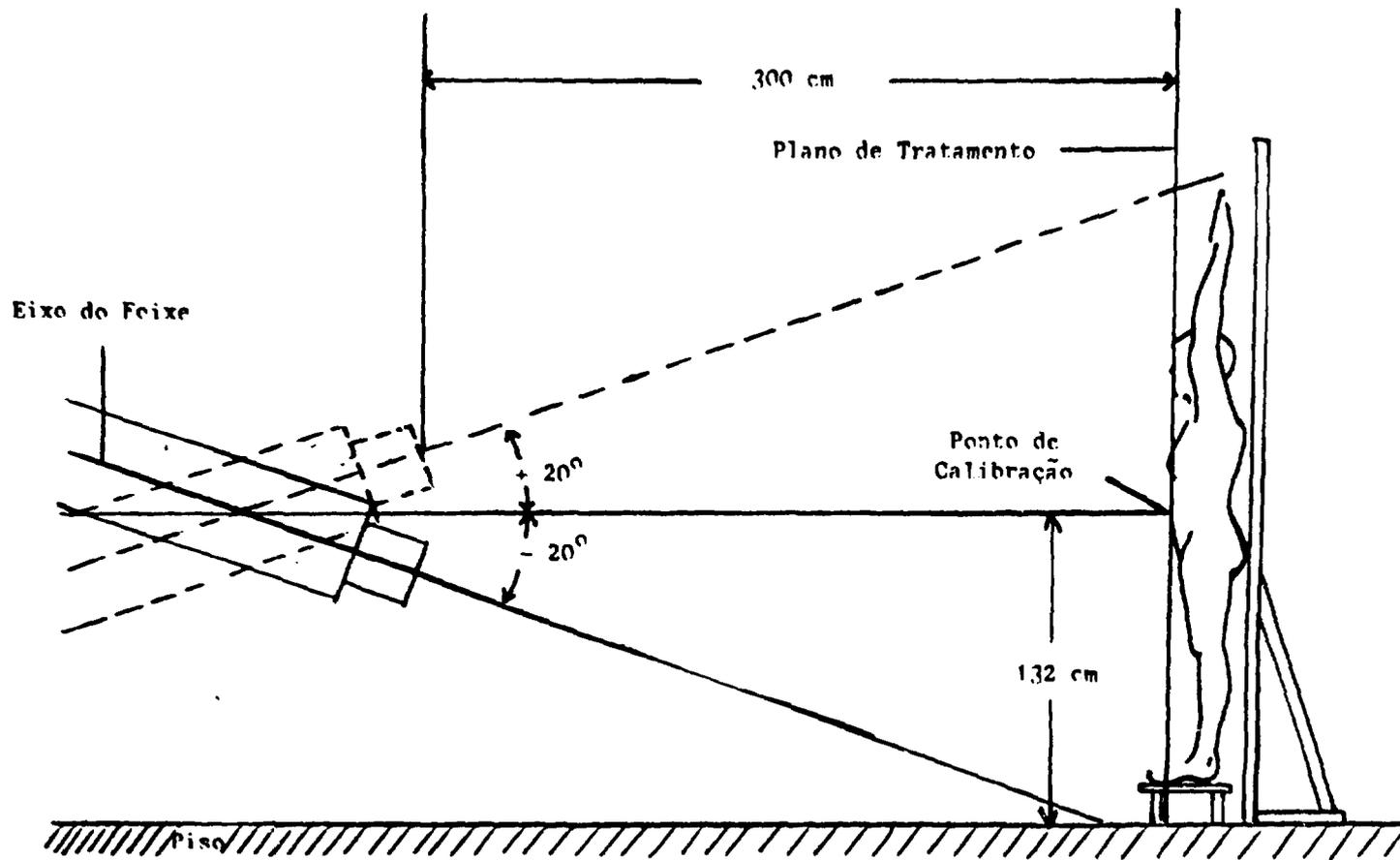


Fig. I-2 - Arranjo geométrico da técnica de tratamento com elétrons usando campos simétricos⁽³⁾.

Algumas dificuldades estão associadas com a dosimetria de campos grandes de irradiação. Os efeitos da radiação retroespalhada pelo piso não são desprezíveis; a lei do inverso do quadrado da distância apresenta desvios maiores do que para tamanhos de campo convencionais; as tabelas de porcentagem de dose profunda (% D P) e a relação tecido-ar (R T A) são obtidas sob condições de "phantom" infinito para campos de até 35 x 35 cm, enquanto que os pacientes não são phantoms infinitos. Uma comparação entre a situação dosimétrica na I C I e na radioterapia convencional é mostrada na Fig. 1 - 3 ⁽⁴⁹⁾ esquemas C,D,E e A,B respectivamente.

Uma outra dificuldade observada na dosimetria de campos grandes, uma vez que toda a câmara de ionização e boa parte do cabo da câmara estão no feixe primário, são os efeitos de haste e cabo, provenientes da irradiação dos mesmos. A influência na leitura das câmaras deve ser investigada, pois podem ocorrer erros superiores a 5% ^(27,38,49).

3- Importância da Determinação da Dose Absorvida.

A eficácia do tratamento de radioterapia está diretamente relacionada com a quantidade de energia depositada no tumor (dose absorvida). Uma variação de somente $\pm 5\%$ desta quantidade pode conduzir a mudanças clinicamente observáveis do efeito da irradiação, havendo uma rápida diminuição da possibilidade de cura à medida que esta quantidade se afasta de um valor ótimo ⁽¹⁷⁾. Portanto, é de extrema importância uma quantificação tão exata quanto possível desta quantidade de energia.

Uma dosimetria acurada com uma incerteza de $\pm 5\%$ pressupõe o uso de um dosímetro calibrado apropriadamente e de um profundo conhecimento dos aspectos básicos de dosimetria. Na ausência destes conhecimentos, podem ocorrer sérios erros em irradiações, como já constatados no programa de intercomparações de doses para o ⁶⁰Co, realizado pela I A E A / W H O ⁽¹⁷⁾, onde erros de $\pm 10\%$ foram comuns, de $\pm 20\%$ não muito frequentes e de $\pm 50\%$ ou mais ocasionalmente observados.

A determinação da dose absorvida em feixes de fótons e elétrons de energias altas pelos usuários é, em princípio, efetuada segundo um procedimento de duas etapas. Primeiro a câmara de ionização é calibrada para uma qualidade de radiação de referência do usuário em um laboratório de padronização e então a câmara é usada para determinar a dose absorvida do feixe de radiação do usuário ⁽⁵⁴⁾.

Alguns fatores de conversão e correção devem ser aplicados. Diferentes conjuntos de fatores são necessários dependendo de qual grandeza física se refere a calibração (exposição, kerma no ar, etc.), geometria da calibração (ar livre, phantom, etc.) e o formato da câmara (tamanho, forma, material da parede, etc.) ⁽⁵⁴⁾. Um outro fator que deve ser introduzido na determinação da dose absorvida em campos grandes de irradiação refere-se às correções para efeitos de haste, cabo e às vezes conectores.

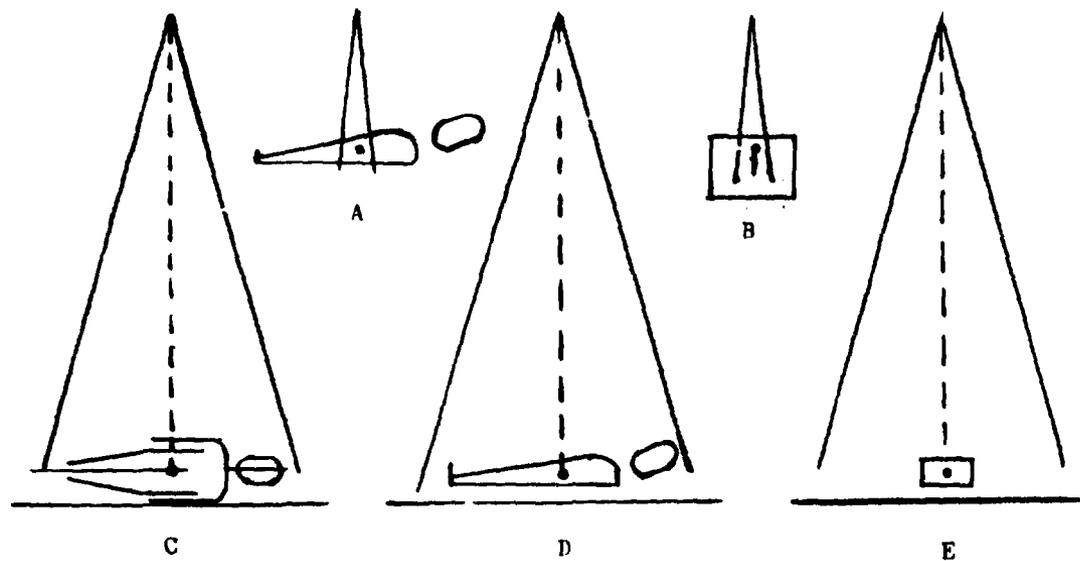


Fig. I-3- Tratamento radioterápico e dosimetria normal (A e B) e comparação com tratamento radioterápico e dosimetria em ICI (C, D e E)⁽⁴⁹⁾.

□ Câmara de ionização dentro de um phantom para dosimetria.

4. Objetivos do Presente Trabalho.

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um método a ser recomendado para os físicos hospitalares seguirem durante a realização da dosimetria de campos grandes de radiação utilizados em radioterapia, para a avaliação do efeito da irradiação de cabos, conectores e cabos de extensão e a consequente determinação dos fatores de correção adequados para cada sistema de medida ou geometria.

Estudou-se os efeitos da irradiação de cabos, conectores e cabos de extensão de três câmaras de ionização, para diferentes tipos de radiações e condições experimentais.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1- Definição de Dose Absorvida.

Na radioterapia, o principal objetivo da dosimetria é determinar uma grandeza física que esteja relacionada e forneça um índice dos efeitos biológicos devidos à radiação. A energia depositada pela radiação ionizante em um material conduziu ao conceito de "dose absorvida", $D^{(33)}$:

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (II - 1)$$

onde $d\bar{\epsilon}$ é a energia média depositada em um material pela radiação ionizante, em um elemento de massa dm .

Determinou-se para esta grandeza a unidade especial chamada rad, tendo a dimensão de energia por massa, tal que:

$$1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

A nova unidade chamada gray (Gy) foi definida a fim de obedecer ao sistema internacional de unidades (SI).

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} = 100 \text{ rad}$$

Esta definição de dose absorvida é válida para todos os tipos de radiações ionizantes e todos os tipos de materiais. Entretanto, a indicação da dose absorvida só possui utilidade se tanto as condições de irradiação quanto o material onde a dose absorvida é determinada forem conhecidos, já que este conceito se refere às interações entre partículas ionizantes geradas pelo feixe de radiação com os átomos ou moléculas do material.

Embora as grandezas dosimétricas, como a dose absorvida, possam ser determinadas pelo produto das grandezas que especificam o campo de radiação com as que caracterizam a interação da radiação com a matéria, elas não são definidas desta forma já que são geralmente medidas diretamente.

Na busca de uma grandeza física apropriada (a ser medida experimentalmente) que permitisse relacioná-la com a dose, identificou-se como um efeito importante a ionização em gases tendo, assim, surgido a definição de exposição.

2- Definição de Exposição.

A ionização do ar pela radiação é um dos efeitos que propicia um método de medida de boa exatidão que fornece um padrão de referência para a dosimetria dos raios-X e gama. A ionização consiste na formação de um número igual de íons positivos e negativos ao longo da trajetória dos elétrons (elétrons chamados secundários) originados pelos processos fotoelétrico, Compton e produção de pares, na interação da radiação com os átomos do ar.

Ionizado o ar, haverá uma tendência à recombinação dos íons, mas a aplicação de um campo elétrico através de duas placas paralelas conectadas a uma bateria evitará a recombinação e possibilitará a coleta de íons de um mesmo sinal. Desta forma, os íons formados pela radiação aparecerão como uma corrente de ionização mensurável por um equipamento sensível.

Definiu-se assim a grandeza dosimétrica chamada "Exposição" (X)⁽¹³⁾, pelo quociente dQ / dm , onde dQ é o valor absoluto da carga total dos íons de mesmo sinal produzidos no ar, quando todos os elétrons liberados pelos fótons no ar (massa dm), são totalmente freados no ar:

$$X = dQ / dm \quad (\text{no ar}) \quad (II - 2)$$

A unidade desta grandeza pode ser obtida a partir da medida de grandezas físicas básicas com a utilização de uma câmara de ionização de ar livre⁽¹⁸⁾, que é um instrumento padrão primário.

Como unidade desta grandeza definiu-se operacionalmente o roentgen (R) tal que:

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

embora esta unidade já não seja mais utilizada atualmente; a fim de obedecer ao S I utiliza-se $\text{C} \cdot \text{kg}^{-1}$.

3- Câmara de Ionização Tipo Dedal.

Devido ao fato das câmaras de ionização de ar livre não serem práticas e não possuírem mobilidade para medidas de rotina, foram desenvolvidas câmaras de ionização do tipo dedal.

Fazendo uso, na realidade, de um artifício para medir de maneira prática a exposição, a câmara tipo dedal consiste de um instrumento de pequenas dimensões com uma parede sólida condutora que delimita um volume de ar. Neste volume está inserido, no centro, um eletrodo para coleta dos íons formados no ar. A fim de não causar perturbação no campo de radiação, tanto a parede da câmara quanto o eletrodo central devem ser equivalentes ao ar em relação à interação dos fótons e dos elétrons secundários. Esta equivalência significa que a parede se comporta como uma camada de ar condensado, fazendo com que a fluência e o espectro de energia dos fótons e dos elétrons secundários (criados pela interação da radiação primária com o material da parede

e no volume de ar) não sejam perturbados pela parede. Esta parede tem uma espessura sempre maior que o alcance máximo dos elétrons secundários criados fora da câmara, o que significa que toda ionização detectada pelo eletrodo central pode ser associada aos elétrons secundários criados e freados dentro do volume de ar já que ocorre o princípio do equilíbrio eletrônico. Isto significa que a transferência de energia dos elétrons secundários criados na parede para o volume de ar é igual à dos elétrons criados no volume de ar para a parede da câmara. Este sistema pode portanto constituir um detector de fótons (42).

Como, na realidade, a câmara dedal afeta a exposição a ser medida devido à espessura da parede, à dimensão do volume sensível e à influência do material do eletrodo central, esta deve ser sempre calibrada em relação a uma câmara de ionização de ar livre (padrão) a fim de que sua resposta seja associada ao roentgen.

Para feixes de fótons com energias acima de 300 keV, há dificuldades experimentais de se obter o equilíbrio eletrônico. Para medidas, por exemplo, em feixes de ^{60}Co (1,25 MeV), a espessura da parede é aumentada através de uma capa de equilíbrio eletrônico ("build-up cap"), geralmente de Plexiglas (Lucite), com 4,6 mm de espessura, a fim de impedir que os elétrons criados fora da câmara penetrem no volume sensível da mesma. Este sistema não é mais analisado como uma câmara dedal, mas sim como uma simulação de uma câmara cavitária.

4- Câmara Cavitária.

A câmara cavitária consiste, teoricamente, de uma pequena cavidade de ar em qualquer material. Ela utiliza como princípio de medida a teoria de Bragg-Gray, que é baseada na determinação da dose absorvida em um material e que pode ser sintetizada da forma descrita a seguir (8,22,24,42).

Considere-se uma pequena cavidade de ar situada em um material sólido homogêneo tal que:

- a- a cavidade possa ser considerada pequena em relação ao alcance dos elétrons secundários gerados no material que a cerca. Isto significa que não haverá perda significativa de energia quando os elétrons secundários atravessarem tal cavidade (fluência praticamente constante). A fração de energia perdida devido à ionização no ar serve para ser detectada e utilizada como medida de interesse;
- b- a espessura do meio sólido seja maior que o alcance máximo dos elétrons secundários, para que os elétrons que atravessam a cavidade sejam somente aqueles produzidos no meio sólido que circunda a mesma;
- c- a espessura do meio sólido seja suficientemente pequena para que a atenuação dos fótons não altere significativamente o valor da exposição a ser

medida.

Sendo obedecidas as hipóteses acima, significa que não há perturbação na fluência de elétrons secundários. Assim, a dose absorvida em um ponto do material (D_m) pode ser relacionada à dose absorvida em uma pequena cavidade de ar (D_a) por:

$$D_m = \left\{ S_a^m \right\}_\lambda D_a \quad (11 - 3)$$

sendo

$$\left\{ S_a^m \right\}_\lambda = \frac{\left(\bar{S}_m \right)_\lambda}{\left(\bar{S}_a \right)_\lambda} \quad (11 - 4)$$

onde $\left(\bar{S}_m \right)_\lambda$ e $\left(\bar{S}_a \right)_\lambda$ são, respectivamente, as energias médias perdidas por unidade de massa pelos elétrons secundários por unidade de percurso no meio e por unidade de percurso no ar, para uma determinada energia λ do feixe de radiação. Estes fatores são chamados poder de freamento de massa para elétrons ("mass electron stopping power").

Medindo-se a densidade de carga (W) produzida na cavidade, em condições de saturação, pode-se determinar a dose absorvida no ar por:

$$D_a = W \frac{J}{e} \quad (11 - 5)$$

onde W é a energia média total despendida pelos elétrons para a criação de um par de íons e e , a carga do elétron.

Combinando-se as equações 11-3 e 11-5 obtém-se:

$$D_m = W \frac{J}{e} \left(S_a^m \right)_\lambda \quad (11 - 6)$$

que relaciona a dose absorvida no material com o ar, através da medida da carga produzida na câmara cavitária.

Como a definição de roentgen é tal que corresponde a $2,58 \times 10^{-4} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ e a energia média total despendida pelos elétrons para criação de um par de íons no ar vale $33,85 \text{ J} \cdot \text{C}^{-1} (137 \text{ eV})$, obtém-se que uma exposição X , em roentgens, produzirá uma dose absorvida no ar (D_a) em rads, de:

$$D_a = 0,873 \cdot X \quad (11 - 7)$$

Se um elemento de massa de ar e um elemento de massa de um material conhecido são irradiados sob as mesmas condições (mesma fluência de energia por exemplo), pode-se afirmar que:

$$\frac{D_m}{D_a} = \frac{\left(\mu_{en}/\rho\right)_{m\lambda}}{\left(\mu_{en}/\rho\right)_{a\lambda}} \quad (11-8)$$

onde $(\mu_{en}/\rho)_{m\lambda}$ e $(\mu_{en}/\rho)_{a\lambda}$ são, respectivamente, os coeficientes de massa de absorção de energia, para uma dada energia λ , para o meio e para o ar.

Combinando-se as equações 11-6, 11-7 e 11-8 obtém-se:

$$X = W \frac{J}{e} \frac{1}{0,873} \left\{ (S_a^m) \frac{(\mu_{en}/\rho)_a}{(\mu_{en}/\rho)_m} \right\}_\lambda \quad (11-9)$$

onde J pode ser medido pela câmara cavitária e as demais constantes são obtidas por tabelas conhecidas.

Na escolha de um material para a construção de câmaras cavitárias, o grafite tem sido o mais usado tanto por ser condutor como pelo fato de que os fatores de interação com a radiação são bem conhecidos.

A simulação de uma câmara cavitária através de uma câmara de ionização tipo dedal com capa de equilíbrio eletrônico torna mais práticas as medidas em feixes de radiação de altas energias (^{60}Co por exemplo). O uso da capa de Plexiglas deve-se ao fato de que geralmente o interesse está na determinação da dose absorvida em tecido mole, que é equivalente à água, e o Plexiglas é considerado equivalente à água⁽¹⁸⁾. Assim, pode-se determinar a dose absorvida no tecido mole, simulando-o pela capa de Plexiglas.

A determinação da exposição à energia do ^{60}Co , utilizando a câmara dedal com a capa de equilíbrio eletrônico, na realidade não equivale à determinação da exposição com a câmara cavitária, devido à existência do meio de Plexiglas, da parede de grafite e do eletrodo central. A perturbação introduzida por esses materiais exige que o sistema câmara dedal-capas de equilíbrio eletrônico seja calibrado contra uma câmara cavitária padrão.

5- Eletrômetros Integradores de Corrente.

Quando uma câmara de ionização é exposta a um feixe de radiação, gera uma corrente elétrica de baixo valor (cerca de 10^{-11} A) que, para ser medida com precisão, exige o uso de instrumentos com características especiais chamados eletrômetros.

De uma forma geral, um eletrômetro é um multímetro dc sofisticado, que, além de poder ser usado para todas as tarefas realizadas por um multímetro convencional, permite ainda a medida de tensões, correntes, resistências e cargas cujas ordens de grandeza estejam fora das

medidas usuais.

Um eletrômetro caracteriza-se por uma alta resistência de entrada (cerca de $10^{14} \Omega$) e uma baixa corrente de "offset" * (cerca de 10^{-14} A). Devido a estas características pode-se, com um eletrômetro, medir tensões, sem praticamente sobrecarregar o circuito em que se está medindo, medir resistências de valores usuais até valores altos e medir pequenas quantidades de cargas armazenadas em um capacitor sem perturbá-lo⁽⁵²⁾.

Na maioria dos dosímetros clínicos o eletrômetro é utilizado para integrar as correntes geradas pelas câmaras de ionização (corrente de ionização), com a finalidade de associar estes valores às medidas de exposição.

Esta medida consiste, basicamente, na determinação da carga elétrica gerada por qualquer fonte de corrente e acumulada em um capacitor. Isto é feito através da equação (II - 10), onde Q é a carga (em coulombs) acumulada no capacitor de capacitância C (em faradays) e V é a tensão (em volts) através do capacitor.

$$Q = C \cdot V \quad \text{(II - 10)}$$

A equação II - 10 sugere um procedimento básico para a medida da carga, que consiste na transferência da mesma para um capacitor de valor conhecido, onde a tensão é medida através do mesmo.

O uso de eletrômetros integradores de corrente requer alguns cuidados como: que sejam utilizados cabos com alta resistência de isolamento; que as medidas não sejam longas para evitar erros dependentes do tempo devido à corrente de "offset" e à corrente de fuga do eletrômetro; que o intervalo entre duas medidas seja suficiente para descarregar toda a carga do capacitor e, principalmente, que não exista a influência na medida da carga devido aos elementos parasitas introduzidos pela fonte de corrente a ser integrada⁽⁵²⁾.

A constituição de um dosímetro, resultante da conexão de uma câmara de ionização (tipo dedal, neste caso) a um eletrômetro, é feita, por exemplo, através de um cabo triaxial de alto poder de isolamento, de baixo ruído, para minimizar os efeitos de cargas geradas por fricção (torção do cabo) e correntes de fuga. Este cabo permite que o sinal da câmara seja transportado até o eletrômetro e, ao mesmo tempo, que uma tensão de polarização, fornecida por uma fonte de tensão geralmente acoplada ao eletrômetro, seja aplicada à câmara de ionização.

Embora um eletrômetro se caracterize por uma alta impedância de entrada, e uma câmara de ionização, quando exposta a um feixe de radiação, constitua um gerador de elevada resistência interna (maior que $10^{14} \Omega$) e baixa capacitância (cerca de 10^{-12} F), a conexão desta ao eletrômetro poderá acarretar uma influência na resposta do mesmo, devido a elementos

* Corrente de "offset" - corrente resultante da alimentação do circuito no estágio anterior à operação.

parasitas (capacitância e resistência) introduzidos pela câmara de ionização pelo cabo de conexão, pelos conectores etc.⁽⁵²⁾.

Quando um eletrômetro é utilizado como parte de um dosímetro para a medida de exposição, o problema da influência dos elementos parasitas é eliminado devido à calibração do dosímetro contra um dosímetro padrão.

6- Fonte de Referência.

É de importância fundamental no controle de qualidade do instrumento ao longo de sua utilização saber que o fator de calibração continue podendo ser aplicado ao instrumento, isto é, verificar que a sensibilidade do mesmo à radiação permanece constante.

A técnica para isto é muito simples, basta submeter a câmara a uma quantidade de radiação precisamente reprodutível (não necessariamente conhecida) tanto por ocasião da calibração como em intervalos regulares subsequentemente. A leitura assim obtida no instrumento deve ser constante. Se não for constante, então algo está errado e novos valores do fator de calibração devem ser obtidos, após o conserto do equipamento.

O modo mais adequado de se obter uma exposição reprodutível e exata é usar um arranjo fixo de fontes radioativas, de meia vida conhecida, em relação ao qual a câmara de ionização pode ser colocada em uma posição exata e reprodutível. Tal sistema deve irradiar a câmara de ionização uniformemente. O relacionamento geométrico entre a fonte radioativa e a câmara deve ser exatamente reprodutível. Deve ser também possível medir a temperatura do conjunto fonte-câmara.

A construção usual de tal sistema consiste de uma ou mais fontes radioativas (geralmente folhas) situadas em um compartimento blindado (blindagem), no qual pode ser mantida uma geometria fixa relacionada com a câmara de ionização de um dosímetro clínico. Na Fig. 11 - 1 é mostrado o diagrama de um sistema de fonte radioativa de referência⁽⁴²⁾.

Devido às vantagens da radiação beta de energia alta: relativa facilidade de blindagem e meia vida longa ($\approx 28,0$ anos), o radionuclídeo utilizado geralmente nestes sistemas é o ^{90}Sr .⁽⁴²⁾

Preferencialmente as medidas de temperatura da fonte de referência devem ser efetuadas durante as medidas em um orifício de sua blindagem, o qual serve também para demonstrar quando a estabilização da temperatura do sistema e do ambiente foi alcançada. Como uma regra prática pode-se admitir 2 horas para cada 5°C de diferença de temperatura, para se alcançar a temperatura de equilíbrio⁽¹¹⁾. Deve-se tomar cuidados especiais no posicionamento ou alinhamento da câmara de ionização neste sistema.

O método mais adequado de utilização é a medida do intervalo de tempo necessário

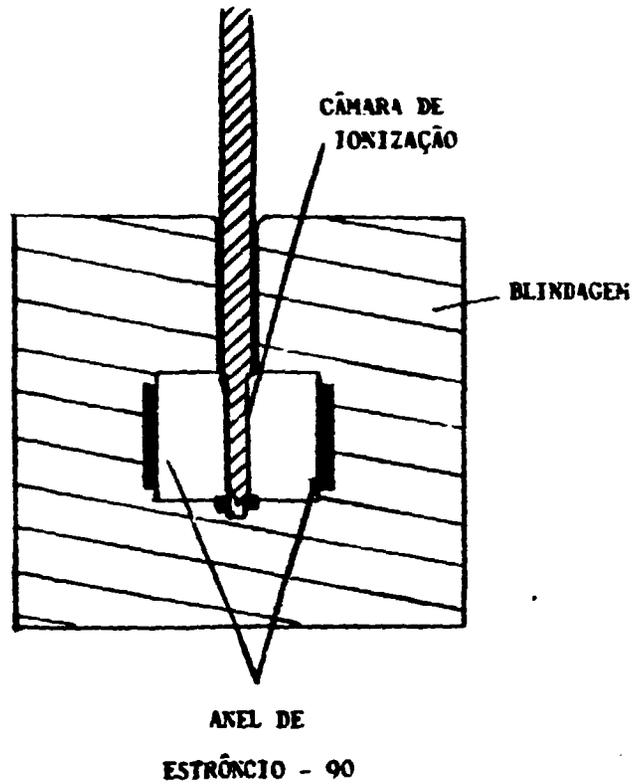


Fig.II-1 - Diagrama de um sistema de fonte radioativa de referência⁽⁴²⁾.

para se obter uma leitura padrão (tempo de controle), bem como a leitura para um intervalo de tempo padrão.

As medidas são feitas tomando-se uma série de leituras, com a câmara conectada ao eletrômetro e posicionada no sistema de fonte de referência. A reprodutibilidade do método é afetada por incertezas ao acaso tanto na cronometragem do tempo como na leitura.

O valor do tempo de controle é tão importante que consta dos certificados de calibração dos dosímetros clínicos.

Em resumo, o propósito de uma fonte de referência é permitir a confirmação de que a sensibilidade de um dosímetro para a radiação da fonte não foi alterada significativamente desde a calibração do instrumento. Para alguns tipos de dosímetros é também usada como leitura de referência para ajustar a sensibilidade do sistema de medida para compensar as mudanças na densidade do ar, bem como pequenas mudanças na sensibilidade do próprio sistema. Qualquer mudança na resposta da câmara de ionização para elétrons de alta energia, raios-X ou raios gama deve mostrar uma correspondente mudança na leitura com a fonte de referência⁽¹¹⁾.

CAPÍTULO III

EFEITOS DA RADIAÇÃO IONIZANTE EM MATERIAIS ISOLANTES

1- Interação da Radiação com Materiais Eletricamente Isolantes

Após a absorção de um fóton energético pelo meio através de interação Compton ou fotoelétrica, o elétron liberado irá dissipar a energia absorvida em uma série de ionizações e excitações liberando novos elétrons e deixando atrás de si íons positivos. Além disso, ligações moleculares podem ser quebradas e pode ocorrer degradação ou formação de cadeias, resultando em novas ligações moleculares, átomos livres e radicais, os quais podem mudar qualquer estrutura periódica de um material e criar armadilhas. Os elétrons livres podem vagar ao acaso através do material até ocorrer armadilhamento ou recombinação, tanto no interior como na superfície do mesmo. A mobilidade e o alcance dos portadores de carga somente são influenciados pela temperatura, e a aplicação de um campo elétrico externo resulta em um componente de deslocamento na direção do campo⁽⁴⁴⁾. As subseqüentes alterações químicas produzidas são características das interações e reações das entidades formadas e da composição química do material considerado⁽³⁴⁾.

Dois tipos de efeitos podem ser observados a partir da interação da radiação com os materiais eletricamente isolantes: efeitos permanentes e efeitos temporários⁽³⁴⁾.

Os efeitos permanentes da radiação, devidos às reações químicas, variam com a dose absorvida no material e em alguns casos são dependentes da taxa de dose absorvida. Em geral, os efeitos são dependentes das condições ambientais e das tensões mecânicas agindo no material durante a irradiação. Resultam predominantemente na deterioração das propriedades mecânicas, geralmente associadas a mudanças elétricas significantes.

Os efeitos temporários da radiação aparecem primeiramente como mudanças nas propriedades elétricas, tal como a condutividade induzida durante e por algum tempo após a irradiação. Esses efeitos são dependentes da taxa de dose absorvida.

A corrente direta devida ao aumento da condutividade observada durante a irradiação é associada a elétrons livres móveis excitados pela radiação absorvida⁽³⁴⁾. A persistência do efeito por um certo período de tempo após a irradiação é atribuída a uma fração dos elétrons gerados por radiação, os quais durante a irradiação vão para as armadilhas de baixa energia potencial⁽³⁴⁾. Eles escapam lentamente de seus poços de potencial e se recombinaem com íons carregados opostamente.

Para os compostos orgânicos a dose absorvida é o principal parâmetro para a avaliação

dos resultados da irradiação, uma vez que os efeitos observados em muitos casos são proporcionais à energia absorvida⁽³⁴⁾.

A temperatura de operação (durante e após a irradiação) e a atmosfera (especialmente o oxigênio e a umidade) podem influenciar significativamente os efeitos da radiação.

Em alguns polímeros orgânicos pode haver efeitos pós-irradiação atribuídos ao decaimento gradual de vários defeitos, tais como os radicais livres residuais.

As mudanças instantâneas na condutividade de um isolante elétrico durante uma irradiação podem ser mais importantes do que os efeitos da deterioração química a longo prazo, devidos à irradiação⁽⁴³⁾.

2- Condutividade Induzida por Radiação em Dielétricos.

A condutividade induzida por radiação em materiais isolantes pode ser interpretada sob dois pontos de vista, de uma maneira macroscópica relacionando-a com a taxa de exposição, dose total ou temperatura ou, de uma maneira microscópica, estudando os mecanismos de condução e a natureza dos portadores de carga⁽⁴⁴⁾.

De um modo geral, a condutividade induzida nos dielétricos durante a irradiação pode ser explicada pelo mesmo mecanismo descrito por Mott e Gurney⁽⁴⁷⁾ para a condutividade induzida em cristais isolantes irradiados com fótons de energia baixa^(5,43).

2.1- Fotocondutividade em Cristais Isolantes⁽⁴⁷⁾.

A absorção de radiação por um cristal dará origem a elétrons livres e buracos positivos livres. Se for aplicada uma tensão ao cristal, eles podem se movimentar em direções opostas contribuindo para uma corrente elétrica. Desse modo um cristal isolante irradiado pode apresentar condutividade.

Quando um cristal é colocado entre dois eletrodos (Fig. III - 1) e é irradiado, podem ser distinguidas duas correntes: uma corrente primária e uma corrente secundária.

A corrente primária I_p é uma corrente fotoelétrica direta, originada pelo movimento de elétrons em direção ao anodo e possivelmente também de buracos positivos em direção ao catodo. Não há qualquer passagem de elétrons do catodo para o cristal, exceto para neutralizar algum buraco.

O fluxo contínuo da corrente primária, em alguns cristais, parece quebrar a resistência do cristal tal que os elétrons podem entrar no cristal provenientes do catodo e passar através dele como num semiconductor. Essa corrente é chamada de corrente fotoelétrica secundária I_s .

Desse modo a corrente total é dada por

$$I = I_p + I_s \quad (III - 1)$$

2.2. Condutividade Induzida por Radiação em Plásticos Sintéticos.

A condutividade elétrica de materiais plásticos isolantes induzida pela radiação foi estudada por vários pesquisadores sob diferentes condições de irradiação, temperatura, taxa de exposição e energia da radiação^(5,14,19,20,23,43, 44,56). Os materiais mais pesquisados foram o Polietileno, Politetrafluoretileno (Teflon), Poliestireno, "Polyvinyl chloride"(P V C) e Perspex .

Macroscopicamente a corrente induzida I ou a condutividade σ induzida no material está relacionada com a taxa de dose absorvida \dot{D} ^(20,44) por uma expressão do tipo

$$\sigma = \dot{D}^\Delta \quad (III - 2)$$

onde Δ é uma característica do material.

Na Tabela III - 1 são fornecidos alguns valores de Δ para os materiais mais comuns. As medidas foram efetuadas à temperatura de 20°C. Foi utilizada a radiação-X de 220 kVp.

Tabela III - 1

Valores de Δ , obtidos para a relação $\sigma = \dot{D}^\Delta$, a 20°C com radiação-X de 220 kVp, de alguns plásticos sintéticos⁽²⁰⁾.

Material	Composição	Δ
Teflon	(C F ₂) _n	0,63
Polietileno	(C H ₂) _n	0,75
Perspex	C ₅ H ₈ O ₂	1,00
Poliestireno	(C H) _n	0,80

Pela Tabela III - 1 pode-se verificar que a distribuição de armadilhas é exponencial e que $\Delta \leq 1$. A fotocondutividade pode ser dividida em três casos⁽⁴⁴⁾:

Caso 1 - $\sigma \propto \dot{D}$

Na ausência de carga espacial a condutividade é proporcional ao número de elétrons liberados se todos os elétrons livres podem se mover em direção ao anodo ou são permanentemente armadilhados após atravessar um percurso constante. σ é independente da temperatura.

Caso 2 - $\sigma \propto \dot{D}^{1/2}$

Essa relação é obtida quando os elétrons são armadilhados somente por íons positivos formados no processo de ionização, considerando que todos os íons positivos têm a mesma secção de choque de captura.

Caso 3 - $\sigma = \sigma_0 e^{\Delta/kT}$

Se os elétrons forem liberados de armadilhas rasas por ativação térmica, eles formam uma contribuição adicional à condutividade, até serem removidos por uma armadilha profunda ou escaparem para os eletrodos. O coeficiente Δ pode tomar valores entre 0,5 e 1,0, dependendo da profundidade e distribuição das armadilhas e da temperatura.

A ativação térmica conduz a uma relação exponencial entre a condutividade σ e a temperatura T .

$$\sigma = \sigma_0 e^{\Delta/kT} \quad (\text{III} - 3)$$

onde

Δ - é a energia de ativação para armadilhamento térmico;

k - é a constante de Boltzmann;

σ_0 - é a condutividade inicial;

T - é a temperatura de irradiação.

Nos casos 1 e 2 a fotocorrente está intimamente relacionada com o processo de ionização e não pode persistir após a irradiação ser interrompida. No caso 3 uma combinação adequada de armadilhas e temperatura pode permitir que a condutividade persista por algum tempo após a irradiação ter terminado⁽⁴⁴⁾.

Microscopicamente, se a condutividade é devida aos elétrons, podem ocorrer vários processos na amostra tal que a corrente medida é a soma ou diferença desses processos. Primeiro, os elétrons livres podem se mover devido à aplicação de um campo elétrico externo em direção ao eletrodo. O segundo efeito é devido aos fotoelétrons e elétrons Compton. Com incidência de fótons com energias na região de MeV, os fotoelétrons e os elétrons Compton possuem uma componente do movimento na direção dos fótons incidentes.

