

ATENÇÃO

O ORIGINAL DESTE ÍTEM NÃO FORNECE CONDIÇÕES
PARA OBTER UMA CÓPIA DIGITALIZADA COM
MELHOR QUALIDADE

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA**

**ALGUNS MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO E
DE DOSIMETRIA DA RADIAÇÃO BETA**

LINDA V. EHLIN CALDAS

**Tese apresentada ao Instituto de Física da
Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Doutor em Ciências.**

**SÃO PAULO
1980**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA

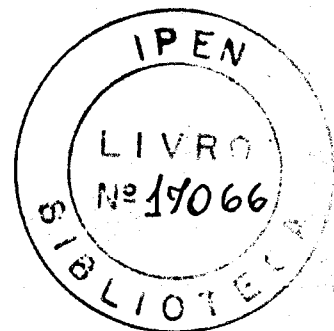
ALGUNS MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO E DE DOSIMETRIA DA RADIAÇÃO BETA

LINDA V. EHLIN CALDAS

Tese apresentada ao Instituto de Física da
Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. SHIGUEO WATANABE

SÃO PAULO
1980



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

A G R A D E C I M E N T O S

Agradecemos de modo especial:

Ao Prof. Dr. Shiguelo Watanabe pela oportunidade de pesquisa, interesse, sugestões e leitura do manuscrito;

Ao Dr. D.F. Regulla (ISS/GSF) pela eficiente e in dispensável orientação nas várias etapas da elaboração des te trabalho;

Ao Dr. G. Drexler (ISS/GSF) pelas valiosas discus sões e o interesse com que acompanhou o estudo realizado;

Ao Dr. J. Böhm (PTB) pela supervisão do trabalho relativo à padronização primária.

Nossos agradecimentos se estendem:

À Superintendência do Instituto de Pesquisas Ener géticas e Nucleares (IPEN), à Gerência do Centro de Proteção Radiológica e Dosimetria do IPEN e à Comissão Nacional de Energia Nuclear, que possibilitaram a realização deste tra- balho, pela permissão do estágio na Alemanha e pelo apoio fi nanceiro;

À Direção do Institut für Strahlenschutz (ISS/GSF), Munique, Alemanha, pela concessão de licença de estágio de 1977 a 1979;

À Direção do Physikalisch - Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, Alemanha, pela autorização de uso dos laboratórios do Departamento de Física Atômica durante o mes de agosto de 1977;

Ao Sr. F. Santner (ISS/GSF) pela assistência téc- nica em algumas etapas do trabalho;

À Dra. Marília T. da Cruz e ao Dr. Satya P. Kathuria pelas discussões no decorrer da redação;

À amiga Letícia L. Campos pela leitura e discus- são de várias partes do manuscrito;

À Nadia A. Vicentini pelo trabalho de datilografia;

À Suzana E. Martins pela confecção das figuras;

À equipe da Academia de Ciências do Estado de São Paulo, pela impressão;

Aos colegas e amigos pelo incentivo e apoio duran- te o desenvolvimento deste trabalho.

R E S U M O

A calibração da radiação beta foi estudada do ponto de vista de padronização tanto primária como secundária, usando-se câmaras de extrapolação e examinando-se diversos efeitos. As propriedades de uma câmara de ionização, comercial, foram investigadas, demonstrando-se a possibilidade do seu uso na calibração e dosimetria da radiação beta de ^{90}Sr - ^{90}Y . Foi desenvolvido um método e montado um sistema de calibração padrão secundária, cujos resultados foram sempre que possível direta ou indiretamente comparados com os obtidos com o sistema primário. A câmara usada neste caso apresentou resposta praticamente independente com a energia média da radiação beta no intervalo de 60 keV a 0,8 MeV.

Duas técnicas de estado sólido, termoluminescência (TL) e emissão exoeletrônica termicamente estimulada (TSEE), foram também usadas para a dosimetria beta. Foram estudadas várias características como reprodutibilidade, resposta com a dose, dependência com a energia, etc., dos materiais: LiF , CaF_2 , CaSO_4 , $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, BeO e Al_2O_3 .

Os detectores TL de espessura 0,9 mm mostraram uma subestimativa na determinação de dose. As amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$, de espessura 60 μm , em suporte fino de alumínio, apresentaram resposta independente com a energia da radiação incidente, atrás de camadas de tecido de densidade superficial de 7 mg/cm^2 . Este dosímetro foi também usado para analisar campos mistos de radiação X, gama e beta. As amostras de BeO em base de quartzo e de $\alpha\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ em base de grafite apresentaram-se como muito bons detectores de radiação beta, usando-se a técnica de TSEE.

Os dosímetros TL de $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$, independentes com a energia, foram utilizados numa comparação internacional de medidas de dose; os resultados obtidos exibiram uma boa concordância com os valores reais das doses (cerca de apenas 10% de diferença). Estes detectores TL foram também usados para medidas de taxas de dose de azulejos esmaltados, coloridos, usados em indústria de construção, e de uma fonte de ^{85}Kr empregada em indústrias têxteis e de metais. Os resultados no último caso foram comparados com os obtidos usando-se o sistema de padronização secundária.

A B S T R A C T

The calibration of beta radiation was studied from the point of view of primary and secondary standardization, using extrapolation chambers and examining several effects. The properties of a commercial ionization chamber were investigated, and the possibility of its use in calibration and dosimetry of ^{90}Sr - ^{90}Y beta radiation was demonstrated. A secondary standard calibration facility was developed and the results obtained with this facility were compared with those obtained from a primary system directly or indirectly. Nearly energy independent response was obtained in the range 60 keV to 0,8 MeV with this secondary standard.

Two solid state techniques namely thermoluminescence (TL) and thermally stimulated exoelectron emission (TSEE) were also used for beta dosimetry. Various characteristics like reproductibility, response with dose, energy dependence, etc. were studied for the materials: LiF , CaF_2 , $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, BeO , CaSO_4 and Al_2O_3 .

TL detectors of thickness 0,9 mm underestimate the dose. 60 μm thick $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ embedded on a thin aluminium plate gave energy independent response behind skin layers of 7 mg/cm^2 . Mixed field of beta, X and gamma radiation was analysed using this detector. Quartz based BeO and graphite based $\alpha\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ were found to be good beta radiation detectors when the TSEE technique is used.

Energy independent $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ TL dosimeters were used in international comparison for dose measurements and the results obtained were in agreement with the actual given doses within 10%. The TL detectors were also used for dose rate measurements from glazed painted tiles used in construction industry and a ^{85}Kr source used in textile and metal industries. Results obtained in the later case were compared with those using the secondary standard facility.

Í N D I C E

	pág.
Capítulo I: Introdução	
I-a. Importância de dosimetria e calibração beta	1
I-a1. Órgão crítico	3
I-a2. Usos da radiação beta na radioterapia	4
I-a3. Cálculo de taxas de dose	5
I-b. Principais métodos existentes de medida	6
I-c. Objetivos do presente trabalho	8
Capítulo II: Calibração beta	
II-a. Introdução	10
II-a1. Câmara de extrapolação	13
II-a2. Saturação da corrente de ionização	14
II-a3. Recombinação inicial e final	15
II-a4. Efeitos de polaridade	17
II-a5. Perda de íons por difusão	18
II-b. Calibração padrão primária	18
II-b1. Parte experimental	
II-b1.1. Fontes	19
II-b1.2. Câmaras	19
II-b1.3. Medida da corrente de ionização	21
II-b2. Resultados	
A. Câmara de extrapolação PTB	24
A.1. Profundidade nula real e área efetiva	26
A.2. Fator de correção K_{Brem}	28
A.3. Curva de extrapolação	29
A.4. Variação com a distância	32
A.5. Fator de transmissão	33
A.6. Experiência comparativa	35
B. Câmara Markus	38
B.1. Estabilidade da câmara	38
B.2. Área efetiva	38
B.3. Curva de saturação	39
B.4. Variação com a distância	41
B.5. Fator de transmissão	42
B.6. Determinação da taxa de dose	44
B.6.1. Método Markus	44
B.6.2. Método Böhm	45
B.6.3. Comparação	46
B.7. Conclusão	47

II-c. Calibração padrão secundária	
II-cl. Parte experimental	48
II-cl.1. Fontes	48
II-cl.2. Câmara de extrapolação Pychlau	53
II-cl.3. Medida da corrente de ionização	54
II-c2. Resultados	
C. Câmara de extrapolação Pychlau	56
C.1. Profundidade nula real	56
C.1.1. Método mecânico	56
C.1.2. Método gráfico	56
C.2. Variação da corrente de ionização	58
C.2.1. Corrente I_{β}	58
C.2.2. Corrente I_o	59
C.2.3. Corrente parasita I_p	60
C.2.4. Corrente de fundo I_f	60
C.3. Curva de extrapolação	61
C.3.1. Fator de calibração	61
C.3.2. Determinação da taxa de dose	63
C.3.3. Influência do valor do campo elétrico	64
C.3.4. Influência do diâmetro do eletrodo coletor	65
C.4. Variação com a distância	66
C.5. Fator de transmissão	67
C.5.1. Fonte de ^{147}Pm	68
C.5.2. Fonte de ^{204}Tl	70
C.5.3. Fontes de ^{90}Sr - ^{90}Y (2 e 50 mCi)	71
C.6. Influência do filtro homogeneizante	
C.6.1. Espectro de radiação	74
C.6.2. Curva de extrapolação	75
C.6.3. Fator de transmissão	76
C.6.4. Campo de radiação	78
C.7. Dependência com a energia	79
Capítulo III: Dosimetria beta	
III-a. Introdução	81
III-a1. Termoluminescência	82
III-a2. Emissão exoeletrônica termicamente estimulada	85

III-b. Parte experimental	
III-b1. Fontes	88
III-b2. Materiais utilizados	89
III-b3. Tratamentos térmicos	91
III-b4. Medida de TL	92
III-b5. Medida de TSEE	94
III-c. Resultados	
III-c1. Características das amostras	95
III-c2. Fator de transmissão	99
III-c3. Dependência angular	103
III-c4. Influência do filtro homogeneizante	105
III-c5. Dependência com a energia	106
III-c6. Irradiação de controle PTB	108
III-c7. Campo misto de radiação	109
Capítulo IV: Aplicações	
IV-a. Comparação internacional	113
IV-b. Azulejos radioativos	115
IV-c. Instrumento Mahlo	117
IV-c1. Câmara de extrapolação	118
IV-c2. Dosímetros termoluminescentes	120
IV-c3. Detector de cintilação MAB	121
CONCLUSÕES	123
SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	127
REFERÊNCIAS	128

I. INTRODUÇÃO

I-a. Importância de dosimetria e calibração beta

Em vários materiais radioativos, pode-se observar radiação beta e gama simultaneamente. Ambos os tipos de radiação têm sido já examinados há cerca de 80 anos, mas enquanto a dosimetria gama é possível com uma boa precisão, a dosimetria beta é ainda insatisfatória no campo da proteção radiológica. Os problemas e as tendências da dosimetria e calibração beta foram assinaladas, por exemplo, nas referências 1, 2 e 3. A contribuição da radiação beta à taxa total de dose é, na maioria das vezes na prática, até mesmo desprezada, embora justamente nas irradiações parciais do corpo é que a taxa de dose beta pode ter um significado decisivo.

Pode-se entender isto do ponto de vista qualitativo: um quantum de radiação gama atravessa a matéria praticamente sem interagir com a mesma. Somente em poucos pontos da trajetória aparece o efeito de troca (efeito Compton). Nos casos de efeito fotoelétrico e criação de pares, o efeito só surge na parte final do percurso do fóton. Uma partícula beta, por outro lado, provoca ionização ao longo da sua trajetória. Portanto, quando um elemento de volume de matéria é exposto à radiação beta e gama de mesma fluência, a taxa de dose de radiação beta é consideravelmente mais alta que a da radiação gama. Isto ocorre porque enquanto todas as partículas beta fornecem energia ao elemento de volume, os fótons contribuem apenas com uma fração pequena.

Na Tabela I-1 são apresentadas, por exemplo, as taxas de dose na vizinhança de uma fonte aberta, puntiforme de ^{60}Co , de 1 mCi, desprezando-se a auto-absorção na própria fonte.

Tabela¹⁾ I-1: Taxas de dose \dot{D} na vizinhança de uma fonte aberta, puntiforme, de 1 mCi, de ^{60}Co , no ar.

Distância (cm)	\dot{D}_β (mrad/h)	\dot{D}_γ (mrad/h)	$\dot{D}_\beta + \dot{D}_\gamma$ (mrad/h)	$\frac{\dot{D}_\gamma}{\dot{D}_\beta + \dot{D}_\gamma}$ (%)
1	960.000	11.200	971.200	1,15
5	25.000	448	25.448	1,77
10	4.700	112	4.812	2,33
50	4,12	4,48	8,60	52,1
100	0	1,12	1,12	100,0

Este exemplo mostra que mesmo quando a suposição de auto-absorção não for válida, na proximidade da fonte a taxa de dose beta pode exceder de modo considerável a taxa de dose gama. Em atividades perto de fontes radioativas abertas e pequenas, a taxa de dose devida à radiação beta muitas vezes é inesperadamente alta (não apenas por causa da variação com a distância) e as pontas dos dedos podem receber uma dose indesejável.

As experiências que requerem campos homogêneos de radiação precisam ser realizadas a grandes distâncias das fontes. Mas para isso só existem disponíveis, com taxas de dose alta, as radiações beta de alta energia, mensuráveis com os instrumentos comerciais. Os resultados da comparação entre tipos diferentes de dosímetros concordam também melhor entre si quando as irradiações são feitas a distâncias grandes dos emissores radioativos. Medidas como estas são, entretanto, de importância apenas secundária, porque as doses altas devidas à radiação beta, são recebidas como doses parciais do corpo durante as irradiações justamente na proximidade da fonte. Nestes casos pode estar presente uma parte grande de radiação beta de baixa energia, da qual nada se pode concluir, apenas a partir das medidas de comparação já citadas. Por isso é que as medidas da radiação beta de baixa energia perto dos emissores são especialmente importantes.

A dificuldade principal na dosimetria beta é devida à fácil absorção desta radiação na matéria e, em consequência, do seu curto alcance.

Devido à forte dependência da taxa de dose beta com a distância e da fácil absorção de radiação, para se ter medidas precisas, são necessários dosímetros de dimensões muito reduzidas e cobertas por invólucro muito fino. Ambas exigências são difíceis de serem satisfeitas na prática. Um dosímetro extenso somente fornece a dose média no volume sensível, e este valor médio pode às vezes ser muito diferente do valor da dose máxima. Este fato pode ser decisivo num eventual dano por radiação.

As radiações beta de energia muito baixa não apresentam interesse, no caso de fontes externas, porque as partículas beta já são fortemente absorvidas pela própria fonte, invólucro, camadas finas de ar, luvas ou camadas superiores da pele das mãos, que não representam qualquer perigo. Na dosimetria beta só são levadas portanto em consideração as radiações com energias máximas a partir de 150 keV.

I-al. Órgão Crítico

Como a radiação beta é facilmente absorvida, nas irradiações externas a dose mais alta surge na parte superior da pele, ou seja, na epiderme. Mas só a camada basal da epiderme (que está em contato com as papilas, que são as saliências da derme) é sensível à radiação; é, portanto, o órgão crítico, e se encontra a uma profundidade aproximada de 7 mg/cm^2 ⁴⁾. Existem medidas mais recentes mostrando que a epiderme da maioria das partes do corpo apresenta apenas 3 a 5 mg/cm^2 de espessura. Na parte dianteira dos dedos, entretanto, a epiderme tem 30 a 50 mg/cm^2 de espessura e do lado dos dedos, apenas 6 a 10 mg/cm^2 .

As diversas sugestões existentes, mostram que ainda não está bem definida a espessura de tecido para a qual as doses beta devem ser determinadas.

Uma outra questão ainda não bem estabelecida se refere ao conceito a ser usado na calibração dos instrumentos na dosimetria beta: dose absorvida no ar ou no tecido.

I-a2. Usos da radiação beta na radioterapia

Pelo fato desta radiação apresentar uma penetração muito limitada no tecido humano, ela encontra uma aplicação muito grande nos problemas de oftalmologia e dermatologia. Em geral é usada a terapia de contato. (Braquiterapia)

Os nuclídeos mais empregados são os que emitem radiação beta de alta energia. Os principais são ^{32}P e ^{90}Sr - ^{90}Y ; outros são ^{86}Rb , ^{80}Sr , ^{91}Y , etc. Na maioria dos casos são usadas as séries de ^{90}Sr - ^{90}Y . O isótopo de ^{90}Sr decai transformando-se em ^{90}Y , num processo envolvendo emissão beta. A radiação beta de ^{90}Sr é comparativamente mole, com uma energia máxima de 0,65 MeV. O produto do decaimento ^{90}Y apresenta, por outro lado, uma radiação beta dura, com uma energia máxima de 2,23 MeV, que define principalmente a curva de dose-profundidade (depth dose curve). A meia-vida longa de ^{90}Sr (27,7 anos) serve para contrabalançar a meia-vida curta de ^{90}Y (64 horas), que é encontrado em equilíbrio radioativo com ^{90}Sr .

Em contraste com as indicações oftalmológicas das irradiações beta de contato, nos problemas dermatológicos, os tumores a serem irradiados são, em geral, muito maiores e variáveis quanto à forma. O aplicador tem que ser, portanto, preparado individualmente, caso em que o tumor todo é irradiado ao mesmo tempo; outra alternativa é usar um aplicador circular, pequeno, do tipo padrão, irradiando-se sucessivamente pequenos campos do tumor. Como a contaminação radioativa não pode ser completamente evitada neste caso, e os tais aplicadores não podem ser preparados de modo perfeito, somente os irradiadores beta de meia-vida curta, como ^{32}P (14 dias) e ^{90}Y (64 horas) podem ser usadas como fontes radioativas.

I-a3. Cálculo de taxas de dose

Existem métodos de cálculo para taxas de dose¹⁾, mas apenas para os casos de meios homogêneos e ilimitados. Na proximidade de fontes puntiformes, a taxa de dose \dot{D} pode ser calculada pela expressão:

$$\dot{D} = i_{\beta} \frac{A}{r^2}$$

onde i_{β} : funções de dose de fonte puntiforme (encontradas em tabelas para vários emissores beta, tanto em ar como em água).

A : atividade da fonte.

r : distância entre fonte e ponto de interesse.

No caso de fontes extensas, a taxa de dose pode ser determinada através de integração, em meios homogêneos.

Estes métodos são especialmente úteis no cálculo de dose beta num órgão após sua incorporação. Nas irradiações externas, a suposição de meios homogêneos e ilimitados já não é satisfeita. Em geral há uma ou duas interfaces presentes e tanto a absorção como o retroespalhamento têm que ser levados em consideração.

A atenuação da radiação beta na matéria pode ser descrita de um modo razoável por uma função exponencial com um coeficiente de atenuação de massa, que é dependente da energia máxima do espectro beta. Isto é, entretanto, apenas uma aproximação. Atrás de absorvedores muito finos, a taxa de dose beta pode até aumentar de valor; isto não ocorre apenas com feixes intensos de radiação e elétrons monoenergéticos, mas também com feixes de emissores beta divergentes⁵⁾.

As partículas beta são espalhadas facilmente pela matéria. Em consequência deste espalhamento, a fluência do feixe radioativo através de absorvedores pode ser fortemente alterada.

Para a proteção radiológica, tanto um aumento na taxa de dose, devido ao retroespalhamento, por exemplo, pelo suporte da fonte, como uma variação na medida do dosímetro, devido à presença de um retroespalhador, situado atrás do dosímetro, são de grande importância.

Os detectores são influenciados de modo diferente pelo retroespalhamento. A medida de uma câmara de extrapolação pode ser aumentada, dependendo da energia dos elétrons incidentes, até cerca de 10%, por causa de um retroespalhador⁵⁾.

Existem, em resumo, vários trabalhos sobre a determinação numérica de taxas de dose na proximidade de emissores beta. Mas o problema do cálculo está, entretanto, longe de estar resolvido.

Em consequência, como não há métodos gerais de cálculo, é necessário medir-se as próprias taxas de dose. Na prática, os campos de radiação são inhomogêneos e por isso até mesmo as medidas apresentam, na maior parte dos casos, grandes dificuldades.

A seguir serão apresentados os métodos mais usados na prática, para a determinação de doses e taxas de dose beta.

I-b. Principais métodos existentes de medida

Uma determinação exata da taxa de dose beta no ar é possível com câmaras de ionização de paredes extremamente finas⁶⁾. Elas são, entretanto, mecanicamente muito sensíveis e portanto impróprias para a monitoração na proteção radiológica.

As câmaras de extrapolação de volume, ou apenas câmaras de extrapolação, servem, em particular para as determinações exatas de dose na matéria^{7,8,9)}. Como no caso das câmaras de ionização de paredes finas, estas são também inconvenientes para a monitoração da radiação beta. A câmara

de extrapolação é o dosímetro padrão para a calibração. Os fenômenos físicos envolvidos e os detalhes serão apresentados no próximo capítulo.

As câmaras planas ("soft X-ray chamber" é um exemplo) são construídas para a determinação de taxas de dose ; são usadas como padrões secundários e para a monitoração de rotina. Devido à pequena profundidade da câmara, a taxa de dose varia pouco com o volume de medida, e a dependência com a energia é fraca. A parede dianteira desta câmara pode ser feita tão fina quanto a camada de matéria atrás da qual se deseja determinar a taxa de dose. Quando a distância entre a câmara e a fonte não for pequena, as medidas destas câmaras planas se aproximam bem das de uma de extrapolação. A desvantagem fundamental das câmaras planas é a sua grande dimensão lateral. Apesar de sua baixa sensibilidade nas medidas na proximidade das fontes, estas câmaras são consideradas ainda como os melhores dosímetros beta para a monitoração na proteção radiológica.

Devido ao seu invólucro, a sensibilidade dos dosímetros de filme para a radiação beta depende fortemente da energia¹⁰⁾. Como os porta-dosímetros ("badges") de filme em geral ficam distantes da fonte emissora, as radiações beta de baixa energia não são de muita importância.

Os dosímetros de vidros de fosfato ativados com prata são impróprios para a dosimetria beta devido à sua espessura e invólucro. Apenas em casos muito especiais, onde os vidros têm uma forma trapezoidal bem definida¹¹⁾, existe a possibilidade de seu uso para a determinação de dose de radiação beta, com energia média entre 40 keV e 1 MeV.

A sensibilidade dos dosímetros termoluminescentes à radiação beta depende fortemente da espessura do detector. Os resultados de diversos autores¹²⁻¹⁷⁾ diferem por isso entre si.

Existem ainda algumas tentativas de uso de detectores de cintilação, semi-condutores e contadores Geiger-Müller neste tipo de dosimetria. Todos os três tipos de instrumentos apresentam, entretanto, uma dependência de sua sensibi-

lidade com a energia da radiação muito forte, não oferecendo utilidade na rotina. Os contadores Geiger-Müller, além disso, são apropriados para as determinações de fluência e atividade de uma fonte, e não para medidas de taxas de dose.

Muitas vezes a dependência das respostas dos detectores com a energia é baseada apenas nas informações dos autores, sendo elas frequentemente insuficientes para se concluir se os instrumentos foram calibrados de modo correto. Na referência 1, Heinzelmann mostrou que na maior parte dos casos os resultados não foram comparados com os de uma câmara de extrapolação. Em outros exemplos, ele demonstrou como as informações sobre a dependência de energia dos detectores podem ser facilmente interpretados de forma errada.

Conseqüentemente, a necessidade de calibração é fundamental no problema da dosimetria beta.

I-c. Objetivos do presente trabalho

A dosimetria beta apresenta dificuldades devido à fácil absorção dessa radiação na matéria e ao intenso espalhamento dos elétrons. Os métodos de cálculo disponíveis para a determinação de dose são insuficientes para a prática e, devido à complexidade dos problemas, não é de se esperar que surja logo um método simples de cálculo, que também possa ser aplicado aos casos especiais.

A medida exata da taxa de dose beta é possível, embora na proteção radiológica ainda esteja faltando um dosímetro adequado, pequeno e independente com a energia da radiação.

O objetivo principal deste trabalho foi, então, o de tentar encontrar um dosímetro deste tipo para a radiação beta. Como na dosimetria o problema da calibração é essencial, o trabalho foi dividido em três partes principais: calibração, dosimetria e aplicações.

No capítulo II, a calibração foi focalizada do ponto de vista de padronização tanto primária como secundária.

ria, usando-se câmaras de extrapolação. Foram estudados vários fenômenos envolvidos com este tipo de detectores. Uma câmara de ionização comercial foi testada quanto à sua utilidade num sistema padrão secundário. Na parte da calibração secundária, o objetivo foi o da montagem de um sistema e o desenvolvimento de um método para calibração, principalmente de instrumentos de campo.

A dosimetria beta foi tratada no capítulo III. Foram utilizadas diversas amostras e duas técnicas experimentais diferentes. Foi também analisado o caso de campos mistos de radiação .

As aplicações de dosimetria beta apresentadas no capítulo IV demonstram a utilidade dos detectores propostos neste trabalho. O resultado de uma comparação internacional foi especialmente importante.

II. Calibração beta

Neste capítulo serão discutidos os fenômenos relacionados com a calibração beta usando-se câmaras de ionização e extrapolação, o arranjo experimental utilizado e os resultados. Logo após a parte introdutória, o capítulo será dividido em duas seções: calibração padrão primária e calibração padrão secundária. Nos dois casos foram usados fontes de radiação e sistemas de detecção diferentes.

II-a. Introdução

Em radiação ionizante*, a reprodutibilidade, para fins de calibração, do valor da quantidade sob medida é obtida em geral usando-se fontes de radiação padrão. Na maior parte dos casos, as fontes beta padrão são em forma de placas, recobertas por uma camada de material radioativo .

Uma fonte padrão primária é uma fonte calibrada por método de medidas absolutas e com certificado de um laboratório de padronização primária, quanto às unidades fundamentais. Este tipo de fonte padrão está sujeito a comparações internacionais. Quando uma fonte é calibrada com referência a uma fonte padrão primária, é chamada fonte padrão secundária.

As fontes calibradas devem satisfazer algumas exigências. No caso dos emissores beta, a característica principal é a uniformidade superficial da emissão. Alguns países mantêm normas específicas que os fabricantes são obrigados

* *Radiação ionizante é, em geral, definida como aquela que pode ionizar a matéria diretamente ou através de uma radiação secundária.*

a seguir. Estas regras prescrevem todas as características das fontes e métodos de sua calibração; unificam, portanto, os procedimentos de calibração de laboratórios diferentes, e proporcionam uma alta precisão e uma reprodutibilidade muito boa de calibração.

Para fins dosimétricos, as fontes beta são calibradas em termos de taxa de dose a distâncias definidas da superfície da fonte.

A calibração de fontes num laboratório de padronização secundária é realizada usando-se o método de medidas relativas da quantidade em questão. Este método só é aplicado aos casos em que as fontes em comparação são do mesmo nuclídeo, assim como do mesmo tamanho, forma, material e suportes. O sistema de calibração deve proporcionar condições de geometria similares tanto durante a medida da fonte padrão, quanto da fonte em questão.

Quanto a instrumentos, a calibração com radiação beta é difícil porque, ao contrário do que ocorre com radiação X e gama, não é muito fácil obter campos de radiação uniformes.

O conceito mais comumente usado em calibração e dosimetria beta é o de dose absorvida (ou simplesmente dose). É uma medida da energia absorvida pela radiação ionizante por um elemento do meio. A unidade especial de dose absorvida é o Gray ($1\text{Gy} = 100\text{rad} = 1\text{J/kg}$). Como já foi visto no capítulo I, é preciso especificar a matéria em que a dose é medida. Dose em ar e dose em tecido são os dois conceitos mais freqüentemente usados e são em geral medidos em termos da unidade especial de dose. A dose em ar é a mais simples de ser medida, em particular no caso de baixas taxas de dose, mas a dose em tecido é de significado mais prático, na determinação do risco da radiação a um indivíduo.

A dose num meio pode ser deduzida a partir de uma medida da ionização produzida numa cavidade de ar situada dentro do meio. Esta medida é, entretanto, difícil porque, quando um feixe de partículas beta atravessa uma cavidade

deste tipo, localizada num meio cujo poder de freamento de massa* dos elétrons é diferente do do ar, a trajetória destas partículas sofre uma distorção, exceto no caso em que a cavidade tenha dimensões muito pequenas.

A primeira formulação matemática da teoria de ionização da cavidade é devida a Bragg (1912) e Gray (1929). Posteriormente, esta teoria foi submetida a um exame crítico e revisada por Wang¹⁸⁾, em 1950.

A dose absorvida pelo meio pode, então, ser determinada a partir da ionização produzida numa cavidade pequena, pela relação de Bragg-Gray:

$$E = s \bar{W} J_g$$

onde: E : energia absorvida pelo meio, por unidade de massa

s : razão entre os poderes de freamento de massa do meio e da cavidade do gás

\bar{W} : energia média dispendida pelas partículas ionizantes na formação de um par de íons na cavidade

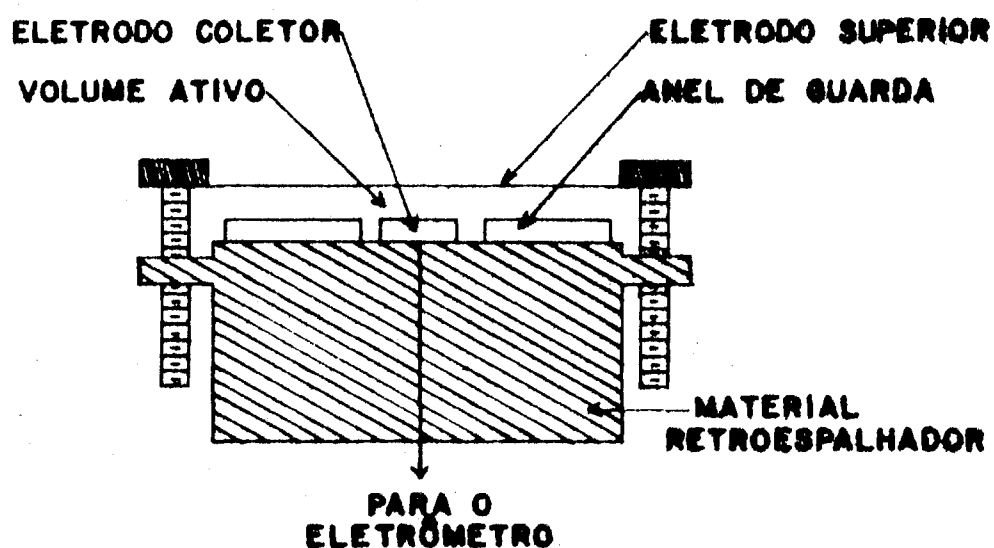
J_g : número de pares de íons produzidos, por unidade de massa do gás.

O método mais conhecido para se ter uma câmara de cavidade cujas dimensões correspondam às condições de Bragg-Gray, consiste em se construir uma câmara de ionização de volume variável, ou seja, uma câmara de extrapolação.

* Poder de freamento de massa ("mass stopping power") pode ser definido como a energia específica perdida pela partícula ao atravessar um certo material, por unidade de massa.

II-al. Câmara de extrapolação

Foi em 1937 que Failla⁷⁾ desenvolveu a primeira câmara de extrapolação, com o propósito de medir a dose superficial de um material sob irradiação. Oferece, no caso da dosimetria beta, a vantagem de satisfazer às condições essenciais impostas à cavidade (pequena superfície coletora e diminuto volume de ar).



CÂMARA DE EXTRAPOLAÇÃO

A figura acima apresenta um esquema de uma câmara de extrapolação.

É uma câmara de ionização de placas paralelas; seu volume ativo (ou sensível) é uma região pequena em forma de disco, entre a folha de entrada e o eletrodo coletor, que é circundado por um anel largo de guarda. Este anel de guarda tem dois objetivos: impedir a fuga de corrente e definir o volume dentro da câmara de ionização no qual os íons podem alcançar o eletrodo coletor. O eletrodo superior é uma folha muito fina segura por um anel rijo, e o espaçamento do eletrodo pode ser variado com precisão por meio de parafusos micrométricos.

Medindo-se a corrente de ionização, por unidade de volume, em função do espaçamento do eletrodo e extrapolando-se a curva resultante para o espaçamento nulo, pode-se obter uma estimativa boa de dose superficial no centro da folha de entrada da câmara.

Com algumas modificações apropriadas, este tipo de câmara tem sido usada na calibração e dosimetria da radiação beta. Neste caso, as partículas ionizantes constituem elas próprias a radiação primária e são anisotrópicas. A introdução de qualquer cavidade finita num meio irradiado por um feixe direto de partículas ionizantes vai sempre perturbar localmente o fluxo das partículas. Por isso, somente algum método de extrapolação pode fornecer informação confiável acerca da distribuição de dose no meio.

A fim de se determinar com precisão os espaçamentos muito pequenos entre os eletrodos, espaçamentos esses que podem ser necessários numa câmara de extrapolação, é aconselhável, em geral, medir-se a capacitância elétrica do eletrodo coletor em relação à placa oposta. Pode-se deduzir destas medidas tanto o valor do espaçamento nulo real, como a área do eletrodo coletor, quantidades muito importantes, como será visto na seção de resultados do presente trabalho. Normalmente o eletrodo coletor e o anel de guarda são separados por uma ranhura de isolamento muito estreita, e a área efetiva do coletor pode ser determinada com precisão.

Alguns fenômenos importantes envolvidos com este tipo de detector serão a seguir sucintamente apresentados¹⁹⁾: saturação da corrente de ionização, recombinação inicial e geral, efeitos de polaridade e perda de íons por difusão. A ocorrência destes efeitos requer a introdução de fatores de correção na determinação de taxas de dose, como será visto na seção II-b1.3 deste capítulo.

II-a2. Saturação da corrente de ionização

À medida que se aumenta a diferença de potencial

(entre zero e um valor alto) aplicada entre os eletrodos de uma câmara de ionização exposta à radiação, a corrente coletada aumenta, no início quase linearmente com a tensão, e depois mais lentamente, até que ela se aproxima assintoticamente da corrente de saturação. É a corrente que seria medida se todos os íons formados na câmara, pela radiação, fossem capazes de alcançar os eletrodos. A curva da corrente de ionização em função da tensão aplicada é chamada curva de saturação.

A tensões coletoras baixas, alguns dos íons produzidos no gás encontram e neutralizam outros de sinal oposto, antes que possam atingir o coletor. Esta recombinação pode ser reduzida removendo-se os íons para fora da câmara mais rapidamente, pelo método de se aumentar a intensidade do campo elétrico ou de se reduzir a distância entre os eletrodos, ou ainda, pelos dois modos.

O campo elétrico máximo que pode ser aplicado é, entretanto, limitado pelo princípio da "ionização por colisão". É o processo no qual um elétron livre pode receber energia adicional, pelo campo elétrico (num caminho livre médio simples), suficiente para ionizar a molécula seguinte com a qual ele colide. Assim que isso acontece, ocorre uma multiplicação rápida de íons na câmara; a corrente coletada total se torna muito dependente da tensão aplicada e mascara a corrente de ionização medida.

II-a3. Recombinação inicial e geral

A recombinação inicial ocorre quando os íons positivos e negativos, formados no rastro de uma partícula ionizante simples, se encontram e recombina. Este processo é independente da taxa de dose e é determinado somente pela densidade de íons ao longo de cada rastro separado. A recombinação inicial é desprezível no caso de elétrons (quando a ionização é produzida por elétrons, raios-X e gama) à pressão atmosférica.

Só adquire importância quando a densidade de íons nos rastros for alta, como por exemplo nos rastros de partículas alfa à pressão atmosférica ou em rastros de elétrons em gás sob alta pressão.

Recombinação geral é a recombinação de íons positivos e negativos, que se originam de rastros diferentes e que ocorre após a estrutura de rastro ter-se desfeito sob a influência do campo aplicado e da difusão. A recombinação geral (ou volumétrica) aumenta com a taxa de dose e impõe um limite superior a esta taxa, que pode ser medida com precisão pelas câmaras de ionização usadas à pressão atmosférica.

É possível distinguir-se experimentalmente entre estes dois processos, tomando-se o recíproco da corrente de ionização observada I e representando-o num gráfico versus uma função apropriada da intensidade do campo elétrico coletor X .

Para a recombinação inicial¹⁹⁾ tem-se:

$$\frac{1}{I} = \frac{1}{I_{\text{sat}}} + \frac{\text{cte}}{X}$$

e para a recombinação geral¹⁹⁾:

$$\frac{1}{I} = \frac{1}{I_{\text{sat}}} + \frac{\text{cte}}{X^2}$$

onde I_{sat} é a corrente de saturação.

O valor das correntes têm que ser, entretanto, medidas com muita precisão para se conseguir uma diferenciação nítida entre os dois efeitos.

Define-se eficiência de coleção de uma câmara de ionização, operando sob condições específicas, como sendo a razão entre a corrente medida I e a corrente de saturação ideal I_{sat} ¹⁹⁾:

$$f = \frac{I}{I_{\text{sat}}}$$

Supõe-se que a corrente é transportada inteiramente por íons positivos e negativos, com mobilidades k_1 e k_2 ($\text{cm}^2/\text{s.V}$) respectivamente e coeficiente de recombinação α (cm^2/s). Isto significa que os elétrons se ligam imediatamente às moléculas do gás e que nenhuma parte apreciável da corrente é transportada por elétrons livres.

Quando a câmara está operando muito perto da saturação, o campo de carga espacial ("space-charge field") devido aos íons pode ser desprezado, em comparação com o campo coletor V/d , onde V representa a tensão aplicada e d , o espaçamento entre os eletrodos (também chamado profundidade da câmara). Os íons vão se mover, então, com velocidades constantes $\frac{k_1 V}{d}$ e $\frac{k_2 V}{d}$ respectivamente, a partir do seu ponto de origem, em direção às placas opostas.

II-a4. Efeitos de polaridade

Observa-se muitas vezes que a corrente coletada de uma câmara de ionização, exposta à radiação de intensidade constante, varia, quando a polaridade do potencial coletor for invertida. Uma das causas mais prováveis deste efeito é a presença de forças eletromotrizes de contato, térmicas ou eletrolíticas no circuito de medida. Podem afetar a ocorrência de saturação da corrente de ionização somente no caso pouco provável de que a tensão aplicada é da mesma ordem de grandeza que as forças eletromotrizes espúrias. Se um eletrodo de guarda aterrado estiver, entretanto, presente na câmara (como é o caso do presente trabalho), mesmo uma diferença de potencial pequena, entre o eletrodo de guarda e o coletor, pode distorcer apreciavelmente o campo elétrico. Uma distorção de campo deste tipo pode causar assimetria da polaridade, que decresce com o aumento do valor da tensão coletora.

Uma forma de contornar este problema é a de se tomar o valor médio entre as duas correntes correspondentes respectivamente à polaridade positiva e negativa, o que fornece a corrente de ionização real no gás da câmara.

II-a5. Perda de íons por difusão

As perdas de íons por difusão são devidas à agitação térmica dos componentes do gás da câmara de ionização.

Quando a tensão coletora é baixa, alguns dos íons positivos produzidos perto da placa positiva podem se dirigir para trás e alcançá-la; analogamente para os íons negativos perto da placa negativa. Esta perda de íons por difusão, entretanto, raramente precisa ser tomada em consideração nas câmaras comuns de ionização.

Um estudo de Böhm²⁰⁾ sobre estes processos indicou a importância do fenômeno da difusão em alguns casos.

No presente trabalho, ela só foi considerada no caso de calibração beta em termos de padronização primária.

II-b. Calibração padrão primária

Uma calibração padrão primária de fontes de radiação beta consiste essencialmente de três partes, ou seja, determinação de: taxa de dose no ar livre \dot{D}_c e no tecido \dot{D}_t , variação com a distância entre fonte e detector, e fatores de transmissão.

Nesta seção são apresentadas as calibrações de duas fontes de ^{90}Sr - ^{90}Y usando o princípio da câmara de extrapolação. Uma outra fonte, já calibrada, foi usada numa experiência comparativa, de determinação de taxa de dose.

Uma câmara de ionização comercial, chamada câmara Markus, foi examinada quanto à possibilidade de sua utilização num sistema de padronização secundária na dosimetria beta, estudando-se suas propriedades e os fenômenos envolvidos.

II-b1. Parte experimental

II-b1.1 Fontes

As duas fontes de ^{90}Sr - ^{90}Y , de atividades aproximadas de 50 e 2 mCi, calibradas neste trabalho foram denominadas de D_1 e D_2 . Elas foram usadas também como fontes padrão na segunda parte deste capítulo (II-c Calibração padrão secundária) e nas irradiações dos dosímetros de estado sólido, do capítulo III. São fontes do tipo "dermaplate" usadas em radioterapia de câncer da pele. As superfícies emisoras das fontes apresentaram raios de 5,0 e 7,5 mm respectivamente.

Em ambos os casos, a exposição da câmara à radiação beta foi realizada sem a utilização de quaisquer filtros intermediários.

Para cada uma das fontes D_1 e D_2 foi necessário fazer um porta-fonte especial de alumínio, com tampa dobradiça, pois as fontes eram de dimensões diferentes.

A fonte de ^{90}Sr - ^{90}Y usada na experiência comparativa foi uma de atividade aproximada de 100 mCi e raio da superfície emissora de 4,7 mm, denominada D_3 , calibrada e pertencente ao sistema padrão do laboratório.

No caso da câmara Markus foi utilizada uma fonte padrão, dita de controle, de ^{90}Sr - ^{90}Y , calibrada, de atividade muito baixa, chamada D_4 , de formato especial, encaixável na própria câmara.

II-b1.2 Câmaras

Câmara de extrapolação PTB

O arranjo experimental está esquematizado na

Fig.II-1. É o do laboratório nacional de padronização primária, de dosimetria beta, de Physikalisch - Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, Alemanha.

A câmara de extrapolação é composta por dois eletrodos principais, planos e paralelos, dos quais um é móvel e cuja posição pode ser ajustada por um parafuso micrométrico externo. A profundidade da câmara pode ser variada entre 0,5 e 11 mm. A parte móvel é, por sua vez, constituída por dois eletrodos, sendo um o eletrodo de medida (ou coletor) e o outro, o de guarda (ou anel de guarda).

O eletrodo móvel consiste essencialmente de um cilindro de carbono, de 6 cm de diâmetro e 2 cm de altura, coberto por uma camada superficial de Plexiglas ($C_5H_8O_2$) de 0,5 mm de espessura. Esta camada foi coberta por uma película de carbono de 1 μ m de espessura. Uma ranhura de 0,2 mm de largura e 0,2 mm de profundidade, no Plexiglas, define a área coletora. A largura do anel de guarda é de cerca de 1,5 cm.

O eletrodo fixo é a janela de entrada da radiação. Consiste de uma folha muito fina (3,5 μ m de espessura) de material polietileno Hostaphan, Melinex, coberta por uma película de grafite de espessura 1 μ m. A folha tem densidade superficial de 0,56 mg/cm². As extremidades da folha de entrada são coladas a um anel de Plexiglas (que é aparafusado à câmara), para mantê-la esticada e paralela ao eletrodo coletor.

O potencial é aplicado ao eletrodo fixo, enquanto que o eletrodo coletor é ligado a um sistema de medida de corrente de ionização, composto essencialmente por um amplificador e um eletrômetro. O conjunto todo de medida é parcialmente automatizado, ligado a uma máquina de cálculo HP, modelo 10, com impressora Facit modelo 3841. Uma sonda de temperatura e um barômetro são ligados ao conjunto para monitoração das respectivas condições em cada medida da corrente de ionização.

A fim de se ter um campo elétrico sempre constante entre os eletrodos no decorrer de cada experiência, toda vez que a profundidade da câmara é variada, também é preciso alterar o valor da alta tensão. A menos que se especifi-

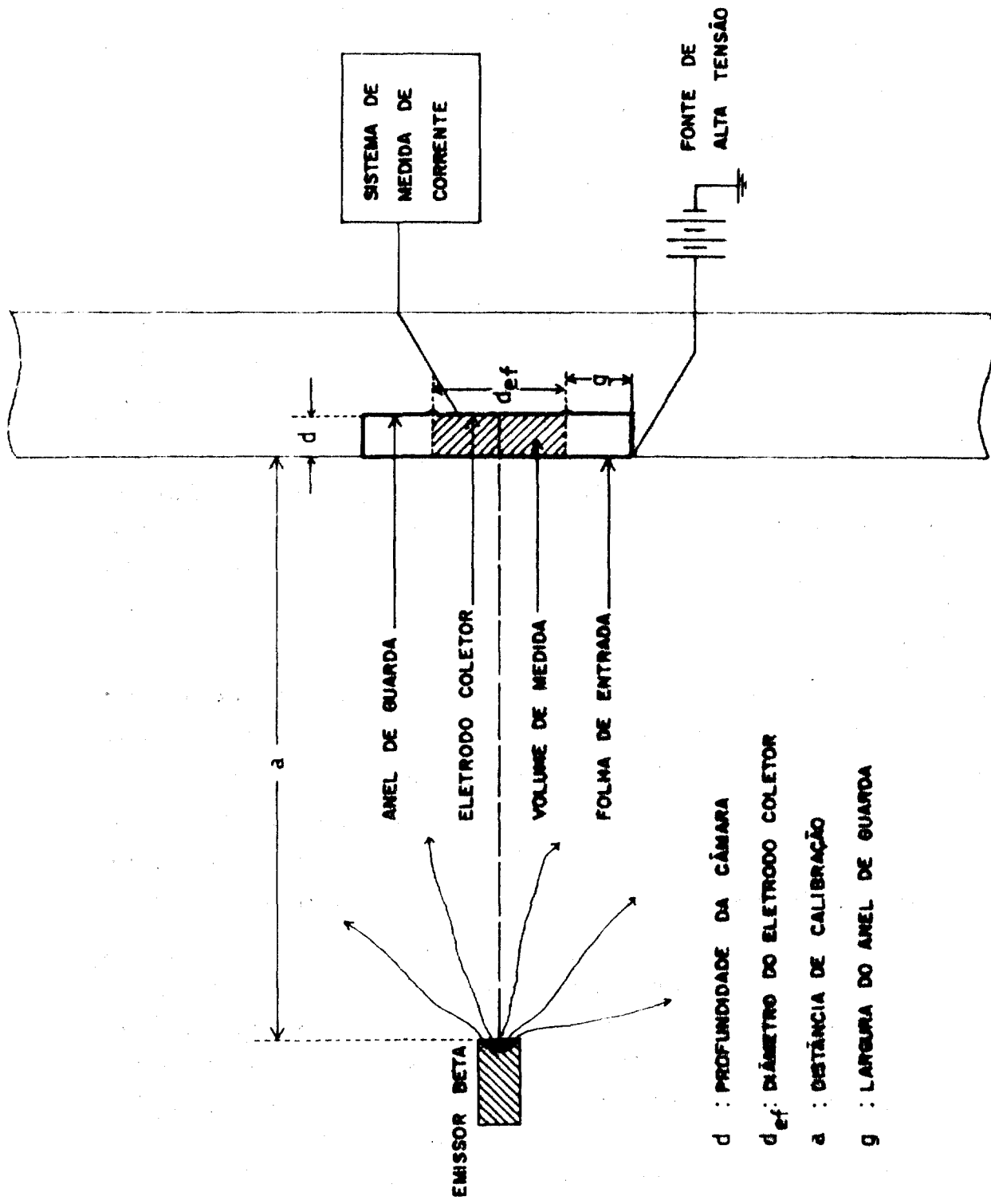


Fig. II-1: Arranjo experimental do sistema de calibração

que o contrário, no decorrer deste trabalho foi usado um campo elétrico de 10 V/mm entre os eletrodos da câmara.

As fontes radioativas foram montadas em frente à câmara num banco ótico de precisão, possibilitando a variação da distância entre a fonte e a câmara.

Câmara Markus

A câmara foi idealizada por Markus²¹⁾ e construída por Pychlau (PTW - Physikalisch - Technische Werkstätten Dr. Pychlau KG., Freiburg/B., Alemanha). É uma câmara de ionização comercial, do tipo "câmara plana".

A parte cilíndrica principal é feita de Plexiglas, de diâmetro 30 mm e altura 14 mm. O volume sensível tem 5 mm de diâmetro e 2 mm de altura. A janela de entrada é de polietileno, coberto por camada de grafite; apresenta uma densidade superficial de 2,3 mg/cm².

O eletrodo coletor é de Polystyrol grafitado, de diâmetro 4,6 mm, e é circundado por um anel de guarda que se estende até as paredes laterais.

O potencial, como no caso da câmara de extrapolação, é aplicado ao eletrodo da janela de entrada. O valor recomendado pelo fabricante foi 300 V para a alta tensão.

No caso desta câmara Markus, os dois eletrodos são fixos, isto é, a profundidade da câmara não pode ser variada e tem o valor de 2,00 mm. Este detector foi acoplado ao sistema padrão de medida de corrente de ionização de PTB, normalmente usado em conjunto com a câmara de extrapolação.

II-b1.3 Medida da corrente de ionização

Nas medidas para uma curva de extrapolação, o volume sensível da câmara é variado, movendo-se o eletrodo coletor e o anel de guarda em intervalos de 0,25 mm, desde

0,50 até 2,50 mm. A curva de extrapolação representa, então, o comportamento da corrente de ionização em função da profundidade da câmara.

Uma vez escolhidos a distância de calibração ($a \geq 10$ cm) e o intervalo de tempo (entre 40 e 200 s em geral) entre as medidas de corrente de ionização, elas são repetidas 7 a 10 vezes para cada polaridade da tensão aplicada à câmara. Calcula-se o valor médio da corrente para cada polaridade. A média destes valores médios representa o valor real da corrente de ionização para determinadas condições da câmara.

Todas as medidas foram feitas sob as seguintes condições ambientais:

Temperatura : (293 ± 1) K

Pressão : $(993 \pm 1,5)$ mbar = $(745 \pm 1,1)$ mmHg

Umidade relativa: $(45 \pm 5)\%$

Os valores da corrente foram sempre normalizados para as condições normais de temperatura e pressão (T_0 , p_0) pelo fator de correção K:

$$K = \frac{p_0 \cdot T}{p \cdot T_0}$$

É necessário ainda corrigi-los para efeitos de saturação, decréscimo da intensidade e efeitos de parede no caso de irradiação com ^{90}Sr - ^{90}Y .

Portanto

$$I = I_{\text{exp}} \cdot K_{\text{ad}} \cdot K_{\text{sat}}$$

onde I_{exp} : é o valor da corrente observada;

K_{ad} : representa a correção para efeitos das paredes da câmara e é uma função que depende da distância de calibração a (cm) e da profundidade da câmara

d (cm), dado pela expressão²²⁾:

$$K_{ad} = \frac{a + d}{a} (1 - 3,5 \cdot 10^{-2} d) ; e$$

$K_{sat} = \frac{1}{f}$, f sendo a eficiência de coleção, dado pela expressão²⁰⁾, que engloba os efeitos de recombinação inicial e geral, e perda de íons por difusão;

$$f = \left(1 - \frac{\sigma_o^2 d^4 q_m}{U^2}\right) \left(1 - \frac{E_1 d}{U}\right) \left(1 - \frac{2kT}{eU}\right)$$

onde $\sigma_o^2 = \frac{\alpha}{6ek_1k_2}$

$$q_m = \frac{I}{a_{ef} \cdot d}$$

α : coeficiente de recombinação

e : carga elementar

k_1 : mobilidade dos íons positivos

k_2 : mobilidade dos íons negativos

q_m : razão de ionização medida (carga coletada por volume e tempo)

U : tensão aplicada à câmara

E_1 : constante com a dimensão de um campo elétrico

k : constante de Boltzmann

a_{ef} : área efetiva do eletrodo coletor

No presente trabalho tem-se

$$f = \left(1 - 6,95 \cdot 10^{10} \frac{I[A] \cdot d^3 [cm^3]}{U^2 [V^2]}\right) \left(1 - \frac{0,044d [cm]}{U [V]}\right) \left(1 - 0,0506 \frac{I}{U [V]}\right)$$

Os valores de K_{ad} e K_{sat} são muito próximos da unidade. A aplicação destes fatores de correção só se justi

ca num sistema de padronização primária, devido à precisão.

II-b2. Resultados

A. Câmara de extrapolação PTB

A taxa de dose \dot{D}_t no tecido* é determinada⁹⁾, usando-se uma câmara de extrapolação, a partir da taxa de dose \dot{D}_a no ar, no volume coletor, de acordo com a relação Bragg-Gray, multiplicando-se \dot{D}_a pela relação entre os poderes de freamento de massa para tecido e ar: $s_{t,a}$ e pelos fatores de correção K_r e K_f .

O fator K_r é utilizado para correção devido à diferença no retroespalhamento entre o material do tecido e da câmara, enquanto que o fator K_f é empregado para correção devido à espessura e material da folha de entrada, e para normalização para uma folha de espessura equivalente a 2 mg/cm² de tecido.

Tem-se, portanto,

$$\dot{D}_t = \dot{D}_a \cdot s_{t,a} \cdot K_r \cdot K_f$$

O valor \dot{D}_a é obtido a partir de

$$\dot{D}_a = \frac{\bar{W}}{e} \frac{K'}{a_{ef} \cdot \rho} \frac{d}{dl} (IK(1))$$

* Tecido neste caso significa uma camada de tecido correspondente a 2 mg/cm² de densidade superficial, abaixo da superfície de um meio semi-infinito de tecido mole.

com $K' = K_{\text{Brem}} \cdot K_{\text{dec}} \cdot K_{\text{hum}} \cdot K_{\text{gap}} \cdot K_{\text{esp}} \cdot K_{\text{inh}}$

$$K(1) = K_{\text{sat}} \cdot K_{\text{ad}} \cdot K_{\rho}$$

$$\frac{d}{dl} (IK(1)) = B$$

onde a_{ef} : área efetiva do eletrodo coletor

ρ : densidade do ar

I : corrente de ionização

l : profundidade da câmara

$\frac{d}{dl} (IK(1))$: derivada da função corrente de ionização , corrigida por $K(1)$; representa o coeficiente angular B da curva de extrapolação.

Fatores de correção:

K_{inh} : inhomogeneidade do campo da radiação primária dentro do volume coletor. Este fator depende da distância entre a fonte e a câmara a e dos raios da câmara a_2 e da fonte a_3 , e é dado pela expressão²²⁾:

$$K_{\text{inh}} = \frac{1 - \frac{r_3^2}{2}}{1 - \frac{r_3^2}{2} - \frac{r_2^2}{2}}$$

com $r_2 = \frac{a_2}{a}$ e $r_3 = \frac{a_3}{a}$

K_{Brem} : emissão de radiação Bremsstrahlung da fonte

K_{dec} : decaimento da fonte

K_{hum} : umidade relativa do ar

K_{gap} : ranhura entre o eletrodo coletor e o anel de guarda (falta de retroespalhador, deformação do volume coletor)

- K_{esp} : partículas beta espalhadas pelo material na vizinhança da fonte e câmara
- K_{sat} : falta de saturação devido à recombinação inicial e geral, e à perda de íons por difusão
- K_{ad} : partículas beta espalhadas pelas paredes laterais
- K_{ρ} : densidade do ar

No caso do conjunto experimental usado neste trabalho, K_{gap} e K_{esp} são unitários.

Tanto o valor de área efetiva de eletrodo coletor a_{ef} como o fator de correção K_{Brem} podem ser determinados experimentalmente.

Uma outra quantidade muito importante para a representação exata dos valores envolvidos na curva de extrapolação é a profundidade nula real da câmara, que também é obtida experimentalmente.

Antes da apresentação das experiências envolvendo curvas de extrapolação, os fatores citados serão determinados.

A.1. Profundidade nula real e área efetiva

Antes da calibração propriamente dita, nesta seção foi feito um teste geral do sistema, medindo-se a capacitância da câmara de extrapolação, com o objetivo da determinação dos valores da profundidade nula real da câmara e da área efetiva do eletrodo coletor.

A profundidade nula da câmara é a distância mínima entre os dois eletrodos para que não encostem um no outro, o que poderia danificar a janela fina da entrada. A câmara já é construída, por segurança, de tal modo a deixar uma profundidade em torno de 0,050 mm.

A capacitância da câmara foi medida 5 vezes para cada polaridade da tensão, variando-se a profundidade da câ

mara entre 0,50 e 2,50 mm (em etapas de 0,25 mm) e a tensão aplicada entre 5 e 25 V (em etapas de 2,5 V). O valor médio variou entre 10,934 e 2,4259 pF.

Sabe-se que a capacitância C_K é diretamente proporcional à área efetiva a_{ef} do eletrodo coletor e indiretamente proporcional à distância d entre os eletrodos:

$$C_K [F] = \epsilon_0 \cdot \epsilon \frac{a_{ef} [m^2]}{d [m]}$$

onde ϵ_0 : constante dielétrica do vácuo: $8,85419 \cdot 10^{-12} F/m$

ϵ : constante dielétrica relativa do meio: 1,000594
($t = 20^\circ C$, $p = 760 \text{ mmHg}$)

Representando-se $\frac{1}{C_K [F]}$ em função d , onde b é o

coeficiente angular, pode-se obter o valor da área efetiva:

$$a_{ef} [m^2] = \frac{1}{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot b}$$

Obtém-se a profundidade nula real da câmara d_0 quando $\frac{1}{C_K} = 0$ ou seja, para o ponto onde a reta corta a abscissa d .

Os valores encontrados foram:

$$b = 1,60368 \cdot 10^{14} F^{-1} m^{-1}$$

$$a_{ef} = 7,0384 \text{ cm}^2$$

$$d_{ef} = 2,994 \text{ cm (diâmetro efetivo do eletrodo coletor)}$$

$$d_0 = (-70,4 \pm 2,5) \mu m$$

Tanto o valor da área efetiva do eletrodo coletor como o da profundidade nula real concordaram dentro de uma precisão de 2% com os valores medidos um ano atrás por Böhm²²⁾.

Nas determinações de curvas de extrapolação, o

valor da profundidade nula é especialmente importante, pois é necessário ter-se o valor real de cada profundidade variada durante a experiência.

A.2. Fator de correção K_{Brem}

Entre os fatores de correção da corrente de ionização, que são levados em consideração na determinação da taxa de dose pelo método da curva de extrapolação, o devido à radiação Bremsstrahlung pode ser obtido experimentalmente, como será relatado a seguir.

A câmara foi coberta por uma camada de Plexiglas, de 1 cm de espessura, com a finalidade de absorver toda a radiação beta. Tem-se neste caso apenas radiação Bremsstrahlung.

Como o valor obtido da corrente de ionização apresentou-se muito baixo, foi necessário usar uma profundidade de câmara de 10 mm. Foram repetidas nove vezes a medida da corrente para cada polaridade da tensão. O valor real desta corrente foi comparado com o da obtida nas mesmas condições sem a cobertura de Plexiglas. A razão entre elas leva ao fator de correção K_{Brem} , relacionados a seguir.

Fonte	Atividade (mCi)	Distância de calibração (cm)	Corrente (A)		$K_{Brem} = 1 - \frac{I_{P1}}{I}$
			Câmara com Plexiglas I_{P1}	Câmara sem Plexiglas I	
D_1	50	20	$1,916 \cdot 10^{-14}$	$3,737 \cdot 10^{-11}$	0,9995
D_2	2	30	$1,8815 \cdot 10^{-16}$	$6,7927 \cdot 10^{-13}$	0,9997

A.3. Curva de extrapolação

A distância de calibração foi escolhida 20 cm para a fonte D_1 e 30 cm, para D_2 .

Variando-se a profundidade da câmara entre 0,50 e 2,50 mm e a tensão aplicada entre 5 e 25 V, a corrente de ionização foi medida para ambas as polaridades da tensão. No caso da fonte D_1 , o valor da corrente variou entre $2,1447 \cdot 10^{-12}$ e $9,8122 \cdot 10^{-12}$ A e, da fonte D_2 entre $3,8661 \cdot 10^{-14}$ e $1,7730 \cdot 10^{-13}$ A. O desvio padrão relativo dos valores em ambos os casos apresentou-se menor que 0,16%.

Após a aplicação dos fatores de correção K_{ad} e K_{sat} (definidos na parte experimental), os valores de corrente passaram a $2,1693 \cdot 10^{-12}$ e $9,8735 \cdot 10^{-12}$ A no caso da fonte D_1 , e a $3,9082 \cdot 10^{-14}$ e $1,7765 \cdot 10^{-13}$ A no caso da fonte D_2 . Representam os valores extremos das curvas de extrapolação correspondentes às profundidades da câmara de 0,50 e 2,50 mm.

As Fig.II-2 e II-3 mostram as curvas de extrapolação obtidas, onde foram representados os valores da corrente de ionização em função das respectivas profundidades de câmara para cada fonte. Nestes gráficos, são os coeficientes angulares B que interessam, para a determinação das taxas de dose em tecido; são apresentadas no quadro a seguir.

Fonte	B (A/cm)
D_1	$3,850 \cdot 10^{-11}$
D_2	$6,943 \cdot 10^{-13}$

Sabe-se que

$$\dot{D}_t = \dot{D}_a \cdot s_{t,a} \cdot K_r \cdot K_f$$

$$\dot{D}_a = \frac{\bar{W}}{e} \frac{1}{a_{ef} \cdot \rho} \cdot K_{Brem} \cdot K_{dec} \cdot K_{hum} \cdot K_{inh} \cdot B$$

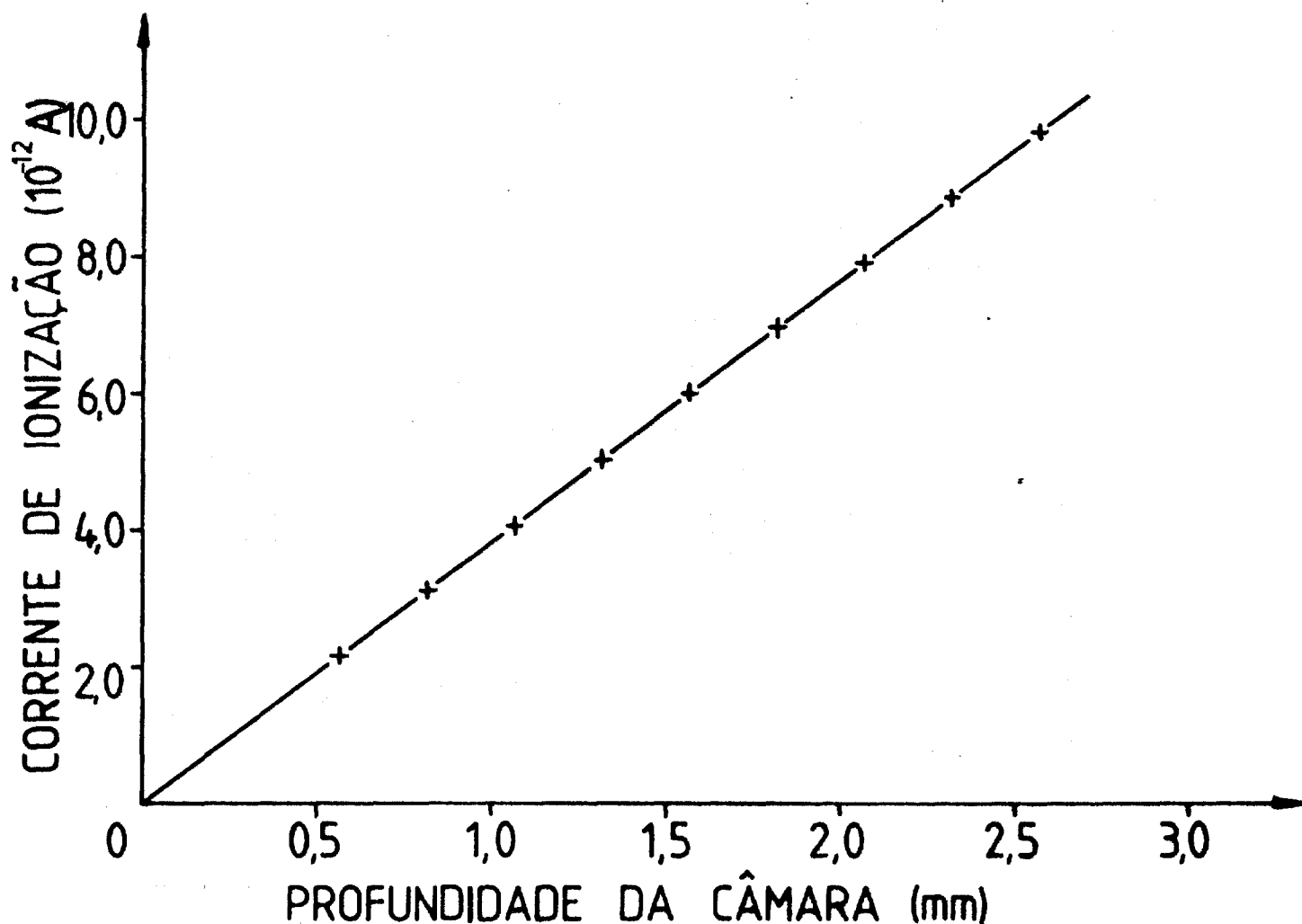


Fig. 11-2: Curva de extrapolação obtida com a fonte D_1 : ^{90}Sr - ^{90}Y (50 mCi) e a câmara de extrapolação PTB (janela de entrada $0,56 \text{ mg/cm}^2$), à distância de 20 cm.

