

DOSIMETRIA DO IRRADIADOR DE ^{60}Co - GAMMABEAM 650

JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO

Orientador : VIRGÍLIO FRANCO DO NASCIMENTO F^o

Dissertação apresentada à Escola Superior de
Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade
de São Paulo, para obtenção do título de
Mestre em Energia Nuclear na Agricultura

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
setembro - 1978

Aos meus pais e irmãos

D E D I C O

À Sra. Leonilda Davanzo e filhos

M I N H A G R A T I D ã O

AGRADECIMENTOS

Das partes componentes deste trabalho, esta nos é mais agradável por termos a oportunidade de registrar nossos sinceros agradecimentos a todos aqueles que nos auxiliaram em sua realização. Em especial, queremos agradecer:

- ao Dr. Virgílio Franco do Nascimento F^o, pela orientação e amizade a nós dedicada;*
- ao Dr. Enéas Salati, pelas críticas e cooperação constante;*
- ao Dr. Epaminondas S. Barros Ferraz, assim como ao Prof. Fernando A. Pinto, pelas sugestões e estímulo no desenvolvimento do trabalho;*
- ao Físico Ivan P.S. de Almeida, pela colaboração nas formulações matemáticas;*
- aos Professores Alfredo Romano e Laurentino F. Batista pelo apoio constante;*
- à Sra. Janete L.B. de Moura, Bibliotecária-Chefe do CENA, Sra. Rosa Maria V.B. Oliveira e Srta. Idalina Gomes, Auxiliares de Biblioteca, pela revisão das citações bibliográficas;*
- à Sra. Diva Athiê, pela revisão da iradução do resumo;*

- aos Técnicos José O. Bertoli, Maria Valéria L. Cruz e Neuza Maria M. Tonin, pela participação nos trabalhos de laboratório;
- aos Srs. Alfredo José Ferraz de Mello e Cleusval Bissi, pelos serviços datilográficos, e Sr. Simplício E. de Souza Neto, pelos serviços de desenho;
- aos membros da Seção de Radioquímica do CENA, pelas facilidades na utilização dos instrumentos de medidas;
- à Seção de Imprensa do CENA, nas pessoas dos Srs. Benedito H. Davanzo e Celso de Aguiar, pela colaboração na impressão;
- aos colegas do Departamento de Solos e Engenharia Rural da Escola de Agronomia de Areia, da Universidade Federal da Paraíba, pelos incentivos;
- às colegas Solange M. Gennari e Dorinha M.V. Marcondes pela amizade sincera, e em particular à Maria Inez Peixoto pela dedicada, espontânea e constante companhia;
- aos Professores do Curso de Pós-Graduação em Energia Nuclear na Agricultura - CPGENA, pelo curso ministrado;

- aos funcionários e amigos do CENA, assim como aos da Escola de Agronomia de Areia, pela atenção com que nos dedicaram;
- ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Comissão Nacional de Energia Nuclear e Agência Internacional de Energia Atômica, pelos recursos financeiros;
- à Comissão Nacional de Energia Nuclear e ao Plano de Formação e Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (PLANFAP), pela bolsa recebida.

Í N D I C E

	Página
1. RESUMO	01
2. INTRODUÇÃO	04
3. REVISÃO DE LITERATURA	06
3.1. Características do dosímetro químico ideal .	06
3.2. Método dosimétrico de <i>Fricke</i>	07
3.2.1. Composição e mecanismo de reações . .	07
3.2.2. Rendimento químico $G(\text{Fe}^{3+})$	12
3.2.3. Método de determinação do íon fêrrico	25
3.2.4. Estabilidade	27
3.2.5. Limites de aplicação do dosímetro . .	28
3.2.6. Aplicações	30
3.3. Cálculo de taxas de exposição	33
3.3.1. Noção básica	33
3.3.2. Cálculo de taxa de exposição em irradi- dores	34
4. METODOLOGIA	38
4.1. Área de irradiação	38
4.2. Descrição do irradiador	41
4.3. Geometrias	46
4.4. Método experimental para obtenção das taxas de exposição	48

	Página
4.4.1. Método de medida	48
4.4.2. Preparo da solução dosimétrica e irradiação	48
4.4.3. Medições dos íons férricos	49
4.4.4. Disposição dos dosímetros.	49
4.4.5. Cálculo das taxas de exposição	52
4.5. Derivações teóricas para o cálculo de taxas de exposição	55
4.5.1. Emissão específica de raios gama do ^{60}Co	55
4.5.2. Cálculo de taxas de exposição panorâmicas	57
4.5.3. Cálculos das taxas de exposição na cavidade interna	63
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
5.1. Metodologia	64
5.1.1. Escolha de geometria	64
5.1.2. Escolha do dosímetro	65
5.1.3. Modelos matemáticos para cálculo das taxas de exposição	66
5.1.4. Fatores de correção	70
5.2. Taxas de exposição panorâmicas (geometria I)	73
5.2.1. Teóricas e experimentais	73
5.2.2. Curvas de isodoses panorâmicas	81

	Página
5.3. Taxas de exposição na cavidade interna . . .	85
5.3.1. Equações de regressão	85
5.3.2. Curvas de isodose na cavidade interna	99
6. CONCLUSÕES	112
7. SUMMARY	114
8. BIBLIOGRAFIA	117
APÊNDICE	127

FiguraPágina

aberturas em função do número de tubos ativos utilizados na cavidade interna	47
12 - Disposição dos cinco planos horizontais panorâmicos e cinco planos horizontais dentro da cavidade . .	50
13 - Esquema das direções onde os dosímetros foram irradiados. (a) Panorâmicas; (b) Cavidade interna .	51
14 - Esquema de desintegração do ^{60}Co (extraído de <i>DIL LMAM, 1969</i>)	56
15 - Esquema para o cálculo de taxas de exposição em um ponto P assumindo o modelo I - Fonte linear . . .	57
16 - Esquema para o cálculo da taxa de exposição em um ponto P, assumindo o modelo II - três fontes pontuais	62
17 - Esquema para o cálculo da taxa de exposição em um ponto P, assumindo o modelo III - fonte pontual .	62
18 - Número de cápsulas por tubo expositor e a posição real nas irradiações	68
19 - Distribuição experimental e teórica (modelo III: fonte pontual) das taxas de exposição em função da distância ao longo do plano horizontal $\underline{0}$, com 12 tubos ativos e 10 cm de abertura (geometria I) .	82
20 - Curvas de isodoses (em KR/h) no plano horizontal $\underline{0}$, com 12 tubos ativos e 10 cm de abertura (geometria I)	83
21 - Curvas de isodoses (em KR/h) no plano vertical N-S, com 12 tubos ativos e 10 cm de abertura (geometria I)	84
22 - Curvas de isodoses (em KR/h) no plano horizontal $\underline{0}$, com 12 tubos ativos e 84 cm de abertura (geometria II)	100

LISTA DAS FIGURAS

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
1 - Fração de íons ferrosos oxidados por radiação gamma (610 rad/min) em solução 0,4 M H ₂ SO ₄ saturada e não saturada com ar, em função da razão entre o tempo de irradiação e a concentração inicial em Fe ²⁺ (ALLEN e ROTHSCHILD, 1957)	17
2 - Espectro de absorção do íon férrico, extraído de BROSZKIEWISE (1967)	25
3 - Formação do íon férrico em função da dose absorvida (ANTA, 1961)	29
4 - Curvas de isodoses relativas da cavidade, calculadas teoricamente e medidas experimentalmente com o dosímetro sulfato ferroso por BURLIN e CHAN (1971)	37
5 - Vista lateral do prédio que contém a câmara de irradiação	39
6 - Esquema da câmara de irradiação	40
7 - Vista frontal do irradiador Gammabeam 650 dentro da câmara	42
8 - Esquema representando o movimento de rotação dos tubos expositores, contendo as cápsulas radioativas, e também a disposição das cápsulas nas irradiações. (1) - Indicador de abertura dos tubos; (2) - Sistema elétrico de rotação dos tubos; (3) - Posição de exposição das cápsulas; (4) - Plataforma de irradiação; (5) - Compressor do irradiador	44
9 - Esquema da cápsula de ⁶⁰ Co - 316 L	45
10 - Corte transversal da Geometria I	46
11 - Corte transversal de três geometrias para uma das	

Figura

Página

23 - Curvas de isodoses (em KR/h) no plano vertical N-S, com 12 tubos ativos e 84 cm de abertura (geometria II)	101
24 - Curvas de isodoses (em KR/h) no plano horizontal <u>0</u> , com 6 tubos ativos e 84 cm de abertura (geometria III)	102
25 - Curvas de isodoses (em KR/h) no plano vertical N-S, com 6 tubos ativos e 84 cm de abertura (geometria III)	103
26 - Curvas de isodoses (em KR/h) no plano horizontal <u>0</u> , com 3 tubos ativos e 84 cm de abertura (geometria IV)	104
27 - Curvas de isodoses (em KR/h) no plano horizontal <u>0</u> , com 12 tubos ativos e 42 cm de abertura (geometria V)	105
28 - Curvas de isodoses (em KR/h) no plano vertical N-S, com 12 tubos ativos e 42 cm de abertura (geometria V)	105
29 - Curvas de isodoses (em KR/h) no plano horizontal <u>0</u> , com 6 tubos ativos e 42 cm de abertura (geometria VI)	106
30 - Curvas de isodoses (em KR/h) no plano vertical O-E, com 6 tubos ativos e 42 cm de abertura (geometria VI)	107
31 - Curvas de isodoses (em KR/h) no plano horizontal <u>0</u> , com 3 tubos ativos e 42 cm de abertura (geometria VII)	108
32 - Distribuição da taxa de exposição em função da distância ao longo das direções S e SO, com 12 tubos ativos e 84 cm de abertura (geometria II)	110

Figura

Página

1.A - Taxa de exposição no ponto central da cavidade (32 cm acima da plataforma de irradiação) em fun- ção do círculo formado pelos 12 tubos ativos . .	131
---	-----

LISTA DAS TABELAS

<u>Tabela</u>	<u>Página</u>
1 - Taxas de exposição experimentais nas quatro direções, e as calculadas pelos modelos I, II e III no plano 0 , em função da distância na irradiação panorâmica (Geometria I)	74
2 - Taxas de exposição experimentais nas quatro direções, e as calculadas pelos modelos I, II e III no plano A_{50} , em função da distância na irradiação panorâmica	75
3 - Taxas de exposição experimentais nas quatro direções, e as calculadas pelos modelos I, II e III no plano B_{50} , em função da distância na irradiação panorâmica (Geometria I)	76
4 - Taxas de exposição experimentais nas quatro direções, e as calculadas pelos modelos I, II e III no plano B_{100} , em função da distância na irradiação panorâmica (Geometria I)	77
5 - Taxas de exposição experimentais nas quatro direções, e as calculadas pelos modelos I, II e III no plano B_{150} , em função da distância na irradiação panorâmica (Geometria I)	78
6 - Desvios relativos entre taxas de exposição experimentais (E) e as teoricamente esperadas (T) pelos três modelos matemáticos, em função da distância nos 5 planos horizontais (geometria I)	80
7 - Taxas de exposição (KR/h) na cavidade utilizando abertura de 84 cm com 12 tubos ativos (geometria II)	86

Tabela

Página

8 - Taxas de exposição (KR/h) na cavidade utilizando abertura de 84 cm com 6 tubos ativos (Geometria III)	87
9 - Taxas de exposição (KR/h) na cavidade utilizando abertura de 84 cm com 3 tubos ativos (Geometria IV)	88
10 - Taxas de exposição (KR/h) na cavidade utilizando abertura de 42 cm com 12 tubos ativos (Geometria V)	89
11 - Taxas de exposição (KR/h) na cavidade utilizando abertura de 42 cm com 6 tubos ativos (Geometria VI)	90
12 - Taxas de exposição (KR/h) na cavidade utilizando abertura de 42 cm com 3 tubos ativos (Geometria VII)	91
13 - Equações de regressão entre taxas de exposição (D, KR/h) e distância (r, cm) para irradiações na cavidade interna, utilizando abertura de 84 cm e 12 tubos ativos (Geometria II)	93
14 - Equações de regressão entre taxas de exposição (D, KR/h) e distância (r, cm) para irradiações na cavidade interna, utilizando abertura de 84 cm e 6 tubos ativos (Geometria III)	94
15 - Equações de regressão entre taxas de exposição (D, KR/h) e distância (r, cm) para irradiações na cavidade interna, utilizando abertura de 84 cm e 3 tubos ativos (Geometria IV)	95
16 - Equações de regressão entre taxas de exposição (D, KR/h) e distância (r, cm) para irradiações na cavidade interna, utilizando abertura de 42 cm e 12 tubos ativos (Geometria V)	96

TabelaPágina

17 - Equações de regressão entre taxas de exposição (D, KR/h) e distância (r, cm) para irradiações na cavidade interna, utilizando abertura de 42 cm e 6 tubos ativos (Geometria VI)	97
18 - Equações de regressão entre taxas de exposição (D, KR/h) e distância (r, cm) para irradiações na cavidade interna, utilizando abertura de 42 cm e 3 tubos ativos (Geometria VII)	98
1.A.- Taxas de exposição no ponto central (32 cm acima da plataforma de irradiação) em função do diâmetro do círculo formado pelos 12 tubos ativos . . .	130

1. RESUMO

O principal objetivo do trabalho foi efetuar o levantamento das curvas de isodoses do irradiador de ^{60}Co - γ mabeam 650, utilizando-se o dosímetro de *Fricke*.

Neste irradiador, as fontes radioativas contidas na blindagem de chumbo, são elevadas até a posição de exposição através de 12 tubos pneumáticos dispostos radialmente, formando um cilindro de diâmetro variável entre 10 e 84 cm.

Pela dosimetria de vidro, constatou-se que cada um desses 12 tubos expositores contém 3 cápsulas de ^{60}Co , sendo a posição média dessas fontes 32 cm acima da plataforma de irradiação. Como o irradiador apresenta infinitas geometrias de fontes para irradiação, foram escolhidas sete de maior uti-

lização prática, abrangendo um intervalo de taxa de exposição de 1 KR/hora a 1 MR/hora (uma geometria para irradiação panorâmica e seis para a cavidade interna).

Visando o uso rotineiro do irradiador procurou-se ainda ajustar modelos matemáticos às geometrias consideradas. Na irradiação panorâmica com os 12 tubos ativos formando um círculo de 10 cm de diâmetro, os dosímetros foram dispostos em 4 direções em 5 planos horizontais, e as curvas de isodoses resultantes dessas medidas foram circulares concêntricas em torno do eixo central do irradiador. Nesta geometria de irradiação, as taxas de exposição foram calculadas teoricamente através de três modelos matemáticos (fonte linear, três fontes discretas pontuais e fonte pontual). Com as devidas correções para decaimento radioativo e absorção da radiação, os três modelos se ajustaram aos dados experimentais, com exceção para pontos próximos à blindagem do irradiador, paredes, piso e teto da câmara. Para uso em rotina, é aconselhável o modelo fonte pontual por ser o mais simples.

Na cavidade interna foram consideradas seis geometrias de irradiação, utilizando-se 12, 6 e 3 tubos ativos formando um círculo de 84 e 42 cm de diâmetro; e nestas geometrias os dosímetros foram irradiados em 8 direções em cinco planos horizontais. A forma das isodoses depende do número de tubos ativos, sendo a dos planos horizontais aproximadamente circulares concêntricas, quando se utilizaram 12 e 6 tubos, e com 3 tubos as isodoses não se fecham dentro dos limites da

cavidade. Diante da impossibilidade de um ajuste de um modelo teórico simples, as taxas de exposição experimentais foram relacionadas com a distância através de uma regressão polinomial, e na maioria das direções a significância dessas regressões foi de 1 e 5%.

2. INTRODUÇÃO

O termo dosimetria é atualmente empregado para designar determinação de dose de radiações ionizantes. Uma dosimetria exata e de confiança, isto é, o conhecimento de doses ou taxas de exposição em qualquer ponto de uma câmara onde objetos são irradiados, é a condição essencial para aplicações com irradiações.

O Centro de Energia Nuclear na Agricultura adquiriu para o desenvolvimento de ensaios com irradiações na área agronômica um irradiador Gammabeam 650, tipo IR31, de alta atividade. O irradiador difere dos demais modelos, que são utilizados para o mesmo fim, por apresentar através de sua consti

tuição, infinitas geometrias de fontes com amplo intervalo de taxas de exposição.

Porém, apesar de todas as facilidades e recursos apresentados pelo irradiador, sua utilização nos ensaios com irradiações está atualmente restrita a um único ponto dentro da câmara, pois nenhuma informação das características básicas, tais como uniformidade de atividade nas fontes radioativas e curvas de isodoses em função das geometrias são conhecidas, quer seja através do manual de operação ou pela literatura especializada, tornando desse modo limitado o uso racional do mesmo.

Devido a importância que representa esta dosimetria na utilização precisa do irradiador e considerando que para a caracterização geral das curvas de isodoses tem-se infinitas soluções, o presente estudo tem como finalidade, através de medições experimentais, determinar as distribuições das taxas de exposição para algumas geometrias, permitindo um conhecimento mais amplo do campo de irradiação. Objetiva-se ainda, com base nessas geometrias, ajustar modelos matemáticos para o cálculo das taxas de exposição, oferecendo assim informações práticas no uso rotineiro do irradiador.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Característica do dosímetro químico ideal

Uma vez que a dosimetria pela medição de uma transformação química se baseia no conhecimento de seu rendimento químico $G(X)$, isto é, o número de íons X transformados por 100 eV de energia absorvida, esse rendimento deverá ser, dentro do domínio de utilização, independente da dose, taxa de dose, tipo e energia da radiação, e variações de temperatura ambiente. Além dessas características, o rendimento do dosímetro deve ser independente das concentrações dos reagentes, dentro de certos limites, podendo os mesmos, serem utilizados sem purificação anterior, ser insensível à presença de impurezas, e das condições que podem mudar no decorrer das irradiações.

Um dosímetro químico, que possui um rendimento satisfazendo essas condições, e mais, podendo ser manipulado em presença de luz e ar nas condições normais de temperatura e pressão, ser estável antes e após a irradiação, e possuir um método analítico simples e rigoroso de medida da transformação química, pode ser considerado como ideal (*VERESHCHINSKII e PIKAEV, 1964*).

De acordo com *ANTA (1961)*, o dosímetro sulfato ferroso ou dosímetro de *Fricke* comumente conhecido, é o dosímetro químico que melhor se adapta às condições anteriormente citadas.

3.2. Método Dosimétrico de *Fricke*

O dosímetro de *Fricke* é um sistema empregado para determinação de doses de absorção através da oxidação de íons ferrosos em solução ácida, com precisão abaixo de 3% (*PETERSSON e HETTINGER, 1967*).

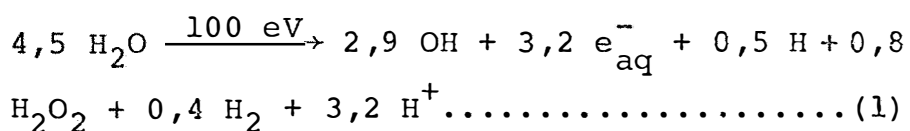
3.2.1. Composição e Mecanismo de Reações

O sistema de *Fricke* consiste em uma solução saturada com ar ou oxigênio, contendo sulfato ferroso ou ferrosomoniacal, cloreto de sódio e ácido sulfúrico em água destilada

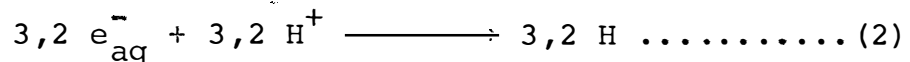
da ou desmineralizada. Para *DRAGANIC et alii (1961)*, *PETTERS*
SON e HETTINGER (1967), *OLLER et alii (1969)*, as concentrações
dos reagentes que permitem uma melhor reprodutibilidade são:

- $10^{-3}M$ de $FeSO_4$ ou $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2$
- 0,4M de H_2SO_4
- $10^{-3}M$ de $NaCl$

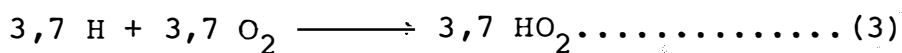
Quando a solução é exposta às radiações ioni
zantes, os íons ferrosos são oxidados para íons férricos atra
vés de um mecanismo de reações (*JAISON et alii, 1975*). A açã
o inicial da água por 100 eV de energia absorvida, pode ser suma
rizada pela equação:



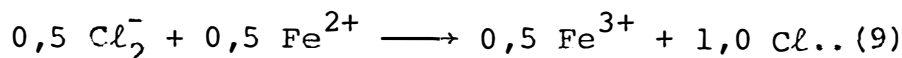
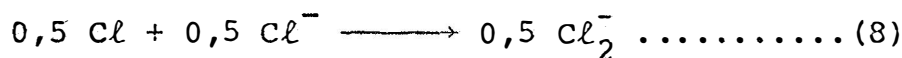
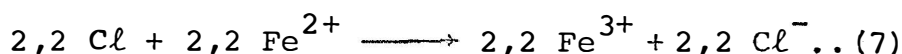
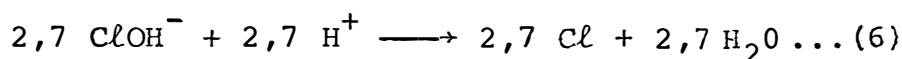
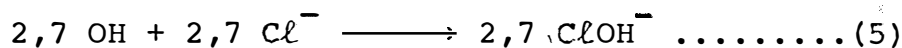
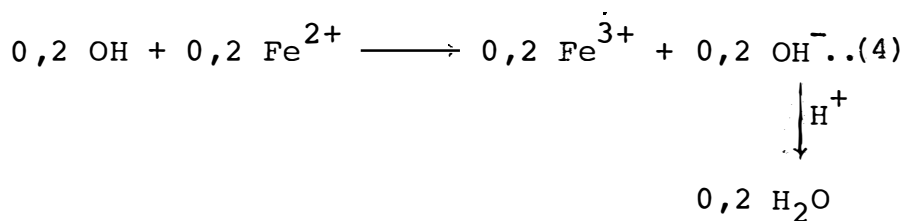
Esta reação é seguida pela reação dos elétrons
hidratados e_{aq}^- com íons de hidrogênio H^+



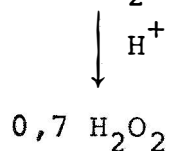
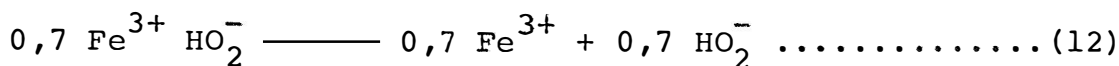
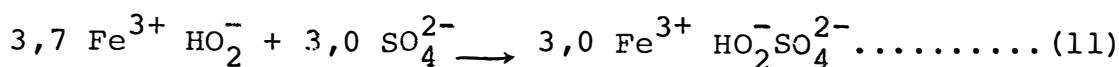
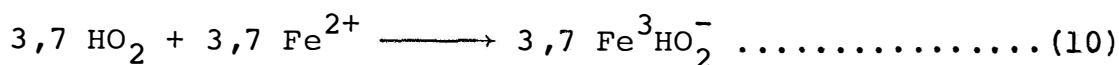
e reações dos átomos de hidrogênios das equações (1) e (2) com
o oxigênio