Na região de energia da radiação gama, o processo Compton predomina e os elétrons têm uma energia⁽⁴⁴⁾

$$E = \frac{2m_0 c^2 \alpha^2 \cos^2 \phi}{1 + 2\alpha + \alpha^2 \sin^2 \phi} \quad (\text{III} - 4)$$

onde

m_0 - é a massa de repouso do elétron;

c - é a velocidade da luz ;

ϕ - é o ângulo de deflexão do elétron do caminho do fóton incidente de energia $h\nu$;

e α é definido por:

$$\alpha = \frac{h \nu}{m_0 c^2} \quad (\text{III} - 5)$$

A equação III - 4 indica que os elétrons terão energias menores quando ϕ for de 0 a 90° e nenhuma energia próximo de 90° . Consequentemente, um feixe unidirecional de fótons pode produzir uma corrente elétrica direcional na ausência de um campo elétrico aplicado. Esse efeito direcional pode ser melhor examinado com o arranjo mostrado na Fig. III - 2 ⁽⁴⁴⁾ onde uma amostra de plástico sintético (meio 2) é revestida de prata em duas faces opostas constituindo eletrodos e intercalada entre placas de um outro material isolante (meio 1). O conjunto é envolto totalmente por uma folha de metal (alumínio), a qual é aterrada. Um circuito simples de medida de corrente e uma fonte de tensão são adaptados ao conjunto. Na amostra incide um feixe de radiação ($h\nu$), de forma perpendicular ao plano dos eletrodos.

O diagrama esquemático mostra que a componente da corrente (I_1) devida ao movimento de elétrons no meio 1 é oposta à corrente (I_2) devida ao movimento de elétrons no meio 2; consequentemente a corrente externa observada será

$$I = I_1 - I_2 \approx I_0 \quad (\text{III} - 6)$$

onde I_0 é a componente devida à aplicação do campo elétrico e o sinal depende da direção do feixe de fótons e da polaridade do campo elétrico aplicado. Em todos os casos, I representa a direção do fluxo de elétrons. Invertendo a direção do feixe de fótons em relação à amostra, a corrente observada externamente é invertida. A corrente direcional é praticamente nula para o feixe de radiação incidente paralelo ao plano dos eletrodos.

3- Corrente Compton

Como já foi visto, na região de energias entre 0,5 e 3 MeV, o processo de interação predominante é o efeito Compton. Os elétrons Compton são espalhados preferencialmente com ângulos próximos de 0° e portanto um feixe de fótons unidirecional incidindo num isolante pode produzir uma corrente "direcional" na ausência de um campo elétrico ⁽⁴⁴⁾, denominada corrente Compton. Com fontes de radiação possuindo alta intensidade, essa corrente Compton pode alcançar valores apreciáveis. Em alguns dielétricos ela excede a corrente de condução produzida sob irradiação quando é aplicado um campo elétrico ⁽⁴⁴⁾.

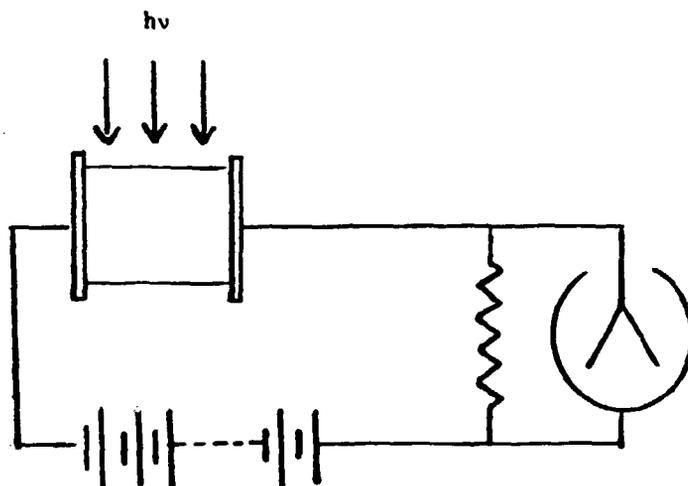


Fig.III-1 - Arranjo experimental para medida da corrente fotoelétrica primária (47).

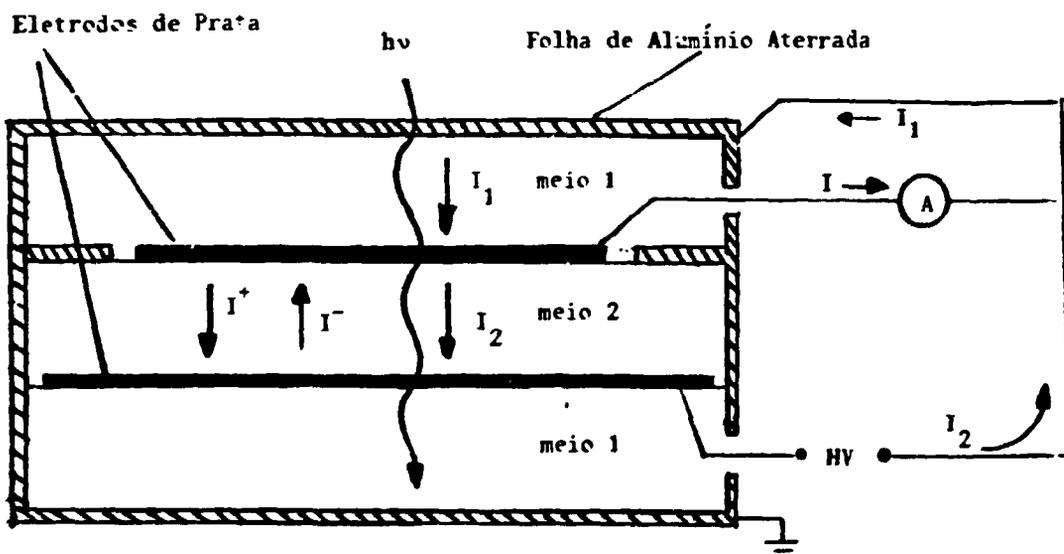


Fig.III-2 - Arranjo experimental para a medida da corrente Compton e da corrente gerada pela aplicação de tensão na amostra, induzidas pela irradiação de plásticos sintéticos (44).

I - corrente total

I_1 e I_2 - corrente direcional devida à interação Compton nos meios 1 e 2 respectivamente

I^+ e I^- - corrente devida à tensão aplicada na amostra

Gross⁽²³⁾ desenvolveu uma expressão aproximada para o cálculo da corrente Compton, considerando-se as seguintes aproximações:

- a- O alcance dos elétrons secundários é muito pequeno comparado com o alcance médio do fóton do feixe primário, o qual é definido pelo recíproco do coeficiente de absorção. No intervalo de energia considerado, os elétrons são muito menos penetrantes do que os fótons de mesma energia. Por outro lado, a energia média dos elétrons Compton produzidos por radiação gama monoenergética é bem menor do que a energia do fóton. Portanto essa condição é certamente satisfeita. O alcance dos elétrons é suposto também ser menor quando comparado com as dimensões do campo de radiação ;
- b- Os elétrons são tratados como partículas. Por exemplo, a relação alcance-energia é considerada linear ;
- c- A emissão de elétrons Compton é tratada como um problema unidimensional. A divergência angular dos elétrons é considerada pela introdução de um coeficiente de redução empírico.

Seja

x - a espessura do absorvedor, em cm,

$P(x)$ - o fluxo de energia radiante, em $\text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$,

$E(x)$ - a energia máxima dos elétrons produzidos na profundidade x , em erg,

$R(x)$ - o alcance máximo dos elétrons produzidos na profundidade x , em cm,

e - a carga do elétron, em C,

$i(x)$ - a intensidade de corrente de elétrons, em A,

$n(x)$ - o fluxo de elétrons, em s^{-1} ,

$f(x, \epsilon) d\epsilon$ - o espectro de energia diferencial dos elétrons produzidos na profundidade x , por unidade de comprimento e por unidade de tempo, em $\text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,

$g(x, r) dr$ - o espectro de alcance diferencial dos elétrons produzidos na profundidade x , por unidade de comprimento e por unidade de tempo, em $\text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,

ν, σ, μ - os coeficientes total, de espalhamento e de absorção verdadeiro, respectivamente dos raios gama, em cm^{-1} .

O fluxo de energia radiante $P(x)$ de um feixe de fótons decresce pela absorção verdadeira (dP_1 / dx) e por espalhamento (dP_2 / dx).

Portanto

$$dP / dx = dP_1 / dx + dP_2 / dx \quad (\text{III} - 7)$$

No intervalo de energia considerado, a absorção é devida principalmente à produção de elétrons Compton. Desse modo dP_1 / dx é igual à energia total dos elétrons, ou

$$dP_1 / dx = - \int_0^E e f(x, \epsilon) d\epsilon \quad (\text{III} - 8)$$

O fluxo de elétrons, através da secção de choque do absorvedor à profundidade x , é devido aos elétrons produzidos entre x e $(x - R)$. O número de elétrons produzidos por segundo à profundidade $(x - s)$ a uma distância ds é dado por ds vezes a integral sobre $g(x - s, r)$ dr desde $r = 0$ a $r = R$. Mas, somente os elétrons com alcance $r \geq s$ alcançam a profundidade x . O fluxo total para $x \geq R$ é a soma das contribuições de todos os elementos ds desde $s = 0$ a $s = R$. Os elétrons são espalhados para frente, com uma distribuição angular que depende da energia do fóton. Um tratamento rigoroso deveria considerar explicitamente a influência da distribuição angular. Neste caso será dado um tratamento semi-empírico. O dito espalhamento dos elétrons Compton corresponde, na verdade, qualitativamente a uma redução do alcance médio dos elétrons. Desse modo introduz-se o fator de redução κ , que é menor do que 1, mas da mesma ordem de grandeza. Esse fator depende da energia do fóton, mas de acordo com Davisson e Evans⁽¹⁴⁾, esse efeito torna-se pequeno para energias acima de 1 MeV. Portanto:

$$n(x) = \kappa \int_0^R ds \int_s^R g(x - s, r) dr \quad (\text{III} - 9)$$

O alcance dos elétrons é muito pequeno quando comparado com o alcance médio do correspondente fóton primário. Desse modo a taxa de produção de elétrons em um intervalo de distância pode ser considerada como uma constante, ou

$$g(x - s, r) = g(s, r) \quad \text{para } 0 < s < R \quad (\text{III} - 10)$$

Desprezando também a variação de R em função de x sobre o intervalo de distância, a integração parcial da equação III - 9, após a substituição da equação III - 10, fica:

$$n(x) = \kappa \int_0^R s g(x, s) ds \quad (\text{III} - 11)$$

Considerando que os elétrons podem ser tratados como partículas, com uma relação alcance-energia linear, então um elétron de energia ϵ tem um alcance

$$s = a \epsilon \quad (\text{III} - 12)$$

onde a é uma constante. O espectro de energia diferencial $f(x, \epsilon) d\epsilon$ é agora unicamente descrito pelo espectro de alcance diferencial $g(x, s) ds$: o número de elétrons produzidos com alcance entre s e $(s + ds)$ é igual ao número de elétrons produzidos com energia entre ϵ e $\epsilon + d\epsilon$, onde s e ϵ são relacionados pela equação III - 12. Portanto tem-se :

$$g(x, s) ds = f(x, \epsilon) d\epsilon \quad (\text{III} - 13)$$

substituindo as equações III - 12 e III - 13 na equação III - 11, tem-se, com $R = a \epsilon$:

$$n(x) = a \kappa \int_0^E \epsilon f(x, \epsilon) d\epsilon \quad (\text{III} - 14)$$

A corrente Compton é dada pelo fluxo de elétrons direcional total, multiplicado pela carga do elétron,

$$i(x) = \kappa n(x) e \quad (\text{III} - 15)$$

Substituindo as equações III - 14 e III - 15 na equação III - 8 obtém-se a corrente em função do decréscimo da intensidade primária:

$$i(x) = -a \kappa e^{-\nu x} \quad \text{e} \quad dP_1(x) / dx \quad \text{(III - 16)}$$

A absorção de um feixe paralelo de radiação monoenergética é exponencial, isto é:

$$P(x) = P_0 e^{-\nu x} \quad \text{(III - 17)}$$

com um coeficiente total de atenuação

$$\nu = \mu + \sigma \quad \text{(III - 18)}$$

onde μ é o coeficiente de absorção verdadeiro e σ , o coeficiente de espalhamento. De acordo com isso

$$dP_1 / dx = -\mu P(x) \quad \text{e} \quad \text{(III - 19)}$$

substituindo na equação III - 16

$$i(x) = \kappa a e^{-\mu x} P(x) \quad \text{(III - 20)}$$

Essa expressão fornece a intensidade da corrente Compton em função da intensidade do feixe. O coeficiente κ deve ser determinado experimentalmente. Pode-se também estabelecer uma relação entre a corrente e a dose absorvida. Essas equações se aplicam somente para profundidades $x > R$, isto é, após a corrente ter atingido a saturação. Na zona de transição $0 < x < R$, a corrente aumenta aproximadamente de forma linear de 0 a $i(R)$.

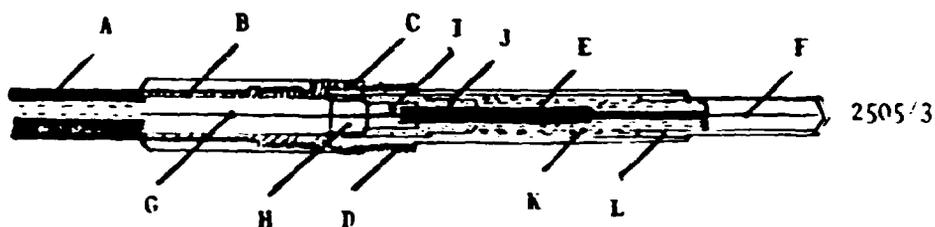
4- Irradiação de Cabos de Câmaras de Ionização.

Um sistema completo de câmara de ionização consiste de quatro partes: a câmara de ionização, a fonte de tensão para polarizar os eletrodos da câmara, um eletrômetro incluindo um sistema de leitura e um cabo inter-conector, pelo qual a corrente gerada na câmara vai para o eletrômetro⁽⁵³⁾.

Um esquema simplificado de uma câmara de ionização tipo dedal modelo 2505/3 da Nuclear Enterprises (N E) e sua capa de equilíbrio eletrônico para radiação gama, modelo 2507/3 é mostrado na Fig. III - 3. Um esquema simplificado de cabo triaxial, utilizado nos sistemas das câmaras N E modelo 2505/3, é mostrado na Fig. III - 4.

Neste tipo de cabo, o material dielétrico que envolve o condutor central é geralmente o polietileno ou Teflon. Na Tabela III - 2 são fornecidas algumas características de cabos normalmente utilizados com câmaras de ionização.

CÂMARA DE IONIZAÇÃO

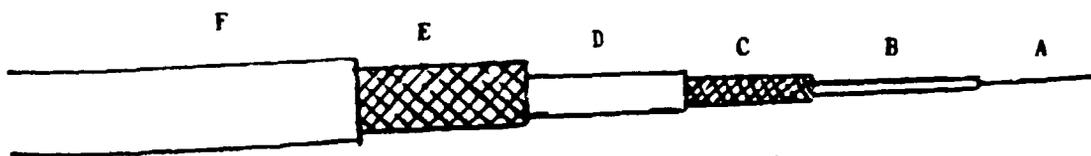


CAPA DE EQUILÍBRIO ELETRÔNICO



- A - COBERTURA EXTERNA DO CABO
- B - MALHA EXTERNA DO CABO
- C e D - DURAL
- E e F - ELETRODO CENTRAL
- G - CABO CONDUTOR
- H - MALHA INTERNA
- I e J - POLIETILENO
- K - PT CFE
- L - GRAFITE

Fig.III-3 - Esquema simplificado da câmara de ionização tipo dedal NE modelo 2505/3 e sua capa de equilíbrio eletrônico.



- A - CABO DO SINAL
- B e D - ISOLANTES
- C e E - MALHAS DE BLINDAGEM
- F - CAPA EXTERNA

Fig.III-4 - Esquema simplificado do cabo triaxial NE 2509

Tabela III - 2

Características de Cabos de Conexão e de Extensão Normalmente Empregados em Câmaras de Ionização⁽⁵³⁾.

Cabo	Tipo	Dielétrico Interno
Amphenol (21 - 537)	Coaxial	Polietileno
Microdot (275 - 3801)	Coaxial	Polietileno
Victoreen	Coaxial	Teflon
Microdot (250 - 3822)	Triaxial	Polietileno
Capintec	Triaxial	Teflon
Exradin	Triaxial	Teflon
Keithley	Triaxial	Polietileno

Ao se irradiar o cabo de uma câmara de ionização com fótons dois efeitos separados ocorrem:

Um dos efeitos é uma corrente negativa proporcional à intensidade da radiação, que corresponde à corrente Compton, que é chamado de efeito direto⁽⁵³⁾.

O segundo efeito é a condutividade induzida no dielétrico pela radiação. A corrente de fuga que ela representa é positiva, dependendo da polaridade da tensão aplicada entre o condutor central e a blindagem interna, e tem intensidade proporcional à tensão aplicada⁽⁵³⁾.

A presença dos dois efeitos simultâneos causa uma certa dificuldade em se determinar a intensidade das contribuições em separado.

Na Tabela III - 3 são fornecidos os valores da corrente Compton e da corrente de fuga determinados por Spokas e Meeker⁽⁵³⁾, obtidos separadamente, para alguns cabos de câmaras de ionização, irradiados com radiação gama do ^{60}Co com uma taxa de exposição de $2,7 \cdot 10^{-3} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$.

Como pode ser observado, o comportamento relativo dos dois tipos de correntes é característico de cada cabo.

Tabela III - 3

Corrente Compton e Corrente de Fuga Induzidas pela Radiação Gama do ^{60}Co em Cabos de Câmaras de Ionização⁽⁵³⁾.

Cabo	Corrente Compton (10^{-16} A)	Corrente de Fuga (10^{-16} A)
Amphenol	380	80
Microdot (Coaxial)	300	45
Microdot (Triaxial)	65	15
Capintec	40	45
Exradin	55	40
Keithley	130	120
Victoreen	70	25

4.1 - Dependência da Resposta de uma Câmara de Ionização com Tamanho de Campo

A dependência da resposta de uma câmara tipo dedal com o tamanho do campo de radiação pode ser interpretada como sendo causada pelo fato de sua haste e seu cabo estarem no campo de radiação. Os efeitos físicos que contribuem para a dependência são:

- a- a radiação espalhada pela haste da câmara;
- b- a corrente de ionização proveniente de cavidades em torno das conexões do eletrodo coletor;
- c- a fuga de corrente induzida pela irradiação do isolante da haste ou do cabo da câmara, que ocorre somente durante a irradiação e é função da taxa de exposição instantâneas;
- d- a fuga de corrente pós-irradiação; é induzida pela irradiação do material isolante da haste ou do cabo, que persiste após a irradiação ter cessado; está relacionada com a irradiação precedente do cabo ou da haste e geralmente decresce exponencialmente com o tempo⁽¹²⁾.

Capítulo IV

CALIBRAÇÃO E DOSIMETRIA

1- Calibração de Dosímetros Clínicos

Embora os fabricantes tentem fazer com que a sensibilidade total de um dosímetro clínico (câmara de ionização + eletrômetro) seja ajustada tal que a leitura obtida indique aproximadamente a exposição em roentgens, um dosímetro não pode ser utilizado sem uma calibração prévia, para que sua resposta indique o mais exatamente possível a exposição em roentgens.

Calibração de um dosímetro significa determinar sua resposta para exposições a uma radiação conhecida ou dose absorvida conhecida e sempre envolve o uso de pelo menos um instrumento padrão ou de referência⁽³⁰⁾.

A classificação dos instrumentos de referência utilizados para a calibração dos dosímetros é a seguinte:

- a- Padrão: instrumento de medida usado para definir, representar fisicamente, conservar ou reproduzir a unidade de uma grandeza com o objetivo de transferi-la a outros instrumentos de medida ;
- b- Padrão Primário: instrumento de mais alta qualidade metrológica, que permite a determinação da unidade de uma grandeza a partir de medidas de grandezas físicas básicas ;
- c- Padrão Secundário: instrumento calibrado por meio de uma comparação com um padrão primário ;
- d- Instrumento de Referência: instrumento de medida, de desempenho e estabilidade altos, usado apenas para calibração de outros instrumentos; substitui o padrão secundário, dependendo se há um controle de sensibilidade a longo prazo e se participa de intercomparações nacionais ;
- e- Padrão Terciário: instrumento calibrado por meio de uma comparação com um padrão secundário.

O termo calibração é algumas vezes usado para a determinação da taxa de exposição ou taxa de dose absorvida (calibração da máquina de terapia) para um ponto de calibração no feixe de radiação sob condições específicas. Neste trabalho, todavia, esse procedimento será trata-

do como dosimetria do feixe e o termo calibração será reservado para a calibração de instrumentos.

A relação entre a resposta do dosímetro (L) e o valor da exposição X , no mesmo ponto de medida, é dada por:

$$X = L \cdot f_c^E \quad (IV - 1)$$

onde f_c^E é o fator que converte a leitura indicada pelo dosímetro para a medida da exposição (fator de calibração). Este fator é dependente da qualidade da radiação e é determinado através da comparação da exposição (X') determinada por um dosímetro padrão com a resposta (L') do dosímetro no mesmo ponto de um feixe de radiação:

$$f_c^E = \frac{X'}{L'} \quad (IV - 2)$$

No uso de dosímetros clínicos, deve-se levar em conta as variáveis que alteram a resposta do mesmo, como: temperatura, pressão, umidade relativa do ar e fuga de corrente no sistema, bem como realizar testes que assegurem o perfeito funcionamento do dosímetro, como: reprodutibilidade, estabilidade, linearidade e tempo de estabilização.

As correções da resposta de um dosímetro devido à temperatura e à pressão ambientais são necessárias, porque as câmaras de ionização do tipo dedal não são, na maioria, seladas. Desta forma, variações nas condições ambientais provocam uma variação na massa de ar do volume sensível da câmara. Tais correções podem ser resumidas num fator:

$$F_{T,P} = \frac{273,15 + T}{273,15 + t} \cdot \frac{p}{P} \quad (IV - 3)$$

onde P é a pressão padrão (101,3 kPa), T a temperatura padrão (20°C), t a temperatura ambiente e p a pressão ambiente.

Esta correção não é necessária nos casos em que a câmara de ionização for selada ou quando o eletrômetro possuir um dispositivo de ajuste da sensibilidade que efetua a correção diretamente.

A correção devido à umidade, embora ainda não seja bem conhecida, é praticamente desprezível em relação à precisão das medidas; mesmo assim, deve-se garantir que a umidade no ambiente do laboratório seja controlada (utilizando-se aparelhos de ar-condicionado, desumidificadores, etc.) para evitar as correções neste caso.

Uma outra técnica é da calibração por componentes ^(9, 52), que apresenta vantagens especiais no caso dos usuários que possuem várias câmaras de ionização, mas só um eletrômetro, e têm que mandar um conjunto completo (câmara e eletrômetro) para recalibração. Desta forma a clínica de radioterapia não pode realizar medidas com as outras câmaras.

Com a calibração por componentes é possível obter-se o fator de calibração de

câmara de ionização f_c e do eletrômetro f^E independentemente. Desse modo o fator de calibração será:

$$f_c^E = f_c \cdot f^E \quad (\text{IV - 4})$$

2- Controle de Qualidade de Dosímetros Clínicos.

Como já foi mencionado, para garantir que o fator de calibração seja confiável, consistente e estável, precisam ser efetuados alguns testes antes e após a calibração propriamente dita, pois a calibração, na realidade, consiste dos testes preliminares e da calibração propriamente dita.

2.1 - Teste de Fuga.

O instrumento deve ser testado não só antes da calibração mas regularmente para verificação da existência de fuga de corrente.

A corrente de fuga é definida como qualquer sinal coletado pelo dosímetro que não seja produzido pela ionização decorrente da irradiação do volume sensível⁽⁶⁾.

O procedimento adequado para verificação da existência de corrente de fuga é descrito a seguir.

Irradia-se a câmara de ionização utilizando-se a fonte de referência até obter uma leitura L no dosímetro. Após remover a câmara da fonte de referência aguarda-se um intervalo de tempo Δt (em minutos), que deve ter a duração de 10 vezes o tempo necessário para cada medida de exposição⁽⁴²⁾ e efetua-se nova leitura L' . A corrente de fuga (dig / h) é dada por:

$$(L - L') \cdot \frac{60}{t} \quad (\text{IV - 5})$$

A corrente de fuga não deve ser maior que 0,5 % do valor da menor taxa de exposição a que o dosímetro deva ser submetido⁽³⁰⁾.

2.2 - Linearidade do Eletrômetro.

Durante a calibração de um dosímetro em um laboratório de padronização, o mesmo é irradiado de tal maneira a produzir um determinado número de dígitos (em geral meio da escala). Se forem obtidos outros números de dígitos

durante o uso rotineiro, é necessário corrigir-se a leitura para uma eventual falta de linearidade da escala.

Uma leitura L tomada como referência é produzida por uma carga acumulada Q . Se uma carga diferente q produz uma leitura l , essa leitura deve ser corrigida por um fator f (6):

$$f = \frac{L \cdot q}{l \cdot Q} \quad (\text{IV - 6})$$

Com a câmara posicionada dentro da fonte de referência, mede-se o tempo necessário t_m para se atingir um determinado número de dígitos L . Repete-se o procedimento para outros números de dígitos ao longo da escala (1). Determina-se a seguir o fator de linearidade f_L para cada valor de l pela expressão:

$$f_L = \frac{L \cdot t_o}{l \cdot t_m} \quad (\text{IV - 7})$$

onde t_o é o tempo necessário para se atingir l dígitos.

A linearidade do eletrômetro deve ser melhor do que $\pm 1\%$, limitando o fator de linearidade a (6)

$$0,99 \leq f_L \leq 1,01$$

2.3 - Reprodutibilidade.

A reprodutibilidade das medidas é verificada observando-se os valores dos tempos de controle obtidos para 10 medidas consecutivas, determinando-se o valor médio e o seu desvio padrão.

A menos que seja especificado pelo fabricante, a variação do tempo de controle deve ser menor do que 1% (6).

2.4 - Estabilidade a Curto e Longo Prazos.

No intervalo entre duas calibrações, a sensibilidade do dosímetro deve ser verificada pela medida do tempo de controle através da utilização da fonte de referência, a fim de se determinar possíveis variações na sua sensibilidade e consequentemente no fator de calibração. A longo prazo, a estabilidade do dosímetro é verificada acompanhando-se sua sensibilidade cronologicamente, através de gráfico do tempo de controle corrigido para o decaimento da fonte.

O procedimento recomendado é descrito a seguir:

O termômetro e a câmara são colocados na fonte de referência nos seus respectivos orifícios, nas posições de referência. O eletrômetro é ligado e o sistema assim permanece durante 1 hora para estabilização à temperatura ambiente. Decorrido esse tempo, a temperatura, a pressão ambiente e a umidade relativa do ar são medidos, o eletrômetro é "zerado" e inicia-se a contagem de tempo (t_1) para obtenção de 50 dígitos na escala de 100 do dosímetro. Deve-se efetuar 10 medidas consecutivas⁽⁶⁾, sendo registrados os valores de temperatura (t) e pressão atmosférica (p) para cada medida⁽³⁰⁾.

No caso do teste de estabilidade a longo prazo, a câmara é totalmente retirada da fonte e recolocada, em medidas consecutivas⁽³⁰⁾.

O tempo t_0 (em segundos), que representa o tempo obtido para uma leitura de 50 dígitos à temperatura de 20°C e pressão atmosférica de 101,3 kPa, é determinado por:

$$t_0 = t_1 \times F_{T, P} \quad (\text{IV} - 8)$$

ou seja

$$t_0 = t_1 \times \frac{293,15}{273,15 + t} \times \frac{p}{101,3} \text{ s} \quad (\text{IV} - 9)$$

A correção do tempo t_n para o decaimento da fonte radioativa de ^{90}Sr é calculada por:

$$t_n = t_r \cdot e^{\ln 2 \cdot n / T_{1/2}} \quad (\text{IV} - 10)$$

onde

n - é o tempo decorrido em anos em relação à data de referência de determinação da atividade da fonte.

t_n - tempo de referência real após decorrido o tempo n .

t_r - tempo de referência por ocasião da calibração da fonte.

O tempo t_0 não deve diferir do tempo de referência corrigido por mais de ± 1%⁽³⁵⁾.

O tempo de referência final corrigido t_f é a média aritmética dos 10 valores t_0 , o qual é anotado e colocado em gráfico para acompanhamento da estabilidade. As barras de erro representam o desvio padrão da média.

A menos que seja especificado pelo fabricante, a variação do tempo de controle deve ser menor do que 1%⁽⁴²⁾.

3- Dosimetria do Feixe

A dosimetria ou calibração de uma unidade de tratamento de radioterapia consiste de um exame de características tais como energia, homogeneidade, comportamento da dose profunda e taxa de exposição como função do tempo de irradiação ou número de dígitos de monitor. Esses parâmetros são medidos de modo a permitirem a estabilização da unidade de tratamento e são geralmente valores médios de uma série de medidas.

Quando em uso para o tratamento de pacientes, espera-se que a unidade de terapia produza, instantaneamente, o feixe que foi descrito pelos processos utilizados para a sua dosimetria.

A dosimetria com câmara de ionização constitui, sem dúvida, o método mais comum para a determinação de dose absorvida (dosimetria) em feixes para aplicações médicas de aceleradores de elétrons e unidades de radiação gama de ^{60}Co . Os procedimentos dosimétricos práticos são bem estabelecidos em protocolos internacionais^(4,31,32) e nacionais^(2,15,25,26,48,50) (vide Apêndice).

A determinação da dose absorvida em I C I por fótons requer o mesmo tipo de dados utilizados na radioterapia regular, mas requer ainda correções específicas uma vez que a geometria é de grandes distâncias⁽³⁸⁾.

Uma vez que as câmaras monitoras situadas nos feixes de radiação de aceleradores são geralmente calibradas em termos de 1 rad (10^{-2} Gy) por unidade do monitor (u . m.) sob condições padrões (a uma distância de 1 metro da fonte, a uma profundidade p_0 em um phantom e tamanho de campo de 10 x 10 cm), precisa-se descrever a dose à profundidade p_0 à distância da I C I para unidades de monitor posicionado na mesa de controle. Tal relacionamento, isto é, rad / u . m. para as I C I, pode ser determinado por 2 métodos: método direto, calculado diretamente através dos dados medidos usando phantoms equivalentes ao paciente ou indiretamente, através de dados obtidos para irradiações a distâncias normais.

Os métodos de calibração descritos como exemplo se aplicam à técnica de campos opostos bilaterais.

3.1 - Método Direto⁽³⁸⁾.

Um phantom de forma cúbica, de água ou plástico, com uma câmara posicionada (em p_0), é colocado à distância do I C I. O phantom deve ser aproximadamente equivalente ao tamanho de um paciente típico para se obter o mesmo espalhamento produzido pelo paciente no ponto de medida. Para feixes de radiação-X de energias baixas, diferentes tamanhos de phantoms devem ser utilizados, uma vez que o espalhamento irá depender significativamente das

dimensões e da forma do paciente. Um único phantom equivalente a um paciente médio, pode ser usado para energias de raios-X de 10 MV ou maiores, uma vez que para energias altas as mudanças no espalhamento com o tamanho de campo são relativamente menos importantes.

Com a câmara posicionada à profundidade de referência p_0 , as medidas são efetuadas para as várias espessuras de phantoms à frente da câmara, mantendo a câmara em posição fixa relativa à fonte. Cerca de 10 cm do material do phantom deve ser colocado atrás da câmara para se obter espalhamento completo. Com radiação de energias baixas é necessário determinar uma série de fatores de correção para diferentes espessuras do tecido atrás do ponto em que se deseja calcular a dose.

Uma vez que toda a câmara e parte do cabo estão no feixe, neste caso as leituras devem ser corrigidas para possíveis efeitos de haste e cabo⁽³⁸⁾.

Os valores medidos podem ser tabelados e usados diretamente para calcular a relação $\text{rad}/\text{u. m.}$, observando-se que o eixo mediano do paciente esteja na mesma posição da câmara.

3.2 - Método Indireto⁽³⁸⁾.

Se os dados básicos medidos à distância padrão são válidos para as distâncias de $|C|$, pode-se calcular a dose à distância de $|C|$, tomando-se o cuidado de que fatores tais como o espalhamento pelo phantom e pelos colimadores sejam levados em conta. O fator de correção de espalhamento pelo colimador (S_c) é definido como a razão entre a taxa de dose no "espaço livre" para um dado campo e aquela do campo de referência (por exemplo 10 x 10 cm). O fator S_c pode ser medido no ar com uma câmara de ionização com capa de equilíbrio eletrônico. O fator de correção total de espalhamento (S_{cp}) é medido no phantom e definido como a razão entre a taxa de dose à profundidade de referência p_0 no phantom para um dado campo e para um campo de referência de 10 x 10 cm. O fator de correção de espalhamento do phantom (S_p) é determinado indiretamente:

$$S_p = \frac{S_{cp}}{S_c} \quad (\text{IV} - 11)$$

Tanto S_{cp} como S_c são medidos à uma distância padrão fonte-eixo. Nas $|C|$ a distância fonte-linha mediana do paciente é diferente dessa distância; o campo deve ser projetado para a distância padrão fonte-eixo para se aplicar S_c . O fator S_p para os campos de $|C|$ deve corresponder ao tamanho de campo efetivo.

O valor U da u . m. para uma dose no tumor D_T à profundidade d é dado por:

$$U = \frac{D_T \times (h'/h)^2}{RTM(r_d, d) \times S_c(r_c) \times S_p(r_d)} \quad (IV - 12)$$

onde

h - é a distância padrão entre a fonte e o ponto de calibração.

h' - é a distância fonte-eixo do corpo do paciente.

RTM - relação tecido-máximo, isto é, a relação entre a dose para um dado ponto no tecido e a dose no mesmo ponto à máxima profundidade de máxima dose*.

r_c - é o tamanho de campo total.

r_d - é o tamanho de campo efetivo.

$S_c(r_c)$ - é o fator S_c para o tamanho do campo total (r_c) projetado para a distância padrão .

$S_p(r_d)$ - é o fator S_p para o tamanho de campo efetivo(r_d)na linha mediana do paciente.

* A relação entre a dose em um dado ponto no tecido e a dose no mesmo ponto à profundidade de referência p_0 em um phantom é chamada relação tecido-phantom (RTF). Se p_0 corresponder à máxima profundidade de máxima dose, a grandeza é chamada relação tecido-máximo (RTM).

Capítulo V

SISTEMAS DE MEDIDA E DE IRRADIAÇÃO

1 - Sistemas de Medida

Todas as medidas foram efetuadas utilizando-se os equipamentos descritos a seguir pertencentes ao Laboratório de Calibração do IPEN.

1.1 - Eletrômetro

O eletrômetro utilizado é da Nuclear Enterprises Ltd. (Inglaterra), tipo Baldwin-Farmer, modelo 2502/3, série 330. É um eletrômetro com amplificador operacional de estado sólido usado de modo integrador, com realimentação negativa, que opera baseado no princípio de balanceamento Townsend. A corrente de ionização é armazenada no capacitor C, que é do tipo integrador, de alto poder de isolamento (poliestireno). A tensão produzida através do capacitor é aumentada pelo amplificador operacional e uma medida aproximada é obtida através da leitura direta do medidor M. A medida exata é determinada pelo balanceamento realizado com um potenciômetro manual, de alta precisão, com leitura digital, utilizando o medidor M como um indicador nulo: Fig. V -1.

Acoplada ao eletrômetro há uma fonte de tensão que, através do cabo de conexão, polariza a câmara de ionização com -300 V na sua parede, em relação ao eletrodo central^(29,35).