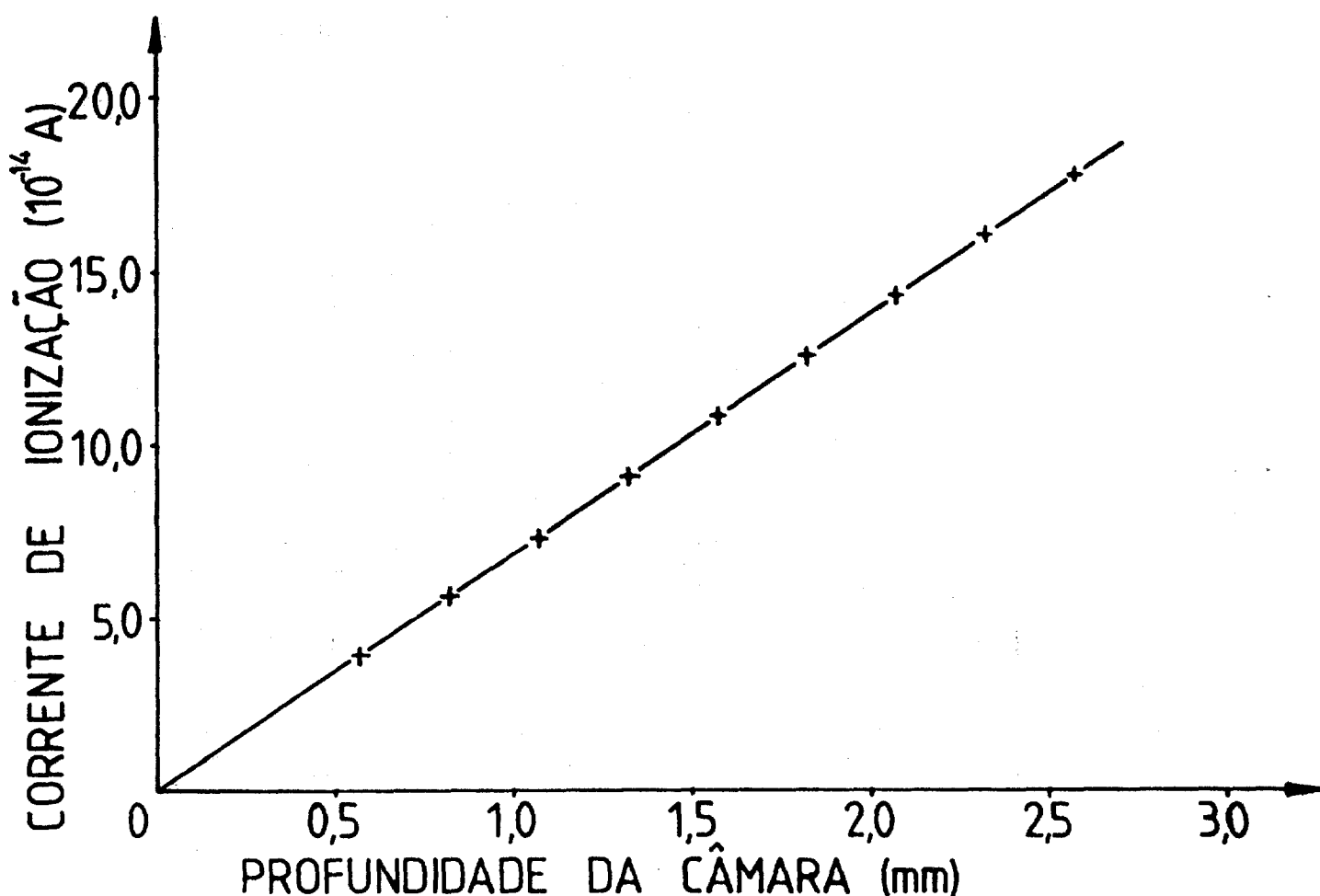


Fig. 11-3: Curva de extrapolação obtida com a fonte D_2 : ^{90}Sr - ^{90}Y (2 mCi) e a câmara de ex

Nos casos das fontes D_1 e D_2 , K_{dec} é unitário, pois as medidas referentes a cada emissor foram feitas no mesmo dia, não necessitando de correção para o decaimento.

As constantes envolvidas no cálculo de \dot{D}_t e \dot{D}_a são:

$$\bar{W} = (33,73 \pm 0,15) \text{ eV}$$

$$e = 1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$\rho = 1,205 \cdot 10^{-3} \text{ g/m}^3$$

$$a_{ef} = 7,038 \text{ cm}^2$$

$$s_{t,a} = 1,111$$

Os fatores de correção encontram-se relacionados a seguir:

Fonte	K_r	K_f	K_{Brem}	K_{hum}	K_{ihn}
D_1	1,010	1	0,9995	0,997	1,0028
D_2	1,010	1	0,9997	0,997	1,0012

Foram obtidos os resultados:

Fonte	\dot{D}_a (Gy/h)	\dot{D}_t (Gy/h)
D_1	0,551	0,618
D_2	$0,992 \cdot 10^{-2}$	$1,113 \cdot 10^{-2}$

Estes valores \dot{D}_t representam, no entanto, a taxa de dose em tecido, mas ainda atrás da folha de entrada da câmara, que tem uma densidade superficial de $0,56 \text{ mg/cm}^2$.

Seria necessário conhecer-se agora o fator de transmissão da radiação neste material (Hostaphan) para se ter as taxas de dose na superfície externa da câmara. A experiência que determina a dose profunda em tecido (ou seja,

os fatores de transmissão) será descrita ainda neste capítulo II. Os fatores de transmissão T em questão já serão entretanto, aqui apresentados, para conclusão desta parte, no quadro seguinte:

Fonte	Distância de calibração (cm)	T (p/0,56 mg/cm ²)	$\dot{D}_t(0) = \frac{\dot{D}_t}{T}$ (Gy/h)
D ₁	20	1,006	0,614
D ₂	30	1,005	1,108.10 ⁻²

A taxa de dose absorvida no tecido e no ar livre, \dot{D}_c , formam o conjunto das quantidades de grande importância prática na calibração e dosimetria da radiação beta.

O valor \dot{D}_c pode ser determinado, considerando-se que na câmara de extrapolação usada são observadas rigorosamente as condições de Bragg-Gray. Neste caso obtém-se o mesmo valor que no ar livre. Assim sendo, tem-se:

$$\dot{D}_c = \frac{\dot{D}_t(0)}{s_{t,a}}$$

Na Tabela II-1 estão resumidos os resultados finais.

Tabela II-1: Taxas de dose no tecido e no ar. Fontes de ⁹⁰Sr-⁹⁰Y.

Fonte	Atividade nominal (mCi)	Distância de calibração (cm)	$\dot{D}_t(0)$ (Gy/h)	\dot{D}_c (Gy/h)
D ₁	50	20	0,614	0,553
D ₂	2	30	1,108.10 ⁻²	0,997.10 ⁻²

Faz ainda parte de um certificado de calibração a data de referência das medidas de taxa de dose, ou seja, para a fonte D_1 : 11.8.1977, e para a fonte D_2 : 19.8.1977.

A.4. Variação com a distância

Nesta etapa do trabalho, a finalidade foi a de se verificar, para as duas fontes D_1 e D_2 sob calibração, o intervalo de validade da lei do inverso do quadrado da distância da resposta da câmara de extrapolação para a radiação beta de ^{90}Sr - ^{90}Y . Além disso, por meio desta experiência foi possível determinar-se a profundidade do material radioativo dentro da fonte emissora.

A profundidade da câmara e a tensão aplicada foram mantidas fixas em respectivamente 1,00 mm e 10,0 V. A distância entre fonte e detector foi variada entre 10 e 40 cm, em intervalos de 10 cm. As medidas de corrente de ionização mostraram uma variação entre $1,4903 \cdot 10^{-11}$ e $1,0389 \cdot 10^{-12}$ A no caso da fonte D_1 , e $5,9455 \cdot 10^{-13}$ e $4,1351 \cdot 10^{-14}$ A, no caso da fonte D_2 . O desvio padrão relativo apresentou-se sempre menor que 0,1%.

Após as correções de K_{ad} e K_{sat} , os valores de corrente foram representados em função da distância a . A Fig.II-4 mostra o resultado da fonte D_1 e a Fig.II-5, da fonte D_2 .

A partir destes dados, obtêm-se:

1. para a fonte D_1

$$\dot{D}(a) = \dot{D}(a = 20 \text{ cm}) \frac{(20,62)^2}{(a + 0,62)^2}$$

no intervalo $10 \leq a \leq 40$ cm

O valor 0,62 cm representa a profundidade do material radioativo dentro da fonte.

2. para a fonte D_2

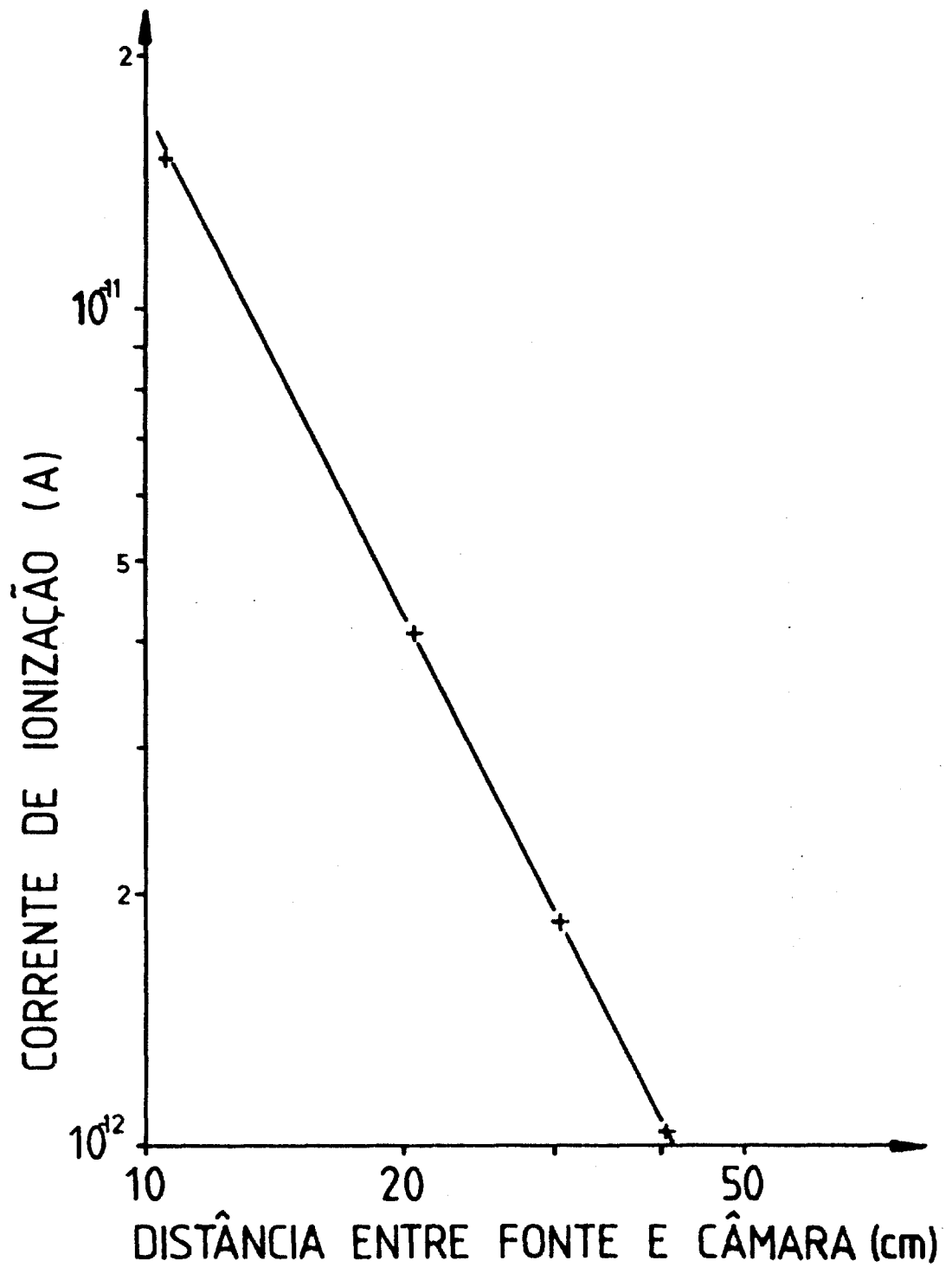


Fig.II-4: Variação da corrente de ionização com a distância entre a câmara de extrapolação PTB e a fonte $D_1: {}^{90}\text{Sr}-{}^{90}\text{Y}$ (50 mCi).

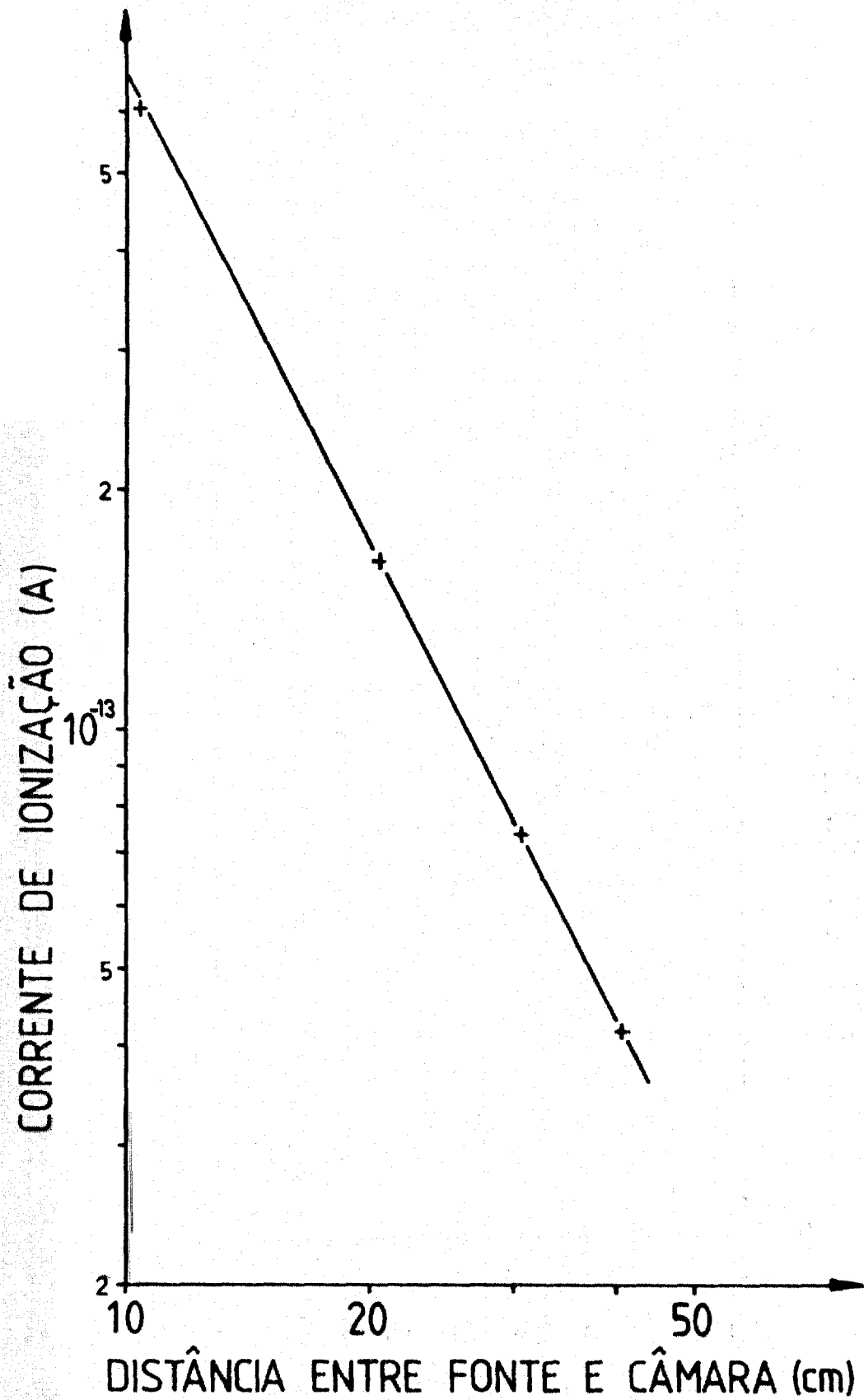


Fig.11-5: Variação da corrente de ionização com a distância entre a câmara de extrapolação PTB e a fonte $D_2: {}^{90}\text{Sr}-{}^{90}\text{Y}$ (2 mCi).

$$\dot{D}(a) = \dot{D}(a = 30 \text{ cm}) \frac{(30,46)^2}{(a + 0,46)^2}$$

no intervalo $20 \leq a \leq 40 \text{ cm}$

Neste caso, o material emissor está a 0,46 cm de profundidade ^{para-} na fonte.

A.5. Fator de transmissão

As experiências para a determinação dos fatores de transmissão foram realizadas, mantendo-se fixas a profundidade (1,00 mm) e tensão (10,0 V) da câmara de extrapolação, além da distância entre fonte e detector (30 cm), nos casos das fontes D_1 e D_2 . A câmara foi recoberta sucessivamente por folhas finas de diversas espessuras (ou densidade superficial) bem controladas, colocadas tão próximas quanto possível da janela de entrada da câmara.

O material destas folhas finas foi plástico (Hostaphan, Melinex), cuja espessura variou entre 12 e 250 μm , correspondendo a 1,67 e 35,0 mg/cm^2 . A equivalência entre este material plástico e tecido pode-se obter pela seguinte relação⁵⁾:

$$10,8 \text{ mg}/\text{cm}^2 \text{ Hostaphan} \equiv 10,0 \text{ mg}/\text{cm}^2 \text{ tecido.}$$

Acima da espessura de 250 μm de Hostaphan, foram usadas placas de Plexiglas, de espessuras 0,49 e 1,01 mm, correspondendo a 57,8 e 119,2 mg/cm^2 . Neste caso, a equivalência segue a relação²²⁾:

$$10,4 \text{ mg}/\text{cm}^2 \text{ Plexiglas} \equiv 10,0 \text{ mg}/\text{cm}^2 \text{ tecido.}$$

Nesta experiência a tomada de dados de corrente de ionização foi realizada do modo habitual. Além das medidas repetitivas para cada polaridade de tensão, para cada folha absorvedora adicional, foram feitas também medidas sem folha adicional, só com a janela de entrada da câmara.

Devido à ocorrência de reflexão da radiação incidente pela margem do anel de Plexiglas que prende o absorvedor em uso, há um fator de correção²²⁾ a considerar:

$$K = 1,003$$

Os valores da corrente de ionização foram, então, representados em função da densidade superficial de camada absorvedora equivalente a tecido das folhas adicionais na Fig.II-6, para a fonte D_1 , e na Fig.II-7, para a fonte D_2 . É preciso levar em consideração a espessura da janela de entrada da própria câmara, para se ter a espessura total do absorvedor. Pode-se observar um comportamento crescente, sendo linear somente no início. Neste tipo de gráfico só se representam os pontos iniciais, pois é a parte importante, como será visto a seguir.

Extrapolando-se a curva para densidade superficial nula, obtêm-se o valor $I(0)$. Os valores de transmissão T' no tecido são obtidos pela relação:

$$T' = \frac{I(a_1)}{I(0)}, \text{ onde } a_1: \text{ espessura do absorvedor}$$

Devido à presença dos absorvedores adicionais, é necessário aplicar-se aos valores dos fatores de transmissão um fator de correção K_a , dado pela expressão²²⁾:

$$K_a = \frac{(a - a_1)^2}{a^2}$$

Os fatores de transmissão T são portanto dados por:

$$T = T' \cdot K_a$$

Os valores de T foram representados em função da densidade superficial na Fig.II-8 e Fig.II-9 para respectivamente as fontes D_1 e D_2 .

Pode-se observar em ambos os casos a ocorrência do efeito de equilíbrio eletrônico causado pelos elétrons secundários espalhados pelas folhas absorvedoras.

A partir das curvas das Fig.II-8 e Fig.II-9 foram obtidos os fatores de transmissão T da Tabela II-2.

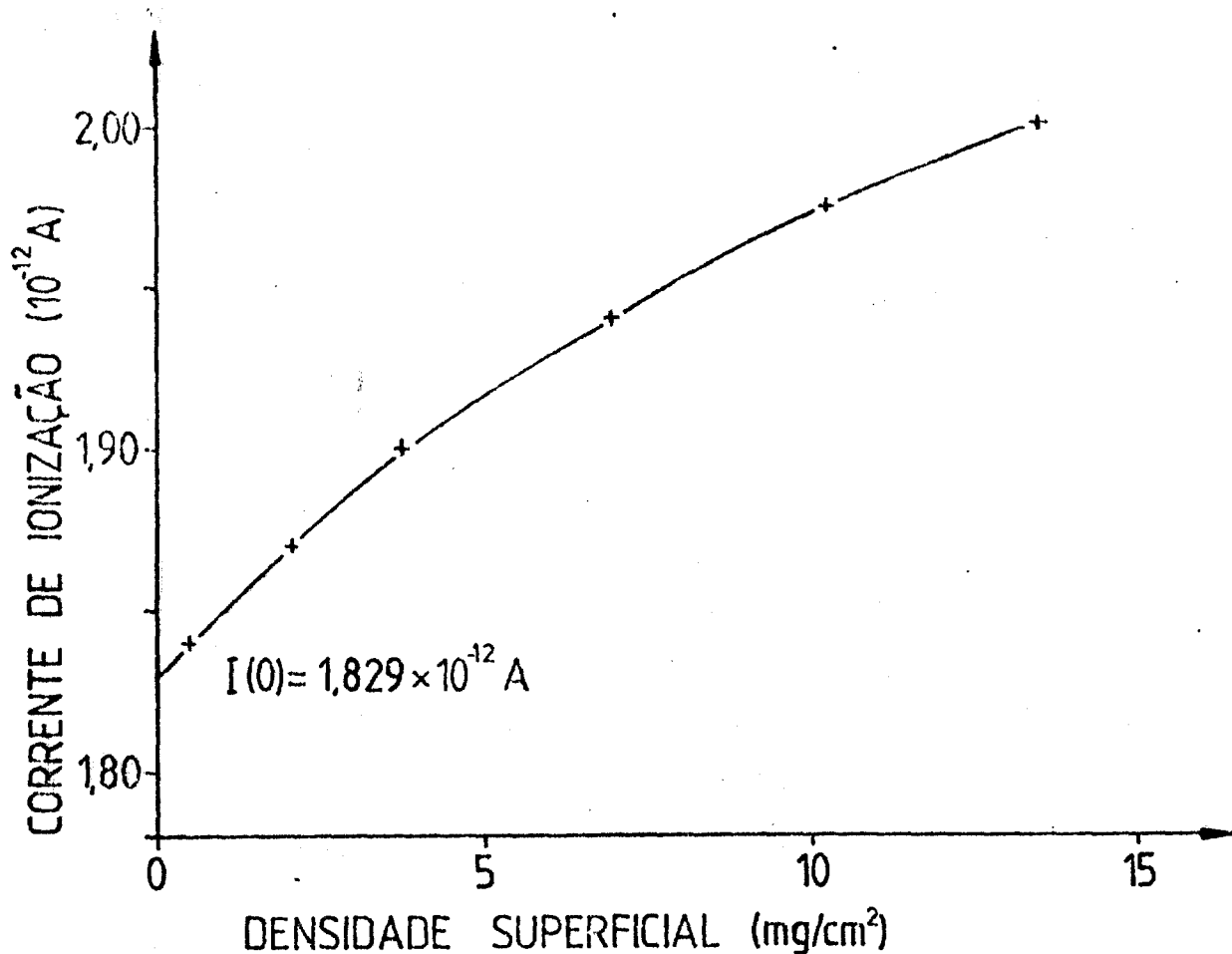


Fig.II-6: Comportamento da corrente de ionização com a densidade superficial de camada absorvedora equivalente a tecido. Fonte D₁: ^{90}Sr - ^{90}Y (50mCi). Câmara de extrapolação PTB. $I(0)$: valor extrapolado para densidade superficial nula.

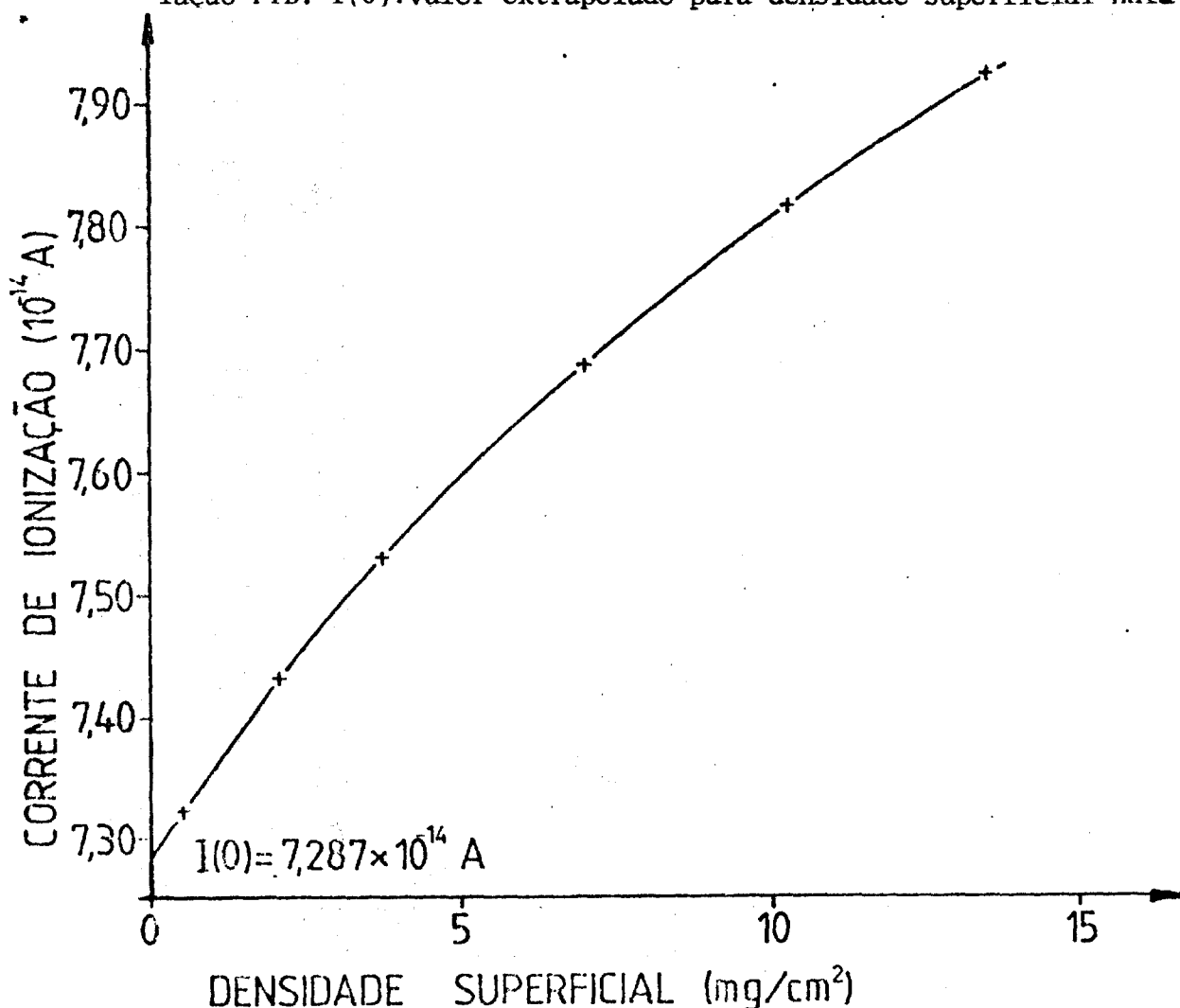


Fig.II-7: Comportamento da corrente de ionização com densidade superficial de camada absorvedora equivalente a tecido. Fonte D₂: ^{90}Sr - ^{90}Y (2 mCi). Câmara de extrapolação PTB. $I(0)$: valor extrapolado para densidade superficial nula.

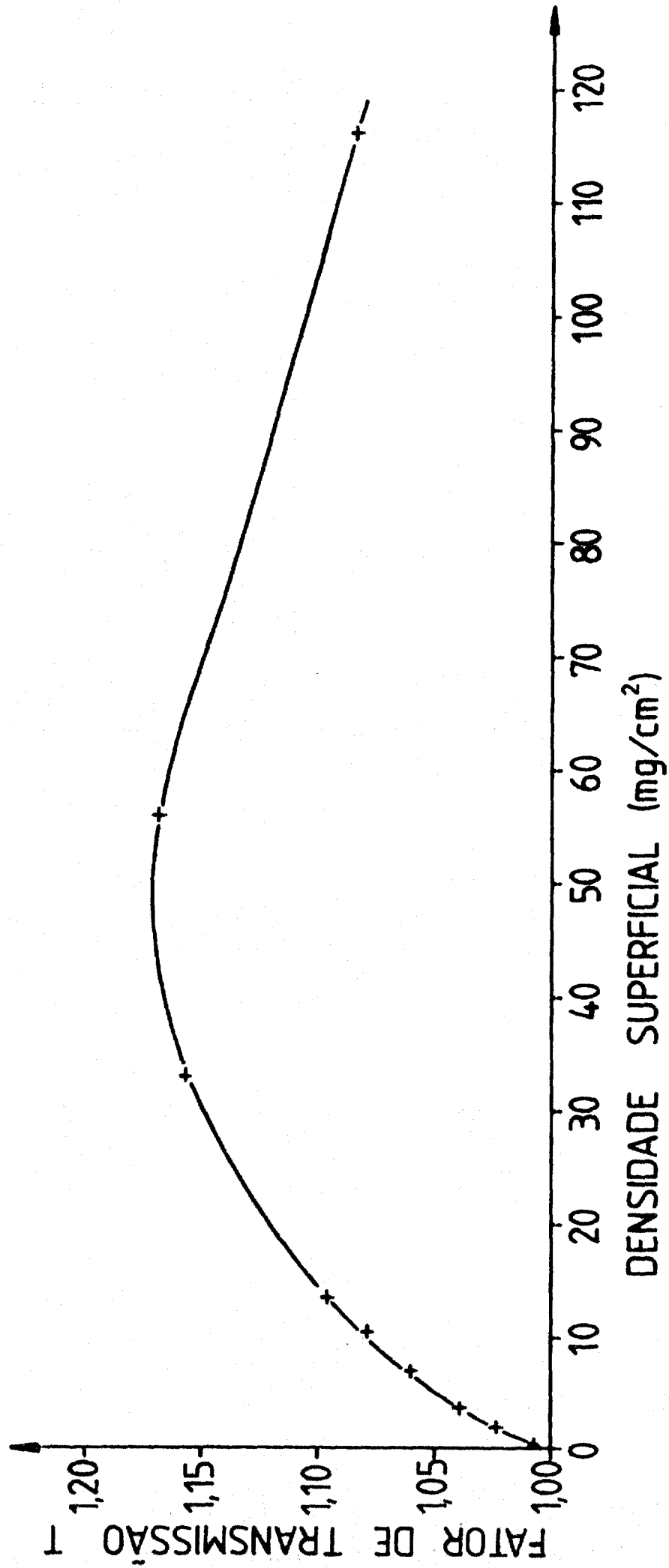


Fig.II-8: Fatores de transmissão para a fonte D_1 : $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ (50 mCi) em camada absorvedora equivalente a tecido, usando-se a câmara de extrapolação PTB.

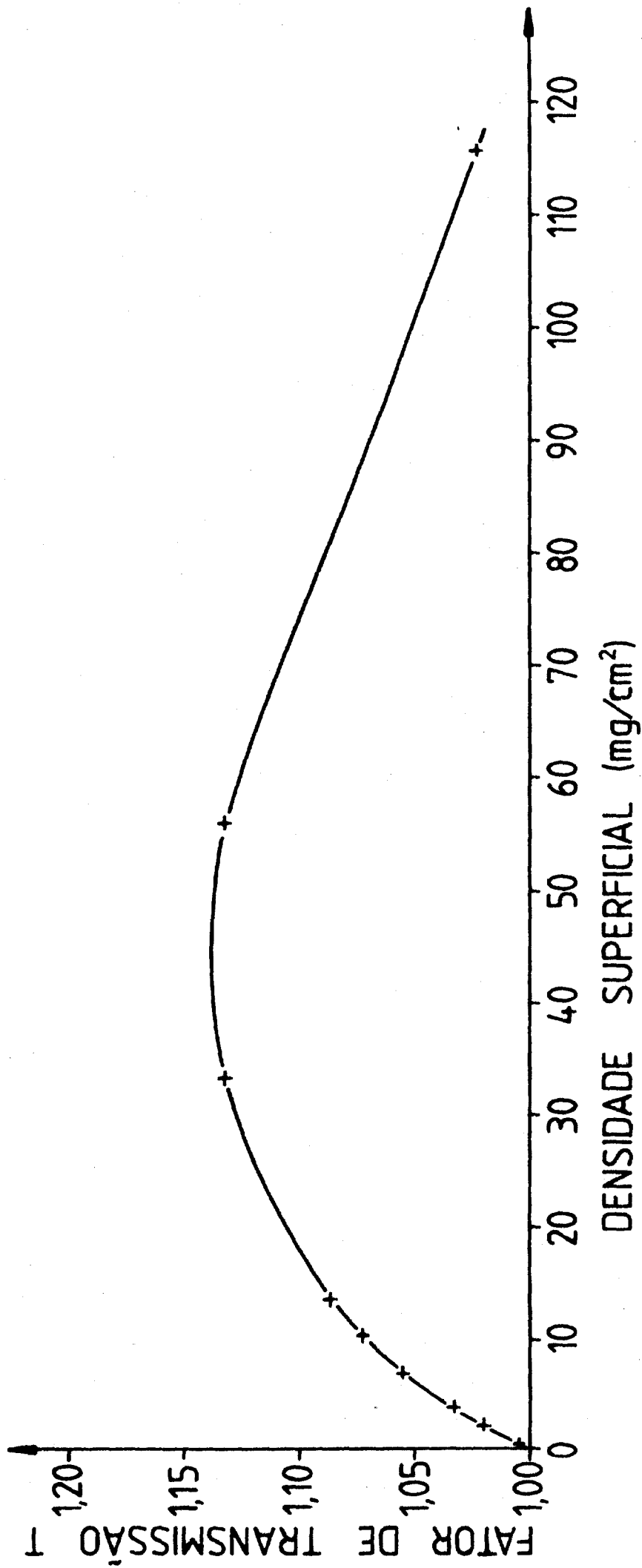


Fig.II-9: Fatores de transmissão para a fonte $D_2: {}^{90}\text{Sr}-{}^{90}\text{Y}$ (2 mCi) em camada absorvedora equivalente a tecido, usando-se a câmara de extrapolação PTB.

Tabela II-2: Fatores de transmissão T.
Fontes de ^{90}Sr - ^{90}Y .

Espessura de tecido		T	T
(mm)	(mg/cm ²)	Fonte D ₁	Fonte D ₂
0	0	1,000	1,000
0,01	1	1,011	1,010
0,03	3	1,031	1,028
0,05	5	1,046	1,043
0,07	7	1,060	1,057
0,10	10	1,078	1,072
0,20	20	1,120	1,105
0,50	50	1,171	1,138
1,00	100	1,106	1,052

Estes dados permitem a determinação da dose profunda no tecido. São especialmente importantes para o planejamento de dose, em radioterapia.

Com a determinação dos fatores de transmissão, terminam os requisitos para a calibração padrão primária completa para a radiação beta.

A.6. Experiência comparativa

Uma experiência usando-se a fonte D₃, do sistema padrão PTB, foi realizada para a determinação de sua taxa de dose no ar. A finalidade principal foi a de comparar este dado com os resultados obtidos por outros⁹⁾. Na publicação 9 foi feita uma comparação entre os valores da taxa de dose da fonte D₃ em dois laboratórios internacionais de padronização: PTB (Alemanha) e LMRI (Laboratoire de Métrologie des Rayonnements Ionisants, CEN, Saclay, França).

A única diferença entre o presente trabalho e o

do PTB⁹⁾ foi o tipo de retroespalhador utilizado na câmara de extrapolação. Neste caso, o eletrodo coletor é constituído, como descrito na parte experimental, por um cilindro de carbono coberto por uma camada superficial de Plexiglas e uma película de carbono, enquanto que na ref.9, ele era feito só de Plexiglas grafitado. Além disso, havia um ano aproximadamente de intervalo de tempo entre as duas experiências.

A distância de calibração foi de 20 cm. O valor da corrente de ionização apresentou uma variação entre $3,7028 \cdot 10^{-12}$ e $1,6972 \cdot 10^{-11}$ A, correspondendo às profundidades de câmara de 0,5 e 2,5 mm. O desvio padrão relativo foi menor que 0,05%. Após a aplicação dos fatores de correção K_{ad} e K_{sat} , os mesmos valores variaram entre $3,7454 \cdot 10^{-12}$ e $1,7078 \cdot 10^{-11}$ A. A Fig.II-10 mostra a curva de extrapolação obtida.

Neste caso tem-se:

$$B = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ A/cm}$$

Os fatores de correção envolvidos são:

Fonte	K_{dec}	K_{Brem}	K_{hum}	K_r	K_{ihn}
D ₃	1	0,9987	0,997	1,010	1,0028

Portanto

$$\dot{D}_a = 0,9954 \text{ Gy/h.}$$

Este valor representa a taxa de dose atrás ainda da folha de entrada da câmara, ou seja, atrás de 0,56 mg/cm² de tecido.

Nesta experiência, os valores comparados foram os de taxa de dose no ar, normalizados através de K_f para correção para 2 mg/cm² de tecido.

Como neste caso $K_f = 1,0153$, tem-se

$$\dot{D}_{aCP} = \dot{D}_a \cdot K_f = 1,0106 \text{ Gy/h}$$

onde o índice CP indica o material do eletrodo coletor, car

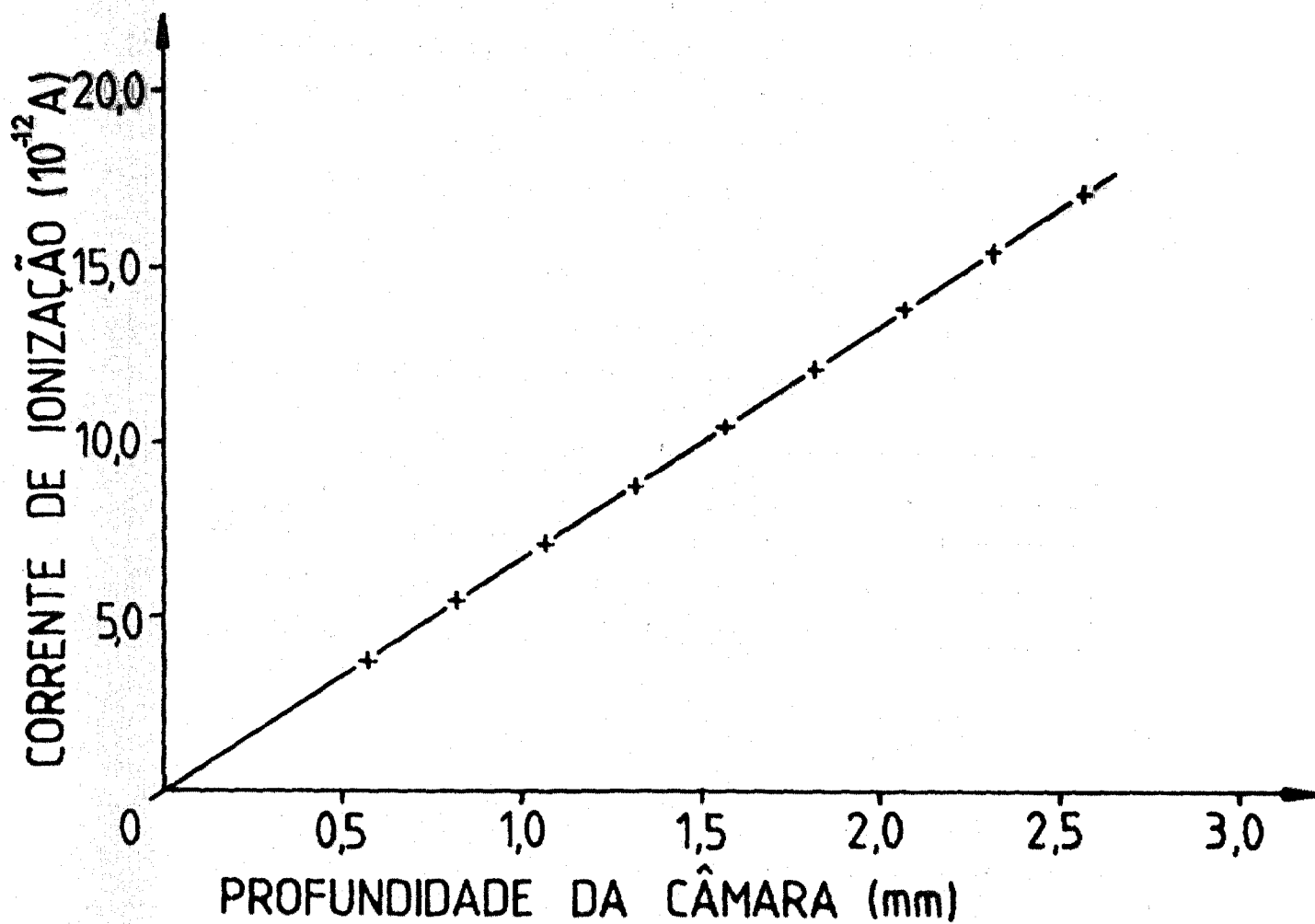


Fig.II-10: Curva de extrapolação obtida com a fonte $D_3: {}^{90}\text{Sr}-{}^{90}\text{Y}$ (100 mCi) e a câmara de extrapolação PTB (janela de entrada $0,56 \text{ mg/cm}^2$), à distância de 20 cm.

bono e Plexiglas.

Da referência 9 tem-se os valores para \dot{D}_t , podendo-se transformá-los em \dot{D}_{aC} (eletrodo coletor sô de carbono, caso do laboratório LMRI) e \dot{D}_{aP} (eletrodo coletor de Plexiglas, PTB), pela expressão:

$$\dot{D}_{aC} = \dot{D}_a \cdot K_f = \frac{\dot{D}_t}{s_{t,a} \cdot K_r}$$

onde $s_{t,a} = 1,111$

e analogamente para \dot{D}_{aP} .

Os resultados finais da comparação estão representados na Tabela II-3.

Tabela II-3: Resultados da comparação.
Fontes de ^{90}Sr - ^{90}Y .

Laboratório	LMRI	PTB	PTB, presente trabalho
K_r	1,0065	1,017	1,010
$K_f \cdot \dot{D}_a$ (Gy/h)	$\dot{D}_{aC} = 1,0150$	$\dot{D}_{aP} = 1,0116$	$\dot{D}_{aCP} = 1,0106$

Duas conclusões principais foram obtidas:

1. A diferença entre os dois resultados do mesmo laboratório PTB apresentou-se menor que 0,1%, mesmo tendo as medidas sido efetuadas com aproximadamente um ano de intervalo. Este dado e aquele obtido para a área efetiva do eletrodo coletor mostram a confiabilidade do sistema de medida.

2. O eletrodo coletor de carbono com camada de Plexiglas apresenta na prática a mesma atuação que o eletrodo feito sô de Plexiglas, não sendo portanto necessário o uso do sistema mais complexo.

B. Câmara Markus

A câmara Markus foi designada²¹⁾ para a dosimetria de radiação de elétrons com energia acima de 400 keV. Pode ser usada para medida de dose absorvida no ar (cavidade), em material sólido ou ainda na água.

O objetivo desta parte foi o de verificar a possibilidade do seu uso num sistema de padronização secundária de calibração e dosimetria da radiação beta. Foram realizadas experiências no sentido de examinar as principais propriedades necessárias para tal.

B.1. Estabilidade da câmara

A fim de se verificar a estabilidade da câmara, foi estudada a variação de sua corrente de ionização. Esta foi medida 47 vezes, em intervalos de 100 seg, para cada polaridade da tensão aplicada de 300 V. Para estas experiências foi utilizada a fonte dita de controle D₄, que foi encaixada na câmara, sendo portanto nula a distância entre fonte e detector. A profundidade desta câmara é fixa, de 2,00 mm.

O valor da corrente de ionização apresentou uma variação de aproximadamente 0,5%, durante 150 min de medida, para ambas as polaridades. O desvio padrão relativo mostrou-se menor que 0,1%. A observação simultânea da pressão atmosférica permitiu a detecção de uma variação menor que 0,1% durante a experiência.

A estabilidade foi portanto considerada satisfatória.

B.2. Área efetiva

Devido ao fato de a câmara Markus apresentar profundidade fixa, a determinação da área efetiva de eletrodo coletor foi realizada através da medida de capacitância

mais direto que no caso da câmara de extrapolação.

Variando-se várias vezes a tensão aplicada à câmara, entre 100 e 300 V, foi obtido para a capacitância o valor:

$$C = 0,14205 \text{ pF } (\pm 0,1\%).$$

Como

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon \frac{a_{ef}}{d} \quad e$$

$$d = 2 \times 10^{-3} \text{ m},$$

tem-se o valor para a área efetiva do eletrodo coletor

$$a_{ef} = 0,321 \text{ cm}^2 \text{ (diâmetro efetivo: 6,4 mm)}.$$

B.3. Curva de saturação

Inicialmente a curva de saturação da câmara Markus foi determinada usando-se o arranjo experimental e a fonte de controle D_4 , de ^{90}Sr - ^{90}Y , encaixada no próprio detector.

Variando-se a tensão aplicada à câmara entre 5 e 300 V, equivalendo a uma variação do campo elétrico entre os eletrodos de 25 a 1500 V/cm, a corrente de ionização foi medida 5 vezes para cada polaridade, em intervalos de 180 seg. O valor da corrente real apresentou uma variação entre $5,1356 \cdot 10^{-12}$ e $5,2884 \cdot 10^{-12}$ A; o desvio padrão relativo mostrou-se menor que 0,1%.

Na Fig.II-11, curva a, pode-se observar a curva de saturação obtida. Nota-se um crescimento rápido inicial; após 10 V de tensão aplicada, o valor da corrente aumenta mais lentamente em função da tensão, tendendo talvez a uma saturação.

A fim de se corrigir os valores da corrente de io

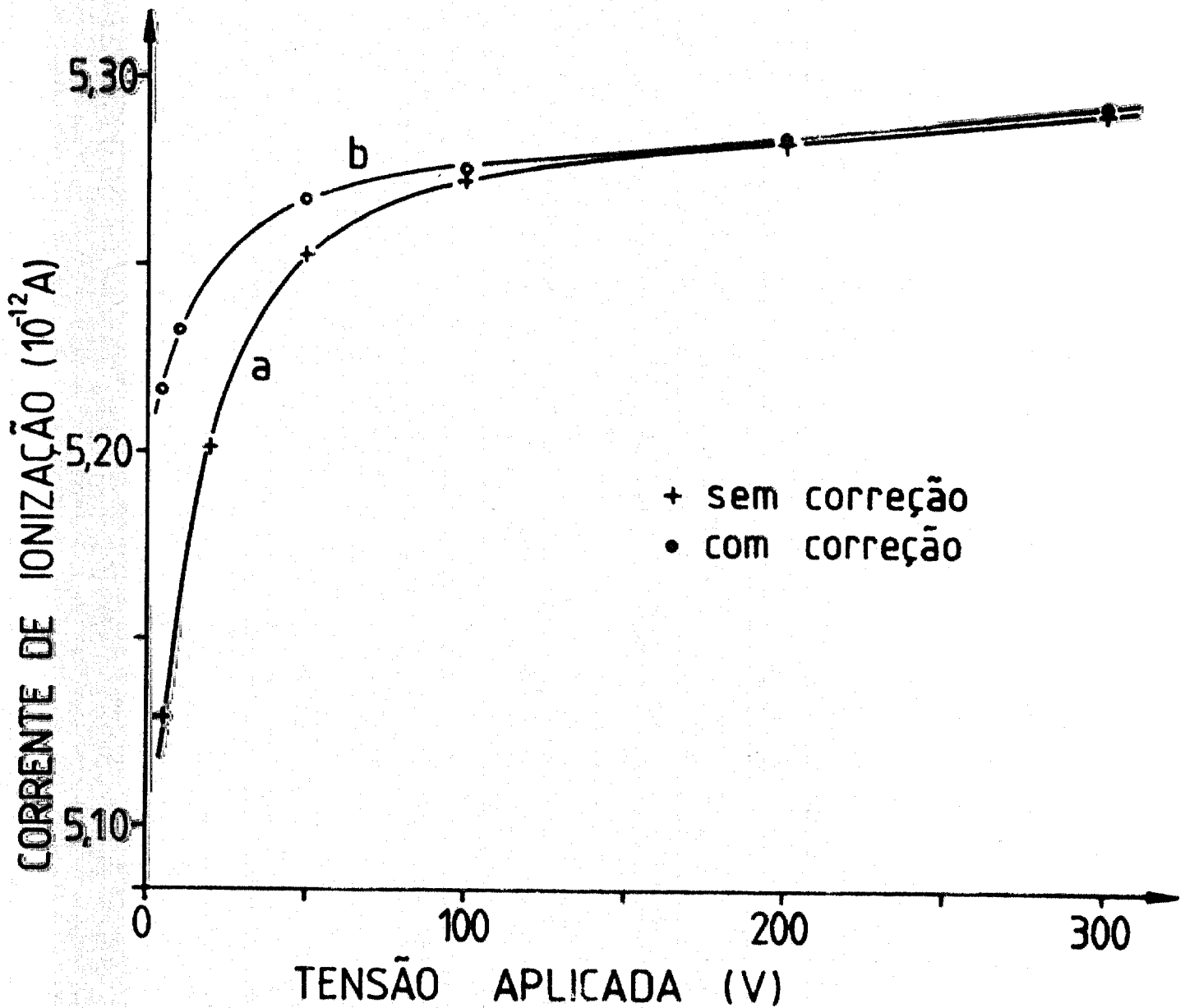


Fig.II-11. Curva de saturação da câmara Markus, fonte D_4 : ^{90}Sr - ^{90}Y , de controle, encaixável na própria câmara. As curvas a e b representam os dados sem e com aplicação do fator de correção K_{sat} .

nização para os efeitos de recombinação inicial, geral e perda de íons por difusão, foi usada a relação apresentada na seção II-b1.3:

$$K_{\text{sat}} = \frac{1}{f}$$

Como na câmara Markus a área efetiva do eletrodo coletor foi determinada em

$$a_{\text{ef}} = 0,321 \text{ cm}^2,$$

obtém-se para este caso:

$$f = \left(1 - 1,52 \cdot 10^{12} \frac{I(\text{A}) \cdot d^3(\text{cm}^3)}{U^2(\text{V}^2)}\right) \left(1 - 0,044 \frac{d(\text{cm})}{U(\text{V})}\right) \left(1 - 0,0506 \frac{1}{U(\text{V})}\right).$$

Na Fig.II-11, a curva b representa a curva de saturação para os valores corrigidos de corrente de ionização. Somente para baixos valores de tensão houve diferença entre as respostas.

Pode-se notar que até 300 V não foi alcançada uma situação de saturação real. Como a fonte era encaixada na câmara, implicando numa distância nula entre ambas, poderia estar ocorrendo falta de uniformidade no campo da radiação beta incidente.

A câmara Markus foi, então, exposta à radiação da fonte D_3 (100 mCi, ^{90}Sr - ^{90}Y), a uma distância de 10 cm, onde o campo de radiação desta fonte era bem conhecido e uniforme. Para isso foi necessário montar a câmara numa placa de Plexiglas de 1 cm de espessura, e dimensões de 20x20 cm², num suporte no banco óptico, em frente à fonte.

A tensão aplicada foi novamente variada entre 5 e 300 V e a corrente de ionização foi medida 5 vezes para cada valor de diferença de potencial e para ambas polaridades, em intervalos de 50 seg. Foi evitada a aplicação de tensões mais altas que 300 V, para impedir a ocorrência de uma alteração no paralelismo da folha da janela de entrada e o eletrodo coletor da câmara. O valor da corrente variou entre

$1,3345 \cdot 10^{-12}$ e $1,3938 \cdot 10^{-12}$ A e o desvio padrão relativo foi sempre menor que 0,1%. A Fig.II-12, curva a, mostra a curva de saturação obtida e a curva b, a mesma tendo-se corrigido os valores de corrente como no caso da figura anterior.

Neste caso, nota-se aproximadamente o mesmo comportamento anterior, mas a tendência para a saturação mostrou-se mais pronunciada. É suficiente tomar-se o coeficiente angular da reta entre 100 e 300 V em ambos os casos, para uma comparação: a razão entre os dois valores foi de aproximadamente 3,4. Isto significa que nesta última experiência a corrente de ionização se aproxima 3,4 vezes mais rapidamente da saturação que na outra experiência. Mesmo assim, uma saturação completa (100%) não foi atingida.

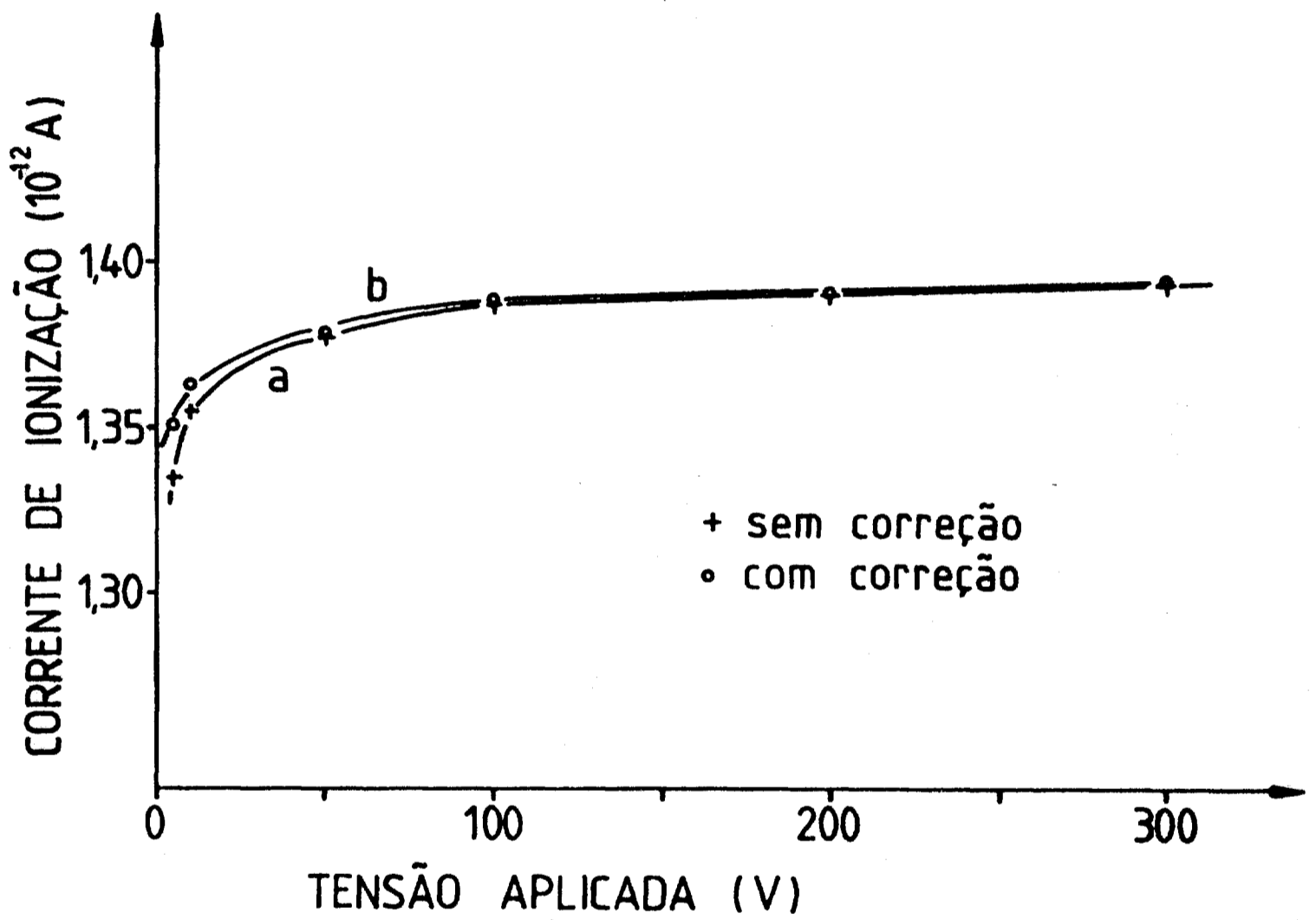
A ausência da ocorrência desta saturação significa que não foi possível obter-se a condição na qual todos os íons formados na câmara eram capazes de alcançar os eletrodos. O fato deve-se provavelmente a efeitos de parede. Mesmo assim, a 300 V a "saturação" atingida (99,6%), foi considerada satisfatória, para uma câmara comercial do tipo em questão.

B.4. Variação com a distância

A câmara Markus foi exposta à radiação da fonte D_3 , variando-se a distância entre ambas.

A tensão aplicada à câmara foi mantida fixa em 300 V e a distância foi variada entre 10 e 40 cm, em intervalos de 10 cm. A corrente de ionização foi medida em intervalos de 50 seg, cerca de 6 vezes para cada polaridade da tensão aplicada. O valor da corrente variou entre $1,3918 \cdot 10^{-12}$ e $8,2140 \cdot 10^{-14}$ A, para respectivamente 10 e 40 cm. O desvio padrão relativo foi menor que 0,2%.

A Fig.II-13 apresenta o resultado obtido, após as correções para os efeitos de recombinação inicial e geral e perda de íons por difusão. A curva segue normalmente o com-



ig.II-12: Curva de saturação da câmara Markus. Fonte $D_3: {}^{90}\text{Sr}-{}^{90}\text{Y}$ (100 mCi), distância:10cm.
 As curvas a e b representam os dados sem e com aplicação do fator de correção K_{sat} .

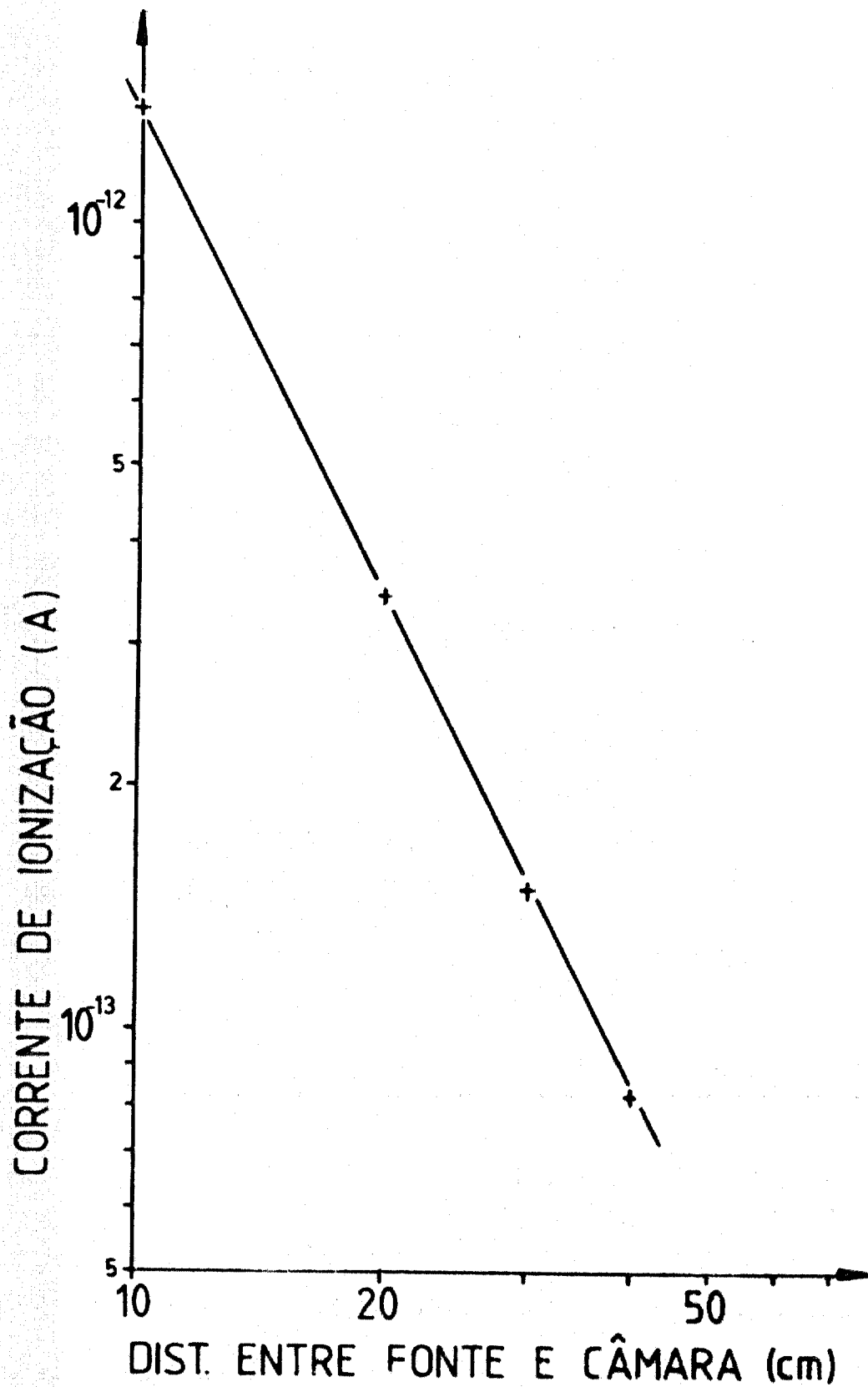


Fig. 11-13: Variação da corrente de ionização com a distância entre a câmara Markus e a fonte D_2^{90} γ (100 mCi). Tensão aplicada: 300 V.

portamento do inverso do quadrado da distância.

B.5. Fator de transmissão

Os fatores de transmissão foram determinados para a câmara Markus usando-se a fonte D_3 .

A distância entre fonte e detector foi mantida fixa em 20 cm e a tensão aplicada à câmara, em 300 V. A espessura do absorvedor de radiação, colocado à frente da câmara, foi variada entre 12 e 250 μm (folhas de plástico Hostaphan, Melinex) e 0,49 e 1,01 mm (placas de Plexiglas).

O método usado foi o mesmo já descrito para o caso da câmara de extrapolação PTB. A corrente de ionização variou entre $3,4164 \cdot 10^{-13}$ e $3,0099 \cdot 10^{-13}$ A, correspondendo ao caso sem absorvedor adicional e ao de espessura máxima (1,01 mm). É preciso lembrar que o caso de espessura nula só é possível obter-se através de extrapolação, pois mesmo sem absorvedor adicional sempre está presente a janela de entrada da câmara.

Na Fig.II-14 foram apresentados os valores da corrente de ionização em função da espessura total, equivalente a tecido, do absorvedor colocado entre a fonte e a câmara. Só foram apresentados no gráfico os resultados até $15,3 \text{ mg/cm}^2$, pois neste caso só a parte inicial tem importância. É uma curva crescente; sua extrapolação para densidade superficial nula fornece o valor $I(0)$, em relação ao qual são determinados os fatores de transmissão.

Após a correção necessária K_a , os valores do fator de transmissão foram representados em função da espessura de camada absorvedora total, equivalente a tecido, na Fig.II-15a. Pode-se observar que o comportamento da curva é crescente até cerca de 25 mg/cm^2 , onde atinge o máximo, para um fator de transmissão de 1,04, decrescendo a seguir. Este crescimento do fator de transmissão mostra a ocorrência de equilíbrio eletrônico, devido aos elétrons secundários espalhados pelas folhas absorvedoras.