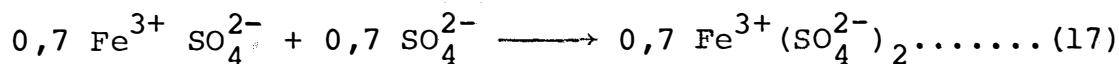
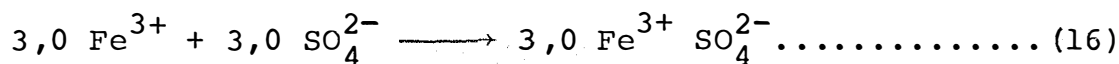
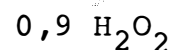
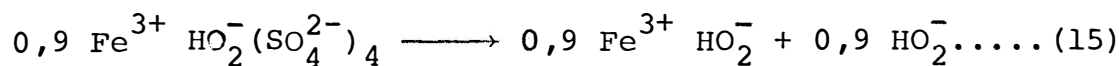
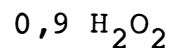
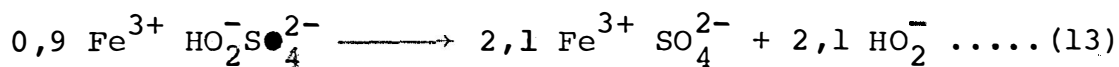


formando os radicais livres hidroxidrila OH, perodroxidrila HO₂ e peróxido de hidrogênio H₂O₂, que irão oxidar o íon ferroso. O radical hidroxidrila OH da equação (1) reage de acordo,

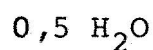
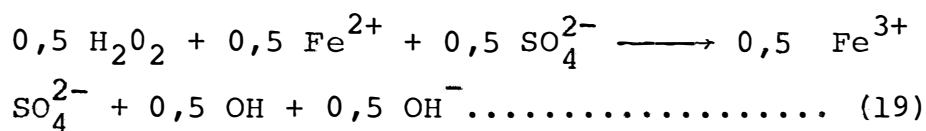
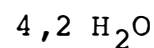
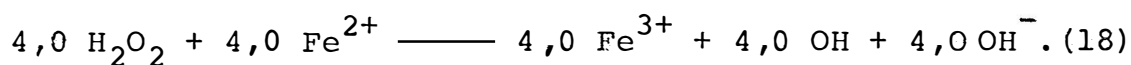


As reações dos radicais perodroxidrila HO₂ da equação (3) com íon ferroso ocorre da seguinte forma:

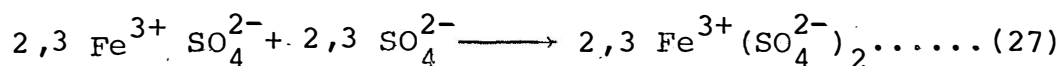
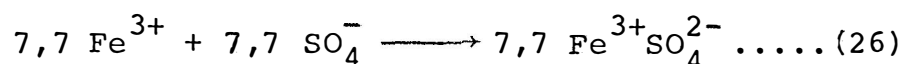
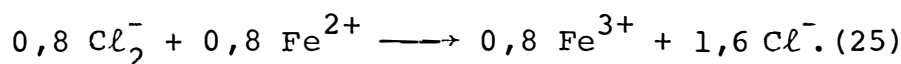
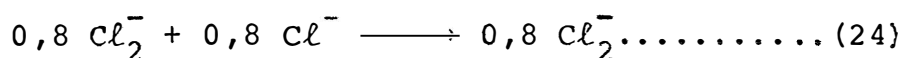
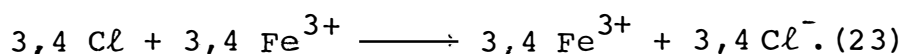
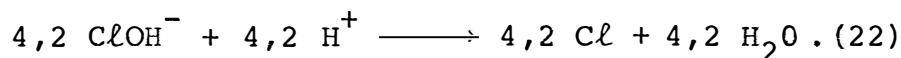
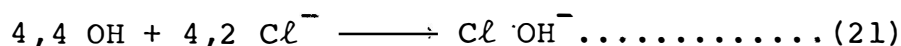
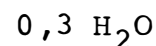
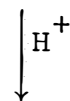
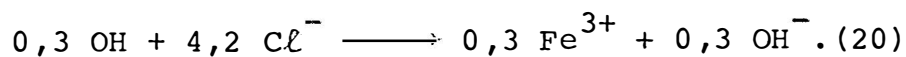




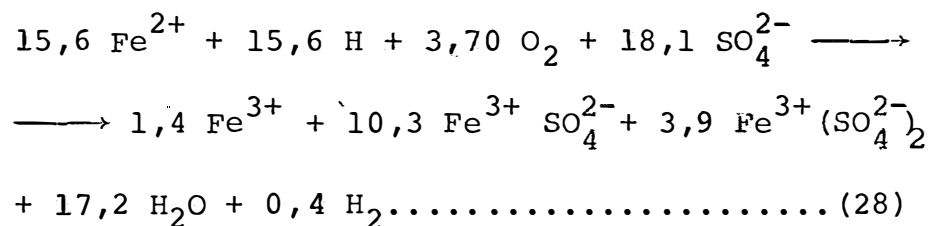
O peróxido de hidrogênio H_2O_2 , vindos das equações (1), (12), (13) e (15) reage com Fe^{2+} de acordo:



os radicais hidroxidrilas OH formados nas equações (18) e (19) reagem com o íon ferroso da forma:



somando-se as equações (1) a (27), temos finalmente, que a equação experimental da oxidação do íon ferroso em férrico é dada por:



de acordo com *BROSZKIEWICS (1967)*, o tempo para ocorrer o mecanismo completo é de 14 segundos.

3.2.2. Rendimento químico $G(\text{Fe}^{3+})$

O rendimento químico $G(\text{Fe}^{3+})$ é definido pela re
lação:

$$G(\text{Fe}^{3+}) = \frac{n}{E} \cdot 100 \dots \dots \dots (29)$$

onde n é o número de íons férricos formados por unidade de vo
 lume, E é a quantidade de energia absorvida em eV por unidade
 de volume.

Até 1953, foram publicados dados contraditórios do valor do rendimento químico $G(\text{Fe}^{3+})$, e após várias determi
 nações realizadas no período de 1953-1956, foi estabelecido conclusivamente que o valor de $G(\text{Fe}^{3+})$ para diversos tipos de radiações é de 15,5 - 15,6 íons/100 eV.

De acordo com *FRICKE e HART (1966)*, para a deter
 minação absoluta do valor de $G(\text{Fe}^{3+})$ são utilizados quatro métodos: calorimétrico, ionização, determinação da energia pe
 lo fluxo de elétrons absorvidos pela solução e fonte interna.

No método calorimétrico de calibração do dosíme
 tro sulfato ferroso, a energia absorvida é medida em um calo
 rímetro calibrado eletricamente por medições do aumento de temperatura em função do tempo, através da equação:

$$\left(\frac{\Delta Q}{\Delta t}\right)_\gamma = H_c \left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)_\gamma \dots\dots\dots(30)$$

onde $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ é a variação de energia elétrica em eV/min; $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ é a variação medida do aumento de temperatura em mV/min, e H_c é a energia equivalente do calorímetro em eV/mV produzidas pelas radiações. Esse método foi empregado por um número muito grande de pesquisadores e LAZO *et alii* (1954) utilizando radiações gama do ^{60}Co , calibraram o dosímetro de *Fricke* encontrando para o valor de $G(\text{Fe}^{3+})$, $15,6 \pm 0,3$ íons/100 eV. Posteriormente essa determinação do valor de $G(\text{Fe}^{3+})$ foi repetida com a mesma radiação por *Brynjolfsson e Holm* (1960), citados em *HOLM et alii* (1961); *KEENE e LAW* (1963), encontrando para o valor de $G(\text{Fe}^{3+})$ 15,68 e 14,4 íons/100 eV respectivamente, concordando com o resultado obtido por *HOCHANADEL e GHORMLEY* (1953).

Para o método de ionização na calibração do dosímetro de *Fricke*, a dose absorvida é medida através da corrente produzida em uma câmara de ionização utilizando-se a lei de *BRAGG-GRAY*:

$$E_w = I.W.\rho \dots\dots\dots(31)$$

onde E_w é a energia absorvida das radiações por unidade de volume na câmara durante um segundo; I é a ionização por unidade de volume dentro da câmara em um segundo; W é a quantidade de energia para formar um par de íons no gás e $\rho = \frac{S_w}{S_g}$ é a razão entre os poderes de freagem dos elétrons da parede e do gás da câmara. Alguns trabalhos têm sido publicados a

través deste método. *HAYBITTLE et alii* (1956) encontraram para o valor de $G(\text{Fe}^{3+})$, utilizando radiação gama do ^{60}Co , $15,5 \pm 0,5$ íons/100 eV. De acordo com esse resultado, *SHALET et alii* (1962) encontraram para o valor de $G(\text{Fe}^{3+})$ $15,6 \pm 0,4$ íons/100 eV. *DAVIES et alii* (1963) utilizando a mesma radiação dos autores anteriores determinaram para o valor de $G(\text{Fe}^{3+})$ $15,4 \pm 0,5$ íons/100 eV. Por outro lado *WEISS et alii* (1954) empregando radiações X, produzidas através do bombardeamento de elétrons de 2 MeV em uma placa de ouro, encontraram para o valor $G(\text{Fe}^{3+})$ $16,4$ íons/100 eV.

Para o método de calibração do dosímetro de *Fricke* por determinação de energia do feixe de elétrons absorvidos pela solução, a energia absorvida pela solução é calculada a partir da corrente de elétrons na solução, e a energia dos elétrons entrando na solução. Se I é a corrente em ampères e E é a energia em MeV dos elétrons entrando na solução, então a dose absorvida D em eV/cm^3 é dada por:

$$D = 6,25 \cdot 10^{24} \cdot I \cdot E \cdot t / V \dots \dots \dots (32)$$

onde V é o volume da solução em cm^3 , t é o tempo de irradiação em segundos. A determinação mais precisa com este método foi realizada por *SCHULLER e ALLEN* (1956). De acordo com seus resultados, para elétrons de 1 a 2 MeV, $G(\text{Fe}^{3+})$ foi de $15,45$ íons/100 eV.

No método de fonte interna de calibração do do

símetro uma solução radioativa contendo ^{32}P ou ^{35}S (emissores beta puro) é introduzida dentro da solução dosimétrica. Se A_0 é a atividade específica (número de desintegrações por segundo por cm^3 da solução) medida para o tempo $t = 0$, o número de átomos radioativos ΔN que terá desintegrado em 1 cm^3 na solução durante o tempo t , a partir de $t = 0$, será:

$$\Delta N = \frac{A_0}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) \dots \dots \dots (33)$$

sendo \bar{E} a energia média em MeV emitida por desintegração. A dose absorvida D em eV/cm^3 é dada por:

$$D = 10^6 \bar{E} \frac{A_0 (1 - e^{-\lambda t})}{\lambda} \dots \dots \dots (34)$$

PEISACH e STEYN (1960) utilizando ^{32}P como fonte interna calcularam o valor $G(\text{Fe}^{3+})$ em $15,4 \pm 0,1$ ions/100 eV.

Assim, o rendimento $G(\text{Fe}^{3+})$ determinado pelos quatro métodos de calibração possui o mesmo valor dentro dos limites de erros experimentais, e o valor comumente empregado na dosimetria sulfato ferroso é de $15,5 - 15,6$ íons/100 eV.

3.2.2.1. Dependência entre $G(\text{Fe}^{3+})$ e a energia das radiações ionizantes

O valor do $G(\text{Fe}^{3+})$ permanece constante em amplo intervalo de energia para as radiações gama e raios X. COMARK

et alii (1954) concluíram que a diferença existente entre os valores de $G(\text{Fe}^{3+})$ utilizando radiações gama do ^{60}Co e raios X com energia de 23 MeV, permanece dentro do erro experimental, 15,8 e 15,5 íons/100 eV, respectivamente. Por outro lado, *HAYBITTLE et alii* (1956) utilizando também radiações gama ^{60}Co e X com energias efetivas de 21 KeV a 7,6 MeV, mostraram que o rendimento $G(\text{Fe}^{3+})$ decresce para radiações com energias abaixo de 50 KeV. O valor de $G(\text{Fe}^{3+}) = 14,7 \pm 0,5$ íons/100 eV foi obtido para radiações X com energia de 33 KeV. Posteriormente, esse decréscimo foi confirmado por *SHALET et alii* (1962) que utilizando radiações com energias efetivas máximas de 200 KeV, encontraram o valor de 14,4 íons/100 eV para $G(\text{Fe}^{3+})$. De acordo com esses resultados, *NOVOTNY e SPURNY* (1968) encontraram $13 \pm 0,6$ íons/100 eV para o valor de $G(\text{Fe}^{3+})$, utilizando raios-X com energias efetivas de 60 KeV.

O valor de $G(\text{Fe}^{3+})$, 15,5 - 15,6 eV, permanece assim praticamente constante para radiações gama e raios X no intervalo de energia de 0,03 a 30 MeV, com variação de $\pm 5\%$.

3.2.2.2. Efeito do Oxigênio

O oxigênio presente na solução afeta consideravelmente o processo radiolítico no dosímetro sulfato ferroso.

ALLEN e ROTHSCHILD (1957), efetuando um estudo detalhado do efeito do oxigênio no valor de $G(\text{Fe}^{3+})$, observou que na sua ausência o valor de $G(\text{Fe}^{3+})$ é 1,9 vezes menor. Com o consumo de oxigênio da solução, a taxa de oxidação do íon férrico decresce, aproximando-se do valor 8,2 íons/100 eV. Este resultado está de acordo com os obtidos por BARR e KING (1956) e DEWHURST (1953). A figura 1 mostra a fração de íons Fe^{2+} oxidados pela radiação gama em função da razão entre o tempo de irradiação e a concentração inicial em Fe^{2+} , para duas diferentes concentrações iniciais nesse íon.

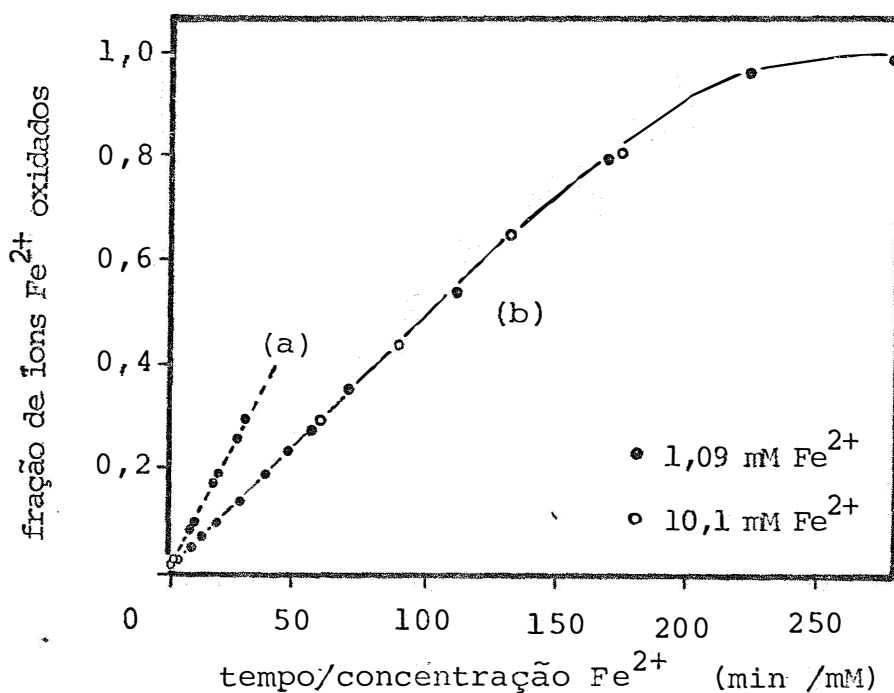


Figura 1 - Fração de íons ferrosos oxidados por radiação gama (610 rad/min) em solução 0,4 M H_2SO_4 saturada (a) e não saturada (b) com ar, em função da razão entre o tempo de irradiação e a concentração inicial em Fe^{2+} (ALLEN e ROTHSCHILD, 1957).

3.2.2.3. Efeito da Concentração do Sulfato Ferroso

FRICKE e MORSE (1927), citados por *FRICKE e HART (1966)*, recomendaram o uso da solução dosimétrica contendo sulfato ferroso na concentração de 5×10^{-4} M. Posteriormente foi mostrado por *MILLER (1953)*, que altas doses de absorção são mais exatamente determinadas utilizando-se concentrações de sulfato ferroso entre 5×10^{-3} a 10^{-2} M. Este intervalo de concentração está de acordo com o utilizado por *WEISS (1952)*, num estudo comparativo entre os dosímetros sulfato ferroso e sulfato cérico.

De acordo com *DAINTON e SUTTON (1953)*, num estudo detalhado da oxidação do Fe^{2+} em soluções diluídas, verificaram que para concentração abaixo de 10^{-4} M, o rendimento decresceu. Isto foi justificado pela reação incompleta entre sulfato ferroso e o peróxido de hidrogênio. Por outro lado, para concentrações de sulfato ferroso acima de 10^{-2} M ocorre um aumento no rendimento químico $G(\text{Fe}^{3+})$. *HOCHANADEL e GHORMLEY (1953)*, utilizando essa concentração de sulfato ferroso, justificaram que o aumento de $G(\text{Fe}^{3+})$ é devido ao aumento do número de radicais livres formados das moléculas excitadas da água participando das reações da oxidação do Fe^{2+} . *SCHULLER e ALLEN (1956)* não encontraram diferença no valor de $G(\text{Fe}^{3+})$ utilizando concentrações de 10^{-3} a 10^{-2} de sulfato ferroso.

Assim, dentro do intervalo de concentração 10^{-4} a 10^{-2} M, o valor de $G(\text{Fe}^{3+})$ é independente da concentração do sulfato ferroso.

3.2.2.4. Efeito do Ácido Sulfúrico

O efeito da concentração do ácido sulfúrico tem sido verificado por muitos pesquisadores. *DEWHURST (1953)* verificou que o rendimento $G(\text{Fe}^{3+})$ permanece constante para o intervalo de 0,4 - 1M, enquanto que *Lebail e Sutton (1956)*, citada por *VERESHCHINSKII e PIKAEV (1964)* não verificaram diferenças para concentrações abaixo de 2,5 M. *ALLEN et alii (1957)* e *ROTHSCHILD e ALLEN (1958)* efetuando um estudo da oxidação de íons ferrosos em meio ácido diluído com concentrações de $4,8 \cdot 10^{-3}$ e $1,1 \cdot 10^{-3}$ M, verificaram um decréscimo para 14,2 e 13,2 íons/100 eV no valor de $G(\text{Fe}^{3+})$ para pH iguais a 2,5 e 2,7, respectivamente. Por outro lado, *Proskurnim (1955)*, citado em *VERESHCHINSKII e PIKAEV (1964)*, notou que o valor de $G(\text{Fe}^{3+})$ é aproximadamente 60 íons/100 eV quando utilizadas concentrações acima de 2,5M.

Assim, $G(\text{Fe}^{3+})$ mostra ser constante para concentrações de ácido sulfúrico no intervalo de 0,05 - 2,5M.

3.2.2.5. Efeito da Temperatura

Inúmeros pesquisadores têm mostrado que o rendimento $G(\text{Fe}^{3+})$ é independente da temperatura em amplo intervalo. *DEWHURST* (1953) verificou que na ausência de NaCl a taxa de oxidação dos íons ferrosos variou de 0,4%/°C dentro do intervalo de 4 a 54 °C, e 0,2% por *HARDWICK* (1953). Posteriormente, o efeito da temperatura foi estudado também por *SCHUARZ* (1954), encontrando que o coeficiente de temperatura no valor de $G(\text{Fe}^{3+})$ é da ordem de $0,04 \pm 0,03\%$ por °C entre 4 e 72 °C. Na ausência de íons cloreto, o efeito da temperatura é maior, da ordem encontrada por *DEWHURST* e *HARDWICK*. *HOCHANADEL* e *GHORMLEY* (1962) *SHALEK et alii* (1962) não encontraram diferenças nas taxas de exposição entre 2 a 65 °C.

Então dentro do intervalo de temperatura de 4 a 70 °C, o valor de $G(\text{Fe}^{3+})$ permanece constante.

3.2.2.6. Efeitos de Substâncias Orgânicas

O efeito de substâncias orgânicas foi observado pela primeira vez por *Harker* (1934), notando que presença de quantidades mínimas de certos compostos orgânicos na solução assimétrica, afeta em considerável extensão a taxa de oxidação radiolítica do Fe^{2+} . Posteriormente *DEWHURST* (1952), citado por *KURIEM et alii* (1959), estudou efeitos de álcoois alifáticos no

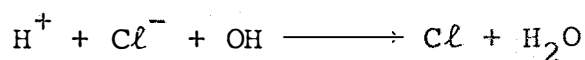
valor de $G(\text{Fe}^{3+})$, verificando que a presença de n-butanol na concentração de 10^{-4}M na solução dosimétrica aumenta o valor de $G(\text{Fe}^{3+})$ de 80%, e uma quantidade igual de etanol em 45%. *HART (1952)* verificou que 10^{-1}M de ácido fórmico na solução dosimétrica resultou em 200 íons/100 eV no valor de $G(\text{Fe}^{3+})$.

Um aumento de $G(\text{Fe}^{3+})$ pode também ocorrer na presença de compostos orgânicos insaturados. *DONALDSON e MILLER (1955)* verificaram que o acréscimo de álcool *Allyl* na solução dosimétrica aumenta o valor de $G(\text{Fe}^{3+})$ de 46%, com estireno de 16%, em 20^{-4}M de tioureia de 20% e 10^{-2}M de *Allylthioueira* de 32%. O efeito do acetileno na solução dosimétrica foi estudada por *Clay et alii (1959)*, citados por *FRICKE e HART (1966)*, verificando que o valor de $G(\text{Fe}^{3+})$ cresce de 50%.

Assim, o acréscimo do valor de $G(\text{Fe}^{3+})$ depende da natureza e da estrutura dos compostos orgânicos.

3.2.2.7. Efeito Inibidor do Íon Cloreto

DEWHURST (1951) verificou que o aumento de $G(\text{Fe}^{3+})$ na presença de impurezas orgânicas pode ser suprimidas por adição de 10^{-3}M de cloreto de sódio. De acordo com o autor, o efeito inibidor é devido ao fato que as reações do íon cloreto com radical hidroxidrila OH



é mais rápida que as reações desses radicais com substâncias orgânicas. *WEISS et alii* (1956), confirmaram que 10^{-3}M de NaCl na solução elimina dentro dos erros experimentais, o efeito de impurezas contidas na água.