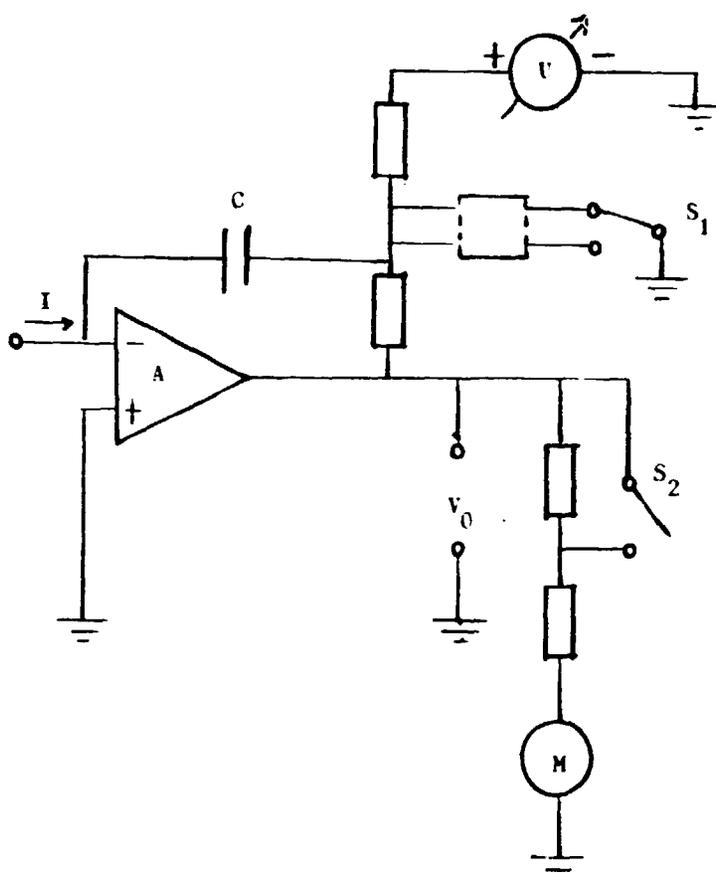
1.2 - Câmaras de Ionização

Para a análise da influência da irradiação de cabos e conectores, foram utilizadas três câmaras de ionização Nuclear Enterprises (Inglaterra) do tipo dedal com as mesmas características, sendo este tipo de câmara normalmente a mais utilizada pelos serviços de radioterapia.

Algumas características das câmaras utilizadas são apresentadas na Tabela V -1.

Foram também utilizados dois cabos de extensão da Nuclear Enterprises Ltda. (N E) Inglaterra, modelo 2509/3, com 6 m de comprimento.

Uma capa de equilíbrio eletrônico de metilmetacrilato (Plexiglas), modelo 2507/3, da Nuclear Enterprises, acompanha cada câmara.



- I - CORRENTE DE IONIZAÇÃO
 A - AMPLIFICADOR OPERACIONAL
 C - CAPACITOR COLETOR
 U - GERADOR DE TENSÃO
 S₁ - CHAVE DE GANHO
 S₂ - CHAVE DE SENSIBILIDADE
 M - INDICADOR DE NULO

Fig.V-1- Esquema simplificado do circuito do eletrômetro modelo 2502/3 da Nuclear Enterprises Ltd. (52)

Tabela V - 1

Características das Câmaras de Ionização Utilizadas.

Fabricante	N. E.	N. E.	N. E.
Tipo	Dedal	Dedal	Dedal
Modelo	2505	2505/3	2505/3
Série	312	1229	2019
Volume Nominal (cm ³)	0,6	0,6	0,6
Material da Parede	Nylon	Grafite	Grafite
Polarização e Tensão Usual	-300 V	-300 V	-300 V
Cabo de Conexão da Câmara	Triaxial	Triaxial	Triaxial
Extensão do Cabo de Conexão	6,0 m	10,0 m	10,0 m

1.3 - Fonte de Referência

Foi utilizada uma fonte de referência de ⁹⁰Sr de 0,37 GBq (10 mCi) de atividade nominal, da Nuclear Enterprises Ltd. (Inglaterra), modelo 2505/3, série 1326.

1.4 - Barômetros, Termômetro e Higrômetro

Para todas as medidas efetuadas no IPEN utilizou-se um barômetro aneróide de precisão modelo M K 2, tipo M 2236, série A 364, da Negretti & Zambra (Inglaterra), com precisão de 0,05 mbar, que opera na faixa de 900 a 1050 mbar.

Para as medidas efetuadas fora do IPEN utilizou-se um barômetro aneróide com precisão de 0,5 mbar, Domatic (Alemanha), calibrado em relação ao barômetro de precisão.

O termômetro de mercúrio utilizado, marca Kessel (Alemanha), tem precisão de 0,5°C.

O higrômetro, marca Haenny (Suíça), tem precisão de 0,5%.

2- Sistemas de Irradiação

Para as irradiações experimentais foram utilizados oito sistemas de irradiações: quatro de raios-X, dois de radiação gama e dois de elétrons, que são descritos a seguir.

2.1 - Sistema de Radiação-X de Energias Baixas.

A radiação-X com energias efetivas de 14 a 24 keV foi obtida, utilizando-se um tubo Philips e um gerador modelo Geigerflex, da Rigaku Denki, Kogyo Co. Ltd. (Japão), instalado no Laboratório de Calibração do IPEN. As condições experimentais de irradiação utilizadas são descritas na Tabela V - 2.

Tabela V - 2

**Condições Experimentais do Sistema de Radiação-X de Energias Baixas
Laboratório de Calibração - IPEN.**

Tensão kV	Corrente mA	Filtração Adicional mm Al	Camada Semi-Redutora mm Al	Energia Efetiva keV
25	30	0,445	0,25	14
40	20	0,682	0,50	18
50	20	1,02	1,00	24

2.2 - Sistema de Radiação-X de Energias Intermediárias.

A radiação-X de energias intermediárias foi obtida utilizando-se um sistema Stabilipan, Siemens (Alemanha), instalado na Divisão de Radioterapia do Hospital A. C. Camargo, São Paulo, capital. As condições experimentais de irradiação são descritas na Tabela V - 3.

Tabela V - 3

**Condições Experimentais do Sistema de Radiação-X de Energias Intermediárias.
Hospital A. C. Camargo, SP.**

Tensão kV	Corrente mA	Filtração Adicional	Camada Semi-Redutora	Energia Efetiva keV
60	20	2,0 mm Al	2,0 mm Al	28
80	20	2,0 mm Al	2,2 mm Al	30
120	20	0,2 mm Cu	0,25 mm Cu	47
160	20	0,5 mm Cu	0,75 mm Cu	67
200	20	1,0 mm Cu	1,5 mm Cu	94
250	15	ThI	2,5 mm Cu	137

2.3 - Sistema de Radiação-X de Energias Altas.

A radiação-X de energias altas foi obtida utilizando-se três aceleradores para uso clínico:

- a- Acelerador linear Clinac - 4, Varian (E U A), que fornece feixes de fótons com 4 MeV de energia máxima, instalado na Divisão de Radioterapia do Hospital A. C. Camargo, São Paulo, capital;
- b- Acelerador linear C G R - I O P, modelo Neptune (França), que fornece feixes de fótons com 9 MeV de energia máxima, instalado no Instituto de Radioterapia do Hospital das Clínicas da Universidade de São Paulo;
- c- Acelerador linear S L 75 / 10 Medical Linear Accelerator - Philips (Holanda), instalado na Divisão de Radioterapia do Hospital Sírio-Libanês, São Paulo, capital, que fornece feixes de fótons com 8 MeV de energia máxima.

2.4 - Fonte de Radiação Gama de ^{137}Cs .

O radioisótopo de ^{137}Cs é uma fonte de radiação gama que emite fótons de 0,67 MeV. As irradiações foram efetuadas utilizando-se um aparelho Cesapan-M, Generay (Itália), atualmente com atividade de 38,8 TBq, instalado no Laboratório de Calibração do IPEN.

2.5 - Fonte de Radiação Gama de ^{60}Co .

O radioisótopo de ^{60}Co é uma fonte de radiação gama que emite fótons com 1,17 e 1,33 MeV, sendo sua energia média 1,25 MeV. As irradiações foram efetuadas utilizando-se um aparelho de telecobaltoterapia Keleket Barnes Flexaray (E U A), instalado no Laboratório de Calibração do IPEN, atualmente com 15,0 TBq de atividade.

2.6 - Sistema de Radiação de Elétrons.

Como fontes de elétrons foram utilizados dois aceleradores para uso clínico:

- a- Acelerador linear C G R - I O P, modelo Neptune (França), instalado no Instituto de Radioterapia do Hospital das Clínicas da Universidade de São Paulo, capital, que fornece feixes de elétrons com energia nominal de 4 a 10 MeV;

- b- Acelerador S L 75 / 10 Medical Linear Accelerator Philips (Holanda), instalado na Divisão de Radioterapia do Hospital Sírio-Libanês, São Paulo, capital, que pode fornecer feixes de elétrons com energia nominal de 4 a 10 MeV.

3- Arranjos de Irradiação.

Todas as irradiações foram efetuadas no ar.

3.1 - Arranjo Utilizado para Irradiações nos Sistemas de Raios-X de Energias Baixas e com as Fontes de ^{60}Co e ^{137}Cs .

Para essas irradiações foram montados arranjos especiais utilizando-se bancos ópticos e cavaleiros com garras para se obter boa reprodutibilidade no posicionamento e se evitar espalhamento da radiação incidente. Um esquema desse tipo de arranjo é mostrado na Fig. V - 2.

A determinação do tamanho dos campos e das taxas de exposição nas posições de irradiação foi feita pelo Laboratório de Calibração do IPEN, utilizando-se um dosímetro clínico com uma câmara de ionização padrão e filmes dosimétricos. Essas medidas foram confirmadas utilizando-se dosímetros termoluminescentes de $\text{Ca SO}_4 : \text{D y}$ e dosímetros fotográficos.

O controle do tempo de irradiação foi feito com cronômetros próprios de cada sistema e com um cronômetro digital marca Minerva (Suíça), com precisão de 0,01 segundos.

3.2 - Arranjo Utilizado para Irradiações no Sistema de Raios-X de Energias Intermediárias.

Neste caso, para as irradiações foram utilizados os cones localizadores originais, normalmente empregados em radioterapia, com tamanhos de campo e de distância fonte-superfície fixos; como suporte para o cabo da câmara foi utilizado um bloco de isopor, para evitar espalhamento da radiação.

Os valores das taxas de exposição nas condições de irradiação foram determinados previamente pelos usuários do equipamento com câmara de ionização e são os valores utilizados rotineiramente nas sessões de radioterapia.

Um esquema do arranjo de irradiação neste caso é mostrado na Fig. V - 3.

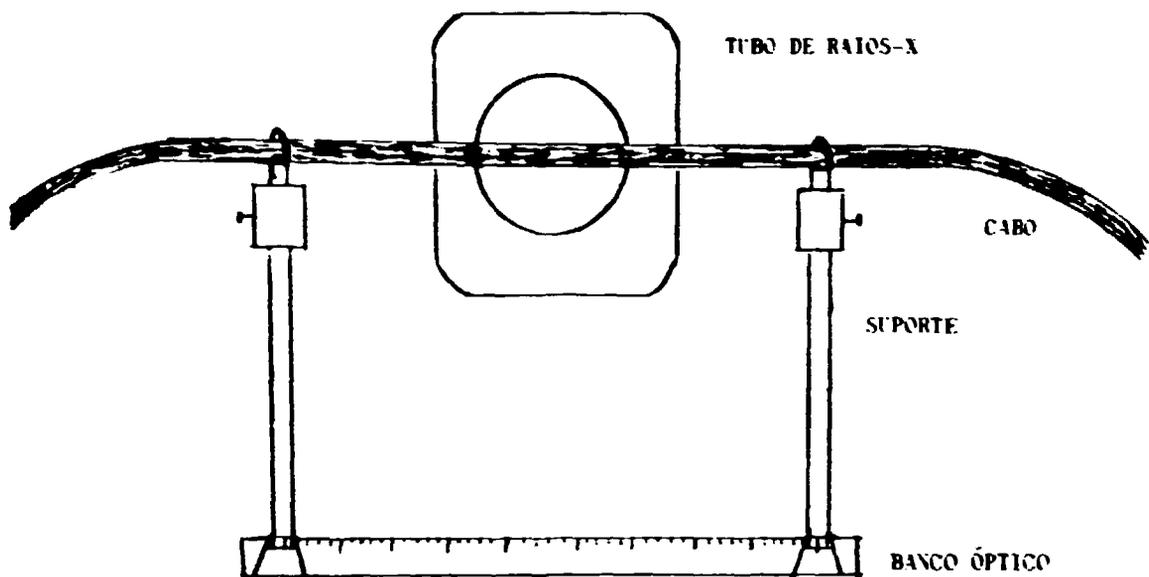


Fig. V-0 - Arranjo de irradiação de cabos para raios-X de energias baixas - ^{137}Cs e ^{60}Co .

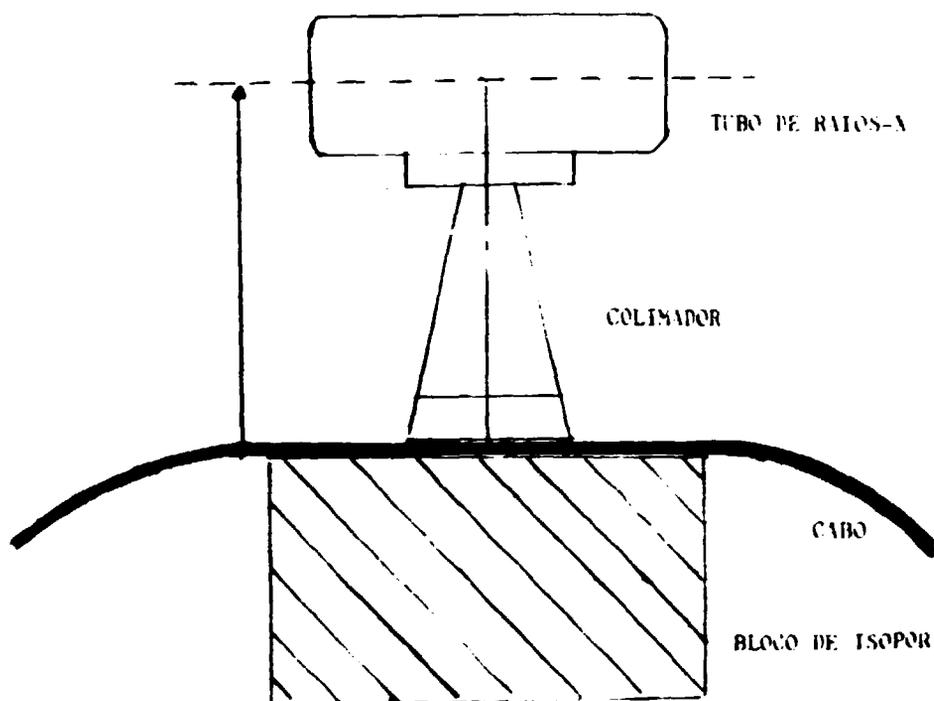


Fig. V-3 - Arranjo de irradiação de cabos para raios-X de energias intermediárias.

O controle do tempo de irradiação foi feito também com o cronômetro do próprio equipamento e ainda com um cronômetro digital.

3.3 - Arranjo Utilizado no Sistema de Raios-X de Energias Altas e de Elétrons com Campos Convencionais.

Foram utilizadas as macas dos próprios equipamentos para as irradiações; o posicionamento dos cabos e o tamanho de campo foram determinados com os recursos de cada equipamento (lasers para posicionamento, por exemplo).

As taxas de dose absorvida utilizadas foram fornecidas pelos usuários, determinadas com câmara de ionização, nas condições normais de irradiação de pacientes.

3.4 - Arranjo Utilizado para Irradiação nos Sistemas de Raios-X de Energias Altas e de Elétrons, com Campos Grandes.

Foram utilizadas placas de isopor, do tamanho aproximado de um adulto para a fixação dos cabos a serem irradiados; o posicionamento e o tamanho de campo foram determinados com os recursos próprios do equipamento.

As taxas de dose absorvida utilizadas foram as fornecidas pelos usuários, determinadas com câmara de ionização nas condições de I C I e T E T S.

O arranjo de irradiação é semelhante ao mostrado na Fig. 1 - 2, com o cabo da câmara posicionado à altura do ponto de calibração.

CAPÍTULO VI

RESULTADOS

1- Correções e Testes Preliminares.

Em todas as medidas realizadas foram observadas as condições ambientais (temperatura, pressão e umidade relativa do ar) e realizados testes que asseguram o controle de qualidade do dosímetro.

1.1 - Correção Devido às Condições Ambientais.

Como a resposta de uma câmara de ionização é dependente da densidade do ar e conseqüentemente das condições ambientais em que é utilizada, todas as medidas foram corrigidas para 20^o C e 101,3 kPa de acordo com a equação IV - 3.

Não se realizou nenhuma correção para a influência devido à umidade relativa do ar, já que as medidas foram efetuadas sempre no intervalo de 50 a 60%, onde a variação na resposta das câmaras utilizadas é desprezível.

1.2 - Tempo de Estabilização.

A fim de permitir a estabilização dos instrumentos, o dosímetro foi sempre ligado pelo menos meia hora antes do início das medidas.

1.3 - Teste de Fuga na Ausência de Radiação.

A corrente de fuga na ausência de radiação tem origem elétrica e sempre pode ser minimizada através da limpeza dos conectores e desumidificação da câmara e do eletrômetro⁽⁶⁾. Desta forma, durante todas as medidas realizadas, a corrente de fuga foi mantida desprezível em relação às medidas, o que foi sempre confirmado anteriormente a cada medida, conforme descrito em IV - 2.1, observando a deflexão na leitura indicada pelo eletrômetro durante 30 minutos, sem a presença de radiação. Em nenhum caso foi encontrado valor que ultrapassasse 0,5%⁽³⁰⁾ da menor taxa de exposição a que o dosímetro foi exposto, sendo que em 80% das medidas não foi detectada fuga de corrente.

1.4 - Reprodutibilidade.

Como este teste consiste na medida do tempo de controle do dosímetro utilizando uma fonte radioativa de referência conforme descrito em IV - 2.3, foi verificado se a reprodutibilidade das medidas (10 medidas) estava de acordo com as especificações do fabricante. Isto foi confirmado; em todos os casos a reprodutibili-

dade das medidas foi sempre melhor do que $\pm 0,06\%$, para todas as câmaras.

1.5 - Estabilidade a Curto Prazo.

As medidas da estabilidade a curto prazo foram efetuadas conforme descrito em IV - 2.4. Em todos os casos a variação do tempo de controle foi sempre melhor do que $0,5\%$ ⁽⁴²⁾, para todas as câmaras, não se verificando nenhuma tendência dos valores em uma determinada direção.

1.6 - Estabilidade a Longo Prazo.

Foi feito um acompanhamento cronológico da estabilidade a longo prazo, seguindo o procedimento descrito em IV - 2.4, durante todo o período da execução do trabalho. As medidas do tempo de controle para este caso foram mensais. Alguns valores obtidos podem ser vistos na Tabela VI - 1.

Na Fig. VI - 1 pode ser visto o acompanhamento cronológico da estabilidade a longo prazo das três câmaras utilizadas.

Como pode ser observado, em nenhum caso o valor do tempo de controle final corrigido ultrapassa $\pm 1,0\%$ ⁽⁴²⁾, nem se verifica nenhuma tendência dos valores numa determinada direção. Isto é uma situação inteiramente satisfatória que demonstra que o instrumento não sofreu danos nesse período.

1.7 - Linearidade do Eletrômetro.

A linearidade do eletrômetro foi verificada seguindo-se o procedimento descrito em IV - 2.2 e o fator de linearidade foi determinado utilizando-se a expressão IV - 7. Na Tabela VI - 2 são fornecidos os fatores de correção para linearidade da escala de 0 a 100 dígitos do eletrômetro NE 2502/3 série 330.

Tabela VI - 2

Fatores de Linearidade do Eletrômetro NE 2502/3 série 330

Número de Dígitos	Fator de Linearidade
20,0	0,998 \pm 0,002
30,0	1,000 \pm 0,002
40,0	1,000 \pm 0,001
50,0	1,000
60,0	1,000 \pm 0,001
70,0	1,001 \pm 0,001
80,0	1,001 \pm 0,001

Tabela VI - 1

Alguns Valores de Tempo de Controle das Câmaras Testadas Escolhidos a Partir da Data do Início das Medidas.

Câmara	Data	No.deDígitos	Temperatura °C	Pressão kPa	Umidade Relativa do Ar - %	Fator de Decaimento	$F_{T,P}$	Tempo de Controle s	Desvio Padrão da Média
312	12/2/86	30	24,0	932,77	55	1,000	0,908	234,73	0,016
	15/2/87	30	22,8	929,94	55	1,025	0,991	234,70	0,010
	2/2/88	30	22,6	929,20	55	1,051	0,909	234,73	0,013
2019	12/2/86	30	24,0	932,76	55	1,000	0,908	150,88	0,019
	15/2/87	30	22,6	929,94	55	1,025	0,991	150,86	0,014
	2/2/88	30	22,5	929,21	55	1,051	0,909	150,89	0,009
1209	12/2/86	30	24,5	932,77	55	1,000	0,907	185,60	0,005
	15/2/87	30	22,4	929,93	55	,025	0,992	185,58	0,014
	2/2/88	30	22,4	929,20	55	1,051	0,910	185,62	0,013

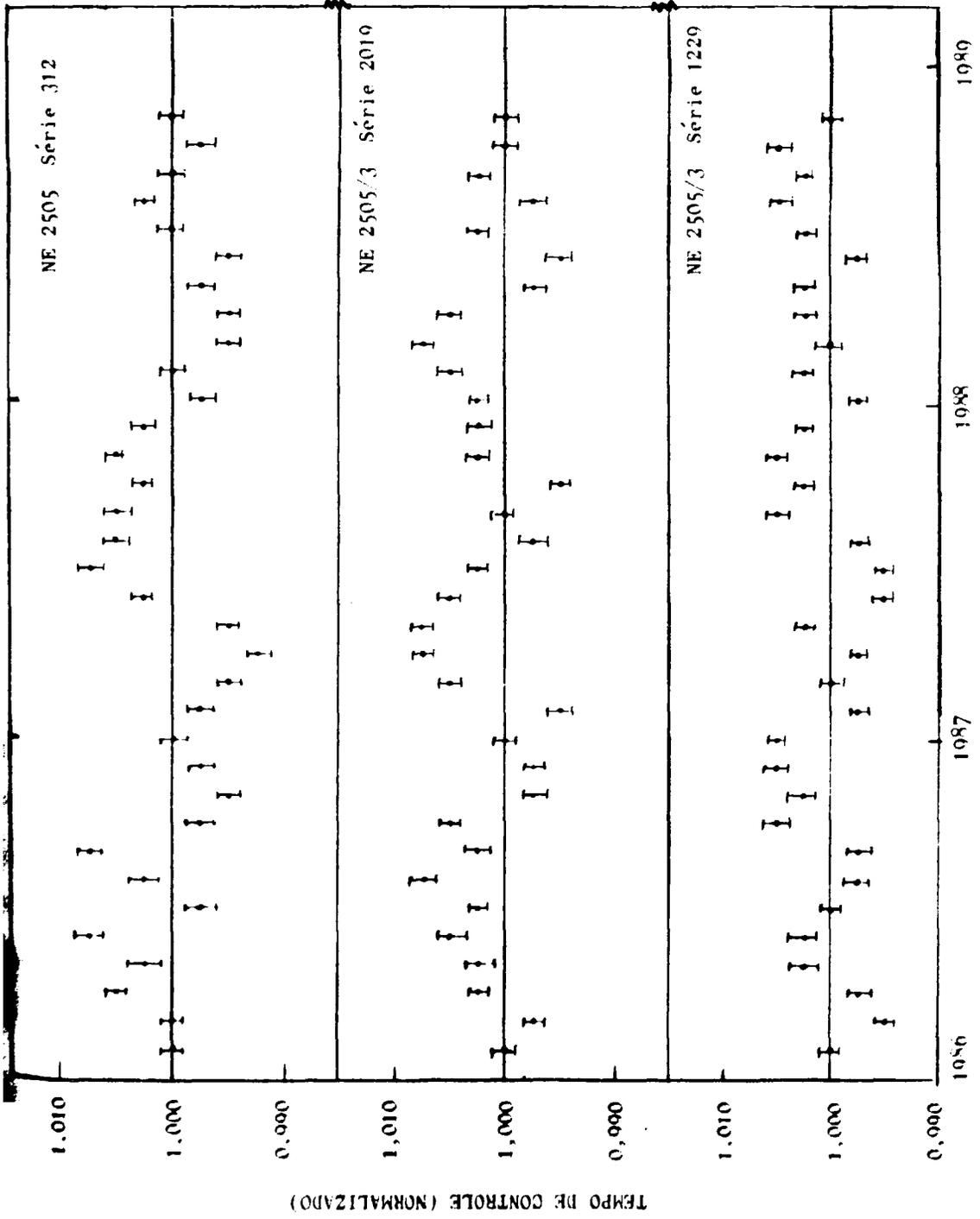


Fig VI-1 - Acompanhamento cronológico da estabilidade a longo prazo

Os valores de t_c e t_m , como definidos em IV - 2.2, representam a média aritmética de 10 medidas do tempo de controle.

Como pode ser verificado, na Tabela VI - 2, nenhum valor ultrapassa o valor de L_{50} , isto é, a leitura tomada como referência (50 dígitos), em $\pm 1\%$ (6).

1.8 - Efeito Haste.

Como foi descrito em IV - 4.1, algumas câmaras de ionização podem apresentar um efeito causado pela ocorrência de interações da radiação no ar próximo à extremidade da câmara ou em materiais dielétricos da haste, mesmo quando são utilizados tamanhos de campo convencionais, ou seja, de 10 x 10 cm. Este efeito é chamado de Efeito Haste. Essas interações, sem origem no volume sensível, resultam em um sinal que irá ser acrescido ao sinal coletado no volume sensível (6).

Para a determinação do fator de haste, o procedimento adotado é descrito a seguir (6).

Utilizando-se campos de radiação retangulares, mantendo-se fixa a dimensão de um dos lados e variando-se a do outro, foram efetuadas medidas, com as câmaras nas posições vertical (A) e horizontal (B), de maneira a se irradiar em um caso (A) sempre o mesmo comprimento de haste e em outro caso (B), comprimentos diferentes da haste da câmara. As câmaras foram sempre submetidas à radiação em condições de equilíbrio eletrônico, isto é, com a utilização das respectivas capas.

O esquema da montagem pode ser visto na Fig. VI - 2 para as duas posições da câmara.

Os resultados das irradiações das câmaras NE 2019 e NE 312 com radiação gama do ^{137}Cs são mostrados na Fig. VI - 3, curvas I e II respectivamente.

Como pode ser observado, esse efeito é significativo para tamanhos de campo a partir de 10 x 6 cm, quando os fatores de correção são maiores que 0,5%. No caso de campos superiores a 16 x 6 cm, já começa a irradiação dos próprios cabos das câmaras.

2- Efeito da Irradiação dos Cabos das Câmaras.

Esse tipo de efeito, embora citado por alguns autores^(10,27,34,49,53), foi apenas constatado, não se possuindo muitas informações sobre sua intensidade e seu comportamento em diferentes condições de irradiação.

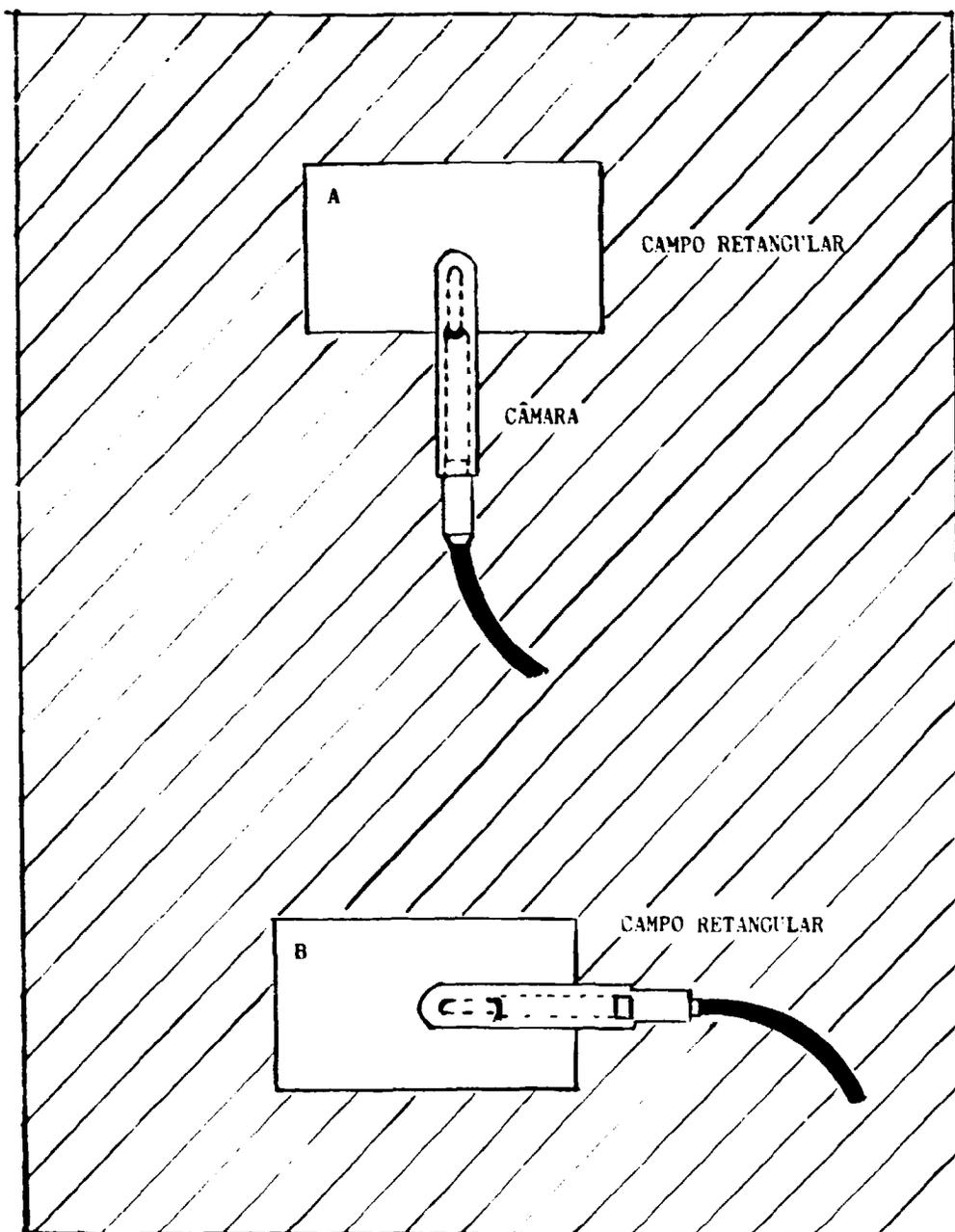


Fig.VI-2 - Esquema simplificado do arranjo de irradiação para determinação do Efeito Haste. Posições vertical (A) e horizontal (B).

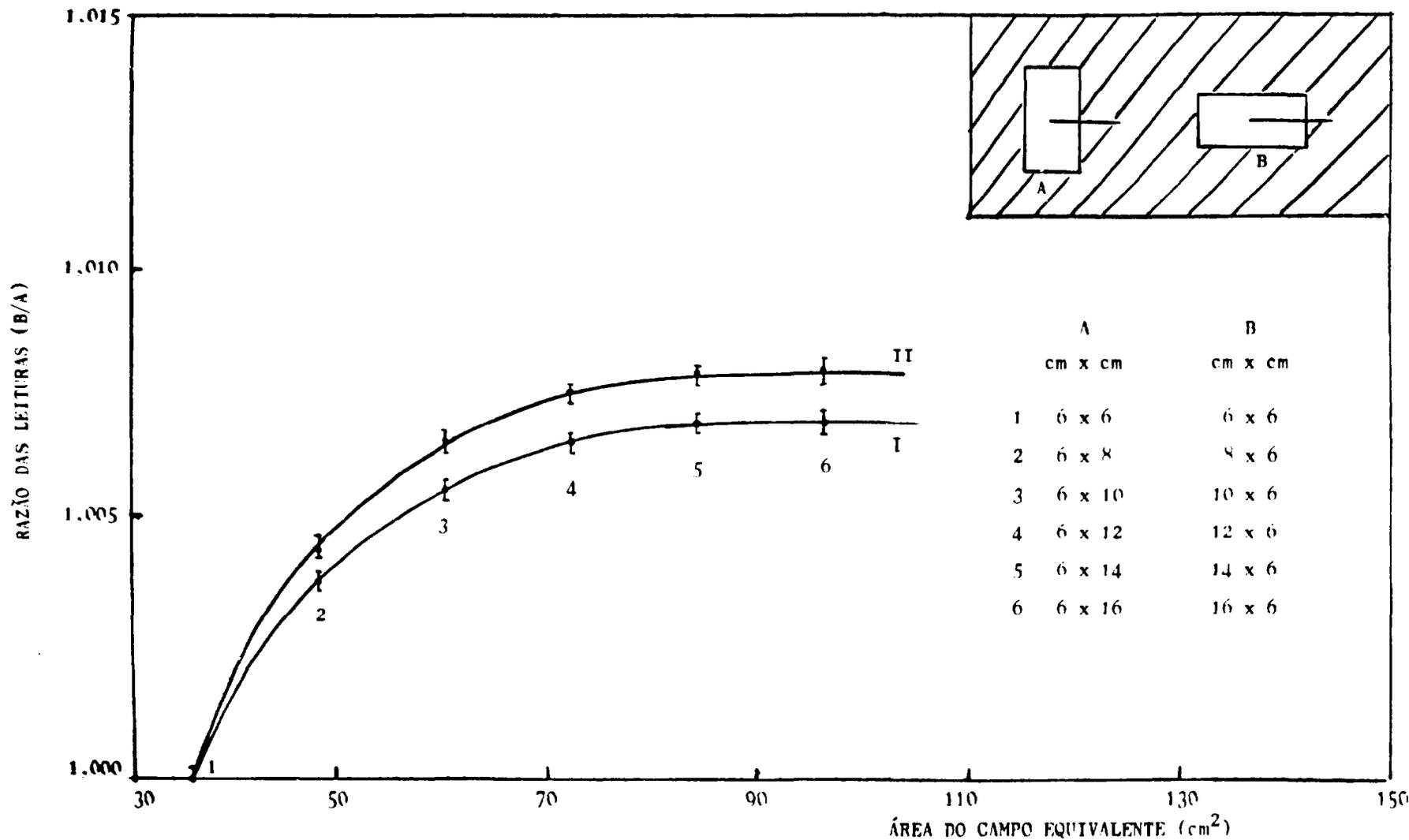


Fig. VI-3 - Dependência da resposta das câmaras NE 2010 (curva I) e NE 312 (curva II) em relação ao tamanho de campo

Para uma melhor compreensão desse efeito foi feito um estudo detalhado de irradiação não só de cabos das câmaras, mas também dos conectores e cabos de extensão, de três câmaras de ionização e de dois cabos de extensão descritos em V - 1.2. Foi verificada a dependência do efeito da irradiação com o comprimento do cabo, a taxa de exposição e a energia da radiação incidente, tanto para irradiações com fótons como para elétrons.

2.1 - Irradiações com Fótons.

As medidas foram efetuadas para energias efetivas de fótons entre 14 keV e 3 MeV. Embora as energias mais baixas não sejam utilizadas em radioterapia, foi feito um estudo em todo intervalo de energias disponível para um melhor entendimento do efeito.

Os tamanhos de campo utilizados e as distâncias fonte-superfície (DFS) foram sempre aqueles convencionais, utilizados na dosimetria dos feixes de radiação em questão, para os quais se tenha determinado a taxa de exposição nos procedimentos de dosimetria.

Para evitar a interferência da corrente de fuga pós-irradiação, descrita em III - 4.1, o intervalo de tempo mínimo entre duas medidas consecutivas foi sempre de um minuto, tempo suficiente para a corrente de fuga ser menor do que 0,5%⁽¹²⁾ da corrente de ionização produzida no volume sensível durante a irradiação.

A reprodutibilidade dos resultados obtidos foi verificada, repetindo-se as medidas de tempo de controle com: arranjos diferentes; posicionamento da fonte de referência com a câmara dentro e fora das salas de irradiações e irradiando-se o mesmo cabo em posições diferentes.

Os resultados obtidos em cada caso foram sempre comparados com os resultados obtidos para uma condição padrão de medida. Em todos os casos, os valores obtidos foram sempre melhores do que $\pm 0,1\%$.

2.1.1 - Irradiação de Cabos.

2.1.1.1 - Sensibilidade das Diferentes Câmaras.

Como um teste inicial, mediu-se o efeito da irradiação dos cabos das 3 câmaras de ionização para uma mesma energia efetiva.

Foram utilizados valores constantes de tamanho de campo, taxa de exposição e comprimento de cabo das câmaras; efetuou-se a medida do tempo de controle com e sem a presença de radiação incidente nos cabos.

Em todas as séries de medidas efetuadas foi sempre feita a determinação

dos tempos de controle inicial e final (t_i e t_f) sem a incidência de radiação nos cabos, com o cabo já posicionado no arranjo de irradiação e a câmara posicionada dentro da fonte de referência, mas fora da sala de irradiação do cabo. A média desses dois valores serviu para a determinação do tempo de controle padrão t_p daquela série de medidas.

A medida do tempo de controle feita simultaneamente com a irradiação dos cabos foi efetuada imediatamente após as medidas para a determinação de t_i e serviu para a determinação de t_r , que representa o tempo de controle com irradiação do cabo.