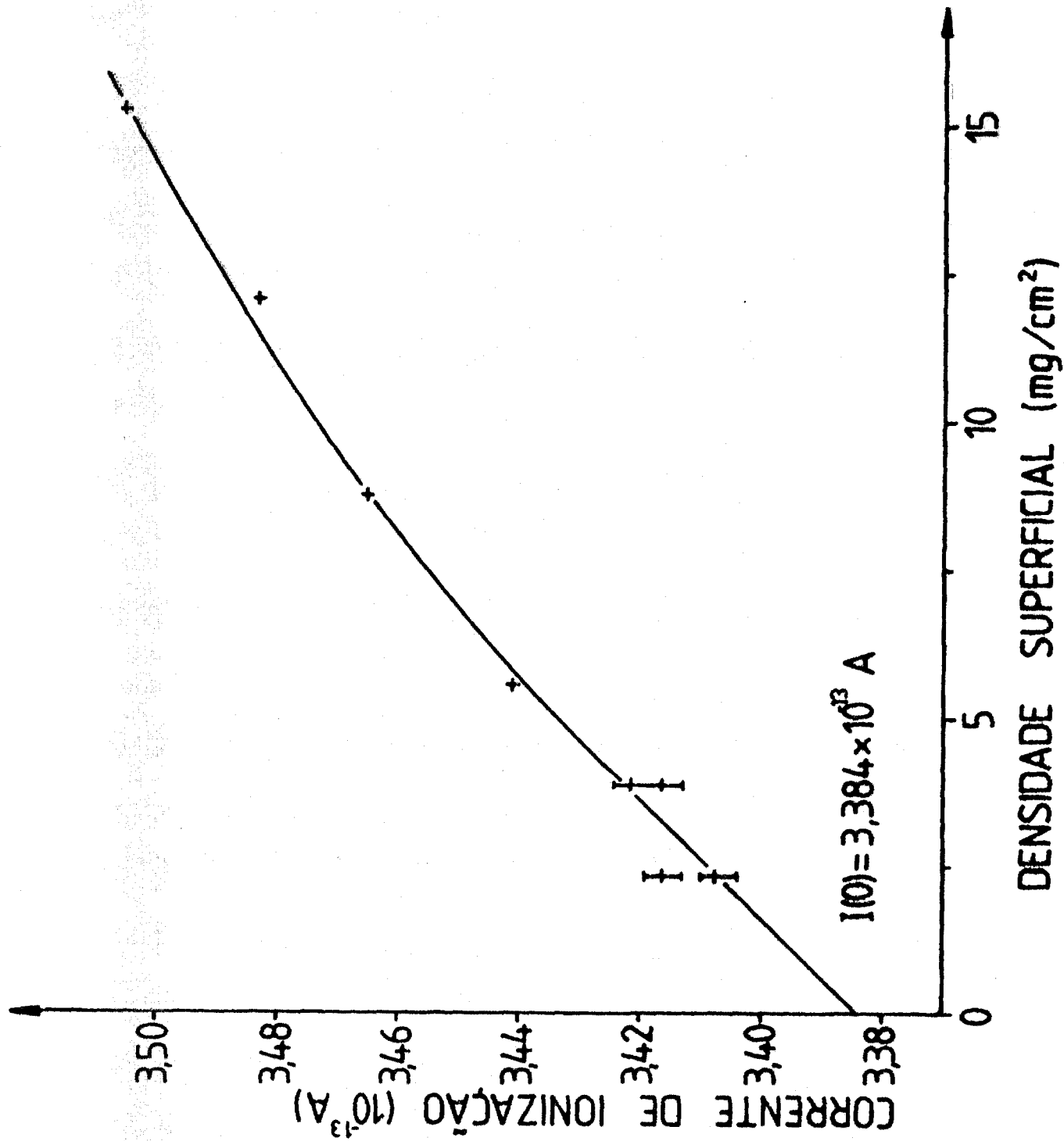
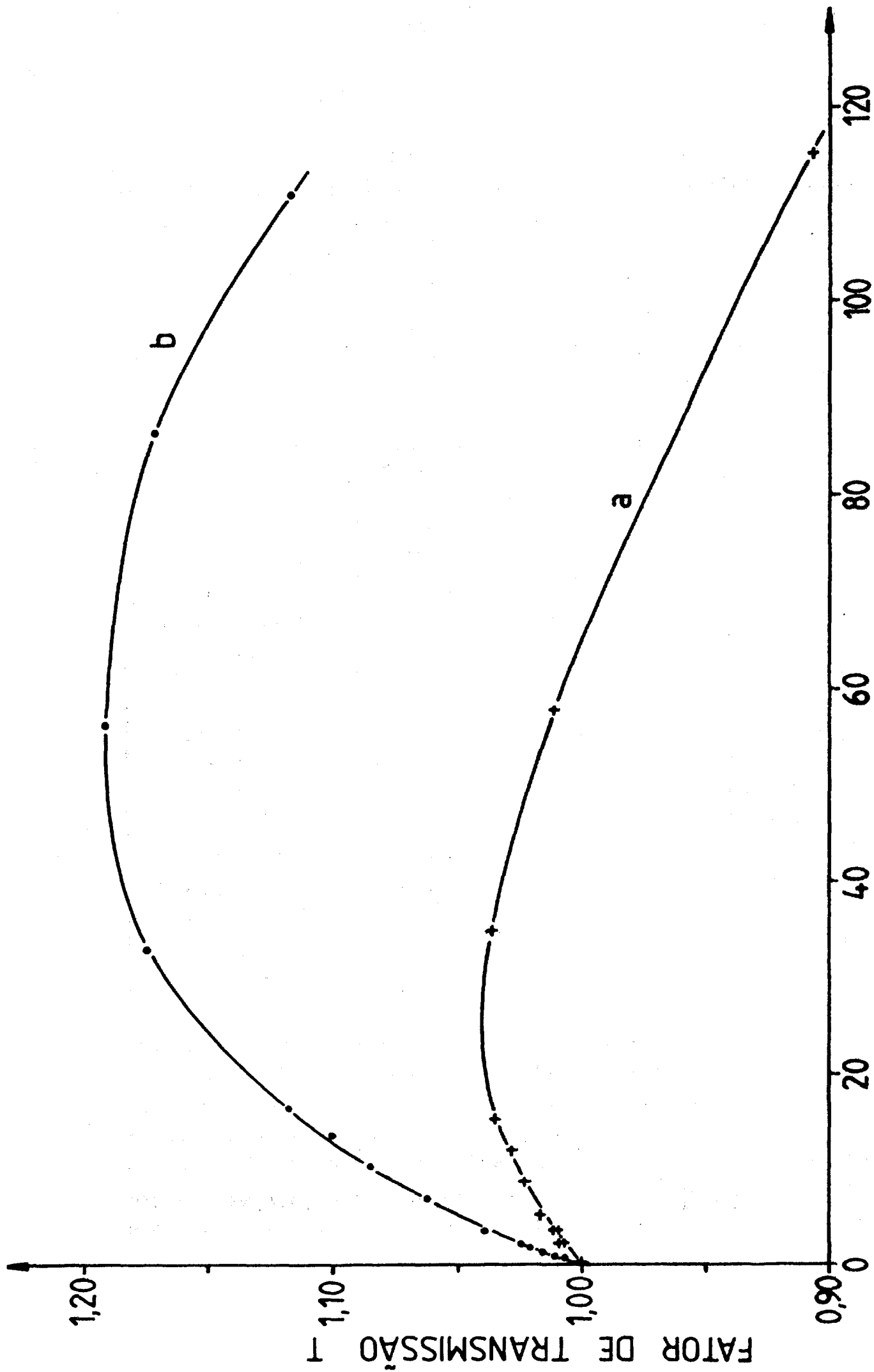


Fig. II-14: Comportamento da corrente de ionização com a densidade superficial de camada absorvedora equivalente a tecido. Fonte D_3 : ^{90}Sr - ^{90}Y (100 mCi). Câmara Markus. $I(0)$: valor extrapolado para densidade superficial nula.



DENSIDADE SUPERFICIAL (mg/cm²)

Fig. II-15: Fatores de transmissão para a fonte D₃: ⁹⁰Sr-⁹⁰Y (100 mCi) em camada absorvedora equivalente a tecido.

a. Câmara Markus

b. Câmara de extrapolação PTB 22

Para uma comparação, a curva²²⁾ b da Fig.II-15 apresenta o comportamento da câmara de extrapolação PTB exposta à radiação da mesma fonte D₃, em condições geométricas idênticas. Pode-se notar uma diferença notável entre os dois resultados. No caso da câmara de extrapolação, o máximo da curva é atingido a cerca de 55 mg/cm² para um fator de transmissão de 1,91. A diferença deve-se apenas ao tipo de câmara de ionização utilizado.

A partir deste gráfico são obtidos os fatores de transmissão, da Tabela II-4.

Tabela II-4: Fatores de transmissão T.
Fonte de ⁹⁰Sr-⁹⁰Y.

Espessura de tecido (mm)		(mg/cm ²)	T câmara Markus	T câmara de ex trapolação PTB
0	0		1,000	1,000
0,01	1		1,002	1,011
0,03	3		1,008	1,030
0,05	5		1,013	1,047
0,07	7		1,019	1,062
0,10	10		1,025	1,083
0,20	20		1,039	1,133
0,50	50		1,021	1,191
1,00	100		0,937	1,144

O fato da curva a não ter apresentado um comportamento mais semelhante ao obtido usando-se o equipamento de padronização primária (câmara de extrapolação) deve estar ligado ao mesmo efeito que provocou a ausência de saturação completa da corrente de ionização até 300 V (Fig.II-12). Como já mencionado anteriormente, isso poderia ser causado por efeitos de parede da câmara, o que constitui ainda um campo aberto de pesquisa.

Estes resultados não implicam em que a câmara Markus não possa ser aplicada à calibração da radiação beta. É apenas necessário conhecer-se bem as características e propriedades da câmara e tomar-se cuidados especiais nas medidas de fator de transmissão.

B.6. Determinação da taxa de dose

A finalidade principal foi a comparação entre dois métodos de determinação de taxa de dose, usando-se a câmara Markus.

B.6.1. Método Markus

Acompanhando o sistema da câmara Markus e a fonte D_4 de controle, o relatório de calibração fornece um fator de calibração K_C . Este foi obtido nos laboratórios PTW, acoplando-se a câmara a um sistema detector "Duplex-Dosimeter".

Corrigindo-se este fator de calibração, dado em unidades de exposição (R) por intervalo de tempo de pulso do instrumento, quanto ao decaimento da fonte, tem-se

$$K_C = 0,5654 \text{ R/s.}$$

Tomando-se a relação existente entre exposição* X e dose absorvida D no ar,

$$D [\text{Gy}] = 8,69 \cdot 10^{-3} \cdot X [\text{R}],$$

* A exposição é medida em unidades de Roentgen (R). 1R corresponde à quantidade de radiação que, incidindo sobre 1 kg de ar, produz $2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C}$.

que resulta considerando que

$$D_{\text{ar}} = \frac{\bar{W}}{e} X \quad \text{com} \quad \frac{\bar{W}}{e} = 33,7 \text{ J/C}$$

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/C} \quad ; \quad 1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg.}$$

Tem-se, então,

$$\dot{D}_C(D_4) = 17,69 \text{ Gy/h}$$

que é a taxa de dose medida no ar atrás de uma camada de material equivalente a tecido de $2,3 \text{ mg/cm}^2$ de densidade superficial.

B.6.2. Método Böhm

A câmara Markus, acoplada ao sistema de medida da câmara de extrapolação de padronização primária (PTB), foi submetida à radiação da fonte de controle D_4 e da fonte D_3 . A distância entre fonte e detector foi mantida em 20 cm para a fonte D_3 ; no caso da fonte de controle D_4 ela foi encaixada no próprio detector.

A corrente de ionização foi medida do modo habitual ($I(D_3)$ e $I(D_4)$), em ambos os casos, sendo a tensão aplicada à câmara de 300 V (correspondendo a um campo elétrico de 150 V/mm):

$$I(D_3) = 3,4164 \cdot 10^{-13} \text{ A}$$

$$I(D_4) = 5,2884 \cdot 10^{-12} \text{ A.}$$

Como a fonte D_3 é calibrada, a sua taxa de dose é bem conhecida⁹⁾, tanto no tecido como no ar, para a distância de 20 cm e para uma data de referência. Após correção para o decaimento, tem-se a taxa de dose no ar:

$$\dot{D}_C(D_3) = 0,9860 \text{ Gy/h.}$$

Fazendo-se a correspondência entre $I(D_3)$ e $\dot{D}_C(D_3)$, obtém-se um fator de calibração K:

$$\dot{D}_C = K \cdot I$$

Portanto,

$$K = 2,8861 \cdot 10^{12} \text{ Gy h}^{-1}\text{A}^{-1}$$

que, aplicado à fonte D_4 , fornece:

$$\dot{D}_C(D_4) = 15,26 \text{ Gy/h}$$

Esta é a taxa de dose medida no ar atrás de uma camada de material equivalente a tecido de $2,3 \text{ mg/cm}^2$ de densidade superficial.

B.6.3. Comparação

Os valores da taxa de dose encontrados pelos dois métodos mostram uma diferença de 14,8%. Foram medidos atrás de $2,3 \text{ mg/cm}^2$ de tecido, que constitui a janela de entrada da câmara.

Para se ter a taxa de dose na superfície da câmara, isto é, a uma profundidade de tecido nula, basta tomar-se os fatores de transmissão T para a espessura em questão e fazer-se uso da relação:

$$\dot{D}_C(x \text{ mg/cm}^2) = \dot{D}_C(2,3 \text{ mg/cm}^2) \cdot \frac{T(x \text{ mg/cm}^2)}{T(2,3 \text{ mg/cm}^2)}$$

onde para $x = 0$, $T(0) = 1$

A fim de se comparar mais diretamente os dois métodos de determinação de taxa de dose no ar, foi feito um estudo para os dois casos das respostas do detector em função da espessura de uma camada de material equivalente a te

cido, ou seja, profundidade no tecido.

Para a determinação dos valores \dot{D}_c foi usada a relação entre 0 e 115 mg/cm². Os fatores de transmissão foram obtidos a partir da Fig.II-15, sendo a curva b para o método Böhm e a curva a, para o método Markus. Apesar dos dados da Fig.II-15 terem sido obtidos com a fonte D₃, a razão entre as taxas de dose dos dois métodos elimina este problema, pois constitui uma forma de correção para o comportamento da câmara Markus em relação ao da câmara de extrapolação.

A razão entre a taxa de dose obtida pelo método Böhm e a obtida pelo método Markus foi representada em função da densidade superficial de camada de material equivalente a tecido na Fig.II-16.

Pode-se observar que para pequenas espessuras, os resultados dos dois métodos diferem bastante (cerca de 15% para o caso de espessura nula). A curva apresenta um crescimento rápido no início, a razão \dot{D}_c (Böhm)/ \dot{D}_c (Markus) atinge o valor unitário em 55 mg/cm² de densidade superficial; depois o comportamento crescente torna-se mais lento, tendendo a um valor constante (cerca de 4,4% acima de 1,000).

O valor unitário representaria neste gráfico uma concordância ótima entre os resultados dos dois métodos, o que só ocorreu para 55 mg/cm². Isto significa que se a calibração da câmara Markus for feita na sua superfície, atrás de uma camada equivalente a tecido desta densidade superficial, a taxa de dose apresentará o mesmo valor tanto por um método como pelo outro. Portanto, a rigor só seria possível a sua utilização nestas condições para calibração e dosimetria da radiação beta de ⁹⁰Sr-⁹⁰Y.

B.7. Conclusão

Em conclusão, o estudo sobre a câmara comercial Markus mostrou a possibilidade do seu uso na calibração e dosimetria da radiação beta de ⁹⁰Sr-⁹⁰Y. Esta possibilidade é, entretanto, limitada devido ao comportamento apre-

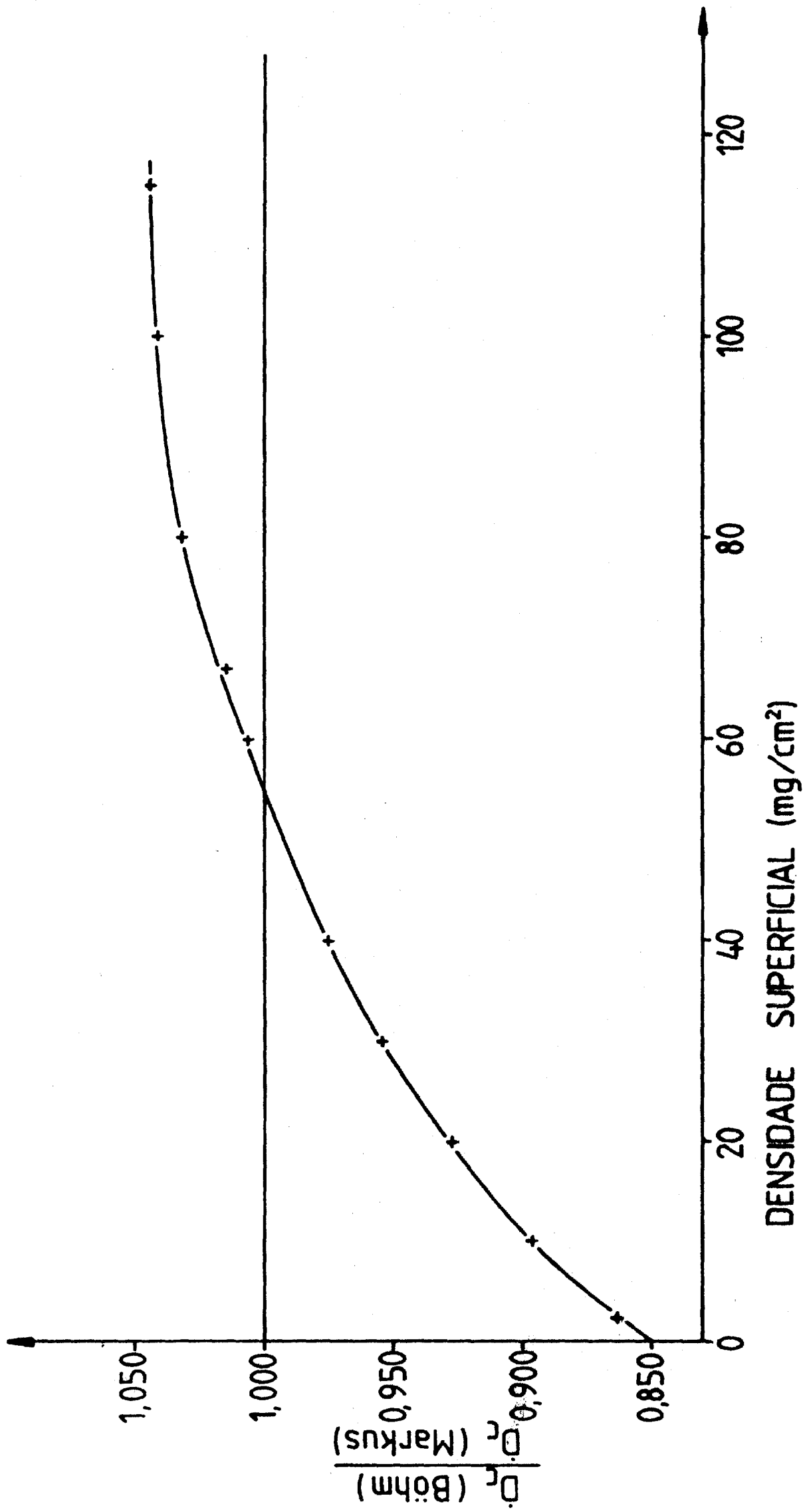


Fig.II-16: Comportamento da razão entre as taxas de dose absorvida determinadas pelos métodos Böhm e Markus em função da densidade superficial de camada absorvedora equivalente a tecido. Fontes D_3 : ^{90}Sr - ^{90}Y (100 mCi) e D_4 : ^{90}Sr - ^{90}Y , de controle.

sentado em função da espessura de tecido, fato este que se acredita estar relacionado com o mesmo fenômeno que impediu a ocorrência de saturação completa da corrente de ionização, ou seja, efeitos de parede.

Os métodos desenvolvidos no presente trabalho permitem contornar o problema, obtendo-se resultados satisfatórios.

II-c. Calibração padrão secundária

A calibração padrão secundária consistiu, neste trabalho, da calibração e do estudo das propriedades de uma câmara de extrapolação, usando-se um conjunto de fontes de radiação beta calibradas num laboratório de padronização primária.

O objetivo foi o da montagem de um sistema e o desenvolvimento de um método para calibração principalmente de instrumentos de campo, usados em dosimetria e monitoração da radiação beta.

As etapas de medida de curva de extrapolação (para a determinação de fatores de calibração), variação da corrente de ionização com a distância entre fonte e detector e determinação de fatores de transmissão constituem, como no caso da calibração padrão primária, ao lado do estudo da dependência do fator de calibração com a energia da radiação, a parte mais importante nesta seção. Foram também examinados vários fatores, que apresentaram influência nas medidas.

II-cl. Parte experimental

II-cl.1. Fontes

Além da fonte D_2 já descrita no item II-bl.1, foi

usado um conjunto de fontes de radiação beta que acompanha o sistema padrão.

A foto II-1 apresenta todos os componentes do sistema padrão beta, fabricada por Buchler & Co. Wenden, mas idealizado e calibrado por PTB, Braunschweig, Alemanha. O conjunto de fontes foi denominado conjunto padrão Buchler. Dentro da caixa de madeira pode-se observar a blindagem que contém quatro fontes, sendo duas de ^{90}Sr - ^{90}Y (2 e 50 mCi), uma de ^{204}Tl (0,5 mCi) e uma de ^{147}Pm (14 mCi). As fontes são parafusadas à blindagem, podendo ser retiradas com o auxílio da pinça especial, com proteção de lucite, para o seu uso no porta-fonte. Ainda dentro da caixa de madeira existem quatro hastes, marcadoras de distâncias (20 e 30 cm) entre a fonte e o detector.

Os emissores radioativos são parafusados ao porta-fonte; o obturador existente na saída do feixe da radiação é controlado pela unidade eletrônica à direita. O intervalo de tempo de abertura e fechamento é de aproximadamente 0,01 seg. A unidade de controle permite a aplicação de uma dose absorvida pré-selecionada. Para isto basta marcar-se no aparelho o intervalo de tempo de irradiação, controlado por um relógio de cristal de quartzo.

Entre as quatro fontes, três delas são usadas juntamente com um filtro plano, que proporciona uma área de calibração específica de taxa de dose absorvida uniforme, de aproximadamente 10 cm de diâmetro. Esta dimensão da área permite a calibração de dosímetros de área extensa (como por exemplo uma câmara de extrapolação). A quarta fonte, com a maior atividade, é usada principalmente para a aplicação de altas doses absorvidas e é por isso calibrada à menor distância, 11 cm. É usada sem o filtro*.

* Este filtro será denominado, no decorrer deste trabalho, filtro homogeneizante.

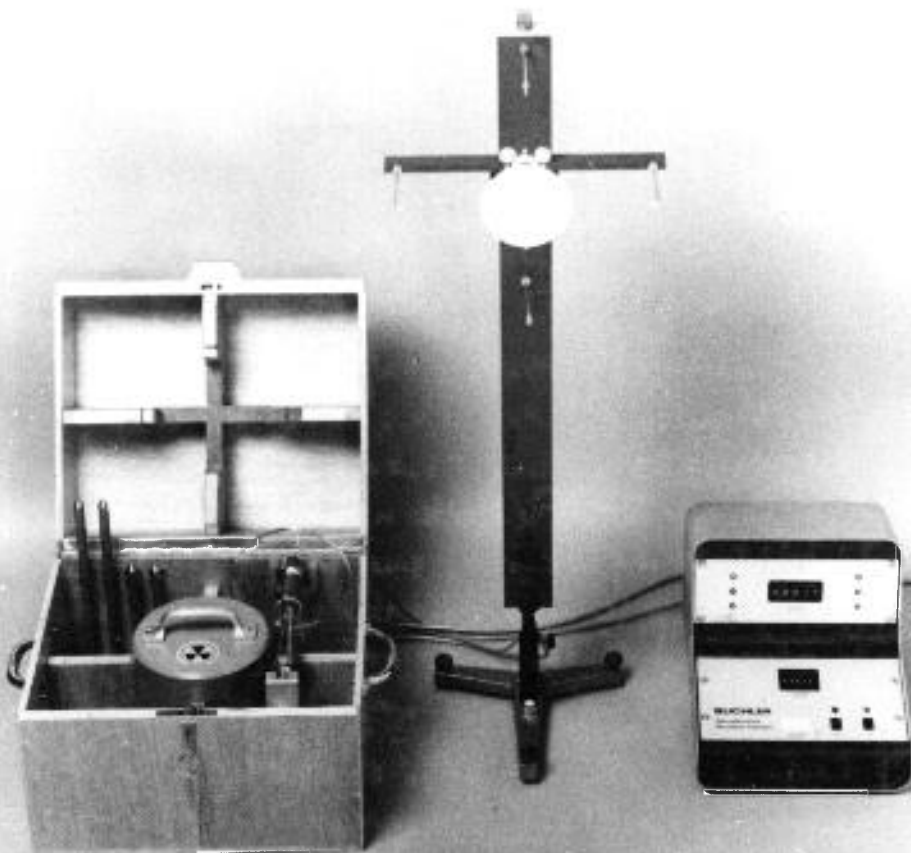


Foto II-1: Conjunto padrão Buchler, para calibração secundária de radiação beta: blindagem contendo as fontes de ^{90}Sr - ^{90}Y , ^{204}Tl e ^{147}Pm , porta-fonte para irradiação e unidade de controle.

Como todo sistema padrão, deste também faz parte um certificado PTB para cada fonte emissora beta, contendo os valores das taxas de dose absorvida e as curvas de dose profunda na região entre 0 e 1 mm de espessura de tecido.

Este sistema padrão encontra aplicação especialmente em calibração de dosímetros pessoais (por exemplo filmes), dosímetros de estado sólido e dosímetros de campo de até 10 cm de diâmetro, dependentes da energia da radiação incidente beta. Outra aplicação muito importante está na pesquisa fundamental no campo da dosimetria beta.

As principais características das fontes do conjunto padrão Buchler, fornecidas pelo laboratório PTB, foram representadas nas tabelas a seguir.

Tabela II-5: Características das fontes

Radionuclídeo	^{147}Pm	^{204}Tl	$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$	$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$
Atividade nominal (mCi)	14	0,5	2	50
Espessura do invólucro de prata (mg/cm ²)	5 ± 1	20 ± 3	50 ± 5	50 ± 5
Energia média da partícula beta (MeV)	0,06	0,24	0,80	0,80
Material do filtro	Hostaphan	Hostaphan	Hostaphan	- - -
Dimensões dos filtros	1 disco de 5 cm de raio e de 100µm de espessura com um buraco central de 0,975 cm de raio.	1 disco de 4 cm de raio e de 50µm de espessura, mais 1 disco de 2,75 cm de raio e 190µm de espessura.	3 discos concêntricos, com 190µm de espessura e de raios 2, 3 e 5 cm.	- - -
Taxa de dose absorvida no ar \dot{D}_c (µGy/s)	0,4470	0,2288	2,359	520,3
Taxa de dose absorvida no tecido \dot{D}_t (µGy/s)	0,5141	0,2606	2,621	578,1
Fator de conversão	1,150	1,139	1,111	1,111
Distância de calibração (cm)	20,0	30,0	30,0	11,0
Data de referência	25.7.78	25.7.78	31.7.78	10.8.78

Tabela II-6: Fatores de transmissão T

Espessura de tecido		^{147}Pm	^{204}Tl	$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ (2mCi)	$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ (50mCi)
(mm)	(mg/cm ²)				
0	0	1,000	1,000	1,000	1,000
0,02	2	0,614	1,000	1,011	1,026
0,04	4	0,377	0,995	1,018	1,047
0,05	5	0,295	0,991	1,020	1,056
0,07	7	0,181	0,969	1,023	1,074
0,10	10	0,087	0,934	1,030	1,097
0,20	20		0,802	1,035	1,150
0,50	50			1,020	1,206
1,00	100			0,930	1,159

Tabela II-7: Características dos radionuclídeos

Radionuclídeo	Meia-vida (anos)	Energia máxima do espectro beta (MeV)	Outros tipos de radiação
^{147}Pm	2,62±0,02	0,225	0,121 MeV 0,01% radiação γ de Sm
^{204}Tl	3,78±0,04	0,763	Radiação γ de Hg
$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$	28,5±0,8	0,546 e 2,274	- - - -

Todos os dados valem nas seguintes condições climáticas:

Pressão atmosférica : 760 torr

Temperatura : 20°C

Umidade relativa do ar: 45%

II-cl.2 Câmara de extrapolação Pychlau

A câmara de extrapolação usada nesta parte do trabalho, modelo 2339, foi fabricada por Pychlau, PTW, Freiburg, Alemanha. Foi designada para a pesquisa da ionização causada na matéria por raios-X moles e partículas beta. Tem forma cilíndrica, com diâmetro externo de 12,5 cm.

A janela de entrada (diâmetro 60mm) foi feita de modo a permitir o uso de materiais de densidades superficiais diferentes, possibilitando a extrapolação para densidade nula. O material foi Mylar, de espessuras 0,02, 0,05 e 0,1 mm, correspondendo aos valores de densidade superficial 2,24, 5,60 e 11,2 mg/cm². A tensão é aplicada ao eletrodo fixo, isto é, à janela de entrada, que internamente é condutora (grafitada).

A profundidade desta câmara pode ser variada entre 0,5 e 25 mm, graças a um parafuso micrométrico externo, com possibilidade de leitura de 0,001 mm.

O eletrodo coletor é circundado por um anel de guarda, ambos ligados ao mesmo potencial, para evitar distorção das linhas do campo elétrico. Um conjunto de eletrodos coletores de diâmetros diversos (15, 20, 30 e 40 mm) e os respectivos anéis de guarda acompanham a câmara. O intervalo entre o eletrodo coletor e o anel de guarda é de 1 mm. O material destas peças pode ser latão ou algum outro escolhido. Neste caso foi usado principalmente o conjunto de grafite. Nas experiências em que não se especifique o contrário, foi usado o eletrodo coletor maior, isto é, de 40 mm de diâmetro.

O eletrodo coletor foi ligado a um eletrômetro digital Keithley, modelo 616, para medida de corrente de ionização. Para a aplicação da tensão à câmara foi usado um sistema Fluke, modelo 415 B e, para a observação desta tensão, um multímetro digital Kontron Elektronik, modelo DMM 3003A.

Assim como na calibração padrão primária, neste caso foi também mantido, a menos quando especificado o con-

trário, o campo elétrico constante de 10 V/mm entre os eletrodos da câmara.

As fontes foram montadas num banco ótico de precisão em frente à câmara.

II-cl.3 Medida da corrente de ionização

Tendo-se verificado que neste caso o valor da corrente de ionização variava em geral entre 10^{-15} e 10^{-13} A, não foi possível a medida direta da corrente com o eletrômetro digital, pois seu limite inferior de medida estava ao redor de 10^{-14} A. Foi, portanto, necessário usar-se o método de medida de carga elétrica acumulada durante um determinado intervalo de tempo. Na parte traseira do eletrômetro foi adaptado um sistema que possibilitou manter-se fixo o valor digital durante um intervalo de tempo necessário para cada medida de carga, sem prejudicar a continuação da acumulação de carga.

As medidas de carga foram em geral feitas até um total de 300 seg, em intervalos de 30 seg, para ambas polaridades da tensão aplicada. Os valores de corrente são calculados dividindo-se a diferença de carga pelo respectivo intervalo de tempo; são obtidos dois valores médios, correspondendo às duas polaridades. A média entre estes valores dá a corrente de ionização real.

Nas experiências de curva de extrapolação, a profundidade de câmara foi variada entre 0,65 e 2,50 mm, em etapas de 0,25 mm, como no caso da calibração padrão primária.

Os valores de corrente foram sempre normalizados para as condições normais de temperatura e pressão (T_0, p_0) pelo mesmo fator de correção K descrito no item II-b1.3. Foram tomados os valores de temperatura, pressão e umidade relativa do ar antes e depois de cada medida completa de corrente de ionização (para ambas polaridades e para uma determinada condição do sistema). A umidade relativa foi corrigi

da para 45%. Neste método não foram necessárias correções para os efeitos de recombinação inicial e geral, e perda de íons por difusão, por falta de uma maior sensibilidade na medida de corrente de ionização.

Por outro lado, no caso das fontes de radiação beta de baixa energia, devido à absorção e ao espalhamento da radiação pelo ar, foram feitas correções na taxa de dose absorvida dos emissores para temperatura, pressão e umidade relativa do ar. No caso de ^{90}Sr - ^{90}Y e ^{204}Tl , estes fatores são unitários, mas para ^{147}Pm tem-se, do relatório de calibração PTB, as seguintes expressões:

$$K_{\text{ar}} = 150,2 \exp\left(-14,5 \frac{p}{T}\right)$$

$$K_{\text{hum}} = 1,02 \exp(-0,0437r)$$

onde p, T são os valores de pressão e temperatura dados em unidade de kPa (1kPa = 10^3N/m^2) e K respectivamente, e r é o valor da umidade relativa do ar.

Para a determinação dos fatores de correção devidos ao decaimento das fontes tem-se, do relatório de calibração PTB, as expressões:

$$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y} : K_{\text{dec}} = \exp(-6,66 \cdot 10^{-5}\tau)$$

$$^{204}\text{Tl} : K_{\text{dec}} = \exp(-5,024 \cdot 10^{-4}\tau)$$

$$^{147}\text{Pm} : K_{\text{dec}} = \exp(-7,248 \cdot 10^{-4}\tau),$$

onde τ é o intervalo de tempo entre a data de referência de calibração e a data de medida, em dias.

II-c2. Resultados

C. Câmara de extrapolação Pychlau

C.1. Profundidade nula real

Foram necessárias duas determinações da profundidade nula real da câmara Pychlau, ou seja, para cada tipo de eletrodo coletor, metal e grafite.

Devido à impossibilidade neste caso de medida de capacitância, foram empregados um método mecânico e um gráfico.

C.1.1. Método mecânico

O instrumento utilizado foi um medidor de diferença entre alturas, muito semelhante a um paquímetro.

A câmara foi aberta, isto é, sua janela de entrada foi removida, e o parafuso micrométrico foi ajustado para profundidade nula de câmara.

Os valores médios obtidos de cerca de 20 medidas foram 0,70 e 0,65 mm para respectivamente eletrodo coletor metálico (latão) e de grafite.

C.1.2. Método gráfico

Este método só foi empregado para o caso de eletrodo coletor de grafite. Consiste na medida de corrente de ionização, variando-se a profundidade da câmara e sempre para ambas polaridades de tensão aplicada. A única diferença entre este tipo de curva obtida e o de uma curva de extrapo

lação é que tanto os valores positivos como os negativos de corrente são representados graficamente, em vez de tomar-se a média de seus valores absolutos, em função da profundidade. Além disso, os valores da profundidade são aqui os fornecidos pela leitura direta do visor do parafuso micrométrico da câmara de extrapolação, sem correções.

Nesta experiência foi usada a fonte D_2 , de ^{90}Sr - ^{90}Y , à distância de 30 cm.

A curva obtida foi representada na Fig.II-17. Pode-se observar duas retas que se cruzam num ponto diferente da origem do sistema de ordenadas.

O termo I_β será discutido na seção II-c2.C2 (variação da corrente de ionização).

O valor absoluto de d_0 , 0,65 mm, representa a profundidade nula real da câmara. Este valor coincidiu com o determinado através do método mecânico, para o caso de eletrodo coletor de grafite.

Em conclusão, estes valores revelaram-se cerca de 10 vezes maiores que aquele encontrado para a profundidade nula real da câmara de extrapolação usada na parte de calibração padrão primária.

Nas experiências de curvas de extrapolação é necessário tomar-se sempre o valor real da profundidade da câmara. Isto significa que, como na calibração primária, deve-se somar ao valor dado pelo parafuso micrométrico o da profundidade nula real aqui determinado.

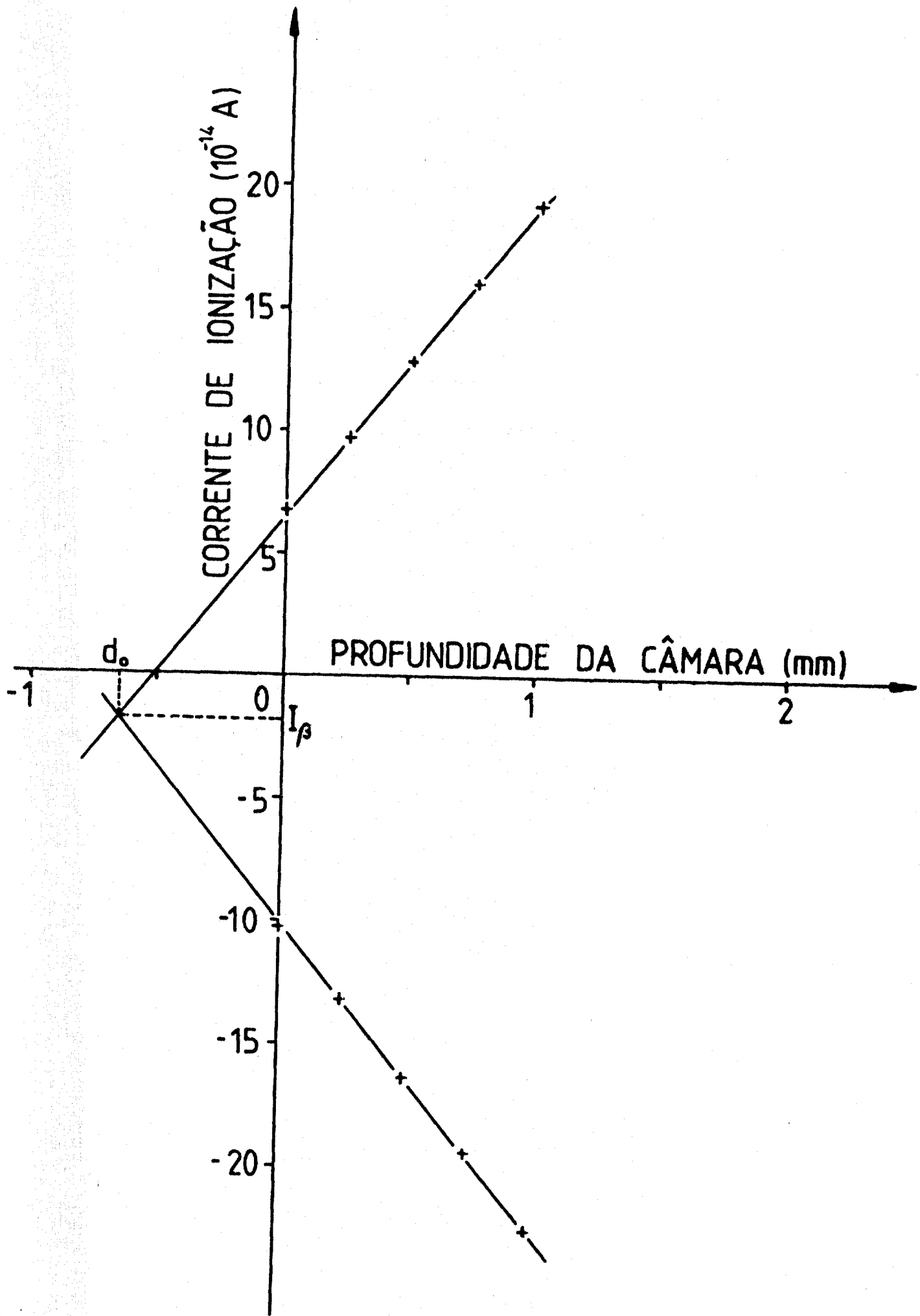


Fig.II-17: Variação da corrente de ionização em função da profundidade da câmara de extrapolação Pychlau, com a fonte $D_2: {}^{90}\text{Sr}-{}^{90}\text{Y}$ (2 mCi), à distância de 30 cm.

C.2 Variação da corrente de ionização

A fim de se caracterizar a câmara Pychlau quanto à resposta da corrente de ionização, variou-se a tensão aplicada entre -10 e +10 V, em três experiências, sendo mantida fixa a profundidade da câmara em 0,65, 1,15 e 1,65 mm. O eletrodo coletor usado foi o de grafite. A exposição à radiação beta foi feita com a fonte D₂, de ⁹⁰Sr-⁹⁰Y, à distância de 30 cm.

A Fig.II-18 apresenta os resultados obtidos, para os três valores diferentes de profundidade de câmara. Além da ocorrência de saturação, pode-se notar que as curvas não são simétricas em relação à origem do sistema de ordenadas. O ponto de simetria encontra-se abaixo da origem,

$$I_t = -4,2 \cdot 10^{-14} \text{A.}$$

Portanto, a corrente medida não representa diretamente a ionização produzida no volume sensível da câmara. Correntes de origem diferente devem estar se superpondo à corrente de ionização criada a partir da energia perdida pela radiação incidente neste volume.

Quatro correntes principais podem ser apontadas:

C.2.1. Corrente I_β

É a corrente, sempre negativa, proveniente das partículas carregadas do feixe primário (partículas beta e raios delta muito energéticos), que perdem em parte ou totalmente sua energia no eletrodo coletor. Mas o valor desta corrente depende da geometria de irradiação, principalmente da espessura do eletrodo. No caso do presente trabalho, tem-se um eletrodo coletor fino, de apenas 0,20 mm de espessura. Este valor é até mesmo menor que a própria profundidade real da câmara, não devendo representar a parte principal da corrente I_t.

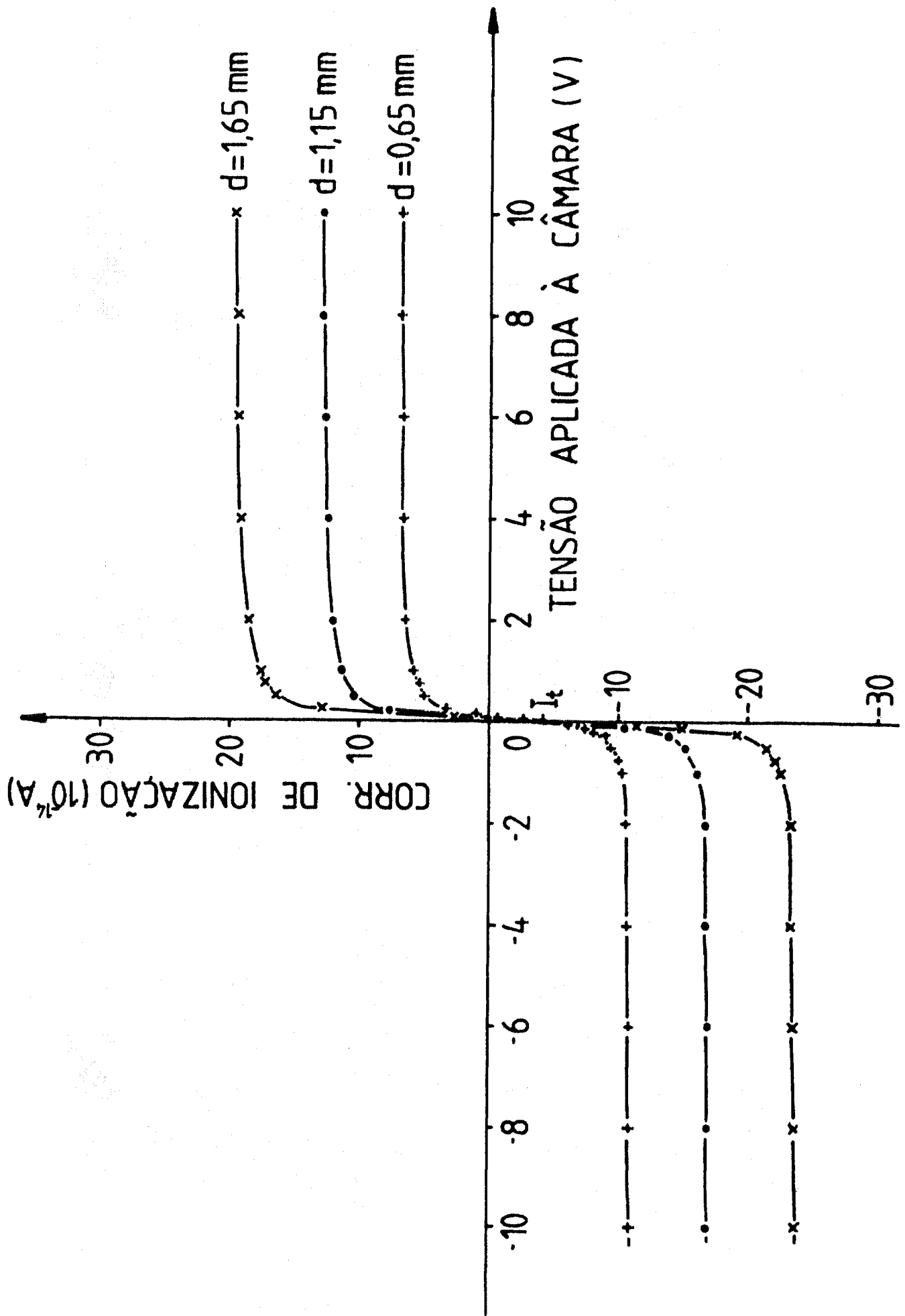


Fig. II-18: Curvas de saturação da câmara de extrapolação Pychlau, para diferentes valores de profundidade de câmara: 0,65 , 1,15 e 1,65 mm. Fonte $D_2: {}^{90}\text{Sr}-{}^{90}\text{Y}$ (2 mCi).

De fato, da Fig.II-17, onde os dados foram corrigidos (inclusive quanto ao efeito Bremsstrahlung), tem-se:

$$I_{\beta} = -1,8 \cdot 10^{-14} \text{A.}$$

C.2.2. Corrente I_0

Trata-se da corrente devida à ionização criada no volume sensível da câmara, mesmo sem a aplicação de tensão, mas expondo-a à radiação beta.

A explicação desta corrente I_0 poderia se fundamentar na existência de um campo elétrico residual entre os eletrodos. O campo seria criado pelas cargas elétricas que surgiriam no contato e na vizinhança dos eletrodos quando irradiados pelas partículas beta. Ocorreria a formação de uma carga espacial ocasionando um campo eletrostático residual. Estas cargas seriam procedentes em parte do fenômeno de retrodifusão das partículas beta e dos elétrons produzidos na matéria isolante dos eletroods.

A Fig.II-19 apresenta o resultado obtido, usando-se a fonte D_2 , à distância de 30 cm; variando-se a profundidade da câmara entre 0 e 25,5 mm, foi medida a corrente de ionização.

Nota-se que a corrente apresenta-se negativa até uma profundidade de 20 mm. No início, o comportamento é decrescente, atinge um valor mínimo de $-13,3 \cdot 10^{-14} \text{A}$ a uma profundidade de 5,5 mm, tornando-se a seguir crescente. O valor constante da corrente $I = +0,50 \cdot 10^{-14} \text{A}$ somente ocorreu a partir de 23 mm de profundidade.

Importante, entretanto, neste caso é a determinação do valor da corrente para uma profundidade nula (para comparação direta com I_{β}); I_0 é obtida por simples extrapolação da curva da Fig.II-19:

$$I_0 = -2,75 \cdot 10^{-14} \text{A.}$$

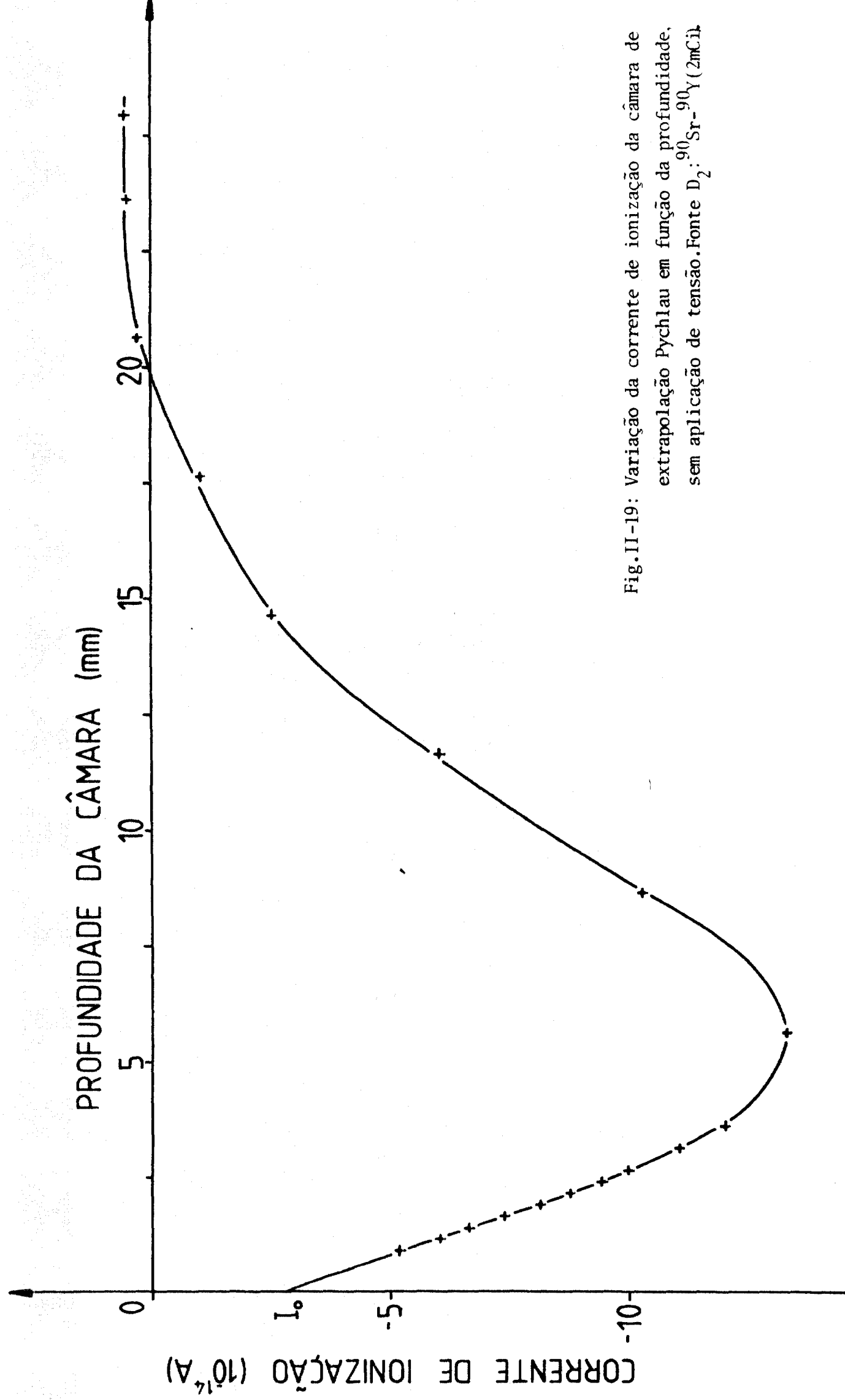


Fig.II-19: Variação da corrente de ionização da câmara de extrapolação Pychlau em função da profundidade, sem aplicação de tensão. Fonte D_2 : ^{90}Sr - ^{90}Y (2mCi).

C.2.3. Corrente parasita I_p

O efeito da radiação gama Bremsstrahlung no material da câmara e no equipamento de medida (principalmente conexões) gera uma corrente parasita. Ela pode alterar a corrente medida no caso de fontes beta de energia elevada. É, entretanto, desprezível para as fontes beta de energia baixa.

Para sua determinação é suficiente blindar-se a janela de entrada da câmara com uma chapa de chumbo.

O valor obtido no caso da fonte D_2 , a 30 cm de distância, foi

$$I_p = +2,0 \cdot 10^{-16} \text{ A.}$$

C.2.4. Corrente de fundo I_f

Esta corrente provém do ruído de fundo do equipamento de medida (câmara, aparelhos, conexões, etc...).

A medida da corrente I_f é feita afastando-se a fonte radioativa do sistema. Foi constatada uma corrente

$$I_f = +3,6 \cdot 10^{-15} \text{ A.}$$

Em conclusão, somando-se as correntes I_β , I_o , I_p e I_f , verifica-se que a corrente I_t pode ser explicada de modo satisfatório.

C.3. Curva de extrapolação

A medida da curva de extrapolação neste caso tem a finalidade de permitir a determinação dos fatores de calibração da câmara Pychlau. Esta câmara foi, então, calibrada em relação ao conjunto de fontes Buchler e depois submetida a teste com a fonte D_2 .

C.3.1. Fator de calibração

Variando-se a profundidade da câmara e a tensão aplicada, do modo habitual para a tomada de dados para curva de extrapolação, a corrente de ionização foi medida para ambas polaridades da tensão.

Durante as experiências para calibração, foi usada a janela de entrada de 0,05 mm e o eletrodo coletor de grafite de 40 mm de diâmetro. Os dados foram sempre corrigidos conforme descrito na parte experimental II-cl.3.

As Fig.II-20 e Fig.II-21 apresentam as curvas de extrapolação obtidas dos radionuclídeos de ^{90}Sr - ^{90}Y , respectivamente de 2 e 50 mCi, do conjunto padrão. As distâncias de calibração foram, neste caso, 30 e 11 cm. Os desvios padrões relativos dos valores de corrente de ionização não foram superiores a 0,80% no caso da fonte de 2 mCi e a 0,60% no caso da de 50 mCi.

Nas Fig.II-22 e Fig.II-23 estão representadas as correspondentes curvas de extrapolação para os emissores ^{204}Tl e ^{147}Pm , tomadas às distâncias de calibração respectivamente de 30 e 20 cm. Os desvios padrões relativos mostraram-se sempre menores que 2,3%. As barras de erro nos dados destas figuras mostram a variação real da corrente de ionização.

A partir destes gráficos foram obtidos os coeficientes angulares B, relacionados com os fatores de calibra

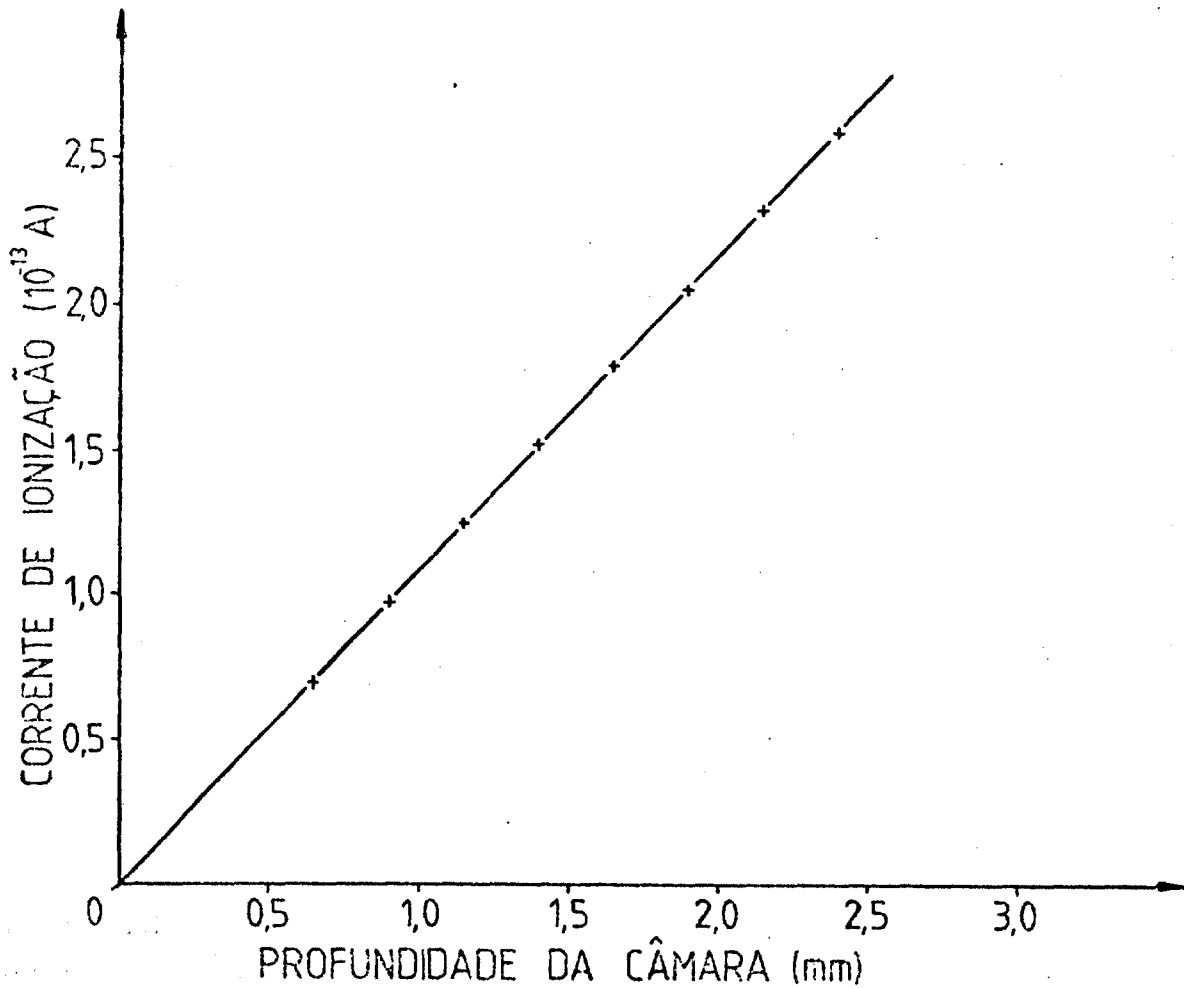


Fig.II-20: Curva de extrapolação obtida com a fonte de ^{90}Sr - ^{90}Y (2 mCi), do conjunto Buchler e a câmara de extrapolação Pychlau (janela de entrada 5,66 mg/cm²), à distância de 30 cm.

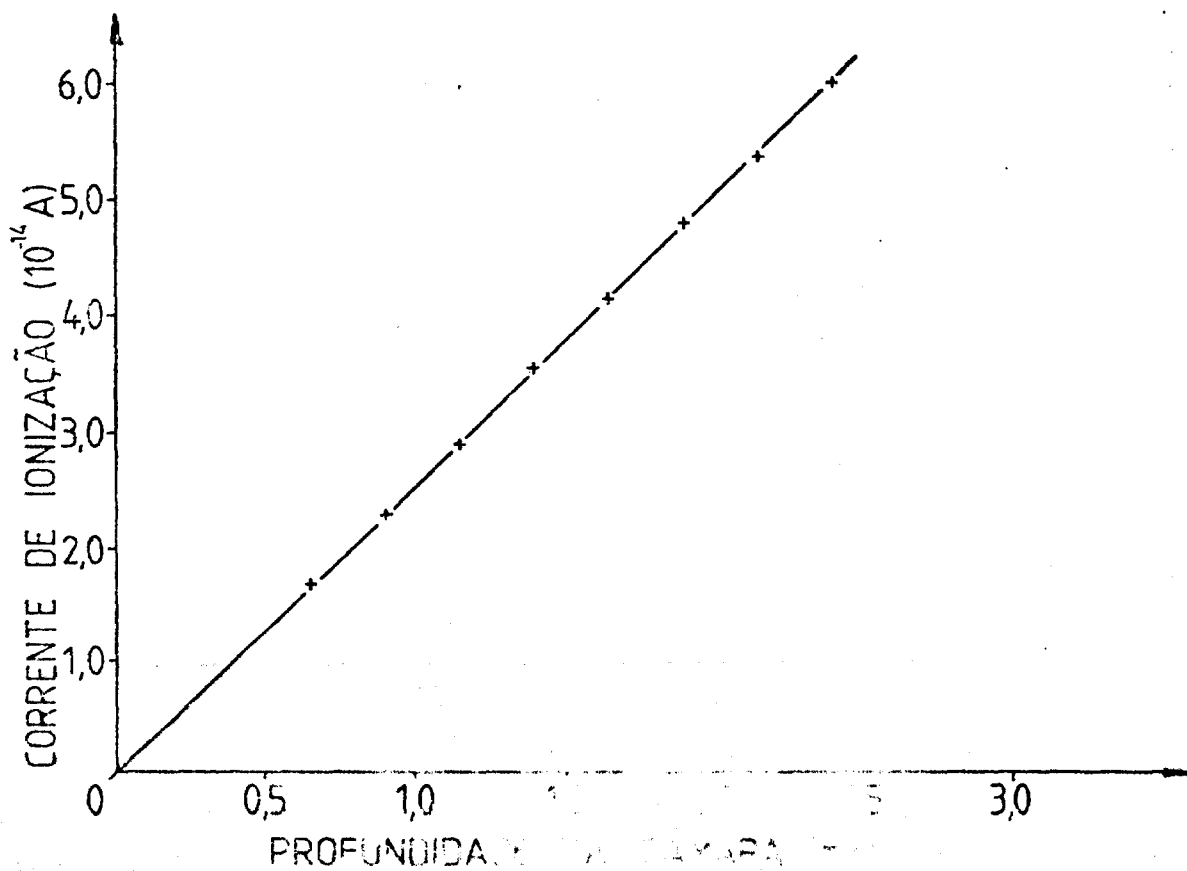


Fig.II-21: Curva de extrapolação obtida com a fonte de ^{90}Sr - ^{90}Y (50 mCi), do conjunto Buchler e a câmara de extrapolação Pychlau (janela de entrada 5,66 mg/cm²), à distância de 31 cm.

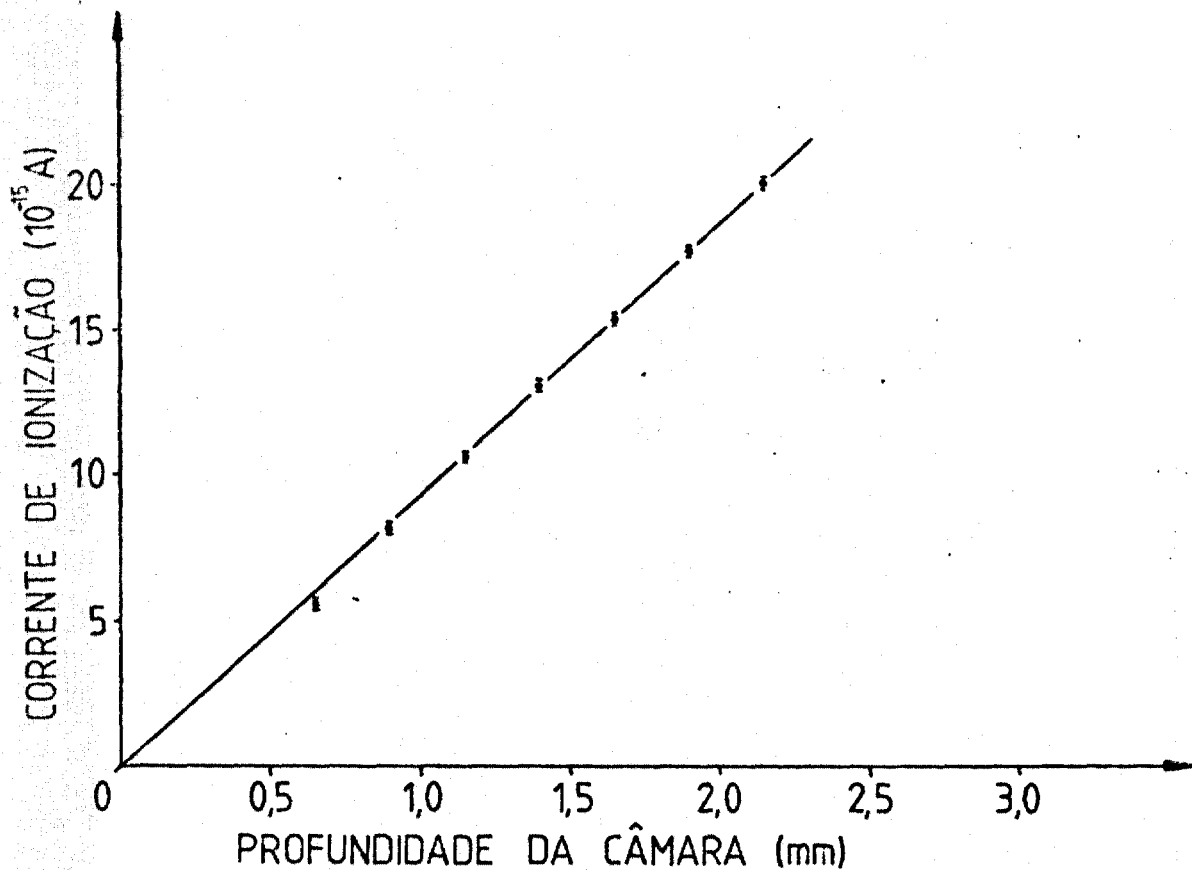


Fig.II-22: Curva de extrapolação obtida com a fonte de ^{204}Tl (0,5 mCi), do conjunto Buchler, e câmara de extrapolação Pychlau (janela de entrada $5,66 \text{ mg/cm}^2$), à distância de 30 cm.