KURIEN et alii (1959) verificaram efeito semelhante utilizando 10^{-2}M de NaCl em solução contendo benzeno e fenol.

3.2.2.8. Efeito da Célula de Irradiação

Outro efeito considerável na resposta do dosímetro sulfato ferroso é a forte dependência da célula de irradiação. Dois fatores são levados em consideração por diversos pesquisadores: a constituição das paredes e o diâmetro interno da célula. O primeiro distorce o campo de irradiação quando os dosímetros são alinhados ao longo de um eixo central, enquanto que o segundo tem influência no rendimento químico $G(\text{Fe}^{3+})$, devido a efeitos secundários originados pela condição de não equilíbrio eletrônico existente entre a parede da célula e a solução (*PETTERSON e HETTINGER, 1967*).

WEISS et alii (1952) utilizando ampolas de vidro com diâmetro interno variando de 5 a 18 mm e volumes entre 0,5 a 6,6 ml, verificaram que a formação de íons férricos produ

zidos em função da razão diâmetro interno e volume do dosímetro é praticamente constante em amplo intervalo, e para diâmetros internos inferiores a 8 mm, há um aumento considerável no rendimento químico $G(\text{Fe}^{3+})$. Posteriormente, *WEISS et alii* (1956) repetiram o experimento de *WEISS* (1952) com ampolas de vidro de 4 mm de diâmetro interno e verificaram um aumento de 6% no valor de $G(\text{Fe}^{3+})$. Os mesmos resultados foram obtidos por *Shersted* (1956) utilizando células de vidro com diâmetro interno entre 4 a 18 mm, *Puig e Sutton* (1956) com célula de polistireno de 5 a 26 mm, ambos citados por *BURLIN e CHAN* (1969).

Mais recentemente, *BURLIN e CHAN* (1969) determinaram através da teoria da cavidade, o efeito da célula de irradiação para diâmetros internos de 1 a 50 mm, utilizando radiações gama com energia entre 0,2 a 3 MeV. Neste método a energia absorvida pela solução dosimétrica (D_c) e energia absorvida na parede da célula (D_w) é dada pela relação:

$$D_w = \frac{1}{\rho} \cdot D_c \dots\dots\dots (35)$$

onde ρ é a razão entre os poderes de freagem para ionizar partículas internas da cavidade e da parede dessa cavidade. Comparadas às determinações teóricas e experimentais, a concordância entre os dois métodos estiveram dentro dos limites de erros experimentais, sendo que a resposta relativa do dosímetro para diâmetro interno superior a 10 mm variou de 1%, abaixo

da ordem encontrada por *WEISS (1956)*.

Assim, células de irradiações com diâmetros internos entre 8 a 50 mm elimina os efeitos secundários dentro do erro experimental.

3.2.2.9. Efeito da Taxa de Dose

Alguns pesquisadores, *DRAGANIC et alii (1961)*, *PETTERSON e HETTINGER (1967)*, *FRICKE e HART (1966)*, e muitos outros, citam que a oxidação do íon ferroso é independente da taxa de dose abaixo de 10^8 rad/s. *SCHULLER e ALLEN (1956)* mostraram que para feixe de elétron de 2 MeV, $G(\text{Fe}^{3+})$ é indepente da taxa de dose abaixo de 10^6 rad/s. Estes autores notaram um decréscimo no valor de $G(\text{Fe}^{3+})$ causado pelo consumo de oxigênio.

O limite inferior não tem sido seguramente determinado, e de acordo com *MILLER (1953)* esse limite inferior não ultrapassa a 0,1 rad/s.

Assim, dentro do intervalo de 0,1 a 10^8 rad/s, $G(\text{Fe}^{3+})$ é independente da taxa de dose.

3.2.3. Método de Determinação do Íon Fêrrico

Para determinar a concentração do íon Fe^{3+} , vários métodos são utilizados: titulação potenciométrica usando permanganato de potássio como indicador, determinações colorimétrica com orto-fenantrolina ou tiocianato como indicador e determinação espectrofotométrica na região do ultra-violeta (FRICKE e HART, 1966).

HARDWICK (1952) propôs a determinação espectrofotométrica direta na faixa de 304 a 305 nm como mostra a figura 2 .

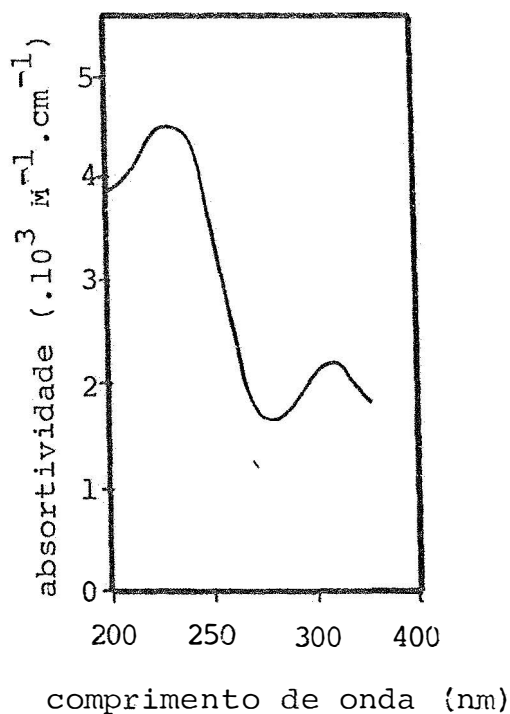


Figura 2. Espectro de absorção do íon fêrrico, extraído de BROSZKIEWISE (1967).

Este método é conveniente, por ser rápido e mais preciso que os outros, e sua sensibilidade permite leituras com precisão de 1% (PETTERSON e HETTINGER, 1967). Neste método, a absorvância da solução irradiada é comparada com a da não irradiada e a concentração do Fe^{3+} é calculada a partir da diferença de absorvância.

A única desvantagem do método de determinação espectrofotométrica direta é a dependência do valor da absorvância $a(\text{Fe}^{3+})$ com a temperatura. Wild (1952), citado por VERESHCHINSKII e PIKAEV (1964), notou que a absorvância $a(\text{Fe}^{3+})$ em solução dosimétrica normal em 304 nm cresce de 0,7% por grau centígrado. Posteriormente esta observação foi confirmada por diversos pesquisadores: HOLM *et alii* (1961), HANDERSON e MILLER (1960) e SCHARF e LEE (1962). O valor médio encontrado por estes autores, quando corrigidos para 25°C foi de $2,197 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$. De acordo ainda com SCHARF e LEE (1962), os valores da absorvância não diferem mais que 1% em diferentes laboratórios.

A absorvância do íon Fe^{3+} é também uma função da concentração do ácido sulfúrico. De acordo com HANDERSON e MILLER (1960), $a(\text{Fe}^{3+})$ em $5.10^{-2} \text{ M H}_2\text{SO}_4$ medida em 304 nm foi 0,6% maior que em $0,4 \text{ M H}_2\text{SO}_4$, e em $5.10^{-3} \text{ M H}_2\text{SO}_4$ é 24% menor. Os autores notaram ainda que o coeficiente de temperatura do $a(\text{Fe}^{3+})$ também depende da concentração do ácido, e para 5.10^{-2} e $5.10^{-3} \text{ M H}_2\text{SO}_4$ o coeficiente variou de 0,6 a 1,1%

por φ C, respectivamente.

Para ALLEN e ROTHSCHILD (1957), a concentração de sulfato ferroso praticamente não tem efeitos nos resultados da determinação do íon Fe^{3+} em solução dosimétrica normal; contudo, se $5 \cdot 10^{-2} \text{M}$ Fe^{2+} estiver presente na solução, a absortividade do íon Fe^{3+} em 304 nm e 0,4M H_2SO_4 cresce aproximadamente de 0,4%.

3.2.4. Estabilidade

O dosímetro de *Fricke* é bastante estável antes e após as irradiações. Para HUFFMAN e DAVIDSON (1956) a oxidação do Fe^{2+} na solução é muito lenta na ausência de radiações. Para uma solução de 10^{-2}M de sulfato ferroso, esta oxidação espontânea é da ordem de $2 \cdot 10^{-6} \text{M/dia}$. Os autores recomendaram para a correção utilizar a própria solução dosimétrica não irradiada como controle. PETERSON e HETTINGER (1967) aconselham armazenar a solução dosimétrica em frasco escuro para evitar a oxidação espontânea. OLLER *et alii* (1969) notaram que a solução dosimétrica permanece inalterado por mais de seis meses quando estocada, e a medição do Fe^{3+} pode ser realizada até algumas horas depois das irradiações.

3.2.5. Limites de Aplicação do Dosímetro

De acordo com *ANTA (1961)*, o limite inferior do dosímetro sulfato ferroso é determinado pela sensibilidade do método empregado na determinação do íon férrico. Quando utilizado o método espectrofotométrico direto, uma variação de absorvância da ordem de 0,1% pode ser determinada com precisão, dentro do 1%, e a dose correspondente é $1,8 \cdot 10^{13}$ eV/cm³ ou aproximadamente $2 \cdot 10^3$ rad.

O limite superior de absorção no dosímetro é determinado pelo consumo de oxigênio na solução (*ANTA, 1961; DRAGANIC, 1961; FRICKE e HART, 1966*). Este limite corresponde à dose absorvida de $4 \cdot 10^4$ rad para uma solução saturada com ar como se observa na figura 3. Entretanto, se ao invés de ar a solução for saturada com oxigênio, de acordo com *DRAGANIC e GUPTO, 1975, WEISS, 1952, BROSZKIEWICS, 1967 e AUXIER, 1967*), este limite é aumentado cinco vezes, isto é, $2 \cdot 10^5$ rad.

Portanto, o dosímetro sulfato ferroso situa-se para medições de doses dentro do intervalo de $2 \cdot 10^3$ a $4 \cdot 10^4$ rad, conforme é mostrado na Figura 3.

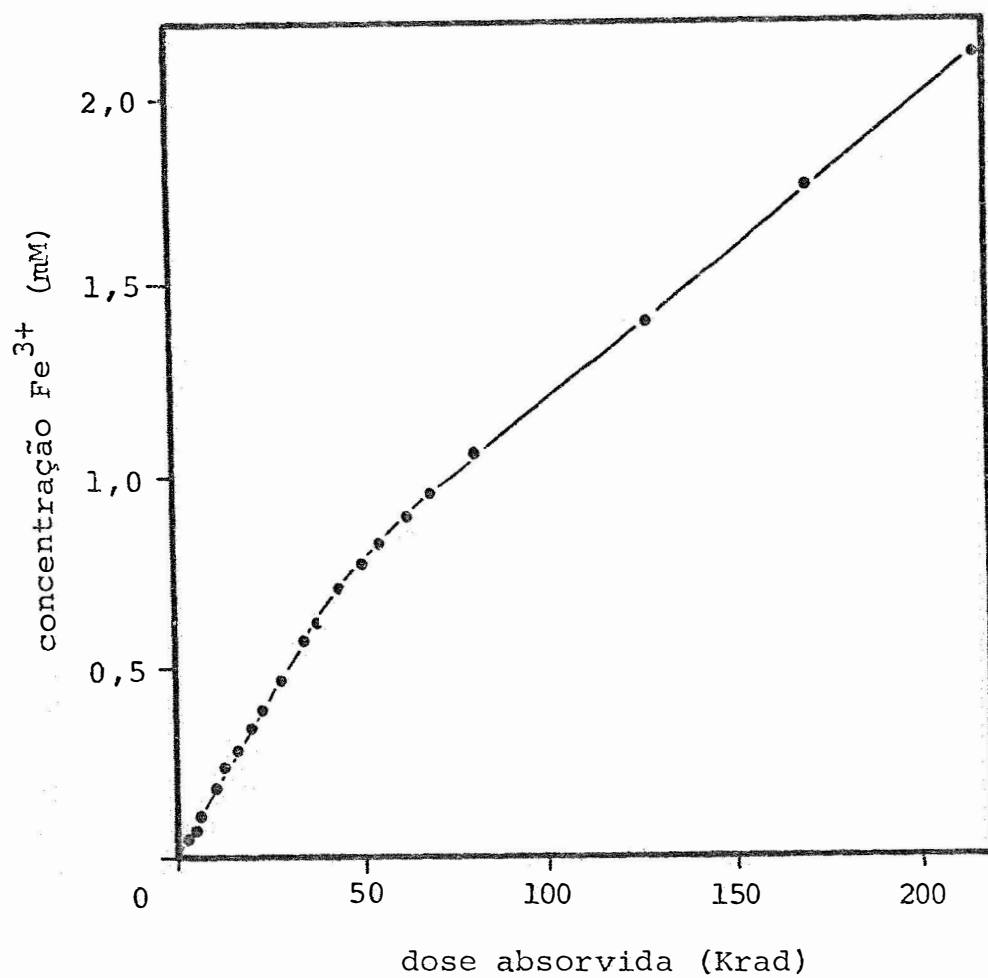


Figura 3. Formação do íon fêrrico em função da dose absorvida (ANTA, 1961).

3.2.6. Aplicações

Várias são as formas de como o dosímetro de *Fricke* vem sendo empregado na dosimetria de radiações ionizantes e como principal aplicação é a sua utilização na calibração de fontes radioativas de alta atividade e aceleradores de elétrons de alta energia.

DAVIDSON et alii (1953) estudando as características de três dosímetros químicos (sulfato ferroso, sulfato cérico e azul de metileno) e um físico (calorímetro adiabático) determinaram experimentalmente as distribuições das taxas exposição na cavidade de um irradiador de ^{60}Co com atividade nominal de 1 KCi. As taxas de doses em cinco posições diferentes medidas através dos quatro dosímetros apresentaram uma variação entre si de 10% e quanto aos dosímetros os autores concluíram:

- dosímetro sulfato ferroso - o mais simples, preciso, reprodutível, apresentando-se melhor para o uso de rotina.

- dosímetro sulfato cérico - preciso, porém exigente aos cuidados da preparação da solução dosimétrica.

- dosímetro azul de metileno - simples na preparação, porém pouco preciso e não reprodutível.

- calorímetro adiabático- preciso, reproduzível, mas inconveniente para o uso de rotina.

LEWIS et alii (1954) na calibração de dois irradiadores de cavidade com ^{60}Co , possuindo atividades nominais de 10 e 1 KCi respectivamente, utilizaram o dosímetro de sulfato ferroso como método padrão e dois medidores eletrônicos baseados na ionização (*Victoreen Roentgen Rate-Meter* e *Victoreen Rate-Meter*). Comparadas às medições experimentais para o primeiro irradiador, as determinações do dosímetro químico foram superiores entre 15 a 20% às determinações do *Victoreen Roentgen Rate-Meter*, enquanto que, para o segundo ocorreu o inverso, obtendo-se valores superiores para *Victoreen Rate-Meter* em relação ao sulfato ferroso, e os autores não justificaram estes resultados.

PETTERSSON e HETTINGER (1967), efetuando um estudo detalhado do dosímetro de *Fricke*, mostraram que este poderia ser utilizado na dosimetria de aceleradores de elétrons com altas energias. Para isso, dois aceleradores de elétrons com energias variando de 5 a 10 MeV foram calibrados. Em ambos aceleradores as doses absorvidas pelo dosímetro estiveram dentro do erro experimental, enquanto que, entre si as determinações apresentaram um desvio de 3%.

RAB MOLLA et alii (1969), utilizaram para a dosimetria do irradiador panorâmico de ^{60}Co com 520 curies do Centro de Energia Atômica de Dacca, Índia, o dosímetro de *Fri*

cke e uma câmara de ionização *Victoreen Roentgen Rate-Meter*, modelo 510. Comparadas as determinações pelos dois métodos, a diferença observada estiveram em torno de 10%. Nas taxas de exposição medidas com o dosímetro de *Fricke*, foram utilizados fatores de correção para a temperatura na determinação dos ions férricos, e para o decaimento radioativo.

BURLIN e CHAN (1971), para a dosimetria de um irradiador de cavidade com ^{60}Co , utilizaram os dosímetros sulfato ferroso, perpex e uma câmara de ionização. Realizadas as correções para os três métodos, o erro provável obtido foi de 1,6%, concordando com o resultado encontrado por *FOLDIAT et alii (1973)* na calibração de um irradiador panorâmico de ^{60}Co com atividade nominal de 80 KCi, utilizando quatro dosímetros químicos (sulfato ferroso, sulfato cérico, sulfato ferroso modificado e etanol clorobenzeno) e um físico (semicondutor de silício).

O dosímetro de *Fricke* tem sido utilizado também como método padrão para calibração de outros dosímetros. *RITZ e ATIX (1962)* e *SVENSSON e PETERSSON (1967)*, utilizaram o dosímetro de *Fricke* como padrão de uma câmara de ionização na dosimetria de um irradiador de cavidade com ^{60}Co e um acelerador de elétrons com energias variando entre 5 a 10 MeV, respectivamente. Igualmente *RAZEN e DVORNIK (1973)* e *OSVAY et alii (1975)* calibraram os dosímetros etanol-clorobenzeno e semicondutor de silício, respectivamente, para as dosimetrias de vários irradiadores de ^{60}Co e aceleradores de elétrons de alta energia.

3.3. Cálculo de Taxas de Exposição

3.3.1. Noção Básica

Para o cálculo de taxa de exposição em torno de uma fonte emissora de radiação gama é necessário que sejam conhecidos a atividade da fonte e o esquema de desintegração do radioisótopo considerado (*HINE e BROWNELL, 1958*). De acordo com os autores, para uma fonte pontual isotrópica, a taxa de exposição em R/h pode ser calculada num ponto qualquer distante da fonte, segundo a usual relação do inverso do quadrado da distância.

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{\Gamma \cdot A}{r^2} \dots\dots\dots(36)$$

onde A é a atividade da fonte em curies, r a distância do ponto à fonte em metros e P é a emissão específica do radioisótopo considerado em R.h⁻¹.Ci⁻¹.m² (item 4.5.1).

Se ao invés de uma fonte pontual tivermos n fontes, mas considerando ainda uma distribuição discreta, pode-se avaliar a taxa de exposição num ponto P, somando-se as contribuições das taxas de cada fonte.

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \Gamma \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{r_i^2} \dots\dots\dots(37)$$

Porém quando a distribuição das fontes não for discreta, surgem sérios problemas nos cálculos da taxa de exposição. Contudo, se a distribuição da fonte for contínua, uniforme e apresentar certas simetrias, a taxa de exposição pode ser calculada dividindo-se a atividade da fonte em elementos infinitesimais com atividade dA . Calcula-se então a taxa de exposição $d(\frac{\Delta X}{\Delta t})$ no ponto P devido a cada um desses elementos, sendo tratados como fontes pontuais.

$$d(\frac{\Delta X}{\Delta t}) = \frac{\Gamma \cdot dA}{r^2} \dots\dots\dots (38)$$

e a taxa de exposição resultante nesse ponto é calculada através da integração de todos os elementos de atividade dA .

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \int d(\frac{\Delta X}{\Delta t}) = \int \frac{\Gamma \cdot dA}{r^2} \dots\dots\dots (39)$$

3.3.2. Cálculo de Taxas de Exposição em Irradiadores

Apesar do largo emprego das radiações gama nas áreas agrônômica, médica, ciências exatas e mesmo em indústria de alimento, são restritos as informações de taxas de exposição nos irradiadores existentes. De forma geral isso ocorre devido os irradiadores serem construídos atendendo necessidades específicas de cada caso. Um modelo comum é o tipo

panorâmico ou *Gammabeam*, isto é, a fonte radioativa é suspensa da blindagem através de um controle automático para a posição de exposição dentro de uma câmara, onde amostras de pequeno e grande porte são irradiadas. Em condições de campo o modelo é chamado de *Gammafield*. Para a grande maioria desses irradiadores a posição da fonte é fixa, sendo o controle da exposição feito em função da distância e do tempo. Em um outro modelo, chamado tipo cavidade ou *Gammacell*, o processo para irradiações é exatamente ao contrário. Nestes irradiadores, amostras de pequenos volumes são conduzidas para dentro da blindagem que abriga um conjunto de fontes fixas dispostas de forma cilíndrica, formando uma cavidade, e a exposição é controlada unicamente através do tempo de irradiação.

RAB MOLLA *et alii* (1969), utilizaram a equação

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \int_{x=0}^{x=a} \frac{\Gamma \cdot A}{ar^2} dx \dots\dots\dots (40)$$

para o cálculo das taxas de exposição em um irradiador *Gamma-beam* de ⁶⁰Co, contendo uma fonte cilíndrica de 15 cm de comprimento por 0,95 cm de diâmetro. A fonte foi admitida como linear e a integração foi realizada de acordo com HINE e BROWNELL (1958), ao longo do comprimento a da fonte. As taxas de exposição calculadas quando comparadas com as observadas experimentalmente através de dois métodos independentes de medidas, foram em geral inferiores e o desvio entre os valores teóricos e experimentais foi de 10%.

LEWIS et alii (1954) utilizaram de uma equação complexa para o cálculo de taxas de exposição dois irradiadores *Gammacell* de ^{60}Co . Para o primeiro irradiador cuja atividade é distribuída uniformemente em uma superfície cilíndrica as taxas de exposição foram superiores, de 28 a 30%, enquanto que para o segundo, o qual apresenta a atividade na forma de 100 cilindros dispostos em círculo, de 16 a 20%.

Por outro lado, *BURLIN e CHAN (1971)* empregando a mesma equação utilizada por *RAB MOLLA et alii (1969)*, calcularam as curvas de isodoses de um irradiador *Gammacell*, com as mesmas características da distribuição de fontes do segundo irradiador de *LEWIS et alii (1954)*. Os valores calculados teoricamente foram 5% superiores aos obtidos experimentalmente com o dosímetro sulfato ferroso. A figura 4 mostra as curvas de isodoses para um plano vertical na cavidade.

Para fontes planas, a maioria das vezes empregadas em aplicações industriais, diversos pesquisadores como *DICKSON e KERR (1975)*, *MOTTE et alii (1961)* e *MANOWTZ et alii (1964)*, apresentam equações para o cálculo de taxas de exposições para fontes com dimensões variadas.