Os valores de t_i , t_f e t_r são sempre a média de 10 medidas e representam o tempo necessário para atingir o mesmo número de dígitos L daquela série de medidas. Todos os valores obtidos foram sempre corrigidos para temperatura, pressão e decaimento radioativo da fonte de referência.

O fator de cabo será então dado por

$$f_c = \frac{t_r}{t_p} \quad (\text{VI} - 1)$$

Esse tipo de medida serviu para a determinação do que se chamou de sensibilidade da câmara. Na Tabela VI - 3 são mostrados os valores obtidos, comparando-se a resposta das três câmaras. Em todas as medidas o tamanho de campo utilizado foi de 10 x 8 cm, com uma distância fonte-superfície de 50 cm e o comprimento de cabo irradiado, de 10 cm.

Tabela VI - 3

Fatores de Cabo (f_c) de Diferentes Cabos de Câmaras Expostos à Radiação-X de 137 keV.
Tamanho de Campo: 10 x 8 cm. Distância Fonte-Superfície: 50 cm. Comprimento de Cabo
Irradiado: 10 cm. Taxa de Exposição: $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$.

Câmara	f_c
NE	
312	1,011 ± 0,001
2019	1,009 ± 0,001
1229	1,007 ± 0,001

Como pode ser observado, para as mesmas condições de irradiação, cada câmara apresenta uma resposta diferente devida à irradiação do respectivo cabo.

2.1.1.2 - Dependência com o Comprimento de Cabo Irradiado.

Seguindo-se o mesmo procedimento para a determinação de f_c descrito em VI - 2.1.1.1, para cada câmara efetuou-se uma série de medidas irradiando-se diferentes comprimentos de cabo. As condições experimentais de irradiação dos cabos são fornecidas na Tabela VI - 4.

Na Fig. VI - 4 pode-se ver a dependência do fator de cabo em função do comprimento de cabo irradiado para a câmara NE 312, no caso das energias de raios-X de 137 keV e radiação gama do ^{137}Cs , utilizando-se diferentes tamanhos de campo e distâncias fonte-superfície.

Na Fig. VI - 5 é mostrada a dependência do fator de cabo em função do comprimento de cabo irradiado para a câmara NE 1229, para a energia de raios-X de 67 keV e diferentes tamanhos de campo.

Na Fig. VI - 6 pode ser vista a dependência do fator de cabo em função do comprimento de cabo irradiado para a câmara NE 2019, no caso em que o cabo foi submetido à radiação-X de 137 keV e 1,4 MeV.

Como pode ser observado nas Fig. VI - 4, VI - 5 e VI - 6, o fator de cabo cresce linearmente com o comprimento de cabo irradiado, tendendo a uma saturação para comprimentos a partir de aproximadamente 60 cm. A linearidade mantém-se independente da taxa de exposição ou da energia da radiação incidente, sendo que a sensibilidade relativa das câmaras não se alterou.

Tabela VI - 4

Condições Experimentais de Irradiação dos Cabos das Câmaras

Câmara	Energia	Tamanho de Campo	Distância Fonte-Superfície	Taxa de Exposição	Comprimento de Cabo Irradiado
	keV	cm x cm	cm	$10^{-2} \text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	cm
NE 312	137	10 x 8	50	1,7	10
	137	10 x 8	50	1,7	20
	137	10 x 8	50	1,7	40
	137	10 x 8	50	1,7	50
	137	15 x 10	50	1,7	15
	137	15 x 10	50	1,7	30
	137	15 x 10	50	1,7	45
	670	10 x 10	60	1,7	10
	670	10 x 10	60	1,7	20
	670	10 x 10	60	1,7	30
	670	10 x 10	60	1,7	40
	670	10 x 10	60	1,7	50
	670	10 x 10	60	1,7	60
NE 1229	67	10 x 8	50	1,2	10
	67	10 x 8	50	1,2	20
	67	10 x 8	50	1,2	30
	67	10 x 8	50	1,2	40
	67	10 x 8	50	1,2	50
	67	15 x 10	50	1,2	15
	67	15 x 10	50	1,2	30
	67	15 x 10	50	1,2	45
	67	15 x 10	50	1,2	60
NE 2019	137	10 x 8	50	1,7	10
	137	10 x 8	50	1,7	20
	137	10 x 8	50	1,7	30
	137	10 x 8	50	1,7	40
	137	10 x 8	50	1,7	50
	137	15 x 10	50	1,7	15
	137	15 x 10	50	1,7	30
	137	15 x 10	50	1,7	45
	1.400	15 x 10	80	5,2	15
	1.400	15 x 10	80	5,2	30
1.400	15 x 10	80	5,2	45	

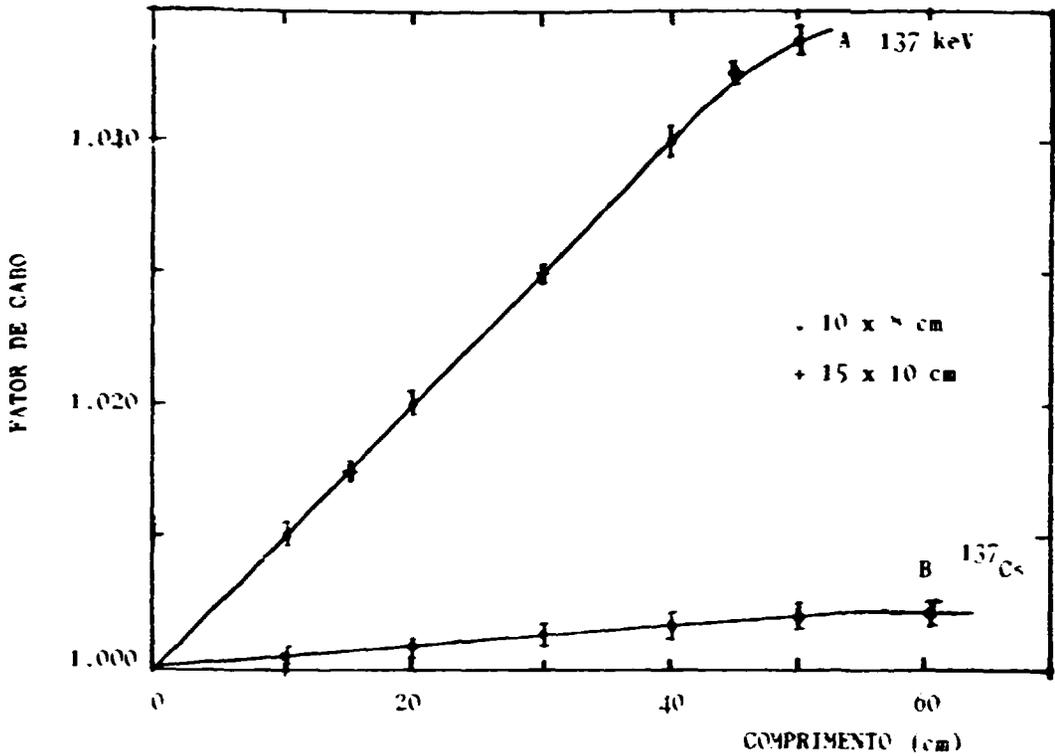


Fig. VI-4 - Dependência do fator de cabo da câmara NE 312 com o comprimento de cabo irradiado. Taxa de exposição: $1,7 \cdot 10^{-2} \text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ com radiação-X (A) e gama (B).

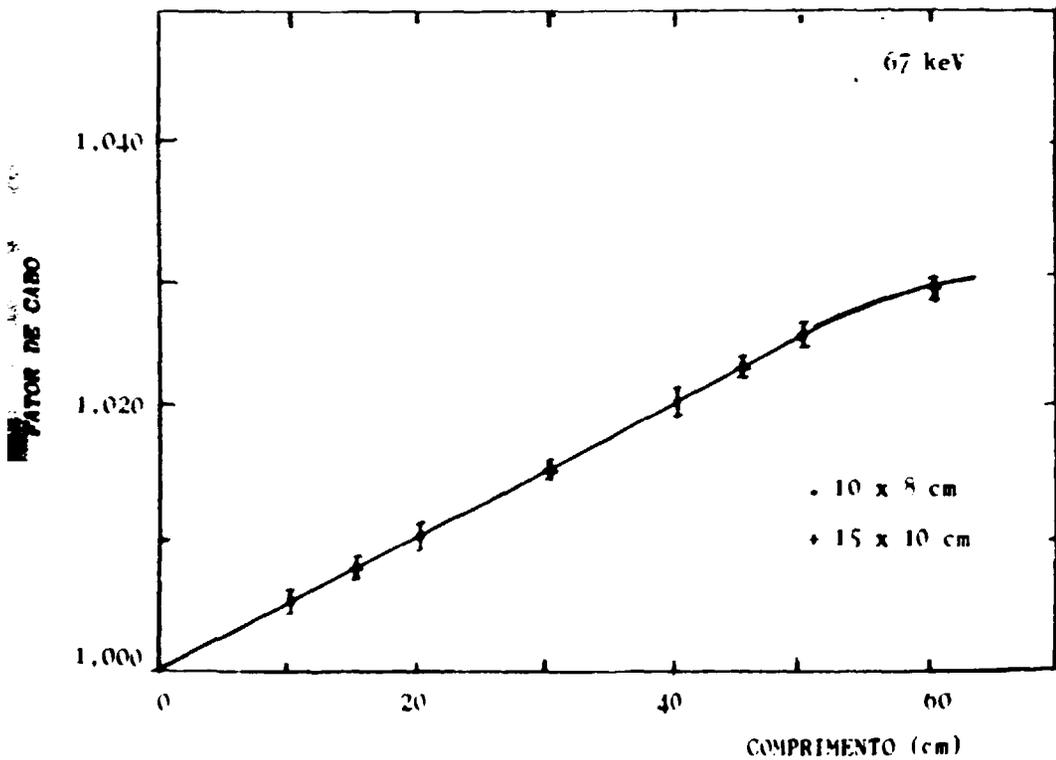


Fig. VI-5 - Dependência do fator de cabo da câmara NE 1229 com o comprimento de cabo irradiado. Taxa de exposição de radiação-X: $1,2 \cdot 10^{-2} \text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$.

2.1.1.3 - Dependência com Taxa de Exposição.

Para uma mesma energia, utilizando-se o mesmo tamanho de campo, irradiou-se os mesmos comprimentos de cabo com diferentes taxas de exposição. Essas taxas de exposição foram obtidas variando-se a distância fonte-superfície entre 30 e 50 cm. O procedimento para a determinação de f_c é o mesmo descrito no item VI - 2.1.1.1.

As condições experimentais da irradiação são fornecidas na Tabela VI - 5.

Tabela VI - 5

Condições Experimentais de Irradiação dos Cabos das Câmaras com Diferentes Taxas de Exposição com Radiação-X

Câmara	Energia	Tamanho de Campo	Distância Fonte-Superfície	Taxa de Exposição	Comprimento de Cabo Irradiado
NE	keV	cm x cm	cm	$10^{-2} \text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	cm
312	137	15 x 10	30	5,0	15
e	137	15 x 10	40	2,8	15
2019	137	15 x 10	50	1,8	15
	137	15 x 10	30	5,0	45
	137	15 x 10	40	2,8	45
	137	15 x 10	50	1,8	45
1229	94	10 x 8	30	3,5	10
	94	10 x 8	40	2,0	10
	94	10 x 8	50	1,3	10
	94	10 x 8	30	3,5	30
	94	10 x 8	40	2,0	30
	94	10 x 8	50	1,3	30

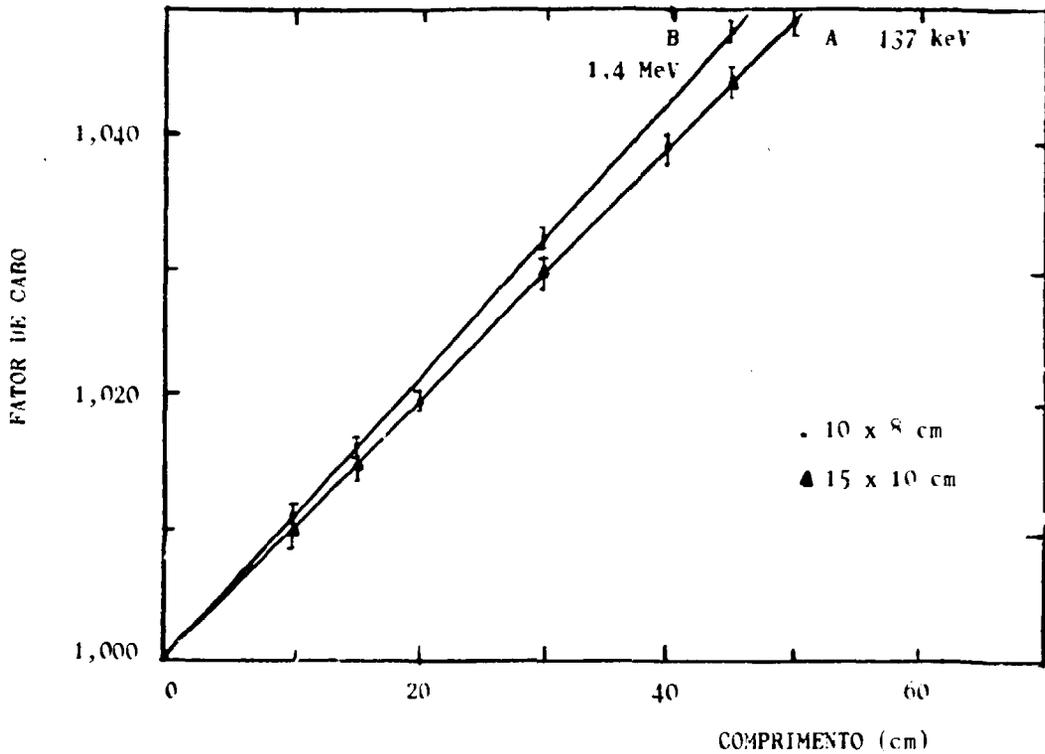


Fig.VI-6 - Dependência do fator de cabo da câmara NE 2019 com o comprimento de cabo irradiado. Taxa de exposição de radiação-X: $1.7 \cdot 10^{-2} \text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ (A) e $5.2 \cdot 10^{-2} \text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ (B).

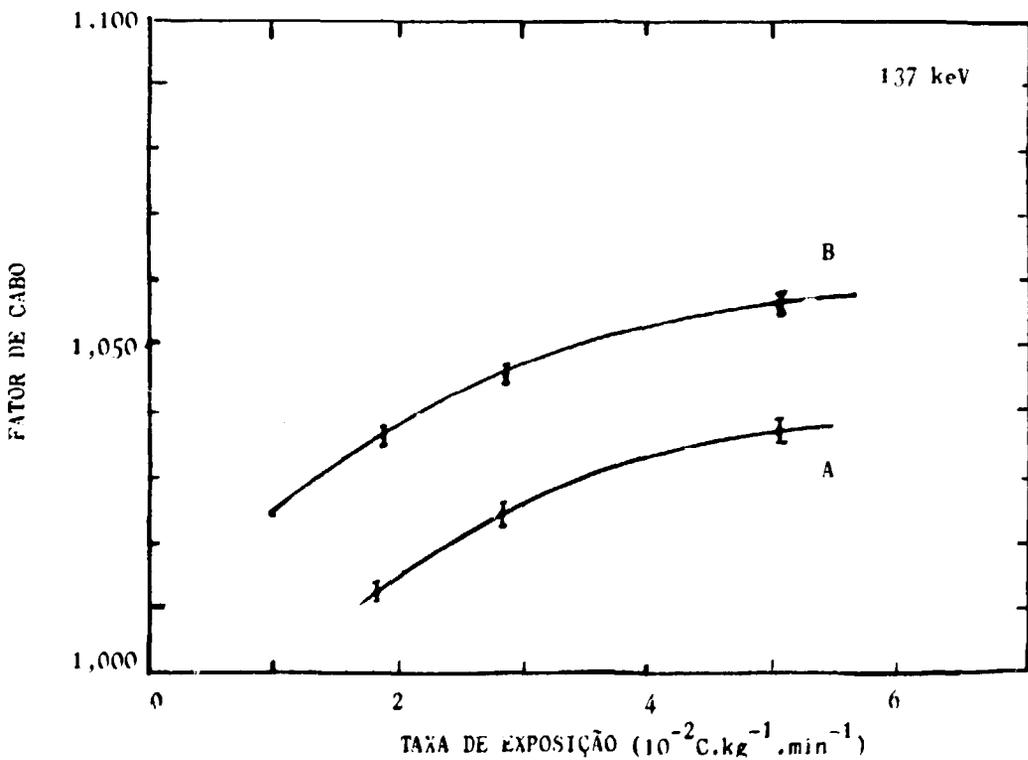


Fig.VI-7 - Dependência do fator de cabo da câmara NE 312 com a taxa de exposição de radiação-X. Comprimento de cabo irradiado: 15 cm (A) e 45 cm (B).

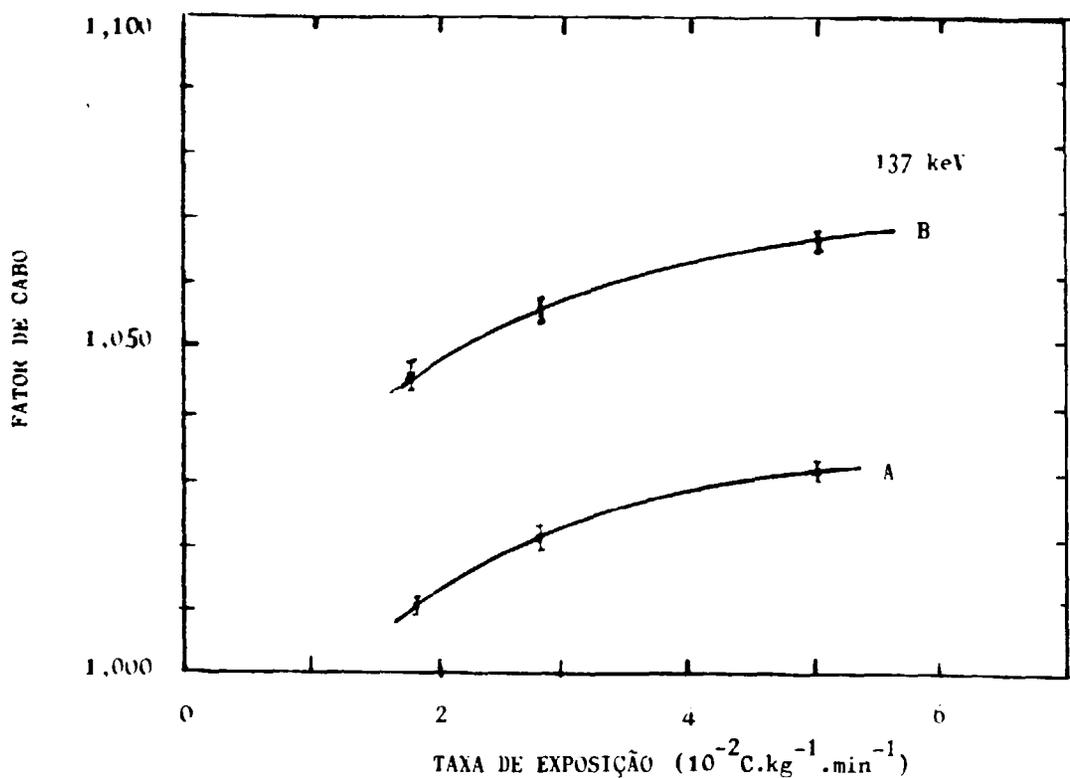


Fig.VI-8 - Dependência do fator de cabo da câmara NE 2019 com a taxa de exposição de radiação-X. Comprimento de cabo irradiado: 15 cm (A) e 45 cm (B).

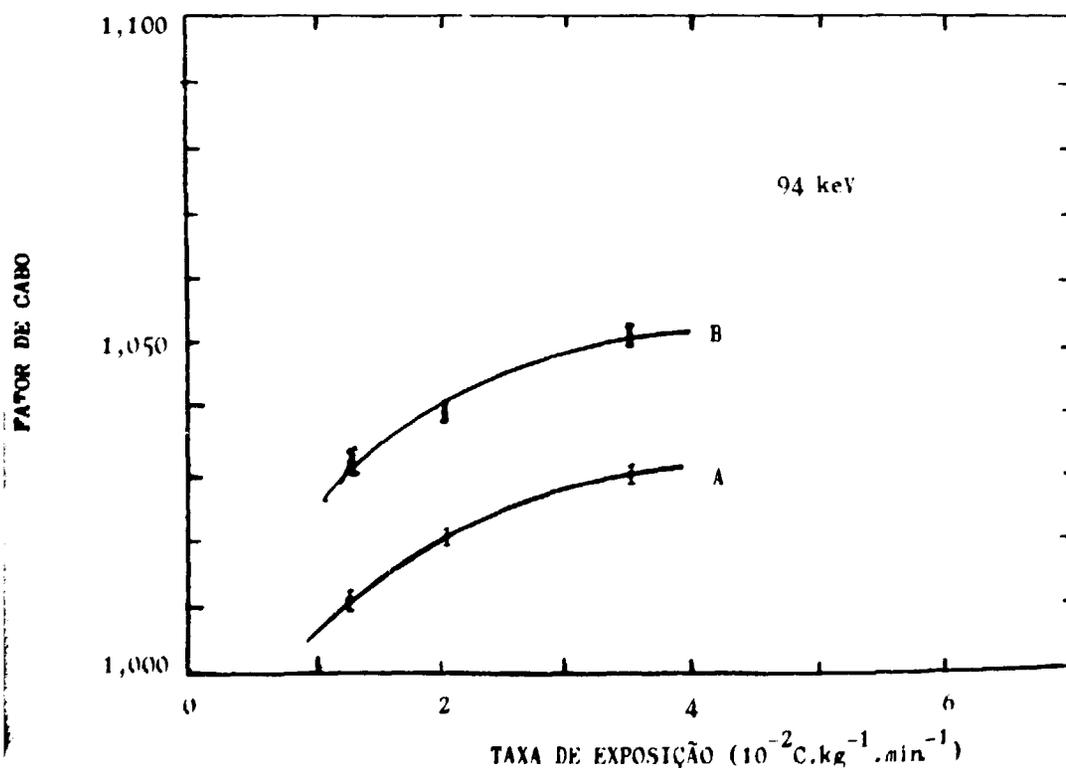


Fig.VI-9 - Dependência do fator de cabo da câmara NE 1229 com a taxa de exposição de radiação-X. Comprimento de cabo irradiado: 10 cm (A) e 30 cm (B).

Nas Fig. VI - 7, VI - 8 e VI - 9 são mostradas as dependências do fator de cabo das câmaras NE 312, NE 2019 e NE 1229 respectivamente em função da taxa de exposição à radiação-X.

O fator de cabo depende da taxa de exposição (\dot{X}) por uma relação do tipo

$$f_c = \dot{X}^\Delta \quad (\text{VI} - 2)$$

onde $\Delta = 0,020 \pm 0,005$.

Em todos os casos a intensidade do fator é proporcional ao comprimento de cabo irradiado, embora característico para cada cabo.

2.1.1.4 - Dependência com a Energia da Radiação Incidente.

A dependência energética do fator de cabo foi estudada para as três câmaras no intervalo de energias entre 14 keV e 3,0 MeV.

Todos os resultados foram normalizados para o mesmo comprimento de cabo irradiado (10 cm) e a mesma taxa de exposição ($1,7 \cdot 10^{-2} \text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$), utilizando-se as curvas de dependência com o comprimento de cabo e com a taxa de exposição obtidas para cada câmara nos itens VI - 2.1.1.2 e VI - 2.1.1.3. O fator de cabo foi determinado como descrito em VI - 2.1.1.1.

As condições experimentais de irradiação dos cabos são fornecidas na Tabela VI - 6. Em todos os casos o comprimento de cabo irradiado foi de 10 cm, exceto durante a irradiação com ^{60}Co , onde foram irradiados 12 cm de cabo.

A Fig. V - 10 (curvas A, B e C) mostra a dependência energética do fator de cabo para as câmaras NE 312, 2019 e 1229 respectivamente, normalizada para 10 cm de cabo irradiado e uma taxa de exposição de $1,7 \cdot 10^{-2} \text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$.

Como pode ser observado, a dependência energética é bastante acentuada atingindo 1 a 1,5% na região de energia de fótons entre 25 e 100 keV, sendo que o comportamento da curva varia de cabo para cabo.

A maior dependência energética do fator de cabo na região de energias baixas pode ser associada à predominância do efeito fotoelétrico na interação da radiação com os materiais componentes do cabo. Na região de predominância de efeito Compton a dependência energética diminui, tendendo a aumentar novamente para a região de energias altas, onde começa a prevalecer o fenômeno de produção de pares.

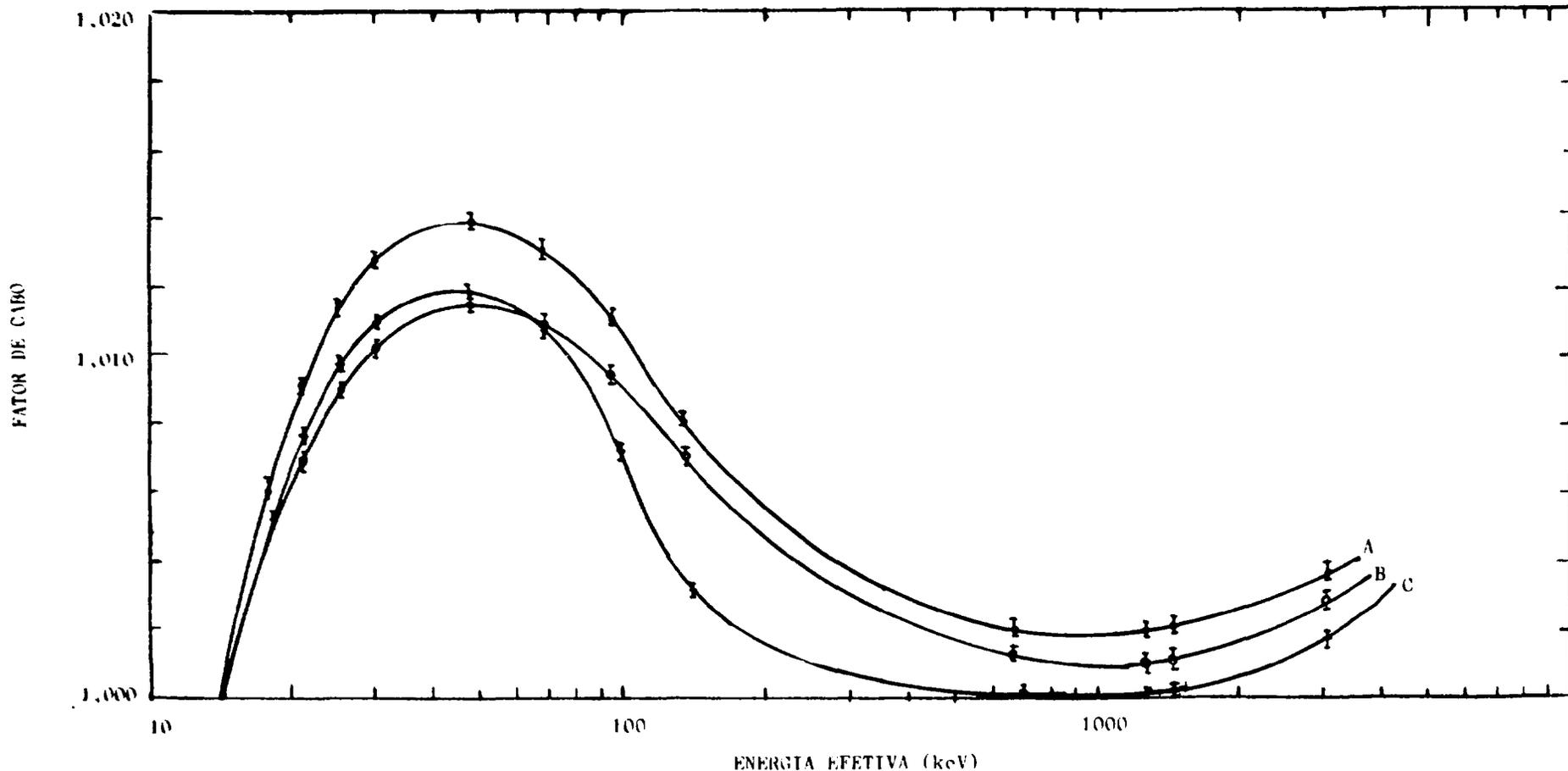


Fig. VI-10 - Dependência energética do fator de cabo das câmaras NE 312 (A), NE 2010 (B) e NE 1220 (C). Taxa de exposição : $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ C. kg}^{-1}$. Comprimento de cabo irradiado: 10 cm.

Tabela VI - 6

Condições Experimentais de Irradiação dos Cabos das Câmaras NE 312, 2019 e 1229 para a Determinação da Dependência Energética do Fator de Cabo.

Energia	Tamanho de Campo	Distância Fonte-Superfície	Comprimento de Cabo Irrradiado	Taxa de Exposição
keV	cm x cm	cm	cm	$10^{-2} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$
14	10 x 10	50	10	1,55
18	10 x 10	50	10	1,55
24	10 x 10	50	10	1,55
25	10 x 8	50	10	1,03
30	10 x 8	50	10	1,04
47	10 x 8	50	10	1,03
67	10 x 8	50	10	1,20
94	10 x 8	50	10	1,30
137	10 x 8	50	10	1,70
670	10 x 10	60	10	1,55
1250	12 x 5	60	12	1,42
1.400	10 x 10	100	10	5,2
3.000	10 x 10	100	10	5,2

2.1.2 - Irradiação de Conectores.

Para a determinação do efeito da irradiação dos conectores das câmaras utilizou-se cabos de extensão com características compatíveis com os cabos e conectores das câmaras em questão. As junções cabo da câmara – cabo de extensão foram utilizadas para as medidas e são os conectores.

Os conectores foram irradiados com tamanhos de campo tais que toda extensão do conector ficasse dentro do campo. Em alguns casos irradiou-se o conector juntamente com diferentes comprimentos de cabo.

2.1.2.1 - Sensibilidade das Diferentes Câmaras

Foram efetuadas medidas de tempo de controle, com e sem a presença de radiação incidindo nos conectores, em uma primeira etapa, irradiando-se o conector no qual se manteve o mesmo cabo de extensão e trocando-se a câ-

para e, numa segunda etapa, mantendo-se a câmara e trocando-se o cabo de extensão.

Os valores do fator de conector f_{cn} foram determinados tomando-se o quociente do valor do tempo de controle determinado irradiando-se o conector t_{rc} e do tempo de controle padrão t_p .

$$f_{cn} = \frac{t_{rc}}{t_p} \quad (VI - 3)$$

Os valores obtidos nas duas etapas de medidas são mostrados na Tabela VI - 7 onde se pode observar que os valores do fator de conector variam tanto em função da câmara que se utiliza como em função do cabo de extensão, sendo diferente para cada conjunto câmara – cabo de extensão.

Tabela VI - 7

Fatores de Conector (f_{cn}) Resultantes da Irradiação dos Conectores das Câmaras NE 312, 2019 e 1229, Acopladas aos Cabos de Extensão 1 e 2. Tamanho de Campo: 15 x 10 cm. Taxa de Exposição com Radiação-X de 137 keV: $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Distância Fonte-Superfície: 50 cm.

Câmara NE	Cabo de Extensão	Conector	f_{cn}
312	1	1	1,017 ± 0,001
2019	1	1	1,015 ± 0,001
1229	1	1	1,013 ± 0,001
312	2	2	1,020 ± 0,001
2019	2	2	1,018 ± 0,001
1229	2	2	1,016 ± 0,001

2.1.2.2 - Dependência com o Comprimento de Cabo Irradiado.

O procedimento foi análogo ao utilizado na irradiação dos cabos descrito em VI - 2.1.1.2. As experiências foram efetuadas com radiação-X de 137 keV e 1,4 MeV. Inicialmente foram irradiados somente os conectores e posteriormente os conectores e diferentes comprimentos de cabo.

As condições experimentais de irradiação dos conectores são fornecidas na Tabela VI - 8.

As Fig. VI - 11 e VI - 12 mostram os resultados obtidos utilizando-se as câmaras NE 312 e 2019 respectivamente durante a irradiação do conector

do cabo de extensão 1 e o conector 2, do cabo de extensão 2.

Tabela VI - 8

Condições Experimentais de Irradiação dos Conectores Utilizando Diferentes Câmaras e Diferentes Cabos. Distância Fonte-Superfície: 50 cm, para Radiação-X de 137 keV e para Radiação-X de 1,4 MeV.

Câmara	Conector	Tamanho de Campo	Taxa de Exposição	Energia	Comprimento de Cabo Irrradiado
NE		cm x cm	$10^{-2} \text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	keV	cm
312	1	15 x 10	1,7	137	—
		10 x 8	1,7	137	—
		10 x 8	1,7	137	20
		10 x 8	1,7	137	30
312	2	15 x 10	1,7	137	—
		10 x 8	1,7	137	—
		10 x 8	1,7	137	20
		10 x 8	1,7	137	30
2019	1	15 x 10	1,7	137	—
		10 x 8	1,7	137	—
		10 x 8	1,7	137	10
		10 x 8	1,7	137	20
		15 x 10	1,7	137	15
		15 x 10	1,7	137	30
2019	1	10 x 10	5,2	1.400	—
		10 x 10	5,2	1.400	10
		10 x 10	5,2	1.400	20
		10 x 10	5,2	1.400	30
2019	2	15 x 10	1,7	137	—
		15 x 10	1,7	137	15
		15 x 10	1,7	137	30

Observa-se que a linearidade do fator de conector mantém-se no sistema conector-cabo, quando se irradia somente o conector ou o conector e diferentes tamanhos de cabo.

2.1.2.3 - Dependência com a Taxa de Exposição.

O procedimento experimental foi análogo ao descrito em VI - 2.1.1.3. Neste

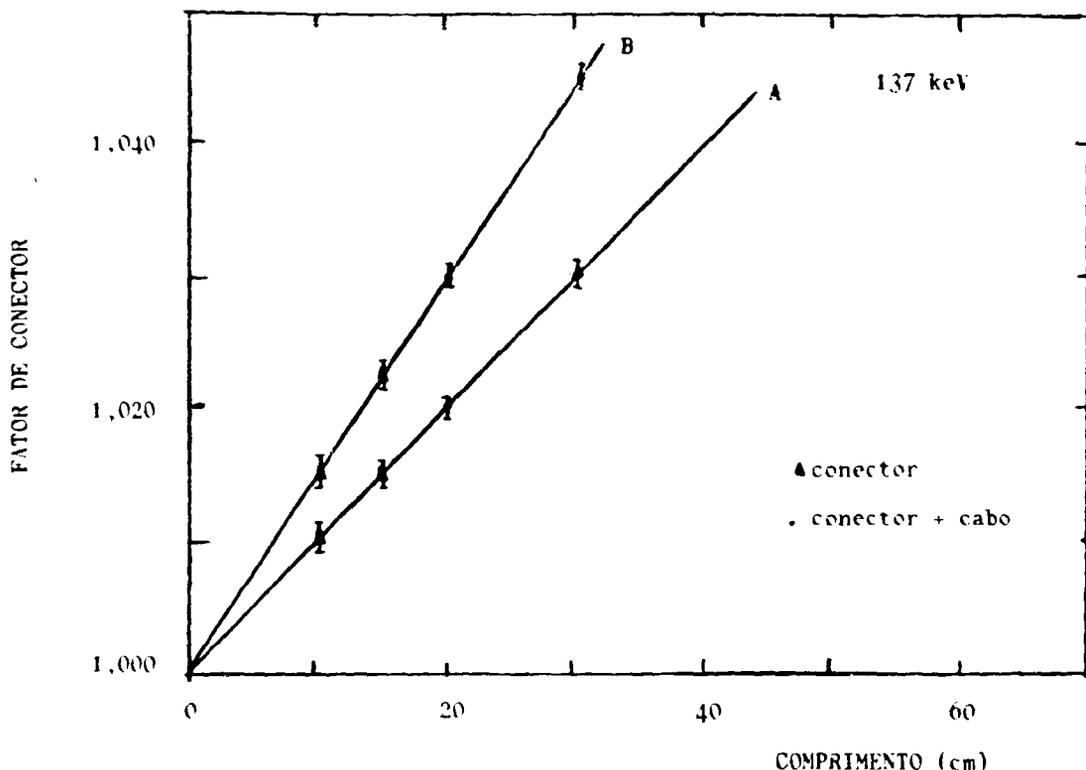


Fig.VI-11 - Dependência do fator de conector da câmara NE 312 com o comprimento de cabo irradiado, para diferentes conectores. Conector 1 (A), conector 2 (B). Taxa de exposição de radiação-X : $1,7 \cdot 10^{-2} \text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$.