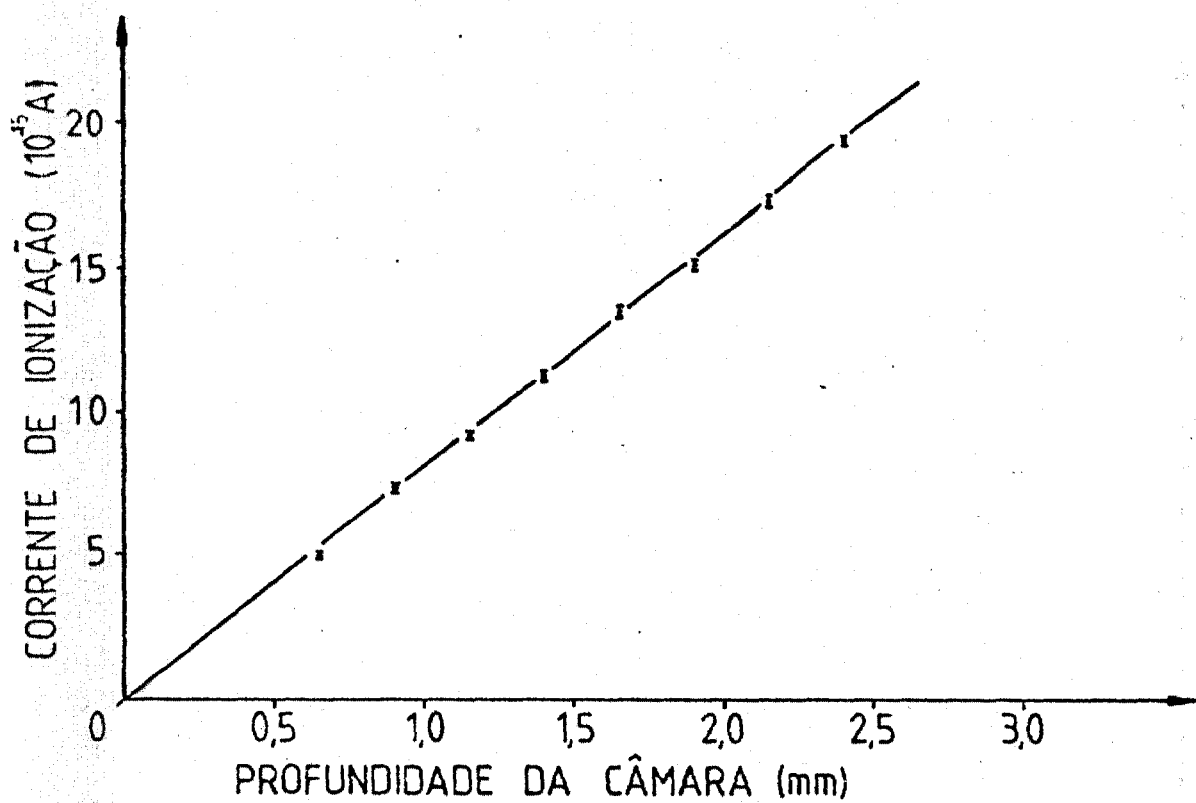


Fig.II-23: Curva de extrapolação obtida com a fonte de ^{147}Pm (14 mCi), do conjunto Buchler, e a câmara de extrapolação Pychlau (janela de entrada $5,66 \text{ mg/cm}^2$), à distância de 20 cm.

ção F, pela expressão:

$$F = \frac{\dot{D}_c}{B}$$

onde \dot{D}_c é a taxa de dose absorvida no ar.

Em todas as determinações dos coeficientes angulares, o primeiro ponto das curvas de extrapolação (para profundidade de câmara de 0,65 mm) foi desprezado, pois sempre apresentou a maior variação entre os valores de corrente de ionização para as duas polaridades de tensão.

Na Tabela II-8 foram sumarizados os principais resultados obtidos.

Tabela II-8: Fatores de calibração

Câmara Pychlau { janela de entrada: 0,05 mm (Mylar)
 eletrodo coletor : 40 mm ϕ (grafite)
 Fontes com respectivos filtros

Fonte	Distância de calibração (cm)	Coefficiente angular B(A/mm)	Fator de calibração F ($10^{+10} \frac{\text{Gy}}{\text{h}} \frac{\text{mm}}{\text{A}}$)
$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}(2\text{mCi})$	30	$1,078 \cdot 10^{-13}$	$7,805 \pm 0,055 (\pm 0,71\%)$
$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}(50\text{mCi})$	11	$2,486 \cdot 10^{-11}$	$7,463 \pm 0,029 (\pm 0,39\%)$
$^{204}\text{Tl} (0,5\text{mCi})$	30	$9,410 \cdot 10^{-15}$	$8,212 \pm 0,007 (\pm 0,08\%)$
$^{147}\text{Pm} (14\text{mCi})$	20	$8,051 \cdot 10^{-15}$	$22,305 \pm 0,049 (\pm 0,22\%)$

Estes valores de F são utilizados na determinação de taxas de dose no ar, mas atrás de uma camada de material equivalente a tecido de densidade superficial $5,657 \text{ mg/cm}^2$, que corresponde à janela de entrada da câmara. Para se obter as taxas de dose na superfície da janela (espessura nula), é suficiente aplicar-se os fatores de transmissão (item C.5), ou usar-se o método descrito na item C.7.

A taxa de dose no tecido \dot{D}_t é obtida, a partir do

valor da taxa de dose em ar, como já foi visto na seção II-b.2, ítem A.3.), usando-se o fator de correção dado pela razão entre os poderes de freamento no tecido e no ar ($s_{t,a}$), que são dependentes da energia da radiação beta.

A diferença verificada entre os fatores de calibração para as duas fontes de ^{90}Sr - ^{90}Y deve-se principalmente às diferenças nas condições experimentais (distância de calibração, uso de filtro homogeneizante).

Medindo-se a curva de extrapolação até 25,0 mm de profundidade de câmara, ao invés de somente até 2,50 mm, foi possível observar-se que a linearidade inicial não ocorria até muito além de 5 mm. Foram feitas medidas para as fontes de radiação beta em questão. Notou-se que quanto mais alta a energia da radiação incidente, maior a profundidade da câmara até a qual a linearidade da curva ocorria.

C.3.2. Determinação da taxa de dose

A fonte de ^{90}Sr - ^{90}Y , denominada D_2 (2mCi), foi utilizada num teste para a calibração efetuada da câmara Pychlau. A exposição à radiação foi feita em condições idênticas às da calibração. Após todas as correções necessárias, os valores de corrente de ionização foram representados em função da profundidade da câmara. A Fig.II-24 apresenta sua curva de extrapolação. Os desvios padrões médios da corrente não foram superiores a 0,70%.

O coeficiente angular obtido foi:

$$B = 12,651 \cdot 10^{-14} \text{ A/mm.}$$

Usando-se o fator de calibração correspondente a este caso,

$$F = 7,805 \cdot 10^{10} \frac{\text{Gy}}{\text{h}} \frac{\text{mm}}{\text{A}},$$

pode-se determinar a taxa de dose absorvida no ar

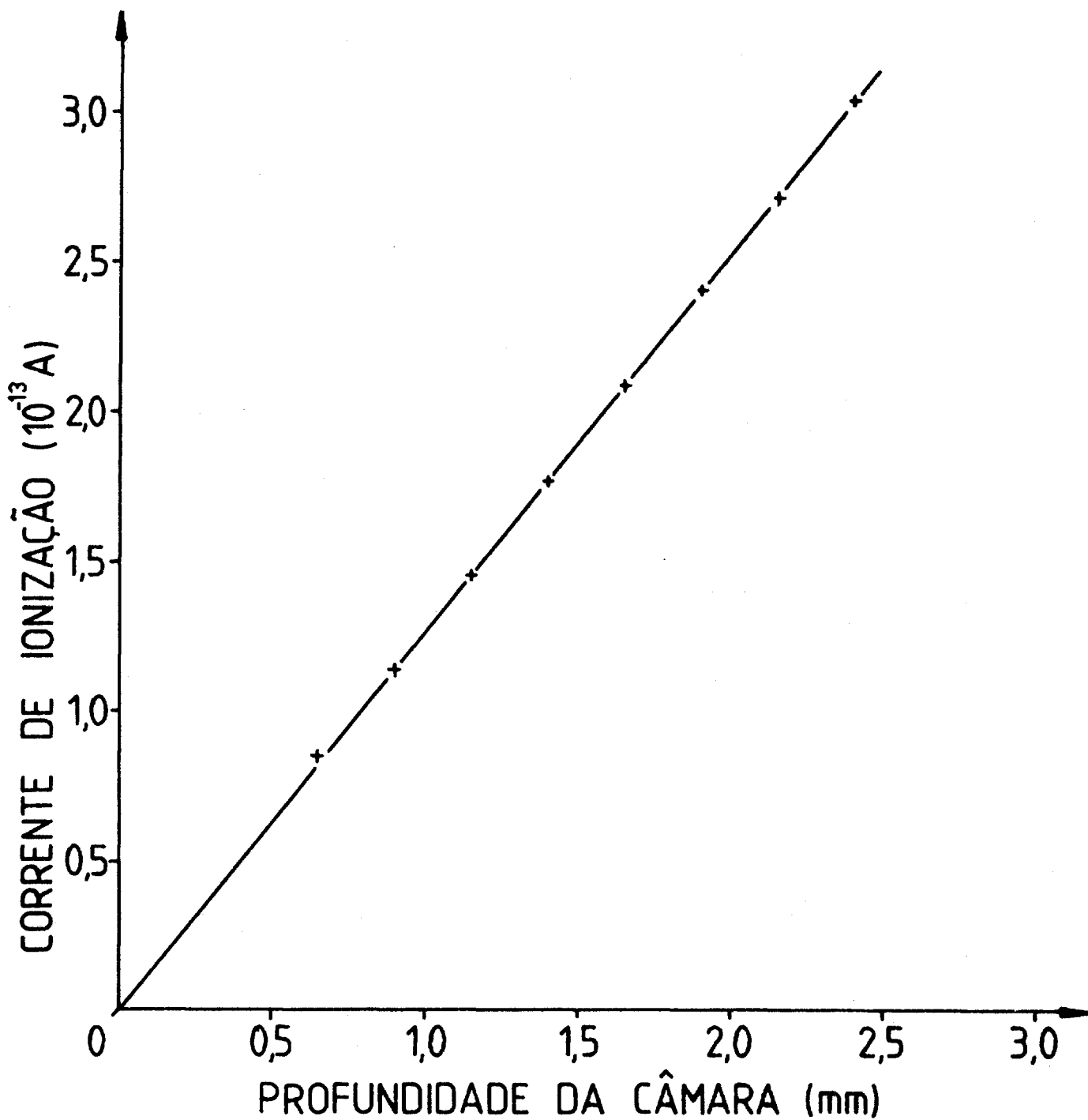


Fig.II-24: Curva de extrapolação obtida com a fonte $D_2: {}^{90}\text{Sr}-{}^{90}\text{Y}$ (2 mCi) e a câmara de extrapolação Pychlau (janela de entrada $5,66 \text{ mg/cm}^2$), à distância de 30 cm.

$$\dot{D}_c = 9,874 \cdot 10^{-3} \text{ Gy/h.}$$

Este é portanto o valor determinado experimentalmente. Da calibração padrão primária foi obtido o valor de sua taxa de dose absorvido no ar \dot{D}_c que, após as correções necessárias, dá

$$\dot{D}_c = 9,881 \cdot 10^{-3} \text{ Gy/h.}$$

Comparando-se os dois valores, nota-se uma concordância excelente. A diferença é menor que 0,1%.

C.5.3. Influência do valor do campo elétrico

A fim de verificar uma possível influência do valor do campo elétrico na determinação do fator de calibração, foram feitas diversas experiências. Foram medidas curvas de extrapolação, mantendo-se constantes tanto a tensão aplicada à câmara como o campo elétrico, usando-se a fonte D_2 , à distância de calibração (30 cm).

No primeiro caso, fixou-se o valor da diferença de potencial entre os eletrodos da câmara em 5, 10, 25, 30, 50, 100 e 250 V. Para cada uma destas condições foi medida uma curva de extrapolação e determinado um fator de calibração. Os valores apresentaram uma variação de apenas 0,41% e o valor médio, em relação ao fator de calibração obtido com a condição habitual de campo elétrico constante de 10 V/mm, mostrou uma diferença de 3,59%.

O valor do campo elétrico, no segundo caso, foi mantido constante, no decorrer da medida de cada curva de extrapolação, em 10, 20, 30, 40 e 50 V/mm. Os valores de fator de calibração variaram dentro de 0,45%. O valor médio entre eles diferiu de 0,35% do de 10 V/mm.

Em resumo, tem-se que, enquanto a determinação do fator de calibração praticamente independe do valor cons-

tante usado para o campo elétrico aplicado entre os eletrodos (no intervalo de 10 a 50 V/mm), no caso de tensão constante (e portanto campo elétrico variável) pode-se introduzir um erro de 3,59% no valor do fator de calibração.

Estes resultados mostram portanto a conveniência da utilização de campo elétrico constante nas medidas com câmara de extrapolação.

C.3.4. Influência do diâmetro do eletrodo coletor

Um conjunto de eletrodos coletores de diversos diâmetros faz parte do sistema da câmara de extrapolação Pychlau, como já foi descrito na parte experimental. A finalidade é permitir, conforme o caso, a escolha do eletrodo mais adequado.

Foram feitas as medidas para as curvas de extrapolação, usando-se as fontes do conjunto padrão Buchler, de ^{147}Pm , ^{204}Tl e ^{90}Sr - ^{90}Y (2mCi), para todos os eletrodos coletores de grafite (10, 15, 20, 30 e 40 mm de diâmetro). A janela de entrada foi a de espessura 0,02 mm e as distâncias entre as fontes e a câmara foram as de calibração.

Os fatores de calibração F obtidos das curvas de extrapolação foram representados em função dos valores da área A do eletrodo coletor na Fig.II-25, para cada fonte. Pode-se observar em cada caso um comportamento decrescente da forma:

$$F = \frac{a}{A^b}$$

onde a e b são constantes.

O fator de calibração depende, portanto, de forma marcante da área do eletrodo coletor. Com estes resultados, pode-se trocar o eletrodo conforme a necessidade, para determinações de taxas de dose tanto baixas como altas.

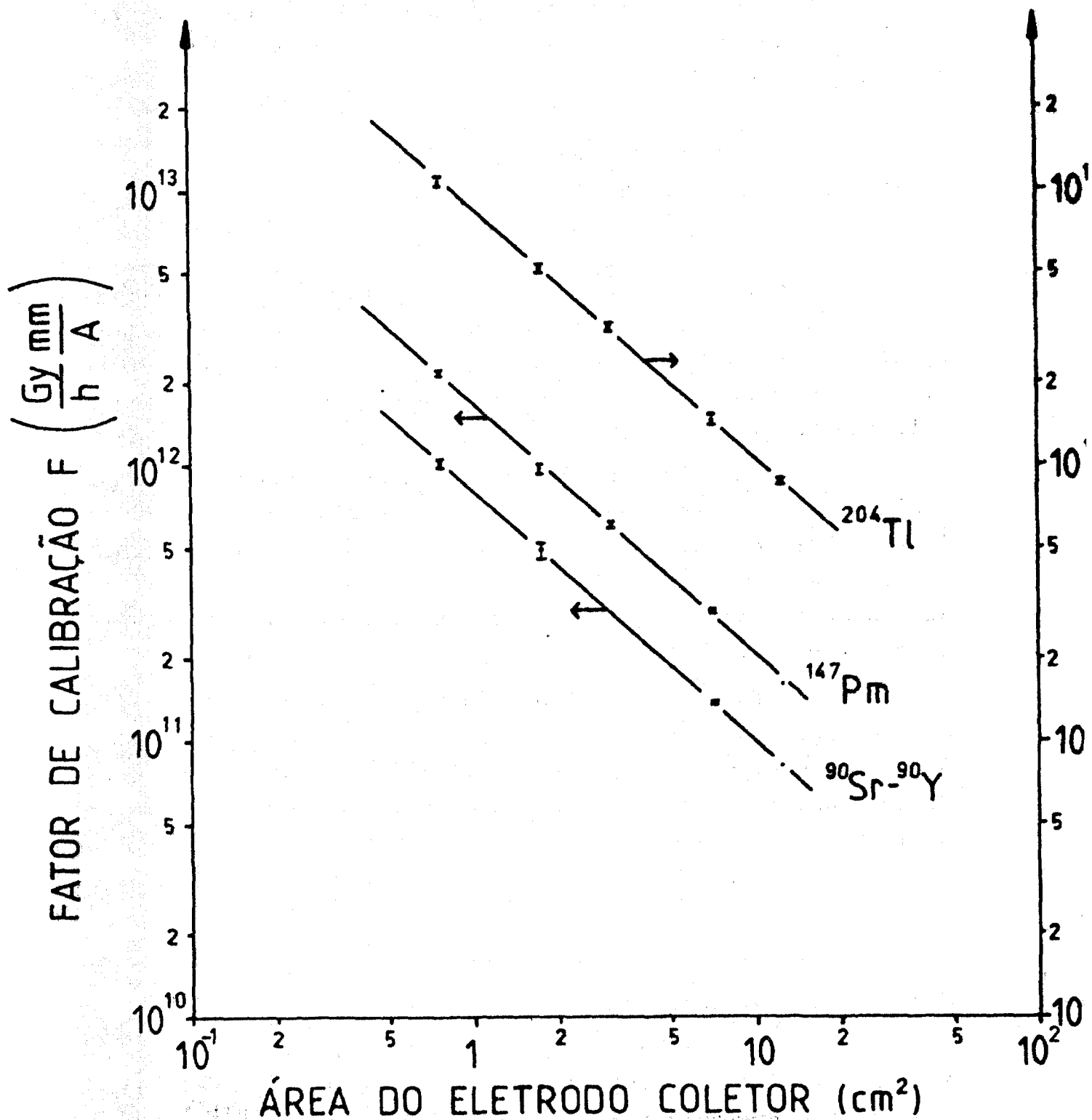


Fig. 11-25: Efeito da área do eletrodo coletor de grafite da câmara de extrapolação Pycblau no valor do fator de calibração, para as fontes de $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$, ^{204}Tl e ^{147}Pm .

C.4. Variação com a distância

Como no caso da calibração em termos de padronização primária, a câmara de extrapolação Pychlau foi exposta às fontes, variando-se a distância entre eles.

A tensão aplicada e a profundidade da câmara foram mantidas fixas em 10 V e 1,00 mm respectivamente. A espessura da janela de entrada foi de 0,05 mm e o diâmetro do eletrodo coletor de grafite, de 40 mm.

No caso da fonte de ^{90}Sr - ^{90}Y (2mCi), a distância entre a câmara e o emissor radioativo foi variada entre 12 e 100 cm. O valor da corrente de ionização variou entre $1,6025 \cdot 10^{-12}$ e $1,5644 \cdot 10^{-14}$ A e o desvio padrão relativo foi sempre menor que 1,2%. A Fig.II-26 apresenta o resultado obtido: após as correções necessárias para a corrente de ionização, ela foi representada em função da distância em questão. Observou-se a validade da lei do inverso do quadrado da distância, entre 25 e 100 cm. Como a corrente de ionização está diretamente relacionada com a taxa de dose absorvida, tem-se:

$$\dot{D}(a) = \dot{D}(a = 30 \text{ cm}) \frac{(30)^2}{a^2}$$

Para o emissor ^{204}Tl , a distância entre fonte e câmara foi variada entre 12 e 40 cm. A corrente de ionização apresentou valores entre $1,2479 \cdot 10^{-13}$ e $8,4956 \cdot 10^{-15}$ A, com desvio padrão relativo nunca superior a 1,90%. Foi assim obtido o comportamento da corrente em função da distância na Fig.II-27. Neste caso, no intervalo de 20 a 40 cm, vale também a lei do inverso do quadrado da distância. E tem-se para \dot{D} o mesmo tipo de expressão que para ^{90}Sr - ^{90}Y .

O intervalo de variação da distância entre a fonte de ^{147}Pm e a câmara foi de 12 a 25 cm. O valor da corrente de ionização variou entre $2,1498 \cdot 10^{-13}$ e $2,9396 \cdot 10^{-15}$ A, com desvio padrão relativo não superior a 1,7%, exceto para 25 cm (3,9%). A Fig.II-28 apresenta o resultado obtido. Como se pode observar, o comportamento não segue a lei do inver-

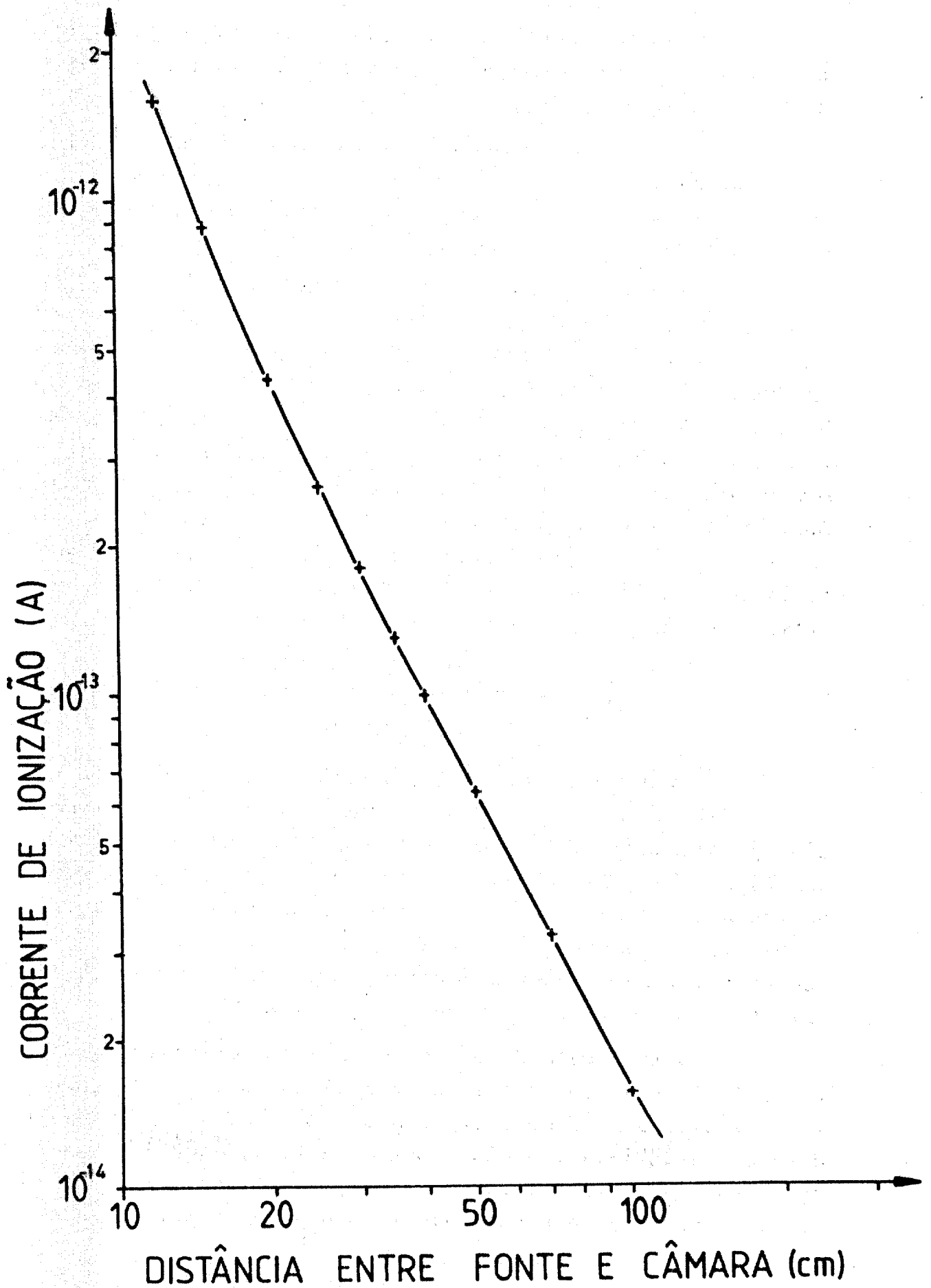


Fig.II-26: Variação da corrente de ionização com a distância entre a câmara de extrapolação Pychlau e a fonte de ^{90}Sr - ^{90}Y (2 mCi).

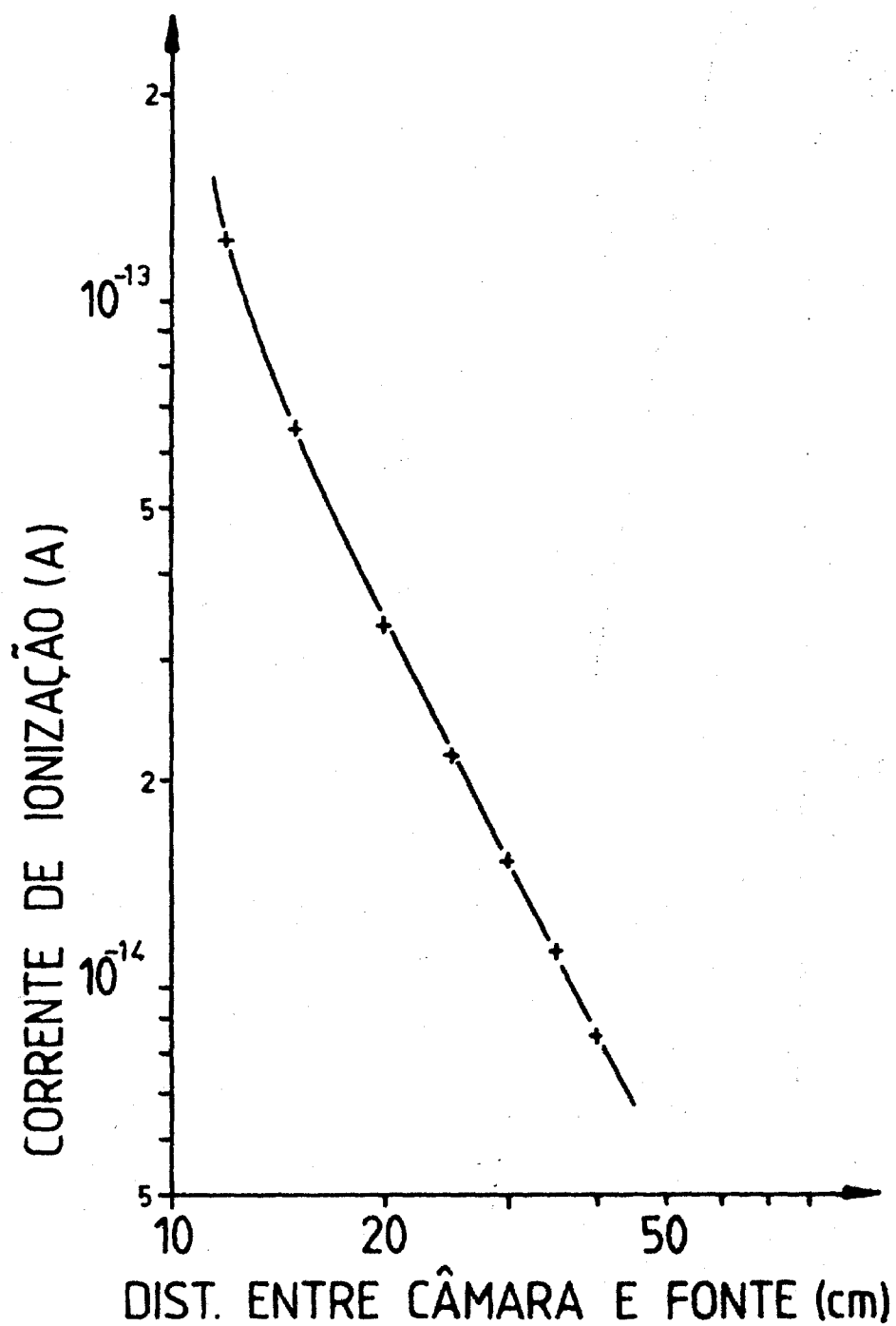


Fig.II-27: Variação da corrente de ionização com a distância entre a câmara de extrapolação Pychlau e a fonte de ^{204}Tl (0,5 mCi).

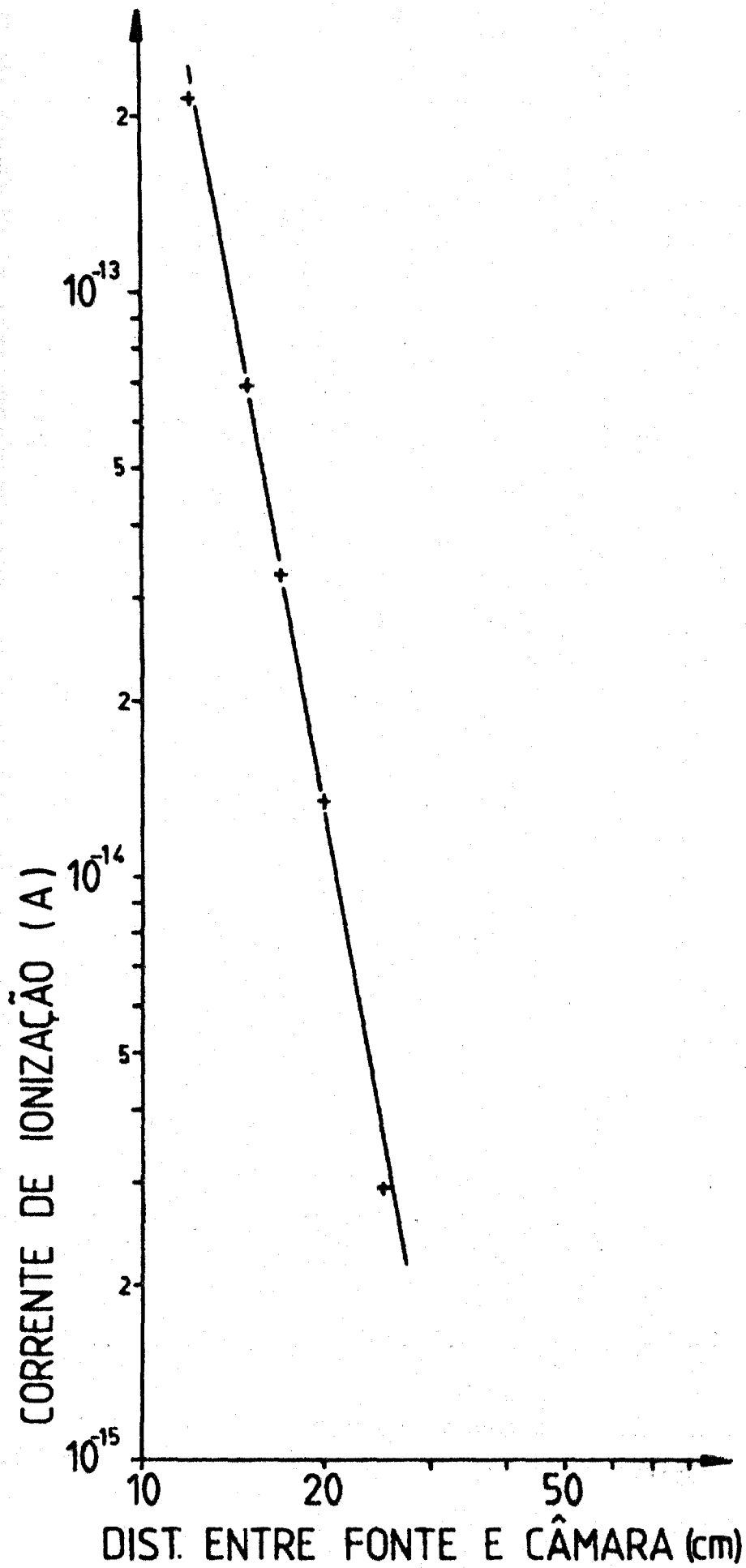


Fig.II-28: Variação da corrente de ionização com a distância entre a câmara de extrapolação Pychlau e a fonte de ^{147}Pm (14 mCi).

so do quadrado da distância. Nos casos de radiação beta de baixa energia é necessário considerar-se ainda a atenuação aproximadamente exponencial.

Como um teste complementar, foi estudada também a variação com a distância da radiação da fonte D_2 , de ^{90}Sr - ^{90}Y . A experiência foi feita nas mesmas condições que por ocasião da calibração padrão primária, para possibilitar uma comparação direta. A Fig.II-29 mostra o resultado obtido neste caso (curva a) e a da calibração padrão primária (curva b). As duas retas são paralelas, fornecendo para a taxa de dose a mesma expressão:

$$\dot{D}(a) = \dot{D}(a = 30 \text{ cm}) \frac{(30,46)^2}{(a + 0,46)^2}$$

com validade entre 20 e 40 cm.

Este resultado constitui mais uma prova do bom funcionamento e da confiabilidade tanto do método usado como da própria câmara Pychlau. A diferença entre os valores absolutos das medidas dos dois casos deve-se ao fato das câmaras usadas não serem idênticas, principalmente o volume de medida e material constituinte das paredes da câmara.

C.5. Fator de transmissão

Foram determinados os fatores de transmissão para cada uma das fontes do conjunto Buchler, como mais uma etapa da calibração padrão secundária da câmara Pychlau. Para se conhecer a dose profunda no tecido, estes dados são essenciais, principalmente em planejamento de dose para radioterapia.

No decorrer destas experiências, o campo elétrico entre os eletrodos da câmara foi mantido constante. A distância entre a fonte e o detector também não foi variada para cada fonte. Foi usada a distância de calibração de cada uma. Em todos os casos a espessura da janela de entrada da câmara foi 0,02 mm e o diâmetro do eletrodo coletor, 40 mm,

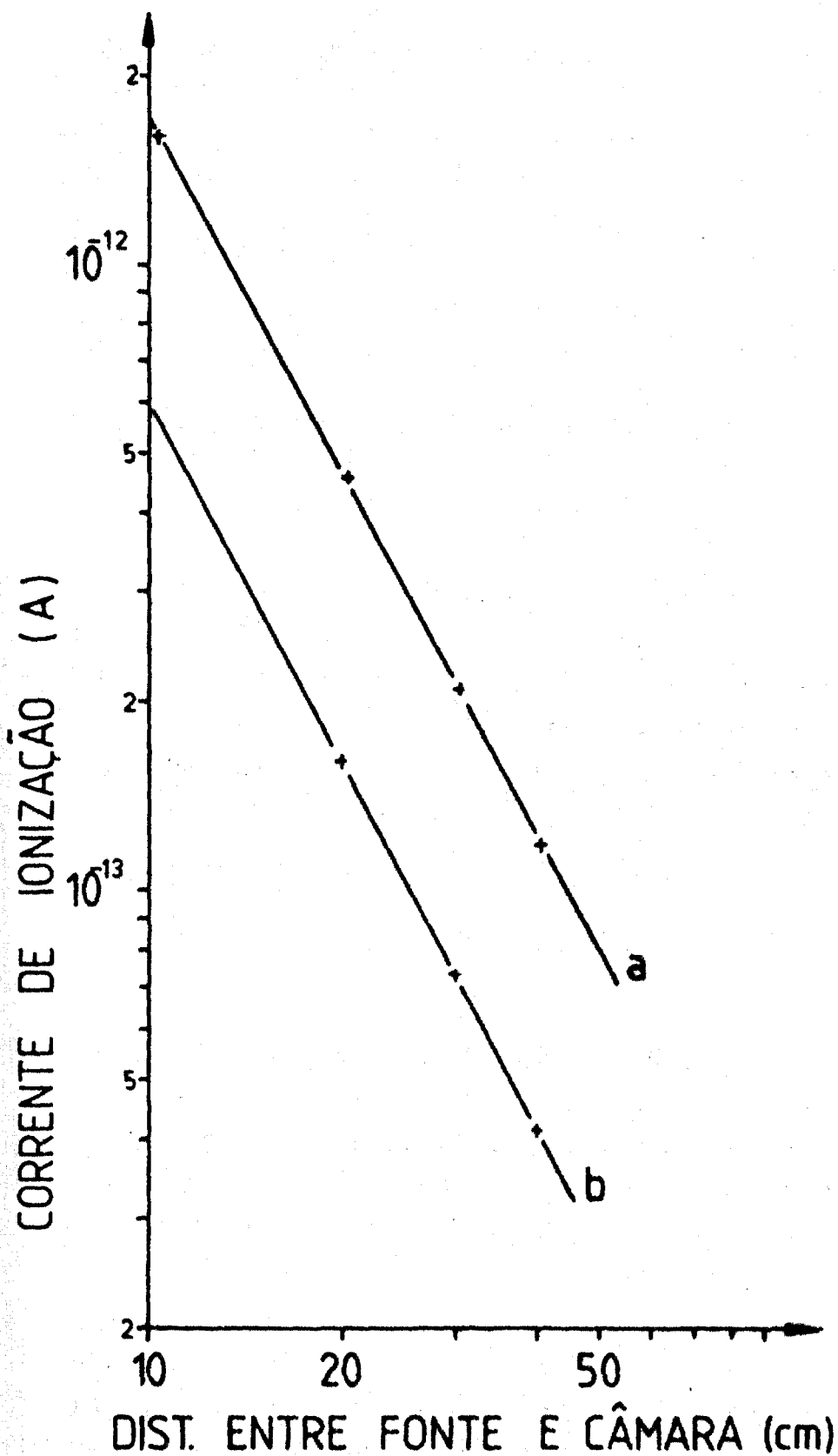


Fig.II-29: Variação da corrente de ionização com a distância entre a fonte $D_2: {}^{90}\text{Sr}-{}^{90}\text{Y}$ (2 mCi) e a.câmara de extrapolação Pychlau
 b.câmara de extrapolação PTB

para permitir sensibilidade máxima.

Quanto ao método, foi o mesmo já descrito no caso da calibração padrão primária, cobrindo-se sucessivamente a janela da câmara com as placas absorvedoras adicionais e medindo-se a corrente de ionização. A espessura destes absorvedores variou entre 2,5 e 300 μm (folhas de plástico Hostaphan, Melinex) e entre 1,0 e 2,0 mm (placas de Plexiglas), dependendo da fonte.

C.5.1. Fonte de ^{147}Pm

Neste caso só foi possível variar-se a espessura do absorvedor entre 2,5 e 75 μm , por causa do curto alcance desta radiação de baixa energia. A corrente de ionização apresentou variação no intervalo de $1,8583 \cdot 10^{-14}$ e $2,1248 \cdot 10^{-15}\text{A}$, correspondendo ao caso sem placa absorvedora adicional e de 75 μm . O desvio padrão relativo foi sempre inferior a 3,0%, exceto pelo último ponto (75 μm), 6,4%. Representando-se os valores de corrente de ionização em função da densidade superficial da camada absorvedora equivalente a tecido, e extrapolando-se a curva para densidade nula, foram determinados os fatores de transmissão.

Na Fig.II-30 tem-se a curva a do fator de transmissão obtida em função da densidade superficial da camada absorvedora. Para comparação foi também apresentada a curva b, que representa os dados fornecidos pelo laboratório de padronização primária PTB, no relatório que acompanha o conjunto Buchler. Pode-se notar que ambas as curvas são funções decrescentes, não coincidentes. A diferença atribuiu-se ao fato das janelas de entrada das duas câmaras terem espessuras desiguais (0,56 e 2,26 mg/cm^2 respectivamente da câmara primária e secundária).

A Tabela II-9 apresenta os fatores de transmissão obtidos com a câmara Pychlau e os fornecidos pelo relatório PTB.

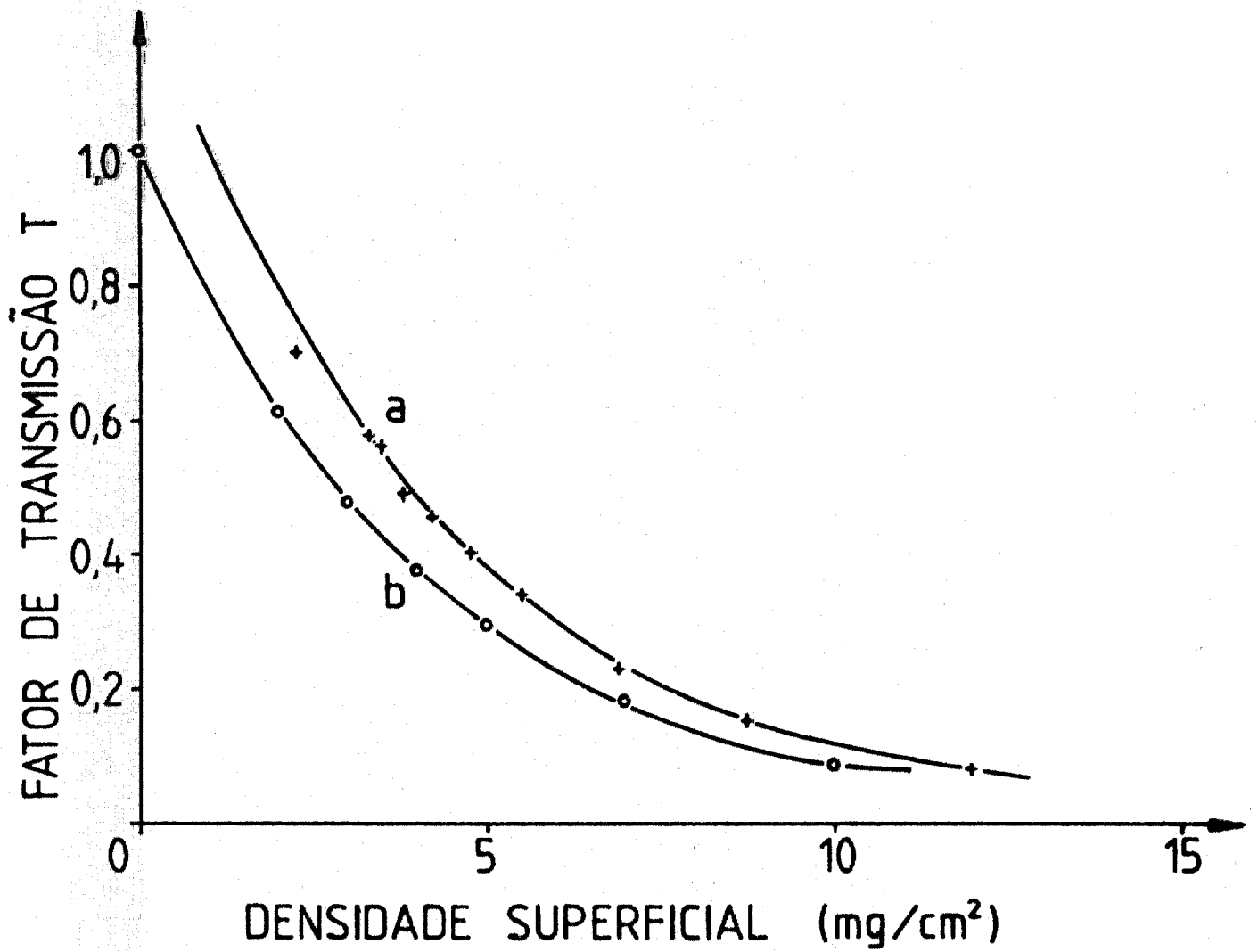


Fig.II-30: Fatores de transmissão para a fonte de ^{147}Pm (14 mCi) em camada absorvedora equivalente a tecido e

- a. Câmara de extrapolação Pychlau (janela de entrada de $2,26 \text{ mg/cm}^2$)
- b. Câmara de extrapolação PTB (janela de entrada de $0,56 \text{ mg/cm}^2$).

Tabela II-9: Fatores de transmissão T
 Fonte de ^{147}Pm .

Espessura de (mm)	tecido (mg/cm ²)	T	T
		câmra Pychlau janela: 2,26 mg/cm ²	câmara PTB janela: 0,56 mg/cm ²
0	0	-	1,000
0,01	1	1,000	0,785
0,02	2	0,800	0,614
0,03	3	0,622	0,477
0,04	4	0,485	0,377
0,05	5	0,382	0,295
0,06	6	0,297	0,227
0,07	7	0,232	0,181
0,08	8	0,182	0,132
0,09	9	0,145	0,105
0,10	10	0,117	0,087

Para se comprovar o fato da diferença obtida, foi realizada uma outra experiência semelhante, usando-se uma janela de outra espessura (0,05 mm) e conservando-se todas as outras condições experimentais. Desta vez a espessura máxima do absorvedor adicional foi 50 μm . A corrente de ionização variou entre $1,4683 \cdot 10^{-14}$ e $2,9912 \cdot 10^{-15}\text{A}$, e o desvio padrão relativo não se apresentou superior a 6,8%. A curva a do fator de transmissão em função da densidade superficial da camada absorvedora intermediária foi representada na Fig.II-31. A curva b é, novamente, a dos dados obtidos pela calibração primária. Neste caso, a diferença entre os resultados é ainda maior que na Fig.II-30, pois as espessuras foram 0,56 e 5,66 mg/cm² respectivamente para câmara primária e secundária.

Usando-se os dados obtidos nestas duas experiências foi possível, por meio de extrapolação, normalizar os dados da câmara de Pychlau para o mesmo valor da espessura da janela de entrada da câmara de extrapolação primária PTB, ou seja, 0,56 mg/cm². Desta vez as duas curvas apresentaram

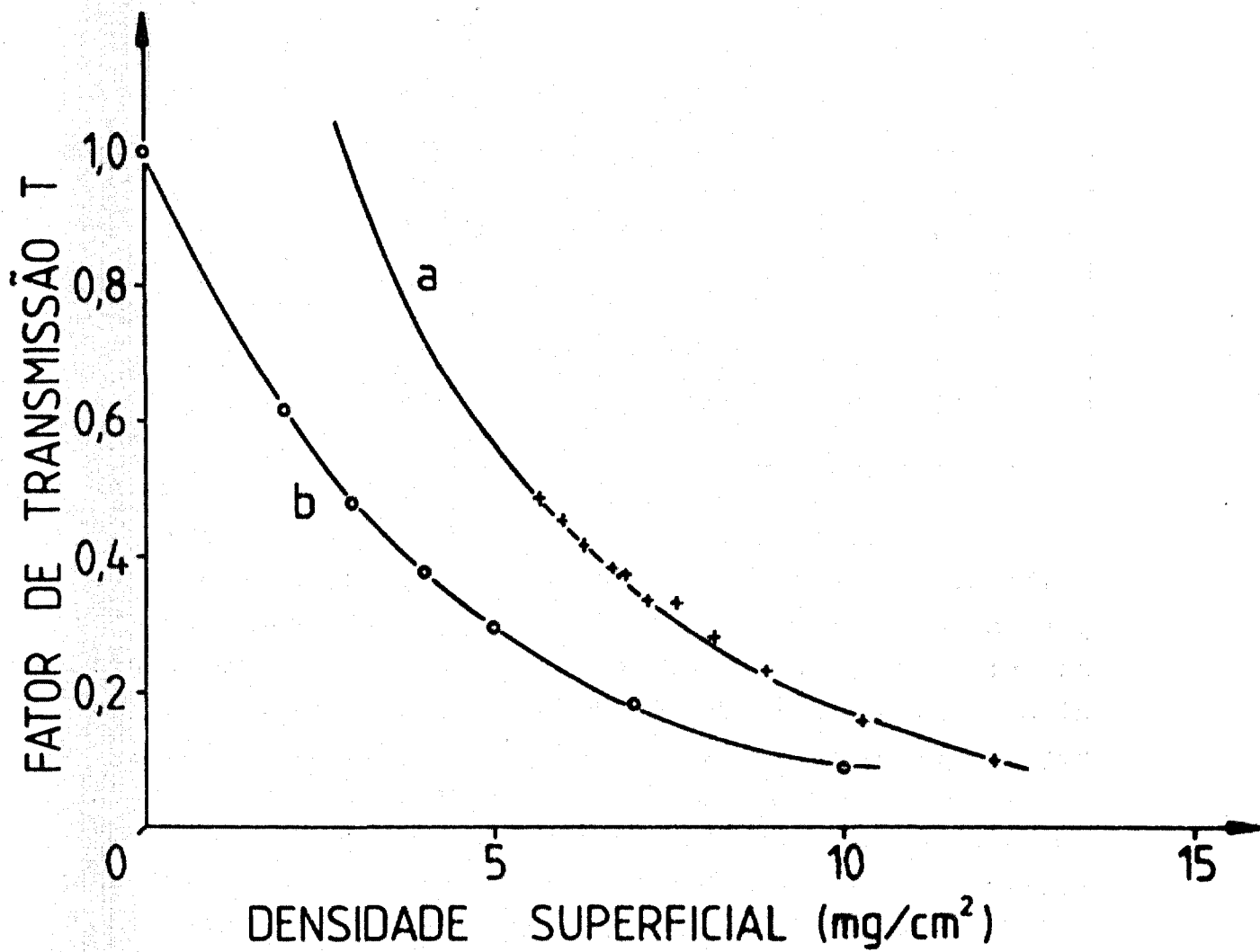


Fig.II-31: Fatores de transmissão para a fonte de ^{147}Pm (14 mCi) em camada absorvedora equivalente a tecido e
 a. Câmara de extrapolação Pychlau (janela de entrada 5,66 mg/cm²)
 b. Câmara de extrapolação PTB (janela de entrada 0,56 mg/cm²).

uma ótima concordância, como pode ser visto na Fig.II-32 (curvas a e b).

Este resultado demonstra, mais uma vez, a validade do método usado e o perfeito funcionamento da câmara Pychlau.

Na Fig.II-32 foi ainda representada a curva c do fator de transmissão em função da densidade superficial do absorvedor, para o caso extremo de espessura nula de janela de entrada da câmara.

A experiência com a janela de entrada de 0,05 mm poderia ter sido substituída por uma outra mais simples, onde seria suficiente determinar-se fatores de calibração F para diferentes espessuras de janela de entrada. Estes fatores foram determinados no item C.7., sobre a dependência com a energia. Usando-se estes dados foi possível comparar-se os resultados obtidos nas experiências descritas no presente item e uma concordância perfeita foi observada.

C.5.2. Fonte de ^{204}Tl

A espessura das placas absorvedoras neste caso variou entre 8 e 300 μm ; a corrente de ionização apresentou-se entre $1,5640 \cdot 10^{-14}$ e $7,8607 \cdot 10^{-15}\text{A}$, respectivamente resultantes das condições sem absorvedor e com o de espessura máxima. O desvio padrão relativo revelou-se sempre inferior a 3,5%. Seguindo-se o procedimento usual, foi obtida a curva a da Fig.II-33. Em comparação com o comportamento da radiação de ^{147}Pm , pode-se observar que neste caso a queda é bem mais lenta. A curva b representa os dados fornecidos pelo laboratório primário. A diferença entre os dois comportamentos pode ser explicada como no caso anterior. Levando-se em conta a diferença existente na espessura das janelas de entrada das duas câmaras usadas, obtém-se a superposição dos resultados.

Os fatores de transmissão estão apresentados na Tabela II-10.

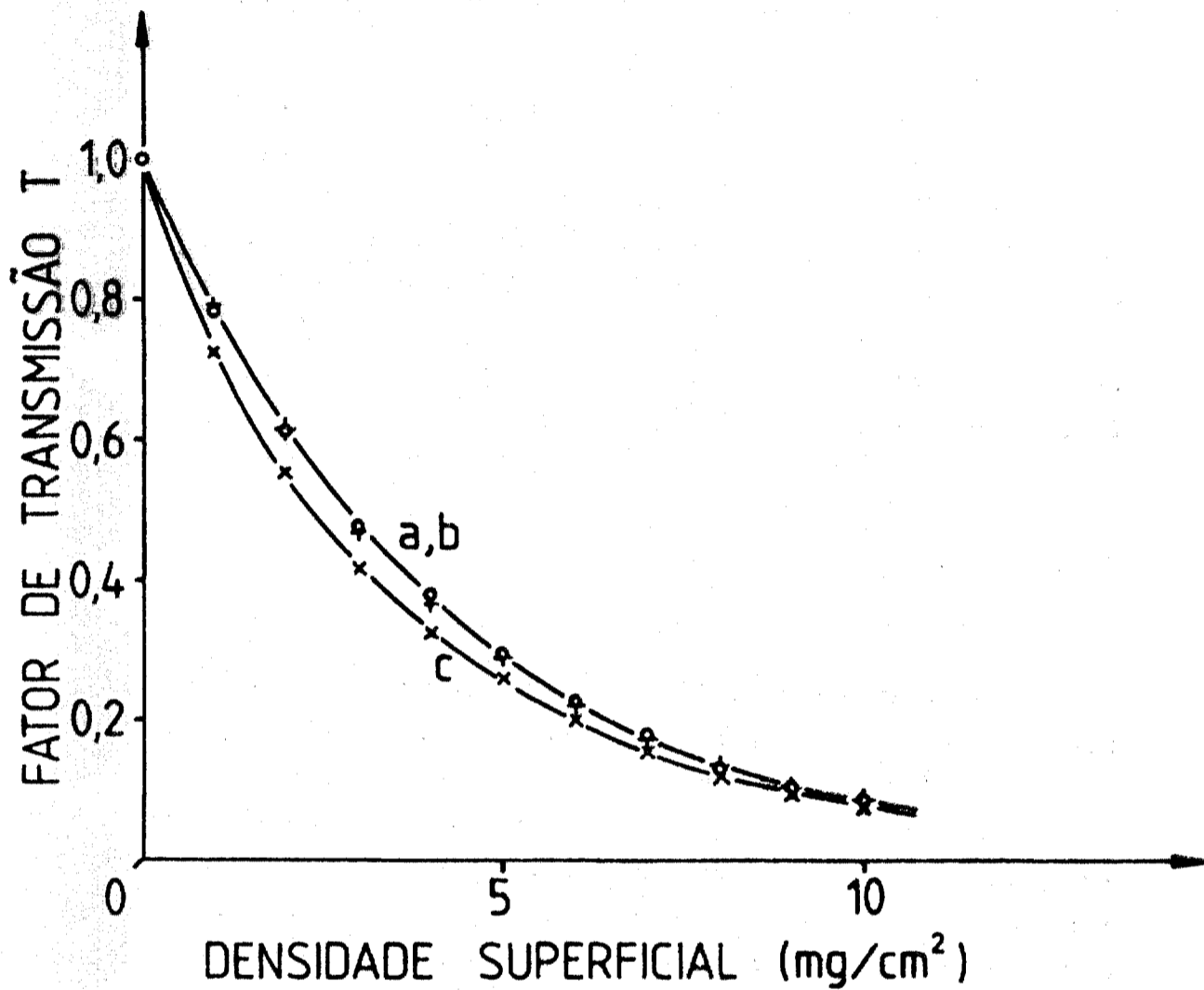
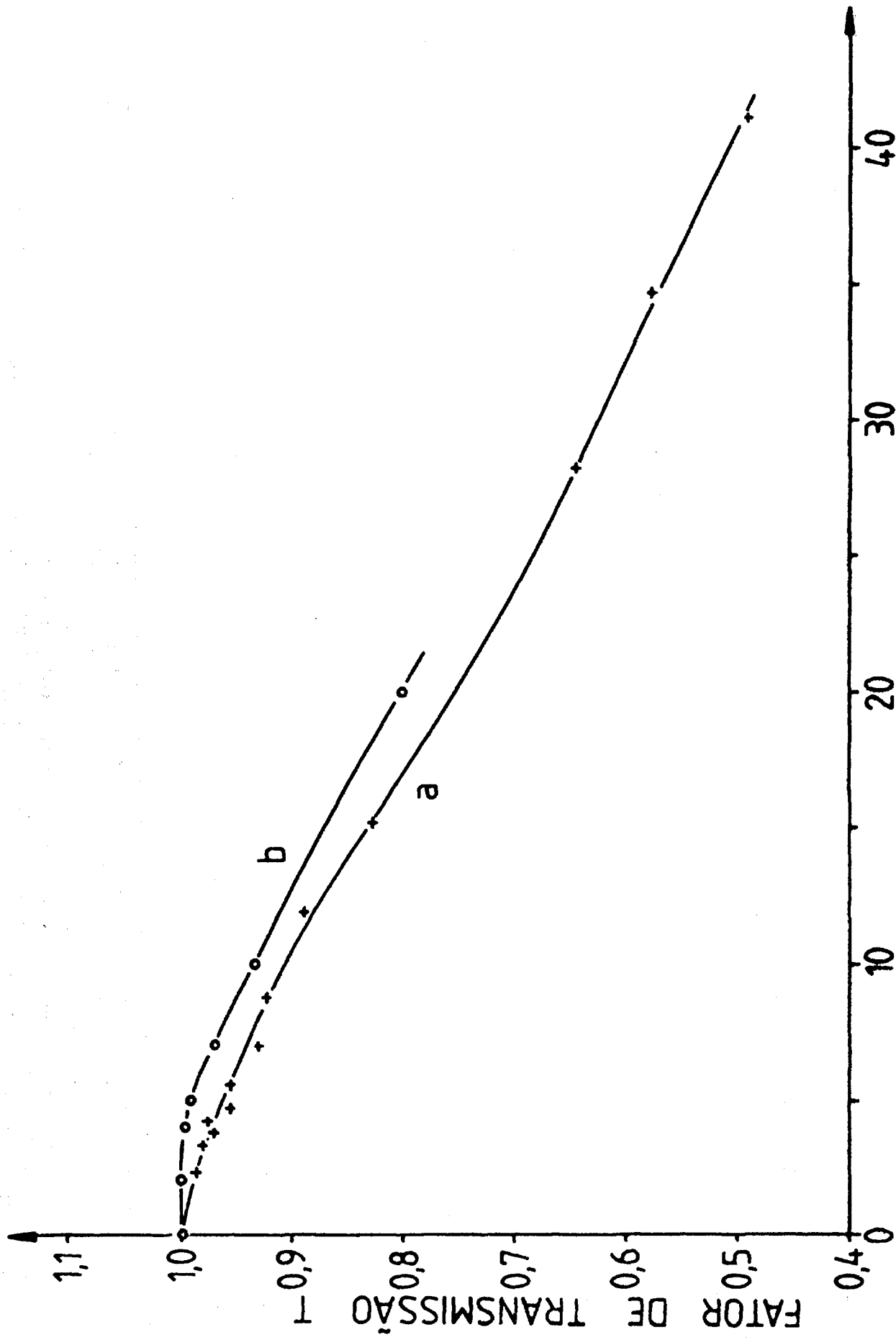


Fig.II-32: Fatores de transmissão para a fonte de ^{147}Pm (14 mCi) em camada absorvedora equivalente a tecido e

- Câmara de extrapolação Pychlau (janela de entrada $0,56 \text{ mg/cm}^2$)
- Câmara de extrapolação PTB (janela de entrada $0,56 \text{ mg/cm}^2$)
- Câmara de extrapolação Pychlau (janela de entrada de espessura nula).



DENSIDADE SUPERFICIAL (mg/cm²)

Fig. II-33: Fatores de transmissão para a fonte de ²⁰⁴Tl (0,5 mCi) em camada absorvedora equivalente a tecido e
 a. Câmara de extrapolação Pychlau (janela de entrada 2,26 mg/cm²)
 b. Câmara de extrapolação PTB (janela de entrada 0,56 mg/cm²).

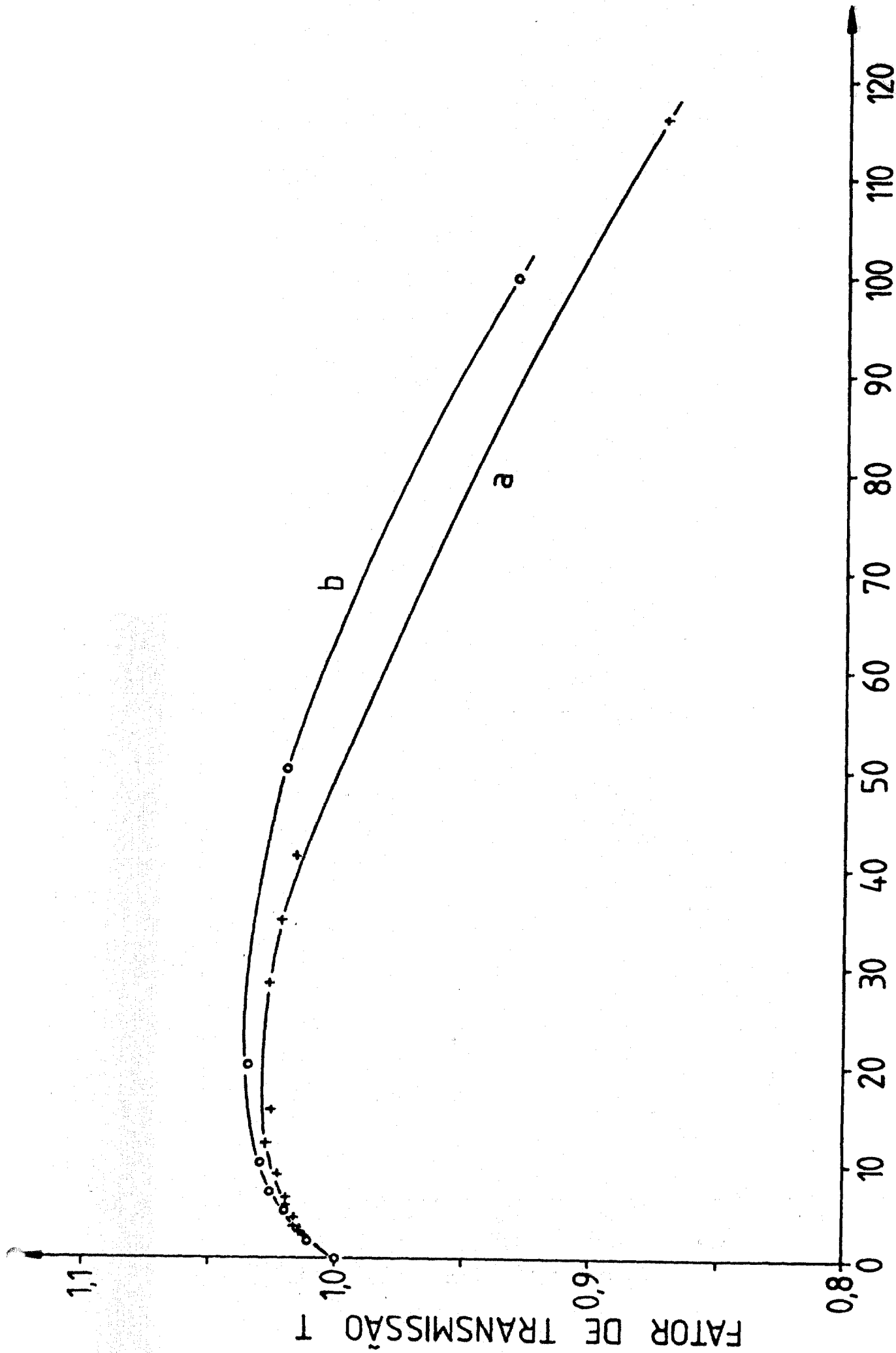


Fig. II-34: Fatores de transmissão para a fonte de ^{90}Sr - ^{90}Y (2 mCi) em camada absorvedora equivalente a tecido e
 a. Câmara de extrapolação Pychlau (janela de entrada 2,26 mg/cm²)
 b. Câmara de extrapolação PTB (janela de entrada de 0,56 mg/cm²).

Tabela II-10: Fatores de transmissão T.
Fonte de ^{204}Tl .

Espessura de tecido (mm) (mg/cm ²)		T câmara Pychlau janela: 2,26 mg/cm ²	T câmara PTB janela: 0,56 mg/cm ²
0	0	1,000	1,000
0,01	1	0,993	1,000
0,02	2	0,987	1,000
0,03	3	0,980	0,998
0,04	4	0,970	0,995
0,05	5	0,960	0,991
0,07	7	0,941	0,969
0,10	10	0,905	0,934
0,20	20	0,755	0,802

C.5.3. Fontes de ^{90}Sr - ^{90}Y (2 e 50 mCi)

Enquanto que no caso da fonte de 2 mCi, a corrente de ionização variou entre $1,8229 \cdot 10^{-13}$ e $9,6154 \cdot 10^{-14}$ A, no da fonte de 50 mCi a variação apresentada foi entre $4,1498 \cdot 10^{-11}$ e $2,7899 \cdot 10^{-11}$ A, respectivamente para placa absorvedora adicional ausente e para a de espessura máxima (2,0 mm de Plexiglas). O desvio padrão relativo não foi superior a 0,65% em ambos os casos.