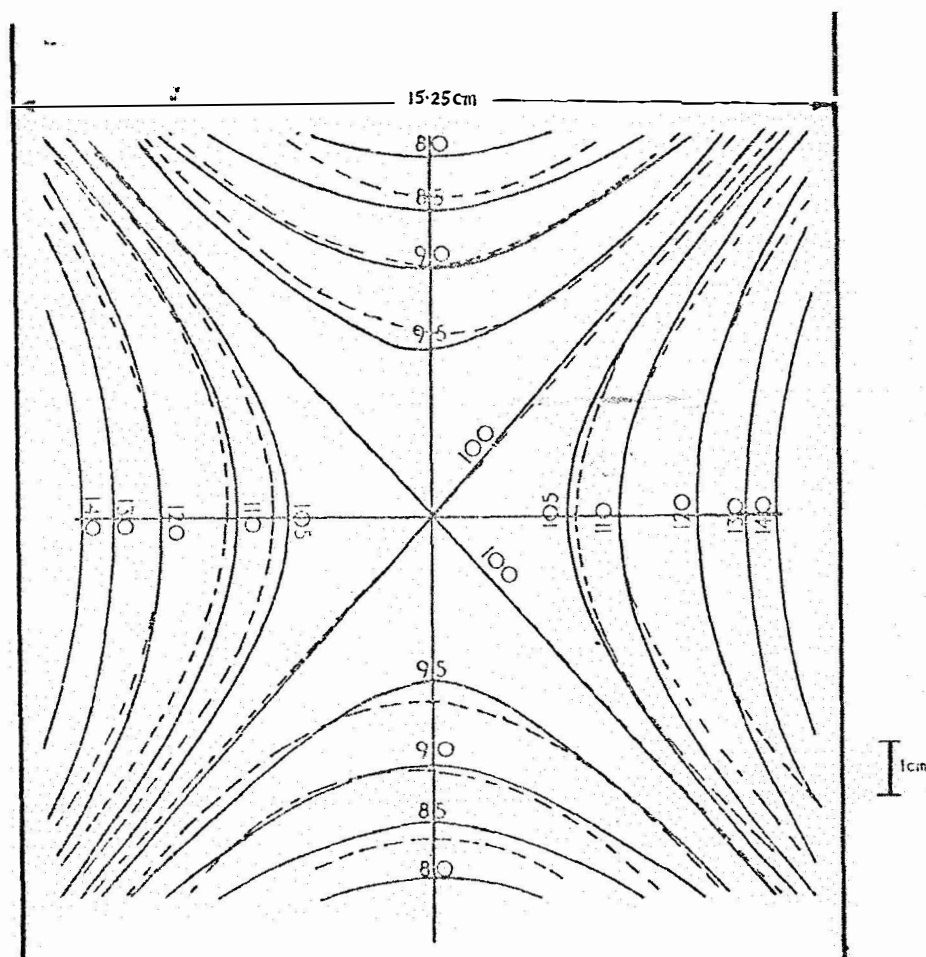


Figura 4. Curvas de isodoses relativas dentro da cavidade, calculadas teoricamente (linha cheia) e medidas experimentalmente com o dosímetro sulfato ferroso (linha pontilhada) por *BURLIN e CHAN (1971)*.

4. METODOLOGIA

4.1. Área de Irradiação

O ensaio experimental para as determinações das taxas de exposição foram conduzidas no irradiador de ^{60}Co Gamma beam 650, de propriedade do CENA/CNEN/USP (Figura 5), junto a Seção de Dosimetria e Proteção Radiológica, Divisão de Ciências Básicas do Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba - Estado de São Paulo.

O irradiador encontra-se localizado próximo ao centro de uma câmara com dimensões de 5,65 X 5,20 X 2,55 m de comprimento, largura e altura respectivamente, e está blindada por paredes de concreto armado cuja espessura é de 1,45 m nas pare-

des laterais e 0,45 m no teto (Figura 6), obedecendo assim as normas estabelecidas pela Comissão Internacinal de Proteção Ra*diol*ógica.



Figura 5 - Vista lateral do prédio que contém a câmara de irra*di*ação.

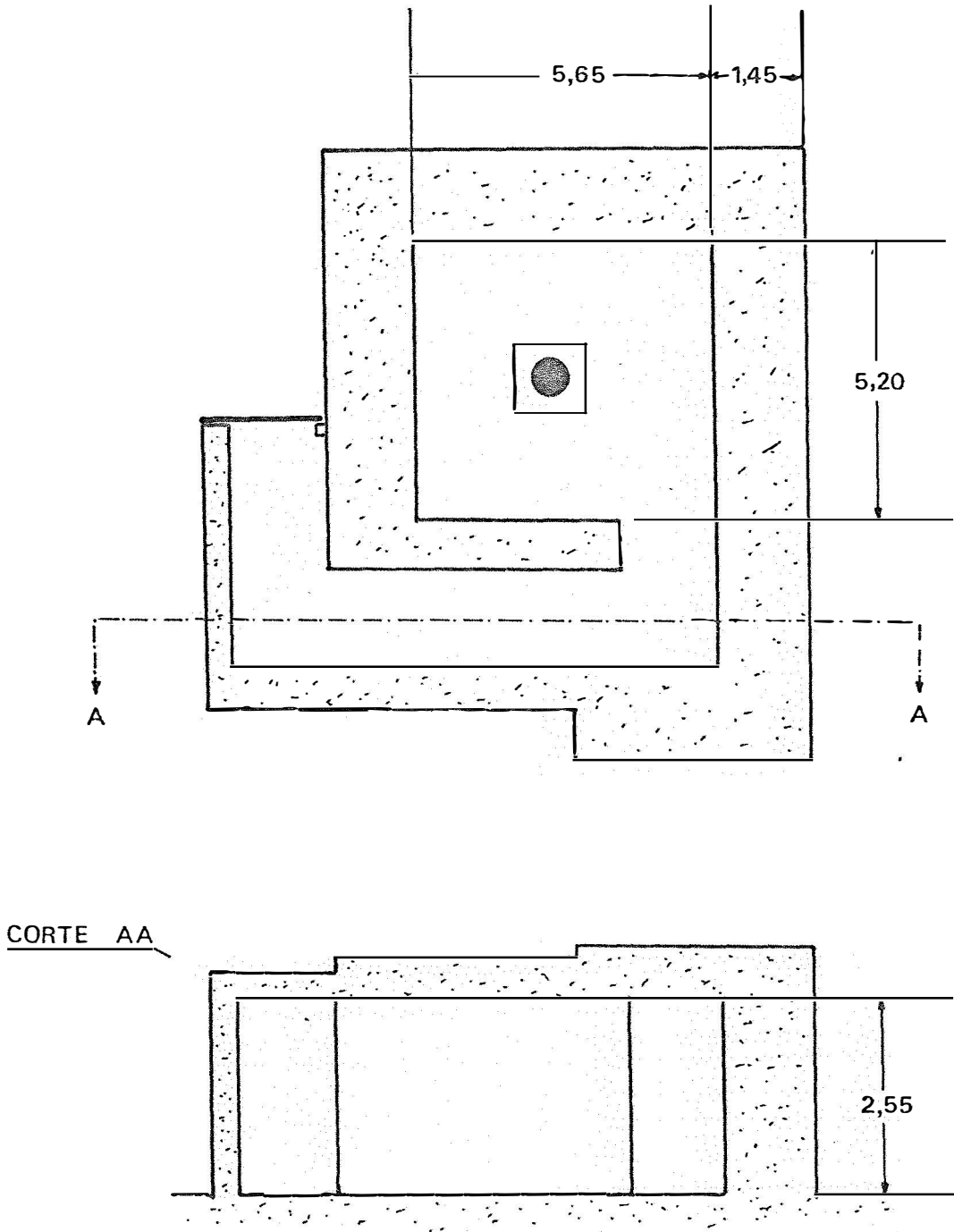


Figura 6 - Esquema da câmara de irradiação (dimensões em metros)

4.2. Descrição do Irradiador

O modelo Gamma-beam 650 - tipo IR31, é um irradiador de ^{60}Co construído pela Atomic Energy of Canada Limited com atividade nominal de 29 080 curies em 19 de abril de 1974, destinado para irradiação com taxas de exposição panorâmicas e cavidade interna.

Basicamente, o irradiador é constituído de 12 tubos metálicos para exposições, contendo trinta e seis cápsulas de ^{60}Co de igual atividade. Numerados de 1 à 12 no sentido horário, estes tubos são estendidos individualmente até o centro de uma blindagem cilíndrica de chumbo, com dimensões de 1,27 m de altura por 0,67 m de diâmetro pesando aproximadamente $5 \cdot 10^3$ kg, que além de blindagem primária, funciona também como um armazenador das cápsulas radioativas (Figura 7).

Através de ar comprimido gerado por dois compressores localizados na base do irradiador (Figura 7), as três cápsulas de cada tubo são movidas internamente ao tubo expositor da posição estoque dentro da blindagem à posição de exposição, na altura de 32 cm acima da plataforma de irradiação, onde as amostras podem ser irradiadas internas ao conjunto de tubos metálicos (cavidade interna) ou externas (panorâmica). As diferentes taxas de exposição em ambos os casos podem ser obtidas através da combinação entre a abertura do círculo formado pelos tubos (que pode ser selecionada previa-

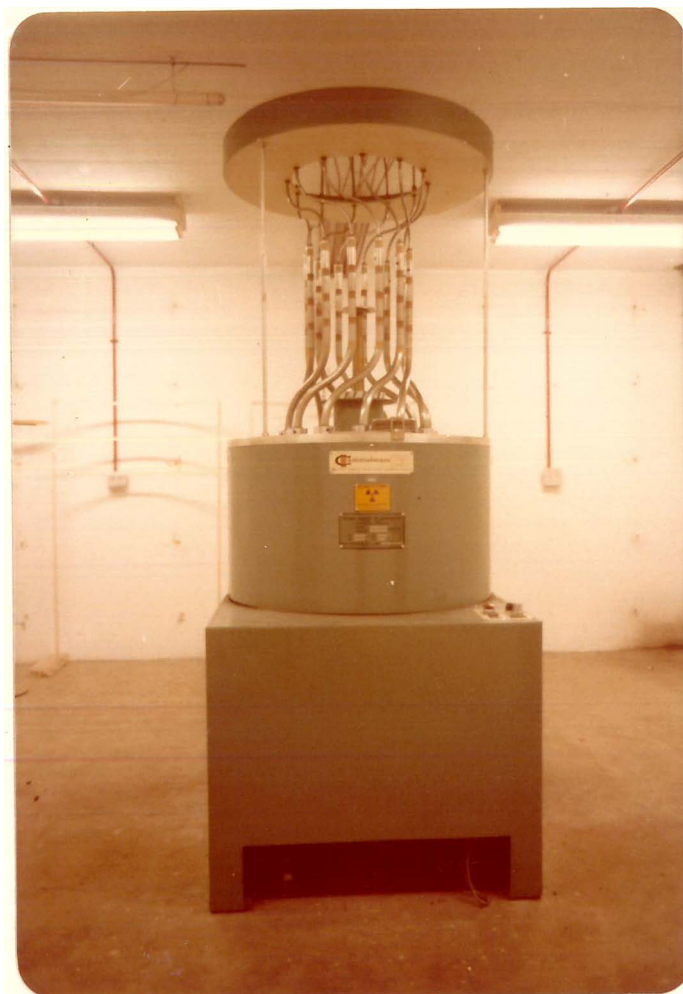


Figura 7 - Vista frontal do irradiador GammaBeam 650 dentro da câmara.

mente através de um sistema eletro-mecânico de rotação desde 10 até 84 cm) e o número de tubos ativos para exposição (Figura 8).

Os tubos metálicos são construídos de aço inoxidável com diâmetros externo e interno de 25,4 mm e 23,0 mm, respectivamente. As cápsulas radioativas contêm o material radioativo ^{60}Co na forma de pequenos cilindros de 1 mm de altura por 1 mm de diâmetro, as quais são duplamente revestidas (cápsula 316 L- Figura 9).

A encapsulação interna é do tipo C133, modelo padrão da Atomic Energy of Canada Limited, de aço inoxidável, com dimensões de 16,13 mm de diâmetro interno por 25,4 mm de altura. A encapsulação externa, do tipo C252 é também construído de aço inoxidável medindo 21,13 mm de diâmetro externo e 38,11 de altura. As cápsulas nos tubos expositores são separadas por molas de 38,1 mm de altura, de tal forma que o conjunto de 3 cápsulas e 2 molas possui uma altura de 19,05 cm.

Todo funcionamento do irradiador é controlado por um painel eletrônico localizado do lado exterior à câmara de irradiação.

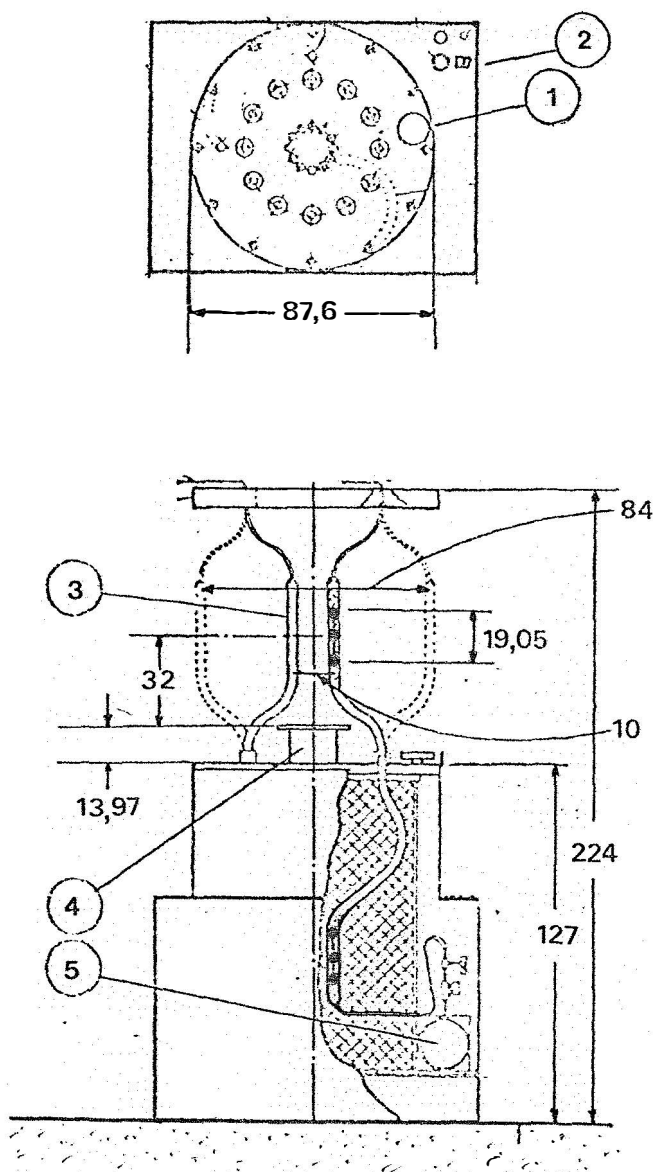


Figura 8 - Esquema representando o movimento de rotação dos tubos expositores, contendo as cápsulas radioativas, e também a disposição das cápsulas nas irradiações. (1) - Indicador de abertura dos tubos; (2) - Sistema elétrico de rotação dos tubos; (3) - Posição de exposição das cápsulas; (4) - Plataforma de irradiação; (5) - Compressor do irradiador (Dimensões em centímetros).

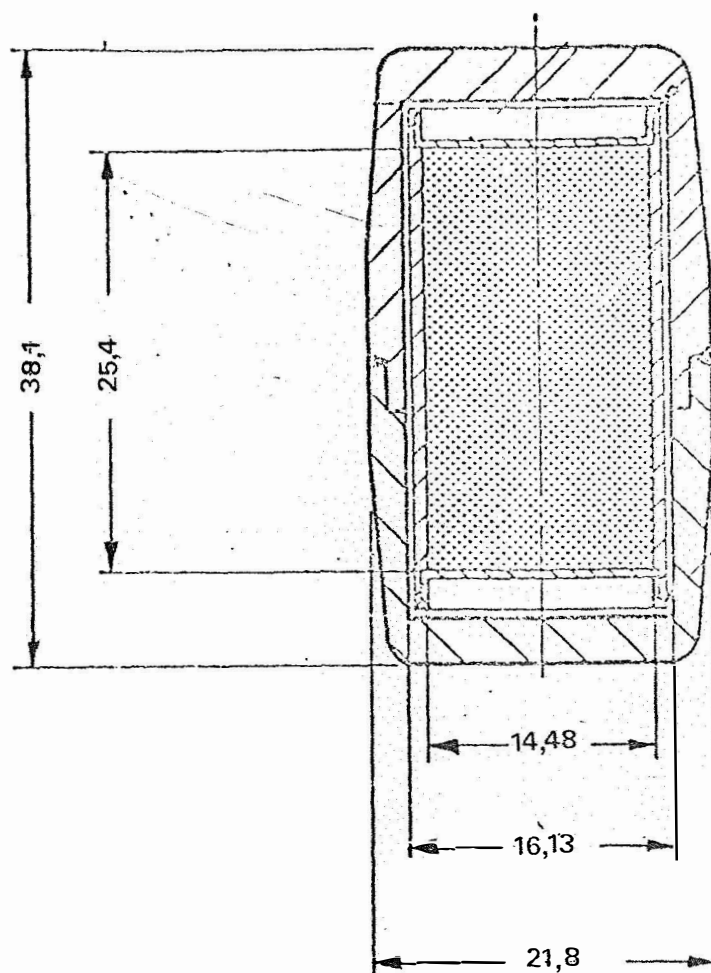


Figura 9 - Esquema da cápsula de ^{60}Co - 316 L (dimensões em milímetros).

4.3. Geometrias

Para a calibração do irradiador, sete geometrias foram escolhidas, sendo uma para o levantamento dosimétrico panorâmico e seis para a cavidade interna. Essas são definidas da seguinte forma:

a) Dosimetria panorâmica:

Geometria I - Abertura de 10 cm no diâmetro entre tubos, com os 12 tubos ativos (Figura 10).

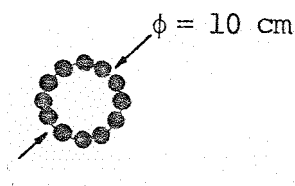


Figura 10 - Corte transversal da Geometria I.

b) Dosimetria da cavidade interna:

Geometria II - Abertura de 84 cm no diâmetro entre tubos, com 12 tubos ativos.

Geometria III - Abertura de 84 cm no diâmetro entre tubos, com 6 tubos ativos.

Geometria IV - Abertura de 84 cm no diâmetro entre tubos, com 3 tubos ativos.

Geometria V - Abertura de 42 cm no diâmetro entre tubos, com 12 tubos ativos.

Geometria VI - Abertura de 42 cm no diâmetro entre tubos, com 6 tubos ativos.

Geometria VII - Abertura de 42 cm no diâmetro entre tubos, com 3 tubos ativos.

Os tubos ativos utilizados foram os mesmos para as duas aberturas (Figura 11).

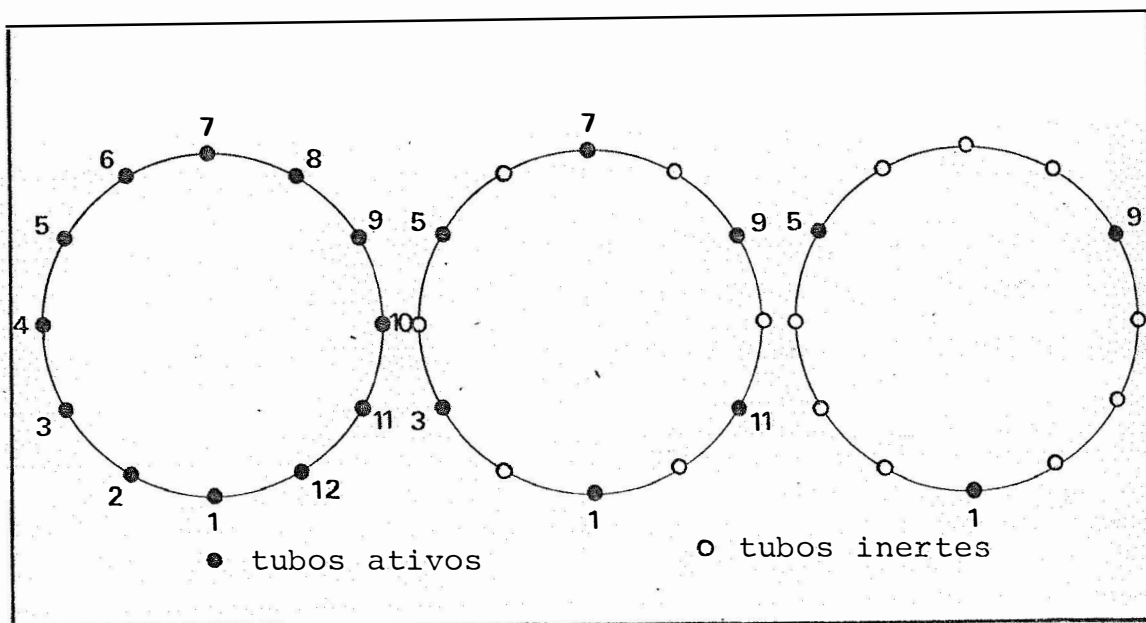


Figura 11 - Corte transversal de três geometrias para uma das aberturas em função do número de tubos ativos utilizados na cavidade interna.

4.4. Método Experimental para obtenção das Taxas de Exposição

4.4.1. Método de Medida

Para as determinações experimentais das taxas de exposição foi utilizado o dosímetro de *Fricke* (*FRICKE e MORSE, 1927*).

4.4.2. Preparo da solução Dosimétrica e Irradiação

A solução dosimétrica foi preparada dissolvendo-se 2 g de sulfato ferroso amoniacal $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ em um balão volumétrico de 5 l, contendo inicialmente uma solução aquosa de 0,3 g de cloreto de sódio e 110 ml de ácido sulfúrico a 92 - 98% de pureza. Depois de completado o volume, a solução foi transportada para frasco escuro, ficando sob aeração por mais de 12 h a temperatura ambiente (*PETTERSON e HETTINGER, 1967; OLLER et alii, 1969*).

Foram utilizadas para as irradiações, ampolas de vidro com 5 cm de altura e 1,4 cm de diâmetro, contendo 5 ml da solução dosimétrica (*DRAGANIC et alii, 1961*). Nas irradiações panorâmicas os dosímetros foram amarrados em fio de nylon, enquanto que nas geometrias da cavidade interna, foram utilizadas placas de isopor devidamente marcadas. Os tempos de exposições dos dosímetros foram diferentes em cada irradiação, de

tal forma que a dose absorvida caísse dentro do intervalo de 10 a 30 KR, a fim de obter maior precisão na leitura espectrofotométrica dos íons fêrricos.

4.4.3. Medições dos Íons Fêrricos

Após as irradiações os dosímetros foram conduzidos ao laboratório com temperatura controlada onde as medições de absorbâncias em 304 nm eram realizadas. Foi empregado nesta medição, um espectrofotômetro Beckman-25 conectado a um registrador Beckman 24-25 AA, e duas cubetas de quartzo de 1 cm de largura.

4.4.4. Disposição dos dosímetros

Foram selecionados para a dosimetria nas sete geometrias, cinco planos horizontais, A_{50} , $\underline{0}$, B_{50} , B_{100} e B_{150} panorâmicos e A_{16} , A_8 , $\underline{0}$, B_8 e B_{16} para a cavidade interna. O plano $\underline{0}$ corresponde em ambos os casos ao plano horizontal a uma altura de 32 cm da plataforma de irradiação, passando pela posição média das fontes. Os planos A_{50} , A_{16} e A_8 , correspondem aos planos paralelos e superiores ao $\underline{0}$, às distâncias de 50, 16, e 8 cm respectivamente. Igualmente, B_{50} , B_{100} , B_{150} , B_8 e B_{16} são planos paralelos e inferiores ao $\underline{0}$ correspondentes às distâncias 50, 100, 150, 16 e 8 cm, como pode ser visto na Figura 12.