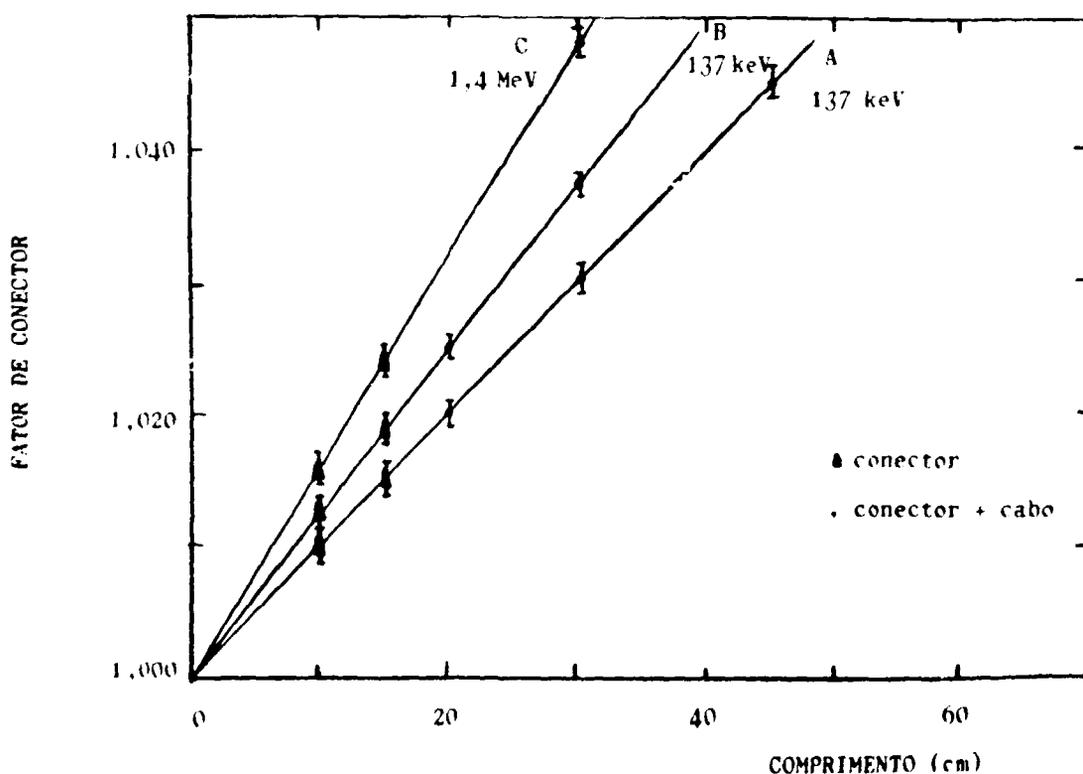


Fig.VI-12 - Dependência do fator de conector da câmara NE 2019 com o comprimento de cabo irradiado para diferentes conectores. Conector 1 (A e C), conector 2 (B). Taxa de exposição: $1,7 \cdot 10^{-2} \text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ (A e C) e $5,2 \cdot 10^{-2} \text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ (B).

caso somente os conectores foram irradiados, não tendo sido irradiado o cabo.

As condições experimentais de irradiação dos conectores são fornecidas na Tabela VI - 9 para os conectores 1 e 2 e as câmaras NE 312 e 2019.

Tabela VI - 9

Condições Experimentais de Irradiação dos Conectores 1 e 2 Acoplados às Câmaras NE 312 e 2019, com Radiação-X de 137 keV. Tamanho de Campo: 15 x 10 cm.

Câmara	Conector	Distância Fonte-Superfície cm	Taxa de Exposição $10^{-2} \text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$
NE 312	1	30	5,0
		40	2,8
		50	1,8
	2	30	5,0
		40	2,8
		50	1,8
2019	1	30	5,0
		40	2,8
		50	1,8
	2	30	5,0
		40	1,8
		50	2,8

Neste caso também o fator de conector apresenta uma dependência com a taxa de exposição do tipo

$$f_{cn} = \dot{X}^{\Delta} \quad (\text{VI} - 4)$$

onde $\Delta = 0,020 : 0,005$ é semelhante ao obtido no caso de irradiação de cabos. As curvas são mostradas nas Fig. VI - 13 e VI - 14 para as câmaras NE 312 e 2019 e os conectores 1 e 2 respectivamente.

2.1.2.4 - Dependência com a Energia de Radiação Incidente.

O estudo de dependência energética do fator de conector foi feito de modo análogo ao descrito em VI - 2.1.1.4 para as irradiações de cabos.

As condições experimentais são as mesmas, fornecidas na Tabela VI - 6, sendo que neste caso foi utilizado o tamanho de campo de 15 x 10 cm.

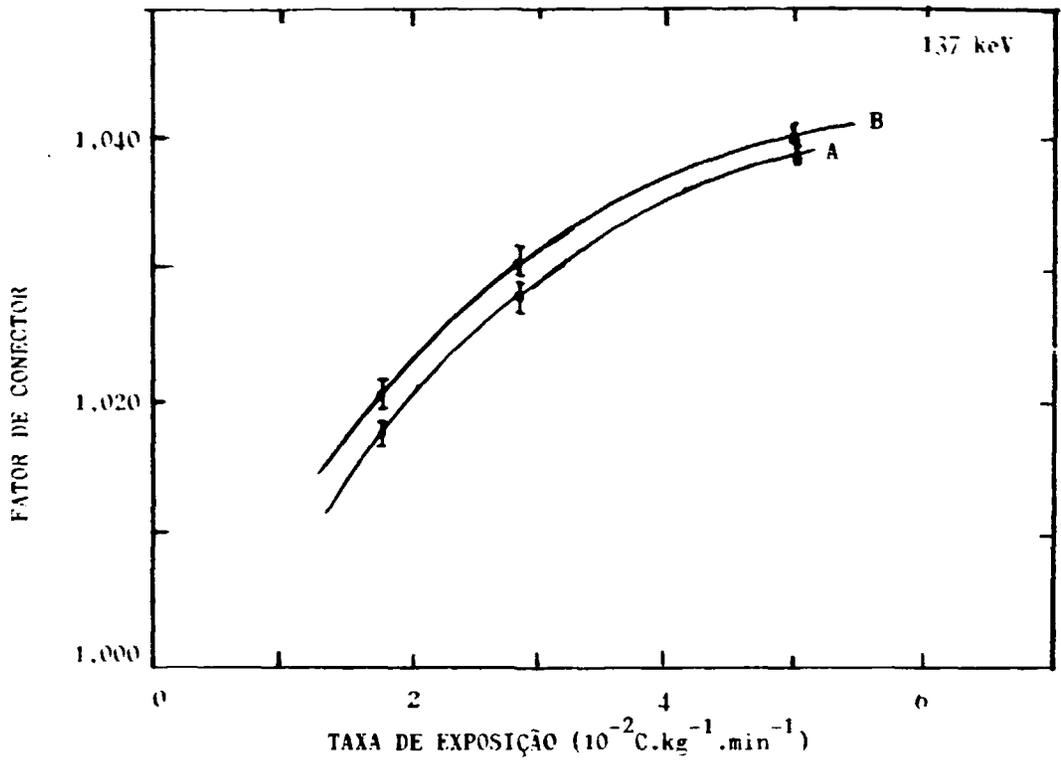


Fig.VI-13 - Dependência do fator de conector da câmara NE 312 com a taxa de exposição de radiação-X. Conector 1 (A), conector 2 (B). Tamanho do campo: $15 \times 10 \text{ cm}$.

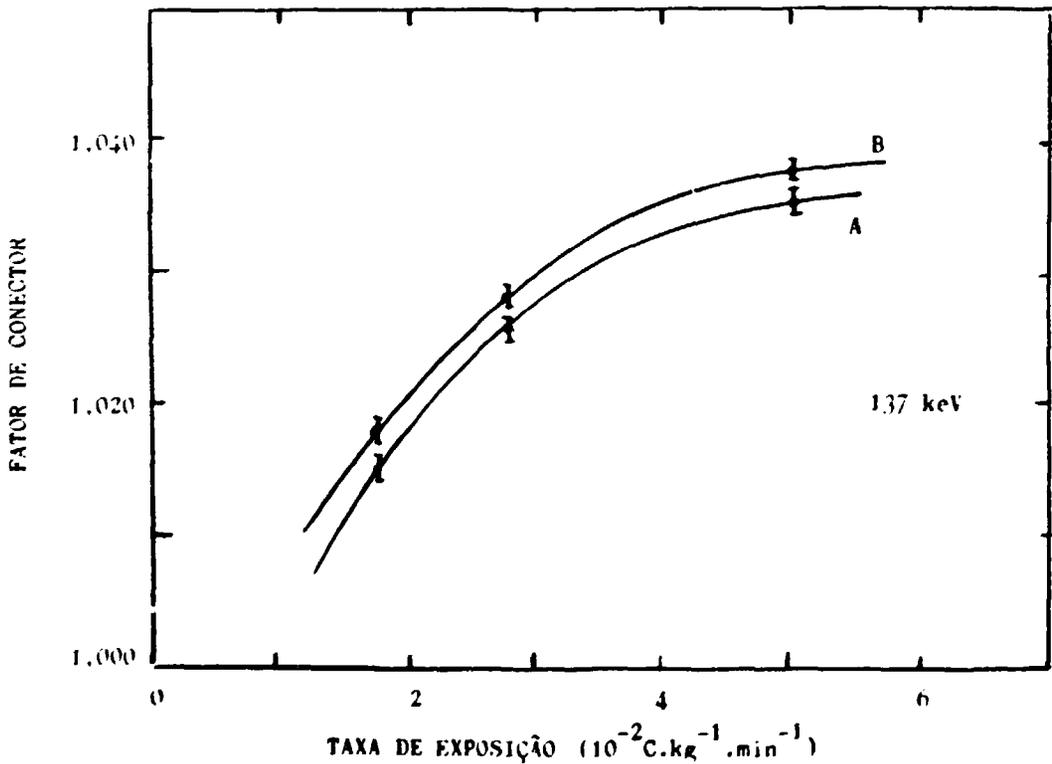


Fig.VI-14 - Dependência do fator de conector da câmara NE 2019 com a taxa de exposição de radiação-X. Conector 1 (A), conector 2 (B). Tamanho do campo: $15 \times 10 \text{ cm}$.

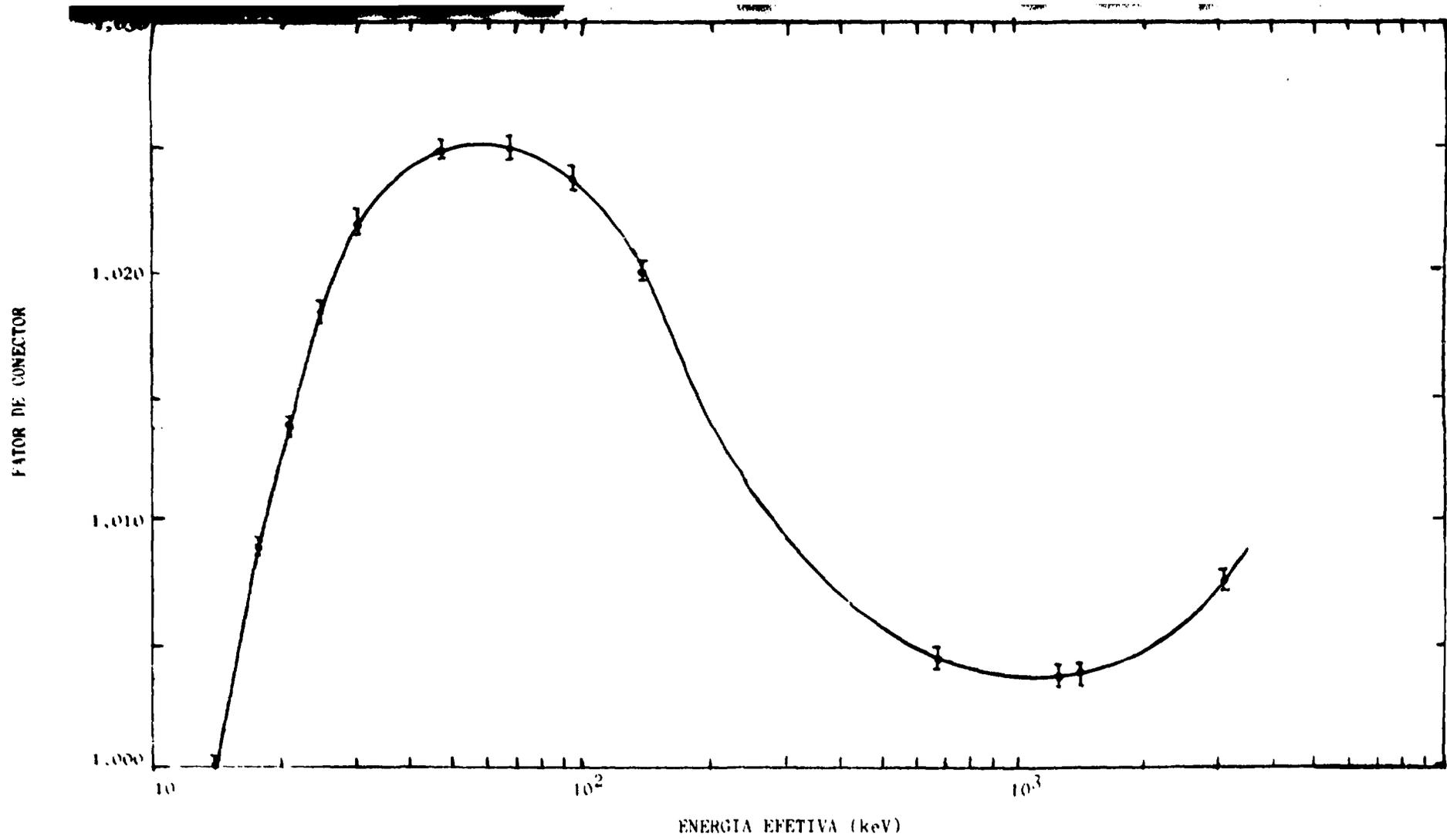


Fig.VI-15- Dependência energética do fator de conector da câmara NE 312 e o conector 1. Taxa de exposição: $1,7 \cdot 10^{-2}$ C. kg⁻¹. min⁻¹.
 Tamanho de campo: 15 x 10 cm

A Fig. VI - 15 mostra a dependência energética do fator de conector para a câmara NE 312 e o conector 1. Na região de energias baixas, o efeito é mais pronunciado, diminuindo à medida que a energia aumenta, mostrando um comportamento semelhante ao demonstrado pelo fator de cabo. A intensidade é maior, entretanto, no caso dos conectores, atingindo 2,5% para a energia de raios-X de 80 keV. Para energias superiores à do ^{60}Co , o fator de conector torna a crescer.

2.1.3 - Irradiação de Cabos de Extensão.

Foi também estudado o efeito da irradiação dos cabos de extensão das câmaras de ionização. O procedimento adotado foi o mesmo da irradiação de cabos e conectores, tomando-se o cuidado de não deixar nem o conector nem o cabo da câmara próximos à fonte de radiação.

Verificou-se também a variação do fator de cabo de extensão, trocando-se a câmara de ionização.

2.1.3.1. - Sensibilidade das Diferentes Câmaras.

Foram efetuadas medidas de tempo de controle, com e sem a presença de radiação incidindo nos cabos de extensão, trocando-se as câmaras de ionização e mantendo-se fixos os demais parâmetros.

Na Tabela VI - 10 são mostrados os valores do fator de cabo de extensão f_{ce} , determinados tomando-se o quociente dos valores do tempo de controle obtido irradiando-se o cabo de extensão conectado a uma determinada câmara (t_{rce}) e do tempo de controle padrão (t_p).

$$f_{ce} = \frac{t_{rce}}{t_p} \quad (\text{VI - 5})$$

Como pode ser observado na Tabela VI - 10, cada cabo de extensão apresenta um fator diferente, dependendo da câmara à qual está acoplado, indicando que este é função não só do cabo irradiado, mas do sistema como um todo.

Tabela VI - 10

Fatores de Cabo de Extensão (f_{ce}) Devidos à Irradiação dos Cabos de Extensão 1 e 2, Acoplados às Câmaras NE 312, 2019 e 1229. Taxa de Exposição com Radiação-X de 137 keV:

$1,7 \cdot 10^{-2} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Comprimento de Cabo Irrradiado: 10 cm.

Distância Fonte-Superfície: 50 cm.

Câmara	Cabo de Extensão	f_{ce}
312	1	$1,008 \pm 0,001$
312	2	$1,010 \pm 0,001$
1229	1	$1,012 \pm 0,001$
1229	2	$1,014 \pm 0,001$
2019	1	$1,010 \pm 0,001$
2019	2	$1,012 \pm 0,001$

2.1.3.2 - Dependência com o Comprimento de Cabo de Extensão Irrradiado.

Os procedimentos de irradiação e medida foram análogos aos descritos em VI - 2.1.1.2. Para irradiação do cabo de extensão 2 acoplado à câmara NE 312, foi utilizada radiação-X de 137 keV, distância fonte-superfície de 50 cm, tamanho de campo de 10 x 8 cm e taxa de exposição de $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Variou-se o comprimento de cabo de extensão irradiado entre 10 e 60 cm.

Os resultados são mostrados na Fig. VI - 16. Como nos casos anteriores, o fator de cabo de extensão cresce linearmente em relação ao comprimento de cabo irradiado, tendendo à saturação para comprimentos superiores a 60 cm.

2.1.3.3 - Dependência com a Taxa de Exposição.

Neste caso também foi avaliada a variação do fator de cabo de extensão em função da taxa de exposição para o cabo de extensão 2 acoplado à câmara NE 312. As condições experimentais de irradiação são as mesmas da Tabela VI - 9.

Os resultados são mostrados na Fig. VI - 17. A dependência do fator de extensão com a taxa de exposição obedece à mesma relação do fator de cabo, porém neste caso $\Delta = 0,015 \pm 0,005$.

2.1.3.4 - Dependência com a Energia da Radiação Incidente.

Foi verificada a dependência energética do fator de cabo de extensão para a câmara NE 312 acoplada ao cabo de extensão 2.

As condições experimentais de irradiação são as mesmas da Tabela VI - 6. Os resultados são mostrados na Fig. VI - 18.

FATOR DE CABO DE EXTENSÃO

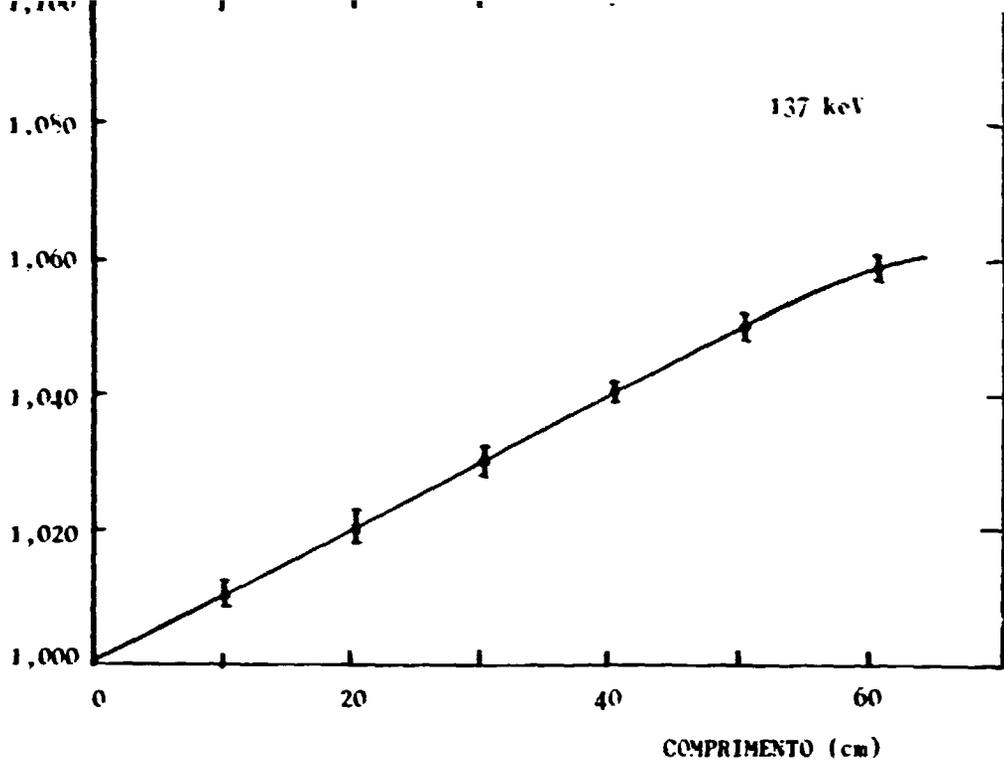


Fig. VI-16 - Dependência do fator de cabo de extensão da câmara NE 312 com o comprimento de cabo irradiado. Cabo de extensão nº 2. Taxa de exposição de radiação-X: $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ C. kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$.

FATOR DE CABO DE EXTENSÃO

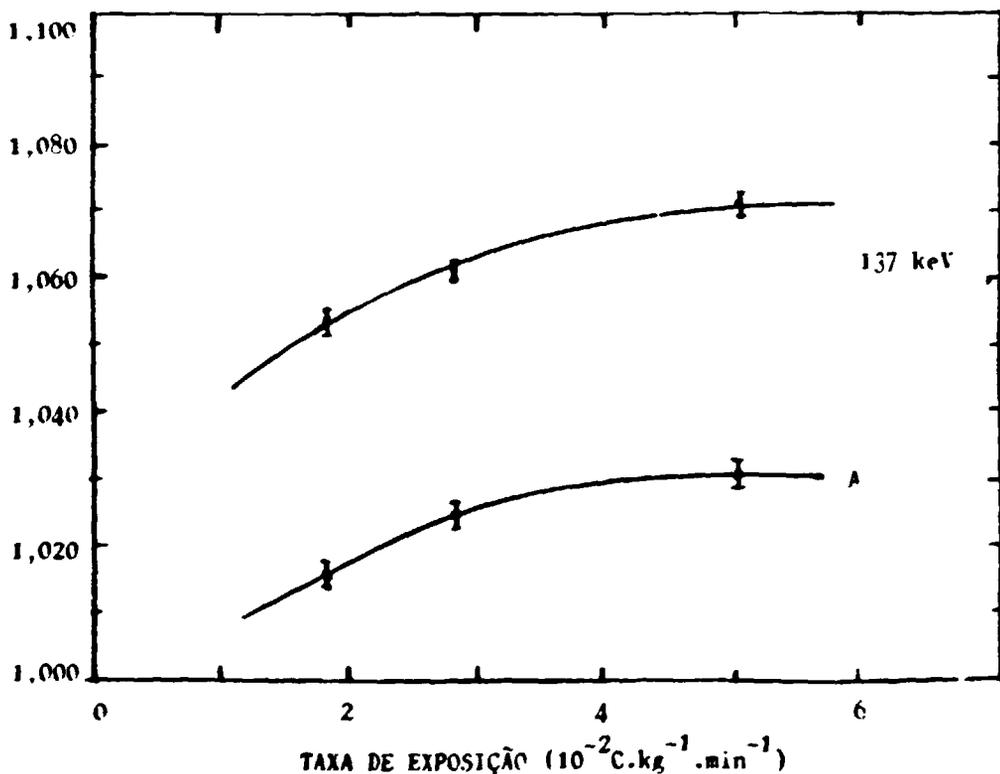


Fig. VI-17 - Dependência do fator de cabo de extensão da câmara NE 312 em função da taxa de exposição de radiação-X. Comprimentos de cabo de extensão: 10 cm (A) e 30 cm (B). Cabo de extensão nº 2.

FATOR DE CABO DE EXTENSÃO

1,020

1,010

1,000

10

10^2

10^3

ENERGIA EFETIVA (keV)

Fig.VI-18 - Dependência energética do fator de cabo de extensão da câmara NE 312 acoplada ao cabo de extensão nº 2. Taxa de exposição: $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Comprimento de cabo irradiado: 10 cm.

Como pode ser observado, o comportamento da curva é o mesmo observado tanto para a irradiação dos cabos como para os conectores, embora os valores dos fatores de cabo sejam diferentes.

2.1.4 - Comparação dos Efeitos de Irradiação de Cabos e Conectores com Fótons.

Os efeitos da irradiação de cabos, conectores e cabos de extensão com radiação-X e gama podem ser sumarizados na Tabela VI - 11, onde são comparados os fatores de cabo, conector e cabo de extensão das câmaras NE 312, 1229 e 2019, para energia efetiva de 137 keV de radiação-X, tamanho de campo de 10 x 8 cm, distância fonte-superfície de 50 cm e comprimento de cabo irradiado de 10 cm, com uma taxa de exposição de $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$.

Tabela VI - 11

Comparação dos Fatores de Correção para as Câmaras NE 312, 1229 e 2019 para a Radiação-X de 137 keV. Tamanho de Campo : 10 x 8 cm. Distância Fonte-Superfície: 50 cm. Comprimento de Cabo Irradiado: 10 cm. Taxa de Exposição: $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$.

Câmara	f_c	f_{e_1}	f_{e_2}	f_{cn_1}	f_{cn_2}	f_{ce_1}	f_{ce_2}
312	1,011	1,010	1,012	1,017	1,020	1,008	1,010
1229	1,007	1,006	1,006	1,013	1,016	1,005	1,006
2019	1,009	1,008	1,009	1,015	1,018	1,007	1,010

onde

f_c - fator de cabo da câmara.

f_{e_1} - fator de cabo da câmara acoplada ao cabo de extensão 1.

f_{e_2} - fator de cabo da câmara acoplada ao cabo de extensão 2.

f_{cn_1} - fator de conector da câmara acoplada ao cabo de extensão 1.

f_{cn_2} - fator de conector da câmara acoplada ao cabo de extensão 2.

f_{ce_1} - fator de cabo de extensão da câmara acoplada ao cabo de extensão 1.

f_{ce_2} - fator de cabo de extensão da câmara acoplada ao cabo de extensão 2.

Como se pode observar, a câmara NE 312 apresenta os maiores fatores de correção; e entre os fatores, o fator f_{cn_2} apresentou-se como predominante. O efeito das irradiações de conectores é sempre superior aos demais. O mesmo cabo de extensão, acoplado a câmaras diferentes, apresenta fatores de correção diferentes, como esperado.

2.2 - Irradiações com Elétrons.

As energias médias dos feixes de elétrons utilizados foram de 2,0; 2,7 e 3,3 MeV, com tamanhos de campo convencionais.

2.2.1 - Irradiação de Cabos.

Como as dimensões das salas de irradiação dos aceleradores lineares são muito maiores que nos casos de radiação-X e gama, somente foi possível irradiar os cabos das câmaras acoplados aos cabos de extensão.

O fator de cabo obtido para as irradiações com elétrons (f_{eE}) foi determinado de modo análogo ao descrito para as irradiações com fótons em VI - 2.1.1.1.

Os procedimentos experimentais foram também os mesmos adotados nas irradiações com fótons.

2.2.1.1 - Sensibilidade das Diferentes Câmaras.

O efeito da irradiação de cabos das câmaras de ionização com elétrons foi estudado para as três câmaras, acopladas aos cabos de extensão 1 e 2. Os tamanhos de campo empregados foram sempre de 10 x 10 cm, as distâncias fonte-superfície, de 103 cm e os comprimentos de cabo irradiado, de 10 cm. A taxa de dose absorvida no ar foi de 2,0 Gy . min⁻¹. Os resultados são mostrados na Tabela VI - 12 para as energias médias de elétrons de 2,0 MeV.

Tabela VI - 12

Fatores de Cabo (f_{eE}) de Diferentes Cabos de Câmaras, Irradiados com Elétrons de 2,0 MeV de Energia Média. Tamanhos de Campo: 10 x 10 cm. Comprimento de Cabo Irradiado : 10 cm. Distância Fonte-Superfície: 103 cm. Taxa de Dose Absorvida no Ar: 2,0 Gy . min⁻¹.
Tempo de Irradiação: 1,5 min.

Câmara	Cabo de Extensão	f_{eE}
NE		
312	1	0,980 ± 0,001
2019	1	0,970 ± 0,001
1229	1	0,975 ± 0,001
312	2	0,978 ± 0,001
2019	2	0,972 ± 0,001
1229	2	0,974 ± 0,001

Como nos casos anteriores, cada câmara apresentou um fator próprio. A mesma câmara, acoplada a cabos de extensão diferentes, apresenta fatores diferentes. Para as irradiações com elétrons, a câmara NE 2019 apresentou o maior efeito de cabo. Comparando-se os efeitos de cabo para as irradiações com fótons, estes são superiores, o que mostra que o efeito é mais intenso, embora em sentido oposto.

2.2.1.2 - Dependência com o Comprimento de Cabo Irradiado.

As medidas foram efetuadas de modo análogo ao descrito em VI - 2.1.1.1. A distância fonte-superfície foi de 103 cm, o tamanho de campo, de 10 x 10 cm e a taxa de dose absorvida no ar foi de 2,0 Gy . min⁻¹. Foram efetuadas medidas com a câmara NE 312 acoplada ao cabo de extensão 1. Para as energias médias de elétrons de 2,0 e 2,7 MeV, os comprimentos de cabo irradiado foram entre 10 e 60 cm. Para a energia média de 3,3 MeV, entre 10 e 40 cm.

Os resultados obtidos são mostrados na Fig. VI - 19. Pode-se observar que o fator de cabo decresce linearmente com o comprimento de cabo irradiado, tendendo a uma estabilização para comprimentos de cabo superiores a 60 cm.

2.2.1.3 - Dependência com a Dose Absorvida.

A dependência do fator de cabo para irradiações com elétrons, em função da dose absorvida no ar, foi estudada para a câmara NE 312 acoplada ao cabo de extensão 1. As energias médias utilizadas foram de 2,0 e 3,3 MeV; a taxa de dose absorvida no ar, de 2,0 Gy . min⁻¹; os tamanhos de campo, de 10 x 10 cm; as distâncias fonte-superfície, de 103 cm; o comprimento de cabo irradiado, de 10 cm; e os intervalos de tempo de irradiação de 1,5, 2,0 e 2,5 min.

Os resultados obtidos são mostrados na Fig. VI - 20. Neste caso, a dependência do fator de cabo com a dose absorvida no ar é do tipo

$$f_{c,E} = D^{-\Delta} \quad (\text{VI - 6})$$

onde $\Delta = 0,035 \pm 0,005$.

Relativamente, a dependência do fator de cabo para irradiação com elétrons é mais pronunciada do que para as irradiações com fótons.

2.2.1.4 - Dependência com a Energia da Radiação Incidente.

A dependência energética do fator de cabo das câmaras de ionização, cujos cabos foram irradiados com elétrons, foi estudada para as energias médias disponíveis de elétrons no caso das três câmaras.

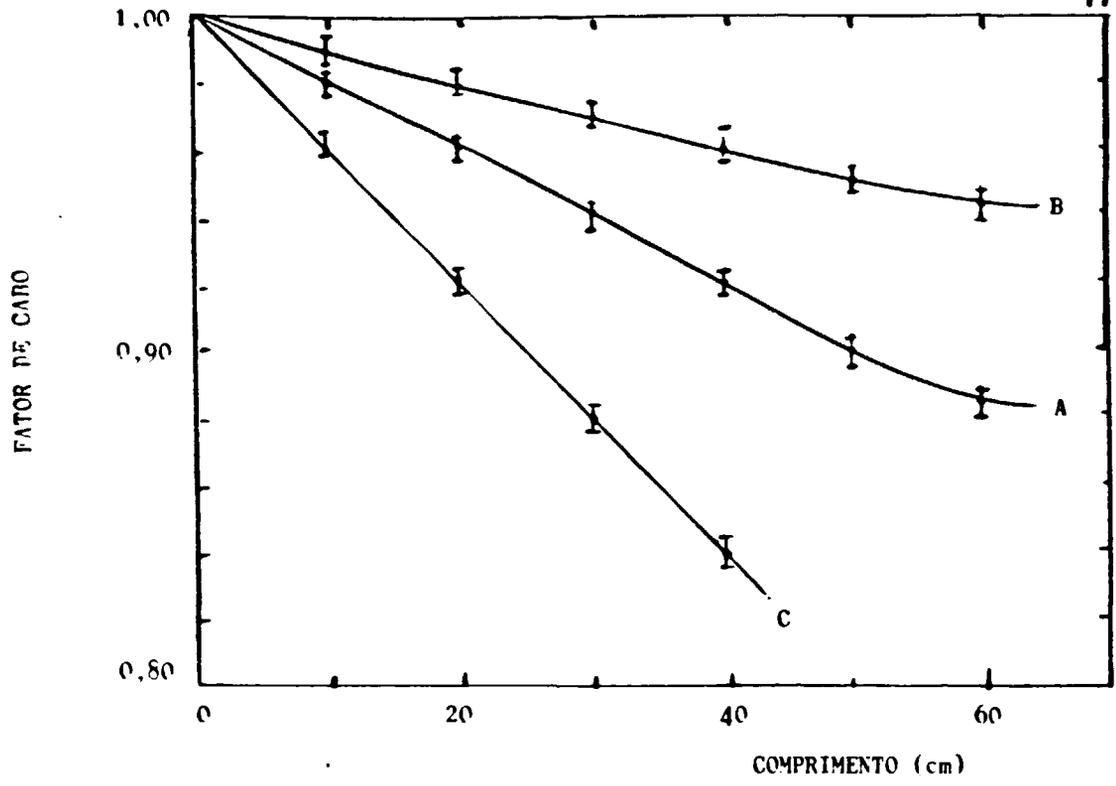


Fig.VI-19 - Dependência do fator de cabo da câmara NE 312 com o comprimento de cabo irradiado. Cabo de extensão nº 1. Dose absorvida no ar : 3 Gy. Energia média dos elétrons: 2,0 MeV (A), 2.7 MeV (B) e 3,3 MeV (C).

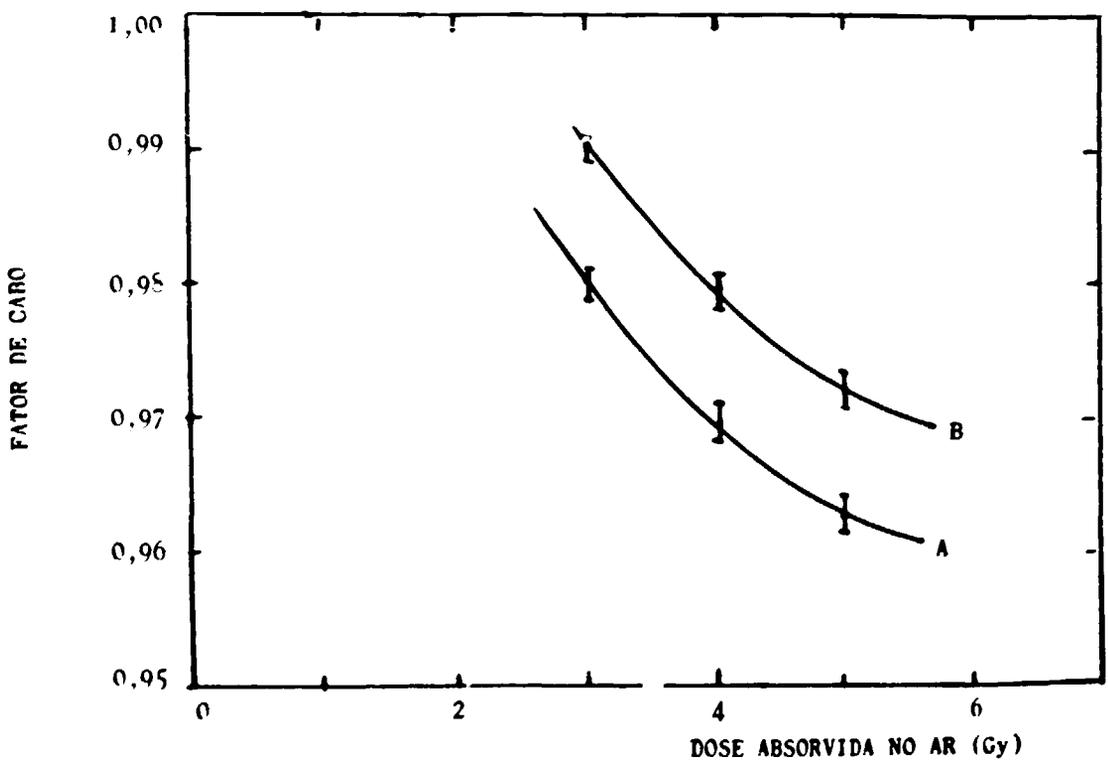


Fig.VI-20 - Dependência do fator de cabo da câmara NE 312 em função da dose absorvida no ar. Cabo de extensão nº 1. Comprimento de cabo irradiado: 10cm. Energia média dos elétrons: 2,0 MeV (A) e 2.7 MeV (B).