As Fig.II-34 e Fig.II-35 apresentam os resultados obtidos (curvas a) do fator de transmissão em função da densidade superficial da camada absorvedora equivalente a tecido, em comparação com os obtidos pela calibração primária PTB (curvas b). Pode-se observar claramente, nestes casos, a ocorrência do efeito de equilíbrio eletrônico. O comportamento das curvas a, no início, é crescente, atinge um máximo para densidade superficial aproximada de 20 mg/cm², no caso da fonte 2 mCi, e 33 mg/cm² para a de 50 mCi, apresentando-se a seguir decrescente. Nota-se que no caso das

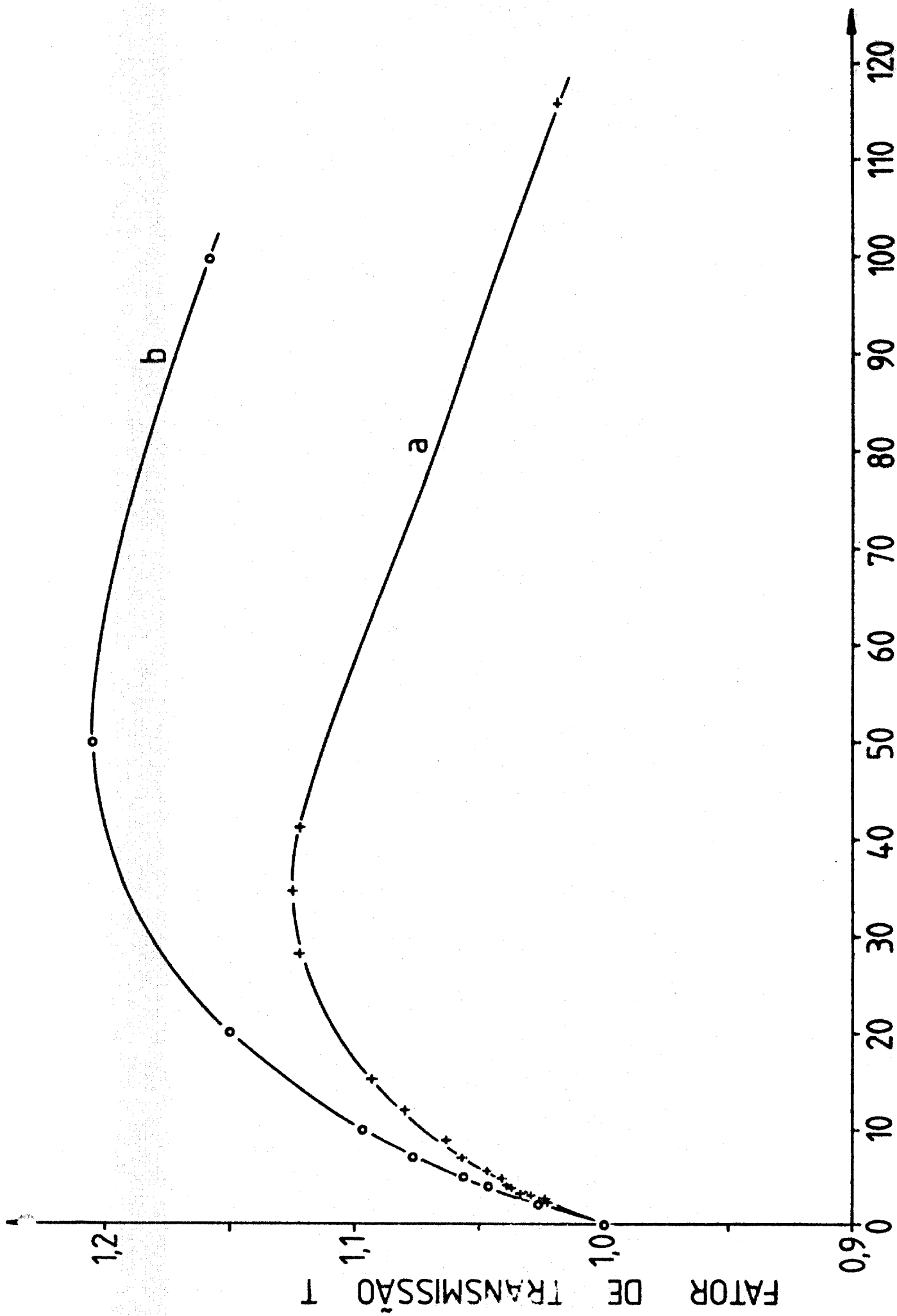


Fig. II-35: Fatores de transmissão para a fonte de ^{90}Sr (50 mCi) em camada absorvedora equivalente a tecido e
 a. Câmara de extrapolação Pychlau (janela de entrada 2,26 mg/cm^2)
 b. Câmara de extrapolação PTB (janela de entrada 0,56 mg/cm^2).

curvas b, o máximo é atingido em 25 e 50 mg/cm², respectivamente para as fontes de 2 e 50 mCi. A diferença entre as curvas a e b pode ser explicada como nos casos anteriores, das fontes de ¹⁴⁷Pm e ²⁰⁴Tl.

Na Tabela II-11 estão apresentados os fatores de transmissão, obtidos das Fig.II-34 e Fig.II-35.

Tendo-se determinado os fatores de calibração e de transmissão, e verificado o comportamento da resposta da câmara Pychlau com a distância até cada fonte, foi praticamente completada a calibração padrão secundária desta câmara. Dois outros aspectos serão, entretanto, ainda estudados: influência do filtro homogeneizante e dependência do fator de calibração com a energia da radiação beta incidente.

Espessura de tecido (mm)	(mg/cm ²)	2 mCi		50 mCi	
		T câmara Pychlau janela:2,26 mg/cm ²	T câmara PTB janela:0,56 mg/cm ²	T câmara Pychlau janela:2,26 mg/cm ²	T câmara PTB janela:0,56 mg/cm ²
0	0	1,000	1,000	1,000	1,000
0,01	1	1,005	1,005	1,010	1,014
0,02	2	1,011	1,011	1,019	1,026
0,03	3	1,014	1,014	1,027	1,036
0,04	4	1,017	1,018	1,035	1,047
0,05	5	1,019	1,020	1,043	1,056
0,07	7	1,022	1,023	1,057	1,077
0,10	10	1,026	1,030	1,072	1,097
0,20	20	1,029	1,035	1,108	1,150
0,50	50	0,999	1,020	1,110	1,206
1,00	100	0,906	0,930	1,040	1,159

Tabela II-11: Fatores de transmissão T.
Fontes de ⁹⁰Sr-⁹⁰Y.

C.6. Influência do filtro homogeneizante

C.6.1. Espectro de radiação

A radiação beta apresenta um espectro contínuo de energia. A energia cinética com a qual a partícula beta é emitida pode ter qualquer valor entre zero e um certo máximo.

A energia máxima do espectro, diferente para cada nuclídeo, pode ser usada na identificação do nuclídeo emissor. Os valores de energia máxima são encontrados em tabelas de dados nucleares.

As curvas a²²⁾ das Fig.II-36, Fig.II-37 e Fig.II-38 representam os espectros das fontes de ^{147}Pm , ^{204}Tl e ^{90}Sr - ^{90}Y respectivamente, sem o uso do filtro homogeneizante.

Pode-se notar que poucas partículas beta são emitidas com a energia máxima, enquanto que a proporção de partículas de energia baixa varia de espectro para espectro. A razão entre a energia média* e a energia máxima não é constante, mas depende da forma do espectro. No caso de partículas beta negativas, a razão é geralmente cerca de 1/3.

No presente trabalho, as fontes do conjunto padrão Buchler foram todas, com exceção da de ^{90}Sr - ^{90}Y (50mCi), usadas com os respectivos filtros, descritos na parte experimental. Estes filtros têm a finalidade de gerar um campo de radiação com taxa de dose uniforme, de uma área com diâmetro aproximado de 10 cm, às distâncias de calibração.

As curvas b²²⁾ das Fig.II-36, Fig.II-37 e Fig.II-38

* Na realidade é a energia correspondente ao máximo no espectro.

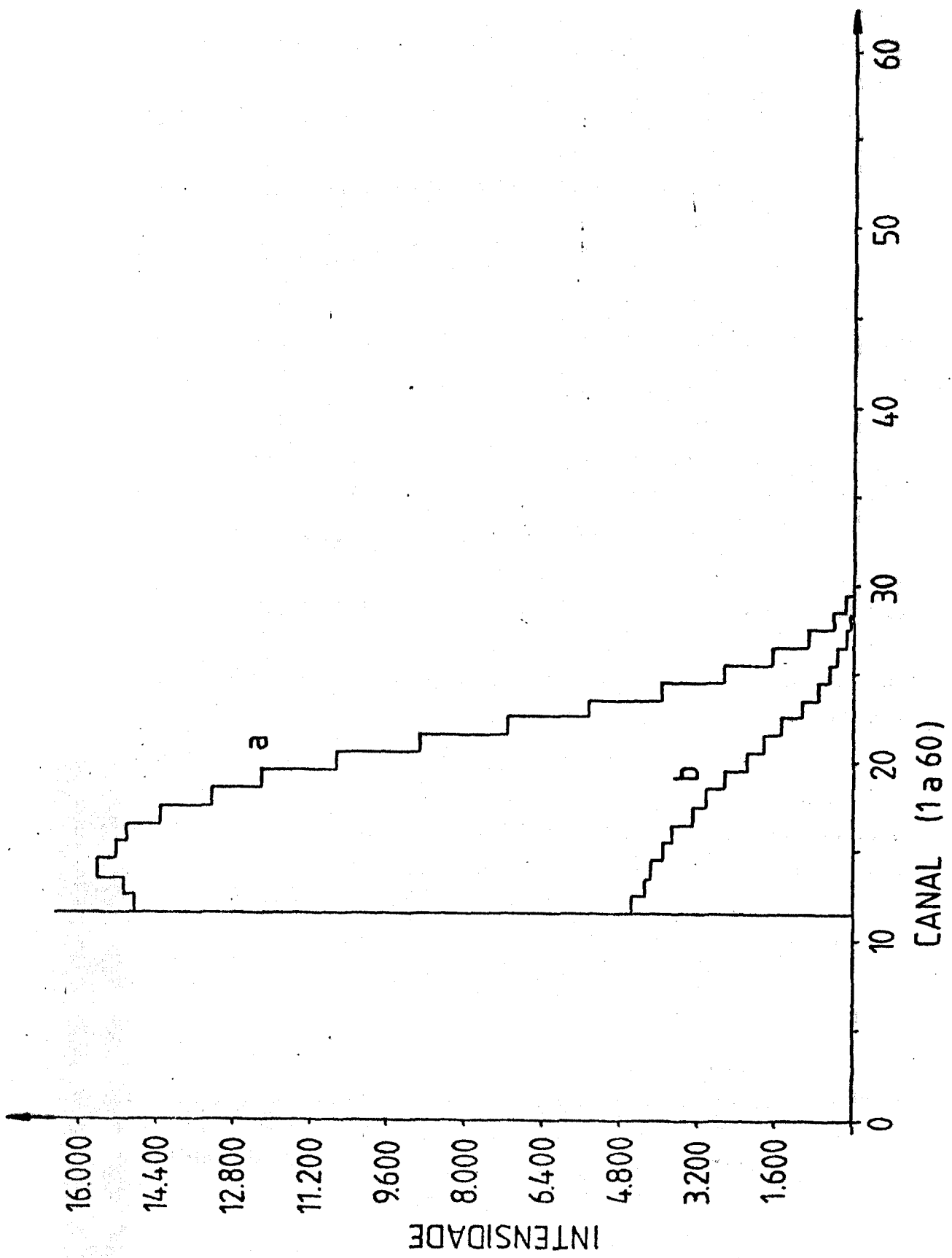


Fig.II-36: Efeito do filtro homogeneizante nos espectros²²⁾ de radiação da fonte de ^{147}Pm . As curvas a e b representam os espectros sem e com o uso do filtro . ($\sim 6,3 \text{ keV/canal}$).

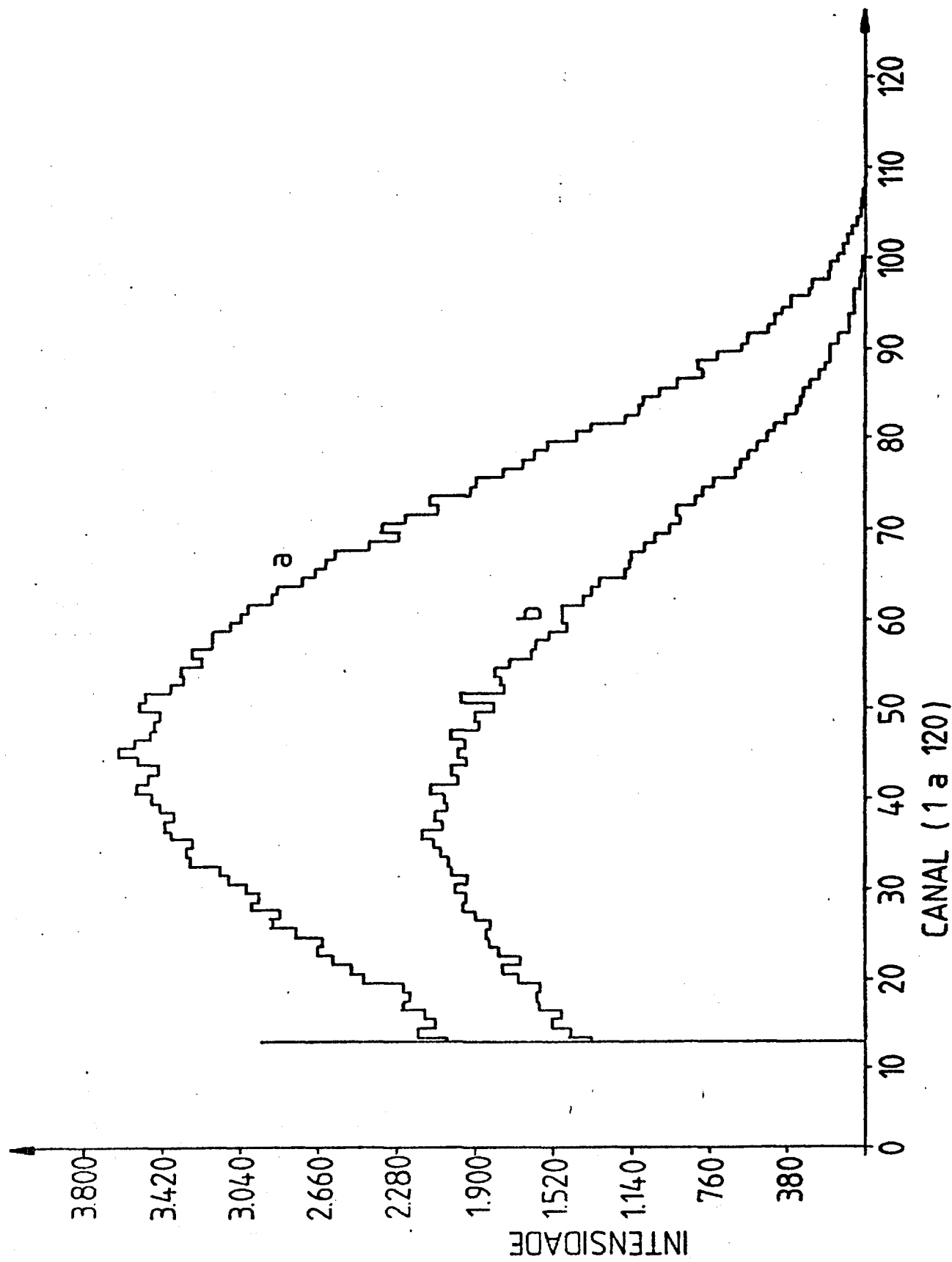


Fig.II-37: Efeito do filtro homogeneizante nos espectros²²⁾ de radiação da fonte de ^{204}Tl . As curvas a e b representam os espectros sem e com o uso do filtro, (a) 3,3 keV/canal.

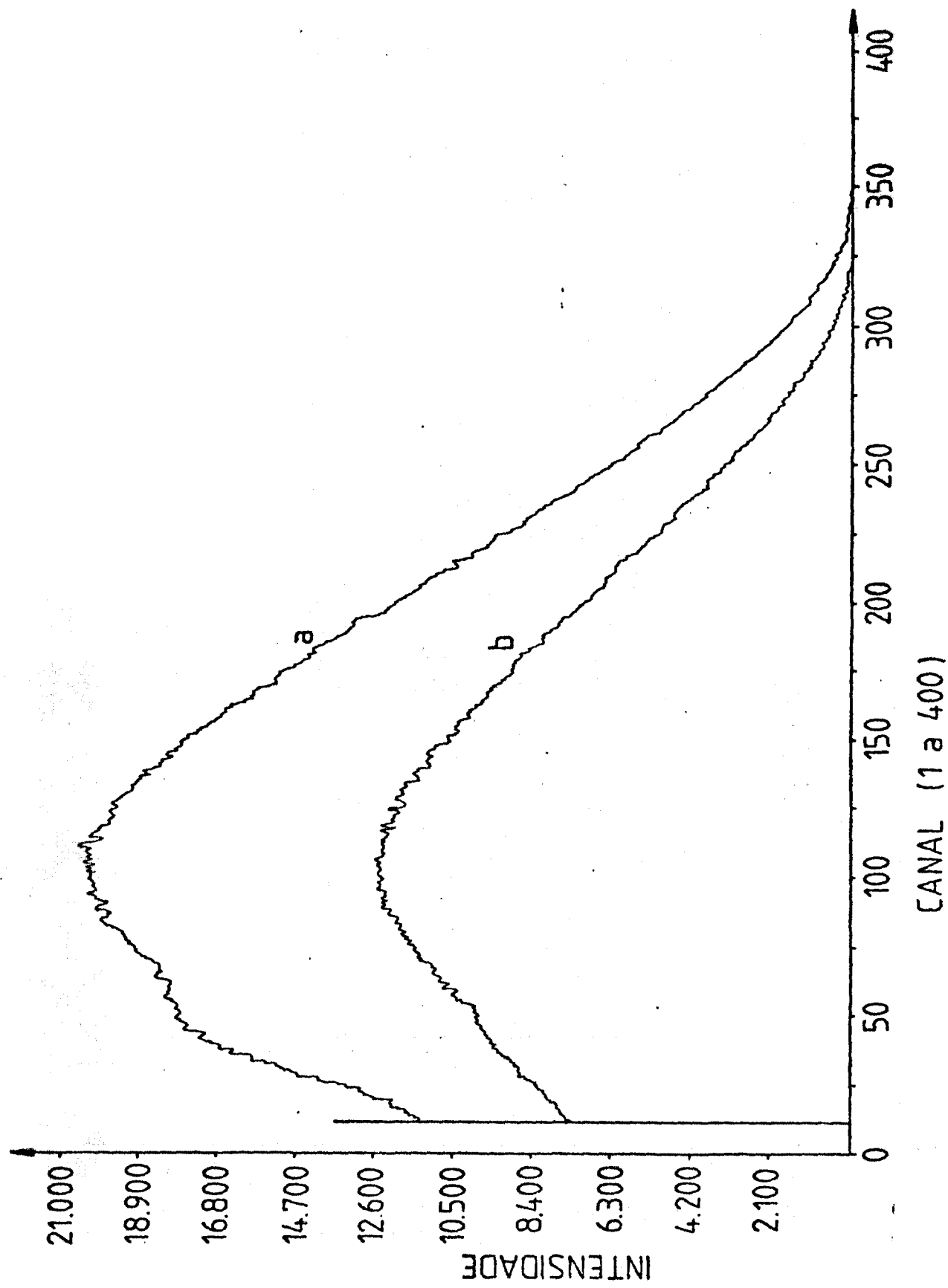


Fig.II-38: Efeito do filtro homogeneizante nos espectros²²⁾ de radiação da fonte de ^{90}Sr . As curvas a e b representam os espectros sem e com o uso do filtro. ($\sim 6,3$ keV/canal).

mostram o efeito dos filtros homogeneizantes nos espectros de radiação. Pode-se ver que o valor da energia média no caso de ^{90}Sr - ^{90}Y não sofre praticamente alteração, enquanto que para ^{204}Tl a variação é bem visível. No caso de ^{147}Pm , infelizmente não foi possível a obtenção²²⁾ do espectro completo (parte de baixas energias), devido ao ruído de fundo do detector. Por isso não se pode observar a mudança do valor da energia média.

C.6.2. Curva de extrapolação

A fim de se verificar o efeito do filtro homogeneizante na determinação do fator de calibração, foram feitas medidas de curvas de extrapolação com a câmara Pychlau para as fontes de ^{147}Pm , ^{204}Tl e ^{90}Sr - ^{90}Y (2 mCi) do conjunto padrão com e sem o uso do filtro.

Como o relatório PTB, que acompanha o conjunto Buchler, não fornece dados de taxa de dose para os casos sem filtro, neste trabalho foram comparados os coeficientes angulares B, obtidos das curvas de extrapolação.

A espessura da janela de entrada da câmara foi 0,02 mm, o diâmetro do eletrodo coletor, 40 mm, e as distâncias entre fonte e detector, as de calibração.

A Tabela II-12 apresenta os resultados obtidos para os coeficientes angulares B, que podem ser diretamente comparados. Estão também representadas as diferenças entre os casos com e sem filtro, em relação ao caso com filtro.

Tabela II-12: Efeito do filtro homogeneizante.

Fonte	Coeficiente angular B		$\frac{B_1 - B_2}{B_2} \cdot 100(\%)$
	fonte sem filtro $B_1 \left(\frac{A}{mm} \right)$	fonte com filtro $B_2 \left(\frac{A}{mm} \right)$	
^{147}Pm	$4,5240 \cdot 10^{-14}$	$1,2105 \cdot 10^{-14}$	273,7
^{204}Tl	$1,5035 \cdot 10^{-14}$	$9,3612 \cdot 10^{-15}$	60,6
$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}(2\text{mCi})$	$1,7919 \cdot 10^{-13}$	$1,0813 \cdot 10^{-13}$	65,7

Comparando-se estas diferenças com as correspondentes da intensidade dos espectros de radiação, pode-se notar que elas concordam razoavelmente bem entre si.

C.6.3 Fator de transmissão

Seguindo-se o método habitual para este tipo de experiência, foram determinados os fatores de transmissão para as fontes de ^{147}Pm , ^{204}Tl e $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ (2 mCi) do conjunto padrão, sem o uso do filtro homogeneizante.

Foram usadas as mesmas condições que nas medidas feitas com o filtro (curvas a das Fig.II-30, Fig.II-33 e Fig.II-34), para permitir uma comparação direta da influência do filtro.

As Fig.II-39, Fig.II-40 e Fig.II-41 representam respectivamente os fatores de transmissão das fontes de ^{147}Pm , ^{204}Tl e $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ (2 mCi) em função da densidade superficial de camada absorvedora equivalente a tecido. As curvas a mostram o comportamento obtido com o filtro (curvas a das Fig.II-30, Fig.II-33 e Fig.II-34) e as curvas b, sem o filtro. Pode-se observar um efeito marcante em todos os casos.

A Tabela II-13 apresenta os fatores de transmissão obtidas com e sem o filtro, com a câmara Pychlau e janela de entrada de espessura 0,02 mm (2,26 mg/cm²).

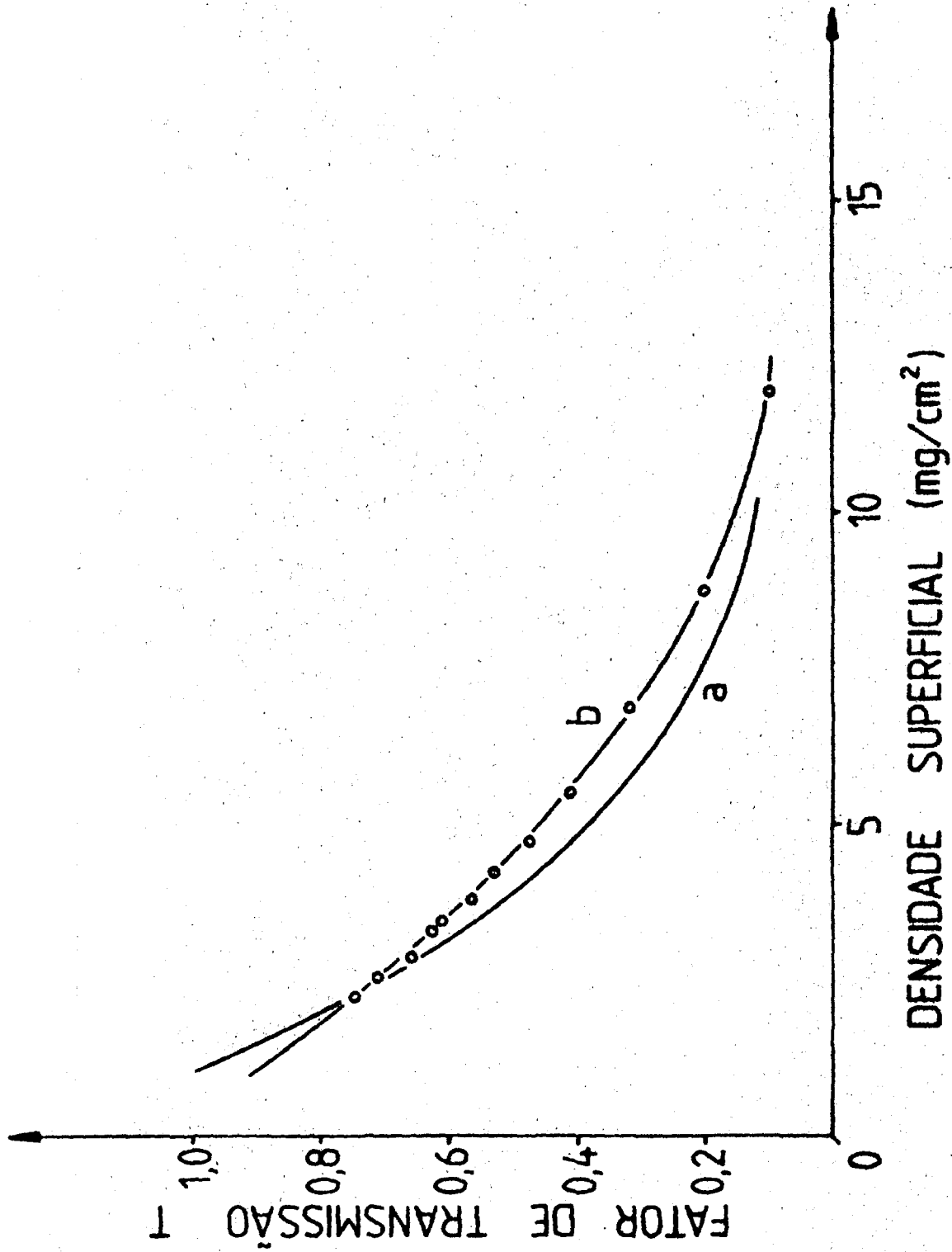


Fig. II-39: Efeito do filtro homogeneizante nos fatores de transmissão para a fonte de ^{147}Pm (14 mCi). As curvas a e b representam os dados com e sem o uso do filtro. Câmara de extrapolação Pychlau.

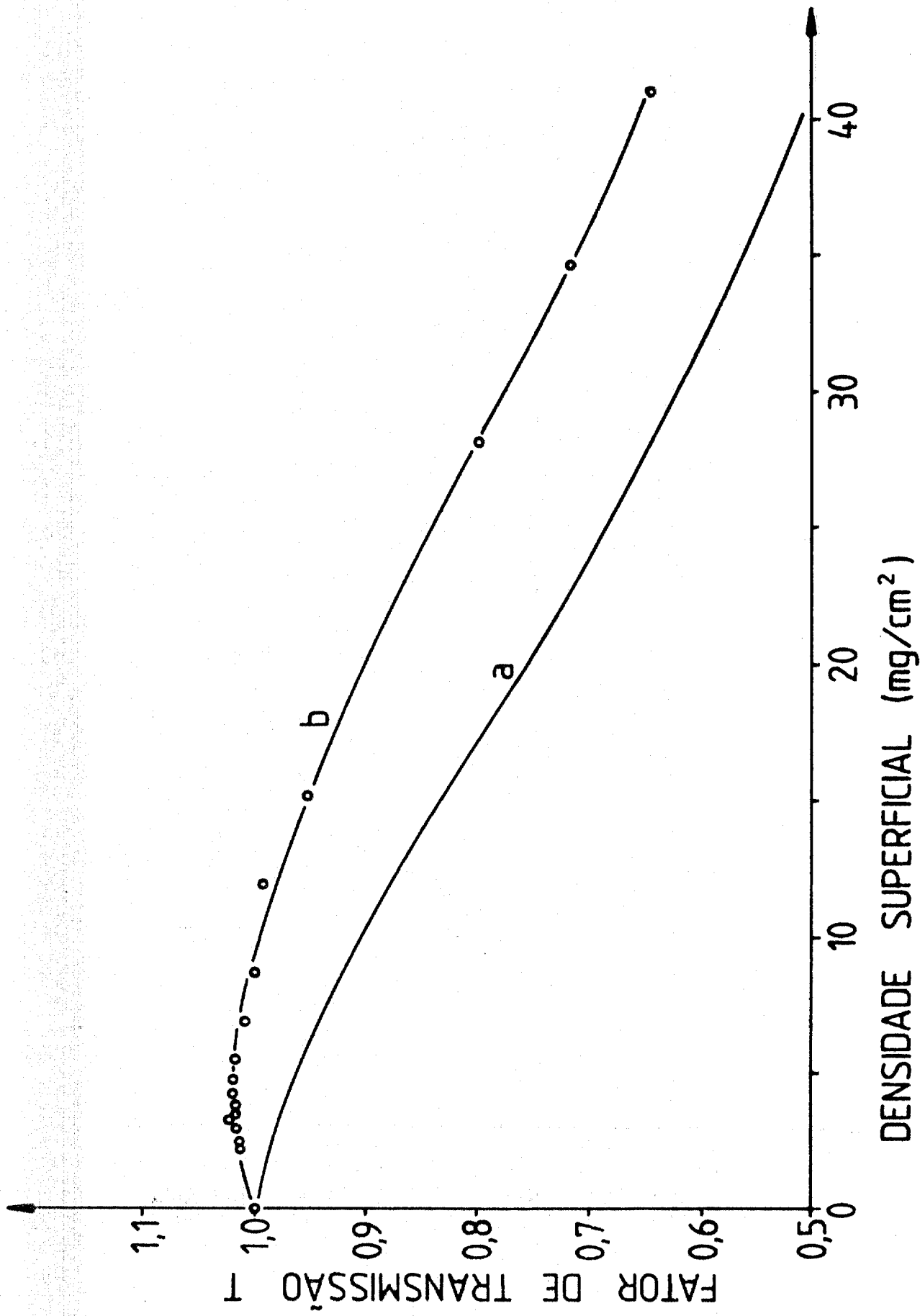


Fig. II-40: Efeito do filtro homogeneizante nos fatores de transmissão para a fonte de ^{204}Tl (0,5 mCi). As curvas a e b representam os dados com e sem o uso do filtro. Câmara de extrapolação Pychlau.

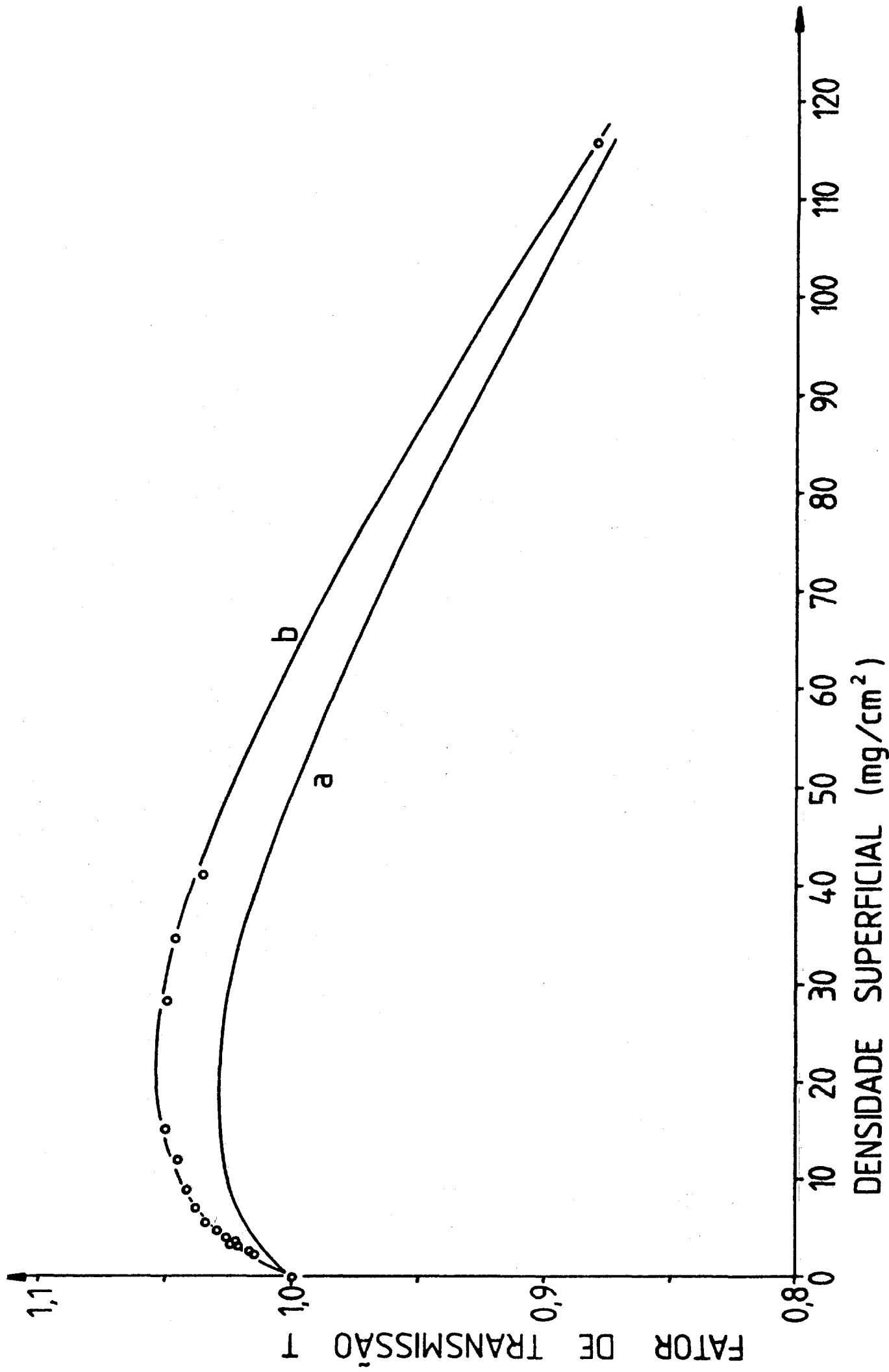


Fig.II-41: Efeito do filtro homogeneizante nos fatores de transmissão para a fonte de ^{90}Sr - ^{90}Y (2 mCi). As curvas a e b representam os dados com e sem o uso do filtro. Câmara de extrapolação Pychlau.

Espessura de tecido (mm)	Fontes		^{147}Pm		^{204}Tl		$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ (2 mCi)	
	com filtro	T sem filtro	T com filtro	T sem filtro	T com filtro	T sem filtro	T com filtro	T sem filtro
0	-	-	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,01	1,000	0,905	0,993	1,007	1,005	1,009	1,005	1,009
0,03	0,622	0,663	0,980	1,016	1,014	1,021	1,014	1,021
0,05	0,382	0,462	0,960	1,017	1,019	1,031	1,019	1,031
0,07	0,232	0,300	0,941	1,013	1,022	1,038	1,022	1,038
0,10	0,117	0,155	0,907	0,993	1,026	1,045	1,026	1,045
0,20			0,755	0,902	1,029	1,054	1,029	1,054
0,50					0,999	1,024	0,999	1,024
1,00					0,906	0,919	0,906	0,919

Tabela II-13: Fatores de transmissão T.
Efeito do filtro homogeneizante.

C.6.4 Campo de radiação

Com a finalidade de verificar se os filtros homogeneizantes geram campos de radiação com taxa de dose absorvida realmente uniforme, às distâncias de calibração de cada fonte, foram usados filmes de mamografia* para as exposições às fontes, com e sem os respectivos filtros.

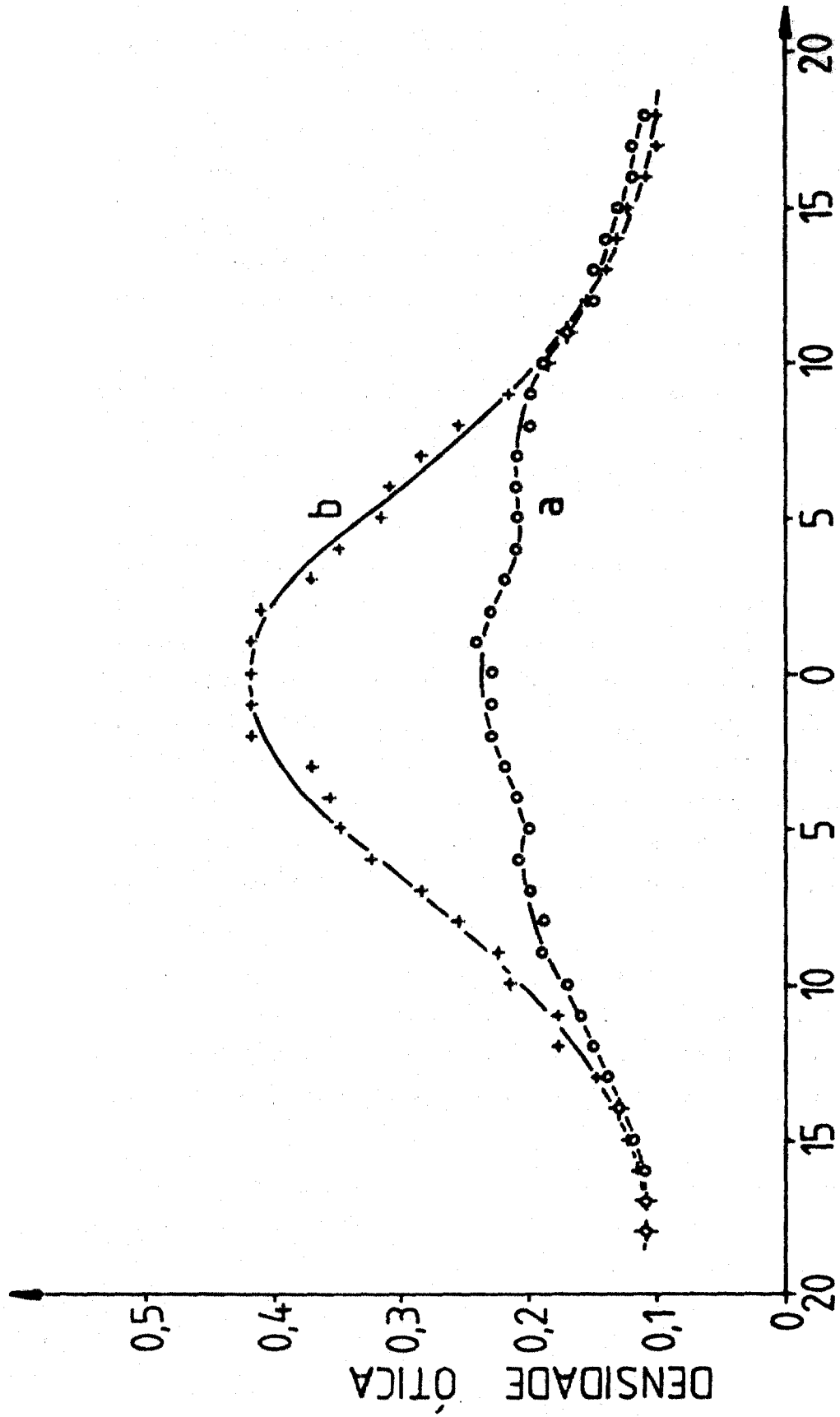
Para a leitura dos filmes foi usado um densitômetro Macbeth-Ansco, que mede a densidade ótica do filme, no intervalo de zero a sete, pela quantidade de luz transmitida através do mesmo.

Os valores de densidade ótica foram sempre corrigidos para o efeito de enegrecimento espontâneo da emulsão fotográfica ("fogging"). As curvas a e b das figuras desta parte representam respectivamente os casos ~~com~~ e ~~sem~~ filtro.

No caso de ^{147}Pm , os filmes foram irradiados com 9,90 rad. Na Fig.II-42 foram representados os valores da densidade ótica em função da distância a partir do centro do filme (centro do campo da radiação). Pode-se observar uma diferença significativa entre os dois casos, na uniformidade do campo da radiação. O filtro correspondente a esta fonte consiste, como já descrito na parte experimental, de um disco de 5 cm de raio com um furo de 0,975 cm de raio. Na Fig.II-42 até o efeito deste furo central é claramente visível.

A irradiação dos filmes com a fonte de ^{204}Tl foi de 1,20 rad. A Fig.II-43 mostra os resultados obtidos. O filtro neste caso consiste de dois discos concêntricos de 4 e 2,75 cm de raio, de espessuras diferentes, cujo efeito

* Filme fotográfico de mamografia Kodak X-Omat M-A, de dimensões 24 cm por 30 cm.



DISTÂNCIA DO CENTRO DO FILME (cm)

Fig. II-42: Efeito do filtro homogeneizante no campo da radiação da fonte de ^{147}Pm , à distância de 20 cm. As curvas a e b representam os dados com e sem o uso do filtro. Filme de mamografia.

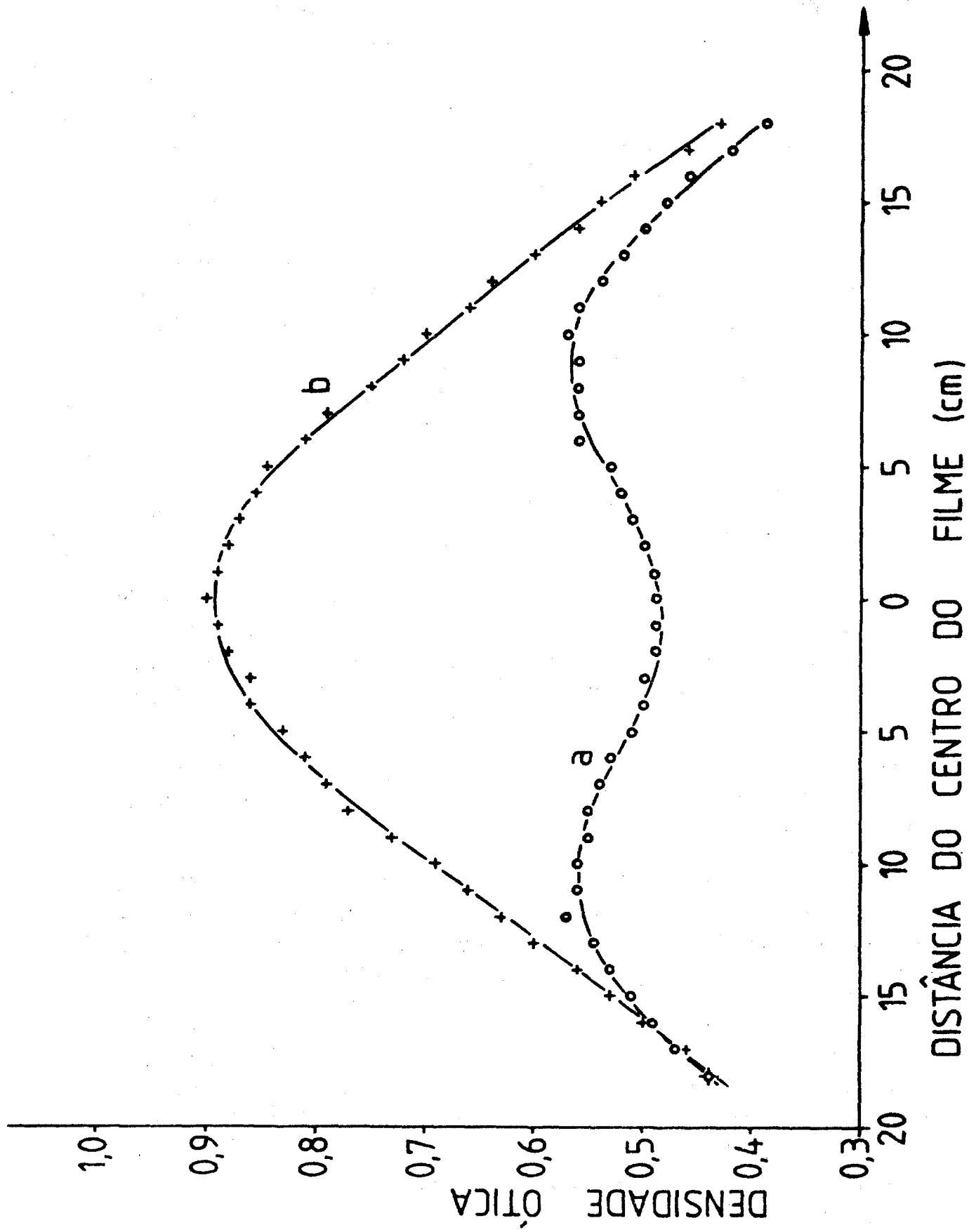


Fig. II-43: Efeito do filtro homogeneizante no campo da radiação da fonte de ^{204}Tl , à distância de 30 cm. As curvas a e b representam os dados com e sem o uso do filtro. Filme de mamografia.

pode-se notar nesta figura. Na parte central, onde a espesura do filtro é maior que nas bordas, tem-se o mínimo da curva a.

Finalmente, no caso da fonte de ^{90}Sr - ^{90}Y (2 mCi), a irradiação dos filmes foi de 2,20 rad. Na Fig.II-44 pode-se observar o efeito do filtro, que consiste de três discos concêntricos de mesma espessura e raios de 2, 3 e 5 cm.

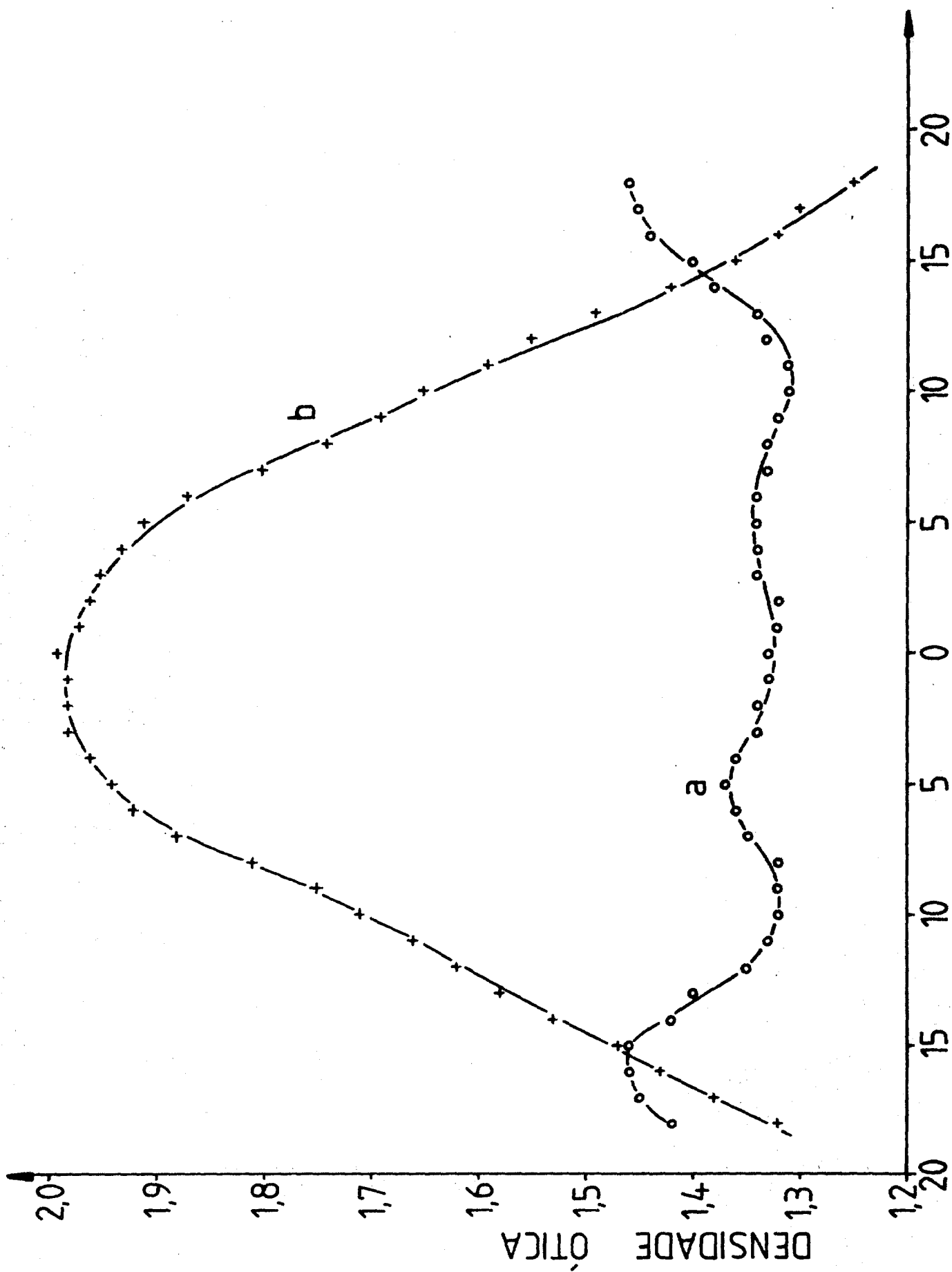
O filtro homogeneizante apresenta, em resumo, uma influência bem pronunciada. Pode-se concluir das figuras aqui apresentadas que a uniformidade pode realmente ser considerada válida numa área de diâmetro aproximado de 10 cm. Este dado é particularmente importante para a dosimetria e calibração dos detectores de estado sólido, que serão focalizados no próximo capítulo.

C.7. Dependência com a energia

Com a finalidade de se verificar a dependência do fator de calibração com a energia da radiação beta incidente, foram realizadas medidas de corrente de ionização para curvas de extrapolação. Foram usadas as fontes do conjunto Buchler (^{147}Pm , ^{204}Tl e ^{90}Sr - ^{90}Y (2 mCi), com os filtros homogeneizantes correspondentes), às distâncias de calibração e a câmara Pychlau munida com janela de entrada cada vez de uma espessura diferente.

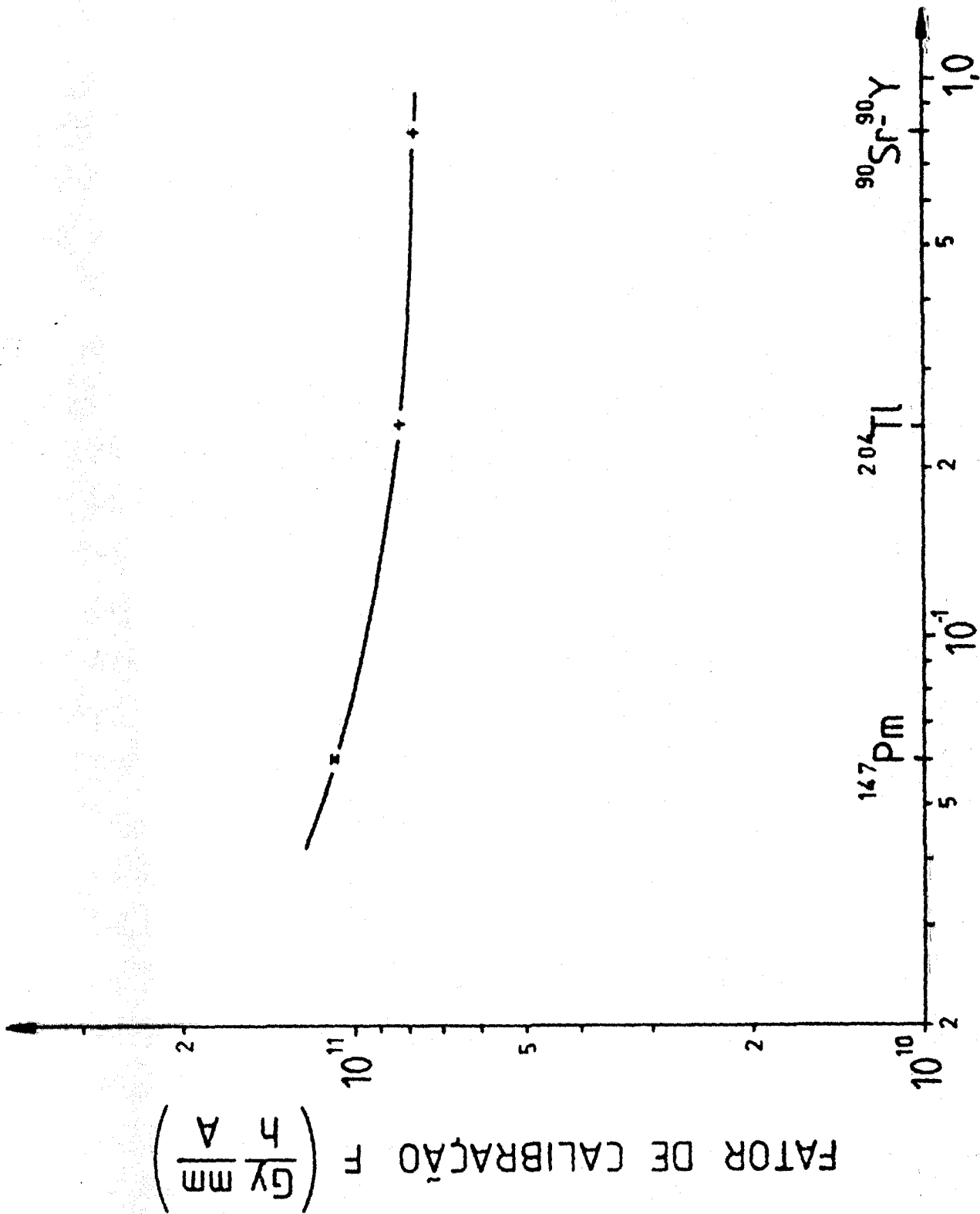
Os fatores de calibração obtidos foram representados em função da espessura de uma camada equivalente a tecido. Uma extrapolação para espessura nula, em cada caso, forneceu os valores desejados de fator de calibração.

Na Fig.II-45 pode-se observar o comportamento deste fator de calibração (para janela de entrada de espessura nula) em função da energia média da radiação beta. Nota-se que a câmara Pychlau é praticamente independente com a energia, no intervalo estudado. Esta é uma grande vantagem dela, em relação a outros tipos de detectores existentes.



DISTÂNCIA DO CENTRO DO FILME (cm)

Fig. 144. Efeito de difusão por parte no campo da radiação da fonte de ^{90}Sr - ^{90}Y (2 mCi), a distância de 70 cm. As curvas a e b representam as condições de exposição e de desenvolvimento.



ENERGIA MÉDIA DA RADIAÇÃO BETA (MeV)

Fig. II-45: Dependência do fator de calibração da câmara de extrapolação Pychlau (janela de entrada de espessura nula) com a energia média da radiação beta.

Em conclusão, ao lado da calibração padrão secundária propriamente dita, que consistiu na determinação dos fatores de calibração F e de transmissão T, e da verificação da variação com a distância das fontes, o estudo da dependência com a energia desempenha um papel igualmente importante para a escolha de um detector adequado para radiação beta.

III. Dosimetria beta

A dosimetria da radiação beta será estudada neste capítulo usando-se principalmente duas técnicas experimentais de Física do Estado Sólido: termoluminescência (TL) e emissão exoeletrônica termicamente estimulada (TSEE). Vários tipos de amostras foram testados, na tentativa de se encontrar um dosímetro adequado, pequeno e independente com a energia da radiação. Será também focalizada a dosimetria de campos mistos de radiação.

III-a. Introdução

Nos últimos 20 anos, as propriedades termoluminescentes dos cristais iônicos têm sido estudadas extensamente, como pode ser verificado pelo grande número de trabalhos publicados^{23 a 29}). O cristal que mais tem merecido a atenção dos pesquisadores é, sem dúvida, o LiF, dada a sua grande aplicação à dosimetria. Sendo assim, medidas da resposta termoluminescente às radiações ionizantes e à radiação ultravioleta (Termoluminescência fotoestimulada) têm sido realizadas utilizando-se LiF, mas também outros materiais^{30a34}).

No caso da radiação beta, ainda há poucos dados disponíveis sobre detectores TL. Devido à forte absorção e ao espalhamento das partículas beta na matéria, a espessura do detector e a energia da radiação são fatores decisivos para a resposta TL. Por isso, os resultados de diversos autores^{12 a 17}) diferem entre si, como já foi mencionado no Capítulo I.

A dosimetria usando a técnica de TSEE (dosimetria TSEE) tem também sido bastante estudada^{25,28,29,35 a 38}) como uma alternativa para a dosimetria TL. Os materiais mais utilizados são CaSO_4 e BeO . A concentração no estudo das suas vantagens e desvantagens tende a desviar a atenção das diferenças importantes entre os dois métodos, o que permite o uso da técnica de TSEE em circunstâncias onde TL não pode

ser empregada com eficiência. Uma das mais importantes destas diferenças está na espessura necessária do elemento dosimétrico. Dosímetros TL muito finos podem ser preparados por vários métodos, mas como a TL é um efeito de volume, eles levam a uma inevitável e muitas vezes inaceitável perda da sensibilidade. A emissão exoeletrônica é, por outro lado, um fenômeno principalmente superficial. É possível, por isso, preparar-se detectores com espessura comparável ao alcance das partículas alfa ou prótons no meio dosimétrico, mas com pouca profundidade para equilíbrio eletrônico para interações de radiação gama. Desta forma, vantagens consideráveis podem ser obtidas usando-se dosímetros TSEE de camadas finas, com o material sensível formando uma película fina num substrato condutor.

A técnica da TSEE tem sido, entretanto, poucas vezes empregada com a radiação beta^{39, 40)}. Os fatos de o alcance deste tipo de radiação ser curto na matéria e a técnica envolver um fenômeno superficial constituem os motivos principais para este estudo. Além disso, não são encontrados na literatura resultados quanto à dependência da resposta TSEE com a energia da radiação de elétrons, exceto para energias muito baixas³⁹⁾ ou seja, até 20 keV.

A seguir serão descritos os fenômenos das técnicas utilizadas.

III-a1. Termoluminescência

Termoluminescência é o fenômeno físico caracterizado pela emissão de luz por um material em processo de aquecimento. As substâncias que apresentam este comportamento são denominadas "fósforos TL" ou simplesmente "fósforos". A TL pode ser induzida na amostra por uma radiação; este fenômeno pode também ser observado quando o fósforo é submetido a outros tratamentos, como choques mecânicos, campos elétricos ou pressões elevadas.

Os materiais TL são, em geral, cristais iônicos,

nos quais a banda de valência se encontra repleta e a de condução vazia, ambas separadas por uma faixa larga de estados energéticos não permitidos aos elétrons e denominada, portanto, banda proibida.

A maioria dos cristais iônicos, como por exemplo os halogenetos alcalinos, é transparente na região que vai do ultravioleta ao infravermelho. Por outro lado, a incorporação de impurezas ou a formação de defeitos na rede cristalina introduz níveis de energia metaestáveis localizados na banda proibida, denominados armadilhas. Elas podem ou não estar associadas a centros de cor, que constituem uma configuração eletrônica especial responsável pelas bandas de absorção na região normalmente transparente do cristal.

Durante uma irradiação ionizante são produzidos no cristal pares elétrons-lacunas, que migram através do mesmo até se recombinarem ou serem capturados em armadilhas. Aquecendo-se posteriormente a amostra, os elétrons, absorvendo energia térmica, escapam das armadilhas, indo para a banda de condução. Podem, então, movimentar-se livremente no cristal até se recombinarem com uma lacuna armadilhada, eventualmente emitindo luz.

A quantidade de luz emitida é mensurável, aumentando sua intensidade com a população de elétrons armadilhados. Esta última cresce com a exposição até atingir um máximo. Desta forma, a luz medida na emissão TL depende da população de elétrons que, por sua vez, depende da exposição recebida pela amostra. Este é o princípio da dosimetria TL.

Após uma irradiação, o cristal pode retornar à sua condição inicial, sendo para tanto necessário submetê-lo a um recozimento adequado que libere todos os elétrons armadilhados.

A curva de emissão é a melhor característica de um fósforo termoluminescente. Representa a luz emitida pelo cristal como função da temperatura ou do tempo de aquecimento e consiste, em geral, de vários picos. Cada um deles está associado a uma determinada armadilha de profundidade E e é caracterizado pela temperatura em que ocorre o máximo de emissão. A formação de um pico de emissão TL está rela-

cionada com a probabilidade de escape do elétron da armadilha correspondente, isto é, quando a temperatura do fósforo é menor que a do pico considerado, poucos elétrons são liberados, e a luz emitida é fraca. Aquecendo-se o cristal, a probabilidade de escape aumenta, causando um aumento na emissão, que é máxima na temperatura do pico. A intensidade decresce, em seguida, devido à redução do número de elétrons armadilhados.

A forma da curva de emissão depende dos tipos de armadilhas e dos centros de luminescência existentes no cristal, da razão de aquecimento e do aparelho detector utilizado. A presença de mais de um pico na curva revela a existência de mais de um tipo de armadilha TL.

Tanto a altura do pico como a área integrada sob o pico de emissão podem ser usadas como medidas da TL, sendo ambas, proporcionais à população eletrônica da armadilha. Neste trabalho foi usada a área integrada.

Em geral, a TL emitida por um fósforo aumenta com a exposição à radiação X ou gama, atingindo um valor de saturação para exposições elevadas. Em algumas amostras essa resposta inicial é linear, em outras observa-se um crescimento mais rápido do que o linear, em alguns intervalos de exposição. A este último comportamento dá-se o nome de supralinearidade.

Em outros casos de radiação (nêutrons, prótons, elétrons e partículas alfa) verifica-se também que a resposta TL cresce com a dose absorvida.

Para simplificação, no caso dos materiais TL, é conveniente que a curva de resposta TL à exposição seja linear no intervalo útil de exposição, pois se isso não ocorrer, será necessária uma calibração cuidadosa na região de interesse.

Um fósforo apresenta boa estabilidade quando, durante o seu armazenamento à temperatura ambiente, a TL dada a uma irradiação prévia não apresentar variação. Em dosimetria é essencial trabalhar-se com picos TL estáveis.

Mede-se a sensibilidade TL de um fósforo pela quan

tidade de luz emitida por uma dada massa do mesmo e por unidade de exposição da radiação a que foi exposto. O limite inferior da sensibilidade útil depende das características do cristal. Quanto mais baixo for este limite inferior de detecção de radiação, mais útil será esse cristal para fins dosimétricos.

A sensibilidade dos fósforos TL em geral depende da energia da radiação incidente, pois esta interage com o cristal de forma diversa quando sua energia varia.

Em termos de dosimetria, é conveniente utilizar-se um material cuja resposta por Roentgen praticamente não apresente variação com a energia. No caso de monitoração pessoal, um material TL cujo número atômico (Z) efetivo seja equivalente ao do tecido humano é o mais indicado, embora este problema possa ser contornado com o uso de filtros adequados.

A sensibilidade TL de um fósforo é influenciada por tratamentos térmicos a que o mesmo é submetido. A variação da sensibilidade depende da duração e da temperatura, além do próprio cristal.

O tratamento térmico tem por efeito esvaziar as armadilhas correspondentes aos picos cujas temperaturas são iguais ou menores que a temperatura do tratamento. Quando são realizadas antes da irradiação, denominam-se pré-recozimentos, e se depois, pós-recozimentos.

III-a2. Emissão exoeletrônica termicamente estimulada

Emissão exoeletrônica é a emissão de elétrons de baixa energia pela superfície de vários sólidos isolantes a temperaturas abaixo daquela em que geralmente ocorre a emissão termoiônica. Portanto esta emissão depende fortemente das propriedades físicas da superfície emissora.

O efeito básico da emissão exoeletrônica pode ser causado por uma deformação mecânica, mudanças de fase, reações químicas ou uma exposição da superfície à radiação ionizante.

zante. Tem sido também chamada pós-emissão de elétrons. O termo "efeito Kramer" tem sido o mais aceito porque foi Kramer quem primeiro investigou sistematicamente este fenômeno, em 1950. Ele também introduziu o termo exoeletrons.

Após o término dos processos físicos ou químicos na superfície, em alguns casos ocorre uma emissão espontânea, que decai com o tempo. Em outros materiais, um aquecimento da amostra é necessário para estimular a emissão, que é a emissão exoeletrônica termicamente estimulada (TSEE).

Ao se desenvolver uma teoria cinética da emissão exoeletrônica, é necessário fazer uma distinção entre armadilhas de superfície e armadilhas volumétricas, que estão presentes por todo o material. Ambas podem contribuir para o espectro de emissão e podem seguir cinéticas diferentes. A emissão predominante, que ocorra a partir de estados superficiais, provavelmente não requer o envolvimento da banda de condução. Para as armadilhas volumétricas, supõe-se que os elétrons são primeiro excitados das armadilhas para a banda de condução, a partir da qual eles estatisticamente superam sua função de trabalho. Os elétrons podem também ser emitidos diretamente das armadilhas superficiais.

Durante a excitação pela radiação ionizante, os centros devidos a defeitos na estrutura da rede dos halogenetos alcalinos, localizados na banda proibida de energia, são preenchidos por elétrons. Um estímulo térmico causa o esvaziamento destes centros. Os elétrons removidos são levados à banda de condução. De lá eles podem se recombinar com ativadores, dando origem à TL ou deixar a superfície se sua energia for maior que a função de trabalho, originando a TSEE.

Embora o conceito de liberação de elétrons dos defeitos perto da superfície do sólido emissor seja geralmente aceito, os processos elementares após seu deslocamento ainda não são completamente entendidos. Para a TSEE é necessário supor-se uma distribuição Maxwelliana de energia de elétrons na banda de condução. De acordo com este modelo, somente os elétrons mais energéticos da extremidade da distribuição são capazes de superar sua função de trabalho e

de contribuir para a emissão.