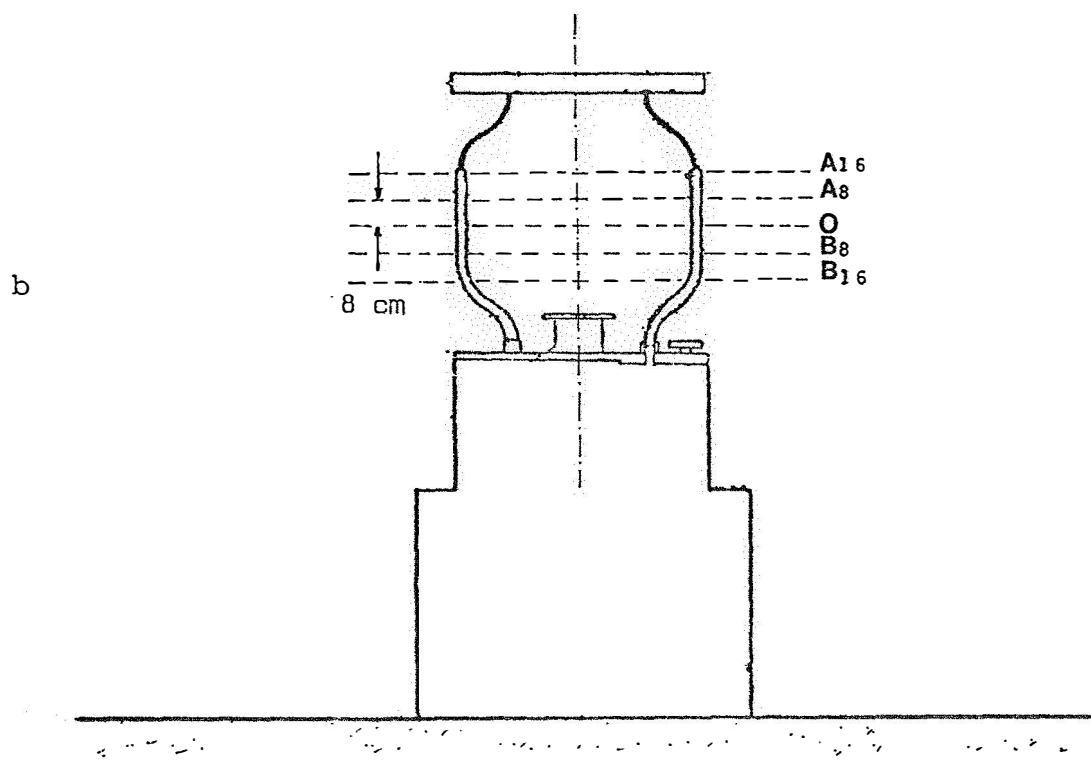
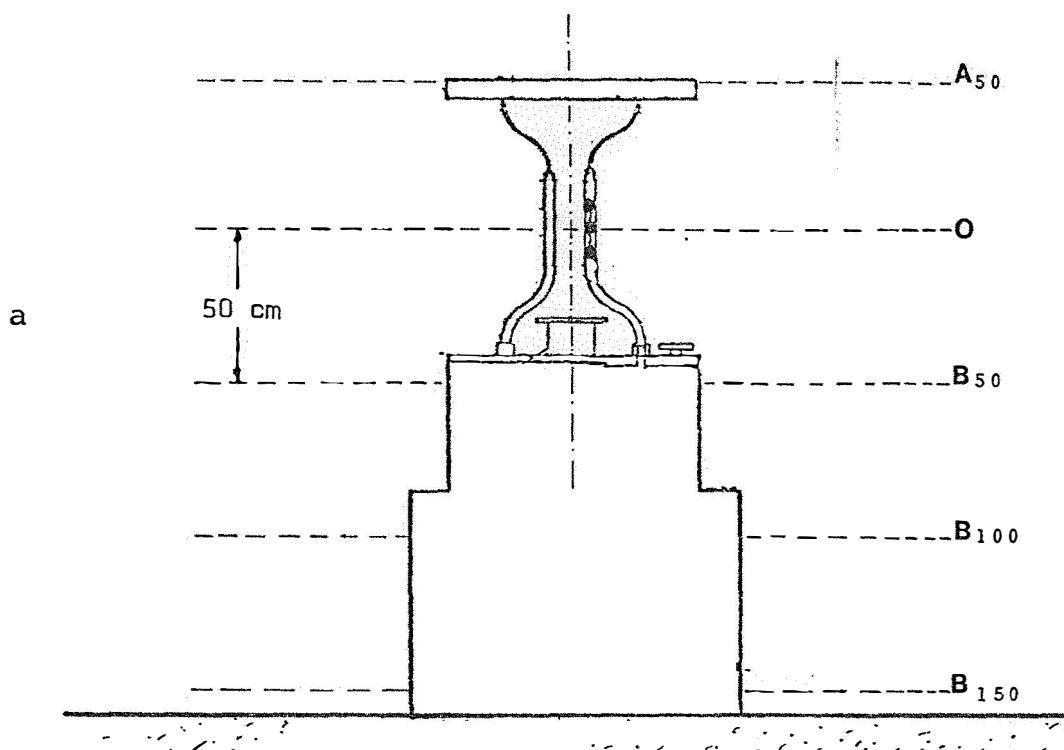


Figura 12 - a) Disposição dos cinco planos horizontais panorâmicos; b) 5 planos horizontais dentro da cavidade.

Para cada plano horizontal panorâmico as taxas de exposição foram medidas a partir do eixo central do irradiador a 50, 100, 150, 200 e 250 cm nas três direções O, N e L, e até 300 cm na direção S como mostra a Figura 13 a. Na cavidade interna para as três geometrias (II, III e IV), os dosímetros foram irradiados em oito direções nas distâncias de 9, 16, 23, 30, 37 e 42 cm a partir do círculo formado pelos tubos em direção ao eixo central do irradiador. Nas geometrias V, VI e VII nas distâncias de 5, 9, 13, 17 e 21 cm também a partir do círculo formado pelos tubos (Figura 13 b). Nas sete geometrias foi tomado como referência a direção S sempre na linha do tubo ativo número 1.

Três repetições das doses de exposição foram de terminadas para cada ponto nas sete geometrias.

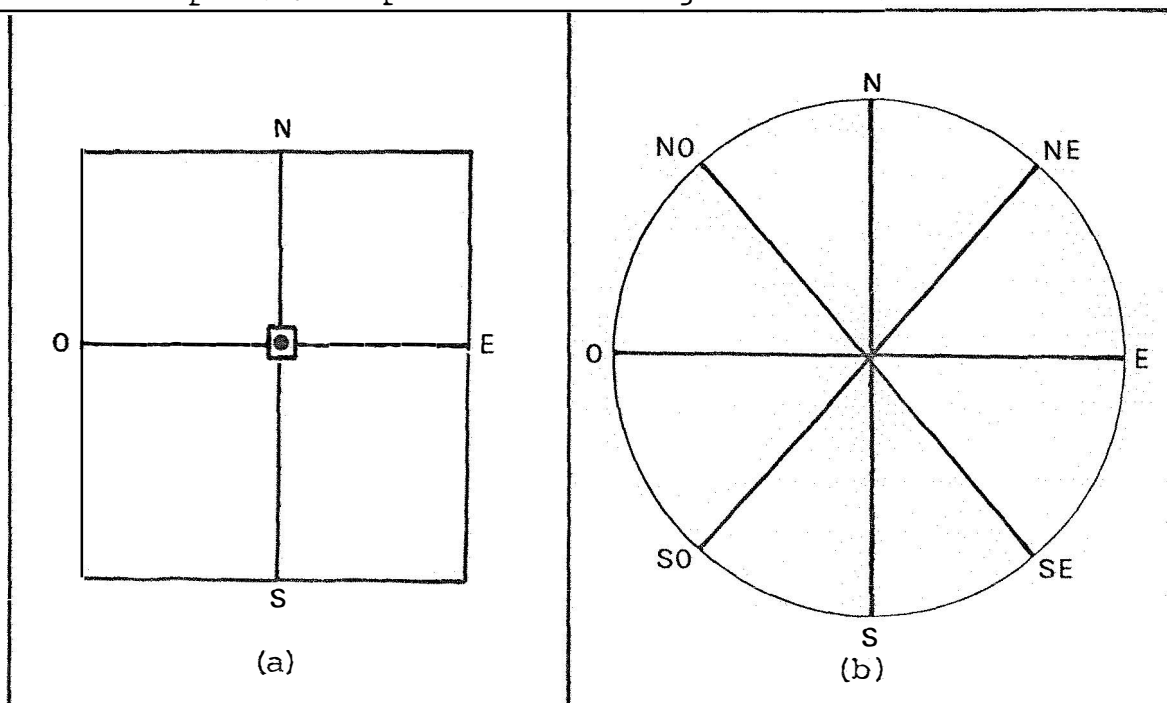


Figura 13 - Esquema das direções onde os dosímetros foram irradiados. (a) Panorâmicas; (b) Cavidade interna.

4.4.5. Cálculo das Taxas de Exposição

A dose absorvida D_A em eV/litro no dosímetro de *Fricke* de acordo com a equação (29) é:

$$D_A = \frac{n}{G(Fe^{3+})} \cdot 100 \dots \dots \dots (41)$$

onde n , $G(Fe^{3+})$ tem mesmos significados anteriores da equação (29). Expressando o número de íons férricos formados em mol/litro, a equação (41) torna-se:

$$D_A = \frac{6,02 \cdot 10^{25} C}{G(Fe^{3+})} \dots \dots \dots (42)$$

onde C é a concentração de íons férricos.

O valor de C é determinado através de espectrofotometria utilizando-se a lei de Beer (*EWING, 1972*) da atenuação da radiação eletromagnética:

$$I = I_0 \cdot e^{-K \cdot b \cdot C} \dots \dots \dots (43)$$

onde:

- I = intensidade do feixe de luz emergente
- I_0 = intensidade do feixe de luz imergente
- K = fator de proporcionalidade ($mol^{-1} \cdot litro^{-1} \cdot cm^{-1}$)
- b = espessura da solução na cubeta (cm)
- C = concentração do soluto Fe^{3+} na solução (mol/litro)

Passando I_0 para o lado esquerdo e aplicando-se a função logarítmica a ambos os lados da equação (44), tem-se:

$$\text{Log } \frac{I_0}{I} = k.b.c. \text{ Log } e \dots\dots\dots (44)$$

Definindo-se $k.\text{Log } e$ como absortividade a em $M^{-1}cm^{-1}$ e $\text{Log } \frac{I_0}{I} = A$, onde A = absorbância do íon férrico, tem-se:

$$A = a.b.C \dots\dots\dots (45)$$

ou ainda:

$$C = \frac{A}{a.b} \dots\dots\dots (46)$$

Devido a oxidação espontânea do íon ferroso, a concentração do íon férrico é obtido pela diferença entre a absorbância da solução dosimétrica irradiada e solução controle. Essa diferença é representada por ΔA , e desse modo a equação (46) pode ser representada por:

$$C = \frac{\Delta A}{a.b} \dots\dots\dots (47)$$

Sabendo-se que $1 \text{ eV} = 1,6.10^{-12} \text{ ergs}$, $100 \text{ erg/g} = 1 \text{ rad}$, $1 \text{ l} = 10^3 \text{ ml}$, e simbolizando a densidade da solução dosimétrica por ρ , em g/cm^3 , e substituindo-se a equação (47) em (42), tem-se que a dose absorvida expressa em rad é dada por:

$$D_A = \frac{9,644 \cdot 10^8 \cdot \Delta A}{\rho \cdot b \cdot G(\text{Fe}^{3+}) \cdot a(\text{Fe}^{3+})} \dots \dots \dots (48)$$

Substituindo na equação (48) os valores $\rho = 1,024 \text{ g/cm}^3$, $G(\text{Fe}^{3+}) = 15,6 \text{ íons/100 eV}$ (VARESHCHINSKII e PIKAEV, 1964) e $a(\text{Fe}^{3+}) = 2197 \text{ M}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ (SCHARF e LEE, 1962) para as determinações medidas a 304 nm, tem-se a dose absorvida em função simplesmente da absorbância da solução irradiada e não irradiada (controle):

$$D_A = 2,748 \cdot 10^4 \Delta A \dots \dots \dots (49)$$

A equação (49) pode ser expressa ainda em taxa de dose de absorção ($\frac{\Delta D_A}{\Delta t}$) em rad/h, dividindo-se a dose absorvida pelo tempo de irradiação do dosímetro:

$$\frac{\Delta D_A}{\Delta t} = 2,748 \cdot \frac{10^4}{t} \Delta A \dots \dots \dots (50)$$

A relação entre taxa de dose absorvida ($\frac{\Delta D_A}{\Delta t}$) em rad/h num meio e a taxa de exposição ($\frac{\Delta X}{\Delta t}$) em R/h é dada por:

$$\left(\frac{\Delta D_A}{\Delta t}\right) = 0,877 \cdot \frac{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_s}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{ar}}} \cdot \left(\frac{\Delta X}{\Delta t}\right) \dots \dots \dots (51)$$

onde $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{ar}}$ é o coeficiente de absorção de massa do ar ($0,0266 \text{ cm}^2/\text{g}$) e $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_s$ é o coeficiente de absorção de massa da solução ($0,0296 \text{ cm}^2/\text{g}$) para os fótons de 1,25 MeV do ^{60}Co (RAB MOLLA et alii, 1969).

Comparando as equações (51) e (50), tem-se finalmente que a taxa de exposição em R/h é também uma função da diferença entre a absorvência das soluções dosimétricas irradiada e não irradiada e do tempo de irradiação.

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{2,816 \cdot 10^4 \Delta A}{t} \dots \dots \dots (52)$$

4.5. Derivações Teóricas para o Cálculo de Taxas de Exposição

4.5.1. Emissão Específica de Raios Gama do ⁶⁰Co

A emissão específica de raios gama em R.h⁻¹.Ci⁻¹.m² para qualquer radioisótopo é definido por:

$$\Gamma = 1,5 \cdot 10^5 \cdot \mu_a E_\gamma P_\gamma \dots \dots \dots (53)$$

onde μ_a é o coeficiente de absorção linear do ar em cm⁻¹; E_γ é a energia da radiação gama em MeV; P_γ é a abundância de emissão do raio gama.

Porém, se o radioisótopo não emitir apenas uma radiação gama por desintegração, a aplicação da equação (53) não é imediata. O valor da emissão específica Γ do radioisótopo é encontrada através de uma somatória dos valores parciais de Γ_i para cada raio gama i obtidos de acordo com a equação (53).

$$\Gamma = \sum_{i=1}^n \Gamma_i = 1,5 \cdot 10^5 \cdot \sum_{i=1}^n (\mu_a E_{\gamma} P_{\gamma})_i \dots \dots \dots (54)$$

O radioisótopo ^{60}Co , tendo um esquema de desintegração como mostra a Figura 14, está de acordo com o segundo caso, pois duas radiações como são emitidas; γ_1 com energia de 1,17 MeV e γ_2 com 1,33 MeV nas abundâncias de 99,8 e 100%, respectivamente. Utilizando os valores dos coeficientes da absorção linear $\mu_1 = 3,2 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ e $\mu_2 = 3,07 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ para as energias 1,17 MeV e 1,33 MeV (RAB MOLLA et alii, 1969), respectivamente, a emissão específica é então calculado como sendo $1,25 \text{ R} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{Ci}^{-1} \cdot \text{m}^2$.

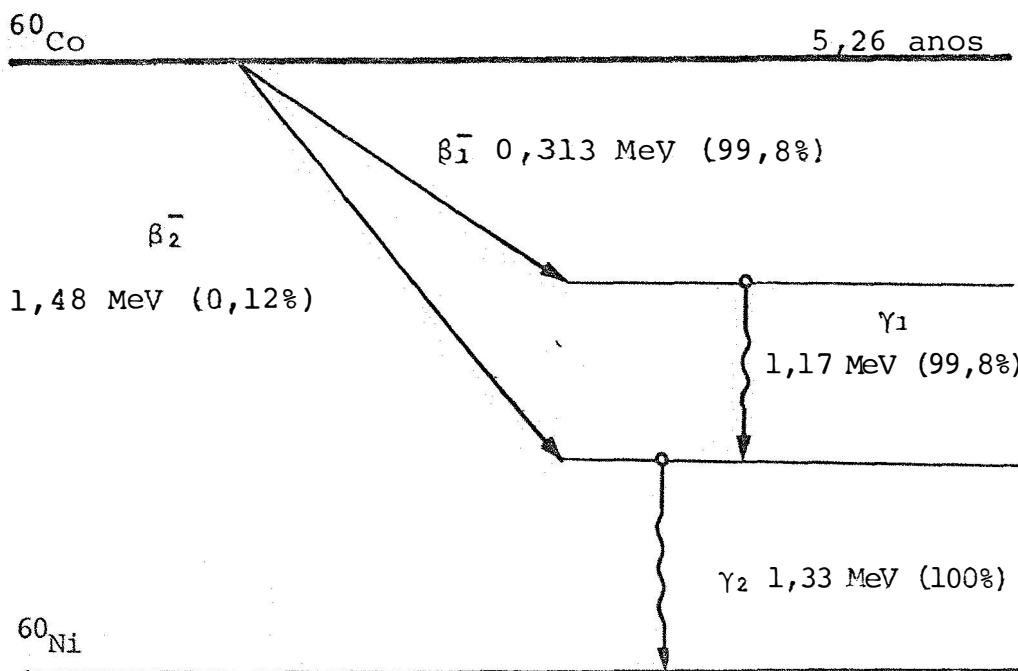


Figura 14 - Esquema de desintegração do ^{60}Co (extraído de DILLMAN, 1969).

4.5.2. Cálculo de Taxas de Exposição Panorâmicas

Para a geometria I (item 4.3.a), as taxas de exposição foram calculadas através de três modelos matemáticos:

a) Modelo I - Distribuição linear

Neste caso foi admitido uma distribuição uniforme da atividade ao longo de uma linha de comprimento a . A taxa de exposição em R/h para qualquer ponto P (Figura 15) é determinada pela integração do comprimento a de acordo com a equação (39), resultando em:

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \int_{x=0}^{x=a} \frac{\Gamma A}{ar^2} dx \dots\dots\dots (55)$$

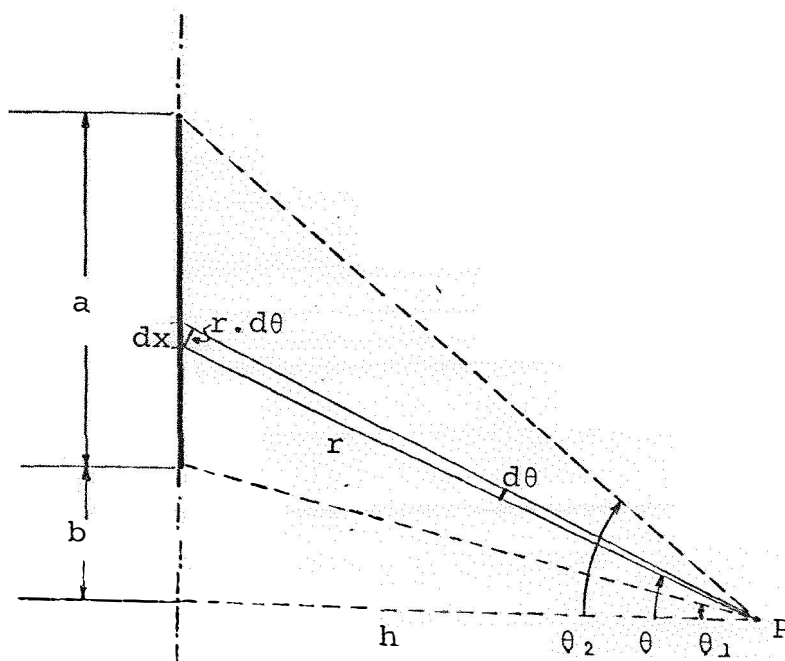


Figura 15 - Esquema para o cálculo de taxas de exposição em um ponto P assumindo o modelo I - Fonte linear.

Sendo h distância perpendicular do ponto P à linha das fontes, tem-se então que:

$$dx = \frac{rd\theta}{\cos \theta} \dots \dots \dots (56)$$

$$r = \frac{h}{\cos \theta} \dots \dots \dots (57)$$

Substituindo as equações (56) e (57) em (55), tem-se:

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{\Gamma.A.d\theta}{ah} \dots \dots \dots (58)$$

como $\frac{\Gamma.A}{ah}$ não depende do ângulo θ , a integração da equação (58) é dada por:

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{\Gamma.A}{ah} (\theta_2 - \theta_1) \dots \dots \dots (59)$$

O valor da emissão específica para os raios gamma foi tomado como $1,25 \text{ R.h}^{-1}.\text{Ci}^{-1}.\text{m}^2$ (item 4.4.1.) e sendo a atividade 29080 Ci em 1º de abril de 1974, o valor do produto $\Gamma.A.$ é igual a $3,635.10^4 \text{ R.h}^{-1}.\text{m}^2$. Substituindo este valor na equação anterior, tem-se:

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{3,635.10^4}{a.h} (\theta_2 - \theta_1) \dots \dots \dots (60)$$

Dependendo do comprimento b em relação a a tem-se

os seguintes casos particulares para a equação (60):

a) b fora de a.

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{3,635 \cdot 10^4}{ah} \left[\arctan \left(\frac{a+b}{h} \right) + \arctan \left(\frac{b}{h} \right) \right] \dots (61)$$

b) b dentro de a.

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{3,635 \cdot 10^4}{ah} \left[\arctan \left(\frac{a-b}{h} \right) + \arctan \left(\frac{b}{h} \right) \right] \dots (62)$$

c) $b = \frac{a}{2}$, dentro de a.

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{3,635 \cdot 10^4}{ah} \left[2 \arctan \left(\frac{a}{2h} \right) \right] \dots (63)$$

d) $b = 0$

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{3,635 \cdot 10^4}{ah} \left[\arctan \left(\frac{a}{2h} \right) \right] \dots (64)$$

2) Modelo II - Três fontes pontuais discretas.