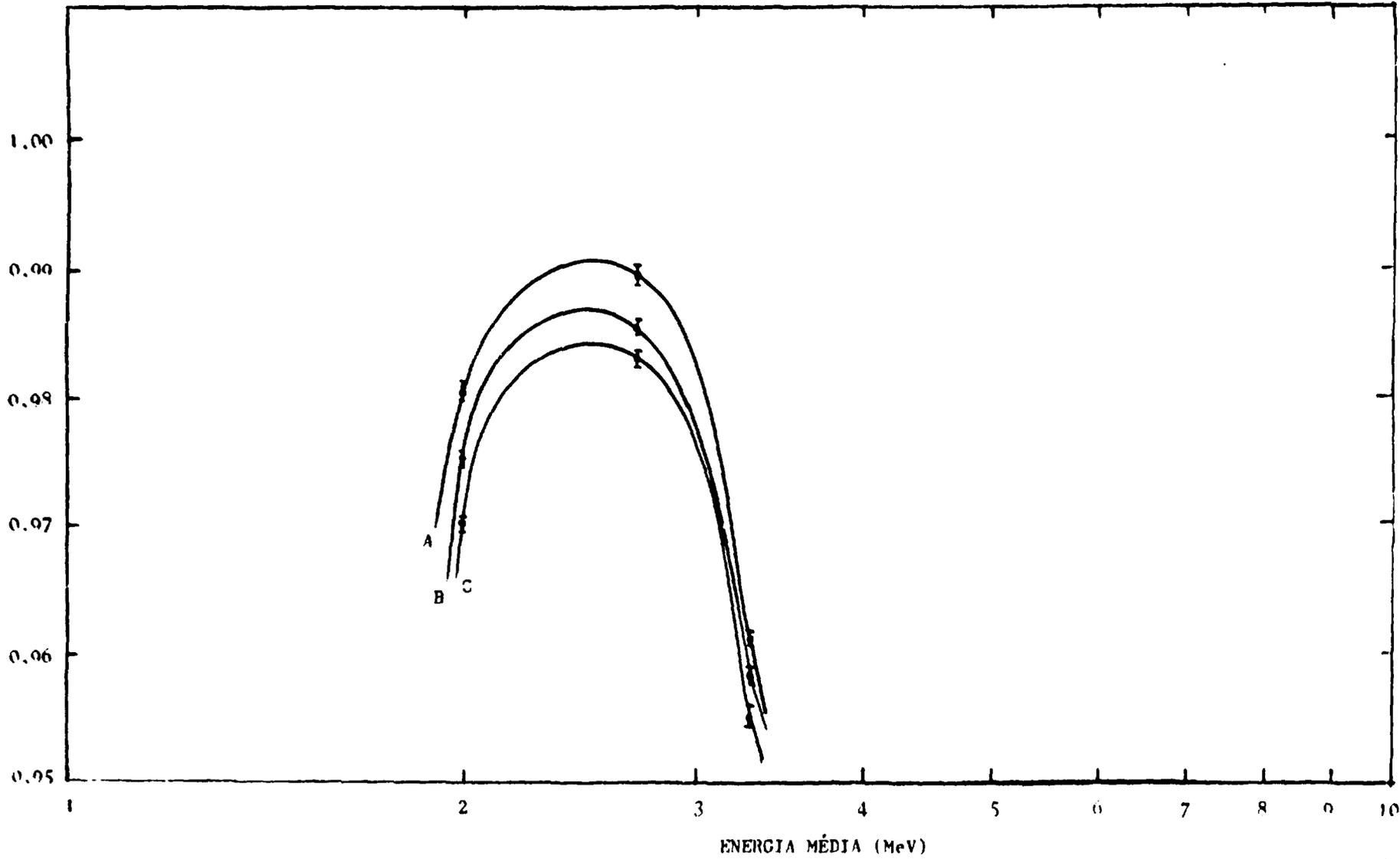


Fig. VI-21- Dependência energética do fator de cabo das câmaras NE 312 (A), 1229 (B) e 2019 (C) acopladas ao cabo de extensão nº 1. Dose absorvida no ar: 2 Gy. Comprimento de cabo irradiado: 10 cm.

O fator de cabo foi determinado como descrito em VI - 2.1.1.1.

Os tamanhos de campo utilizados foram de 10 x 10 cm, os comprimentos de cabo irradiados, de 10 cm, as distâncias fonte-superfície, de 103 cm e a taxa de dose absorvida no ar foi de 2,0 Gy . min⁻¹ para as energias médias de elétrons de 2,0 , 2,7 e 3,3 MeV. Neste caso, todas as câmaras foram acopladas ao cabo de extensão 1.

Os resultados obtidos são mostrados na Fig. VI - 21.

Embora as energias disponíveis para irradiação tenham sido de apenas três, pode-se notar que a dependência energética é bastante acentuada nessa região.

2.2.2 - Comparação dos Efeitos de Irradiação de Cabos com Elétrons.

Os efeitos de irradiações de cabos das câmaras de ionização com elétrons podem ser sumarizados na Tabela VI - 13, onde são comparados os fatores de cabo das três câmaras, para duas energias médias de elétrons.

Os comprimentos de cabo irradiado foram de 10 cm, a distância fonte-superfície, de 103 cm e a taxa de dose absorvida no ar, de 2,0 Gy . min⁻¹.

Tabela VI - 13

Comparação dos Fatores de Correção para as Câmaras NE 312 e 1229, para Elétrons.

Tamanho de Campo: 10 cm. Distância Fonte-Superfície: 103 cm. Taxa de Dose Absorvida no Ar: 2,0 Gy . min⁻¹.

Câmara	Energia Média	$f_{c_{E_1}}$	$f_{c_{E_2}}$
NE	MeV		
312	2,0	0,980	0,978
1229	2,0	0,975	0,974
312	3,3	0,960	0,958
1229	3,3	0,955	0,950

onde

$f_{c_{E_1}}$ - fator de cabo da câmara acoplada ao cabo de extensão 1.

$f_{c_{E_2}}$ - fator de cabo da câmara acoplada ao cabo de extensão 2.

Neste caso, o efeito de cabo da câmara 1229 é maior do que o da câmara 312.

que mostra uma situação inversa ao que se verifica nas irradiações com fótons.

Do mesmo modo, a mesma câmara acoplada a diferentes cabos de extensão apresenta fatores diferentes.

2.3 - Efeito da Radiação Espalhada.

Este efeito refere-se à irradiação de partes da câmara e de outras partes que estão normalmente fora do feixe primário, mas estão situadas dentro da sala de irradiação. As partes dentro da sala de irradiação podem ser subdivididas de acordo com o uso: dentro de um raio de 50 cm a partir do ponto de referência da câmara, ou, a grandes distâncias. A radiação espalhada não deve exceder de 10% a radiação do feixe primário para as partes situadas dentro de 50 cm a partir do ponto de referência da câmara ou de 2% para as partes mais distantes. Esses requisitos limitam o efeito da radiação espalhada em $\pm 0,5\%$ da taxa de exposição no feixe⁽³⁶⁾.

O efeito da irradiação de cabos, conectores e cabos de extensão com radiação espalhada foi medido, principalmente no caso dos aceleradores lineares, onde o comprimento de cabo das câmaras que permanece dentro das salas de irradiação é grande e as taxas de dose absorvida são relativamente altas, embora o feixe seja bem colimado.

Foram efetuadas medidas de tempo de controle com e sem a presença de radiação. Nas medidas sob irradiação do cabo, parte do cabo da câmara foi mantido no campo, no modo usual de irradiação e variou-se o comprimento do cabo e do cabo de extensão a uma distância menor do que 50 cm a partir do ponto de referência do cabo sob irradiação.

Foram determinados os fatores de cabo de extensão, da maneira usual, que são mostrados na Tabela VI -14.

A energia efetiva de raios-X de 67 keV foi escolhida por ser a energia onde o efeito da irradiação atinge o máximo da curva de dependência energética do fator de cabo, conector e cabo de extensão.

Como pode ser observado na Tabela VI - 14, a influência da radiação espalhada no fator de cabo é muito pequena ou praticamente nenhuma, mesmo quando todo o cabo da câmara está numa região onde há radiação espalhada.

Tabela VI - 14

Influência da Radiação Espalhada de Fótons no Fator de Cabo da Câmara NE 312 Acoplada aos Cabos de Extensão 1 e 2. Comprimento de Cabo no Feixe Primário: 10 cm.

Energia	Taxa de Exposição	Comprimento de Cabo Fora do Campo Primário	Comprimento do Cabo de Extensão Fora do Campo Primário	Conector	f_c
keV	$10^{-2} \text{C.kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	cm	cm		
67	1,2	45	—	—	1,006
		600	—	—	1,005
		600	—	1	1,005
		600	600	1	1,006
67	1,2	45	—	—	1,008
		600	—	—	1,008
		600	—	2	1,007
		600	600	2	1,008
1.400	5,2	45	—	—	1,010
		600	—	—	1,010
		600	—	1	1,010
		600	600	1	1,011
1.400	5,2	45	—	—	1,012
		600	—	—	1,012
		600	—	2	1,012
		600	600	2	1,013

3 - Medida de Corrente de Fuga Induzida por Radiação.

A corrente de fuga induzida pela irradiação dos cabos das câmaras de ionização, conectores e cabos de extensão foi também medida para as diferentes câmaras.

3.1 - Irradiações com Fótons.

As irradiações foram efetuadas de modo análogo ao descrito em VI - 2.1.

3.1.1. - Irradiação de Cabos.

Para as medidas da corrente de fuga induzida por radiação foi adotado o procedimento descrito a seguir: o volume sensível da câmara de ionização foi l-

radiado, utilizando-se ou a fonte de referência ou a própria fonte de radiação até se obter uma leitura L no eletrômetro. Após retirar a câmara da fonte de controle ou do campo de radiação, o cabo da câmara foi posicionado no arranjo de irradiação e imediatamente foi efetuada uma nova leitura L' . Se não houve interferência, $L = L'$. O cabo da câmara foi irradiado durante um intervalo de tempo Δt , efetuando-se ao término deste uma nova leitura L'' . Para relacionar esses resultados com os fatores de cabo, conector e cabo de extensão, definiu-se o que se chamou de fator de fuga (F) tal que

$$F = \frac{L'}{L''} \quad (\text{VI} - 7)$$

onde

L' - é a leitura do dosímetro antes da irradiação do cabo,

L'' - é a leitura do dosímetro imediatamente após o término da irradiação do cabo.

Foram efetuadas medidas da corrente de fuga variando-se o tempo de irradiação, o tamanho do cabo irradiado, o tamanho do campo de radiação, a taxa de exposição, a dose absorvida e a energia da radiação incidente para as diferentes câmaras e cabos de extensão.

3.1.1.1 - Sensibilidade das Diferentes Câmaras.

Como um teste inicial mediu-se a fuga induzida pela irradiação dos cabos das três câmaras disponíveis.

Os fatores de fuga de cabo (F_c) foram determinados submetendo-se os cabos das diferentes câmaras à radiação-X de 94 keV, com tamanho de campo de 10 x 8 cm, distância fonte-superfície de 50 cm, taxa de exposição de $1,3 \cdot 10^{-2} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ durante 2 minutos. O comprimento de cabo irradiado foi sempre de 10 cm. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela VI - 15.

Tabela VI - 15

Fatores de Fuga de Cabo das Câmaras NE 312, 2019 e 1229. Comprimento de Cabo Irradiado: 10 cm. Radiação-X: 94 keV. Distância Fonte-Superfície: 50 cm. Tamanho de Campo: 10 x 8 cm. Taxa de Exposição: $1,3 \cdot 10^{-2} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Tempo de Irradiação: 2 min.

Câmara NE	F_c
312	1,004 ± 0,001
2019	1,003 ± 0,001
1229	1,002 ± 0,001

Pode-se observar que a câmara NE 312 apresenta o maior fator de fuga, do mesmo modo como apresentou o maior fator de cabo (Tabela VI - 3). Como esperado, cada câmara apresenta um fator de fuga de cabo próprio.

3.1.1.2 - Dependência com o Comprimento de Cabo Irradiado.

O procedimento para a determinação do fator de fuga de cabo (F_c) foi o mesmo descrito em VI - 3.1.1, sendo que foram irradiados diferentes comprimentos de cabo. Na Tabela VI - 16 são fornecidas as condições de irradiação.

Tabela VI - 16

Condições de Irradiação dos Cabos das Câmaras para a Determinação de Fator de Fuga de Cabo.

Câmara	Tempo de Irradiação	Tamanho de Campo	Energia	Taxa de Exposição	Comprimento de Cabo Irradiado
NE	min	cm x cm	keV	$10^{-2} \text{ C.kg}^{-1} . \text{min}^{-1}$	cm
312	4	10 x 8	94	1,3	10
					20
					30
					40
2019	4	10 x 8	94	1,3	10
					20
					30
					40
					50
					60
1229	4	10 x 8	137	1,7	10
					20
					30
1229	4	15 x 10	137	1,7	15
					30
					45

As Fig. VI - 22 e VI - 23 mostram o comportamento do fator de fuga em função do comprimento de cabo irradiado das câmaras NE 312 e 2019 e da câmara 1229 respectivamente.

Do mesmo modo que o fator de cabo (item VI - 2.1.1.2), o fator de fuga cresce linearmente em função do comprimento de cabo irradiado.

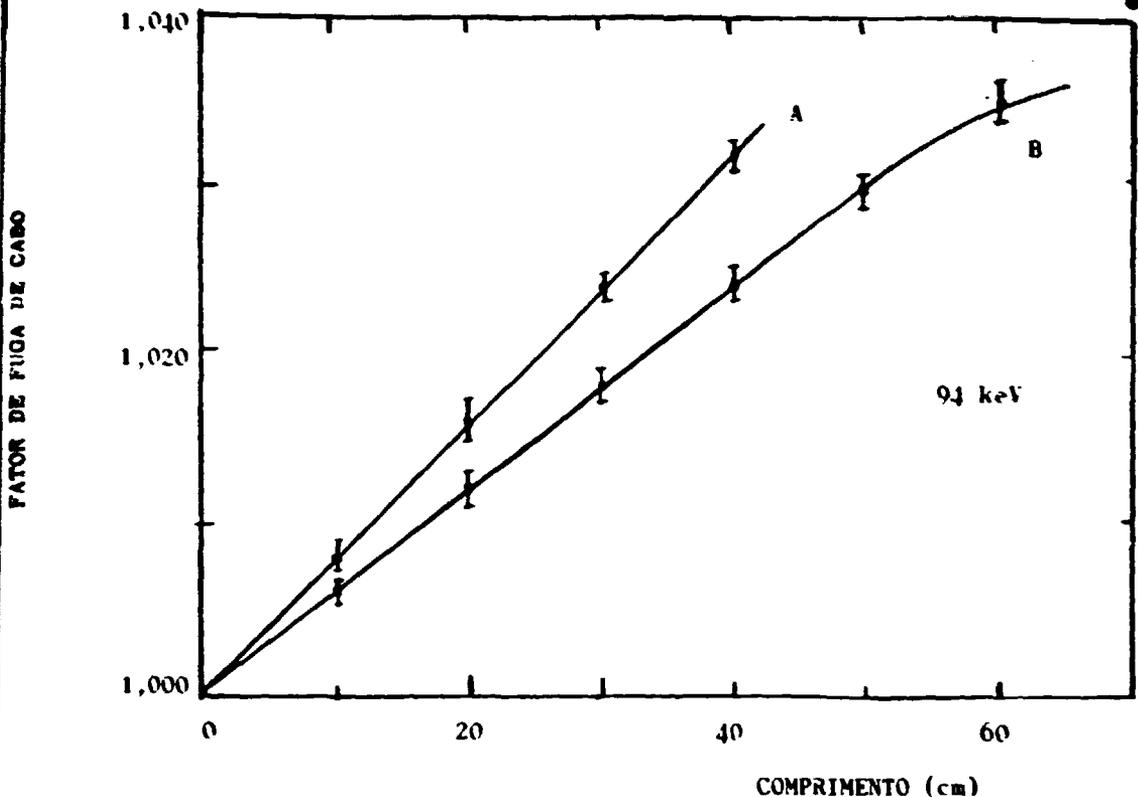


Fig. VI-22 - Dependência do fator de fuga de cabo das câmaras NE 312 (A) e NE 2019 (B) com o comprimento de cabo irradiado. Taxa de exposição de radiação-X: $1,3 \cdot 10^{-2} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Tempo de irradiação: 4 min.

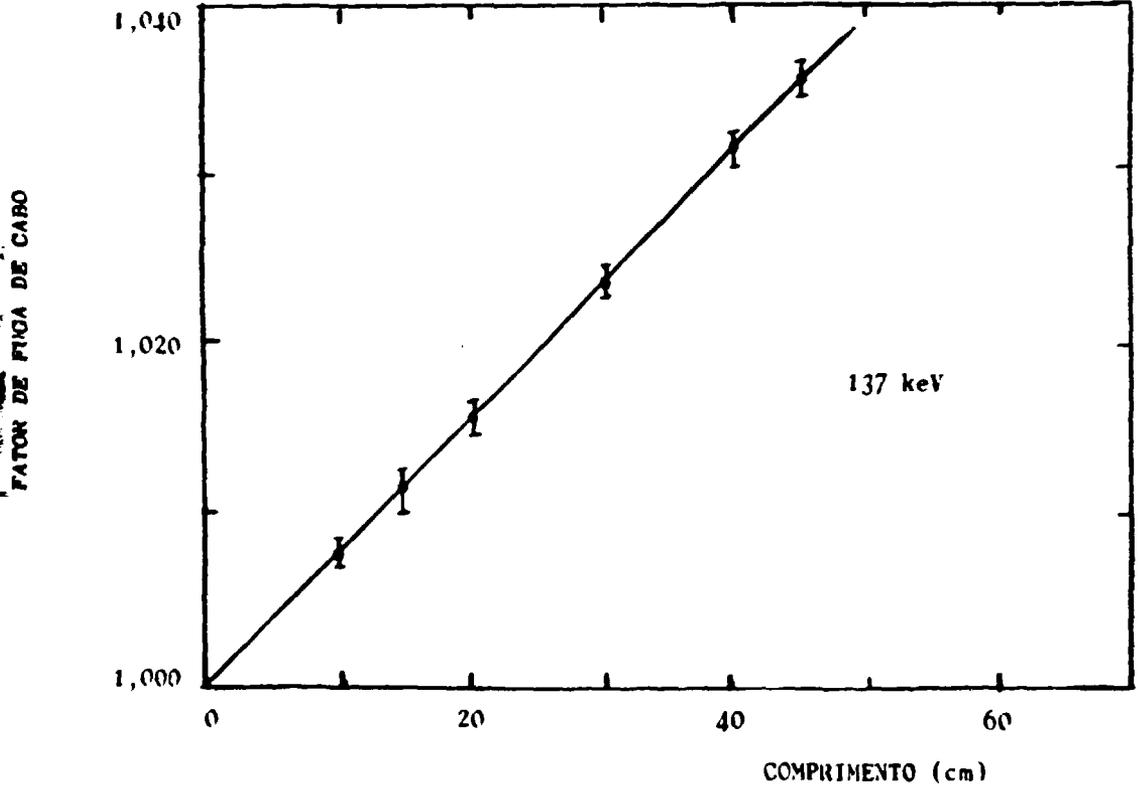


Fig. VI-23 - Dependência do fator de fuga de cabo da câmara NE 1229 com o comprimento de cabo irradiado. Taxa de exposição de radiação-X: $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Tempo de irradiação: 4 min.

3.1.1.3 - Dependência com o Tempo de Irradiação.

Foi verificado o comportamento do fator de fuga de cabo em função do intervalo de tempo de irradiação dos cabos das câmaras NE 312 e 2019.

As medidas foram efetuadas sempre imediatamente após o término da irradiação, variando-se o intervalo de tempo de irradiação. Os parâmetros mantidos constantes foram: o tamanho de campo de 10 x 8 cm, a distância fonte-superfície de 50 cm e o comprimento de cabo irradiado de 10 cm. Na Tabela VI - 17 são fornecidas as demais condições experimentais.

Tabela VI - 17

Condições Experimentais para a Determinação da Dependência do Fator de Fuga de Cabo em Função do Tempo de Irradiação. Tamanho de Campo: 10 x 8 cm. Distância Fonte-Superfície: 50 cm. Comprimento de Cabo Irradiado: 10 cm.

Câmara NE	Energia keV	Taxa de Exposição $10^{-2} \text{ C.kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$	Tempo de Irradiação min
312	94	1,3	1
			2
			3
			4
			5
2019	137	1,7	1
			2
			3
			4
			5

Os resultados obtidos são mostrados nas Fig. VI - 24 e VI - 25.

O comportamento do fator de fuga de cabo em função do tempo de exposição, obedece também, a uma relação do tipo:

$$F_c = t^{\Delta} \quad (\text{VI - 8})$$

Para as câmaras em questão $\Delta = 0,0050 : 0,0005$.

3.1.1.4 - Dependência com a Taxa de Exposição.

Este estudo foi feito de modo análogo ao descrito em VI - 3.1.1.

FATOR DE FUGA DE CABO

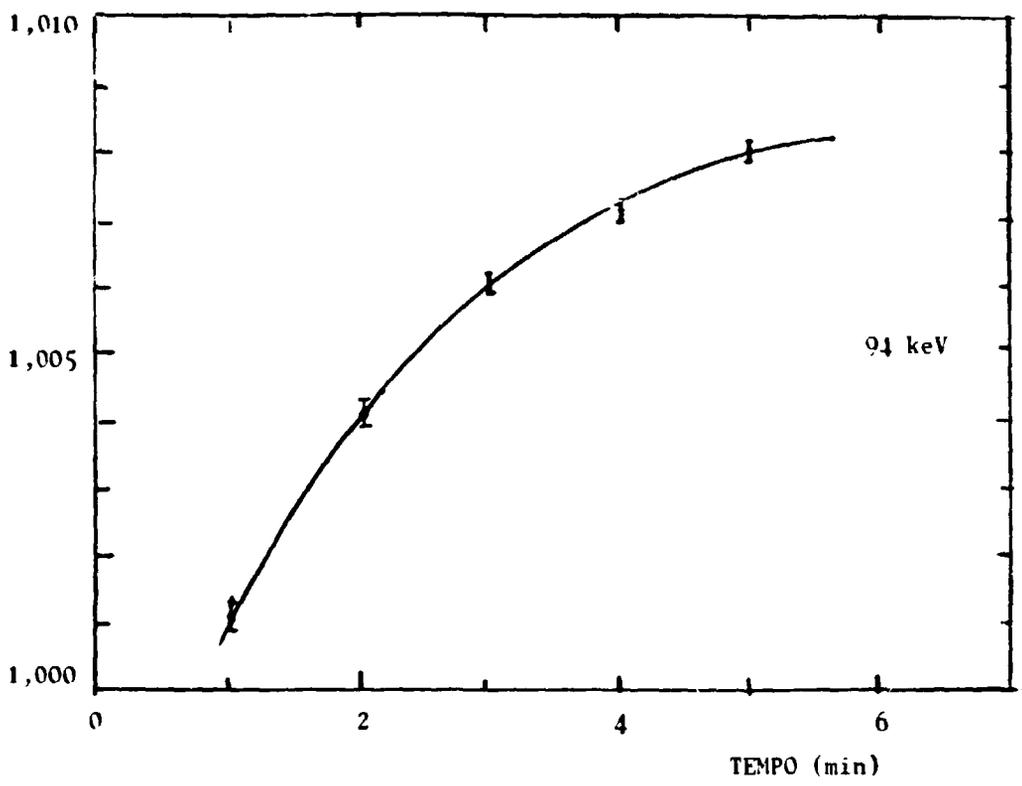


Fig. VI-24 - Dependência do fator de fuga de cabo da câmara NE 312 com o tempo de irradiação do cabo. Taxa de exposição de radiação-X : $1,3 \cdot 10^{-2} \text{ C. kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Comprimento de cabo irradiado: 10 cm.

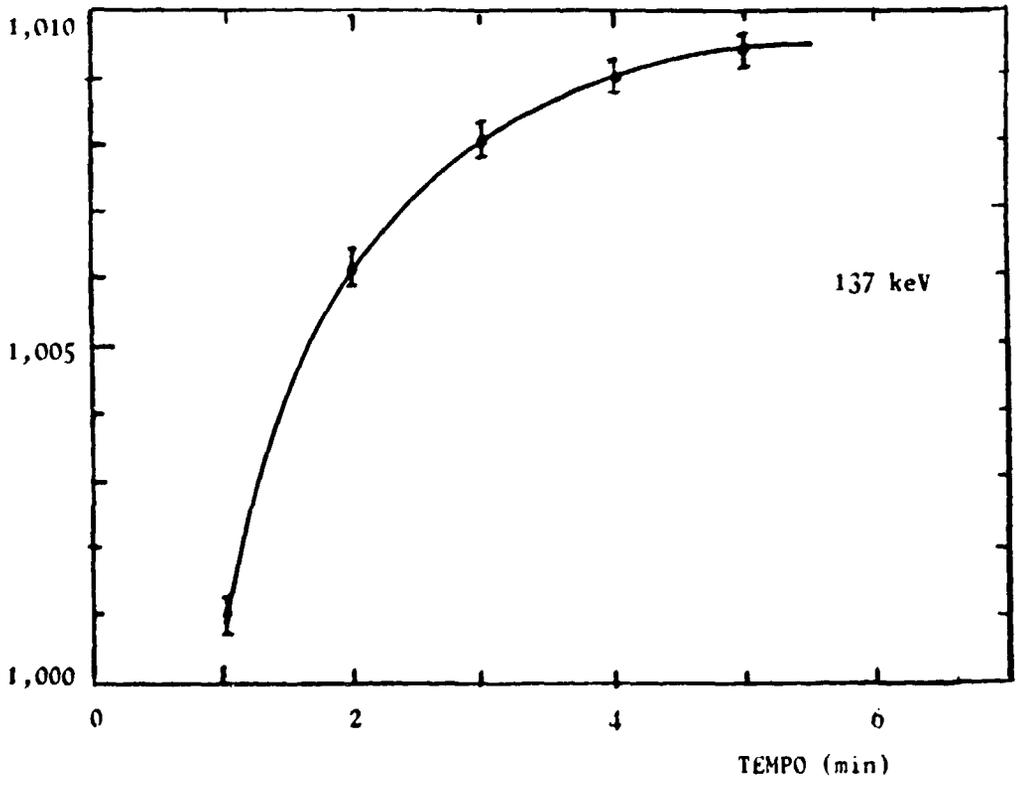


Fig. VI-25 - Dependência do fator de fuga de cabo da câmara NE 2019 com o tempo de irradiação do cabo. Taxa de exposição de radiação-X : $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ C. kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Comprimento de cabo irradiado: 10 cm.

No caso de radiação-X de energias intermediárias variou-se a distância fonte-superfície entre 30 e 50 cm para a obtenção das taxas de exposição de $3,5 \times 10^{-2}$ a $1,3 \cdot 10^{-2} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ respectivamente. As demais condições experimentais de irradiação das câmaras NE 2019 e 1229 foram: radiação-X de 94 keV; comprimento de cabo irradiado de 15 cm; tempo de irradiação de 4 min; tamanho de campo de 15 x 10 cm.

No caso de radiação-X de energias altas variou-se o tempo de irradiação entre 1 e 2,5 min, para obtenção de doses absorvidas no ar entre 2 e 5 Gy. As demais condições experimentais de irradiação da câmara NE 312 foram as seguintes: radiação-X de 3 MeV; comprimento de cabo irradiado de 10 cm; tamanho de campo de 10 x 10 cm; distância fonte-superfície de 103 cm e taxa de dose absorvida no ar de $2,0 \text{ Gy} \cdot \text{min}^{-1}$.

Os resultados obtidos são mostrados nas Fig. VI - 26 e VI - 27.

Também neste caso a dependência do fator de fuga de cabo em função da taxa de exposição (ou da dose absorvida) obedece a mesma relação: $F = X^{\Delta}$, onde para as várias medidas o valor de Δ é $(0,020 \pm 0,005)$, semelhante ao que foi encontrado para a dependência do fator de cabo com a taxa de exposição (item VI - 2.1.1.3).

3.1.1.5 - Dependência com a Energia da Radiação Incidente.

O estudo da dependência energética foi realizado de modo análogo ao descrito em VI - 3.1.1, mantendo-se constante o tempo de irradiação, o tamanho de campo, o comprimento de cabo irradiado e a distância fonte-superfície. As condições experimentais são as mesmas da Tabela VI - 6.

A dependência energética do fator de fuga de cabo é mostrada na Fig VI - 28 curvas A, B e C para as câmaras NE 2019, 1229 e 312 respectivamente. Todos os valores foram normalizados para a taxa de exposição de $2 \cdot 10^{-2} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ e para 10 cm de cabo irradiado, utilizando as curvas de dependência do fator de fuga em função do comprimento de cabo irradiado e da taxa de exposição para cada câmara. Em todos os casos o intervalo de tempo de irradiação foi de 4 minutos.

3.1.2 - Irradiação de Conectores.

As medidas foram efetuadas de modo análogo ao descrito em VI-3.1.1, para a câmara NE 2019 e os cabos de extensão 1 e 2, determinando-se o que se chamou de fator de fuga de conector F_{cn} .

Os resultados obtidos são fornecidos na Tabela VI - 18.

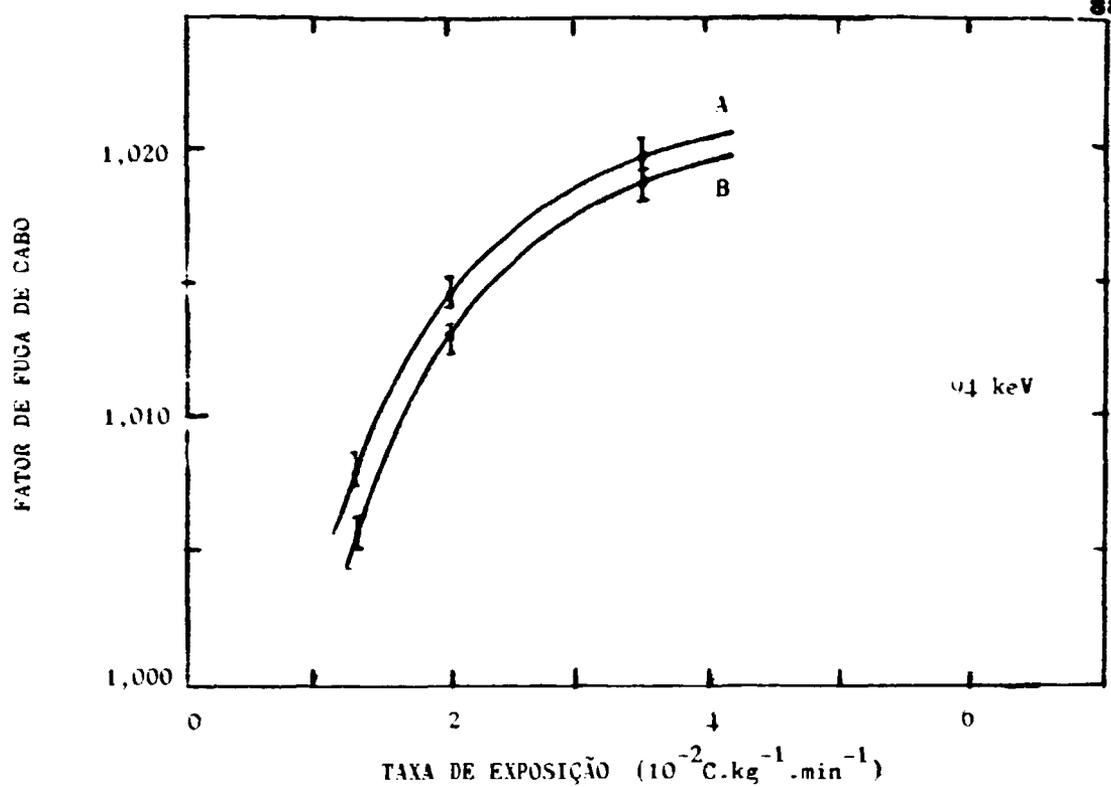


Fig.VI-26 - Dependência do fator de fuga de cabo das câmaras NE 1229 (A) e NE 2019 (B) com a taxa de exposição. Comprimento de cabo irradiado : 15 cm. Tempo de irradiação : 4 min.

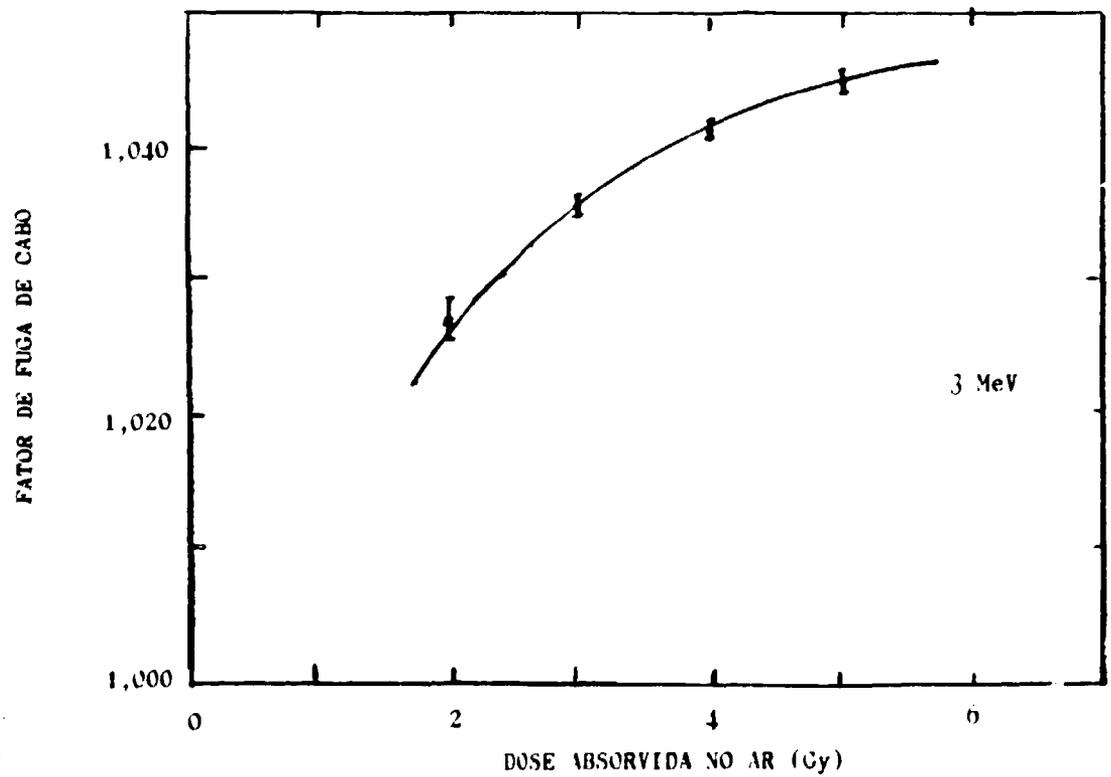
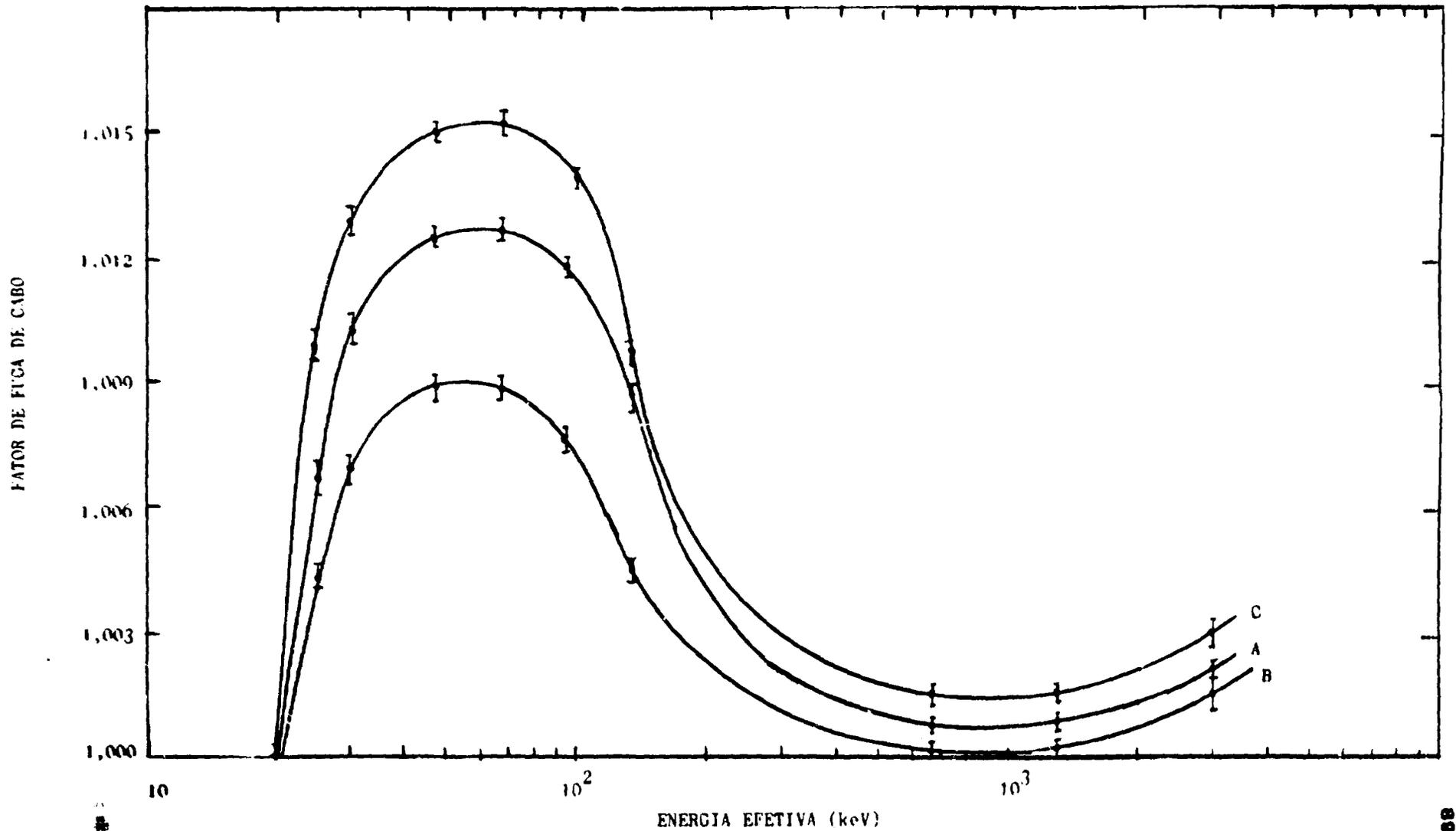


Fig.VI-27 - Dependência do fator de fuga de cabo da câmara NE 312 em função da dose absorvida de radiação-X. Comprimento de cabo irradiado: 10 cm.