Os espectros TSEE ou curvas de emissão TSEE (como são chamadas em analogia com a TL) consistem em geral de vários picos de alturas diferentes, sendo que as temperaturas dos picos característicos indicam as profundidades das armadilhas dos elétrons, e as alturas dos picos representam suas populações relativas de elétrons.

Tanto a altura do pico como o número de contagens de exoe elétrons, durante um determinado intervalo de tempo (que depende da taxa de aquecimento da amostra e da posição do pico), servem como medida da TSEE, sendo ambos proporcionais à população eletrônica da armadilha em questão. No decorrer deste estudo foi usado o número de contagens.

A resposta à radiação X ou gama de amostras em pó, emissoras de exoe elétrons, apresenta uma variação linear com a dose de radiação, para baixos valores. Pode-se conseguir um aumento deste intervalo de dose se for possível tornar a superfície emissora eletricamente condutora, adicionando-se por exemplo um material condutor mas não emissor, como pó de grafite.

Dependendo do material e do pico considerado, encontram-se também respostas supralineares à radiação. Como no caso de TL, o material ideal para dosimetria usando a técnica da TSEE deverá de preferência apresentar uma dependência linear com a radiação.

Uma das vantagens principais que a técnica de TSEE exhibe é a sua alta sensibilidade, principalmente no caso de amostras como CaSO_4 e BeO .

Assim como na TL, para que um detector de TSEE seja útil na dosimetria da radiação, é fundamental que seus picos de emissão sejam estáveis e que sua resposta apresente pequena ou nenhuma dependência com a energia.

Pode-se fazer com que o material dosimétrico retorne à sua condição inicial, ficando novamente apto a detectar uma nova radiação (re-uso), após o esvaziamento das armadilhas, por meio de tratamentos térmicos especiais.

III-b. Parte experimental

III-b1. Fontes

As amostras foram expostas tanto à radiação X e gama como à radiação beta.

No caso de radiação gama, foi usada uma fonte de ^{60}Co , montada experimentalmente de modo a permitir a exposição simultânea de várias amostras: Gammatron, de 527 Ci, que fornece à distância de 1 m a taxa de exposição de 685 R/h e a 2 m um campo de radiação de 60 x 60 cm. As amostras foram sempre irradiadas com esta fonte atrás de 3 mm de ~~lucite~~ lucite, para a obtenção de equilíbrio eletrônico.

As exposições com raios-X* foram feitas com um sistema terapêutico Dermopan, da Siemens. O filtro inerente (janela) do tubo de raios-X é de Be, de espessura 1,0 mm.

Foi usado um irradiador de referência Studsvik modelo 6527 A consistindo de uma fonte de ^{90}Sr - ^{90}Y , de 10 mCi. Apresenta a possibilidade de irradiação em posição estacionária, onde se pode escolher o intervalo de tempo, e em movimento, onde a amostra passa por baixo da fonte com velocidade constante de 10 seg/rotação.

As fontes de ^{90}Sr - ^{90}Y de atividades aproximadas 50 e 2 mCi, denominadas D₁ e D₂, já foram descritas na seção II-b1.1, e as fontes de ^{90}Sr - ^{90}Y , ^{204}Tl e ^{147}Pm , do conjunto padrão Buchler, na seção II-c1.1. Estas foram, sempre que não especificado o contrário, usadas com os respectivos filtros homogeneizantes.

* Estas irradiações foram realizadas com a ajuda do Sr. Eckerl, do Institut für Strahlenschutz, GSF, Alemanha, a quem agradecemos.

Nas exposições à radiação beta, foi utilizado um porta-amostra especial de lucite, permitindo a variação da espessura da parede dianteira. Este porta-amostra foi montado numa haste também de lucite, para se evitar o retroespalhamento da radiação.

Todas as irradiações foram feitas à temperatura controlada de 20°C.

III-b2. Materiais utilizados

Os diversos materiais termoluminescentes usados neste trabalho encontram-se na Tabela III-1, assim como algumas de suas características.

As amostras de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7: \text{Ag, Cu}^{41)}$, $\text{CaSO}_4: \text{Tm}^{42)}$ e $\text{BeO: Li}^{43)}$ são constituídas por camadas finas de pó e resina termoestável; uma placa de alumínio num dos lados serve como reforço. Destes, os materiais UD-100M8 e BeO: Li apresentam uma camada ativa TL de apenas 60 μm de espessura, e os outros ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7: \text{Ag, Cu}$ e $\text{CaSO}_4: \text{Tm}$), de 70 μm .

A finalidade de usar BeO com ativador metálico (no caso Lítio) foi para melhorar sua sensibilidade, aumentando o número de armadilhas de elétrons e, assim, sua emissão.

Os materiais usados na parte de TSEE foram BeO e Al_2O_3 (No caso de BeO , foram três os tipos de detectores):

- a) BeO: Li , usados em TL, descritos na Tabela III-1.
- b) BeO em grafite, preparados da seguinte forma: o pó de BeO foi misturado com acetona e depositado, usando-se uma injeção, numa base de grafite, de diâmetro 10 mm, formando uma película sólida de 8 mm de diâmetro, circundado por um anel externo de grafite.
- c) BeO em quartzo, fornecidos por Batelle-Institut, Frankfurt, constituídos por uma película de BeO depositada pela técnica de evaporação numa base de quartzo, de dimensões 16 x 12 mm. A película apresentou uma espessura aproximada de 1000 Å e um diâmetro, de 10 mm. Foi necessário submeter

Material	Nome comercial	Procedência	Dimensões	Número atômico efetivo (Z)	Pico principal (°C)
LiF	TLD-100	Harshaw Chemical Co.	3 x 3 x 0,9mm	8,2	205
LiF	TLD-100 (C)		3 x 3 x 0,9mm	8,2	205
LiF	TLD-600		3 x 3 x 0,9mm	8,2	205
LiF	TLD-700		3 x 3 x 0,9mm	8,2	205
CaF ₂ :Dy	TLD-200	Matsushita Electric Industry Co., Ltd.	3 x 3 x 0,9mm	16,3	180
CaF ₂ :Mn	TLD-400		3 x 3 x 0,9mm	16,3	260
CaF ₂ :Mn	TLD-400 fino		3 x 3 x 0,25mm	16,3	260
Li ₂ B ₄ O ₇ :Ag, Cu			Diâmetro 3,5mm	7,3	185
CaSO ₄ :Tm			Diâmetro 3,5mm	14,4	220
CaSO ₄ :Tm	UD-100 M8		Diâmetro 8 mm	14,4	220
BeO:Li			Diâmetro 8 mm	7,1	180

Tabela III-1: Materiais termoluminescentes

as amostras a uma preparação complementar especial: exposição a "spray" de grafite por cima e por baixo, e dos lados, exceto na área contendo BeO. Este tratamento permitiu a obtenção de melhores resultados experimentais. A fim de diminuir-se a sensibilidade da resposta TSEE, as amostras propriamente ditas (películas de BeO) foram ainda riscadas com lápis, formando uma rede, com espaçamento aproximado de 1 mm, proporcionando assim tanto uma melhor reprodutibilidade, como linearidade entre os dados. O pico principal apresentou-se a cerca de 280°C para todas as amostras de BeO.

d) Al₂O₃ em grafite, cuja preparação foi a seguinte: Foram misturados em partes iguais pó de Al₂O₃ (Merck) em fase α e β; a deposição em base de grafite foi feita como no caso de BeO, usando-se uma injeção e acetona. A base, de diâmetro 19 mm, permitiu a formação de uma película de 13 mm de diâmetro, circundado por um anel externo de grafite. O pó de Al₂O₃ em fase β serve como substituto ao pó de grafite, na função de permitir uma melhor condutividade. Este material exibe uma forte condutividade iônica, mas o material exotativo é o de Al₂O₃ em fase α⁴⁴), daí a razão da mistura. O pico principal de TSEE apresentou-se a cerca de 450°C.

Foram também utilizados filmes em algumas experiências: filmes dosimétricos da Firma Gevaert (de dimensões 4 x 3 mm). Estes foram usados dentro dos porta-dosímetros (desenvolvidos e usados para dosimetria pessoal no Institut für Strahlenschutz, GSF, Munique, Alemanha), que contêm, além da janela aberta, os seguintes filtros: Cu 1,2 mm, Cu 0,3 mm, Cu 0,05 mm, Pb 0,8 mm e plástico, permitindo a determinação de dose e energia de radiação X, gama e beta de alta energia, por meio de programa de computador acoplado diretamente ao densitômetro digital Macbeth.

III-b3. Tratamentos térmicos

Os tratamentos térmicos dos materiais usados em termoluminescência foram realizados em fornos especiais de temperatura regulável. As amostras foram colocadas em pran-

chetas de alumínio.

Verificou-se que para todas as amostras TL, o pré-recozimento a 400°C era suficiente para eliminar todo o sinal residual e para que elas readquirissem as condições iniciais. Apenas no caso das amostras de camada fina e reforço de alumínio, o intervalo de tempo do tratamento térmico foi de 3 min; todas as outras eram submetidas ao pré-recozimento durante 5 min⁴⁵⁾.

Todas as amostras TL foram tratadas, após as irradiações e antes das medidas, a 100°C durante 15 min⁴⁵⁾, constituindo o pós-recozimento. Este tratamento tem a finalidade de eliminar os picos TL de baixa temperatura, que apresentam decaimento rápido com o tempo.

O resfriamento foi sempre lento, realizado em cima de placas de amianto, durante aproximadamente 10 min.

Os métodos de recozimento e resfriamento são muito importantes, devendo ser sempre realizados de mesma maneira, para não influir na sensibilidade e reprodutibilidade das medidas, podendo constituir-se em fontes significativas de erro.

No caso das amostras para TSEE, elas foram tratadas termicamente no próprio sistema de detecção.

III-b4. Medida de TL

Foram utilizados dois sistemas de medida de termoluminescência.

Todas as amostras TL, com exceção das de forma circular (8mm), foram medidas no aparelho de leitura TL da Harshaw Chemical Co., USA, modelo 2000A, acoplado ao pico amperímetro, modelo 2000B. Na utilização deste conjunto, a razão linear nominal de aquecimento foi de 14°C/seg.

Este sistema de leitura TL consta de uma prancheta que é aquecida por meio de uma corrente elétrica, sobre a qual é colocado o fósforo TL. A luz emitida durante o aque

cimento é detectada por um tubo fotomultiplicador, que fornece uma corrente que, depois de amplificada, pode ser registrada em função do tempo de aquecimento ou da temperatura (curva de emissão). Faz parte essencial deste arranjo, portanto, um sistema de aquecimento e detecção da luz, uma fonte de alta tensão, um eletrômetro, um integrador e um registrador.

No aparelho leitor existe uma entrada de gás na câmara de leitura TL, tendo-se, durante a realização deste trabalho, feito as medidas em ambiente de nitrogênio, para reduzir a TL espúria, isto é, a TL não devida à irradiação, e também para aumentar a vida da prancheta.

O outro sistema de medida de TL foi o da Matsushita Electric Industry Co., Ltd., Japão, modelo UD-505A. O aquecimento das amostras neste caso é feito por passagem de pulsos de ar quente. A circulação do ar é feita por um ventilador através de barbatanas quentes de alumínio. O ar, após aquecido, é direcionado ao dosímetro. A razão sinal/ruído deste instrumento é muito alta devido a duas razões:

- a) o dosímetro é aquecido sem a ocorrência da transferência de uma grande quantidade de calor aos materiais adjacentes (que poderiam emitir radiação térmica);
- b) o dosímetro é aquecido muito rapidamente (5 a 10seg) e o sinal TL é proporcionalmente maior. Por causa desta característica, é possível uma detecção sensível da TL.

O tempo de medida usado neste trabalho foi 10 seg. As amostras circulares (8mm) foram medidas com este sistema. Neste caso não se usa gás de nitrogênio.

Nos dois sistemas existe uma lâmpada padrão que emite fluorescência constante e possibilita a calibração do ganho do aparelho, bem como possíveis correções para as medidas. A finalidade destas correções foi a comparação entre resultados.

De todas as medidas TL foram sempre subtraídos os valores obtidos de amostras não irradiadas, chamados valores OR.

Os valores de TL são relativos ao ^{60}Co . Isto signi

fica que as amostras foram sempre calibradas uma a uma com a fonte de ^{60}Co .

III-b5. Medida de TSEE

O sistema usado para medida de TSEE foi um protótipo construído pela firma Klemt, Alemanha.

A emissão exoeletrônica é detectada por um contador proporcional ligado a um amplificador e a uma fonte de alta tensão, tudo embutido no mesmo aparelho. O aquecedor e o porta-amostra são feitos de uma liga de Platina e Irídio, de espessura 1 mm, apresentando a possibilidade de uso para amostras de espessuras até 3 mm e diâmetro máximo de 20 mm. A medida da temperatura da amostra é feita usando-se um termopar de Chromel - Alumel, que é encostado na própria amostra. O aquecimento é feito por uma lâmpada especial Philips, que permite a obtenção, por meio de um controlador de temperatura, de taxas lineares de aquecimento entre 0 e $10^{\circ}\text{C}/\text{seg}$, até o máximo de temperatura de 600°C , desde a temperatura ambiente. Um sistema de circulação de água e de ventilação permite um resfriamento rápido do porta-amostra.

O aparelho permite manter a amostra a uma determinada temperatura durante o intervalo de tempo desejado, possibilitando assim os tratamentos térmicos necessários.

As medidas foram realizadas em ambiente gasoso de uma mistura de argônio (90%) e metano (10%).

Devido à temperatura de pico de emissão, as medidas de TSEE foram feitas até a temperatura máxima de 300 e 600°C respectivamente para as amostras de BeO e Al_2O_3 . A taxa de aquecimento foi $10^{\circ}\text{C}/\text{seg}$.

Como no caso de TL, aqui também foram sempre subtraídos das medidas de TSEE os valores obtidos de amostras não irradiadas (OR).

O valor da alta tensão necessária para as contagens de impulsos foi determinado experimentalmente, varian-

do-se a tensão entre 0 e 2.200 V. Para isto foi usada uma fonte padrão ^{237}Np , que foi preparada da maneira descrita a seguir. De uma folha radioativa foi cortada uma fração circular; ela foi isolada dentro de plástico aluminizado, para evitar contaminação. Suas dimensões foram tais que ela pudesse ser encaixada exatamente na prancheta, sem erro na geometria de posicionamento. Com o sistema de aquecimento do aparelho de TSEE desligado, a fonte foi então colocada na prancheta e as medidas de impulsos realizadas, variando-se a alta tensão. Só a partir de 1.300 V houve sinal registrado. Foram feitas 5 medidas para cada valor de tensão, sendo o intervalo de tempo de medida 10 seg. Representando-se o número de impulsos em função da tensão aplicada, foi possível observar-se um patamar de resposta aproximadamente constante, entre 1.900 e 2.000 V. Decidiu-se assim pelo valor 1.950 V para ser mantido fixo no decorrer das medidas de TSEE.

III-c. Resultados

III-cl. Características das amostras

Neste ítem serão examinadas as características das amostras usadas tanto em TL como em TSEE.

Para se estudar a reprodutibilidade (que neste caso é indicada pelo desvio padrão relativo) das medidas, as amostras foram expostas cerca de 10 vezes à radiação da fonte de ^{90}Sr - ^{90}Y (10 mCi). Foram mantidos constantes todos os outros parâmetros, tais como modo de irradiação, pós- e pré-recozimentos e geometria de medida.

Na Tabela III-2 foram representados os valores da reprodutibilidade de medida para cada tipo de amostra TL.

Tabela III-2: Reprodutibilidade.
Amostras de TL.

Material	Nome	Reprodutibilidade (%)
LiF	TLD-100	1,96
LiF	TLD-100 (C)	2,46
LiF	TLD-600	1,41
LiF	TLD-700	2,03
CaF ₂ :Dy	TLD-200	1,64
CaF ₂ :Mn	TLD-400	3,20
CaF ₂ :Mn	TLD-400 fino	2,00
Li ₂ B ₄ O ₇ :Ag,Cu		3,95
CaSO ₄ :Tm		0,81
CaSO ₄ :Tm	UD-100 M8	0,71
BeO:Li		2,90

Como pode ser visto, todas as amostras testadas apresentaram uma reprodutibilidade menor que 4%, considerada muito boa.

Os erros experimentais que afetam os resultados TL são devidos, durante a medida, à variação da corrente de aquecimento na prancheta (ou da passagem do ar quente) e à geometria de posicionamento da amostra na prancheta.

No caso da TSEE, devido ao fato do sistema não apresentar boa estabilidade de um dia para outro, foi necessário desenvolver um método especial para permitir uma comparação entre os resultados. Quando as medidas são realizadas no mesmo dia, a reprodutibilidade mostrou-se de aproximadamente 15%, sem o uso do método mencionado.

A melhor reprodutibilidade foi obtida quando foram observadas condições geométricas constantes de medida e quando os valores foram corrigidos. O método consistiu em se usar a fonte padrão de ²³⁷Np, descrita no ítem III-b5. Com o sistema de aquecimento desligado, a fonte era medida, durante 10 seg, 10 vezes antes e depois de cada medida de TSEE.

A reprodutibilidade das contagens desta fonte apresentou-se sempre menor que 1,0% (em geral 0,4%), demonstrando sua utilidade para normalizar os dados de TSEE para um certo valor. Além dessa correção, as amostras foram sempre, após a medida principal, expostas à fonte de ^{90}Sr - ^{90}Y (10 mCi) durante um intervalo de tempo fixo e medidos quanto à TSEE. Desta forma, tem-se controle sobre o comportamento tanto do sistema de detecção como da própria amostra.

Na Tabela III-3 tem-se os resultados obtidos para reprodutibilidade das amostras de TSEE.

Tabela III-3: Reprodutibilidade.
Amostras de TSEE.

Material	Suporte	Reprodutibilidade (%)
BeO:Li	metal	6,76
BeO	grafite	7,80
BeO	quartzo	4,92
$\alpha\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$	grafite	3,16

Das amostras testadas, só as de BeO em suporte de quartzo e de $\alpha\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ em suporte de grafite apresentaram uma reprodutibilidade ideal, ou seja, menor que 5%. No entanto, os outros tipos são também aceitáveis para a técnica de TSEE.

Os erros experimentais são devidos a diversos fatores: variação na taxa de aquecimento da prancheta, posicionamento da amostra por ocasião da medida, forma desigual entre os detectores de cada tipo, aquecimento indesejável do contador proporcional, contato imperfeito tanto entre os termopares como entre a amostra e a prancheta.

Quanto à resposta em função da dose, todas as amostras de TL e de TSEE foram expostas tanto à radiação beta como à gama.

As irradiações (beta) foram feitas usando-se uma folha plástica Hostaphan RN 15 (15 μm de espessura e 1,94mg/cm²

de densidade superficial de camada equivalente a tecido) para recobrir as amostras. Neste capítulo será ainda vista a influência de folhas intermediárias (absorvedores de radiação) na resposta TL. Os tratamentos térmicos foram os descritos na parte experimental.

As Fig.III-1 e Fig.III-2 apresentam os resultados obtidos expondo-se à radiação beta de ^{90}Sr - ^{90}Y à distância de 30 cm entre $7,8 \cdot 10^{-1}$ e $3,9 \cdot 10^2$ mGy ($7,8 \cdot 10^{-2}$ e 39rad), os fósforos:LiF (TLD-100 normal e com grafite), CaF_2 :Mn (TLD-400 normal e fino), CaF_2 :Dy (TLD-200); e entre $4,4 \cdot 10^{-1}$ e $1,7 \cdot 10^2$ mGy os fósforos BeO:Li e $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$:Ag,Cu. Pode-se observar que em todos os casos foi constatada a linearidade nos intervalos estudados, com exceção de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$:Ag,Cu que apresentou esta característica somente a partir de 2,0 mGy. Os valores de LiF (TLD-600) e LiF (TLD-700) não foram representados no gráfico da Fig.III-1 pois ambas as amostras apresentaram o mesmo resultado que LiF (TLD-100).

A resposta TL à radiação beta de ^{204}Tl e ^{147}Pm foi também medida em função da dose para todos os fósforos, tendo a linearidade sido observada. Na Fig.III-3 tem-se como exemplo os resultados obtidos para CaSO_4 :Tm (UD-100 M8) entre $4,0 \cdot 10^{-1}$ e $3,9 \cdot 10^2$ mGy para ^{90}Sr - ^{90}Y , entre 1,7 e 39 mGy para ^{204}Tl e entre 3,4 e $1,2 \cdot 10^2$ mGy para ^{147}Pm .

No caso de TSEE, a resposta em função da dose foi medida após irradiação com a fonte de ^{90}Sr - ^{90}Y (10 mCi) entre 6,5 e 65 mGy para as amostras de BeO em base de grafite e entre 2,6 e 53 mGy para BeO em base de quartzo. Na Fig.III-4 pode-se observar a ocorrência de linearidade para estes materiais, nos intervalos de dose estudados.

A Fig.III-5 apresenta o comportamento da resposta TSEE em função da dose de ^{90}Sr - ^{90}Y (10 mCi) das amostras de BeO:Li em base metálica entre 6,5 e 65 mGy e de $\alpha\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ em base de grafite entre 6,5 e 98 mGy. No caso de $\alpha\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$, foi feito um teste complementar: exposição à fonte de ^{60}Co entre doses de $8,7 \cdot 10^{-1}$ e 17,4 mGy, para comparação. A falta de linearidade observada entre $8,7 \cdot 10^{-1}$ e 8,7 mGy mostrou o valor da dose mínima detectável: 8,7 mGy. Por outro lado, acima de aproximadamente $8 \cdot 10^2$ mGy pôde-se notar

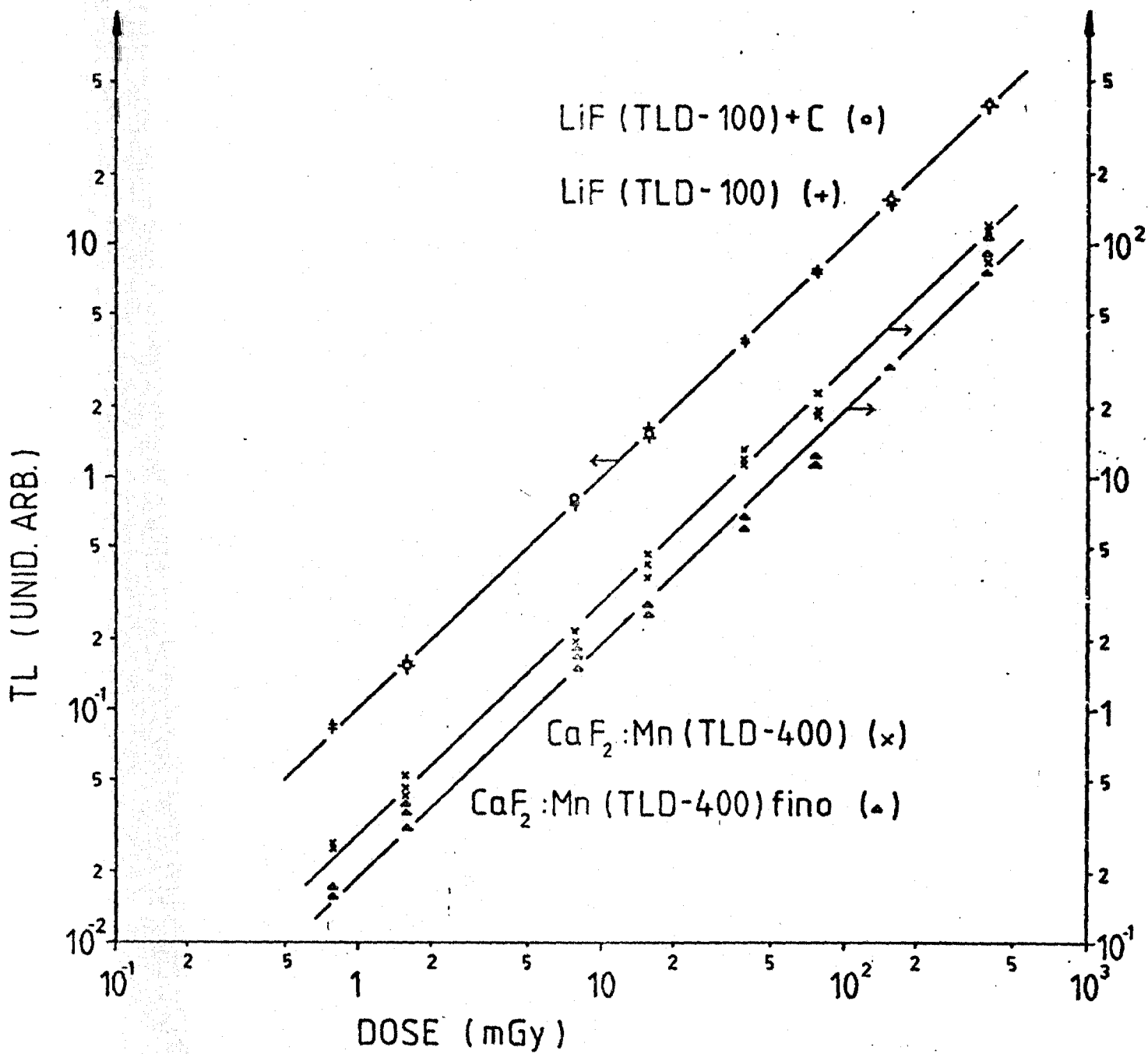
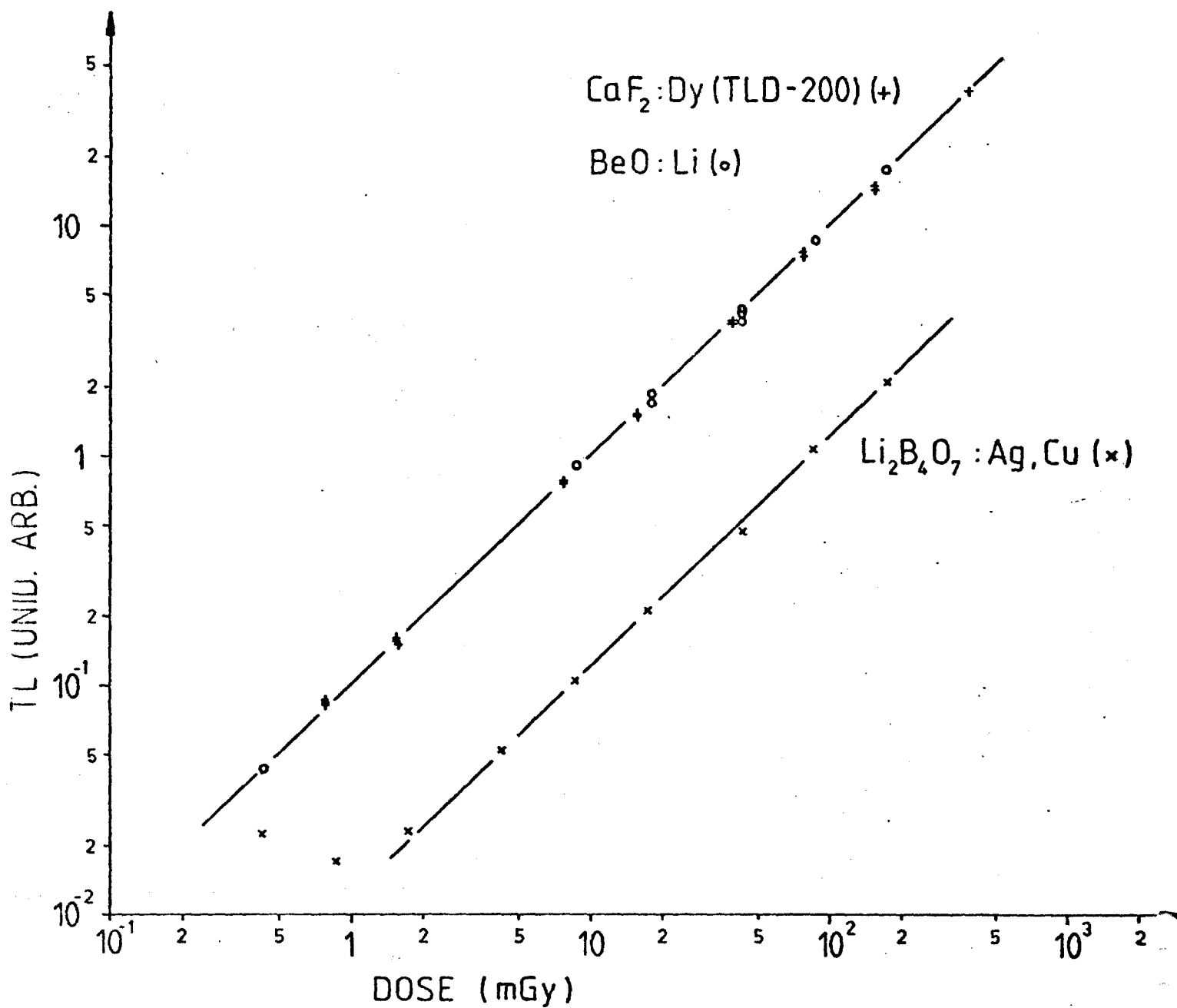


Fig.III-1: Resposta TL em função da dose absorvida da radiação da fonte de ⁹⁰Sr-⁹⁰Y, de diferentes materiais, atrás de 1,94 mg/cm² de tecido. Valores relativos a uma dose unitária de ⁶⁰Co.



g.III-2: Resposta TL em função da dose absorvida da radiação da fonte de ^{90}Sr - ^{90}Y , de diferentes materiais, atrás de $1,94 \text{ mg/cm}^2$ de tecido. Valores relativos a uma dose unitária de ^{60}Co .

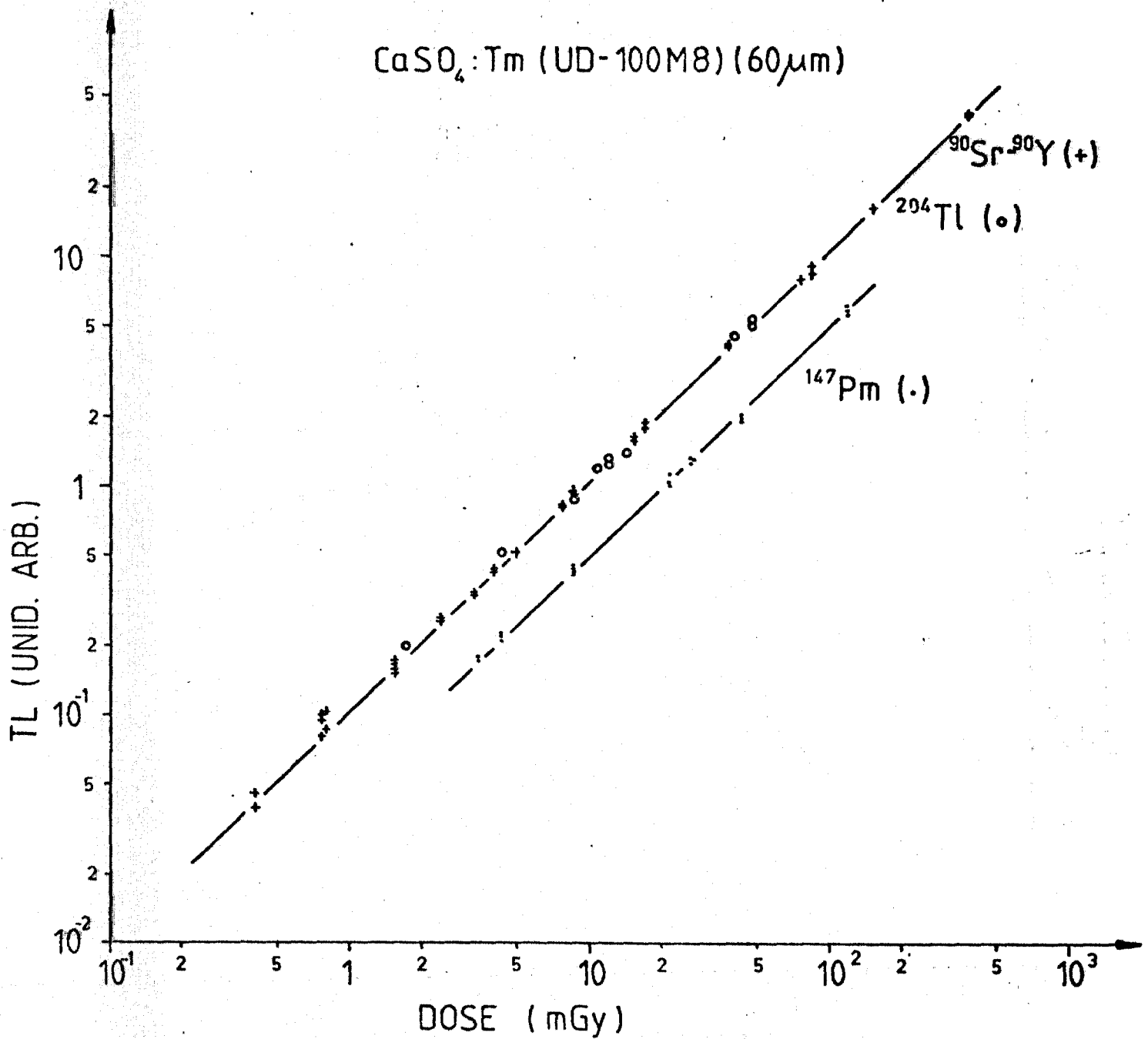


Fig.III-3: Resposta TL em função da dose absorvida da radiação das fontes de $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$, ^{204}Tl e ^{147}Pm , atrás de $1,94\text{ mg/cm}^2$ de tecido. Amostras: $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ ($60\mu\text{m}$ de espessura). Valores relativos a uma dose unitária de ^{60}Co .

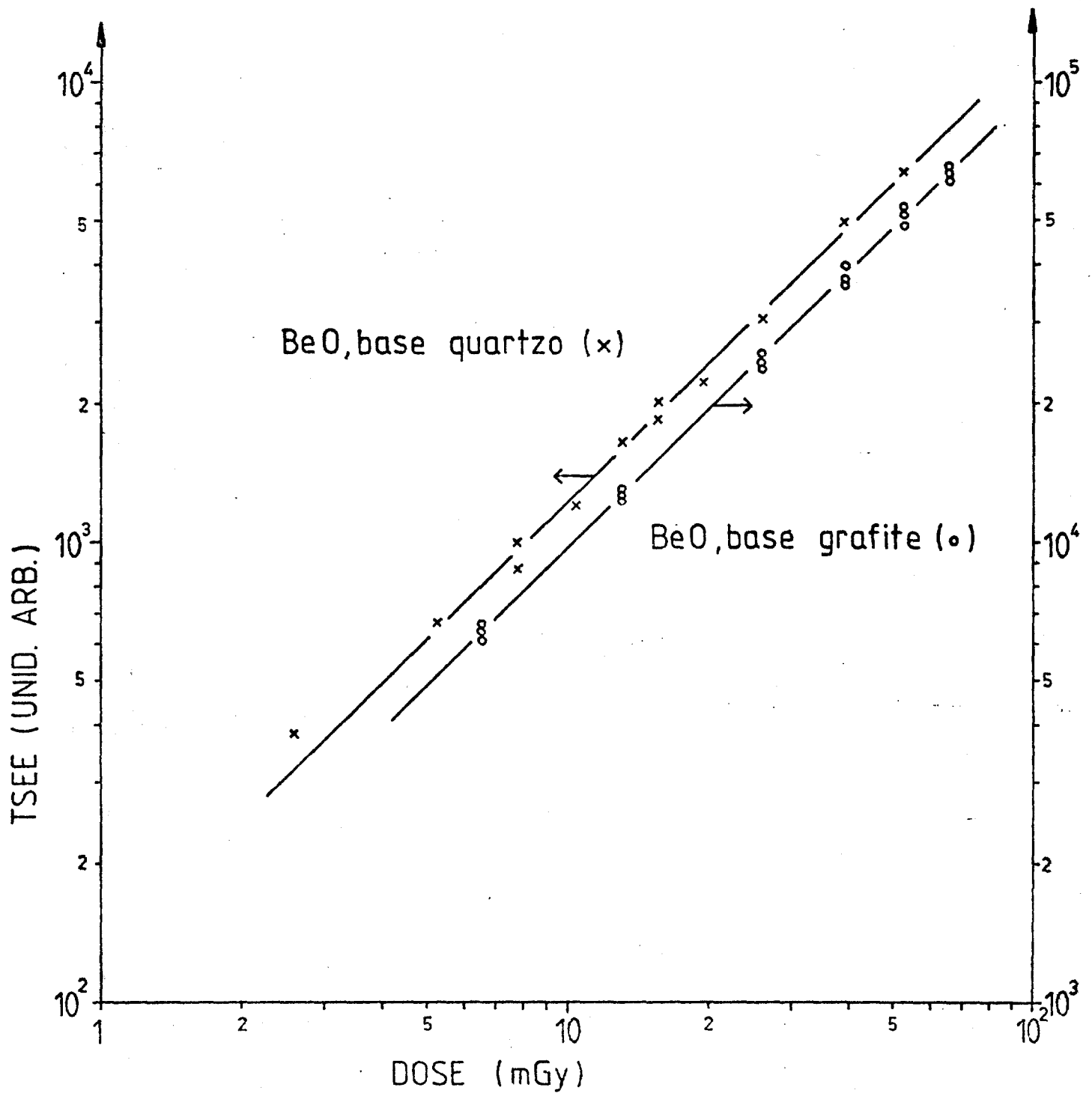


Fig.III-4: Resposta TSEE em função da dose absorvida da radiação da fonte de ⁹⁰Sr-⁹⁰Y, atrás de 1,94 mg/cm² de tecido. Valores relativos a uma dose unitária de ⁶⁰Co.

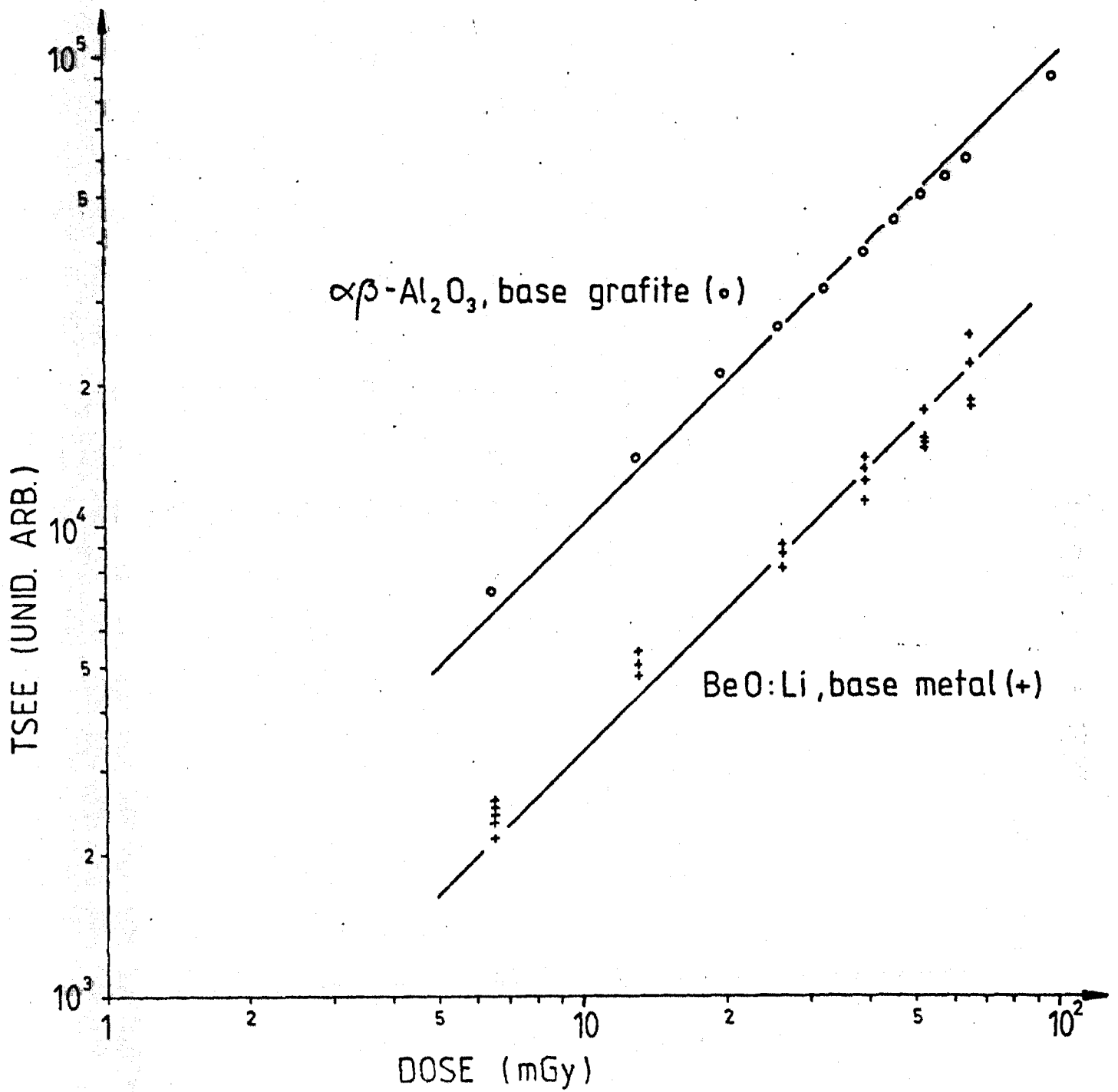


Fig.III-5: Resposta TSEE em função da dose absorvida da radiação da fonte de ^{90}Sr - ^{90}Y , atrás de $1,94 \text{ mg/cm}^2$ de tecido. Valores relativos a uma dose unitária de ^{60}Co .

também falta de linearidade, o que concorda com resultados anteriores⁴⁴⁾.

Os detectores de TSEE foram, como no caso de TL, também submetidos à radiação beta de ^{204}Tl e ^{147}Pm , tendo-se verificado comportamentos lineares em função da dose.

III-c2. Fator de transmissão

Os fatores de transmissão foram determinados para cada uma das fontes de radiação beta do conjunto padrão Buchler, usando-se todos os tipos de detectores TL caracterizados neste capítulo.

As amostras, sempre em número de 4 ou 5 cada vez, foram irradiadas às distâncias de calibração até uma determinada dose, variando-se a espessura da placa absorvedora intermediária: folhas de plástico Hostaphan (Melinex), Makrofol KG e Plexiglas. Os tratamentos térmicos antes e após as irradiações foram os habituais.

Representando-se os valores da resposta TL, por unidade de dose, em função da densidade superficial da camada absorvedora equivalente a tecido, e extrapolando-se a curva obtida para densidade nula, foram obtidos os valores de fator de transmissão, em cada caso. O método utilizado foi o mesmo já descrito no capítulo II, com câmara de extrapolação.

No caso da fonte de ^{147}Pm , a espessura do absorvedor foi variada entre 2,5 e 50 μm , correspondendo a $3,24 \cdot 10^{-1}$ e 6,48 mg/cm^2 . A variação entre as medidas TL para cada tipo de folha Hostaphan nunca foi superior a 3,0%.

Durante as irradiações com ^{204}Tl , a espessura do plástico variou entre 10 e 190 μm (respectivamente folha Makrofol 1,22 mg/cm^2 e Hostaphan 25,92 mg/cm^2). Os valores da resposta TL apresentaram-se sempre dentro de uma variação inferior a 3,5%, exceto no caso de $\text{CaF}_2:\text{Mn}$, onde alcançou até 4,8%.

Somente no caso da fonte de ^{90}Sr - ^{90}Y (50 mCi), foi possível usar-se uma placa de Plexiglas de espessura máxima 1,5 mm ($1,70 \cdot 10^2$ mg/cm²) e ainda obter-se resposta TL. Como no caso anterior, a variação entre as medidas foi apenas superior a 3,5% para as amostras de $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ (até 5,0%).

As Fig.III-6 e Fig.III-7 apresentam as curvas do fator de transmissão para as amostras TL de LiF (TLD-100) normal e com grafite respectivamente, em função da densidade superficial de camada absorvedora equivalente a tecido.

Nas Fig.III-8, Fig.III-9 e Fig.III-10 foram representados os resultados para $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ (TLD-400) normal e fino e $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ (TLD-200) respectivamente.

As curvas obtidas com as amostras com suporte metálico $\text{BeO}:\text{Li}$, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag,Cu}$, $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ (UD-100 M8, de espessura 60 μm) e $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ (espessura 70 μm) estão apresentadas respectivamente nas Fig.III-11, Fig.III-12, Fig.III-13 e Fig.III-14.

Comportamentos semelhantes podem ser observados em todos os casos: uma queda brusca no caso da radiação de ^{147}Pm e um comportamento decrescente lento para ^{204}Tl . No caso da fonte de ^{90}Sr - ^{90}Y nota-se um aumento inicial do fator de transmissão, que atinge um máximo em geral para densidade superficial entre 20 e 30 mg/cm², e apresentando a seguir um comportamento decrescente. Somente para as amostras de $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ (TLD-200), da Fig.III-10, não foi observada a ocorrência do equilíbrio eletrônico, isto é, o comportamento inicial crescente do fator de transmissão. No caso das amostras de $\text{BeO}:\text{Li}$, $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ normal e fino, o máximo da curva foi atingido respectivamente para 85,50 e 70 mg/cm², tendo mostrado os efeitos mais pronunciados.

A partir dos gráficos das Fig.III-6 a Fig.III-14 foram determinados os fatores de transmissão, representados na Tabela III-4.

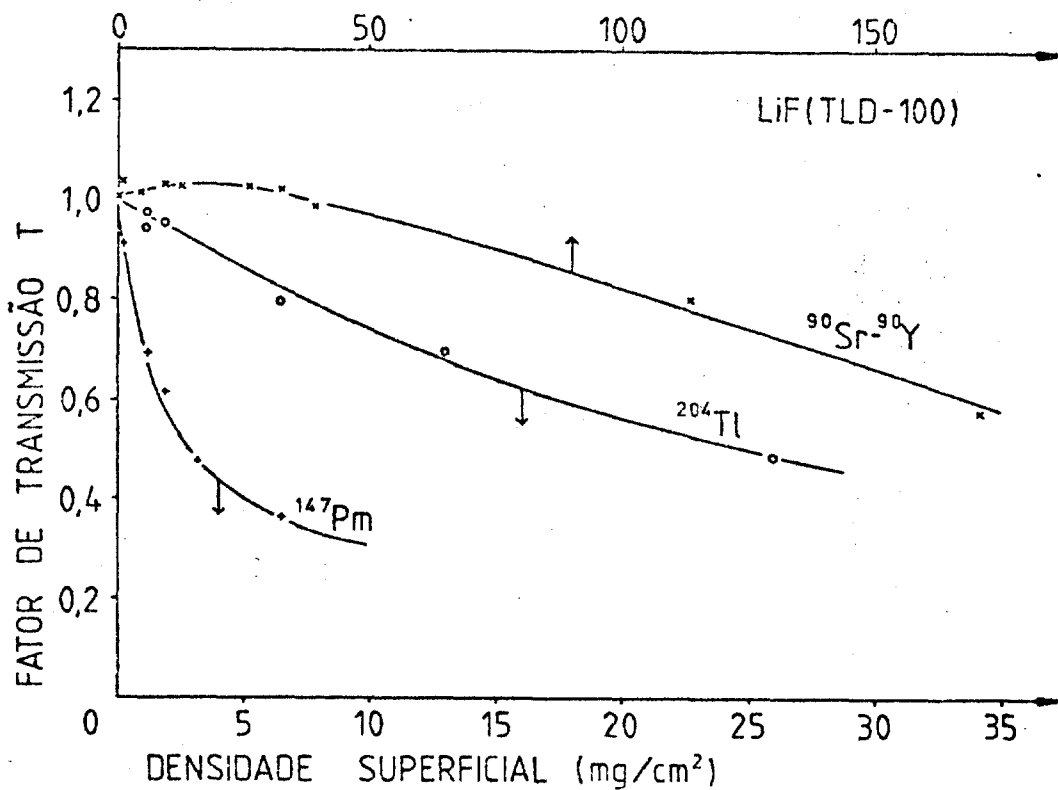


Fig.III-6: Fatores de transmissão para as fontes de radiação beta em camada absorvedora equivalente a tecido. Amostras TL de LiF (TLD-100), de espessura 0,9 mm.

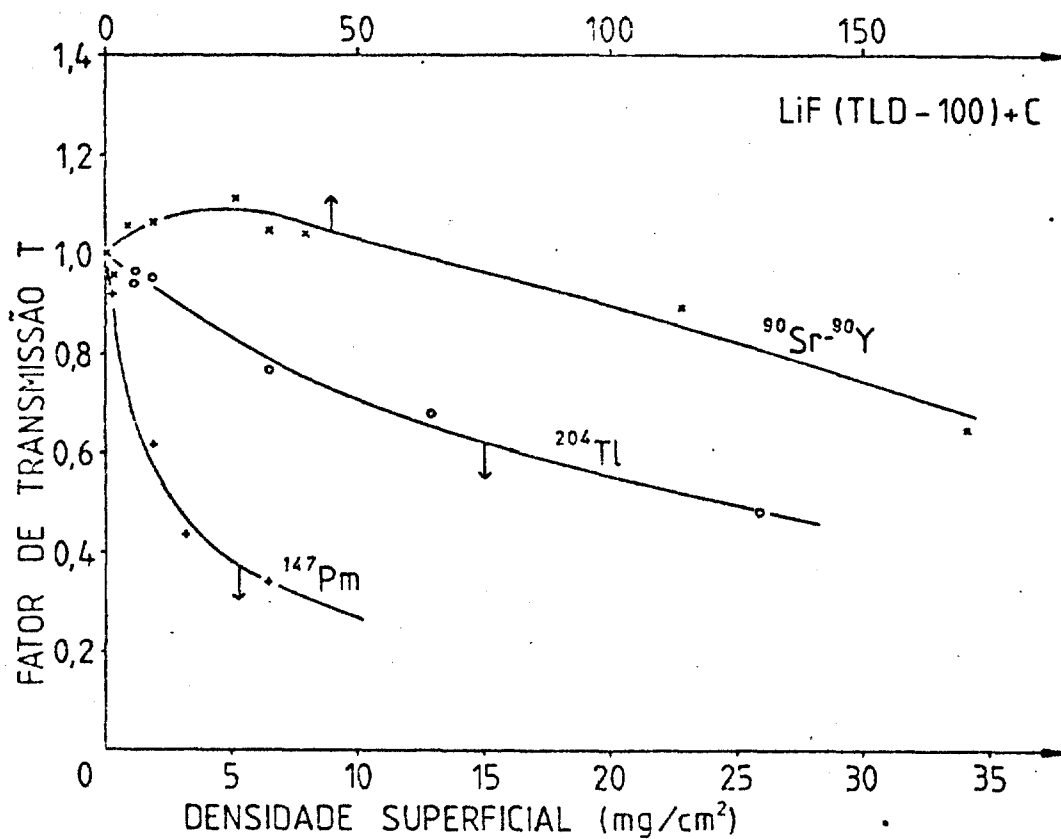


Fig.III-7: Fatores de transmissão para as fontes de radiação beta, em camada absorvedora equivalente a tecido. Amostras TL de LiF (TLD-100) + C, de espessura 0,9 mm.

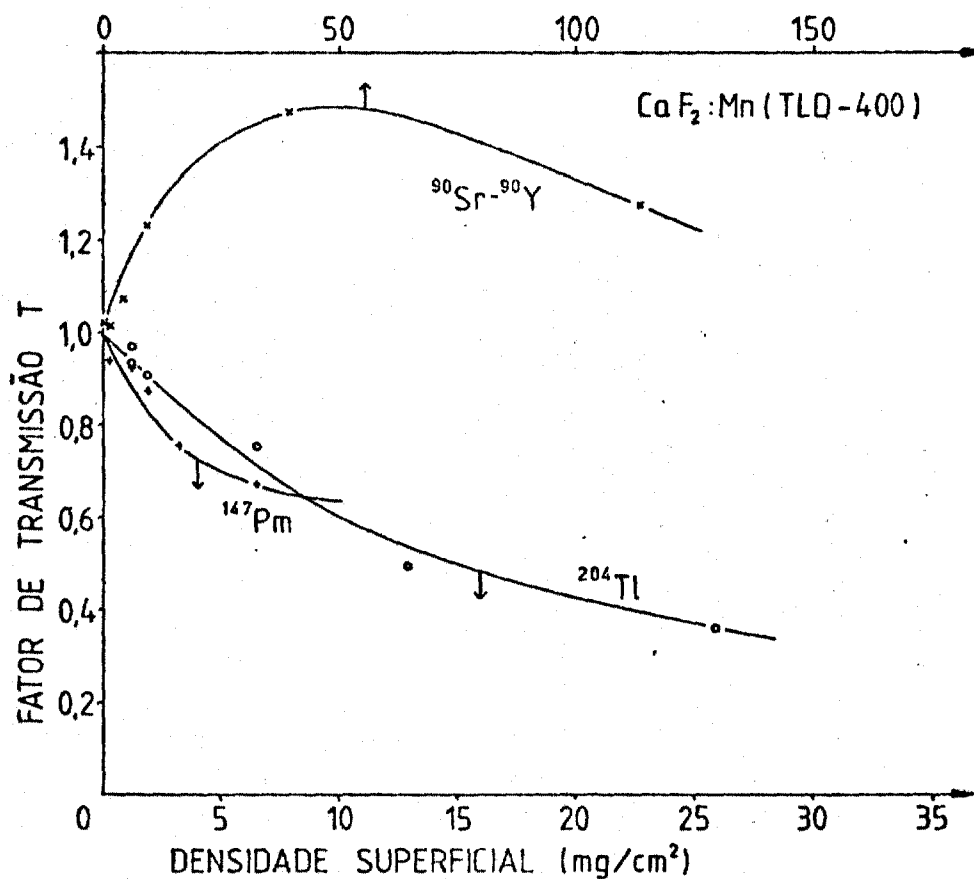


Fig.III-8: Fatores de transmissão para as fontes de radiação beta, em camada absorvedora equivalente a tecido. Amostras TL de CaF₂:Mn(TLD-400), de espessura 0,9 mm.

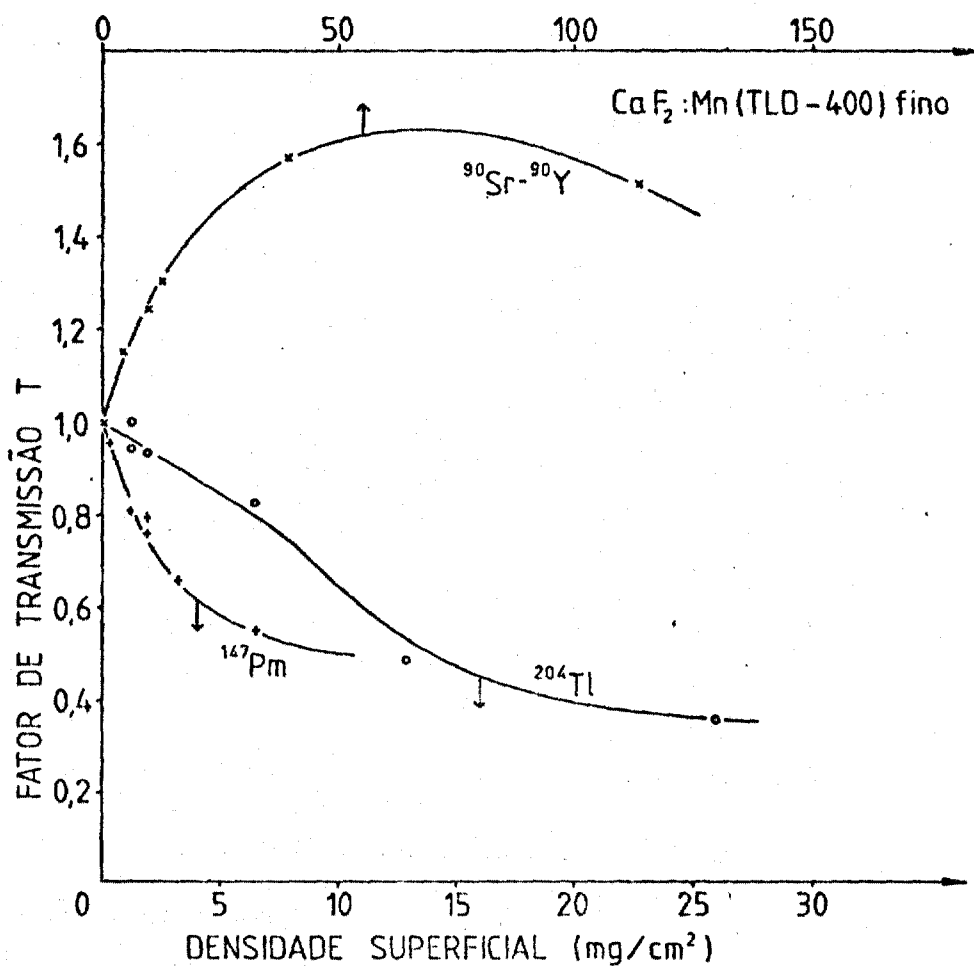


Fig.III-9: Fatores de transmissão para as fontes de radiação beta, em camada absorvedora equivalente a tecido. Amostras TL de CaF₂:Mn(TLD-400) fino, de espessura 0,25 mm.

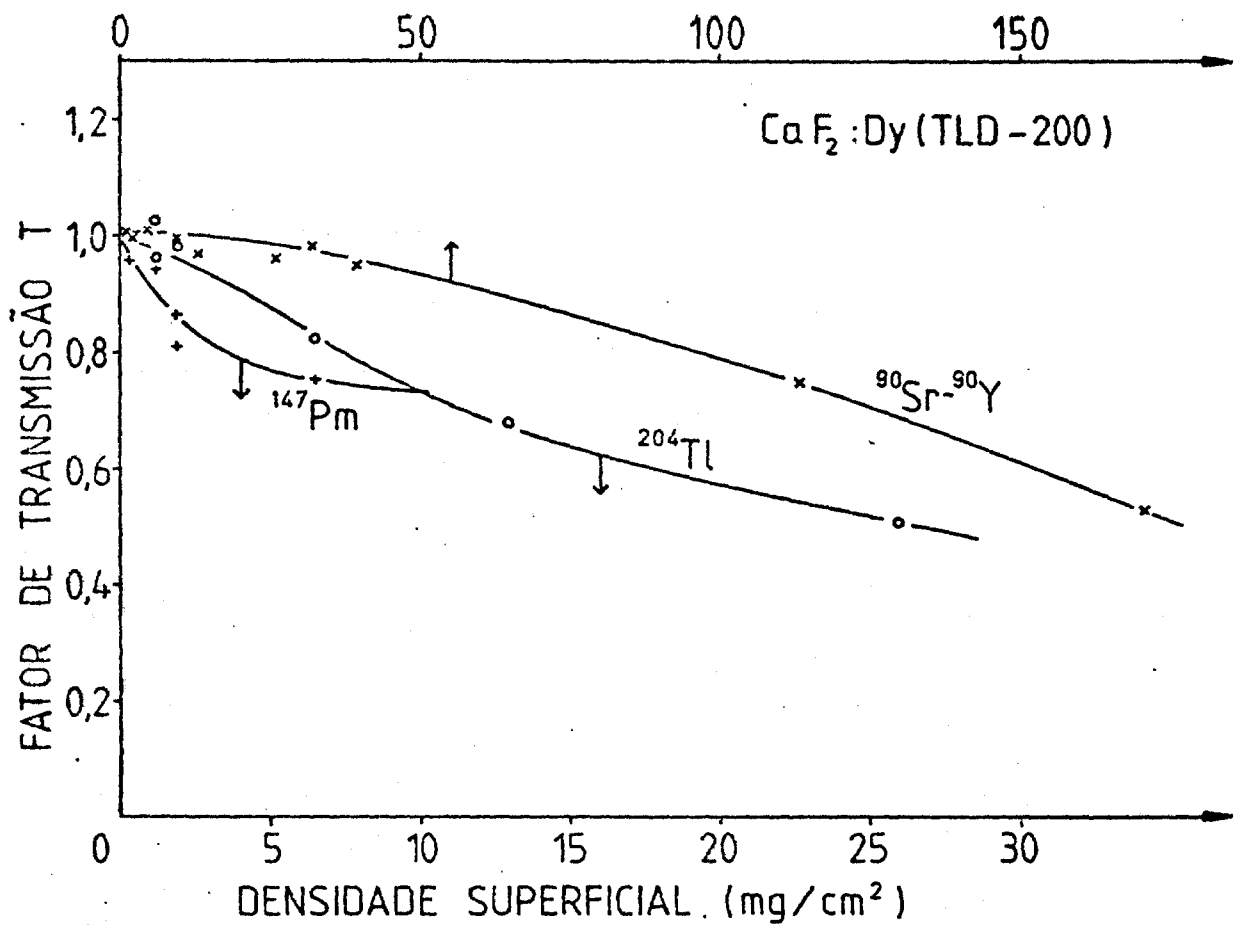


Fig.III-10: Fatores de transmissão para as fontes de radiação beta, em camada absorvedora equivalente a tecido. Amostras TL de $\text{CaF}_2:\text{Dy}(\text{TLD}-200)$, de espessura 0,9 mm.

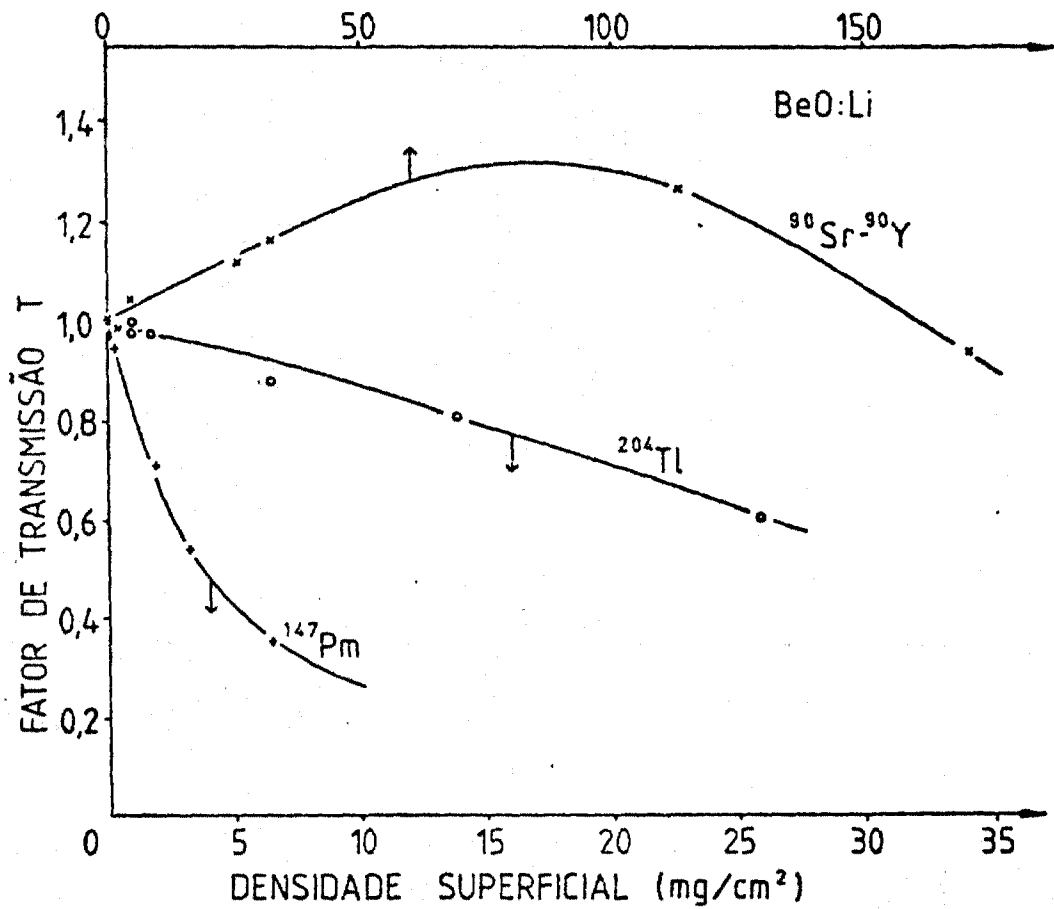


Fig.III-11: Fatores de transmissão para as fontes de radiação beta, em camada absorvedora equivalente a tecido. Amostras TL de $\text{BeO}:\text{Li}$, de espessura $60\ \mu\text{m}$, com suporte metálico.