Admitindo-se três fontes pontuais equidistantes (d = 9 cm) com atividades iguais conforme mostra a Figura 16, a taxa de exposição, para qualquer ponto P, é dada de acordo com a equação (37) por:

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{\Gamma \cdot A}{3} \left(\frac{1}{r_1^2} + \frac{1}{r_2^2} + \frac{1}{r_3^2} \right) \dots (65)$$

onde r_1 , r_2 e r_3 são as distâncias entre o ponto considerado a cada uma das três fontes pontuais. Expressando as distâncias r_1 da equação (65) em função de h e b , e substituindo o valor de $\Gamma.A$, como foi visto anteriormente de $3,635.10^4 \text{ R.h}^{-1}.\text{m}^2$, tem-se:

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{3,635.10^4}{3} \left[\frac{1}{h^2 + (b+d)^2} + \frac{1}{h^2 + b^2} + \frac{1}{h^2 + (b-d)^2} \right] \dots (66)$$

Para o caso particular em que P está contido no plano horizontal que passa pelo ponto médio das três fontes ($b = 0$), r_2 e r_3 são simétricas e a equação (65) se transforma em:

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\Gamma.A}{r_2} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\Gamma.A}{r_2 + d^2} \dots (67)$$

ou, de outro modo, em:

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\Gamma.A}{r_2} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\Gamma.A}{r_2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{d^2}{r_2^2}} \dots (68)$$

O termo $(1 + \frac{d^2}{r_2^2})^{-1}$ pode ser expandido em série binomial do tipo (SPIEGEL, 1971):

$$(1 + x)^P = 1 + px + p \left(\frac{p-1}{2!} \right) x^2 + \dots + p(p-1) \frac{\dots (p-n+1)}{n!} x^n \dots (69)$$

Fazendo-se $\frac{d^2}{r_2^2} = x$ e desenvolvendo-se a série de acordo com a equação (69), tem-se:

$$\left(1 + \frac{d^2}{r_2^2}\right)^{-1} = 1 - \frac{d^2}{r_2^2} + \left(\frac{d^2}{r_2^2}\right)^2 \dots \dots \dots (70)$$

Como para $r \gg d$, o termo $\left(\frac{d^2}{r_2^2}\right)^2$ é desprezado e

e sendo $\Gamma.A = 3,635 \cdot 10^4 \text{ R.h}^{-1} \cdot \text{m}^2$, tem-se:

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{1}{3} \cdot \frac{3,635 \cdot 10^4}{\Gamma_2^2} + \frac{2}{3} \cdot \frac{3,635 \cdot 10^4}{3 r_2^2} \cdot \left(1 - \frac{d^2}{r_2^2}\right) \dots \dots (71)$$

3) Modelo III - Fonte pontual.

Para uma fonte pontual, a taxa de exposição para um ponto P qualquer, como mostra a Figura 17, pode ser calculado de acordo com a equação (38) por:

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{\Gamma.A}{h^2 + b^2} \dots \dots \dots (72)$$

Substituindo o valor de $\Gamma.A = 3,635 \cdot 10^4 \cdot \text{R.h}^{-1} \cdot \text{m}^2$ na equação (72), a taxa de exposição é obtida por:

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} = \frac{\Gamma \cdot A}{h^2 + b^2} \dots \dots \dots (73)$$

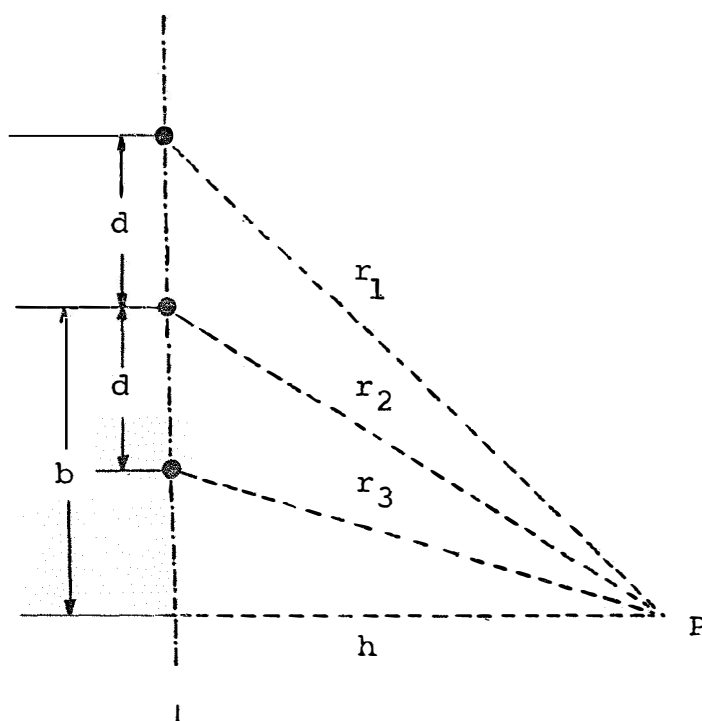


Figura 16 - Esquema para o cálculo de taxa de exposição num ponto P , assumindo o modelo II - três fontes pontuais.

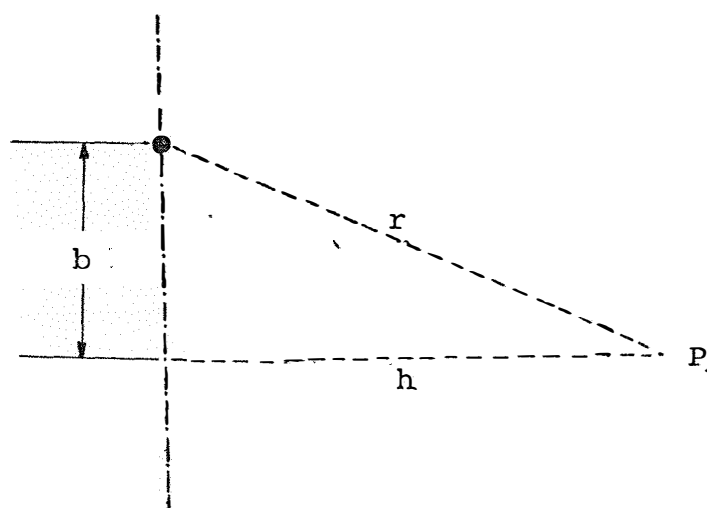


Figura 17 - Esquema para o cálculo da taxa de exposição em um ponto P , assumindo o modelo III - fonte pontual.

4.5.3. Cálculos das Taxas de Exposição na Cavidade Interna

Para as seis geometrias na cavidade (Ítem 4.3.b), as taxas de exposição experimentais foram ajustadas em dois modelos de regressão através do método de seleção de variáveis ("stepwise" ou regressão passo a passo, *RALSTON e WILF, 1960*), utilizando-se um computador eletrônico IBM-1130.

Modelo I:

$$D = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{r^2} + \beta_2 \left(\frac{1}{r^2}\right)^2 + \dots + \beta_5 \left(\frac{1}{r^2}\right)^5 \dots \dots (74)$$

Modelo II:

$$D = \beta_0 + \beta_1 r + \beta_2 r^2 + \dots + \beta_5 r^5 \dots \dots \dots (75)$$

onde D é a taxa de exposição em KR/h; $\beta_1, \beta_2, \beta_3 \dots \beta_5$ são parâmetros de regressão e r = distância em cm.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Metodologia

5.1.1. Escolha de Geometria

As geometrias citadas no item 4.4 foram previamente escolhidas para a dosimetria do irradiador devido a sua maior utilização prática e pelo fato de abranger um amplo intervalo de taxas de exposição, 1 KR/h a 1MR/h. Além desses fatores, foi levado em consideração que a partir dos resultados, seria possível obter outras informações. Assim, para irradiações panorâmicas a geometria com abertura de 10 cm de diâmetro e 12 tubos ativos foi a escolhida (item 4.4.a) com o propósito de uma vez determinadas as curvas de isodoses, as outras geometrias correspondentes à mesma abertura estariam solucionadas. Para

irradiações na cavidade interna foram escolhidas as geometrias com três variações quanto ao número de tubos ativos, com a finalidade de verificar a diferença de uniformidade das taxas de exposição dentro da cavidade interna quando tais combinações forem utilizadas.

5.1.2. Escolha do dosímetro

A princípio, para as determinações experimentais das taxas de exposição, pensou-se em utilizar o dosímetro azul de metileno que aparentemente serviria, pois apresenta algumas características de um bom dosímetro tais como largo intervalo de dose de absorção, facilidade de preparação e um método simples de medida (*FRICKE e HART, 1966*). Vários ensaios foram realizados com este dosímetro e finalmente a idéia foi abandonada pelos seguintes motivos:

- a) pouco reprodutível,
- b) instável na presença de luz,
- c) impreciso na medição espectrofotométrica.

DAVIDSON et alii (1953), na calibração de um irradiador, utilizaram alguns dosímetros químicos, dentre os quais o azul de metileno, e observaram os mesmos efeitos.

Posteriormente, depois de estudar vários dosímetros químicos, optou-se pelo dosímetro sulfato ferroso, o qual apresenta todas as características de um bom dosímetro:

preciso (FRICKE e HART, 1966), reprodutível (OLLER *et alii*, 1969), estável antes e após as irradiações (HUFFMAN e DAVIDSON, 1956; PETERSON e HETTINGER, 1967), método de medida preciso e simples (HARDWICK, 1952), além de ser em largo intervalo independente da dose (ANTA, 1961; WEISS, 1952), taxa de dose (DRAGANIC *et alii*, 1961; SCHULER e ALLEN, 1956), tipo e energia das radiações (COMARK *et alii*, 1954), temperatura de irradiação (HOCHANADEL e GHORMLEY, 1962; SHALEK *et alii*, 1962) e das concentrações dos reagentes (MILLER, 1953; WEISS, 1952, DEWHURST, 1953; SCHULLER e ALLEN, 1956). Além dessas características, seu uso constante nas dosimetrias de radiações ionizantes (FOLDIAT *et alii*, 1973; RITZ e ATTIX, 1966; RÓZEM e DVONIK, 1973; OSVAY *et alii*, 1975; ANTA, 1961; SVENSSON e PETERSON, 1967; DRAGANIC *et alii*, 1961, e outros) tornou-o universalmente aceito como o melhor dosímetro para medições de doses.

OLLER *et alii* (1969) realizaram um estudo comparativo entre vários dosímetros químicos e físicos, concluindo que o dosímetro de Fricke é o único dosímetro químico que pode ser utilizado em medição de dose sem padronização prévia.

5.1.3. Modelos Matemáticos para Cálculo das Taxas de Exposição

No início do trabalho, sérias dificuldades foram encontradas no conhecimento real da distribuição das fontes no irradiador. De acordo com o manual de instruções de ope

ração (*ATOMIC ENERGY OF CANADA LIMITED, 1970*), o irradiador deveria conter cinco cápsulas de ^{60}Co em cada tubo expositor, e na posição de exposição, a posição média das cinco cápsulas estaria a uma altura de 32,5 cm a partir da plataforma de irradiação. Medidas iniciais de taxa de exposição, próximas aos tubos expositores deram resultados muito diferentes com relação ao teoricamente esperado e então foi colocado em dúvida o número e a posição média das cápsulas nos tubos expositores descritos pelo manual de instrução do irradiador.

A fim de verificar a distribuição real das fontes, a primeira tentativa foi realizada colocando-se dosímetros de *Fricke* perpendiculares ao tubo de exposição, a uma distância de 2 cm. Foram realizadas três repetições para cada tubo expositor e um resultado surpreendente de três máximos de taxas de exposição foi observado ao longo do tubo expositor, dando-nos indicação de que o número de fontes citado no manual de instrução não correspondia à realidade. Para ter realmente certeza, de que cada tubo expositor contém três fontes separadas possivelmente por cápsulas inertes, e que a posição média dessas fontes de irradiação não era precisamente de 32,5 cm da plataforma de irradiação foi utilizado um antigo método de dosimetria - o vidro. Quando este é exposto a radiações ionizantes sofre uma transformação na cor e a intensidade é proporcional à dose recebida. Assim uma placa retangular de vidro foi colocada junto à dois tubos expositores e foi irradiada durante dez minutos, de tal forma que pode-se distinguir diferenças

no enegrecimento do vidro. O resultado foi idêntico ao primeiro, destacando-se três manchas escuras no vidro para cada tubo de exposição, dando-nos a certeza da existência de três fontes por tubo e que a altura média dessas fontes é 32 cm, a partir da plataforma de irradiação (Figura 18).

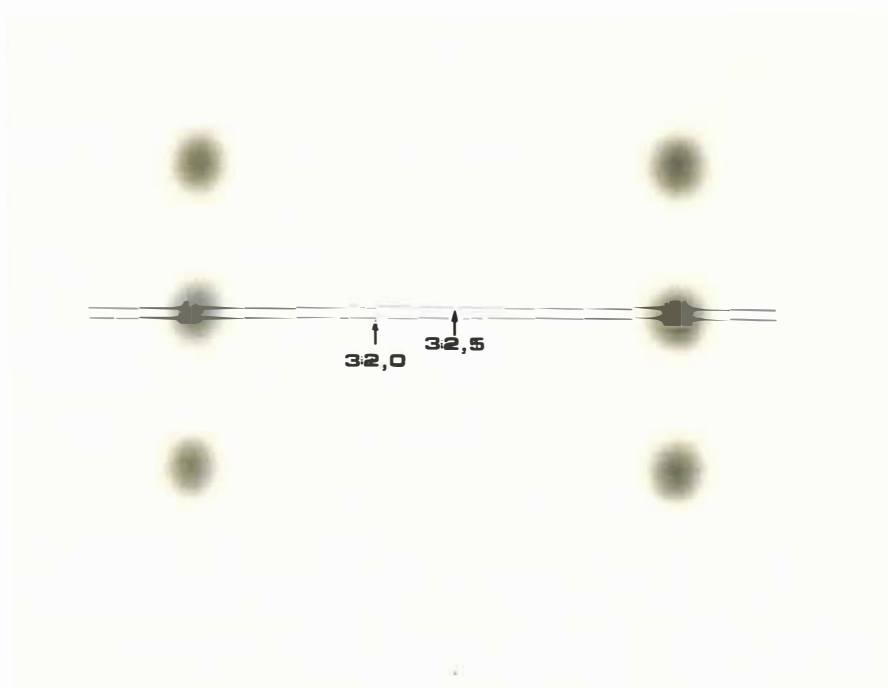


Figura 18 - Número de cápsulas por tubo expositor e a posição real nas irradiações (dimensões em cm).

Para os cálculos de taxas de exposição é também necessário conhecer a construção da cápsula de ^{60}Co , tipo 316J, citada no manual de instrução do irradiador. Foram consultadas várias revistas especializadas de fontes radioativas de alta atividade, sem obter qualquer informação. Posteriormente, atra

vês de informações obtidas diretamente da firma construtora de irradiador, foi conseguido o esquema da cápsula 316L e mais a confirmação de que realmente o número total de fontes era de 36 cápsulas, enquanto que a altura média das fontes permanecia aquela dada pelo manual de instrução.

Assim, na geometria I (irradiações panorâmicas), as fontes estão muito próximas umas das outras, formando no conjunto três anéis discretos superpostos, com raio de 5 cm, distante de 3,8 cm entre si e contendo 12 fontes. De acordo com esta distribuição, para o cálculo das taxas de exposição o mais correto seria utilizar a equação (37) (*HINE e BROWNELL, 1956*), mas dependendo do ponto de interesse, seria elevado o número de termos que apareceriam na equação, tornando inconveniente a sua utilização prática. Considerando que esta geometria I é utilizada para irradiações em grandes distâncias quando comparadas com as dimensões do conjunto de fontes, levantou-se a hipótese de três outros modelos mais simples e de uso imediato.

Uma aproximação mais lógica, seria considerar que toda atividade contida no anel de 12 fontes se localiza em um ponto e desse modo tem-se então um modelo teórico de três fontes pontuais. De utilização mais prática ainda, seria o modelo pontual onde toda a atividade nos três anéis (36 fontes) estivessem contidas num único ponto (modelo fonte pontual). Pode-se pensar ainda na hipótese que a atividade das fontes nos 12 tu

bos expositores estivessem contidas em um único tubo e uniformemente distribuída ao longo de uma linha.

Para os cálculos das taxas de exposição dentro da cavidade, nas geometrias II a VII, o mais correto seria também utilizar a equação (37), porém sua utilização seria inconveniente pelo mesmo motivo considerado anteriormente. Uma tentativa de aproximação da distribuição real de fontes, como na geometria I, foi impossível, pois para os pontos dentro da cavidade as distâncias entre o ponto de interesse e as fontes são comparáveis com as entre fontes. Desse modo, procurou-se ajustar equações polinomiais aos dados experimentais com intuito de correlacionar taxas de exposição em função da distância nas diferentes direções.

5.1.4. Fatores de Correção

Antes da apresentação dos resultados teóricos e experimentais é importante esclarecer que alguns fatores foram aplicados nos dois métodos de determinação das taxas de exposição, fatores estes semelhantes aos empregados em diversos trabalhos de mesma natureza por *RAB MOLLA et alii* (1966), *BURLIN e CHAN* (1971), *RITZ e ATTIX* (1966) e *RÁZEM e DVORNIK* (1973).

Para as taxas de exposição calculadas de acordo com as equações (61) e (63) para o modelo I - fonte linear,

(65) para o modelo II - três fontes pontuais discretas, e (73) para o modelo III - fonte pontual, os fatores utilizados foram os seguintes:

a) um fator de correção de 0,6662 foi para descontar o decaimento radioativo ocorrido no período de 1º de abril de 1974 a 1º de maio de 1977 (37 meses).

b) fator de correção devido à absorção das radiações gama quando atravessam a blindagem das cápsulas e tubo expositor, num total de 0,7 cm de espessura de ferro. Para a distribuição linear a espessura de blindagem da cápsula pode ser maior que 0,7 cm, dependendo do ângulo θ entre a fonte e o ponto de interesse (Figura 15), e uma expressão para a espessura efetiva é:

$$0,7 \sec \theta \dots\dots\dots(74)$$

enquanto que a absorção é dada por:

$$e^{-0,7 \mu \cdot \sec \theta} \dots\dots\dots(75)$$

onde $\mu = 0,4 \text{ cm}^{-1}$ é o coeficiente de absorção linear do Fe para o ^{60}Co (CHAPPEL, 1954).

De acordo ainda com a Figura (15) tem-se:

$$\sec \theta = \sqrt{1 + \frac{b^2}{h^2}} \dots\dots\dots(76)$$

Substituindo a equação (76) na equação (75), vem então que o fator de correção devido à absorção pode ser escri

to como:

$$e^{-0,28 \sqrt{1 + b^2/h^2}} \dots\dots\dots (77)$$

Assim, o fator de correção total utilizado no cálculo teórico da taxa de exposição no modelo I (fonte linear) foi:

$$0,6662 \cdot e^{-0,28 \sqrt{1 + b^2/h^2}} \dots\dots\dots (78)$$

e para os demais modelos, três fontes pontuais (Modelo II) e fonte pontual (Modelo III), foi utilizado o fator

$$0,6662 \cdot e^{-0,28} \dots\dots\dots (79)$$

assumindo que a espessura da cápsula é a mesma em todas as direções em torno das fontes pontuais.

Nas determinações experimentais de taxas de exposição obtidas de acordo com a equação (52) foram feitas as seguintes correções:

a) um fator de correção para a temperatura, dado por:

$$\frac{1}{[1 - 0,007 (t - 25\text{°C})]}$$

onde t é a temperatura da sala na qual foram realizadas as medas da absorbância do íon férrico. Esse fator é devido à variação de 0,7% por °C no valor da absortividade do íon férrico

medida à 25 °C em 304 nm (HOLM *et alii*, 1961; SCHARFF e LEE, 1962; HANDERSON e MILLER, 1960).

b) um fator de correção para o decaimento radioativo, devido a duração das determinações experimentais. As taxas de exposições medidas experimentalmente em diferentes épocas, foram convertidas para um único dia de exposição, 1º de maio de 1977, também utilizado nos cálculos teóricos.

Com relação ao tempo de subida e descida das cápsulas radioativas, aproximadamente 4 segundos, não foi necessário efetuar correções, pois os tempos de exposições foram consideravelmente superiores.

5.2. Taxas de Exposição Panorâmicas (Geometria I)

5.2.1. Teóricas e Experimentais

As tabelas 1 a 5 mostram as taxas obtidas experimentalmente (médias das três repetições), e as calculadas através dos três modelos (item 4.5.2), para as quatro direções nos cinco planos horizontais.

Tabela 1 - Taxas de exposição experimentais nas quatro direções, e as calculadas pelo modelos I, II e III no plano O , em função da distância na irradiação panorâmica (Geometria I).

Distância (cm)	Taxas de exposição (KR/h)							
	Observadas nas direções				Calculadas pelos modelos			
	S	O	N	E	I	II	III	
50	70,1	70,2	70,1	69,9	69,5	71,2	72,7	
100	17,9	17,5	17,8	17,6	17,9	18,0	18,1	
150	8,1	8,0	8,0	7,9	8,0	8,0	8,0	
200	4,9	4,7	4,8	4,5	4,5	4,5	4,5	
250	3,0	3,1	3,1	3,1	2,9	2,9	2,9	
300	2,2	-	-	-	2,0	2,0	2,0	

Tabela 2 - Taxas de exposição experimentais nas quatro direções, e as calculadas pelo modelos I, II e III no plano A₅₀, em função da distância na irradiação panorâmica

Distância (cm)	Taxas de exposição (KR/h)							
	Observadas nas direções				Calculadas pelos modelos			
	S	O	N	E	I	II	III	
50	31,8	31,7	32,6	29,8	33,3	32,7	36,3	
100	14,5	14,6	14,3	14,2	14,1	14,5	14,5	
150	7,4	7,5	7,2	7,2	7,1	7,2	7,2	
200	4,4	4,3	4,6	4,2	4,2	4,2	4,2	
250	3,1	2,9	2,8	2,8	2,7	2,7	2,7	
300	2,2	-	-	-	1,9	1,9	1,9	

Tabela 3 - Taxas de exposição experimentais nas quatro direções, e as calculadas pelos modelos I, II e III no plano B_{50} , em função da distância na irradiação panorâmica (Geometria I).

Distância (cm)	Taxas de exposição (KR/h)							
	Observadas nas direções				Calculadas pelos modelos			
	S	O	N	E	I	II	III	
50	29,6	28,6	29,0	28,9	33,3	32,7	36,3	
100	15,7	14,6	14,7	14,0	14,1	14,5	14,5	
150	7,3	7,1	7,4	7,5	7,1	7,2	7,2	
200	4,5	4,3	4,8	4,2	4,2	4,2	4,2	
250	3,1	2,8	3,0	3,1	2,7	2,7	2,7	
300	2,2	-	-	-	1,9	1,9	1,9	

Tabela 4 - Taxas de exposição experimentais nas quatro direções, e as calculadas pelos modelos I, II e III no plano B_{100} , em função da distância na irradiação panorâmica (Geometria I).

Distância (cm)	Taxas de exposição (KR/h)							
	Observadas nas direções				Calculadas pelos modelos			
	S	O	N	E	I	II	III	
50	-	-	-	-	10,7	14,6	14,5	
100	6,2	6,3	6,2	6,5	8,2	9,1	9,0	
150	5,3	5,3	5,5	5,4	5,3	5,5	5,5	
200	3,6	3,7	3,6	3,5	3,5	3,6	3,6	
250	2,4	2,6	2,7	2,8	2,4	2,5	2,5	
300	2,1	-	-	-	1,7	1,8	1,8	

Tabela 5 - Taxas de exposição experimentais nas quatro direções, e as calculadas pelos modelos I, II e III no plano B₁₅₀, em função da distância na irradiação panorâmica (Geometria I).