Dependência energética do fator de fuga de cabo das câmaras NE 2019 (A), FE 1200 (B) e NE 312 (C). Taxa de exposição: 100 r.p.m. Tempo de exposição: 4 min. Comprimento de cabo irradiado: 10 cm.

Tabela VI - 18

Fatores de Fuga Devido à Irradiação dos Conectores 1 e 2, Acoplados à Câmara NE 2019, com Radiação-X de 94 keV. Tamanho de Campo: 10 x 8 cm. Distância Fonte-Superfície: 50 cm. Taxa de Exposição: $1,3 \cdot 10^{-2} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. Intervalo de Tempo de Irradiação: 4 min.

Conector	F_{cn}
1	$1,014 \pm 0,001$
2	$1,015 \pm 0,001$

Comparando-se os fatores de fuga de conector com os fatores de conector determinados na Tabela VI - 7, pode-se observar que em ambos os casos o conector 2 é o que apresenta os maiores fatores.

3.1.2.1 - Dependência com a Taxa de Exposição.

O procedimento experimental foi análogo ao executado em VI - 3.1.1.4. Somente os conectores foram irradiados com radiação-X de 94 keV, não tendo sido irradiado o cabo. As condições experimentais são fornecidas na Tabela VI - 19 e os resultados são mostrados na Fig. VI - 29 para a câmara NE 2019 e o conector 1.

Tabela VI - 19

Condições Experimentais de Irradiação de Conector com Radiação-X de 94 keV. Tamanho de Campo: 10 x 8 cm, Câmara NE 2019 e Conector 1. Tempo de Irradiação: 4 min.

Distância Fonte-Superfície	Taxa de Exposição
cm	$10^{-2} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$
30	5,0
40	2,7
50	1,7

Neste caso, o fator de fuga de conector apresenta uma dependência com a taxa de exposição semelhante às anteriores, (item VI - 2.1.2.3), onde $\Delta = 0,020 \pm 0,005$.

3.1.2.2 - Dependência com a Energia da Radiação Incidente.

O estudo da dependência energética do fator de fuga de conector foi feito de modo análogo ao descrito em VI - 3.1.1.5. As condições experimentais são

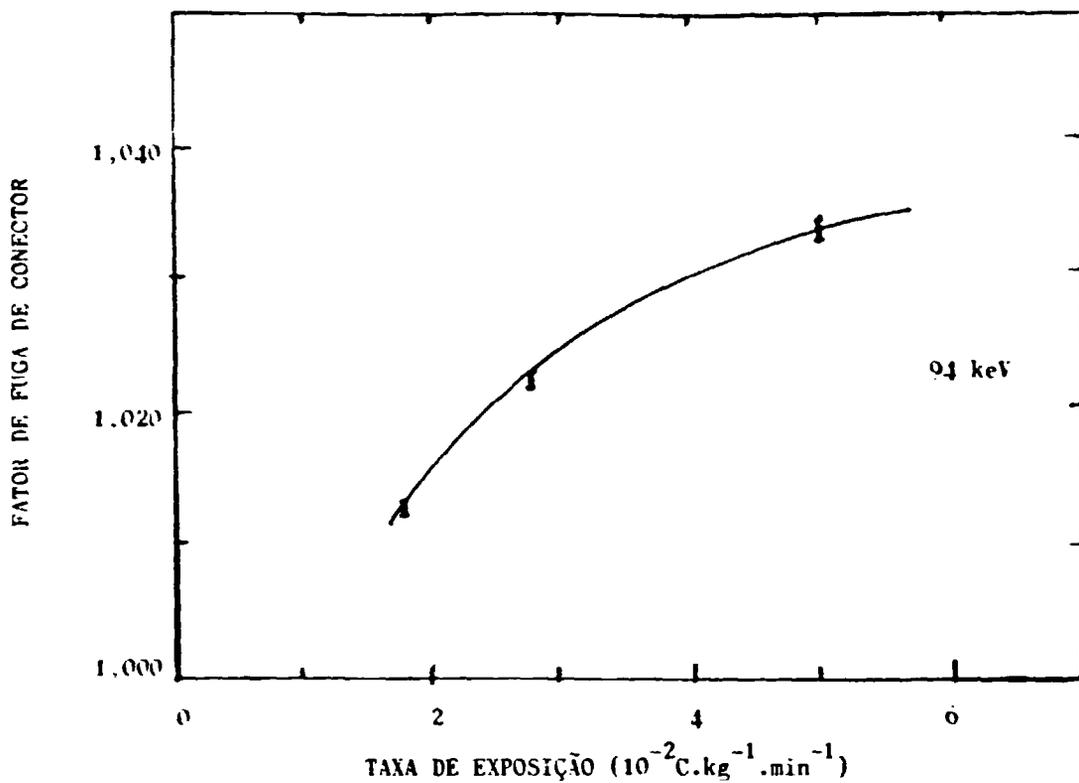


Fig. VI-20 - Dependência do fator de fuga de conector da câmara NE 2019 com a taxa de exposição de radiação-X. Conector 1. Tempo de irradiação: 4 min.

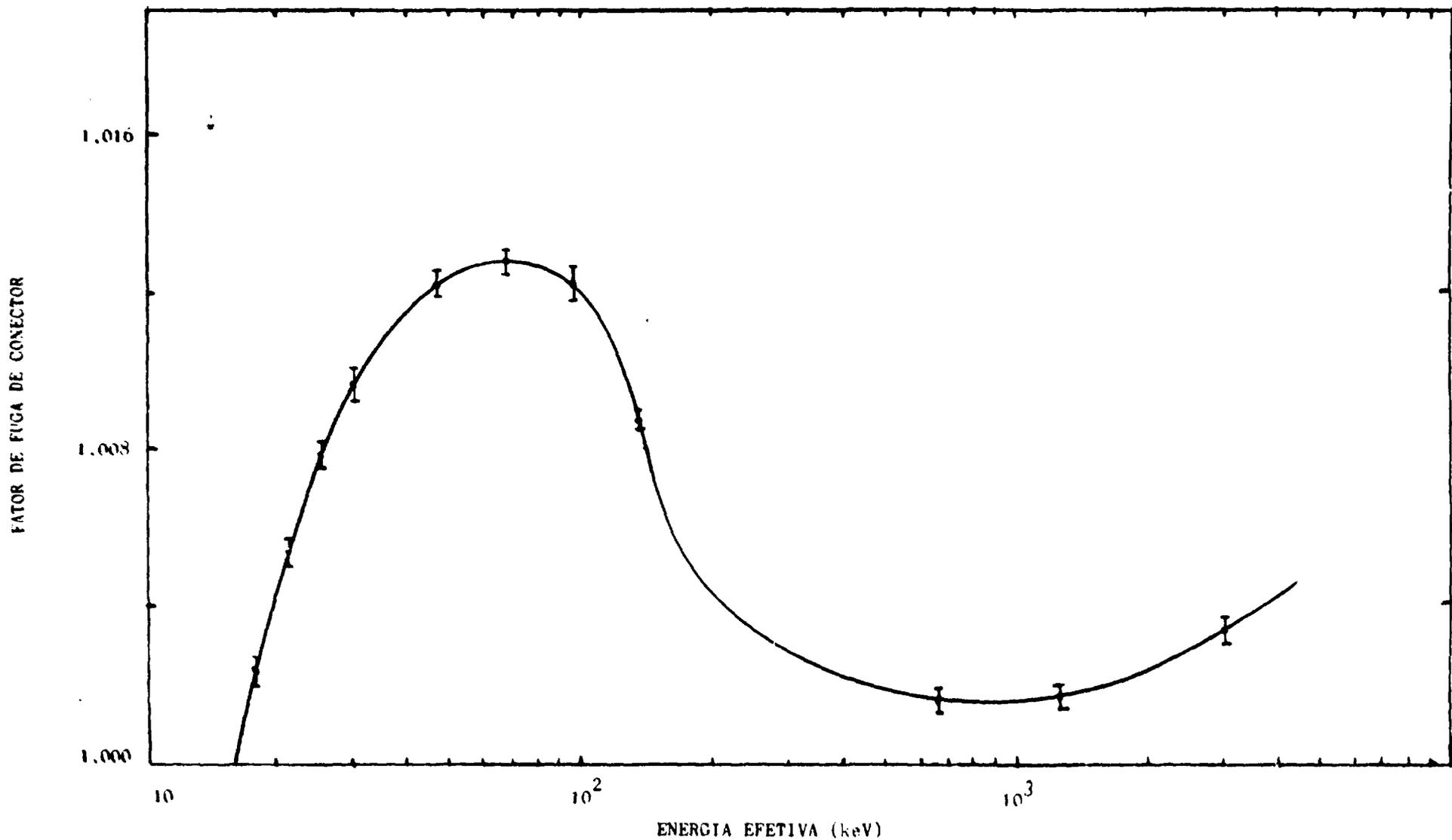


Fig.VI-30 - Dependência energética do fator de fuga de conector da câmara NE 2019 e conector 1. Taxa de exposição: $1.7 \cdot 10^{-2} \text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}$. Tamanho de campo: $10 \times 8 \text{ cm}$. Tempo de irradiação: 4 min.

as mesmas da Tabela VI - 6. A dependência energética do fator de fuga de conector é mostrado na Fig. VI - 30 para a câmara NE 2019 e o conector 1. Todos os valores foram normalizados para a taxa de exposição de $1,7 \cdot 10^{-2} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, o tamanho de campo de 10 x 8 cm, a distância fonte-superfície de 50 cm e o tempo de irradiação de 4 minutos.

O comportamento do fator de fuga de conector em função da energia é o mesmo encontrado para o fator de conector (item VI - 2.1.2.4).

3.1.3 - Irradiação de Cabos de Extensão.

O fator de fuga dos cabos de extensão (F_{ce}) foi também medido para os cabos de extensão 1 e 2 acoplados à câmara NE 2019.

O fator de fuga de cabo de extensão foi determinado seguindo o procedimento descrito em VI - 3.1.1. As irradiações foram efetuadas com radiação-X de 94 keV, tamanho de campo de 10 x 8 cm, distância fonte-superfície de 50 cm, taxa de exposição de $1,3 \cdot 10^{-2} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ e irradiação de 2 min. Os resultados são mostrados na Tabela VI - 20.

Tabela VI - 20

Fatores de Fuga de Cabo de Extensão (F_{ce}) para a Câmara NE 2019 e os Cabos de Extensão 1 e 2. Tamanho de Campo: 10 x 8 cm. Distância Fonte-Superfície: 50 cm. Taxa de Exposição: $1,3 \cdot 10^{-2} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ de radiação-X de 94 keV. Tempo de Irradiação: 2 min.

Cabo	F_{ce}
1	$1,003 \pm 0,001$
2	$1,005 \pm 0,001$

De modo análogo ao já verificado na determinação dos fatores de cabo, os valores do fator de fuga (F_{ce}) para o cabo 1 são menores do que para o cabo 2, acoplados separadamente à mesma câmara.

3.1.4 - Comparação dos Fatores de Fuga de Cabo, Conector e Cabo de Extensão Irrradiados com Fótons.

Os fatores de fuga resultantes da corrente de fuga induzida por radiação-X e gama nos cabos, conectores e cabos de extensão de dosímetros clínicos foram comparados entre si para as câmaras NE 312, 2019 e 1229. Todos os valores foram normalizados para a energia de radiação-X de 94 keV, o tamanho de campo de 10 x 8 cm, a distância fonte-superfície de 50 cm, a taxa de exposição de $1,3 \cdot 10^{-2} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ e o tempo de exposição de 4 minutos. Os resulta-

dos são mostrados na Tabela VI - 21.

Tabela VI - 21

Comparação dos Fatores de Fuga Devidos à Irradiação de Cabos, Conectores e Cabos de Extensão com Radiação-X de 94 keV. Taxa de Exposição: $1,3 \cdot 10^{-2}$ C. kg⁻¹ . min⁻¹. Tempo de Irradiação: 4 min. Comprimento de Cabo Irrradiado: 10 cm. Distância Fonte-Superfície: 50 cm.

Câmara	F_c	F_{c_1}	F_{c_2}	F_{cn_1}	F_{cn_2}	F_{co_1}	F_{co_2}
312	1,008	1,007	1,009	1,016	1,018	1,008	1,012
2019	1,006	1,005	1,007	1,014	1,015	1,006	1,010
1229	1,005	1,005	1,006	1,012	1,015	1,005	1,005

onde

F_c - é o fator de fuga de cabo da câmara.

F_{c_1} - é o fator de fuga de cabo da câmara acoplada ao cabo de extensão 1.

F_{c_2} - é o fator de fuga de cabo da câmara acoplada ao cabo de extensão 2.

F_{cn_1} - é o fator de fuga de conector da câmara acoplada ao cabo de extensão 1.

F_{cn_2} - é o fator de fuga de conector da câmara acoplada ao cabo de extensão 2.

F_{co_1} - é o fator de fuga do cabo de extensão 1.

F_{co_2} - é o fator de fuga do cabo de extensão 2.

Como observado em VI - 2.1.4, a câmara NE 312 apresenta os maiores fatores de fuga. Entre os fatores, o fator de fuga do conector 2 (F_{cn_2}) apresenta-se sempre superior aos demais. Do mesmo modo, o mesmo cabo de extensão, acoplado às outras câmaras diferentes, apresenta fatores de correção diferentes. Todos esses resultados são semelhantes aos encontrados em VI - 2.1.4 para os fatores de cabo, conector e cabo de extensão.

Normalizando todos os fatores das Tabelas VI - 11 e VI - 21 para as mesmas condições de irradiação, ou seja, mesmo comprimento de cabo irradiado, mesma taxa de exposição, mesmo tamanho de campo, mesmo tempo de irradiação e mesma energia estes concordam dentro de $\pm 0,1\%$.

3.2 - Irradiações com Elétrons.

As energias médias dos feixes de elétrons utilizados para a determinação de fuga de cabo foram as mesmas utilizadas em VI - 2.2 para a medida do fator de cabo.

3.2.1 - Irradiação de Cabos.

O fator de fuga de cabo para irradiação com elétrons (F_{cE}) foi determinado de modo análogo ao descrito em VI - 3.1.1. Os procedimentos experimentais foram os mesmos adotados para as irradiações com fótons.

3.2.1.1 - Sensibilidade das Diferentes Câmaras.

O fator de fuga de cabo (F_{cE}) devido à irradiação dos cabos das câmaras com elétrons de energia média de 2,7 MeV foi determinado para as três câmaras. O tamanho de campo foi de 10 x 10 cm, a distância fonte-superfície de 103 cm, o comprimento de cabo irradiado de 10 cm, o intervalo de tempo de irradiação de 1,5 min e a dose absorvida no ar de 3 Gy. Na Tabela VI - 22 são mostrados os valores de F_{cE} para as três câmaras, acopladas ao cabo de extensão 2.

Tabela VI - 22

Fatores de Fuga de Cabo (F_{cE}) dos Cabos, Submetidos ao Feixe de Elétrons de Energia Média de 2,7 MeV. Tamanho de campo: 10 x 10 cm. Distância Fonte-Superfície: 103 cm. Taxa de Dose Absorvida no ar: 2,0 Gy . min⁻¹. Tempo de Irradiação: 1,5 min.

Câmara	F_{cE}
312	0,996 ± 0,001
2019	0,990 ± 0,001
1229	0,987 ± 0,001

Como verificado em VI - 2.2.1.1, cada câmara apresentou um fator de fuga próprio. Para as irradiações com elétrons, a câmara NE 319 é a que apresenta o menor efeito de fuga enquanto que para fótons é a que apresenta o maior efeito de fuga. Neste caso, a câmara NE 1229 foi a que apresentou o maior efeito de fuga. Deve-se notar que o comportamento do fator de fuga de cabo para irradiações com elétrons é oposto ao verificado para o fator de fuga de cabo para irradiações com fótons.

3.2.1.2 - Dependência com o Comprimento de Cabo Irradiado.

O procedimento experimental foi o mesmo descrito em VI - 3.1.1 para a determinação de F_{cE} . Para as energias médias dos elétrons de 2,0, 2,7 e 3,3 MeV foram irradiados comprimentos de cabo entre 10 e 40 cm sendo que: a dose absorvida no ar foi de 3 Gy, o tamanho de campo de 10 x 10 cm, a distância fonte-superfície de 103 cm, a taxa de dose absorvida no ar de 2,0 Gy . min⁻¹ e o tempo de irradiação de 1,5 min.

A Fig. VI - 31 mostra os resultados obtidos com a câmara NE 312 acoplada

ao cabo de extensão 2, para três energias médias de feixes de elétrons.

Como no caso do fator de cabo em (VI - 2.2.1.2), o fator de fuga de cabo decresce linearmente com o comprimento de cabo irradiado com elétrons.

3.2.1.3 - Dependência com a Dose Absorvida.

O estudo da dependência do fator de fuga de cabo com a dose absorvida no ar, foi feito de modo análogo ao descrito em VI - 3.1.1, variando-se a dose absorvida no ar entre 3 e 5 Gy, para as três energias e mantendo-se constante os demais parâmetros, ou seja, o tamanho de campo de 10 x 10 cm, a distância fonte-superfície de 103 cm, a taxa de dose absorvida no ar de 2,0 Gy . min⁻¹ e comprimento de cabo irradiado de 10 cm. Os tempos de irradiação variaram entre 1,5 e 2,5 min.

Os resultados obtidos podem ser vistos na Fig. VI - 32. Observa-se o comportamento decrescente do fator de fuga de cabo, que também obedece à relação de $F_{c\xi} = D^{-\Delta}$, sendo que o valor de Δ , para o fator de fuga de cabo para irradiação com elétrons é:

$$\Delta = 0,035 \pm 0,005.$$

Esse resultado foi o mesmo encontrado para o fator de cabo (VI - 2.2.1.3).

3.2.1.4 - Dependência com a Energia da Radiação Incidente.

A dependência energética do fator de fuga de cabo, para irradiação com elétrons, foi determinado para as três câmaras, de modo análogo ao descrito em VI - 3.1.1. As condições experimentais são as mesmas descritas em VI - 2.2.1.4. Os resultados são mostrados na Fig. VI - 33. Pode-se observar que o comportamento da curva de dependência energética é o mesmo verificado para o fator de cabo em VI - 2.2.1.4.

3.2.2 - Comparação dos Efeitos de Irradiação dos Cabos das Câmaras com Elétrons.

Os efeitos de fuga de corrente resultantes da irradiação dos cabos das câmaras de ionização com elétrons podem ser sumarizados na Tabela VI - 23, onde são comparados os fatores de fuga de cabo das três câmaras, para o feixe de elétrons de energia média de 2,7 MeV, a dose absorvida de 3 Gy, o comprimento de cabo irradiado de 10 cm, a distância fonte-superfície de 103 cm e o tempo de irradiação de 1,5 min.

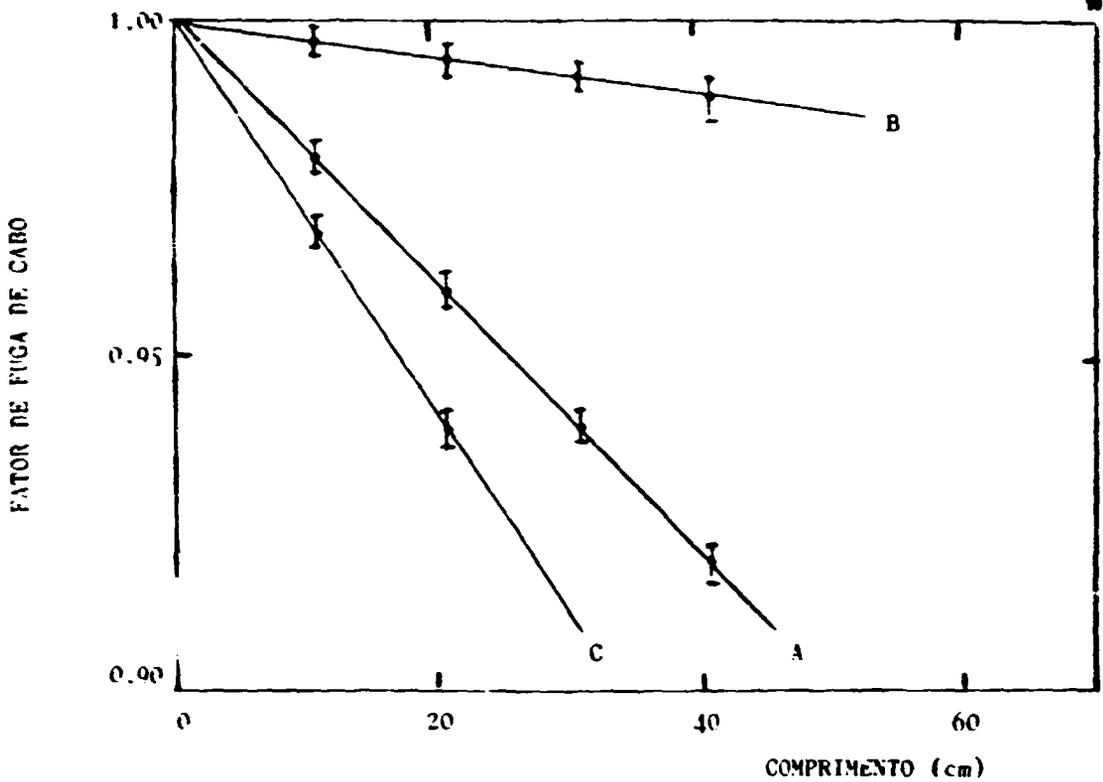


Fig. VI-31 - Dependência do fator de fuga de cabo da câmara NE 312 com o comprimento de cabo irradiado. Dose absorvida no ar: 3 Gy. Energias médias de elétrons: 2.0 MeV (A), 2.7 MeV (B) e 3.3 MeV (C).

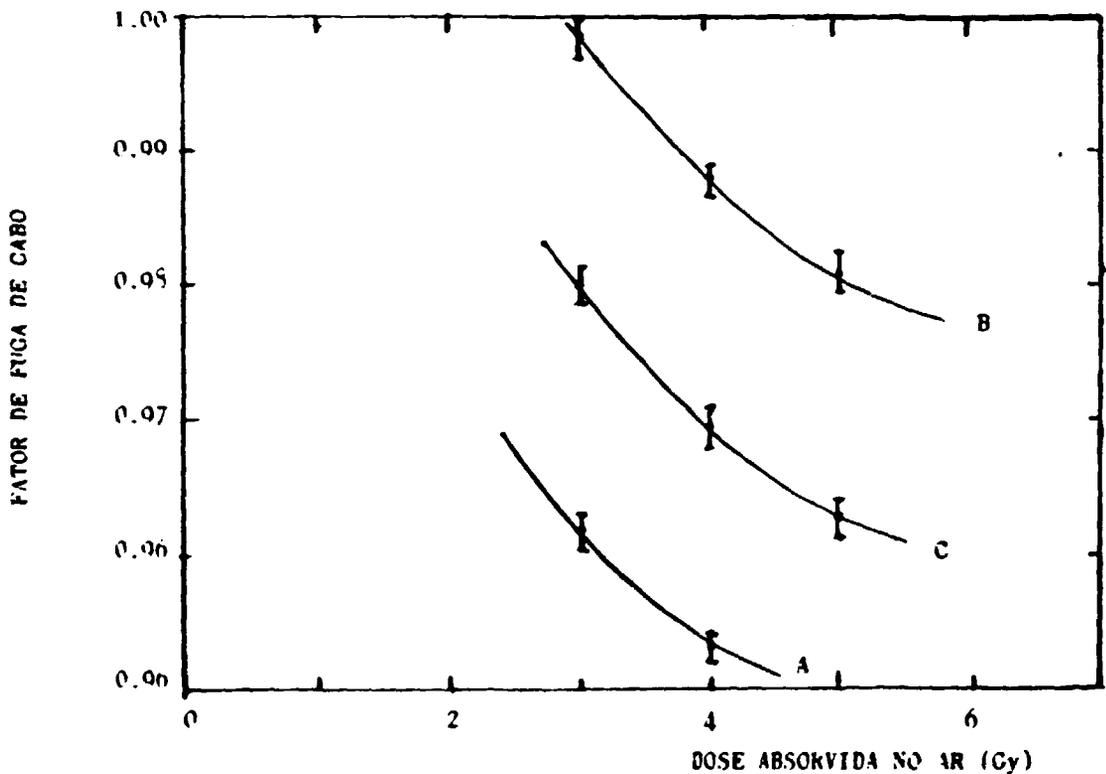


Fig. VI-32 - Dependência do fator de fuga do cabo da câmara NE 312 em função da dose absorvida no ar. Comprimento de cabo irradiado: 10 cm. Energias médias de elétrons: 2.0 MeV (A), 2.7 MeV (B) e 3.3 MeV (C).

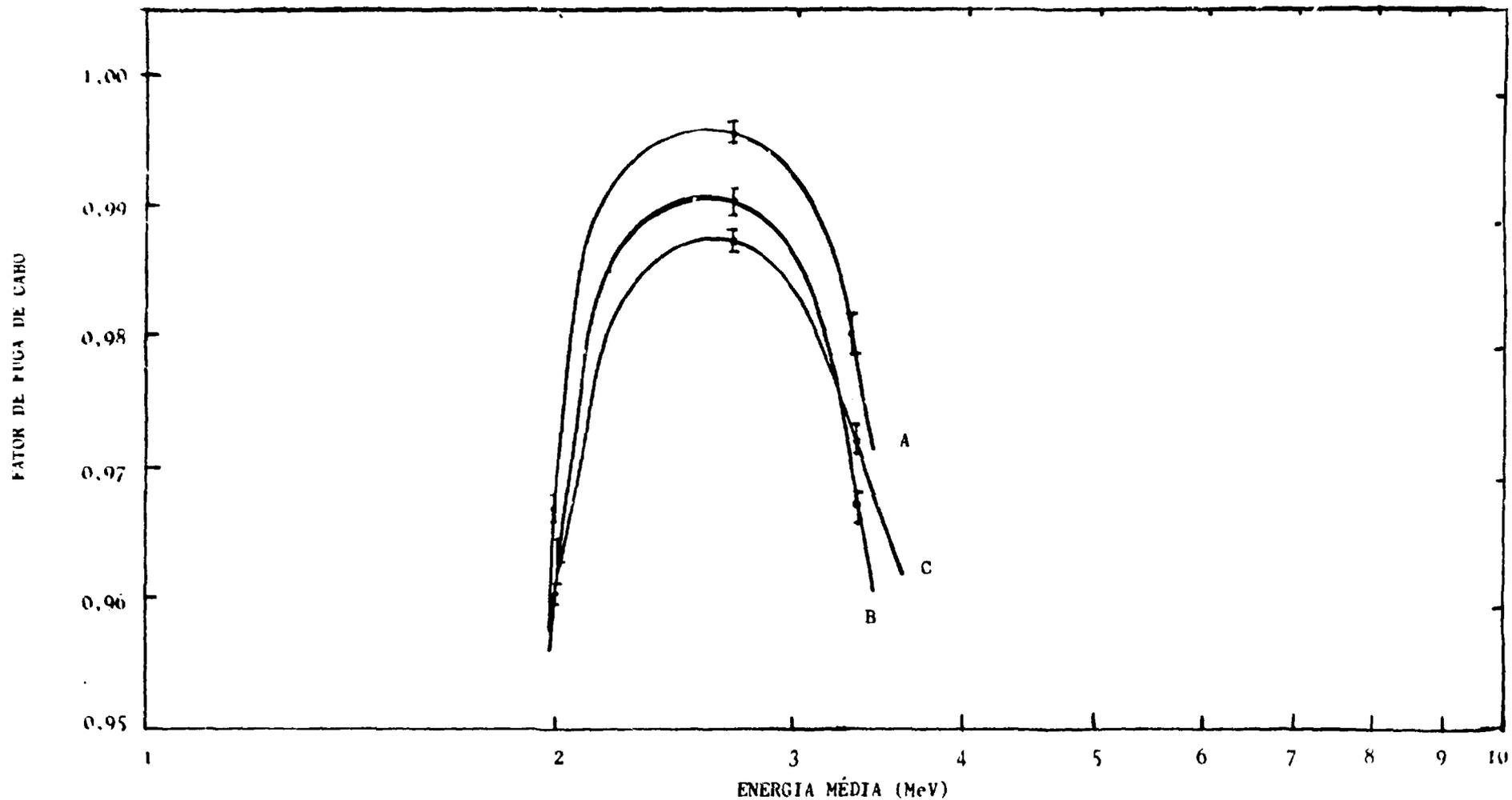


Fig.VI-33- Dependência energética do fator de fuga de cabo das câmaras NE 312 (A), NE 2019 (B) e NE 1229 (C). Dose absorvida no ar: 3 Gy. Comprimento de cabo irradiado: 10 cm.

Tabela VI - 23

Comparação dos Fatores de Fuga de Cabo para os Cabos Submetidos ao Feixe de Elétrons com Energia Média de 2,7 MeV. Dose Absorvida no Ar: 3 Gy. Comprimento de Cabo Irradiado: 10 cm. Distância Fonte-Superfície: 103 cm. Tempo de Irradiação: 1,5 min.

Câmara	F_{cE_1}	F_{cE_2}
312	0,998	0,996
2019	0,992	0,990
1229	0,990	0,987

onde

F_{cE_1} - é o fator de fuga de cabo da câmara acoplada ao cabo de extensão 1.

F_{cE_2} - é o fator de fuga de cabo da câmara acoplada ao cabo de extensão 2.

A câmara NE 1229 apresentou o maior efeito de fuga de cabo para as irradiações com elétrons, enquanto que para a irradiação com fótons a mesma câmara apresentou o menor efeito.

4- Irradiações de Cabos das Câmaras de Ionização em Campos Grandes.

Foram efetuadas medidas para a determinação do fator de cabo, irradiando-se o cabo da câmara NE 2019 tanto com fótons como com elétrons, bem como medidas para a determinação do fator de fuga induzida pela radiação, nas geometrias de I C I e T E T S.

Todas as medidas foram efetuadas de modo análogo ao descrito em VI - 2.1.1. e VI - 3.1.1. Os fatores f_e , F_e , f_{eE} e F_{eE} para as irradiações com fótons e elétrons foram também determinados como descrito em VI - 2.1.1.1 e VI - 3.1.1 respectivamente.

As condições experimentais e os resultados são fornecidos na Tabela VI -24.

Como pode ser observado, no caso das irradiações em campos grandes com geometria de I C I com fótons, os efeitos de cabo e de fuga são da ordem de 0,5% ou mais, podendo atingir 1%, se o comprimento de cabo irradiado for superior a 48 cm. Para o caso das irradiações com elétrons em campos grandes com geometria de T E T S, os efeitos de cabo e fuga são muito superiores, atingindo 1,5% ou mais, podendo atingir 3% conforme o tamanho de campo empregado. Estes fatos mostram a importância de se prestar atenção aos efeitos estudados e efetuar as devidas correções.

Tabela VI - 24

Condições Experimentais e Resultados Obtidos na Irradiação do Cabo da Câmara NE 2019 nas Condições de Dosimetria do Feixe de Fótons e Elétrons para ICI e TETS. Distância Fonte-Superfície: 300 cm.

Radiação	Energia	Tamanho de Campo	Comprimento de Cabo Irradiado	Dose Absorvida no Ar	Tempo de Irradiação		
	MeV	cm x cm	cm	10^{-2} Gy	s		
	Efetiva					f_e	F_e
Fótons	2,6	96 x 96	96	4,73	30,50	1,009 ± 0,001	1,009 ± 0,001
	2,6	48 x 48	48	4,73	30,50	1,005 ± 0,001	1,005 ± 0,001
	Média					f_{eE}	F_{eE}
Elétrons	4,0	96 x 96	96	33,0	88,40	0,973 ± 0,001	0,973 ± 0,001
	4,0	48 x 48	48	33,0	88,40	0,986 ± 0,001	0,986 ± 0,001

CAPÍTULO VII

DISCUSSÕES

Todos os testes relevantes de controle de qualidade foram rigorosamente efetuados de acordo com as recomendações da International Electrotechnical Commission⁽³⁵⁾ e da Associação Brasileira de Normas Técnicas⁽⁶⁾. Como pode ser observado nos ítems VI - 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 e 1.7, o dosímetro não apresenta fuga de corrente na ausência de radiação; a reprodutibilidade das medidas foi sempre melhor do que $\pm 0,06\%$ para todas as câmaras. O acompanhamento cronológico da estabilidade a longo prazo também demonstrou que o comportamento dos dosímetros esteve sempre dentro dos padrões exigidos, ou seja, o valor do tempo de controle final corrigido foi sempre melhor do que $\pm 1\%$, em relação a um tempo inicial de referência, nem se verifica nenhuma tendência dos valores numa determinada direção. Isto é uma situação perfeitamente satisfatória e demonstra que os instrumentos não sofreram danos durante todo o período de utilização (Fig. VI - 1).

Pode-se também verificar que o fator de linearidade do eletrômetro não se alterou para qualquer número de dígitos na escala de 0 a 100. Isto significa que durante as medidas foi possível utilizar qualquer número de dígitos, conforme a necessidade, sem a preocupação da aplicação de fatores de correção para uma possível falta de linearidade (Tabela VI - 2).

Quando toda a haste da câmara está no feixe primário, o efeito haste (nos casos estudados) apresentou-se da ordem de 0,8% (Fig. VI - 3), o que já tornaria necessária a aplicação de fatores de correção na determinação da dose absorvida. Quando se começa irradiar o cabo da câmara propriamente dito, o efeito se torna muito mais significativo, surgindo então a necessidade da aplicação dos fatores de correção.

1- Comportamento do Efeito da Irradiação de Cabos, Conectores e Cabos de Extensão de Câmaras de Ionização com Fótons.

Observou-se que a amplitude do fator de cabo, conector ou cabo de extensão é característico para cada câmara ou cabo de extensão (ou conjunto câmara e cabo de extensão), como pode ser visto nas Tabelas VI - 3, VI - 7 e VI - 10, sendo que esse fator é mais pronunciado quando o conector está no feixe primário. Pode-se concluir da Tabela VI - 11 que, em todos os cabos, os fatores de conector são sempre maiores que os fatores de cabo ($f_{cn} > f_c$).

Com relação ao comprimento do cabo irradiado, o fator de cabo e o fator de cabo de extensão crescem linearmente com o aumento do comprimento de cabo irradiado, como pode ser observado nas Fig. VI - 4, VI - 5, VI - 6, VI - 11, VI - 12, VI - 16 para diferentes energias de fótons, tamanhos de campo e taxas de exposição, tendendo à saturação, nos casos estudados,

para comprimentos de cabos irradiados iguais ou superiores a 60 cm. A linearidade mantém-se no sistema conector-cabo, onde se irradia somente o conector ou o conector juntamente com diferentes comprimentos de cabo. Este fato pode ser observado nas Fig. VI - 11 e VI - 12.