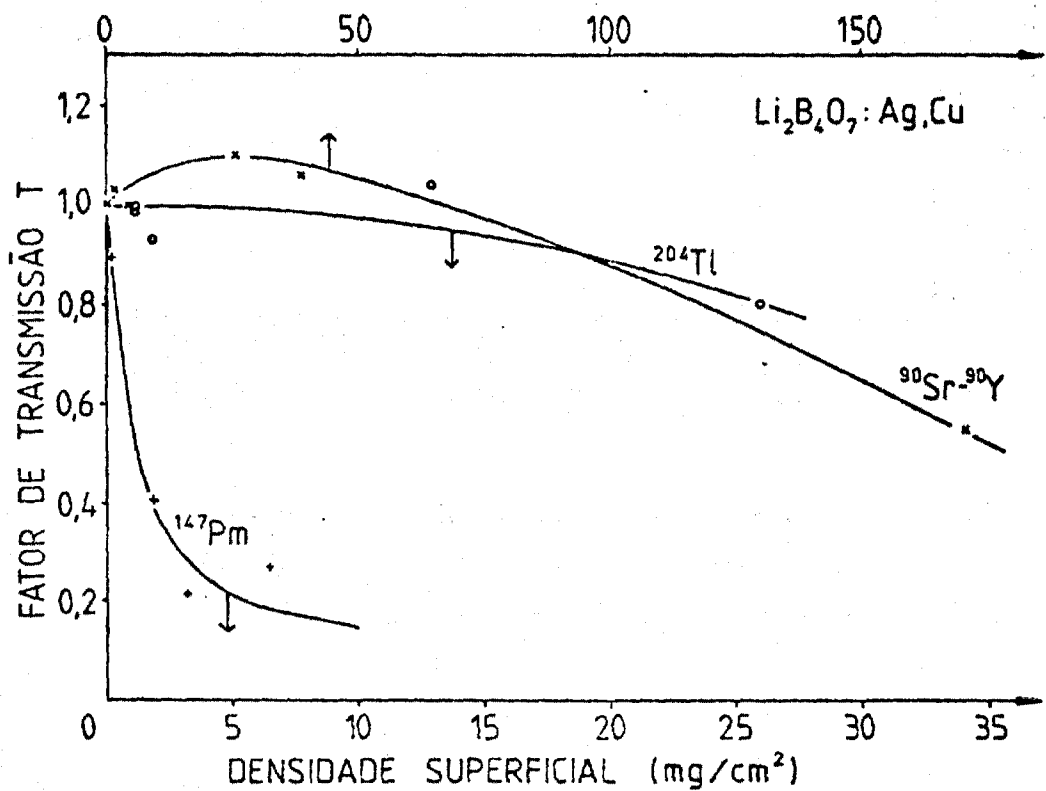


Fig.III-12: Fatores de transmissão para as fontes de radiação beta, em camada absorvedora equivalente a tecido. Amostras TL de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag,Cu}$, de espessura $70\ \mu\text{m}$, com suporte metálico.

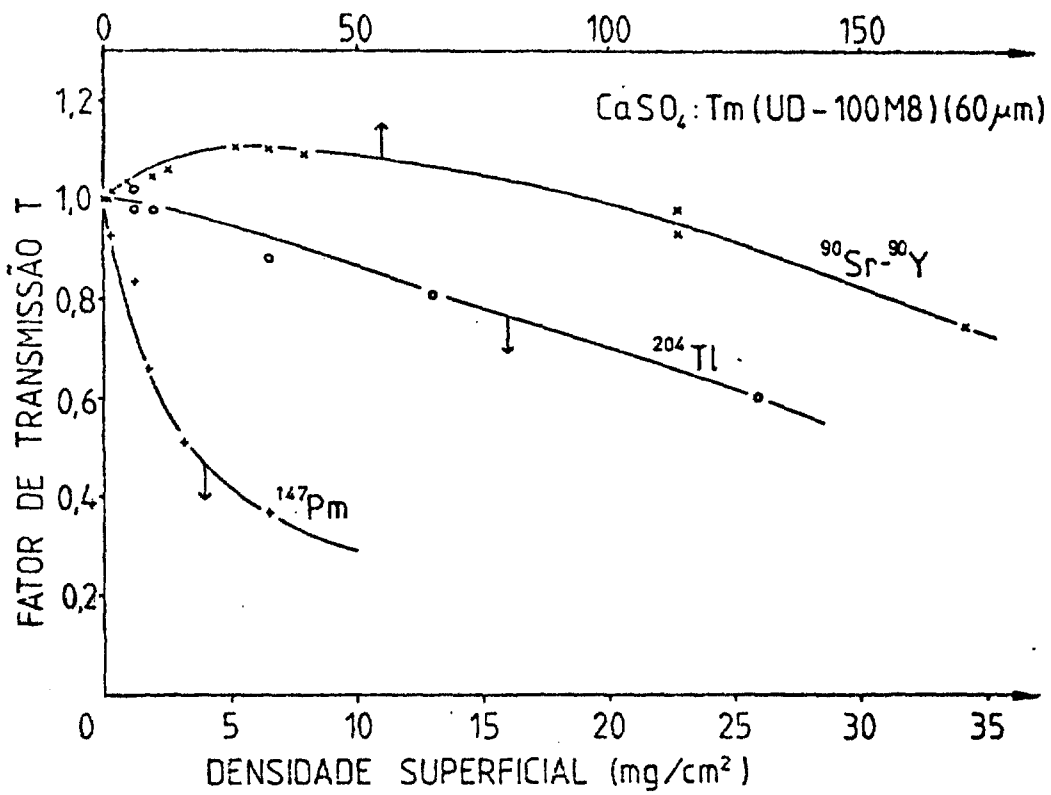


Fig.III-13: Fatores de transmissão para as fontes de radiação beta, em camada absorvedora equivalente a tecido. Amostras TL de CaSO₄:Tm(UD-100M8), de espessura 60 μm, com suporte metálico.

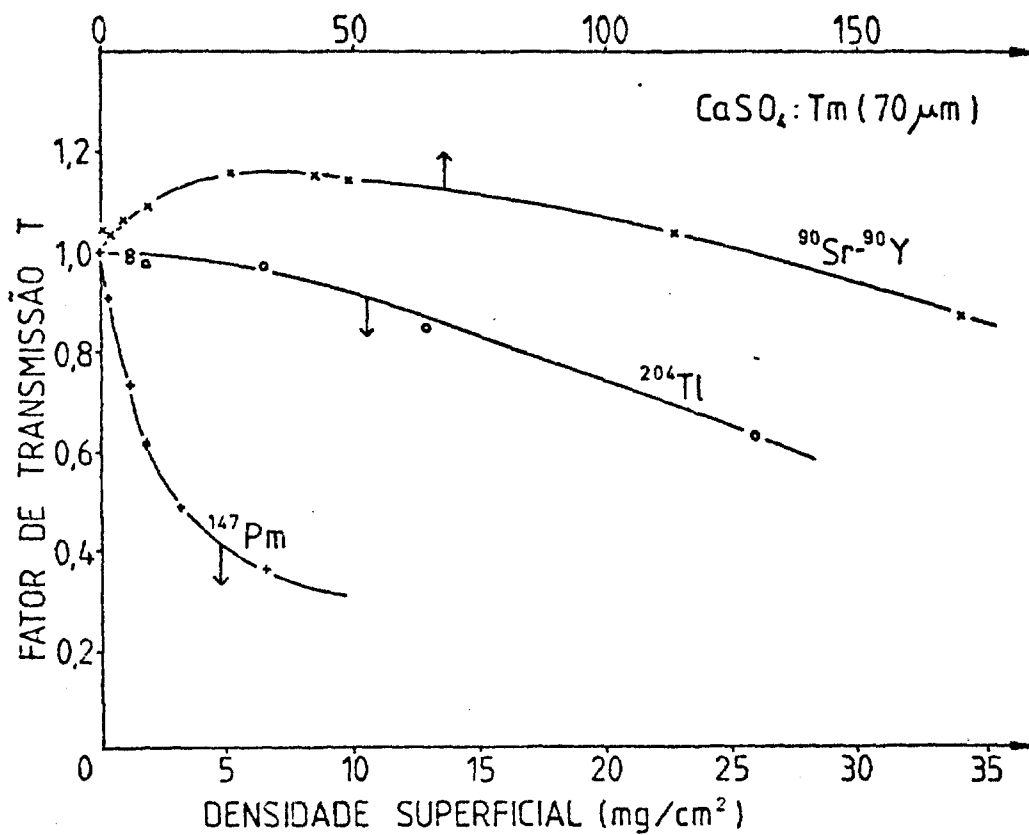


Fig.III-14: Fatores de transmissão para as fontes de radiação beta, em camada absorvedora equivalente a tecido. Amostras TL de CaSO₄:Tm, de espessura 70 μm, com suporte metálico.

Espessura de tecido (mm)	LiF (TLD - 100)			LiF (TLD - 100) + C			BeO : Li		
	147Pm	204Tl	90Sr-90Y	147Pm	204Tl	90Sr-90Y	147Pm	204Tl	90Sr-90Y
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,02	0,570	0,945	1,010	0,555	0,934	1,020	0,670	0,975	1,015
0,04	0,437	0,888	1,015	0,420	0,865	1,035	0,480	0,953	1,025
0,05	0,400	0,860	1,020	0,383	0,835	1,043	0,420	0,940	1,030
0,07	0,350	0,807	1,023	0,328	0,775	1,054	0,340	0,915	1,040
0,10	0,305	0,737	1,027	0,270	0,705	1,068	0,262	0,870	1,055
0,20		0,560	1,030		0,550	1,090		0,705	1,105
0,50			0,965			1,030			1,245
1,00			0,820			0,895			1,300
	CaF ₂ :Dy (TLD-200)			CaF ₂ :Mn (TLD-400)			CaF ₂ :Mn (TLD-400) fino		
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,02	0,853	0,960	1,000	0,818	0,903	1,065	0,732	0,942	1,055
0,04	0,788	0,907	1,000	0,725	0,814	1,115	0,618	0,880	1,115
0,05	0,770	0,875	1,000	0,698	0,771	1,140	0,583	0,845	1,143
0,07	0,750	0,815	1,000	0,652	0,694	1,185	0,535	0,778	1,200
0,10	0,730	0,733	1,000	0,634	0,600	1,247	0,500	0,645	1,265
0,20		0,574	0,990		0,426	1,367		0,393	1,415
0,50			0,932			1,485			1,605
1,00			0,788			1,327			1,567

Tabela III-4: Fatores de transmissão T.
Fontes: 90Sr-90Y, 204Tl e 147Pm.

Espessura de tecido		Li ₂ B ₄ O ₇ :Ag,Cu			CaSO ₄ :Tm (UD - 100 M8, 60 µm)			CaSO ₄ :Tm (70 µm)		
(mm)	(mg/cm ²)	147Pm	204Tl	90Sr-90Y	147Pm	204Tl	90Sr-90Y	147Pm	204Tl	90Sr-90Y
0	0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,02	2	0,380	0,995	1,017	0,630	0,987	1,020	0,590	0,995	1,035
0,04	4	0,240	0,993	1,030	0,465	0,960	1,033	0,440	0,985	1,055
0,05	5	0,210	0,991	1,037	0,418	0,946	1,040	0,405	0,978	1,063
0,07	7	0,175	0,987	1,050	0,351	0,915	1,050	0,350	0,957	1,080
0,10	10	0,142	0,970	1,065	0,287	0,865	1,064	0,300	0,915	1,100
0,20	20		0,887	1,093		0,699	1,100		0,740	1,142
0,50	50			1,050			1,085			1,145
1,00	100			0,878			0,990			1,067

Tabela III-4 (cont.): Fatores de transmissão T.
Fontes: 90Sr-90Y, 204Tl e 147Pm.

III-c3. Dependência angular

Na escolha de um detector adequado para dosimetria da radiação é importante o conhecimento de sua dependência angular. É o comportamento da resposta (neste caso TL) em função do ângulo de incidência da radiação na amostra.

As experiências realizadas nesta parte do trabalho consistiram em expor-se os fósforos TL à radiação beta das fontes do conjunto padrão Buchler, variando-se o ângulo de incidência entre 0 e 180°, que correspondem respectivamente às exposições frontal e traseira.

Os detectores foram colocados em porta-amostras especiais, apresentando possibilidade de rotação em torno do seu eixo, para que a distância entre fonte e amostra fosse sempre a mesma. Para prender os detectores em posição vertical para a irradiação, foi utilizada a folha plástica Hostaphan RE 2,5, cujas características são: espessura de 2,5 μm e densidade superficial equivalente a tecido de 0,324 mg/cm².

Devido ao curto alcance da radiação beta na matéria e à opacidade de algumas amostras, os detectores TL devem sempre apresentar a mesma face tanto à exposição à radiação como à medida TL, ocorrendo por isso o interesse no estudo da dependência angular especialmente entre 0 e 90°. As medidas entre 90 e 180° têm a finalidade de possibilitar o aproveitamento dos resultados obtidos para a determinação de dose mesmo tendo ocorrido engano de lado do detector por ocasião de sua preparação para a irradiação. Isto significa que se a face não convecionada da amostra foi exposta à radiação, ainda é possível aproveitar-se os dados. A medida TL é, entretanto, realizada sempre com a face convencional voltada para o tubo fotomultiplicador, por causa da calibração prévia.

Os fósforos TL foram irradiados com as fontes de ⁹⁰Sr-⁹⁰Y (50 mCi), ²⁰⁴Tl e ¹⁴⁷Pm com respectivamente 43,5, 8,7 e 17,4 mGy, para cada ângulo de incidência da radiação. Os tratamentos térmicos foram os habituais.

Os resultados deste estudo foram representados em gráficos (Fig.III-15 a Fig.III-23) sob forma de resposta TL, por unidade de dose, em função do ângulo mencionado.

As Fig.III-15 e Fig.III-16 apresentam os resultados obtidos com as amostras de LiF (TLD-100) normal e com grafite. Nas Fig.III-17, Fig.III-18 e Fig.III-19 foram representados os comportamentos dos fósforos de CaF_2 , ou seja, respectivamente $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ (TLD-400) normal, fino e $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ (TLD-200). Finalmente, os dados devidos aos detectores com suporte metálico, ou seja, $\text{BeO}:\text{Li}$, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag,Cu}$, $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ (60 μm) e $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ (70 μm), podem ser observados respectivamente nas Fig.III-20, Fig.III-21, Fig.III-22 e Fig.III-23.

Nota-se na maioria dos casos a ocorrência de uma simetria aproximada nas curvas, em relação ao ângulo de incidência de 90° .

A opacidade de algumas amostras é a responsável fundamental pela falta da simetria, observada principalmente nos casos de LiF (TLD-100) com grafite, onde o efeito pode ser visto para todos os tipos de radiação beta, em amostras de suporte metálico, para a radiação de ^{147}Pm . A espessura das amostras desempenha naturalmente neste caso papel importante.

Tomando-se a diferença entre os valores TL para 0 e 90° , em relação ao valor para 0° , pode-se praticamente dividir os detectores em dois grupos, que se comportam de forma semelhante: amostras TLD da Harshaw Chem. Co. (Fig.III-15 a Fig.III-19) e amostras com suporte metálico (Fig.III-20 a Fig.III-23). Enquanto que no primeiro grupo as diferenças variaram entre 45 e 76%, 72 e 85%, 75 e 80% para respectivamente radiação de ^{147}Pm , ^{204}Tl e $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$, no segundo grupo as variações se apresentaram entre 82 e 89%, 59 e 76%, 61 e 70%. Os detectores de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag,Cu}$ apresentaram as maiores diferenças na resposta TL devida à irradiação a 0 e 90° : 89, 76 e 70%, no grupo a que pertence.

Como se pode observar, a dependência angular apresenta-se marcante. Por isso, a fim de ser possível o uso destes detectores neste tipo de dosimetria, é necessário sempre levar-se sua dependência angular em consideração.

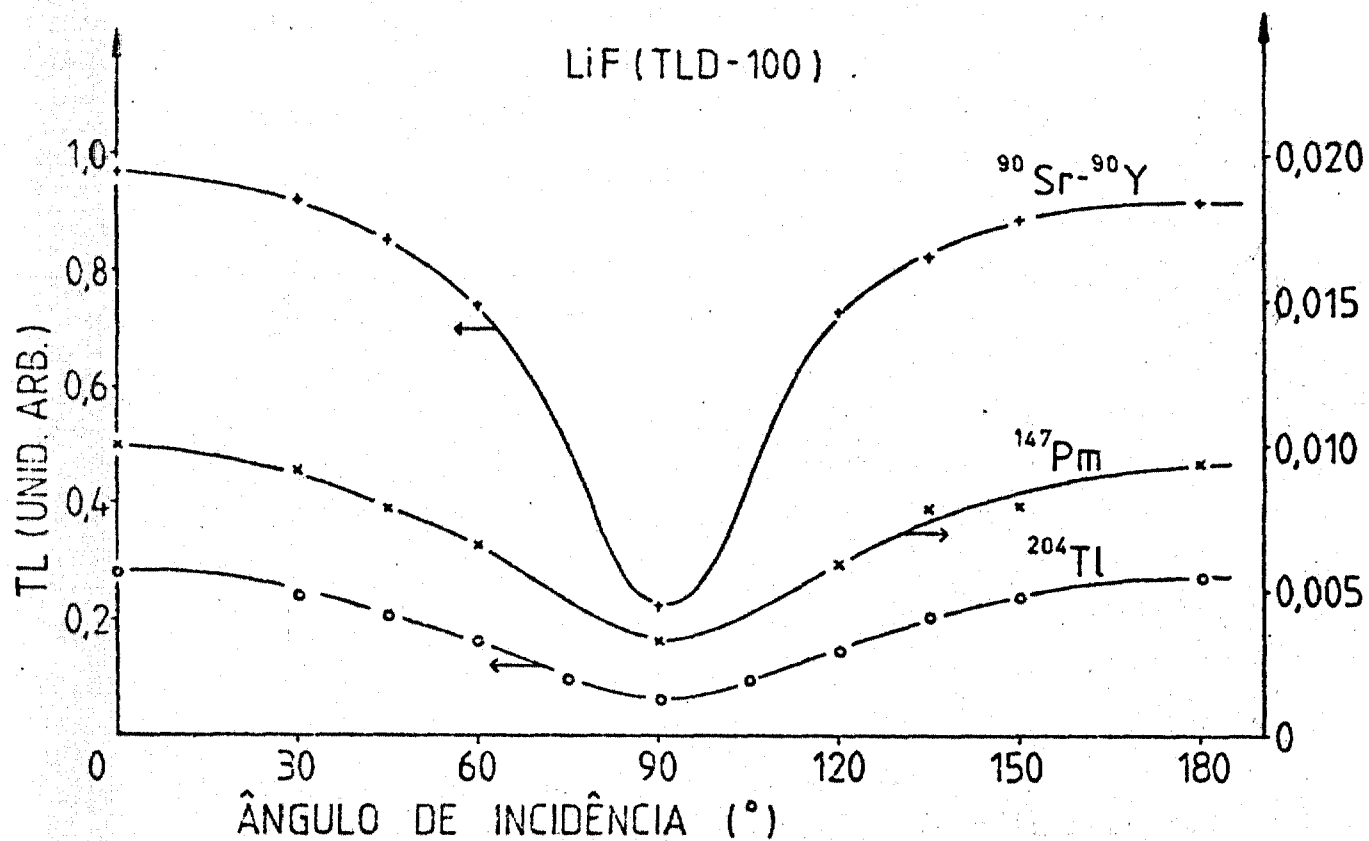


Fig.III-15: Dependência angular da resposta TL das amostras de LiF(TLD-100), expostas à radiação beta, atrás de 0,324 mg/cm² de tecido.

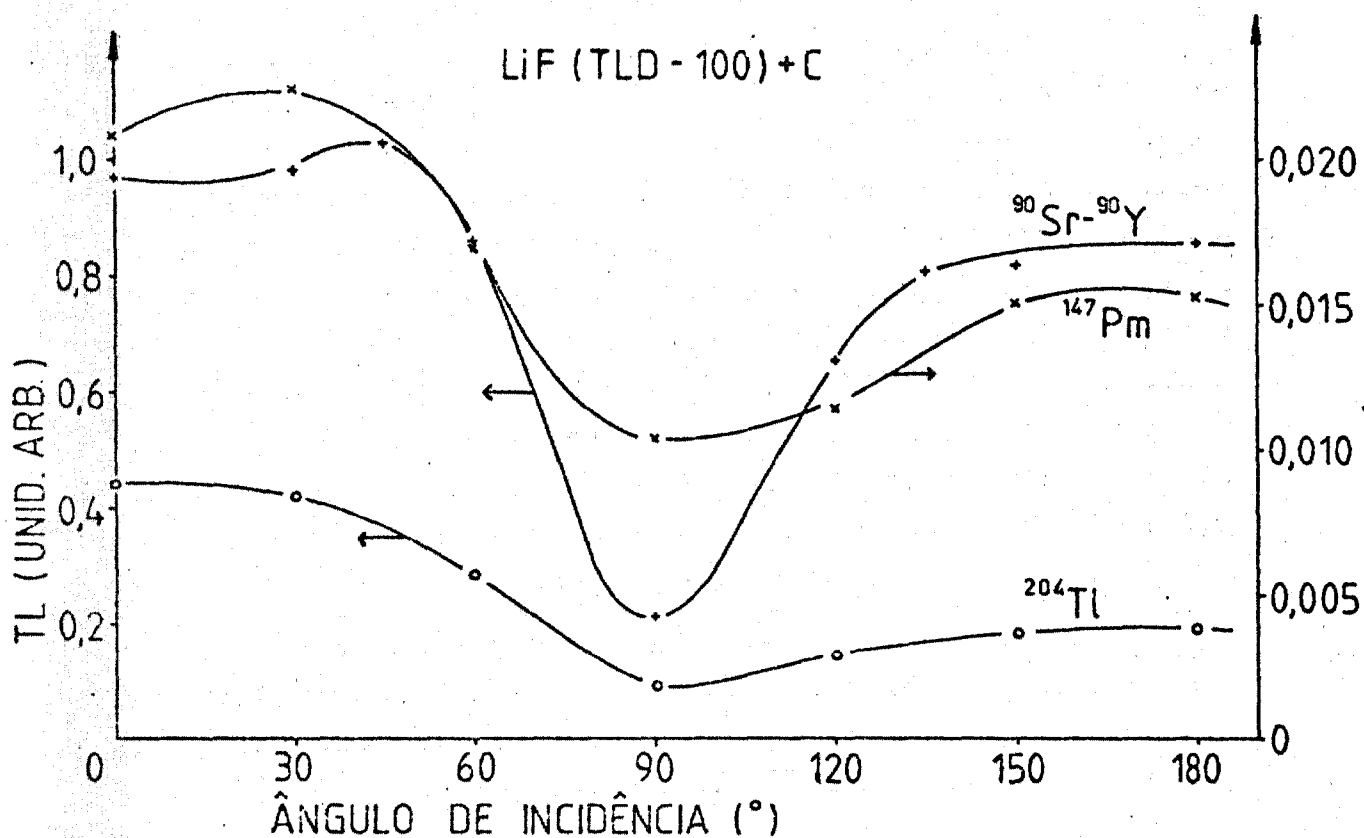


Fig.III-16: Dependência angular da resposta TL das amostras de LiF(TLD-100) + C à radiação beta, atrás de 0,324 mg/cm² de tecido.

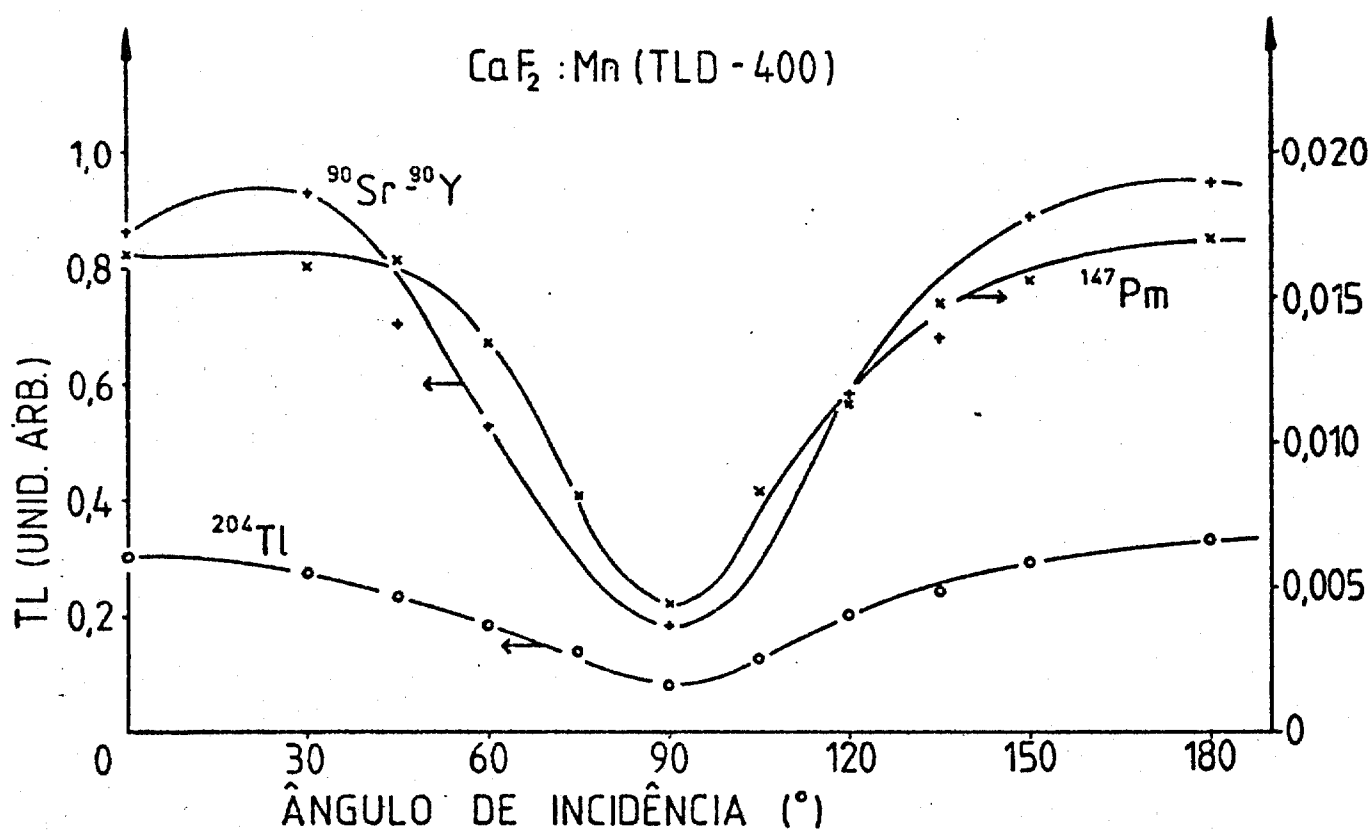


Fig.III-17: Dependência angular da resposta TL das amostras de $\text{CaF}_2:\text{Mn(TLD-400)}$, expostas à radiação beta, atrás de $0,324 \text{ mg/cm}^2$ de tecido.

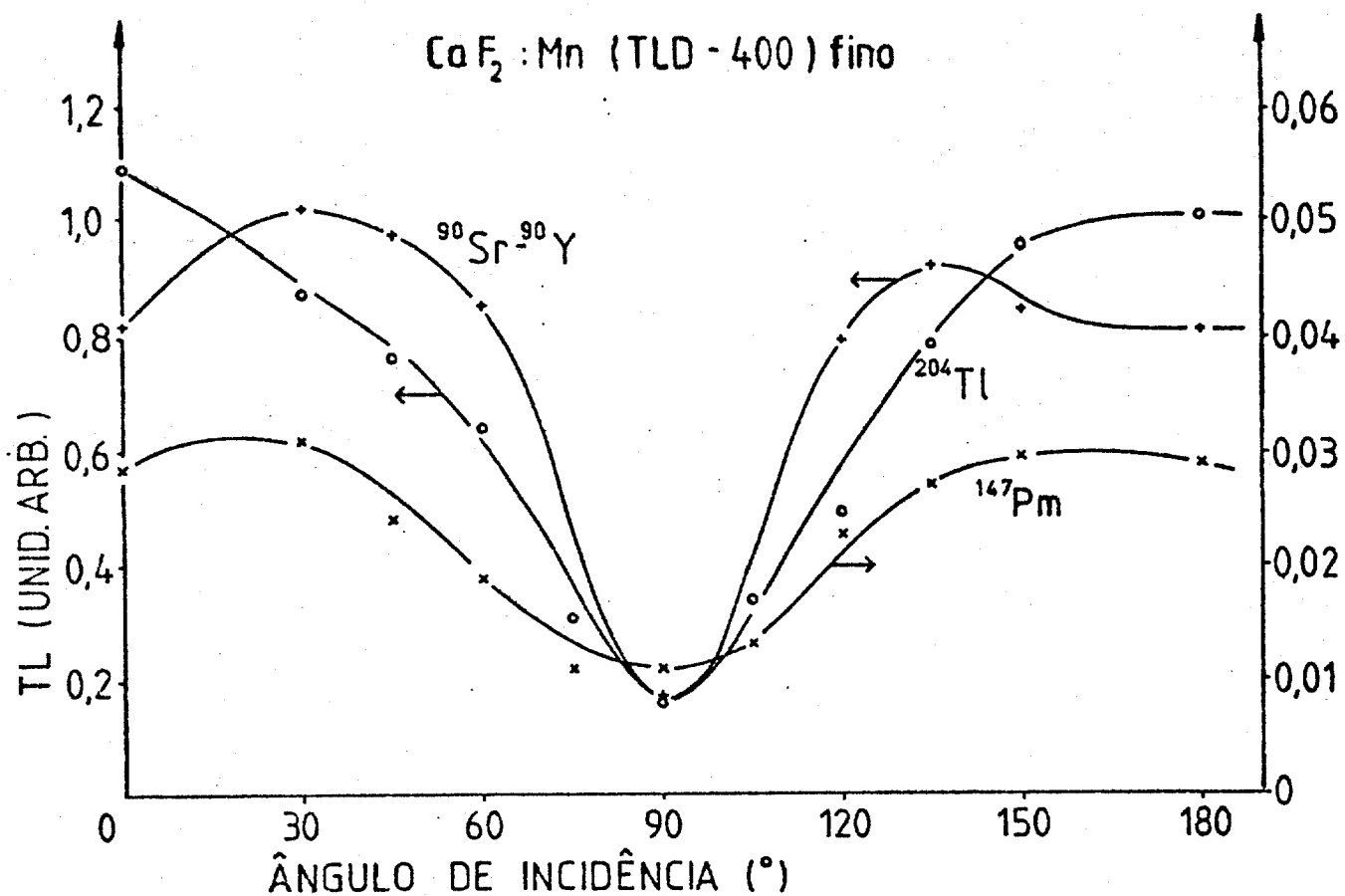


Fig.III-18: Dependência angular da resposta TL das amostras de $\text{CaF}_2:\text{Mn(TLD-400)}$ fino, expostas à radiação beta, atrás de $0,324 \text{ mg/cm}^2$ de tecido.

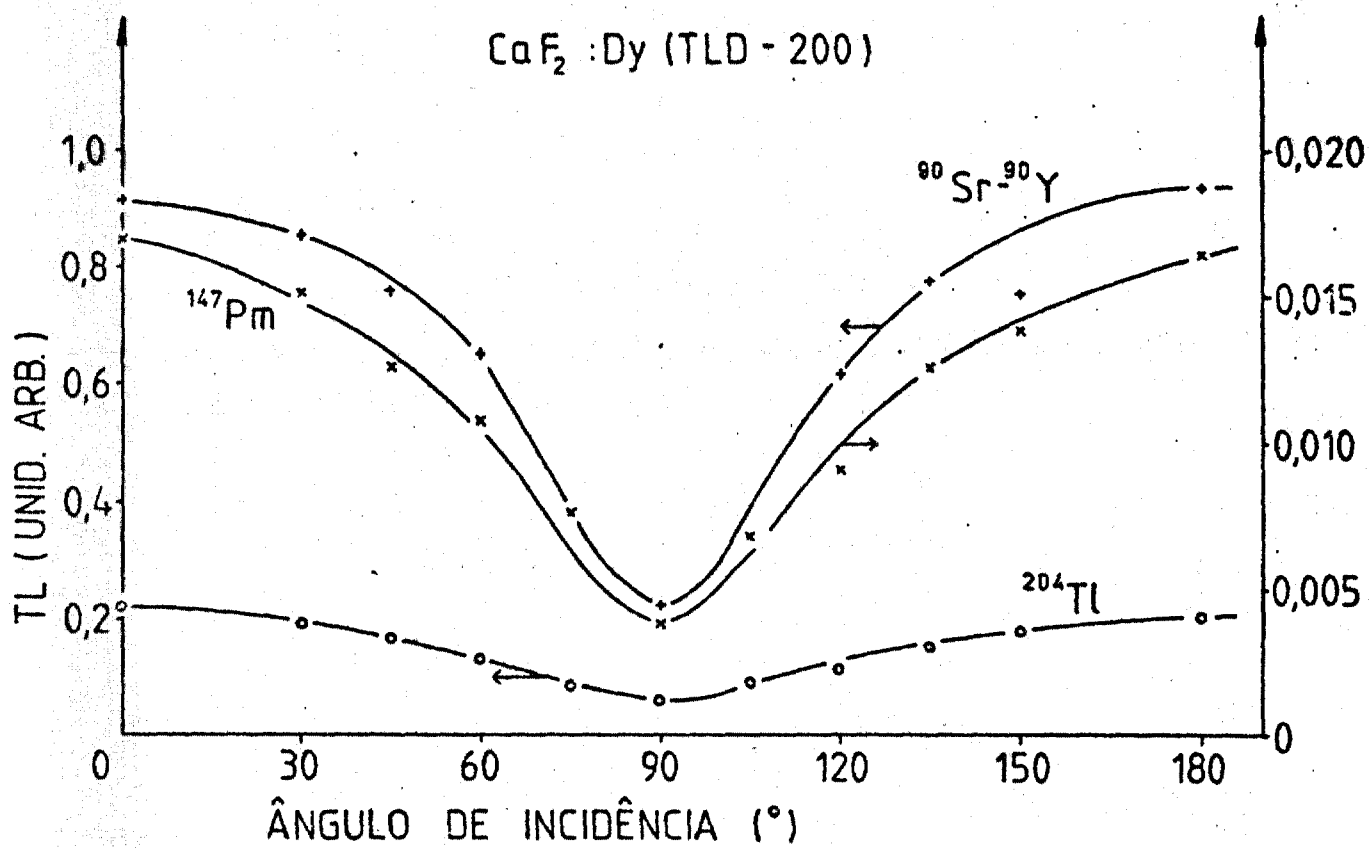


Fig. III-19: Dependência angular da resposta TL das amostras de $\text{CaF}_2 : \text{Dy}$ (TLD-200), expostas à radiação beta, atrás de $0,324 \text{ mg/cm}^2$ de tecido.

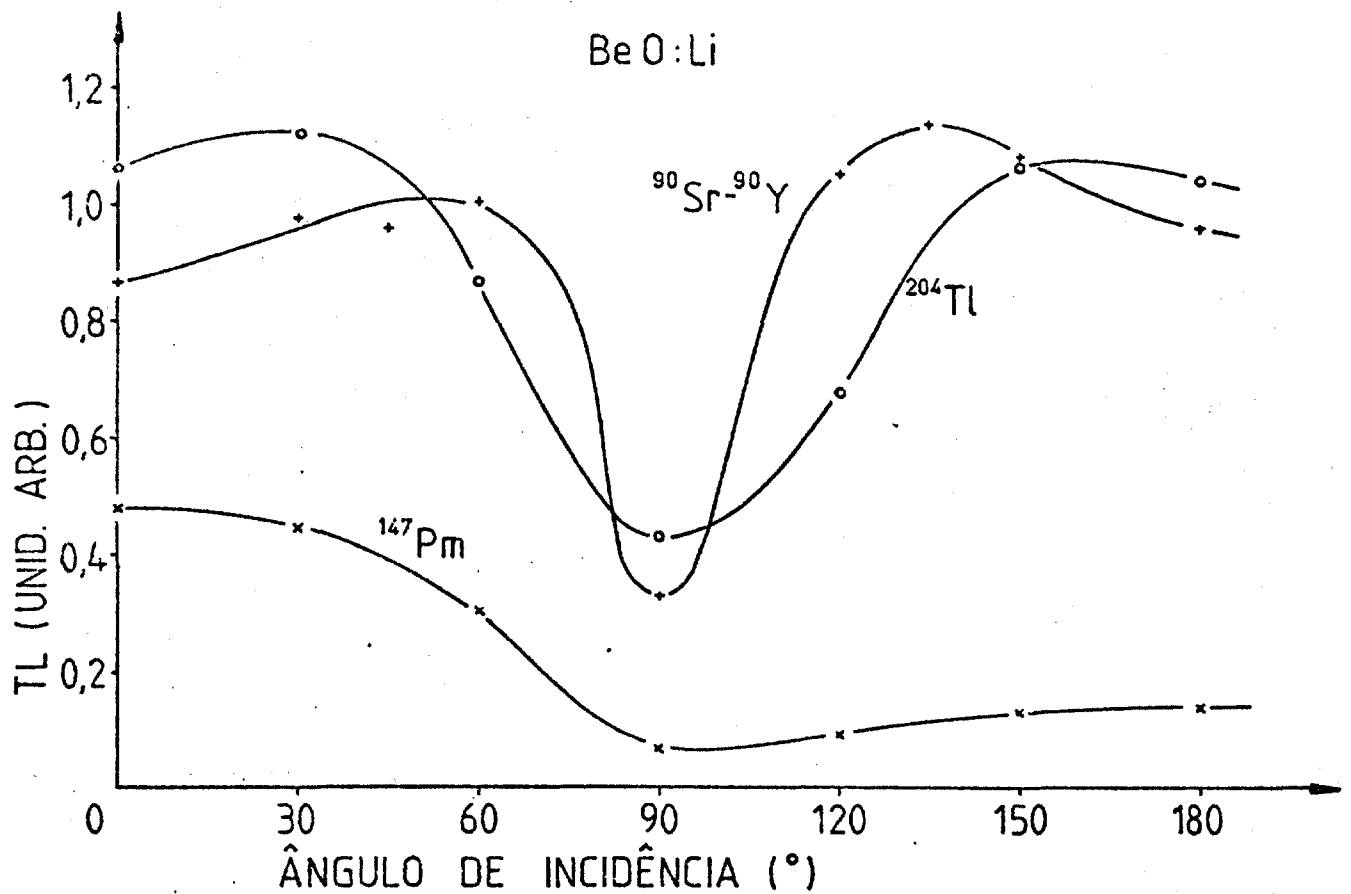


Fig. III-20: Dependência angular da resposta TL das amostras de BeO:Li, expostas à radiação beta, atrás de 0,324 mg/cm² de tecido.

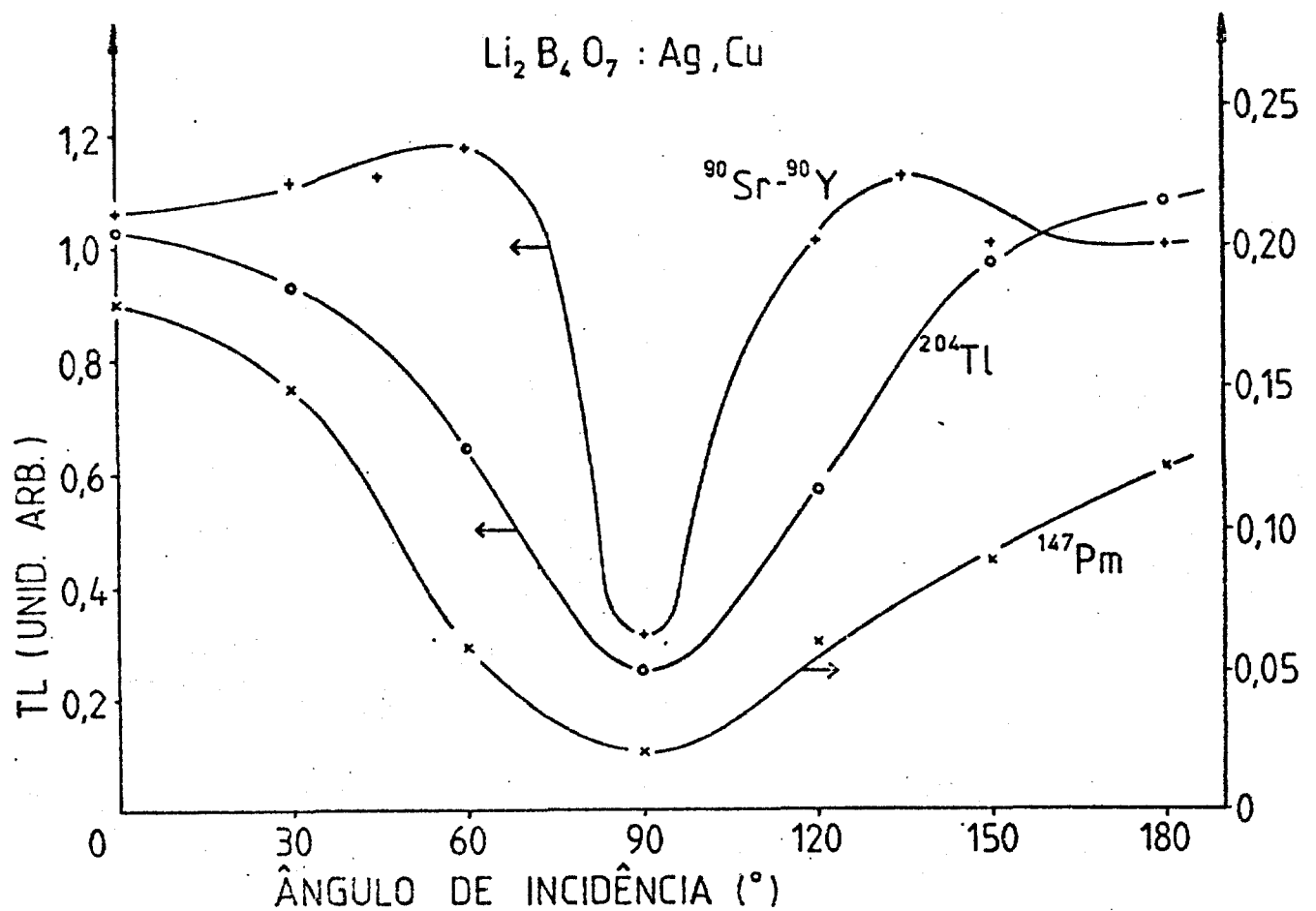


Fig. III-21: Dependência angular da resposta TL das amostras de Li₂B₄O₇:Ag,Cu, expostas à radiação beta, atrás de 0,324 mg/cm² de tecido.

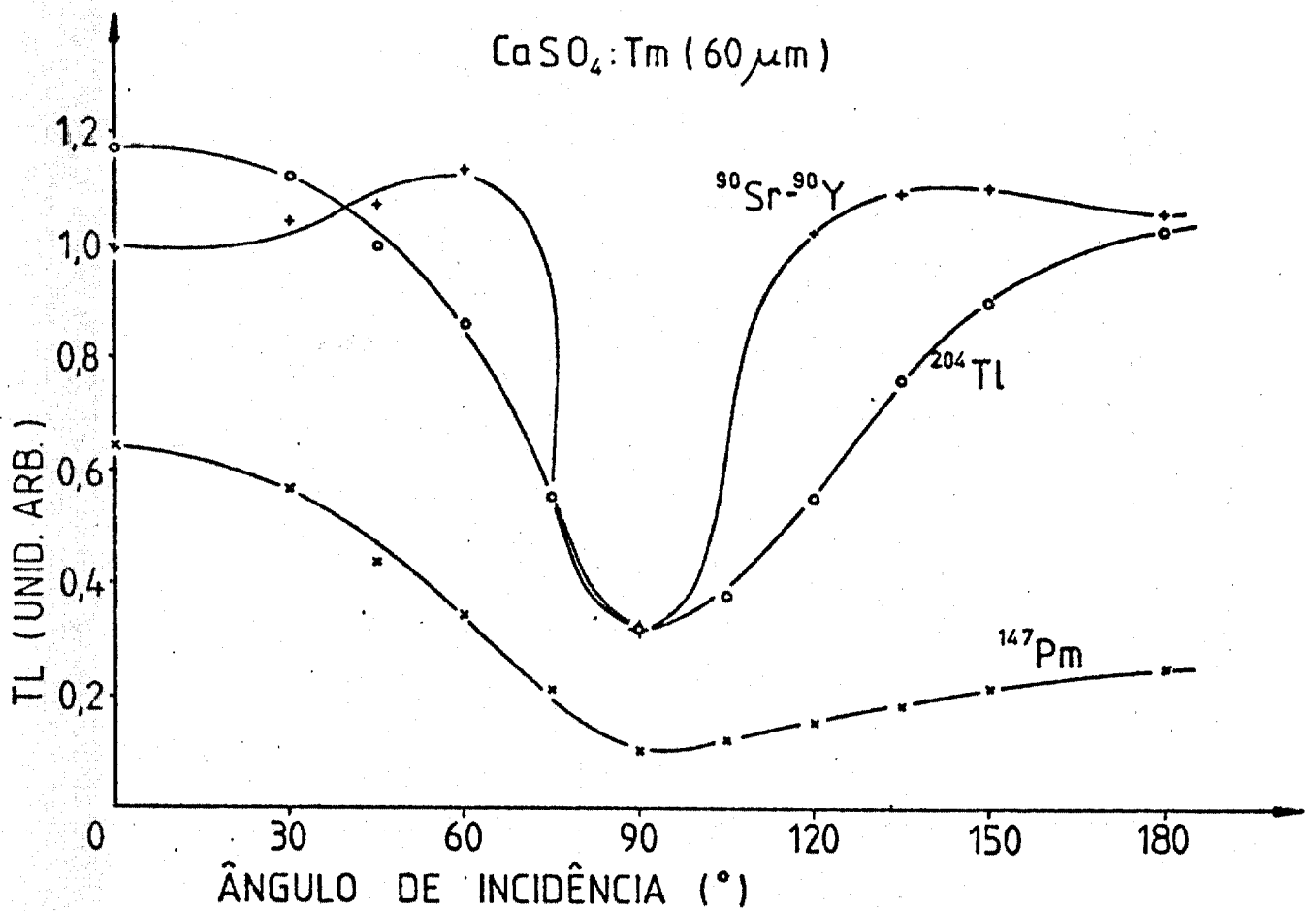


Fig. III-22: Dependência angular da resposta TL das amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$, de espessura $60\mu\text{m}$, expostas à radiação beta, atrás de $0,324\text{ mg/cm}^2$ de tecido.

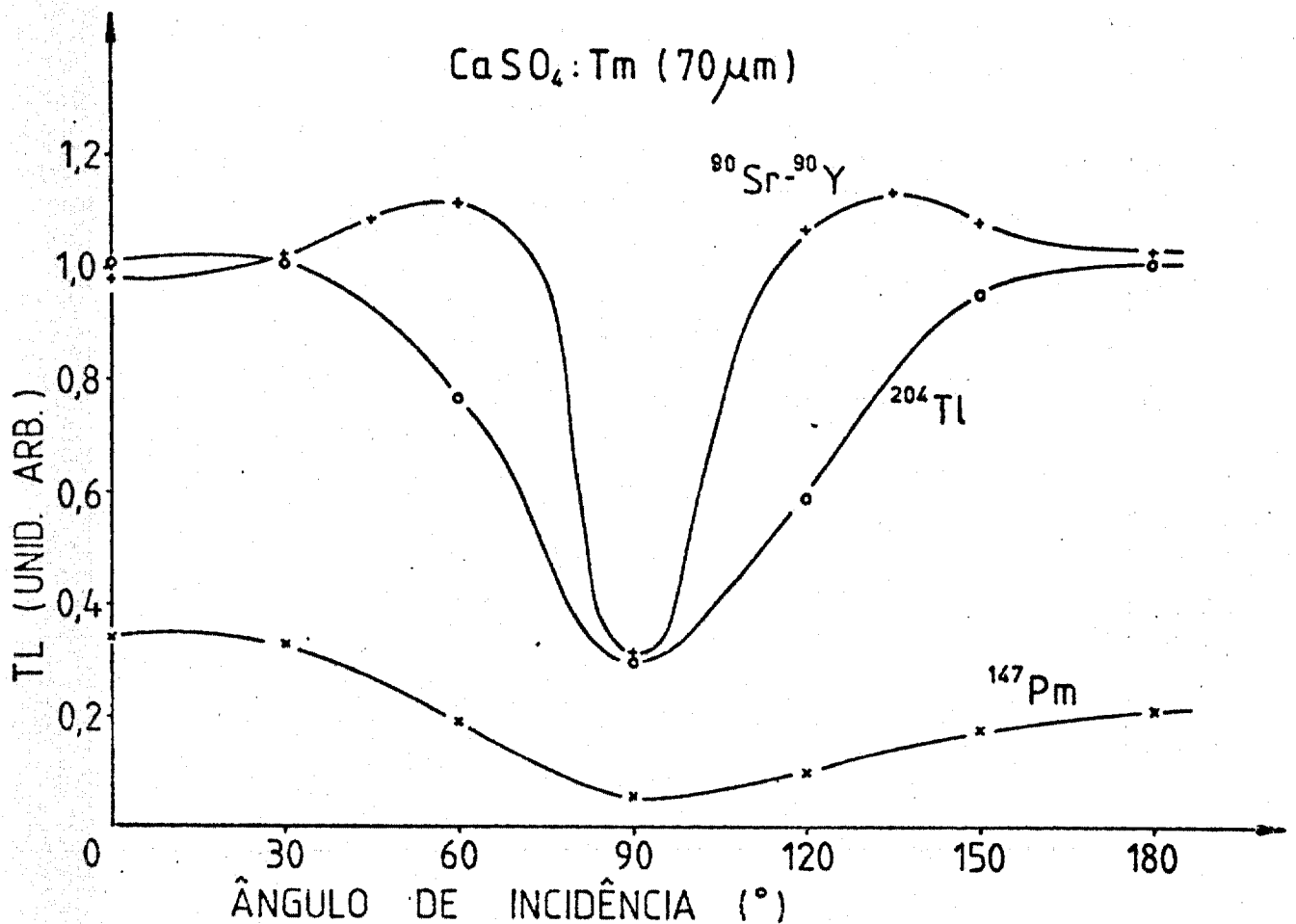


Fig. III-23: Dependência angular da resposta TL das amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$, de espessura $70\mu\text{m}$, expostas à radiação beta, atrás de $0,324\text{ mg/cm}^2$ de tecido.

III-c4. Influência do filtro homogeneizante

A influência do filtro homogeneizante na resposta dos detectores TL foi analisada durante irradiações com as fontes do conjunto padrão Buchler (sendo a de ^{90}Sr - ^{90}Y de atividade 2 mCi) para completar o estudo do item C6., capítulo II.

As amostras foram expostas à radiação, às respectivas distâncias de calibração, usando-se folha plástica Hostaphan RE 2,5, paramantê-lasfixas ao porta-amostra. As irradiações foram de 26,9, 11,3 e 8,7 mGy para respectivamente fontes de ^{147}Pm , ^{204}Tl e ^{90}Sr - ^{90}Y , uma vez do modo normal, isto é, com o filtro acoplado ao sistema e outra vez, sem o filtro. Os tratamentos térmicos foram os habituais.

Na Tabela III-5 estão representadas as diferenças entre os valores TL sem e com o filtro, em relação ao valor com filtro, para os fósforos TL estudados. Para uma comparação direta, foram incluídos no fim da tabela os dados relativos à câmara de extrapolação Pychlau, do item C6.2, capítulo II (Tabela II-12)

Tabela III-5: Efeito do filtro homogeneizante. Diferença entre valores TL sem e com filtro, em relação ao valor obtido com filtro (%). Valores para câmara de extrapolação da Tabela II-12.

Material	^{147}Pm	^{204}Tl	^{90}Sr - ^{90}Y (2mCi)
LiF (TLD-100)	249,3	94,7	64,9
LiF (TLD-100) + C	253,2	78,7	54,5
CaF ₂ :Dy (TLD-200)	174,9	94,5	67,2
CaF ₂ :Mn (TLD-400)	77,2	81,1	76,3
CaF ₂ :Mn (TLD-400) fino	104,1	81,6	76,7
BeO:Li	305,6	52,5	83,9
Li ₂ B ₄ O ₇ :Ag,Cu	188,9	81,5	82,0
CaSO ₄ :Tm (60 µm)	270,2	62,7	66,2
CaSO ₄ :Tm (70 µm)	252,1	60,9	62,4
Câmara de extrapolação Pychlau	273,7	60,6	65,7

Pode-se observar que o filtro influencia de modo marcante a resposta TL, principalmente nas irradiações com ^{147}Pm .

Comparando-se os valores da câmara de extrapolação com os obtidos nesta experiência, nota-se imediatamente a surpreendente semelhança existente com os relativos aos detectores de $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ (60 μm), UD-100 M8. A diferença maior entre os valores neste caso foi a encontrada para a radiação de ^{204}Tl : apenas 3,5%. Isto significa que estas amostras se comportam praticamente de forma idêntica à câmara de extrapolação, que constitui um sistema padrão, levando portanto uma grande vantagem em relação aos outros detectores testados.

III-c5. Dependência com a energia

O estudo da dependência da resposta dos detectores com a energia da radiação incidente é fundamental para a escolha do dosímetro adequado.

Neste caso as amostras que apresentaram reprodutibilidade nas respostas TL e TSEE inferior a 5,0%, ou seja, todos os detectores TL e dois de TSEE, foram estudados. As fontes de radiação foram as do conjunto padrão Buchler e os tratamentos térmicos, os habituais.

Tanto os fósforos TL como os detectores TSEE foram expostos à radiação, usando-se a folha plástica Hostaphan RE 2,5, que os mantém presos ao porta-amostra. Os valores de TL e TSEE, por unidade de dose, são todos relativos a uma dose unitária de ^{60}Co .

A Fig. III-24 apresenta os resultados obtidos da resposta TL em função da energia média da radiação beta para as amostras de LiF (TLD-100) normal e com grafite, $\text{CaF}_2:\text{Dy}$ (TLD-200) e $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ (TLD-400) normal e fino. Observa-se uma forte dependência com a energia.

Na Fig. III-25 foram representados os resultados

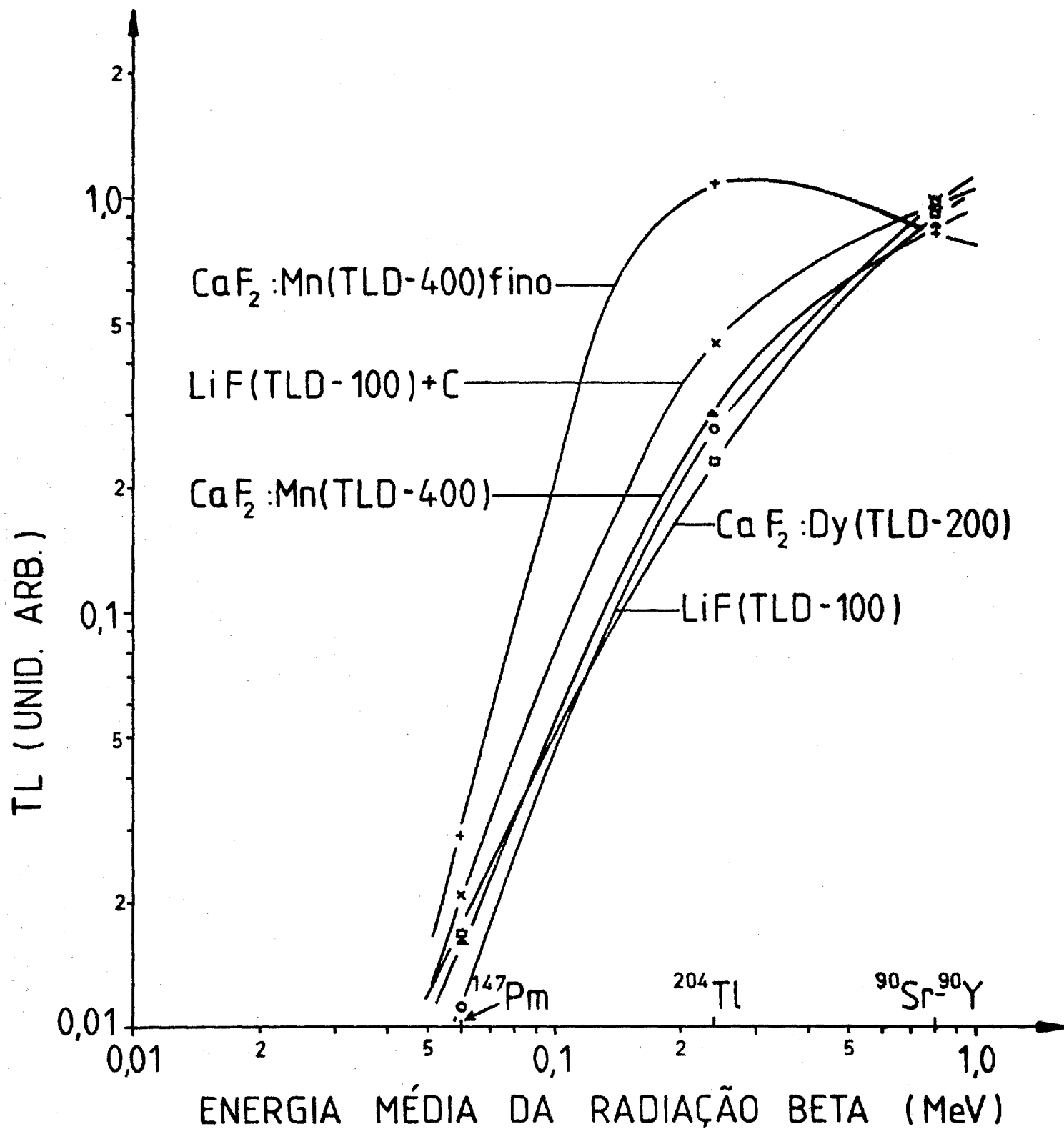


Fig. III-24: Dependência da resposta TL com a energia média da radiação beta, de diferentes amostras, atrás de $0,324 \text{ mg/cm}^2$ de tecido. Valores relativos a uma dose unitária de ^{60}Co .

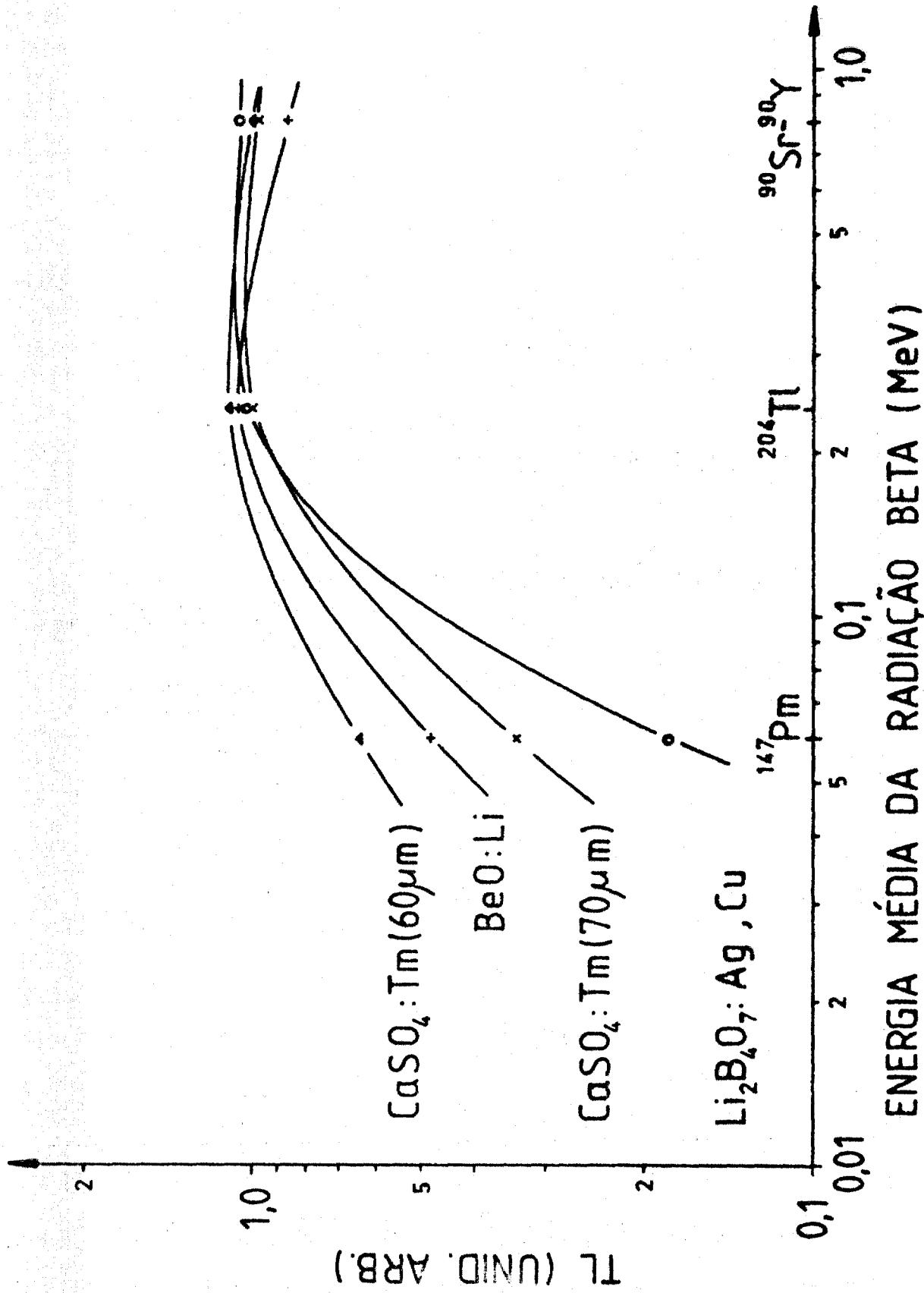


Fig. III-25: Dependência da resposta TL com a energia média da radiação beta, de diferentes amostras, atrás de 0,324 mg/cm² de tecido. Valores relativos a uma dose unitária de ⁶⁰Co.

dos detectores TL com suporte metálico: $\text{BeO}:\text{Li}$, $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7:\text{Ag,Cu}$, $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ (60 μm) e $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ (70 μm). Pode-se notar uma dependência com a energia bem mais fraca que na figura anterior. Além disso, neste caso esta dependência só ocorre para a radiação ^{147}Pm ; no intervalo entre a energia média de ^{204}Tl e ^{90}Sr - ^{90}Y tem-se uma resposta praticamente constante. Estas amostras apresentam portanto uma independência parcial com a energia.

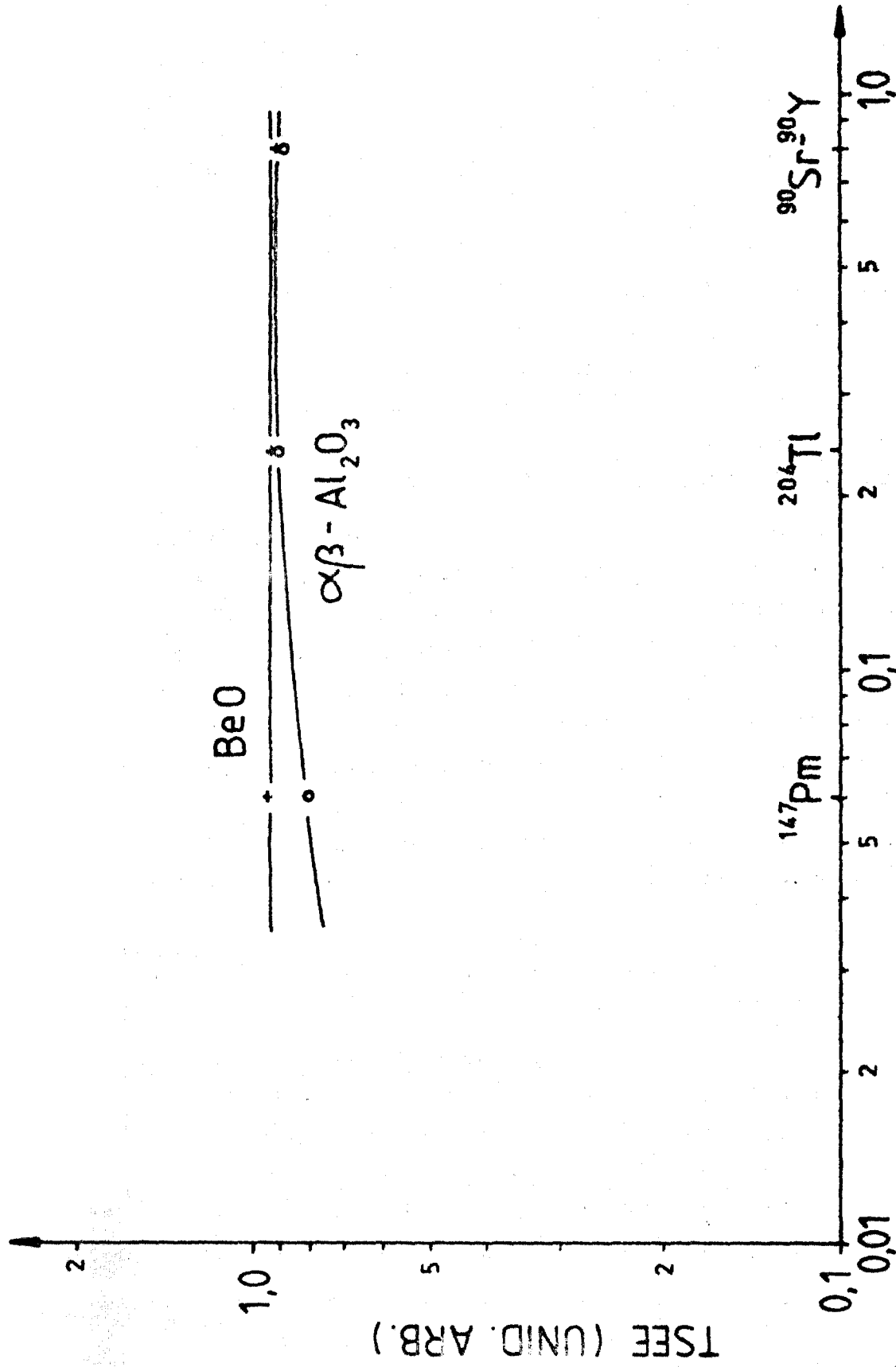
Entre os detectores da Fig.III-24, foi o de espessura menor, de 0,25 mm, $\text{CaF}_2:\text{Mn}$ (TLD-400) fino, que apresentou o melhor resultado. Ele foi, entretanto, superado por todas as amostras de suporte metálico da Fig.III-25. Entre estas, a de $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$, de 60 μm de espessura, mostrou o comportamento mais próximo do desejável, que seria uma independência total com a energia.