Distância (cm)	Taxas de exposição (KR/h)						
	Observadas nas direções				Calculadas pelos modelos		
	S	O	N	E	I	II	III
50	-	-	-	-	4,1	7,3	7,2
100	-	-	-	-	4,5	5,6	5,5
150	4,4	4,0	4,8	4,0	3,6	4,0	4,0
200	3,1	3,1	3,1	2,9	2,7	2,9	2,9
250	2,3	2,6	2,3	2,4	2,0	2,1	2,1
300	2,1	-	-	-	1,5	1,6	1,6

De acordo com as determinações experimentais, pôde-se observar que o intervalo de variação obtidos nas três repetições em cada ponto de medida não ultrapassaram a 5%, estando normalmente entre 1 a 2%. Este intervalo pode ser considerado aceitável quando comparados a 0,3 a 36% obtido por *RAB MOLLA et alii* (1969) utilizando o dosímetro de *Fricke*. Os autores atribuíram como a maior fonte de erro, a colocação do dosímetro sempre no mesmo ponto, e o restante foi dividido entre erros inerentes ao método, medição espectrofométrica e células de irradiação. Por outro lado quando comparados com o valor médio de 2,5% obtido por *BURLIN e CHAN* (1971), o qual também utilizou o dosímetro de *Fricke* nas medições, nossos resultados foram muito satisfatórios.

Com relação ainda às determinações experimentais pode-se observar nas tabelas 1 a 5 que nas quatro direções para uma mesma distância a variação relativa da taxa de exposição foi mínima, não ultrapassando a 2,5%. Isto evidencia numa primeira aproximação que o irradiador apresenta uma distribuição uniforme quanto à atividade das fontes radioativas e um valor médio da taxa de exposição pode ser usado para cada distância.

Comparando os dados médios e os calculados pelos três modelos teóricos nas distâncias e planos correspondentes (Tabela 1 a 5), pode-se observar que estes modelos teóricos de distribuições de fontes se ajustaram às observações experimentais, com exceção feita para alguns pontos localizados junto a

Tabela 6 - Desvios relativos^{a/} entre as taxas de exposição experimentais (E) e as teoricamente esperadas (T) pelos três modelos matemáticos, em função da distância nos 5 planos horizontais (geometria I).

Distância (cm)	Planos horizontais														
	Modelo I - Fonte linear					Modelo II - Três fontes pontuais					Modelo III - Fonte pontual				
	O	A ₅₀	B ₅₀	B ₁₀₀	B ₁₅₀	O	A ₅₀	B ₅₀	B ₁₀₀	B ₁₅₀	O	A ₅₀	B ₅₀	B ₁₀₀	B ₁₅₀
50	1,7	- 6,0	-14,9	-	-	-0,6	- 4,0	-12,8	-	-	-2,8	-15,5	-25,3	-	-
100	-1,5	- 1,1	3,6	-30,3	1,0	-2,7	- 1,5	1,1	-44,4	-	-2,8	- 1,6	1,0	-44,3	-
150	-0,5	1,9	1,9	1,0	10,3	-0,8	0,8	0,8	- 4,1	- 0,1	-0,4	0,6	0,7	4,1	-0,2
200	5,5	1,8	4,5	1,6	11,0	5,3	1,1	3,9	- 4,6	5,0	5,2	1,0	3,8	-4,6	5,0
250	5,6	5,6	7,2	1,6	14,6	5,4	5,2	6,8	- 0,3	10,8	5,3	5,1	6,7	-0,4	10,8
300	8,2	10,9	10,9	14,6	25,3	8,1	10,6	10,6	13,4	23,0	8,1	10,6	10,6	13,3	23,0

$$a/ = \frac{E - T}{E} \cdot 100$$

blindagem, paredes laterais, piso e teto da câmara de irradiação. Nessas posições, efeitos de auto-absorção e retroespalhamento tiveram influências nas medidas experimentais, as quais não foram consideradas no cálculo teórico.

Tendo em vista que não houve uma diferença significativa entre as taxas de exposição entre as calculadas pelos três modelos (Tabelas 1 a 5), resultando em variações relativas à experimental de mesma magnitude (Tabela 6), optou-se pelo modelo III - fonte pontual, por ser mais simples no uso rotineiro do irradiador. A Figura 19 mostra as distribuições das taxas de exposição para o plano O , onde os efeitos anteriormente citados são menores devido a sua posição relativa na câmara de irradiação..

5.2.2. Curvas de Isodoses Panorâmicas

As curvas de isodoses para a Geometria I, foram obtidas a partir das curvas experimentais taxas de exposição médias versus distância para os cinco planos horizontais. Desse modo foi possível construir as curvas de mesma taxa de exposição para os planos horizontais e verticais, sendo mostrado na Figura 20 os resultados referentes ao plano horizontal O e na Figura 21 ao plano vertical das direções N-S.

As isodoses nos planos horizontais são totalmen

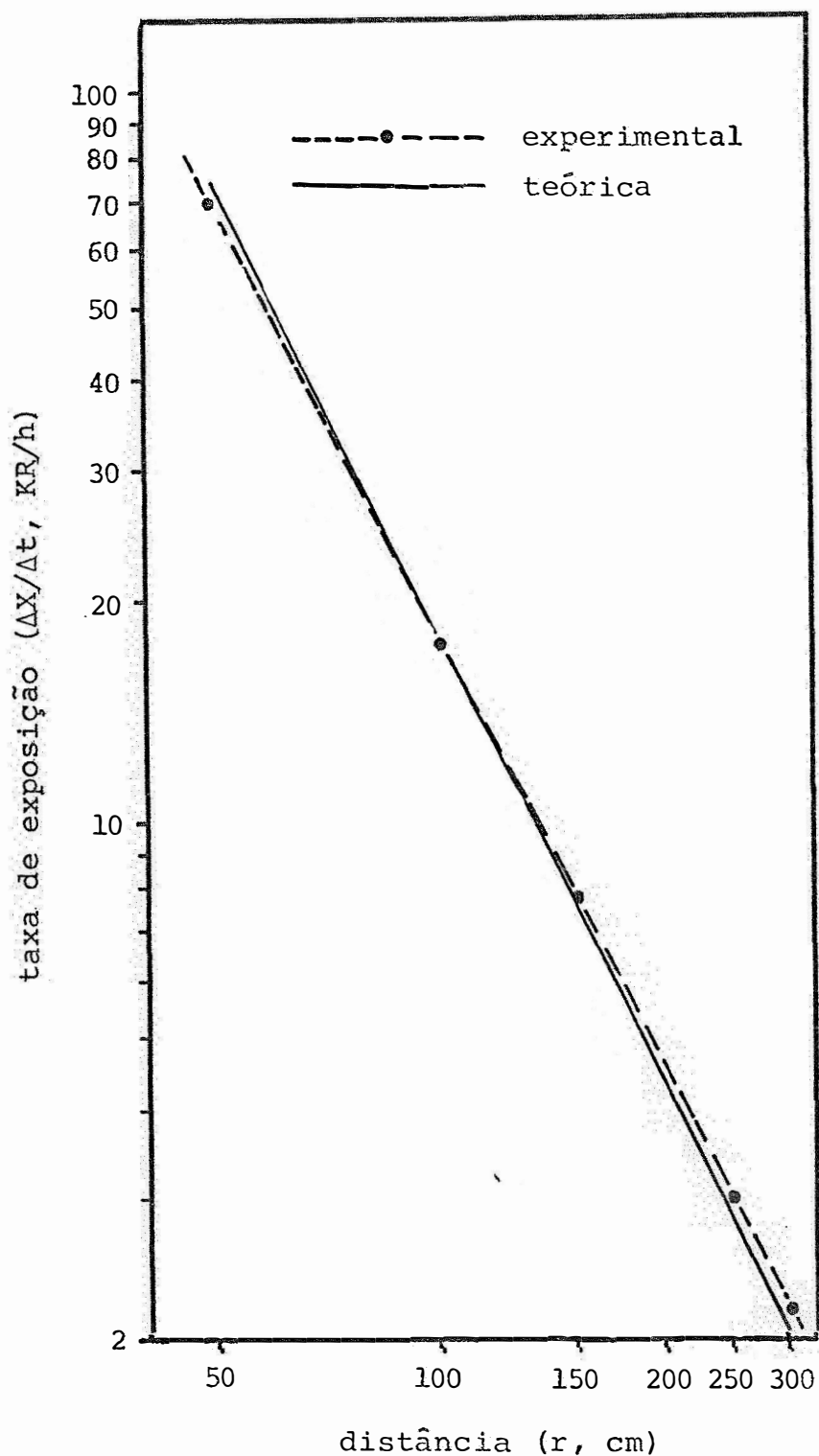


Figura 19 - Distribuição experimental e teórica (modelo III: fonte pontual) das taxas de exposição em função da distância ao longo do plano horizontal $\underline{0}$, com 12 tubos ativos e 10 cm de abertura (geometria I).

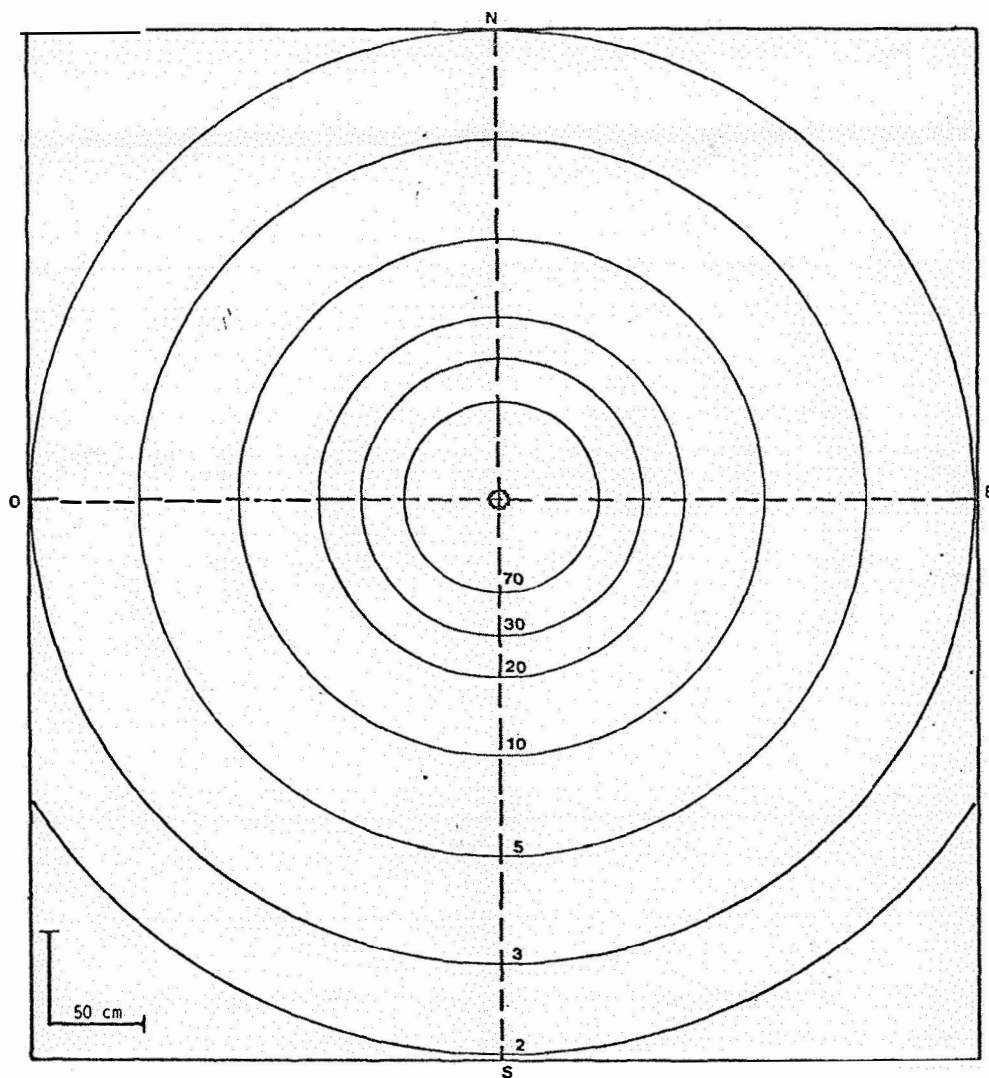


Figura 20 - Curvas de isodoses (em KR/h) no plano horizontal 0,
com 12 tubos ativos e 10 cm de abertura (geometria I).

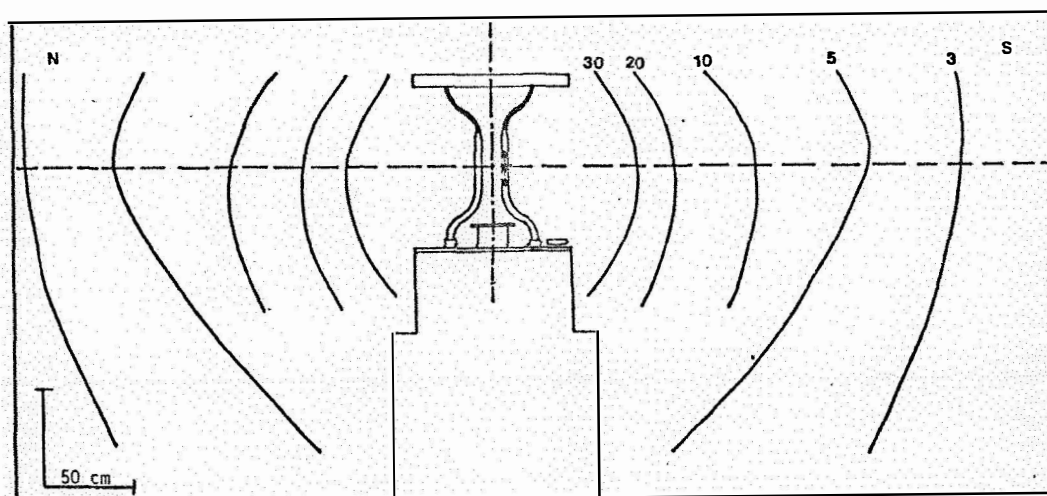


Figura 21 - Curvas de isodoses (em KR/h) no plano vertical N-S, com 12 tubos ativos e 10 cm de abertura (geometria I).

te simétricas nas quatro direções formando linhas circulares à partir do irradiador até as paredes da câmara, decrescendo na intensidade. Para os demais planos horizontais (A_{50} , B_{50} , B_{100} e B_{150}) o comportamento das curvas de isodoses é idêntico às do plano Q , somente com a diferença de ser menos intensas à medida que se afastam do plano Q . Nos planos verticais elas são simétricas com relação ao eixo vertical do irradiador, e com relação ao plano horizontal Q não há simetria, devido a posição não simétrica das fontes dentro da câmara de irradiação.

5.3. Taxas de Exposição na Cavidade Interna

Os dados médios das taxas de exposição obtidas com três repetições para os planos horizontais e verticais das seis geometrias definidas na cavidade interna (item 4.3.b), encontram-se nas tabelas 7 a 12. Os coeficientes de variação para estas medidas estiveram na faixa de 1 a 10%, com valores mais frequentes no intervalo de 2 a 4%.

Pode-se notar pelas tabelas que, com raras exceções, as taxas decrescem à medida que se afasta do círculo formado pelas fontes em cada plano horizontal, atingindo o ponto de mínimo exatamente no eixo vertical do irradiador.

5.3.1. Equações de Regressão

As equações de regressão entre taxas de exposi

ção e distâncias obtidas em cada direção nos cinco planos horizontais são mostrados nas tabelas 13 - 18.

Considerando os dois modelos de regressão citados no (item 4.5.3.), foi escolhido como equação representativa, a obtida pelo modelo II, tendo em vista que este modelo apresentou na grande maioria dos casos um coeficiente de determinação R^2 superior aos obtidos através do modelo I. É até certo ponto surpreendente que o modelo II tenha sido ajustado melhor aos dados experimentais que o modelo I, visto que este modelo I é uma função inversamente proporcional ao quadrado da distância, que rege normalmente o cálculo teórico das taxas de exposição em função da distância para uma fonte pontual. Todavia se considerarmos que há várias fontes radioativas e não somente uma, e que os pontos de medidas nem sempre estiveram na linha de ação das fontes em relação ao eixo da cavidade, aceita-se que o ajustamento pelo modelo II tenha sido melhor.

Pode-se verificar que o ajustamento de acordo com o modelo II não foi totalmente uniforme para todas as geometrias, sendo melhor quanto maior a abertura e número de tubos ativos. Assim uma análise dos coeficientes de determinação R^2 , mostrou-se que 87% das equações obtidas foram significativas ao nível de 1% (na maioria das vezes) e 5%, sendo que apenas 13% não atingiram a significância de 5%.

Tabela 13 - Equações de regressão entre taxas de exposição (D, KR/h) e distância (r, cm) para irradiações na cavidade interna, utilizando abertura de 84 cm e 12 tubos ativos (geometria II).

$$D = \beta_0 + \beta_1 r + \beta_2 r^2 + \beta_3 r^3 + \beta_4 r^4 + \beta_5 r^5$$

Plano	Direção	COEFICIENTES					R ²	
		β_0	β_1	β_2	β_3	β_4		β_5
O	S	0,4732 E03 ^{a/}	-0,3033 E02	0,8824 E00	-0,8742 E-02	-	-	0,9971**
	SO	0,3654 E03	-0,1813 E02	0,4717 E00	-0,4420 E-02	-	-	0,9985**
	O	0,4653 E03	-0,2905 E02	0,8278 E00	-0,8065 E-02	-	-	0,9979**
	NO	0,3579 E03	-0,1741 E02	0,4458 E00	-0,4095 E-02	-	-	0,9999**
	N	0,5013 E03	-0,3354 E02	0,9960 E00	-0,1000 E-01	-	-	0,9967**
	NE	0,3574 E03	-0,1630 E02	0,3138 E00	-	0,4148 E-04	-	0,9999**
	E	0,4572 E03	-0,2885 E02	0,8377 E00	-0,8296 E-01	-	-	0,9984**
	SE	0,3397 E03	-0,1442 E02	0,2343 E00	-	-	0,6093 E-06	0,9999**
A ₈	S	0,3838 E03	-0,2232 E02	0,6213 E00	-0,5801 E-02	-	-	0,9959**
	SO	0,2481 E03	-0,4448 E02	-	-	-	0,4010	0,9943**
	O	0,4117 E03	-0,2579 E02	0,7852 E00	-0,8110 E-02	-	-	0,9971**
	NO	0,3074 E03	-0,1259 E02	0,2338 E00	-	-0,2497 E-04	-	0,9999**
	N	0,4317 E03	-0,2821 E02	0,8478 E00	-0,8501 E-02	-	-	0,9980**
	NE	0,3076 E03	-0,1334 E02	0,3143 E00	-0,2545 E-02	-	-	0,9990**
	E	0,5628 E03	-0,4232 E02	0,1339 E01	-0,1401 E-01	-	-	0,9876*
	SE	0,2661 E03	-0,7877 E01	0,1004 E00	-	-	-	0,9982**
A ₁₆	S	0,1798 E03	-0,3913 E01	0,5097 E-01	-	-	-	0,9945**
	SO	0,1750 E03	-0,3605 E01	0,4633 E-01	-	-	-	0,9983**
	O	0,2230 E03	-0,9101 E01	0,2506 E00	-0,2418 E-02	-	-	0,9968**
	NO	0,1591 E03	-0,1434 E01	-0,1646 E-01	-	-	0,2818 E-06	0,9641*
	N	0,1852 E03	-0,4449 E01	0,6140 E-01	-	-	-	0,9903**
	NE	0,1687 E03	-0,2536 E01	-	0,5809 E-03	-	-	0,9995**
	E	0,1840 E03	-0,4235 E01	0,5647 E-01	-	-	-	0,9987**
	SE	0,1727 E03	-0,3291 E01	0,4032 E-01	-	-	-	0,9982**
B ₈	S	0,3798 E03	-0,2131 E02	0,5771 E00	-0,5315 E-02	-	-	0,9965**
	SO	0,3084 E03	-0,1378 E02	0,3412 E00	-0,2994 E-02	-	-	0,9965**
	O	0,3647 E03	-0,2011 E02	0,5498 E00	-0,5136 E-02	-	-	0,9995**
	NO	0,3112 E03	-0,1511 E02	0,4101 E00	-0,3935 E-02	-	-	0,9995**
	N	0,4084 E03	-0,2561 E02	0,7562 E00	-0,7525 E-02	-	-	0,9975**
	NE	0,3219 E03	-0,1615 E02	0,4478 E00	-0,4376 E-02	-	-	0,9977**
	E	0,3647 E03	-0,1979 E02	0,5461 E00	-0,5244 E-02	-	-	0,9939**
	SE	0,283 E03	-0,1043 E02	0,2225 E00	-0,1733 E-02	-	-	0,9961**
B ₁₆	S	0,1831 E03	-0,4064 E01	0,4984 E-01	-	-	-	0,9981**
	SO	0,1795 E03	-0,3874 E01	0,4729 E-01	-	-	-	0,9975**
	O	0,1815 E03	-0,4072 E01	0,5075 E-01	-	-	-	0,9995**
	NO	0,1628 E03	-	-	0,4334 E-03	-	-	0,9991**
	N	0,1844 E03	-0,4341 E01	0,5538 E-01	-	-	-	0,9968**
	NE	0,1782 E03	-0,389 E01	0,439 E-01	-	-	-	0,9994**
	E	0,208 E03	-0,7630 E01	0,1923 E00	-	-0,1724 E-02	-	0,9990**
	SE	0,1739 E03	-0,3426 E01	0,398 E-01	-	-	-	0,9981**

a/ 0,4732.10³

* significativas a 5%

** significativas a 1%

Tabela 14 - Equações de regressão entre taxas de exposição (D, KR/h) e distância (r, cm) para irradiações na cavidade interna, utilizando abertura de 84 cm e 6 tubos ativos (geometria III).

$$D = \beta_0 + \beta_1 r + \beta_2 r^2 + \beta_3 r^3 + \beta_4 r^4 + \beta_5 r^5$$