A dependência do fator de cabo, conector ou cabo de extensão com a taxa de exposição (ou com a dose absorvida no ar), obedece a uma relação do tipo $f = \dot{X}^\Delta$, onde $\Delta = 0,020 \pm 0,005$ para os fatores de cabo e de conector e $\Delta = 0,015 \pm 0,005$ para o fator de cabo de extensão. Esse comportamento é mantido, independente do comprimento de cabo irradiado e da energia da radiação incidente (Fig. VI - 7, VI - 8, VI - 9, VI - 13, VI - 14 e VI - 17).

Finalmente, a dependência energética dos fatores de cabo, conector e cabo de extensão mostrou-se bastante acentuada na faixa de energia de fótons entre 25 e 100 keV, sendo que o comportamento das curvas varia de cabo para cabo ou de conector para conector (Fig. VI - 10, VI - 15 e VI - 18).

Como já foi observado (VI - 2.1.1.4), a maior dependência do fator de cabo ou conector na região de energias baixas pode ser associado à predominância do efeito fotoelétrico na interação da radiação com o material isolante do cabo. Na região de predominância de efeito Compton a dependência energética diminui, tendendo a aumentar novamente na região de energias altas, onde começa a prevalecer o fenômeno de produção de pares. A dependência energética é maior no caso dos fatores de conector (Fig. VI - 15) do que para os cabos.

Uma visão geral do comportamento dos fatores de cabo, conector e cabo de extensão é dada na Tabela VI - 11. A partir dos resultados obtidos, foi calculado o fator de correção para comprimentos de cabos irradiados da ordem de 50 cm, com taxas de exposição da ordem de $2,6 \cdot 10^{-3} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ com radiação gama do ^{60}Co , que normalmente são as condições mais utilizadas na I C I; pode-se obter fatores de correção da ordem de 1%, dependendo da sensibilidade da câmara. Se o conector também estiver exposto à radiação, esse fator será no mínimo 1,5%. Deve-se considerar também o fator de haste, que é da ordem de 0,8%. Isto significa que o fator de correção total, para o exemplo hipotético acima é de aproximadamente 1,018, se o conector não estiver no feixe primário e 1,023 se o conector estiver no campo de radiação.

2- Comportamento do Efeito da Irradiação de Cabos das Câmaras de Ionização com Elétrons.

Neste caso também a amplitude do fator de cabo é característica para cada conjunto câmara e cabo de extensão, uma vez que para as irradiações com elétrons, devido às dimensões das salas de irradiação dos aceleradores lineares é obrigatório o uso do cabo de extensão. Esses resultados são mostrados na Tabela VI - 12.

O comportamento do fator de cabo devido à irradiação dos cabos das câmaras com elétrons tem sentido oposto ao comportamento dos fatores de cabo, conector e cabo de extensão devido à irradiação com fótons. Isto significa que no primeiro caso: $f_c \leq 1$, e no segundo caso: $f_c \geq 1$.

Embora em sentido oposto, todas as características dos fatores são semelhantes, ou seja, o fator de cabo decresce linearmente em relação ao comprimento de cabo irradiado com elétrons (Fig. VI - 19). A dependência do fator de cabo com a dose absorvida no ar, (Fig. VI - 20) obedece à relação $f_{cE} = D^{-\Delta}$ com $\Delta = 0,035 \pm 0,005$.

A dependência energética do fator de cabo na região de energias médias de elétrons estudada apresentou-se também acentuada (Fig. VI - 21).

Uma visão geral dos fatores de cabo em função de diferentes câmaras e cabos de extensão para duas energias diferentes é mostrada na Tabela VI - 13.

Como exemplo, o fator de cabo aproximado, quando 50 cm de cabo são expostos a um feixe de elétrons de energia média de 3,5 MeV, e uma dose absorvida no ar de 0,5 Gy, que são as condições normalmente utilizadas nas I C I, será da ordem de 2%. Deve-se considerar também o fator de haste para o caso de irradiações com elétrons, que não foi determinado nas medidas do presente trabalho.

3- Efeito da Radiação Espalhada no Fator de Cabo.

Como pode ser observado na Tabela VI - 14, a influência da radiação espalhada no fator de cabo, conector ou cabo de extensão é muito pequena ou praticamente desprezível. Comparando-se os resultados obtidos nos casos em que os cabos e conectores estão no feixe primário, e no caso da radiação espalhada, pode-se concluir que este último é devido principalmente ao fato das taxas de exposição nesses casos serem muito menores do que no feixe primário. Nas Fig. VI - 7, VI - 8, VI - 9, VI - 13, VI - 14 e VI - 17 pode-se observar que o fator de cabo é desprezível para as taxas de exposição muito baixas, embora muitas vezes o comprimento de cabo submetido à radiação espalhada seja grande.

4- Comportamento da Corrente de Fuga Induzida pela Irradiação de Cabos, Conectores e Cabos de Extensão das Câmaras de Ionização com Fótons.

O comportamento do fator de fuga, induzida pela irradiação de cabos, conectores e cabos de extensão de câmaras de ionização tipo c'edal é análogo ao comportamento observado no caso do fator de cabo, conector e cabos de extensão respectivamente.

Nas Tabelas VI - 15, VI - 18 e VI - 20 observa-se que o fator de fuga é característico para cada cabo, conector ou cabo de extensão.

O fator de fuga também apresenta-se linear em função do comprimento de cabo irradiado, como pode ser visto nas Fig. VI - 22 e VI - 23.

Um parâmetro importante na determinação do fator de fuga é o tempo de irradiação. Como pode ser visto nas Fig. VI - 24 e VI - 25, a dependência do fator de fuga de cabo com tempo de irradiação é do tipo $F_f = t^{\Delta}$, onde $\Delta = 0,0050 \pm 0,0005$.

A dependência do fator de fuga com a taxa de exposição (ou dose absorvida no ar) apresenta o mesmo comportamento observado no caso dos fatores de cabo ou conector, ou seja, $\Delta = 0,020 \pm 0,005$, mantendo a proporcionalidade em relação ao comprimento de cabo irradiado (Fig. VI - 26, VI - 27 e VI - 29).

A dependência energética do fator de fuga de cabo e de conector (Fig. VI - 28 e VI - 30) segue também o mesmo comportamento observado para os fatores de cabo e conector.

5- Comportamento da Corrente de Fuga Induzida pela Irradiação de Cabos com Elétrons.

O comportamento do fator de fuga, quando o cabo da câmara é exposto a um feixe de elétrons, é análogo ao fator de cabo, quando o cabo da câmara é irradiado em condições semelhantes, como pode ser observado na Fig. VI - 31.

O fator de fuga de cabo decresce linearmente com o comprimento de cabo irradiado (Fig. VI - 31) e apresenta a mesma dependência com a dose absorvida no ar apresentada pelo fator de cabo, ou seja, $F_{cE} = D^{-\Delta}$ onde $\Delta = 0,035 \pm 0,005$ (Fig. VI - 32).

A dependência energética do fator de fuga de cabo na região média dos elétrons estudada é a mesma verificada para o caso do fator de cabo.

6- Irradiações em Campos Grandes.

Como esperado, o efeito é significativo, embora as taxas de dose absorvida no ar sejam bem menores do que nos casos de irradiações em campos convencionais. Por outro lado, o efeito é aumentado considerando-se que o comprimento total de cabo irradiado é muito maior e o fato da haste da câmara também estar no feixe primário.

Para uma mesma geometria e condições experimentais de irradiação, os fatores de cabo e fuga apresentaram os mesmos valores (Tabela VI - 24). No caso de irradiação com elétrons, os efeitos são superiores quando comparados com os efeitos obtidos nas irradiações com fótons.

Pelos resultados obtidos pode-se concluir que o efeito total da irradiação de cabos, conectores e cabos de extensão de câmaras de ionização é exclusivamente devido à ocorrência de uma corrente de fuga causada pela interação da radiação com o material dielétrico do cabo, conector ou cabo de extensão. Essas interações sem origem no volume sensível da câmara resultam num sinal que irá ser acrescido ao sinal coletado no volume sensível da câmara, aumentando, como no caso de irradiações com elétrons, ou diminuindo, como no caso de irradiações com fótons, as leituras no eletrômetro.

Baseado no esquema da Fig. III - 2 onde:

$$I = I_1 - I_2 \pm I_0^{\pm}$$

e considerando que a tensão aplicada na câmara é de - 300 V, podemos expressar as correntes da

fuga observadas para as irradiações dos cabos triaxiais com fótons e elétrons.

No caso da irradiação dos cabos, conectores e cabos de extensão com fótons, a corrente de fuga total será:

$$I = -I_2 + I_0^-$$

onde I_2 representa a corrente Compton e I_0^- , a corrente devida à condutividade induzida no dielétrico pela radiação. No caso de um cabo triaxial, $I_1 = 0$, pois o meio 1 é isolado eletricamente do meio 2.

Neste caso $I_2 > I_0^-$, o que resulta numa diminuição da leitura do eletrômetro quando o cabo, o conector ou o cabo de extensão também forem irradiados, obtendo-se um fator de correção maior do que 1.

No caso da irradiação das mesmas peças com elétrons, devido ao pequeno percurso dos elétrons no material, a corrente Compton é desprezível e então tem-se:

$$I = I_0^-$$

o que resulta num aumento da leitura do eletrômetro quando o cabo, o conector ou o cabo de extensão também forem irradiados, obtendo-se um fator de correção menor do que 1.

Como a corrente de fuga é função da interação da radiação com o material dielétrico interno do cabo triaxial, resulta que a intensidade da corrente de fuga depende do tipo, da pureza e da espessura do isolante de cada cabo, sendo portanto característica para cada equipamento. Desse modo é necessária a determinação de fatores de correção para irradiação de cada cabo de câmara em particular.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSÕES

Como já foi mencionado, um erro na aplicação de uma dose de radiação em determinado tumor pode causar inúmeros problemas ao paciente. Assim sendo, é necessário que os equipamentos estejam perfeitamente calibrados. Se a dose for reduzida em cinco por cento, por exemplo, a probabilidade de controlar a doença pode ser reduzida de 80% para 20% em determinados tipos de tumores. Por outro lado, um excesso de cinco por cento, aumenta de 25% para 50% a possibilidade de o paciente apresentar problemas colaterais como a necrose, em forma de queimaduras.

Desse modo é necessária uma dosimetria do feixe acurada, com uma incerteza de no máximo $\pm 5\%$.

Os resultados obtidos mostraram que:

- a- nas geometrias de irradiação com campos grandes, o efeito da irradiação de cabos, conectores e cabos de extensão pode ser igual ou superior a 1,0% para as irradiações com fótons e igual ou superior a 2,0% para as irradiações com elétrons;
- b- o efeito aumenta linearmente com o comprimento de cabo irradiado;
- c- a dependência com a taxa de exposição (ou dose absorvida no ar) é do tipo $f = \dot{X}^\Delta$ para irradiações com fótons e $f = D^{-\Delta}$ para irradiações com elétrons;
- d- a dependência da corrente de fuga com o tempo de irradiação é do tipo $F = t^\Delta$ para as irradiações com fótons;
- e- o efeito da irradiação de toda a haste da câmara é da ordem de 0,8% ou mais.

Os resultados deste trabalho mostraram a necessidade de fatores de correção quando cabos, conectores e cabos de extensão estiverem no feixe primário de radiação e possibilitaram estabelecer um método para a determinação desses fatores.

O método recomendado, neste caso, para os físicos hospitalares, consta de duas etapas: determinação do fator de haste e determinação do fator de cabo.

1- Determinação do Fator de Haste.

A determinação do fator de correção de haste pode ser feita seguindo-se o procedimento usual descrito em VI - 1.8. Isto é feito utilizando-se campos de radiação retangulares, com um

dos lados mantido fixo e variando-se a dimensão do outro. As medidas são efetuadas com a câmara nas posições vertical e horizontal, de modo a irradiar no primeiro caso sempre o mesmo comprimento da haste da câmara e no segundo caso, comprimentos diferentes da haste. O fator de correção será dado pelo quociente entre as leituras do dosímetro para as irradiações dos tamanhos de haste diferentes e para as irradiações do tamanho fixo da haste.

Os tamanhos de campo utilizados podem ser os convencionais empregados em radioterapia. Recomenda-se que esse tipo de medida seja efetuada para diferentes taxas de exposição, para uma maior exatidão dos fatores obtidos, uma vez que a sua dependência com a taxa de exposição não é conhecida.

2- Determinação do Fator de Cabo.

Para a determinação do fator de cabo, sugere-se que seja efetuada uma curva de dependência do fator de cabo em função da taxa de exposição (ou da dose absorvida no ar), à energia de radiação que se vai utilizar.

Essa curva pode ser determinada de duas maneiras:

- a- medindo-se os tempos de controle com a câmara posicionada dentro da fonte de referência, com e sem a irradiação do cabo da câmara;
- b- medindo-se a corrente de fuga após uma irradiação prévia da câmara, com e sem a presença de radiação incidente no cabo da câmara.

Em ambos os casos todos os demais parâmetros devem ser mantidos constantes.

Como o efeito é linear em relação ao comprimento de cabo irradiado, essas medidas podem também ser efetuadas para os tamanhos de campo padrão; os resultados podem ser extrapolados para maiores comprimentos de cabos irradiados.

Os fatores de correção de cabo ou de fuga são determinados como descrito em VI-2.1.1.1 e VI-3.1.1. No primeiro caso, o fator de cabo é dado pelo quociente entre a média dos tempos de controle obtidos durante a irradiação simultânea do cabo e sem a irradiação dele. No segundo caso, o fator de fuga de cabo é dado pelo quociente entre a leitura do dosímetro sem irradiação do cabo e a leitura do dosímetro após a irradiação do cabo.

Obtendo-se a curva de dependência do fator de cabo em função da taxa de exposição (ou da dose absorvida) pode-se determinar o parâmetro Δ da expressão $f = X^\Delta$, o que possibilita obter o fator de correção para irradiação de cabo, para qualquer taxa de exposição.

APÊNDICE

PROTOCOLOS DE DOSIMETRIA

Os propósitos dos Protocolos de Dosimetria e Códigos de Prática são descrever com detalhes os métodos de procedimentos e fornecer os coeficientes de interações (W/e e $S_{\text{água, ar}}$) mais adequados e atualizados e os fatores de correção (p_u , k_m e k_{att}), que permitam a determinação da dose de um feixe de radiação com exatidão, que é necessária para aplicação em radioterapia.

Muita ênfase tem sido dada para tornar os procedimentos de dosimetria os mais simples possíveis; todavia, é necessário incluir uma grande quantidade de informações no sentido de fornecer aos usuários todos os dados que eles possam necessitar para a determinação da dose absorvida.

Nos últimos oito anos foram publicados novos Protocolos (N A C P - 1980⁽⁴⁸⁾, A A P M - 1983⁽²⁾, S F F M - 1985⁽¹⁵⁾) e Códigos de Prática (H P A - 1983⁽²⁸⁾, I A E A - 1987⁽⁴⁾) para dosimetria de feixes de fótons de energias altas e de elétrons. Essas recomendações internacionais, nacionais e regionais vêm substituir as publicações prévias, todas geralmente seguindo os conceitos e valores numéricos para as grandezas físicas previamente apresentadas no I C R U Report 14 (I C R U - 1969⁽³¹⁾). A revisão e as modificações das recomendações desse I C R U⁽⁵⁴⁾ são decorrentes dos desenvolvimentos que têm ocorrido nessa área e têm sido publicados nos novos Protocolos e Códigos de Prática.

Todas as publicações baseiam a determinação da dose absorvida no uso de câmaras de ionização padrões secundários calibradas no ar, contra câmaras padrões primários em um feixe de radiação gama do ^{60}Co ou radiação-X de 2 MV. Tanto o padrão secundário, bem como os valores dos fatores de conversão e de correção para obtenção da dose absorvida na água a partir das leituras da câmara de ionização, são diferentes em cada publicação.

Uma comparação dos métodos de determinação da dose absorvida na água utilizando phantoms irradiados com feixes de fótons de energia alta^(45,46) é feita a seguir, no caso dos Protocolos mais utilizados no Brasil.

As equações relacionando a leitura da câmara de ionização (M ou R) com a dose absorvida na água ($D_{\text{água}}$) para uma radiação de qualidade λ ou u de um feixe de fótons são dadas por:

$$\text{H P A} \quad D_{\text{água}} = R N_x C_\lambda \quad (\text{A} \cdot 1)$$

$$\text{N A C P} \quad D_{\text{água}} = M_u N_D (S_{\text{água, ar}})_u P_u \quad (\text{A} \cdot 2)$$

$$N_D = N_u (\bar{W}/e) k_{att} k_m k_f \quad (\text{A} \cdot 3)$$

$$A A P M \quad D_{\text{água}} = M N_{\text{gas}} (\bar{L} / \rho)_{\text{ar}}^{\text{água}} P_{\text{ion}} P_{\text{repl.}} P_{\text{parede}} \quad (A - 4)$$

$$(A - 5)$$

$$N_{\text{gas}} = \frac{(W/e) A_{\text{parede}} \beta_{\text{parede}} A_{\text{ion}}}{\alpha (\bar{L} / \rho)_{\text{gas}}^{\text{parede}} (\bar{\mu}_{\text{en}} / \rho)_{\text{parede}}^{\text{ar}} + (1 - \alpha) (\bar{L} / \rho)_{\text{gas}}^{\text{capa}} (\bar{\mu}_{\text{en}} / \rho)_{\text{capa}}^{\text{ar}}}$$

$$I A E A \quad D_{\text{água}} (P_{\text{off}}) = M_{\text{u}} N_{\text{D}} (S_{\text{água, ar}})_{\text{u}} p_{\text{u}} \quad (A - 6)$$

Todas as equações acima são válidas para câmaras de ionização que possuem fator de calibração dado em exposição (N_x). A lista de símbolos é dada no fim deste apêndice.

Comparando as equações A - 3 e A - 5 temos que:

$$k_{\text{att}} = A W_{\text{parede}} \beta_{\text{parede}} \quad (A - 7)$$

e

$$k_{\text{m}} = \left\{ \alpha (\bar{L} / \rho)_{\text{gas}}^{\text{parede}} (\bar{\mu}_{\text{en}} / \rho)_{\text{parede}}^{\text{ar}} + (1 - \alpha) (\bar{L} / \rho)_{\text{gas}}^{\text{capa}} (\bar{\mu}_{\text{en}} / \rho)_{\text{capa}}^{\text{ar}} \right\} \quad (A - 8)$$

No protocolo da A A P M considera-se que

$$A_{\text{ion}} = 1,000$$

As equações A - 2 e A - 4 são semelhantes, mas o fator de perturbação total p_{u} do Protocolo da N A C P, o qual tem o mesmo significado em todos os protocolos, é dado por todos os seus fatores constituintes no Protocolo da A A P M.

No protocolo da I A E A a dose absorvida na água é determinada no ponto de interesse, ou seja, no ponto efetivo de medida da câmara, enquanto que nos outros Protocolos a dose absorvida na água é determinada na posição do centro do volume sensível da câmara, quando a câmara é substituída por água durante uma irradiação idêntica.

O fator N_{D} do Protocolo da I A E A é igual ao fator N_{gas} da A A P M.

O Protocolo da N A C P é menos rigoroso do que o Código do H P A e permite o uso de câmaras de ionização de referência com volumes de ar com dimensões específicas. A parede, a capa de equilíbrio eletrônico e o eletrodo central das câmaras devem todos ser feitos do mesmo material, o qual deve ser um material equivalente a grafite, água, ar ou tecido. Os valores de k_{m} e k_{att} são fornecidos no Protocolo da N A C P para câmaras de ionização cilíndricas com dimensões recomendadas para os materiais citados acima e os valores de p_{u} são fornecidos para paredes de materiais equivalentes a grafite e água.

O protocolo da A A P M limita as dimensões superiores da cavidade de ar, mas permite

o uso de um grande número de materiais para a parede. Este Protocolo permite também o uso de materiais diferentes da água para os phantoms.

Uma comparação entre os valores de dose absorvida na água, determinada com diferentes tipos de câmaras de ionização, aplicando os Protocolos da N A C P e A A P M e o Código de Prática da H P A, normalizados para o valor médio de um tipo particular de câmara e uma qualidade de radiação específica é feita na Tabela A - 1.

Expressões análogas são fornecidas pelos Protocolos e Códigos de Prática para a determinação da dose absorvida na água para feixes de raios-X de energias baixas e intermediárias bem como para feixes de elétrons^(3,4,26), sendo definidos em cada caso novos fatores de correção.

Lista de Símbolos

Hospital Physicists Association - H P A

- $D_{\text{água}}$ - Dose absorvida na água na posição do centro do volume sensível da câmara, quando a câmara é substituída por água durante uma irradiação idêntica (G γ).
- R - Leitura no instrumento, corrigida para as condições normais de temperatura e pressão (C ou dígitos).
- N_x - Fator de calibração fornecido pelo Laboratório Secundário para converter a leitura do instrumento em exposição (R . C⁻¹ ou R . dig⁻¹) ou (C . kg⁻¹ . dig⁻¹).
- C_λ - Fator de conversão, que depende da qualidade da radiação. (Tabelas fornecidas pelo Protocolo para radiação gama do ¹³⁷Cs e ⁶⁰Co e radiação-X com qualidade entre 2 MV e 35 MV).

Nordic Association of Clinical Physics - N A C P.

- M_u - Leitura do instrumento na qualidade da radiação do usuário, corrigida para temperatura, pressão, recombinação, unidade, etc. (C ou dígitos).
- N_D - Fator de calibração em dose absorvida no ar da câmara de ionização, relacionando-o com o fator de calibração em exposição N_x (Gy . C⁻¹).
- p_u - Fator de perturbação total. (Tabelas fornecidas pelo Protocolo para radiação gama do ⁶⁰Co e radiação-X com qualidade entre 2 MV e 50 MV, para câmaras com parede de grafite e de água).
- $S_{(\text{água, ar})u}$ - Razão entre os poderes de freamento de massa água/ar, no ponto de referência, na qualidade de radiação do usuário. (Tabelas fornecidas no Pro-

protocolo para radiação gama do ^{60}Co e radiação-X com qualidade entre 2 MV e 50 MV).

- N_x - Fator de calibração fornecido pelo Laboratório Secundário para converter a leitura do instrumento em exposição ($\text{R} \cdot \text{C}^{-1}$ ou $\text{R} \cdot \text{dig}^{-1}$) ou ($\text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{dig}^{-1}$).
- \bar{W}/e - energia média gasta no ar para formação de um par de íons e por carga do elétron ($\bar{W}/e = 33,85 \text{ J} \cdot \text{C}^{-1}(37)$).
- k_{att} - Fator de atenuação e espalhamento, que corrige a atenuação e o espalhamento no material da câmara de ionização durante a calibração no feixe de radiação gama do ^{60}Co . (Tabelas fornecidas no Protocolo).
- k_m - Fator de correção, dependente do material da câmara; corrige a falta de equivalência do material da câmara de ionização com o ar. (Valor fornecido pelo Protocolo).
- $k_1 = 1,00$ para N_x , em $\text{C} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}$.
 $= 2,58 \cdot 10^{-4}$ para N_x , em $\text{R} \cdot \text{C}^{-1}$

American Association of Physicists in Medicine-A A P M

- α - Fração da ionização devida aos elétrons provenientes da parede da câmara (Fornecido pelo Protocolo).
- A_{ion} - Eficiência de coleção de íons da câmara do usuário no tempo de irradiação com ^{60}Co durante a calibração.
- $A_{rep.}$ - Fator de correção para substituição da água pela câmara do usuário durante a calibração em dose absorvida com ^{60}Co . (Fornecido pelo Protocolo).
- A_{parede} - Fator de correção para atenuação e espalhamento na parede e capa de equilíbrio eletrônico da câmara do usuário quando exposta à radiação gama do ^{60}Co no ar. (Fornecido no Protocolo para diferentes câmaras, com diferentes materiais da parede e da capa de equilíbrio eletrônico).
- \bar{L}/ρ - poder de freamento de massa de colisão restrito médio. (Tabelas fornecidas pelo Protocolo).
- M - Leitura do eletrômetro, normalizada para 22°C e $101,3 \text{ kPa}$ (C ou dígitos).
- N_{gas} - Fator de calibração cavidade - gás ($\text{Gy} \cdot \text{C}^{-1}$ ou $\text{Gy} \cdot \text{dig}^{-1}$). (Fornecido pelo Protocolo para diferentes câmaras).
- P_{ion} - Fator de correção de recombinação de íons, aplicável à calibração do feixe do usuário. (Fornecido pelo Protocolo para diferentes câmaras).

P_{repl} - Fator de correção para substituição do material do phantom pela câmara de ionização. (Fornecido pelo Protocolo para diferentes câmaras).

$\bar{\mu}_{\text{en}} / \rho$ - Coeficiente de absorção de energia de massa médio. (Tabelas fornecidas no Protocolo).

β_{parede} - Razão entre a dose absorvida e a fração de kerma de colisão na parede da câmara. ($\beta_{\text{parede}} = 1,005$).

Tabela A - 1

Comparação entre Valores de Dose Absorvida na Água, Determinada Utilizando Diferentes Câmaras de Ionização e Aplicando os Protocolos da N A C P e A A P M e o Código de Prática do H P A , Normalizados para um Valor Médio de um Tipo de Câmara Particular e para uma Radiação Específica.

Radiação gama e X	Tipo de Câmara de Ionização								
	NE 2505/3A		NE 2505/3B		NE 2561			NE 2581	
	N A C P	A A P M	N A C P	A A P M	N A C P	A A P M	H P A	N A C P	A A P M
^{60}Co	1,002	1,002	1,000	1,000	1,005	1,000	1,000	0,998	1,001
4 MV	1,002	1,002	1,002	0,998	1,004	0,999	1,002	1,004	0,997
8 MV	1,004	0,998	1,008	0,995	1,008	0,997	0,999	1,003	0,996
16 MV	1,003	0,998	1,010	0,992	1,006	0,999	0,997	0,999	0,998
25 MV	1,003	0,998	1,010	0,992	1,007	1,000	0,992	—	—

REFERÊNCIAS

- 1 - AGET, H.; VAN DYK, J.; LEUNG, P.M.K. Utilization of a high energy photon beam for whole body irradiation. Radiology, 123 (3): 747-51, 1977.
- 2 - AMERICAN ASSOCIATION OF PHYSICISTS IN MEDICINE. A protocol for the determination of absorbed dose from high-energy photon and electron beams. Med. Phys., 10 (6): 741-71, 1983.
- 3 - AMERICAN ASSOCIATION OF PHYSICISTS IN MEDICINE. Total skin electron therapy: technique and dosimetry. New York, N.Y., 1988. (AAPM report, 23)
- 4 - ANDREO, P.; CUNNINGHAM, J.R.; HOHLFELD, K.; SVENSSON, H. Absorbed dose determination in photon and electron beams: an international code of practice. Vienna, International Atomic Energy Agency, 1987. (Technical report series, 277).
- 5 - ARMISTEAD, F. C.; PENNOCK, J. C.; MEAD, L. W. Conductivity changes in dielectrics during 2,5 MeV x-radiation. Phys. Rev., 76:860, 1949.
- 6 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Controle de qualidade de dosímetros clínicos. São Paulo, jun. 1985. (ABNT 20.02.007-001).
- 7 - BOAG, J. W. Ionization chambers. In: ATTIX, F. H.; ROESCH, W. C. eds. Radiation dosimetry. 2. ed. New York, N.Y., Academic, 1966. v.2, p. 2-72.
- 8 - BURLIN, T. E. Cavity chamber theory. In: ATTIX, F. H.; ROESCH, W. C. eds. Radiation dosimetry. 2. ed. New York, N.Y., Academic, 1968. v.1, p. 332-88.
- 9 - CALDAS, L. V. E.; ALBUQUERQUE, M. P. P.; XAVIER, M. Improvement of the calibration technique of clinical dosimeters by components. In: UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Radiation physics: annals of the 4th international symposium, held in São Paulo, 3-7 October 1988. São Paulo, 1988. p. 11-29.
- 10 - CALDAS, L. V. E.; REGULLA, D. F.; PYCHLAU, P. Ionization chamber extension cables: radiation effects. Appl. Radiat. Isotopes. (Aceito para publicação).
- 11 - CAMPION, P. J. & BURNS, J. E. Guidance on the use of a stability check source. World Health Organization, Geneva, 1974. (SSDL Circ. Letter 11/14).

- 12 - CAMPOS, C. A. A. Construção, calibração e testes de uma câmara de ionização para medidas de exposição de raios-x e gama na região de 40 keV até 1250 keV. Rio de Janeiro, 1982. (Dissertação de mestrado, Univ. Federal do Rio de Janeiro).
- 13 - D'ANGIO, G. J. Total body irradiation. Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys., 6: 744-45, 1980.
- 14 - DAVISSON, C. M.; EVANS, R. D. Gamma - ray absorption coefficients. Rev. Mod. Phys., 24: 79-107, 1952.
- 15 - DUTREIX, A. The French dosimetry protocol. Radiotherapy and Oncol. 4: 301-04, 1985.
- 16 - DUTREIX, A. & BRIDIER, A. Dosimetry for external beams of photon and electron radiation. In: KASE, K.R.; BJÄRNGARD, B. F.; ATTIX, F. H. eds. The dosimetry of ionizing radiation. New York, N.Y., Academic, 1985. v.1, p. 163.
- 17 - EISENLOHR, H. The function and position of the secondary standard dosimetry laboratories within the metrology system. In: IAEA/WHO/GSF. International training course on the measuring devices, held in Munique, Vienna, 1980.
- 18 - EVANS, R. D. X-ray and γ -ray interactions. In: ATTIX, F. H.; ROESCH, W. C. eds. Radiation dosimetry. 2. ed. New York, N.Y., Academic, 1968. v.1, p. 94-155.
- 19 - FOWLER, J. F. & FARMER, F. T. Conductivity induced in polytetrafluoroethylene by x-rays. Nature, 173: 317-18, 1954.
- 20 - FOWLER, J. F. & FARMER, F. T. Conductivity induced in insulating materials by x-rays. Nature, 174: 136-37, 1954.
- 21 - GONÇALVES, J.F.; SOUHAMI, L.; PEREIRA JR., P.; CECATTI, S. G. P.; PEREIRA, E. N.; SILVA, M. P.; RODRIGUES, A. T. Aspectos dosimétricos de irradiação de meio corpo. Radiol. Bras., 18 (1): 96-99, 1985.
- 22 - GREENING, J. R. Fundamentals of radiation dosimetry, Bristol, Adam Hilger, 1981. (Medical physics handbooks, 6).
- 23 - GROSS, B. The compton current. Z. Physik, 155: 479-87, 1959.
- 24 - HOROWITZ, Y. S. Photon general cavity theory. Radiat. Prot. Dosim., 9 (1): 5-18, 1984.

- 25 - HOSPITAL PHYSICISTS' ASSOCIATION. A code of practice for the dosimetry of 2 to 35 MV x-ray and caesium - 137 and cobalt - 60 gamma ray beams. Phys. Med. Biol., 14 (1): 1-8, 1969.
- 26 - HOSPITAL PHYSICISTS' ASSOCIATION. A practical guide to electron dosimetry, London, 1971. (HPA Report series, 4).
- 27 - HOSPITAL PHYSICISTS' ASSOCIATION. Code of practice for electron beam dosimetry in radiotherapy. Phys. Med. Biol., 30 (11): 1169-94, 1985.
- 28 - HOSPITAL PHYSICISTS' ASSOCIATION. Revised code of practice for the dosimetry of 2 to 25 MV x-ray, and caesium - 137 and cobalt - 60 gamma - ray beams. Phys. Med. Biol., 28 (10): 1097-104, 1983.
- 29 - INSTRUCTION manual for 0.6 cc ionization chamber (guarded STEM) type 2571. Berkshire, England, Nuclear Enterprises, 1984.
- 30 - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Calibration of dosimeters used in radiotherapy. Vienna, 1979. (Technical report series, 185).
- 31 - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS . Radiation dosimetry: x-rays and gamma rays with maximum photon energies between 0.6 and 50 MeV. Washington, D. C., 1969. (ICRU - 14).
- 32 - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. Radiation dosimetry: electrons with initial energies between 1 and 50 MeV. Washington, D. C., 1972. (ICRU - 21).
- 33 - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. Radiation quantities and units. Washington, D. C., 1980. (ICRU - 33).
- 34 - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Guide for determining the effects of ionizing radiation on insulating materials. Geneva, 1977. (IEC 544-1-77).
- 35 - INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Medical electrical equipment. Dosimeters with ionization chambers as used in radiotherapy. Geneva, 1982. (IEC - 731-82).
- 36 - JOHNS, H.E. & CUNNINGHAM, J. R. The physics of radiology. 3. ed. Springfield, Ill., Charles C. Thomas, 1978. p. 104.

- 37 - KATHREN, R. External beta-photon dosimetry for radiation protection. In: KASE, K. R.; BJÄRNGARD, B. E.; ATTIX, F. H. eds. The dosimetry of ionizing radiation. New York, N.Y., Academic, 1985. v-2, p. 330.
- 38 - KHAN, F. M.; WILLIANSON, J. F.; SEW CHAND, W.; KIM, T. H. Basic data for dosage calculation and compensation. Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys., 6: 745-51, 1980.
- 39 - KIM, T. H.; KHAN, F. M.; GALVIN, J. M. A report of the work party: comparison of total body irradiation techniques for bone marrow transplantation. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys., 6: 779-84, 1980.
- 40 - LEDERMAN, M. The early history of radiotherapy: 1895 - 1939. Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys., 7: 639-48, 1981
- 41 - MARTINS, H. L. Dosimetria de uma nova técnica de tratamento radioterápico de toda superfície do corpo. São Paulo, 1984. (Dissertação de mestrado, Instituto de Física, Univ. São Paulo.)
- 42 - MASSEY, J. B. Manual of dosimetry in radiotherapy. International Atomic Energy Agency, Vienna, 1970. (Technical report series, 110).
- 43 - MAYBURG, S. & LAWRENCE, W. I. The conductivity change in polyethylene during γ - irradiation. J. Appl. Phys., 23 (9): 1006-11, 1952.
- 44 - MEYER, R. A.; BOUQUET, F. L.; ALGER, R. S. Radiation induced conductivity in polyethylene and teflon. J. Appl. Phys., 7 (9): 1012-18, 1956.
- 45 - MIJNHEER, B. J. A summary of the discussion on the practical use and comparison of new protocols for the dosimetry of high - energy photon and electron beams. Radiotherapy and Oncol., 4: 325-28, 1985.
- 46 - MIJNHEER, B. J. & WITTKÄMPER, F. W. Comparison of recent codes of practice for high-energy photon dosimetry. Phys. Med. Biol., 31 (4): 407-16, 1986.
- 47 - MOTT, N. F. & GURNEY, R. W. Electronic processes in ionic crystals. 2 ed. New York, N.Y., Dover Publ., 1964.
- 48 - NORDIC ASSOCIATION OF CLINICAL PHYSICS. Procedures in external radiation therapy dosimetry with electron and photon beams with maximum energies between 1 and 50 MeV. Acta Radiol. Ther. Phys. Biol., 11: 603-25, 1972.

- 49 - QUAST, U. Dosimetry of total body irradiation: a review. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Dosimetry in radiotherapy: proceedings of a symposium held in Vienna, 31 Aug. - 4 Sept., 1987. Vienna, 1988. v.2, p. 187-210.
- 50 - SCARPA, G.; MILANO, F.; RENZI, R. Italian national program of dosimetry standardization in radiotherapy. Radiotherapy and Oncol., 4: 309-12, 1985.
- 51 - SCHULZ, R. J.; ALMOND, P. R.; KUTCHER, G.; LOEVINGER, R.; NATH, R.; ROGERS, D. W. O.; SUNTHARALINGAM, N.; WRIGHT, K. A. Clarification of the AAPM task group 21 protocol. Med. Phys., 13 (5): 755-59, 1986.
- 52 - SILVA, T. A. Comparação experimental entre fatores de calibração totais e fatores de calibração de componentes de dosímetros de referência usados nos laboratórios de dosimetria de padronização secundária. Rio de Janeiro, 1981. (Dissertação de mestrado, Univ. Federal do Rio de Janeiro).
- 53 - SPOKAS, J. J. & MEEKER, R. D. Investigation of cables for ionization chambers. Med. Phys., 7 (2): 135-40, 1980.
- 54 - SVENSSON, H. & BRAHME, A. Recent advances in electron and photon dosimetry. In: ORTON, C. G. Radiation dosimetry. New York, N.Y., Plenum, 1985. cap. 3, p. 87-170.
- 55 - VAN DYK, J.; LEUNG, P. M. K.; CUNNINGHAM, J. R. Dosimetric considerations of very large Cobalt - 60 fields. Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys., 6: 753-59, 1980.
- 56 - WARNER, A. J.; MULLER, F. A.; NORDLIN, H. G. Electrical conductivity induced by ionizing radiation in some polymeric materials. J. Appl. Phys., 25: 131, 1954.