Os dados obtidos com os detectores de TSEE de BeO em suporte de quartzo e de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ em suporte de grafite podem ser observados na Fig.III-26. No caso de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ somente o dado relativo a ^{147}Pm mostrou-se dependente com a energia: mesmo assim o valor da resposta TSEE foi apenas de 12,5% mais baixo que da parte constante. A resposta deste tipo de amostra pode portanto ser considerada praticamente independente com a energia. Os detectores de BeO , de espessura 1000 \AA , entretanto apresentaram o comportamento ideal, ou seja, independência com a energia em todo o intervalo considerado.

A influência da espessura da amostra ficou claramente visível neste estudo.

Em conclusão, os detectores TL de $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ (60 μm) em suporte metálico e as amostras de TSEE de BeO em suporte de quartzo mostraram-se os mais apropriados para a dosimetria da radiação beta. Em comparação com os dados das referências 12 a 17, 39 e 40, pode-se verificar que os resultados do presente trabalho se apresentam mais satisfatórios.

No campo da dosimetria beta muitas vezes interessa conhecer-se o valor da taxa de dose que atinge a camada basal da epiderme e que se encontra a uma profundidade aproximada de 7 mg/cm^2 no tecido. Para isto basta recobrir-se o



ENERGIA MÉDIA DA RADIAÇÃO BETA (MeV)

Fig. III-26: Dependência da resposta TSEE com a energia média da radiação beta, de amostras de BeO em base de quartzo e de $\alpha\beta$ - Al_2O_3 em base de grafite, atrás de 0,324 mg/cm² de tecido. Valores relativos a uma dose unitária de ^{60}Co .

detector com uma camada absorvedora equivalente, determinada através dos dados de fatores de transmissão para as amostras TL.

Como um exemplo, tomando-se o caso específico de $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ (60 μm) tem-se para a energia média da radiação de ^{147}Pm , uma resposta TL, de 0,64 em unidades arbitrárias. Expondo-se portanto a amostra à radiação de 10 mGy (1 rad) ela detecta apenas 6,4 mGy (0,64 rad). Usando-se o gráfico do fator de transmissão em função da densidade superficial de uma camada absorvedora equivalente a tecido (Fig. III-13), pode-se notar que para um fator de transmissão $T = 0,64$ corresponde uma densidade aproximada de 2 mg/cm^2 . Isto sugere que tudo se passa como se o próprio detector já contivesse intrinsecamente uma folha absorvedora de cerca de 2 mg/cm^2 , necessitando por isso de uma folha complementar de apenas 5 mg/cm^2 para fornecer os resultados atrás de uma camada de 7 mg/cm^2 . Nos itens III-c6. e III-c7., são descritos dois arranjos diferentes de amostra e folha absorvedora com os respectivos resultados.

III-c6. Irradiação de controle PTB

Como um teste final, 10 amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ (60 μm), recobertas por folha plástica Makrofol KG e arranjadas duas a duas, foram enviadas ao laboratório de calibração padrão primária PTB (Braunschweig, Alemanha), para uma irradiação de controle. Consistiu de exposição à radiação beta, de doses desconhecidas. Os detectores TL irradiados foram depois medidos no laboratório GSF e as doses foram determinadas atrás de camada absorvedora de 7 mg/cm^2 .

Os resultados deste teste, que podem ser vistos na Tabela III-6, mostram a grande utilidade destes detectores como dosímetros da radiação beta.

Tabela III-6: Irradiação de controle PTB.

Amostras TL de $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ (60 μm)

Tipo de radiação	PTB Dose nominal (mGy)	GSF Dose determinada (mGy)	Variação (%)
^{204}Tl	3,20	3,30	+ 3
^{204}Tl	3,20	3,30	+ 3
^{147}Pm	5,15	4,42	-14
^{147}Pm	5,15	4,62	-10
$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$	6,30	6,10	- 3
$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$	6,30	5,90	- 6
$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ ^{204}Tl	6,30 } 1,80 } 8,10	8,20	+ 1
$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ ^{204}Tl	6,30 } 1,80 } 8,10	8,10	0
$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$	78,00	73,00	- 6
$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$	78,00	72,00	- 8

Somente num caso de radiação de ^{147}Pm a variação entre dose nominal e determinada apresentou-se maior que 10%.

III-c7. Campo misto de radiação

Na dosimetria pessoal são encontrados muitas vezes campos mistos de radiação. A calibração em campo misto foi feita utilizando-se raios-X (70 kV com filtro de 2 mm Al), radiação gama (^{60}Co) e beta (fontes do conjunto padrão Buchler).

Uma desvantagem do dosímetro TL de $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ (60 μm) é a sua sensibilidade à luz⁴⁶⁾ (que embora fraca existe) e pelo fato das folhas plásticas geralmente usadas serem trans

parentes, uma solução encontrada foi substituí-las por folhas opacas de plástico aluminizado. Estas folhas foram tais que permitissem a detecção pelo dosímetro de doses abaixo da camada de tecido de aproximadamente 7 mg/cm².

As amostras de CaSO₄:Tm neste caso foram expostas à radiação junto com filmes de dosimetria pessoal, num arranjo especial, em que a posição dos dois tipos de detectores fosse a mesma em relação a qualquer fonte. Cada conjunto consistiu além do filme, de dois detectores TL, sendo um recoberto com a folha plástica aluminizada e o outro com um filtro de Plexiglas de 10 mm de espessura. Sabe-se que este filtro é suficiente para absorver a radiação beta. Serve, entretanto, para detectar radiação X e gama. Além das exposições a cada tipo de radiação, foram feitas combinações de radiação beta (de cada energia) tanto com radiação X como com gama.

No caso da radiação X, a dose foi 1,74 mGy e da fonte de ⁶⁰Co, de 17,4 mGy. A irradiação com as fontes do conjunto Buchler foi de 45,2, 14,4 e 17,4 mGy respectivamente para ¹⁴⁷Pm, ²⁰⁴Tl e ⁹⁰Sr-⁹⁰Y (2 mCi).

Os detectores fotográficos e termoluminescentes serão analisados separadamente.

a. Filmes dosimétricos

No caso de radiação X e gama, os filmes foram expostos dentro dos porta-amostras, já descritos na parte experimental (ítem II-b2). O sistema de medida permitiu a determinação correta tanto da dose como da energia neste caso.

Quanto à radiação beta, apenas para alta energia (⁹⁰Sr-⁹⁰Y) foi possível a determinação correta da dose. Devido ao invólucro, a sensibilidade destes detectores depende fortemente da energia da radiação, como pode ser visto na Tabela III-7, onde foram representados os valores da densidade ótica (OD.) por unidade de dose para cada fonte usada. As medidas foram tomadas na posição da janela aberta do porta-amostra.

Tabela III-7: Filmes dosimétricos.

Resposta O.D., por unidade de dose
(mGy).

Fonte	Resposta /mGy
^{147}Pm	$6,64 \cdot 10^{-3}$
^{204}Tl	$7,00 \cdot 10^{-2}$
$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$ (2mCi)	$1,67 \cdot 10^{-1}$

No caso de campos mistos de radiação X ou gama com radiação beta, ainda é possível a determinação da dose e da energia, exceto da radiação beta.

b. Amostras termoluminescentes

Notou-se que o detector TL apresenta uma forte dependência com a energia no caso da radiação X. A resposta TL, por unidade de dose, mostrou o valor 5,915, enquanto que para ^{60}Co , foi de 1,035 (ambos nas mesmas unidades arbitrárias), sendo que os detectores medidos foram os com filtro de Plexiglas. Esta dependência com a energia da radiação X concorda com os resultados de Soyberk⁴⁷⁾.

Devido ao filtro de Plexiglas, foi possível discernir-se o tipo de radiação, quando não mista. No caso de raios-X, a resposta TL com e sem filtro apresentaram uma diferença de cerca de 20%, enquanto que a radiação de ^{60}Co provocou uma resposta com filtro cerca de 2 vezes maior que sem filtro. Já no caso de radiação beta, somente as amostras sem filtro mostraram resposta TL.

Nas irradiações mistas beta e X, os detectores sem filtro apresentaram resposta TL devida tanto à radiação X como à beta, causando portanto dificuldades na interpretação dos resultados (devido à dependência com a energia, referente à radiação X).

Em campos de radiação mista beta e gama, o método é utilizável, principalmente se as doses beta a serem determinadas forem à profundidade de tecido de 7 mg/cm^2 . Neste caso os resultados podem ser vistos na Tabela III-8, onde fo-

ram também representados os relativos à profundidade de tecido de 5 mg/cm².

Tabela III-8: Amostra TL de CaSO₄:Tm (60 μm).
Resposta TL, por unidade de dose (mGy).

Fonte	Profundidade	
	5 mg/cm ²	7 mg/cm ²
¹⁴⁷ Pm	0,424	0,967
²⁰⁴ Tl	0,993	0,921
⁹⁰ Sr- ⁹⁰ Y (2mCi)	1,047	0,989

Pode-se observar que o dosímetro assim calibrado (caso de profundidade 7 mg/cm²) praticamente independe da energia. A variação em relação ao valor unitário foi de 3,4, 8,5 e 12% respectivamente para a radiação de ¹⁴⁷Pm, ²⁰⁴Tl e ⁹⁰Sr-⁹⁰Y. Constitui desta forma um dosímetro recomendável para a detecção da radiação beta, apresentando também utilidade em campos mistos. No caso de radiação X, entretanto, é necessário usar-se dosímetro apropriado, como por exemplo Li₂B₄O₇, BeO:Li⁽⁴⁷⁾ ou outro fósforo TL que apresente independência com a energia, ou ainda o próprio CaSO₄:Tm com arranjo especial de filtros.

Uma comparação internacional usando-se o dosímetro beta proposto neste trabalho será apresentada no Capítulo IV.

IV. Aplicações

Serão apresentadas neste capítulo algumas aplicações da dosimetria beta com a finalidade principal de demonstrar a utilidade dos métodos e detectores propostos neste trabalho.

IV-a. Comparação internacional

O teste mais representativo do dosímetro TL proposto foi realizado através de uma comparação internacional.

Foram enviadas amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ (60 μm), preparadas conforme descrição no ítem III-c7, para três laboratórios de padronização primária:

LMRI: Laboratoire de Métrologie des Rayonnements Ionisants CEN/Saclay, França

NPL : National Physical Laboratory, Teddington , Inglaterra

PTB : Physikalisch - Technische Bundesanstalt , Braunschweig, Alemanha.

Uma parte dos detectores foi calibrada em cada laboratório e a outra foi exposta a fontes de radiação beta e doses desconhecidas, tendo, porém, todas as amostras sido medidas quanto à TL no Institut für Strahlenschutz , GSF, após os tratamentos térmicos habituais.

A Tabela IV-1⁴⁸⁾ apresenta os resultados obtidos. Nela estão indicadas as razões entre dose determinada e dose nominal, para cada laboratório. O valor médio e o respectivo desvio padrão constam também da tabela.

Tabela IV-1: Resultados de comparação baseada em calibração GSF (+ calibração NPL). Razão entre dose determinada e dose nominal.

Fonte	Dose nominal (mGy)	Dose determinada/Dose nominal		
		GSF/LMRI	GSF/NPL	GSF/PTB
$^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$	1,6			0,94
	2,43		1,15	
	19,4		1,06	
	20,0			1,06
	30,9	1,01		
	51,5	1,02		
	49,8		1,06	
	103,1	0,99		
	120,0			1,05
^{204}Tl	2,12		0,94	
	2,4			0,88
	12,0			1,03
	16,0			1,01
	16,9		1,00	
	33,8		1,04	
^{147}Pm	1,6			1,00
	2,26		0,93	
	5,0			0,92
	6,02		0,78 (0,96 ⁺)	
	8,13			0,92
	18,4		0,78 (0,96 ⁺)	
Valor médio		1,01	0,97 (1,01 ⁺)	0,98
Desvio padrão		0,02	0,13 (0,07 ⁺)	0,07

Estes resultados confirmam que realmente as amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ propostas tornam possível a dosimetria TL independente com a energia, mesmo para a radiação de ^{147}Pm , com cerca de 60 keV de energia média, atrás de camadas de tecido de densidade superficial de 7 mg/cm².

IV-b. Azulejos radioativos

Após a constatação nos laboratórios de Kraftwerk Union (KWU) em Erlangen, Alemanha, de que certos tipos de azulejos são radioativos, as amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ ($60 \mu\text{m}$), estudadas no Cap. III, foram usadas para determinação de taxas de dose.

Estes azulejos são de esmalte vitrificado, de procedência italiana, com desenhos de várias cores, usadas para revestimento principalmente de paredes. Nos laboratórios KWU foram identificados nos azulejos os seguintes elementos radioativos: urânio, tório e potássio, presentes nos esmaltes de tonalidade amarela, marron e vermelha intenso. Os ornamentos marron-amarelados e especialmente as manchas vermelhas contêm de 5 a 20% de urânio em sua constituição. A taxa de dose beta por eles determinada foi entre 0,1 e 0,2 mGy/h (10 e 20 mrad/h), cerca de 100 a 200 vezes mais alta do que a dos azulejos de fabricação alemã, também coloridos.

Para uma comparação inicial, os dosímetros de $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ foram enviados, em número de 12, ao laboratório KWU para exposição à radiação dos azulejos. As amostras foram envoltas em folhas plásticas Hostaphan RN15 (espessura de $15 \mu\text{m}$ e densidade superficial de camada equivalente a tecido de $1,94 \text{ mg/cm}^2$). Os dosímetros assim preparados foram colocados em contato com as manchas de diferentes colorações, durante um intervalo de tempo de aproximadamente 160 min. Os tratamentos térmicos e as medidas TL, assim como a calibração de cada amostra em relação à radiação de ^{60}Co , foram realizados nos laboratórios GSF do modo habitual.

Tanto o esmalte de tonalidade alaranjada como marron apresentaram taxas de dose aproximadas de 0,153 mGy/h (15,3 mrad/h). Dos ornamentos de cor cinza e marron bem claro foram obtidas taxas de dose da mesma ordem de grandeza queda radiação de fundo.

Este resultado concorda muito bem com os medidos em KWU, com sistema de cintilação, mostrando a utilidade dos dosímetros de $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ para radiação beta.

Tendo-se recebido vários tipos de azulejos para a determinação de taxas de dose, foi dada atenção especial a um deles, que se apresentou como o caso mais sério, quanto à proteção radiológica.

Inicialmente um filme de mamografia (descrito no item C6.4, capítulo II) foi mantido em contato com o azulejo durante cerca de 12 horas. O escurecimento do filme deu-se principalmente nas posições correspondentes às manchas vermelhas.

A fim de se verificar se a radiação era beta, os dosímetros de $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ foram irradiados atrás de uma camada absorvedora de 10 mm de Plexiglas. Não tendo se observado resposta TL maior que a devida à radiação de fundo, o tipo de radiação foi confirmado.

A determinação das taxas de dose das diferentes posições do azulejo foi realizada expondo-se as amostras TL a cada tipo de tonalidade durante cerca de 70 horas.

As manchas vermelhas apresentaram taxas de dose de 0,321 mGy/h (32,1 mrad/h), enquanto que as de cor verde e cinza foram apenas 0,63 e 3,4 $\mu\text{Gy/h}$ (0,063 e 0,34 mrad/h) respectivamente. De todos os dados foi subtraída a radiação de fundo. A uma distância de 5 cm das mesmas manchas vermelhas, a taxa de dose foi ainda considerada alta: 39,5 $\mu\text{Gy/h}$ (3,95 mrad/h), suficiente para o aconselhamento da retirada destes azulejos da parede.

Um estudo complementar foi ainda realizado com este azulejo, recobrando-o sucessivamente com folhas plásticas Hostaphan de espessuras diferentes e medindo-se a termoluminescência das amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$. A finalidade foi a determinação do comportamento do fator de transmissão desta radiação, em função da densidade superficial de camada absorvedora, para uma comparação com o de fontes conhecidas. Foi possível observar-se um decaimento mais lento que o apresentado por fonte de ^{204}Tl (Fig. III-13), sem, entretanto, atingir o equilíbrio eletrônico que ocorre no caso de $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$. Este fato sugere portanto que o elemento emissor deste azulejo apresenta uma energia máxima entre aproximadamente as de ^{204}Tl e $^{90}\text{Sr}-^{90}\text{Y}$, o que concordaria com as energias da

radiação beta de certos isótopos de urânio e tório (cerca de 1,2 MeV).

Foram também submetidos à medida tanto paredes de cimento sem revestimento de ladrilhos como azulejos simples, sem ornamentos coloridos. Desta vez o intervalo de tempo de exposição das amostras TL foi de 31 dias. A taxa de dose superficial das paredes apresentou-se de 43,0 $\mu\text{Gy/h}$ (4,3 mrad/h), enquanto que no caso dos azulejos incolores a taxa foi de 0,484 $\mu\text{Gy/h}$ (48,4 $\mu\text{rad/h}$), que são valores normalmente encontrados em materiais de construção.

IV-c. Instrumento Mahlo

O instrumento Mahlo faz parte de um sistema usado em escala industrial, para medição e controle de espessura de materiais, como tecidos e metais. Fabricado pela Firma Mahlo GmbH, Saal/Donau, Alemanha, contém um emissor radioativo embutido Nr.0224 Bk: o radioisótopo é ^{85}Kr , de 100mCi. O instrumento tem 64 cm de altura, e cerca de 30 x 30 cm de base. Apresenta um cabeçote, onde a fonte embutida encontra-se voltada para baixo. Os materiais a serem examinados passam através do instrumento, que é dotado de duas placas côncavas, na direção da qual a fonte fica voltada.

A finalidade principal do estudo deste aparelho foi a determinação da taxa de dose da radiação emissora a diversas distâncias, para a construção das curvas de isodose. Estes dados deverão constar do catálogo do sistema no futuro.

Foram utilizados três sistemas de medida:

1. Câmara de extrapolação Pychlau
2. Dosímetros TL de $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ (60 μm)
3. Detector de cintilação MAB (Münchener Apparatebau), modelo 603, Alemanha.

IV-cl. Câmara de extrapolação

A câmara de extrapolação Pychlau, calibrada no Cap.II, foi usada para a determinação da taxa de dose da fonte do instrumento Mahlo.

O aparelho foi montado no banco ótico em frente à câmara, à distância de 30 cm, e medidas de corrente de ionização foram feitas, variando-se do modo habitual tanto a profundidade da câmara como a tensão aplicada. Foi usado o eletrodo coletor de grafite com 40 mm de diâmetro e a janela de entrada de 0,05 mm de espessura (5,657 mg/cm²). O campo elétrico foi mantido constante em 10 V/mm no decorrer das experiências.

Da curva de extrapolação foi obtido o valor do coeficiente angular:

$$B = 1,266 \cdot 10^{-14} \text{ A/mm.}$$

Representando-se os valores do fator de calibração da Tabela II-8, correspondentes à câmara com a mesma janela de entrada aqui utilizada, em função da energia máxima da radiação, e considerando o valor 0,67 MeV como a energia do radioisótopo em questão, obtém-se:

$$F = 8,45 \cdot 10^{10} \frac{\text{Gy}}{\text{h}} \frac{\text{mm}}{\text{A}}.$$

A taxa de dose tem-se portanto pela relação $\dot{D} = F \cdot B$, ou seja,

$$\dot{D} = 1,070 \cdot 10^{-3} \text{ Gy/h.}$$

Esta é a taxa de dose absorvida no ar, atrás de uma camada de 5,657 mg/cm² de densidade superficial equivalente a tecido.

A variação com a distância da intensidade desta radiação foi determinada entre 20 e 60 cm. Neste caso a pro

fundidade de câmara e a tensão foram mantidas fixas em 1,00 mm e 10 V respectivamente. O comportamento da corrente de ionização em função da distância pode ser visto na Fig.IV-1. Tem-se aproximadamente uma reta no gráfico logarítmico sem, entretanto, seguir apenas a lei do inverso do quadrado da distância. Neste caso tem-se para o parâmetro distância a potência 3,6.

Durante a experiência realizada para a determinação dos fatores de transmissão, a distância entre a fonte do aparelho Mahlo e a câmara foi de 21 cm. A câmara foi recoberta sucessivamente com folhas plásticas Hostaphan com espessuras entre 2,5 e 300 μm e placas de Plexiglas de 1,0 e 1,5 mm. A corrente de ionização foi representada em função da densidade superficial destas camadas absorvedoras adicionais. Uma extrapolação para densidade superficial nula possibilitou a determinação dos dados para a curva da Fig.IV-2, onde foram representados os fatores de transmissão em função da espessura da camada absorvedora (em unidade de mg/cm^2). Pode-se observar um comportamento decrescente.

Desta figura foram obtidos os valores de fator de transmissão representados na Tabela IV-2.

Tabela IV-2: Fator de transmissão T.
Fonte de ^{85}Kr .

Espessura de tecido		T
(mm)	(mg/cm^2)	câmara Pychlau janela: $5,657\text{mg}/\text{cm}^2$
0,01	1	1,000
0,03	3	0,999
0,05	5	0,990
0,07	7	0,980
0,10	10	0,940
0,20	20	0,735
0,50	50	0,285
1,00	100	0,065

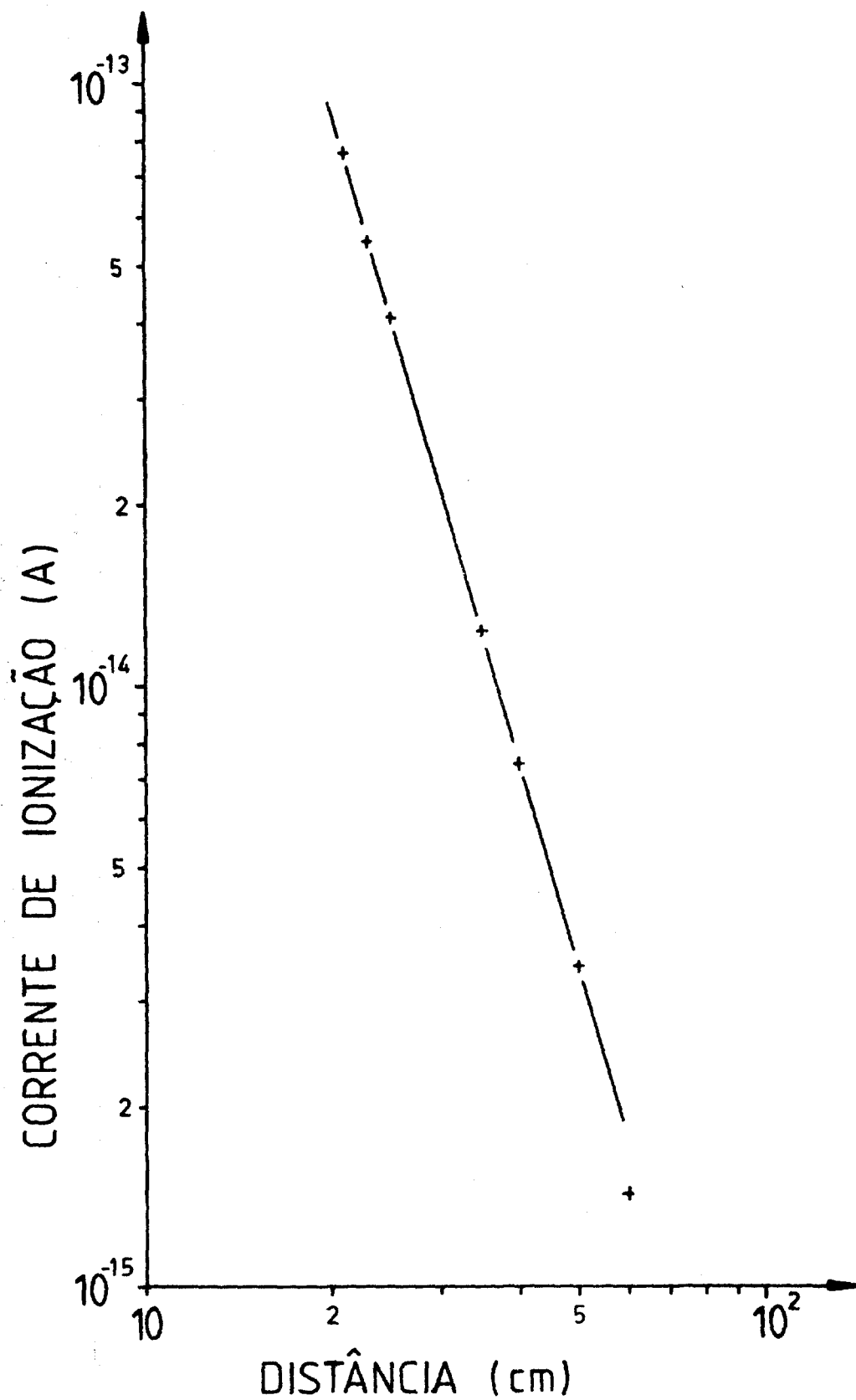


Fig.IV-1: Variação da corrente de ionização com a distância entre a câmara de extrapolação Pychlau e a fonte de ^{85}Kr (100 mCi) do Instrumento Mahlo.

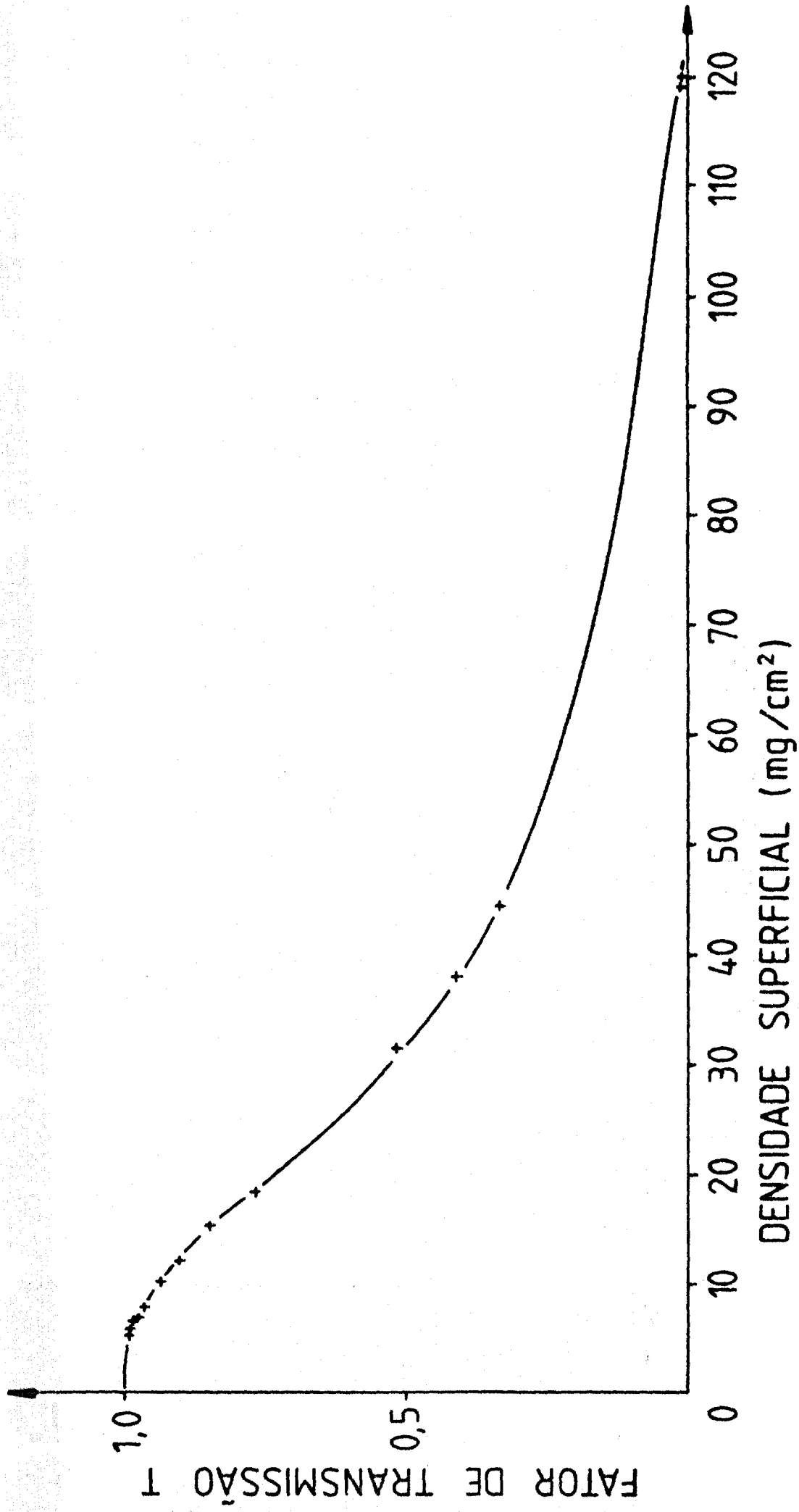


Fig. IV-2: Fatores de transmissão para a fonte de ^{85}Kr (100 mCi) do Instrumento Mahlo em camada absorvedora equivalente a tecido, usando a câmara de extrapolação Pychlau.

IV-c2. Dosímetros termoluminescentes

Os dosímetros TL de $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$, calibrados, foram usados envoltos em folhas de plástico Makrofol KG (espessura 10 μm e densidade superficial 1,22 mg/cm^2).

Foram expostos à distância de 25 cm da fonte de ^{85}Kr , variando-se a altura em relação à base do instrumento Mahlo entre 7 e 70 cm, a fim de se ter um perfil do comportamento da intensidade da radiação. O resultado pode ser visto na Fig.IV-3, onde foram representados os valores da taxa de dose em função da altura. Foi marcada a posição do centro da abertura (31 cm de altura), que não coincide com a posição da taxa de dose máxima, devido à situação geométrica da fonte dentro do instrumento. A constatação da radiação ser beta foi realizada recobrando-se as amostras TL com placas de Plexiglas de 10 mm de espessura.

O resultado da Fig.IV-3 foi ainda confirmado por medidas de densidade ótica de filmes de mamografia expostas à radiação nas mesmas condições das amostras TL.

Variando-se a distância entre os dosímetros TL e a fonte entre 25 e 100 cm, foi observado o mesmo comportamento que com a câmara de extrapolação.

Para a taxa de dose determinada à distância de 30 cm, como no caso da câmara de extrapolação, fazendo-se as correções necessárias para decaimento e para a mesma espessura de camada absorvedora intermediária (5,657 mg/cm^2), foi obtido o valor:

$$\dot{D} = 1,148 \cdot 10^{-3} \text{ Gy/h.}$$

Comparando-se os dois resultados, pode-se notar uma diferença de apenas 7,3%, que está perfeitamente dentro do erro experimental do tipo de arranjo em questão. Esta concordância foi considerada portanto excelente.

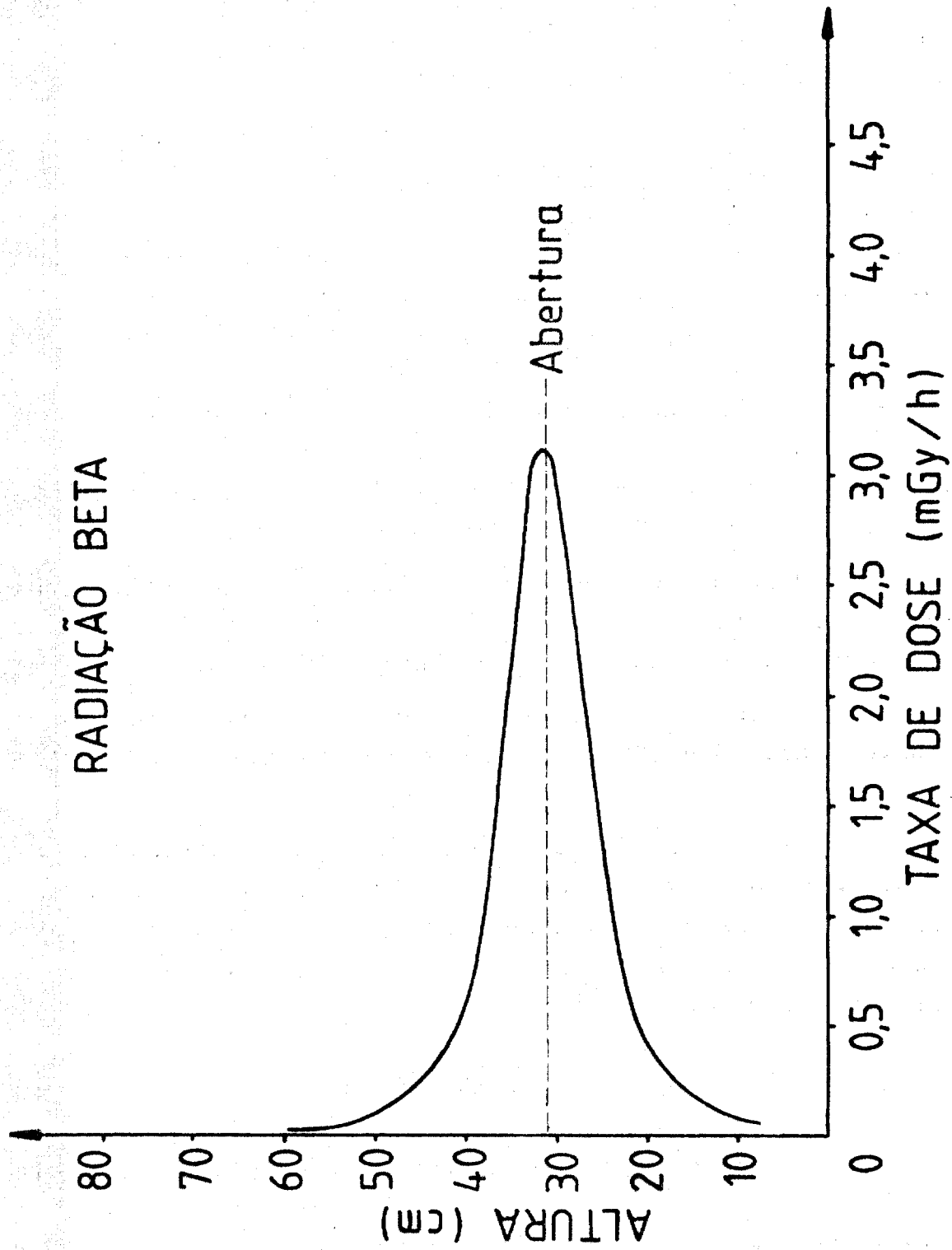


Fig. IV-3: Perfil da taxa de dose da radiação beta (^{85}Kr). Medidas à distância de 25 cm do centro do Instrumento Mahlo.

IV-c3. Detector de cintilação MAB

A calibração do detector de cintilação foi realizada através dos dosímetros TL de $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ (60 μm), a diferentes distâncias da fonte e a diferentes alturas em relação à base do instrumento Mahlo.

Tendo-se em vista a determinação das curvas de isodose, as medidas com o detector MAB* foram feitas às distâncias de 25, 50, 75 e 100 cm da fonte e às alturas de 7,31 e 55 cm. Para cada uma destas posições foram realizadas quatro medidas: com fonte aberta e fechada, com e sem uma placa absorvedora de radiação beta, de Plexiglas de 10 mm de espessura. Nestas condições foi ainda variado o ângulo em relação a uma posição fixa do instrumento Mahlo, entre 0 e 360°, em intervalos de 30°.

As taxas de dose determinadas foram representadas, para cada ângulo medido, em função da distância da fonte e da altura em relação à base. Destes gráficos foram tomados os valores para as curvas de isodose, que foram representados em coordenadas polares. Para a apresentação destes dados foi feita uma separação entre radiação beta e Bremsstrahlung (radiação de fótons).

Na Fig.IV-4 tem-se as curvas de isodose para as taxas de dose 0,1, 0,2, 0,5 e 1,0 mGy/h (10, 20, 50 e 100 mrad/h). Estes dados são obtidos atrás de uma camada absorvedora de 7 mg/cm², de modo que se possa equipará-los com a dose da pele do corpo. Destas medidas resultam dois limites de controle. O Limite 1 corresponde à isodose de 43,2 $\mu\text{Gy/h}$ (4,32 mrad/h), que leva a 90 mSv/ano (9rem/ano),

* *Agradecemos pela participação nestas medidas ao Sr. J. David, do Institut für Strahlenschutz, GSF, Alemanha.*

RADIAÇÃO BETA

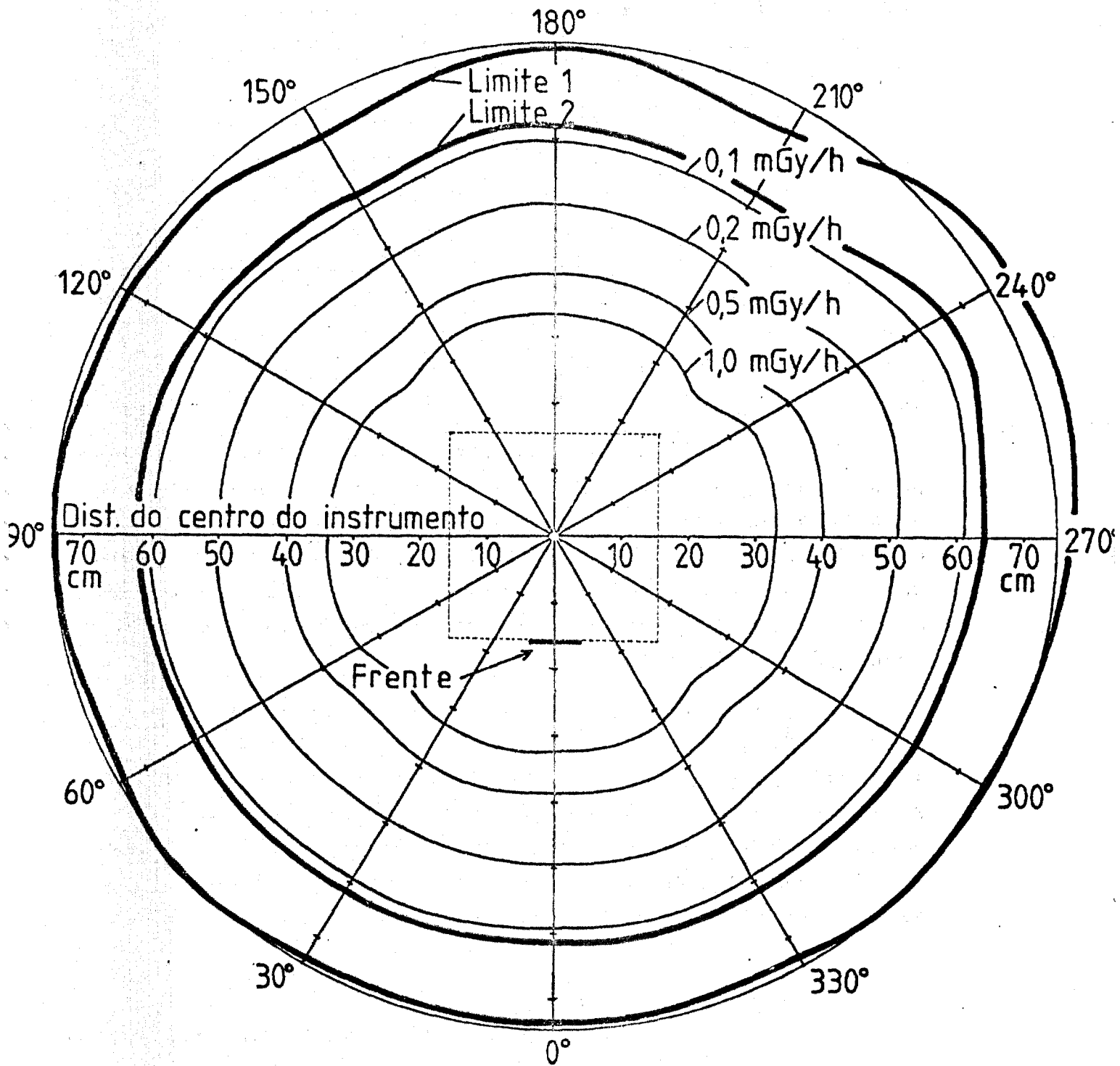


Fig.IV-4: Curvas de isodose (ã altura de 31cm) da radiação beta da fonte de ^{85}Kr (Instrumento Mahlo). Os limites 1 e 2 representam taxas de dose de 43,2 e 86,5 $\mu\text{Gy/h}$

o que representa 3/10 da dose máxima permissível anual⁴⁹⁾ de 300 mSv (30 rem) para a pele do corpo inteiro, em regime de trabalho de 40 horas por semana. Como é pouco provável a ocorrência de uma irradiação de corpo inteiro, devido a razões geométricas (vide Fig.IV-3), foi marcado na Fig.IV-4 também o Limite 2. Este corresponde à isodose de 86,5 µGy/h (8,65 mrad/h), que leva a 180 mSv/ano (18 rem/ano), representando 3/10 da dose máxima permissível anual⁴⁹⁾ de 600 mSv (60 rem)* para exposições das mãos, antebraços, etc., nas mesmas condições de 40 horas de trabalho por semana.

Com a fonte fechada não foi detectada radiação beta.

As curvas de isodose da radiação Bremsstrahlung estão representadas na Fig.IV-5 para as taxas de dose de 1,0, 2,0 e 5,0 µGy/h (0,1, 0,2 e 0,5 mrad/h). Para a determinação do limite de controle neste caso foi usada a dose para o corpo inteiro. Este limite corresponde à curva de isodose de 7,2 µGy/h (0,72 mrad/h) e representa o limite de uma região, na qual 3/10 da dose máxima permissível anual⁴⁹⁾ de 50 mSv (5 rem) pode ser atingido.

As curvas de isodose das Fig.IV-4 e Fig.IV-5 foram feitas para a altura de 31 cm, que é a posição da abertura do instrumento Mahlo.

A Fig.IV-6 apresenta as curvas de isodose em plano vertical, onde se pode observar uma simetria aproximada. A radiação Bremsstrahlung existe mesmo com fonte fechada.

Em conclusão, o operador de um aparelho Mahlo deste tipo deverá manter uma distância mínima aproximada de 65 cm da fonte, enquanto esta estiver aberta (sistema ligado). Com fonte fechada, entretanto, a distância mínima a ser observada é aproximadamente de 22 cm.

* Segundo as normas de EURATOM.

RADIAÇÃO BREMSSTRAHLUNG

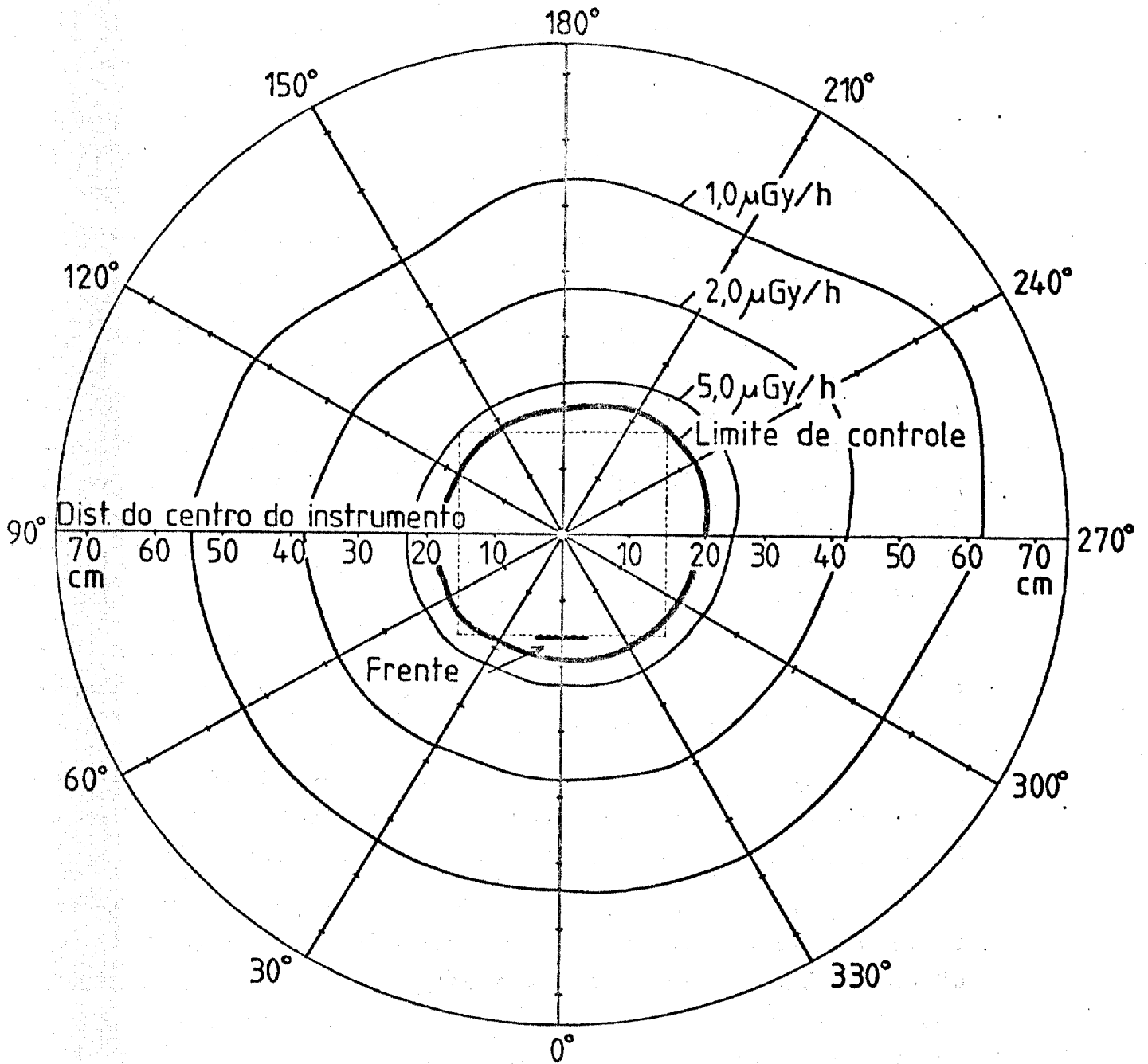


Fig.IV-5: Curvas de isodose (à altura de 31cm) da radiação Bremsstrahlung da fonte de ^{85}Kr (Instrumento Mahlo). O limite de controle representa taxa de dose de 7,2 $\mu\text{Gy/h}$

RADIAÇÃO BREMSSTRAHLUNG

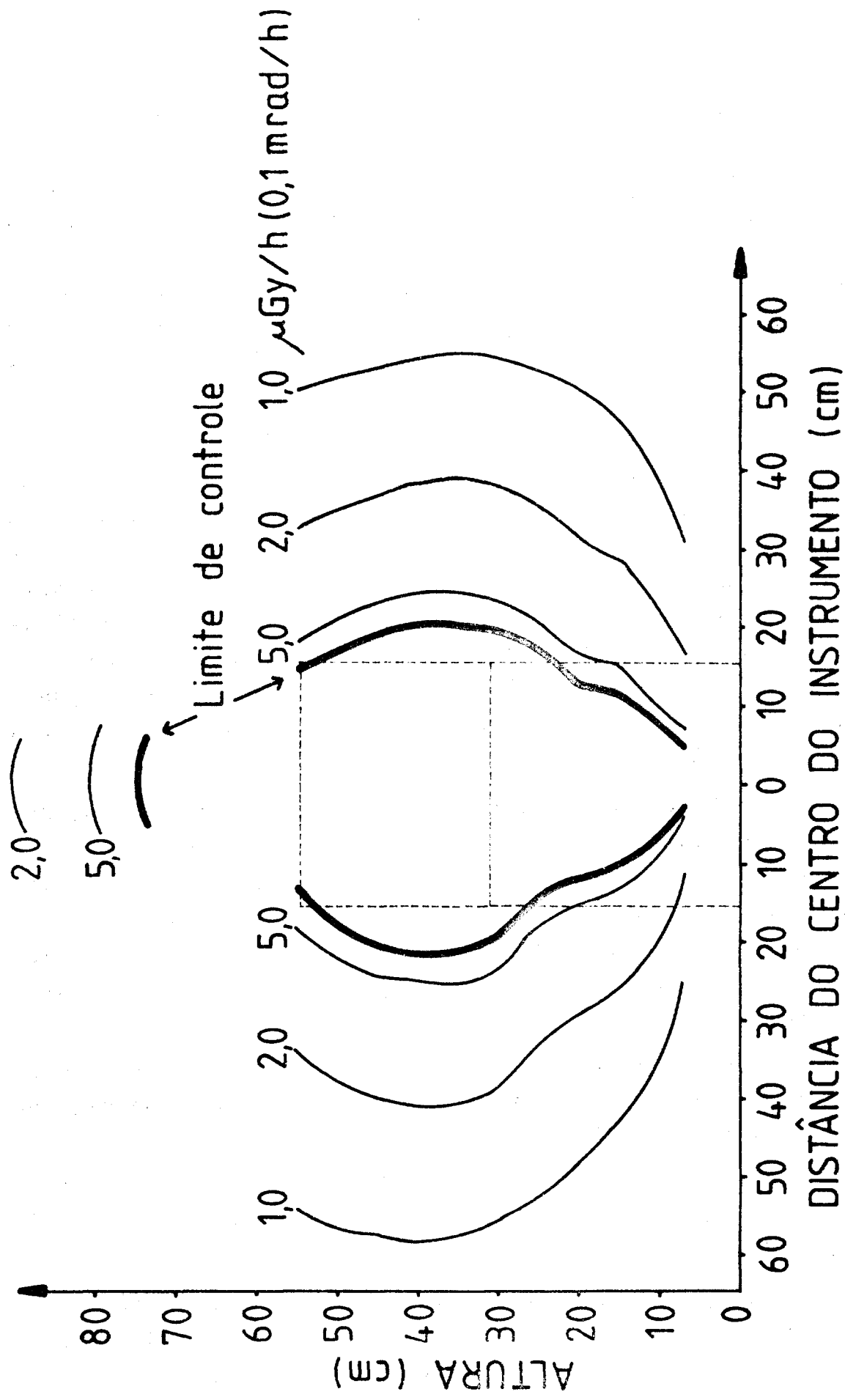


Fig. IV-6: Curvas de isodose (plano vertical) da radiação Bremsstrahlung da fonte de ^{85}Kr (Instrumento Mahlo).
O limite de controle representa taxa de dose de 7,2 $\mu\text{Gy/h}$.

C O N C L U S Õ E S

As experiências necessárias para uma calibração padrão primária foram apresentadas para o caso da radiação beta de fontes de ^{90}Sr - ^{90}Y . Entre os principais resultados usando-se o sistema padrão, foi visto que a câmara de extrapolação mostrou o mesmo comportamento com o eletrodo coletor constituído tanto por um bloco de carbono recoberto por camada de Plexiglas e película de carbono, como por apenas um bloco de Plexiglas e película de carbono. Este fato demonstra não ser necessário o uso de um sistema mais complexo.

O estudo completo da câmara de ionização Markus, comercial, mostrou a possibilidade de seu uso na calibração e dosimetria da radiação beta de fontes de ^{90}Sr - ^{90}Y . Chegou-se a esta conclusão, apesar da ocorrência de falta de saturação completa da corrente de ionização, durante a aplicação à câmara de tensões até 300 V, e do comportamento diverso do fator de transmissão da radiação em função da espessura de tecido, em relação ao obtido com a câmara do sistema de calibração primária.

O método do sistema de calibração secundária, desenvolvido com a câmara Pychlau, demonstrou, através de comparações com os resultados do sistema primário, a perfeita viabilidade de seu uso em padronização. A corrente de ionização medida neste caso não representa diretamente a ionização produzida no volume sensível da câmara. Pode-se notar a ocorrência de mais quatro tipos de corrente:

- a. corrente proveniente das partículas carregadas do feixe primário, que perdem em parte ou totalmente sua energia no eletrodo coletor;
- b. corrente devida à ionização criada no volume sensível da câmara, mesmo sem a aplicação de tensão, mas com exposição à radiação beta;
- c. corrente parasita devida ao efeito da radiação Bremsstrahlung no material da câmara e no equipamento de medida;
- d. corrente proveniente do ruído de fundo do equipamento de

medida.

Do conjunto de experiências realizadas com a câmara Pychlau, a determinação dos fatores de transmissão foi a mais decisiva. Neste caso foi obtida uma concordância total entre os resultados das câmaras primária e secundária, fazendo-se as correções necessárias para a espessura da janela de entrada. Foi vista, de outra experiência, a conveniência da utilização de um valor constante de campo elétrico aplicado entre os eletrodos da câmara de extrapolação. Foi ainda determinada a variação da radiação beta com a distância, mostrando-se que, especialmente para baixas energias, é necessário levar-se em conta a atenuação exponencial da radiação. O filtro homogeneizante (usado durante as irradiações) apresentou um efeito pronunciado nos espectros da radiação, nos valores dos coeficientes angulares usados para a determinação dos fatores de calibração, nos fatores de transmissão e no campo de radiação, às distâncias de calibração utilizadas. O fator de calibração da câmara depende de forma marcante da área do eletrodo coletor, resultado que permite a escolha prévia do tipo de eletrodo mais conveniente para determinações de taxas de dose, tanto baixas como altas.

O resultado mais importante, entretanto, apresentado pela câmara Pychlau foi em relação ao seu comportamento praticamente independente com a energia média da radiação beta entre 60 keV e 0,8 MeV.

Do estudo dosimétrico sistemático realizado empregando-se as técnicas de termoluminescência (TL) e emissão exoeletrônica termicamente estimulada (TSEE) e os materiais de estado sólido LiF, CaF₂, CaSO₄, Li₂B₄O₇, BeO e Al₂O₃, foram propostos um dosímetro TL e dois detectores de TSEE para a radiação beta, ou seja, CaSO₄:Tm em suporte metálico, BeO em suporte de quartzo e $\alpha\beta$ -Al₂O₃ em suporte de grafite respectivamente.

A reprodutibilidade das amostras TL não foi superior a 4%, enquanto que no caso da TSEE, só os detectores propostos apresentaram valores inferiores a 5%. A linearidade da resposta com a dose foi constatada em todos os casos

de doses baixas, comuns à dosimetria pessoal, para as amostras de TL e TSEE. Os fatores de transmissão da radiação beta foram determinados para todos os detectores TL, usando-se as fontes disponíveis de ^{90}Sr - ^{90}Y , ^{204}Tl e ^{147}Pm . A dependência angular das amostras TL apresentou-se bastante pronunciada, devido ao curto alcance da radiação beta na matéria e à opacidade de alguns detectores, concluindo-se que é conveniente manter-se a mesma face da amostra tanto à irradiação como à medida TL. Este estudo foi realizado entre 0 e 180° para permitir correções nos casos em que a recomendação de mesma face não for seguida.

O efeito do filtro homogeneizante na resposta TL foi analisado no caso de todos os detectores e as fontes do conjunto padrão. Numa comparação direta com os resultados obtidos com a câmara de extrapolação secundária (Pychlau), notou-se a surpreendente semelhança, entre o seu comportamento e o das amostras TL de $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$ ($60\ \mu\text{m}$). A diferença entre os valores não foi superior a 3,5%, significando que estas amostras se comportam de forma muito parecida com o sistema padrão.

O resultado do estudo da dependência da resposta TL e TSEE com a energia da radiação beta foi fundamental para a escolha dos dosímetros. Notou-se uma forte dependência da resposta de todos os detectores de 0,9 mm de espessura (geralmente usados em dosimetria pessoal) com a energia, resultando numa subestimativa das doses determinadas. As amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$, de espessura $60\ \mu\text{m}$, em suporte fino de alumínio, apresentaram resposta TL independente com a energia da radiação beta incidente, atrás de camadas de tecido de densidade superficial de $7\ \text{mg}/\text{cm}^2$. Esta densidade superficial representa justamente a profundidade de tecido onde se localiza o órgão crítico, ou seja, a camada basal da epiderme. A influência da espessura da amostra ficou claramente visível neste estudo. Foram realizados dois testes de medida de dose com estes dosímetros: uma irradiação de controle no laboratório primário PTB (Alemanha) e uma comparação internacional, com participação dos laboratórios de padronização primária NPL (Inglaterra), LMRI (França) e PTB; no primeiro caso foi usada folha plástica transparente e no segun

do, folha opaca, ambas de espessura controlada, para recobrir as amostras. Os resultados obtidos apresentaram uma concordância muito boa com os valores nominais de dose, com cerca de apenas 10% de diferença.

Além das amostras TL, os detectores de TSEE de BeO em suporte de quartzo mostraram resposta independente com a energia; no caso de $\alpha\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$, somente para a fonte de ^{147}Pm houve uma variação de 12,5% em relação ao valor constante da resposta em função da energia. As amostras de TSEE, entretanto, apresentam uma desvantagem em relação às amostras TL: são mais sensíveis à manipulação e por isso não são apropriadas como dosímetros (isto é, para uso em dosimetria pessoal ou ambiental), mas sim como detectores de radiação beta.

Duas aplicações práticas, usando-se as amostras de $\text{CaSO}_4:\text{Tm}$, para medida de taxas de dose da radiação beta emitida por azulejos esmaltados (utilizada em indústria de construção), e por uma fonte de ^{85}Kr (empregada em indústrias têxteis e de metais), para a qual ainda foram determinadas as curvas de isodose, mostraram a múltipla utilidade dos dosímetros propostos.

SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

1. Estudar o efeito de paredes das câmaras de ionização comerciais para solucionar questões como a falta de ocorrência de saturação da corrente de ionização, para valores elevados da tensão aplicada à câmara, e a diferença entre os comportamentos do fator de transmissão em função da espessura da camada absorvedora, usando-se câmaras de ionização e extrapolação, e radiação beta.
2. Medir a dependência angular de câmara de extrapolação exposta à radiação beta, para comparação com os resultados obtidos com os detectores TL.
3. Determinar, para as amostras propostas de TSEE, os fatores de transmissão da radiação beta e a dependência angular.
4. Estender o estudo do presente trabalho para o caso de fótons de baixa energia, usando-se os detectores propostos de TL e TSEE.
5. Tentar obter um dosímetro de baixo número atômico e de espessura reduzida, que permita a determinação de doses tanto de radiação beta como de fótons, independentemente da energia, seguindo os métodos do presente trabalho.
6. Fazer um estudo comparativo de dosimetria beta, usando-se amostras radiofotoluminescentes de forma trapezoidal, descritas na ref. 11.

R E F E R E N C I A S

1. Heinzelmann, M., Fachverband für Strahlenschutz EV, FS-3, Jülich, Alemanha, 1975.
2. "Handbook on calibration of radiation protection monitoring instruments". Technical Report Series No.133, IAEA, Vienna, p.21, 1971.
3. Kiefer, H., Maushart, R. and Mejdahl, V. in "Radiation Dosimetry", Vol.III, 2nd Ed., Edited by Attix, F.H. and Tochilin, E. Academic Press, 1969, p.578.
4. ICRP Publication 2, Pergamon Press, Oxford, 1959.
5. Owen, B., Phys. Med. Biol. 18, 355 (1973).
6. Owen, B., Phys. Med. Biol. 17, 175 (1972).
7. Failla, G. Radiology 29, 202 (1937).
8. Loevinger, R., Rev. Sci. Instruments 24, 907 (1953).
9. Böhm, J., Hillion, P. and Simoen, J.P., PTB-Dos.-1, 1976.
10. Dudley, R.A. in "Radiation Dosimetry", Attix, F.H. and Roesch, W.C., Vol.II. New York, 1966, p.347.
11. Yokota, R., Muto, Y. and Miyake, T., Health Phys. 22, 516 (1972).
12. Harvey, J.R. and Townsend, S., RD/B/N 1372 (1969).
13. Marshall, M. and Docherty, J., Phys. Med. Biol. 16, 503 (1971).
14. Greitz, U. and Rudén, B.I., Phys. Med. Biol. 17, 193 (1972).
15. Busuali, G. and Julius, H.W., Proceed. 5th Int. Conf. on Luminescence Dosimetry, S.P., 1977, p.225.
16. Pradhan, A.S. and Bhatt, R.C., Phys. Med. Biol. 22 (5), 873 (1977).
17. Jain, V.K., Phys. Med. Biol. 23 (5), 1000 (1978).
18. Wang, T.J., Nucleonics 7 (2), 55 (1950).
19. Attix, F. and Roesch, W. "Radiation Dosimetry"; Vol.I, Academic Press, 1968, Cap.9.

20. Böhm, J., Phys. Med. Biol. 21 (5), 754 (1976).
21. Markus, B., Strahlentherapie 152 (6), 517 (1976).
22. Böhm, J. Comunicação particular.
23. Cameron, J.R., Suntharalingam, N. and Kenney, G.N., "Thermoluminescence Dosimetry", The Univ. of Wisconsin Press (1968).
24. Watanabe, S. "Propriedades de Termoluminescência do LiF:Mg", S.Paulo, 1969 (Tese de Livre-Docência).
25. Becker, K. "Solid State Dosimetry", Cleveland, Ohio, Chemical Rubber, 1973.
26. Stoebe, T.G. and Watanabe, S., Phys. Stat. Sol. 29 (1), 11 (1975).
27. Nambi, K.S.V., Informação IEA 54, 1977.
28. Proceed. IV Int. Conf. on Luminescence Dosimetry, Krakow, Poland, 1974.
29. Procees. V Int. Conf. on Luminescence Dosimetry, S.Paulo, Brazil, 1977.
30. Okuno, E. "Propriedades TL do fluoreto de cálcio natural", S.Paulo, 1971 (Tese de Doutorado).
31. Cruz, M.T. "Propriedades TL da fuorita brasileira de coloração violeta", S.Paulo, 1972 (Tese de Doutorado).
32. Caldas, L.V.E. "TL radio e fotoestimulada do LiF:Mg", S.Paulo, 1973 (Tese de Mestrado).
33. Caldas, L.V.E. and Mayhugh, M.R. Health Phys. 31, 451 (1976).
34. Sunta, C.M. and Watanabe, S., J. Phys. D: Appl. Phys. 9, 1271 (1976).
35. Proceed. IV Int. Symp. on Exoelectron Emission and Dosimetry, Liblice, Tchecoslovaquia, 1973.
36. Proceed. V Int. Symp. on Exoelectron Emission and Dosimetry, Zvikov, Tchecoslovaquia, 1976.
37. VI Int. Symp. on Exoelectron Emission and Dosimetry, Ahrenshoop, East Germany, 1979. Proceed. ainda não publicados.

38. Regulla, D.F., Drexler, G. and Boros, L. in Proceed.III Int. Conf. on Luminescence Dosimetry, Risø, Denmark, 1971. pg 601.
39. Gammage, R.B. and Cheka, J.S. Nucl. Int. Meth. 127, 279 (1975).
40. Gammage, R.B. in Ref. 36 (1976).
41. Takenaga, M., Yamamoto, O. and Yamashita, T. in Ref.29.
42. Iga, K., Yamashita, T., Takenaga, M., Yasuno, Y., Oonishi, H. and Ikedo, M., Health Phys. 33, 605 (1977).
43. Yamashita, T., Yasuno, Y. and Ikedo, M., Health Phys. 27, 201 (1974).
44. Petel, M. and Holzapfal, G. in Ref. 36.
45. Regulla, D.F. in "Instrumentation in Radiotherapy", Drexler, G., Leetz, K.H., Regulla, D.F. and Seelentag, W., GSF Report S471 (1978).
46. Yamashita, T., Nada, N., Oonishi, H. and Kitamura, S., Health Phys. 21, 295 (1971).
47. Soyberk, Ö. Comunicação particular.
48. Regulla, D.F. and Caldas, L.V.E., Proceed. 5th Int. Congress of IRPA, Jerusalem, Israel (1980).
49. ICRP Publication 26, Pergamon Press, Oxford, 1977.