Plano	Direção	COEFICIENTES					R ²	
		β_0	β_1	β_2	β_3	β_4		β_5
O	S	0,3703 E03	-0,2906 E02	0,8933 E00	-0,9092 E-02	-	-	0,9933*
	SO	0,1735 E03	-0,8310 E01	0,2113 E00	-0,1934 E-02	-	-	0,9997**
	O	0,1014 E03	-0,1343 E01	0,1037 E02	-	-	0,8525 E-07	0,9993**
	NO	0,1773 E03	-0,8956 E01	0,2411 E00	-0,2324 E-02	-	-	0,9994**
	N	0,3885 E03	-0,3142 E02	0,9819 E00	-0,1011 E-01	-	-	0,9906*
	NE	0,1864 E03	-0,9351 E01	0,2400 E00	-0,2203 E-02	-	-	0,9908**
	E	0,9903 E03	-0,1067 E01	0,1134 E-01	-	0,6629 E-05	-	0,9928**
	SE	0,1776 E03	-0,8471 E01	0,2105 E00	-0,1880 E-02	-	-	0,9998**
A ₈	S	0,2703 E03	-0,1888 E02	0,5545 E00	-0,5452 E-02	-	-	0,9947**
	SO	0,1502 E03	-0,6835 E02	0,1789 E00	-0,1707 E-02	-	-	0,9980**
	O	0,1199 E03	-0,4205 E01	0,1022 E00	-0,9588 E-03	-	-	0,9997**
	NO	0,1446 E03	-0,5313 E01	0,8507 E-01	-	-	0,1578 E-06	0,9992**
	N	0,2659 E03	-0,1852 E02	0,5448 E00	-0,5369 E02	-	-	0,9949**
	NE	0,1640 E03	-0,8135 E01	0,2235 E00	-0,2221 E02	-	-	0,9952**
	E	0,1162 E03	-0,3459 E01	0,5469 E-01	-	-	0,1115 E-06	0,9987**
	SE	0,1529 E03	-0,6750 E01	0,1679 E00	-0,1532 E-02	-	-	0,9977**
A ₁₆	S	0,1338 E03	-0,5953 E01	0,1507 E00	-0,1329 E-02	-	-	0,9858*
	SO	0,8040 E02	-0,9198 E00	-	-	-	0,7769 E-07	0,9963**
	O	0,7501 E02	-0,7451 E00	-	-	-	0,6002 E-07	0,9982**
	NO	0,9604 E02	-0,2239 E01	0,2855 E01	-	-	-	0,9949**
	N	0,1341 E03	-0,6932 E01	0,2067 E00	-0,2103 E-02	-	-	0,9994**
	NE	0,9303 E02	-0,2995 E01	0,3311 E-01	-	-	0,2269 E-07	0,9993**
	E	0,7689 E02	-0,8683 E00	-	-	0,3620 E-05	-	0,9995**
	SE	0,9494 E02	-0,2067 E01	0,2474 E-01	-	-	-	0,9953**
B ₈	S	0,2896 E03	-0,2242 E02	0,7270 E00	-0,7837 E-02	-	-	0,9839*
	SO	0,1428 E03	-0,5768 E01	0,1140 E00	-	-0,1578 E-04	-	0,9996**
	O	0,9344 E02	-0,1336 E01	-	0,2124 E-03	-	-	0,9940**
	NO	0,1380 E03	-0,5660 E01	0,1419 E00	-0,1325 E-02	-	-	0,9994**
	N	0,2831 E03	-0,2087 E02	0,6350 E00	-0,8422 E-02	-	-	0,9934**
	NE	0,1386 E03	-0,4270 E01	0,5365 E-01	-	-	-	0,9946**
	E	0,9042 E02	-0,1040 E01	-	-	-	0,4797 E-07	0,9927**
	SE	0,1571 E03	-0,7531 E01	0,2018 E00	-0,1937 E-02	-	-	0,9991**
B ₁₆	S	0,1288 E03	-0,6044 E01	0,1620 E00	-0,1510 E02	-	-	0,9967**
	SO	0,8953 E02	-0,2042 E01	0,3086 E-01	-	-	-0,6612 E-07	0,9995**
	O	0,7203 E02	-0,6557 E00	-	-	0,1673 E-05	-	0,9853*
	NO	0,8850 E02	-0,1924 E01	0,2734 E-01	-	-	-	0,9996**
	N	0,1245 E03	-0,5525 E01	0,1397 E00	-0,1215 E02	-	-0,4867 E-07	0,9963**
	NE	0,8986 E02	-0,0190 E01	0,2410 E-01	-	-	-0,2090 E-07	0,9985**
	E	0,6939 E02	-0,3301 E00	-	-	-	0,6200 E-07	0,9931**
	SE	0,5166 E02	-0,5349 E00	0,2000 E00	-	-	0,2650 E-07	0,9997**

* - significativas a 5%

** - significativas a 1%

Tabela 15 - Equações de regressão entre taxas de exposição (D, KR/h) e distância (r, cm) para irradiações na cavidade interna, utilizando abertura de 84 cm e 3 tubos ativos (geometria IV).

$$D = \beta_0 + \beta_1 r + \beta_2 r^2 + \beta_3 r^3 + \beta_4 r^4 + \beta_5 r^5$$

Plano	Direção.	C O E F I C I E N T E S					R ²	
		β_0	β_1	β_2	β_3	β_4		β_5
O	S	0,3062 E03	-0,2524 E02	0,7601 E00	-0,7561 E-02	-	-	0,9968**
	SO	0,2831 E02	0,2309 E00	-	-	-0,9065 E-05	0,1400 E-06	0,9769*
	O	0,5182 E02	-0,7558 E00	-	-	0,2626 E-05	-	0,9956**
	NO	0,1585 E03	-0,9652 E01	0,2440 E00	-0,2102 E-02	-	-	0,9992**
	N	0,2127 E02	0,5619 E00	-	-	-0,2518 E-04	0,4693 E-06	0,7024
	NE	0,1641 E03	-0,1025 E02	0,2677 E00	-0,2401 E-02	-	-	0,9998**
	E	0,5475 E02	-0,1074 E01	0,1072 E-01	-	-	-	0,9948*
	SE	0,3001 E02	0,1143 E00	-	-	0,6777 E-05	0,1097 E-06	0,9334
A ₈	S	0,2327 E03	0,5378 E00	-0,5284 E-02	-	-	-	0,9994**
	SO	0,2504 E02	0,4308 E00	-0,1004 E-01	-	-	0,1026 E-07	0,9593
	O	0,4571 E02	0,5610 E00	-	-	-	0,3579 E-07	0,9900**
	NO	0,1434 E03	-0,9411 E01	0,2644 E00	-0,2546 E-02	-	-	0,9974**
	N	0,1673 E02	0,1016 E01	-0,2483 E-01	-	-	0,8279 E-07	0,8289
	NE	0,1359 E03	-0,7996 E01	0,2017 E00	-0,1749 E-02	-	-	0,9995**
	E	0,4610 E02	-0,5837 E00	-	-	-	0,4005 E-07	0,9955**
	SE	0,2698 E02	0,1755 E00	-	-	-0,6992 E-05	0,1083 E-06	0,9745*
A ₁₆	S	0,1026 E03	-0,5795 E01	0,1479 E00	-0,1277 E-02	-	-	0,9998**
	SO	0,2205 E02	0,4293 E00	-0,9942 E-02	-	-	0,2425 E-07	0,9867*
	O	0,2539 E02	0,1198 E01	-0,6173 E-01	0,7954 E-02	-	-	0,9903*
	NO	0,6683 E02	-0,2106 E01	0,2684 E-01	-	-	-	0,9996**
	N	0,1740 E02	0,6970 E00	-0,1394 E-01	-	-	0,2671 E-07	0,9755*
	NE	0,6704 E02	-0,2342 E01	0,3524 E-01	-	-	-0,3935 E-07	0,9988**
	E	0,3467 E02	-0,1273 E00	-0,5258 E-02	-	-	0,4418 E-07	0,9911*
	SE	0,1208 E02	0,1576 E01	-0,5210 E-01	0,5324 E-03	-	-	0,9793*
B ₈	S	0,2497 E03	-0,2025 E02	0,6151 E00	-0,6184 E-02	-	-	0,9972**
	SO	0,2628 E02	0,3805 E00	-0,8264 E-02	-	-	-0,5912 E-08	0,9211
	O	0,4675 E02	-0,5956 E00	-	-	0,1699 E-05	-	0,9951**
	NO	0,2360 E04	-0,2597 E03	0,9106 E01	-0,1013 E00	-	-	0,9647**
	N	0,1982 E02	0,5913 E00	-	-	-0,2425 E-04	0,4397 E-06	0,8225
	NE	0,1336 E03	-0,7878 E01	0,2041 E00	-0,1840 E-02	-	-	0,9990**
	E	0,4757 E02	-0,6433 E00	-	-	-	-0,1375 E-07	0,9907**
	SE	0,2675 E02	0,3303 E00	-0,6727 E-02	-	-	-0,1433 E-07	0,9693*
B ₁₆	S	0,9177 E02	-0,4519 E01	0,1004 E00	-0,7321 E-03	-	-	0,9992**
	SO	0,2246 E02	0,3910 E00	-0,9441 E-02	-	-	0,2249 E-07	0,8155
	O	0,3433 E02	-0,2237 E00	-0,1755 E-02	-	-	0,2546 E-07	0,9965**
	NO	0,7331 E02	-0,3378 E01	0,8072 E-01	-0,6604 E-03	-	-	0,9986**
	N	0,1623 E02	0,8890 E00	-0,2143 E-01	-	-	-0,7038 E-07	0,9586
	NE	0,7199 E02	-0,2920 E01	0,5930 E-01	-0,3923 E-03	-	-	0,9990**
	E	0,3404 E02	-0,1129 E00	-0,5094 E-02	-	-	0,3688 E-07	0,9974**
	SE	0,1839 E02	0,1168 E01	-0,3659 E-01	-	0,7236 E-05	-	0,7959

* - significativas a 5%

** - significativas a 1%

Tabela 16 - Equações de regressão entre taxas de exposição (D, KR/h) e distância (r, cm) para irradiações na cavidade interna, utilizando abertura de 42 cm e 12 tubos ativos (geometria V).

$$D = \beta_0 + \beta_1 r + \beta_2 r^2 + \beta_3 r^3 + \beta_4 r^4 + \beta_5 r^5$$

Plano	Direção	C O E F I C I E N T E S					R ²	
		β_0	β_1	β_2	β_3	β_4		β_5
O	S	0,1093 E04	-0,7491 E02	0,2094 E01	-	-	-	0,9869*
	SO	0,8939 E03	-0,4527 E02	0,1122 E01	-	-	-	0,9979**
	O	0,1054 E04	-0,7023 E02	0,1963 E01	-	-	-	0,9827*
	NO	0,9135 E03	-0,4855 E02	0,1235 E01	-	-	-	0,9962**
	N	0,1069 E04	-0,7137 E02	0,1985 E01	-	-	-	0,9825*
	NE	0,9306 E03	-0,5241 E02	0,1385 E01	-	-	-	0,9916**
	E	0,1070 E04	-0,7525 E02	0,2174 E01	-	-	-	0,9621*
	SE	0,9281 E03	-0,4990 E02	0,1264 E01	-	-	-	0,9986**
A ₈	S	0,7745 E03	-0,5248 E02	0,1431 E01	-	-	-	0,9879*
	SO	0,6462 E03	-0,3364 E02	0,8162 E00	-	-	-	0,9960**
	O	0,7784 E03	-0,5287 E02	0,1446 E01	-	-	-	0,9745*
	NO	0,6887 E03	-0,3927 E02	0,9955 E00	-	-	-	0,9849*
	N	0,7937 E03	-0,5515 E02	0,1520 E01	-	-	-	0,9811*
	NE	0,6729 E03	-0,3554 E02	0,8473 E00	-	-	-	0,9970**
	E	0,7920 E03	-0,5532 E02	0,1511 E01	-	-	-	0,9865*
	SE	0,6835 E03	-0,3736 E02	0,2094 E00	-	-	-	0,9963**
A ₁₆	S	0,3106 E03	-0,9607 E00	-0,3618 E-01	-	-	-	0,9552*
	SO	0,3054 E03	-0,6468 E-01	-0,6791 E-01	-	-	-	0,9864*
	O	0,2918 E03	-0,1475 E00	0,1191 E-02	-	-	-	0,9745
	NO	0,3298 E03	-0,3635 E01	0,4823 E-01	-	-	-	0,9968**
	N	0,3335 E03	-0,5063 E01	0,1123 E00	-	-	-	0,9620*
	NE	0,3114 E03	-0,1592 E01	-0,6982 E-02	-	-	-	0,9519*
	E	0,3212 E03	-0,2839 E01	0,3049 E-01	-	-	-	0,9914**
	SE	0,3242 E03	-0,3089 E01	0,4062 E-01	-	-	-	0,9324
B ₈	S	0,7600 E03	-0,4786 E02	0,1298 E01	-	-	-	0,9862*
	SO	0,6350 E03	-0,2853 E02	0,6512 E00	-	-	-	0,9952*
	O	0,8070 E03	-0,5472 E02	0,1521 E01	-	-	-	0,9746**
	NO	0,6781 E03	-0,3340 E02	0,7844 E00	-	-	-	0,9977*
	N	0,7531 E03	-0,4640 E02	0,1241 E01	-	-	-	0,9829**
	NE	0,6653 E03	-0,3232 E02	0,7578 E00	-	-	-	0,9991*
	E	0,7782 E03	-0,5061 E02	0,1386 E01	-	-	-	0,9837*
	SE	0,6841 E03	-0,3424 E02	0,8092 E00	-	-	-	0,9986**
B ₁₆	S	0,3023 E03	-0,9227 E00	-0,2316 E-01	-	-	-	0,9739*
	SO	0,3060 E03	-0,1147 E01	-0,2316 E-01	-	-	-	0,9911**
	O	0,3192 E03	-0,3318 E01	0,5133 E-01	-	-	-	0,9969**
	NO	0,3260 E03	-0,3064 E01	0,2066 E-01	-	-	-	0,9298
	N	0,3304 E03	-0,5529 E01	0,1345 E00	-	-	-	0,9793*
	NE	0,3125 E03	-0,2434 E01	0,2379 E-01	-	-	-	0,9643*
	E	0,3162 E03	-0,2632 E01	0,2629 E-01	-	-	-	0,9786*
	SE	0,3096 E03	-0,1687 E01	-0,2598 E-02	-	-	-	0,9584*

* - significativas a 5%

** - significativas a 1%

Tabela 17 - Equações de regressão entre taxas de exposição (D, KR/h) e distância (r, cm) para irradiações na cavidade interna, utilizando abertura de 42 cm e 6 tubos ativos (geometria VI).

$$D = \beta_0 + \beta_1 r + \beta_2 r^2 + \beta_3 r^3 + \beta_4 r^4 + \beta_5 r^5$$

Plano	Direção	C O E F I C I E N T E S					R ²	
		β_0	β_1	β_2	β_3	β_4		β_5
O	S	0,6678 E03	-0,4640 E02	0,1610 E01	-	-	-	0,9764*
	SO	0,4151 E03	-0,2190 E02	0,5400 E00	-	-	-	0,9934**
	O	0,3361 E03	-0,1210 E02	0,2412 E00	-	-	-	0,9937**
	NO	0,4053 E03	-0,2061 E02	0,5123 E00	-	-	-	0,9971**
	N	0,6972 E03	-0,6121 E02	0,1791 E01	-	-	-	0,9843*
	NE	0,4367 E03	-0,2411 E02	0,6012 E00	-	-	-	0,9945**
	E	0,3315 E03	-0,1191 E02	0,2210 E00	-	-	-	0,9976**
	SE	0,4315 E03	-0,2351 E02	0,5811 E00	-	-	-	0,9982**
A ₈	S	0,6250 E03	-0,5410 E02	0,1604 E01	-	-	-	0,9554*
	SO	0,3899 E03	-0,2291 E02	0,6310 E00	-	-	-	0,9889*
	O	0,2827 E03	-0,7213 E01	0,1101 E00	-	-	-	0,9955**
	NO	0,3546 E03	-0,1613 E02	0,3821 E00	-	-	-	0,9987**
	N	0,6327 E03	-0,5521 E02	0,1631 E01	-	-	-	0,9590*
	NE	0,3982 E03	-0,2310 E02	0,6211 E00	-	-	-	0,9916**
	E	0,2877 E03	-0,8121 E01	0,1512 E00	-	-	-	0,9991**
	SE	0,3936 E03	-0,2291 E02	0,6211 E00	-	-	-	0,9915**
A ₁₆	S	0,1549 E03	-0,1981 E01	0,4210 E-01	-	-	-	0,8322
	SO	0,1409 E03	0,8911 E00	-0,2512 E-01	-	-	-	0,9039
	O	0,1415 E03	0,7210 E00	0,2913 E-02	-	-	-	0,9549*
	NO	0,1459 E03	-0,4413 E00	0,1631 E-01	-	-	-	0,9020
	N	0,1692 E03	-0,3241 E01	0,8312 E-01	-	-	-	0,9961**
	NE	0,1493 E03	-0,1421 E01	0,2213 E-01	-	-	-	0,9618*
	E	0,1497 E03	-0,1212 E01	0,1237 E-01	-	-	-	0,9894**
	SE	0,1528 E03	-0,1476 E01	0,1912 E-01	-	-	-	0,9760*
B ₈	S	0,5693 E03	-0,4691 E02	0,1373 E01	-	-	-	0,9622*
	SO	0,3824 E03	-0,2162 E02	0,5713 E00	-	-	-	0,9891**
	O	0,2884 E03	-0,8412 E02	0,1517 E00	-	-	-	0,9682*
	NO	0,3672 E03	-0,1883 E02	0,4817 E00	-	-	-	0,9997**
	N	0,5659 E03	-0,4571 E02	0,1321 E01	-	-	-	0,9557*
	NE	0,4015 E03	-0,2381 E02	0,6413 E00	-	-	-	0,9942**
	E	0,3036 E03	-0,1061 E02	0,2317 E00	-	-	-	0,9874*
	SE	0,3971 E03	-0,2341 E02	0,6312 E00	-	-	-	0,9935**
B ₁₆	S	0,1640 E03	-0,3101 E01	0,8121 E-01	-	-	-	0,9820*
	SO	0,1489 E03	-0,1120 E01	0,1531 E-01	-	-	-	0,9186
	O	0,1447 E03	-0,4713 E00	-0,4612 E-02	-	-	-	0,9295
	NO	0,1526 E03	-0,1731 E01	0,4471 E-01	-	-	-	0,8224
	N	0,1662 E03	-0,3561 E01	0,1001 E-01	-	-	-	0,9965**
	NE	0,1559 E03	-0,2161 E01	0,5713 E-01	-	-	-	0,9416
	E	0,1544 E03	-0,1817 E01	0,4413 E-01	-	-	-	0,8398
	SE	0,1549 E03	-0,2017 E01	0,5217 E-01	-	-	-	0,9466*

* - significativas a 5%

** - significativas a 1%

Tabela 18 - Equações de regressão entre taxas de exposição (D, KR/h) e distância (r, cm) para irradiações na cavidade interna, utilizando abertura de 42 cm e 3 tubos ativos (geometria VII).

$$D = \beta_0 + \beta_1 r + \beta_2 r^2 + \beta_3 r^3 + \beta_4 r^4 + \beta_5 r^5$$

Plano	Direção	C O E F F I C I E N T E S					R ²	
		β_0	β_1	β_2	β_3	β_4		β_5
O	S	0,5794 E03	-0,5753 E02	0,1666 E01	-	-	-	0,9796*
	SO	0,9375 E02	0,2757 E01	-0,1227 E00	-	-	-	0,9957**
	O	0,1563 E03	-0,4745 E01	0,9500 E-01	-	-	-	0,5514
	NO	0,3177 E03	0,2294 E02	0,5971 E00	-	-	-	0,9970**
	N	0,7924 E02	0,2637 E01	-0,8546 E-01	-	-	-	0,9302
	NE	0,3294 E03	-0,2482 E02	0,6618 E00	-	-	-	0,9953**
	E	0,1703 E03	-0,5818 E01	0,1122 E00	-	-	-	0,9947**
	SE	0,9261 E02	0,2903 E01	-0,1273 E00	-	-	-	0,9795*
A ₈	S	0,4977 E03	-0,4927 E02	0,1434 E01	-	-	-	0,9784*
	SO	0,9153 E02	0,1227 E01	0,6448 E-01	-	-	-	0,9596*
	O	0,1514 E03	-0,4836 E01	0,8670 E-01	-	-	-	0,9928**
	NO	0,2703 E03	-0,1930 E02	0,5086 E00	-	-	-	0,9989**
	N	0,7886 E02	0,1607 E01	-0,4820 E-01	-	-	-	0,7293
	NE	0,2789 E03	-0,1987 E02	0,5184 E00	-	-	-	0,9920**
	E	0,1544 E03	-0,5730 E01	0,1238 E00	-	-	-	0,9961**
	SE	0,2045 E02	0,1308 E01	-0,6766 E-01	-	-	-	0,9770*
A ₁₆	S	0,8584 E02	-0,1259 E01	0,1269 E-01	-	-	-	0,9748*
	SO	0,5334 E02	0,2607 E01	-0,9646 E-01	-	-	-	0,9990**
	O	0,7733 E02	-0,4327 E00	-0,5830 E-02	-	-	-	0,9948**
	NO	0,8487 E02	-0,8623 E00	-0,3303 E-02	-	-	-	0,9831*
	N	0,5196 E02	0,2235 E01	-0,7641 E-01	-	-	-	0,9539*
	NE	0,9643 E02	-0,2579 E01	0,5357 E-01	-	-	-	0,9932**
	E	0,7669 E02	-0,5391 E00	0,2035 E-02	-	-	-	0,8732
	SE	0,5831 E02	0,1623 E01	-0,6092 E-01	-	-	-	0,9431
B ₈	S	0,4663 E03	-0,4551 E02	0,1318 E01	-	-	-	0,9753*
	SO	0,8287 E02	0,2423 E01	-0,1114 E00	-	-	-	0,9293
	O	0,1399 E03	-0,3728 E01	0,5165 E-01	-	-	-	0,9982**
	NO	0,2430 E03	-0,1638 E02	0,4234 E00	-	-	-	0,9887*
	N	0,6716 E02	0,3069 E01	-0,1095 E00	-	-	-	0,6206
	NE	0,2751 E03	-0,2005 E02	0,5267 E00	-	-	-	0,9934**
	E	0,1342 E03	-0,3114 E01	0,3412 E-01	-	-	-	0,9863*
	SE	0,7916 E02	0,2897 E01	-0,1267 E00	-	-	-	0,9868*
B ₁₆	S	0,9231 E02	-0,2371 E01	0,5672 E-01	-	-	-	0,9655*
	SO	0,5872 E02	0,1497 E01	-0,4589 E-01	-	-	-	0,9518*
	O	0,6972 E02	0,4822 E00	-0,2723 E-01	-	-	-	0,8562
	NO	0,8853 E02	-0,1527 E01	0,2520 E-01	-	-	-	0,9482*
	N	0,6465 E02	0,1318 E00	0,1009 E-02	-	-	-	0,5950
	NE	0,9056 E02	-0,2776 E01	0,6749 E-01	-	-	-	0,9967**
	E	0,7936 E02	-0,1010 E01	0,2268 E-01	-	-	-	0,9858*
	SE	0,5878 E02	0,1324 E01	-0,4164 E-01	-	-	-	0,9987**

* - significativas a 5%

** - significativas a 1%

5.3.2. Curvas de Isodoses na Cavidade Interna

As curvas de isodoses foram obtidas para todas as geometrias de acordo com as equações dada nas Tabelas 13 a 18 quando significativas até o nível de 5% de significância, e com as curvas experimentais quando não significativas. As curvas de isodoses para os planos horizontais foram construídas ligando-se os pontos de mesma taxa de exposição nas oito direções, enquanto que as verticais foram obtidas de modo análogo as horizontais, ligando-se pontos de mesma taxa de exposição nos cinco planos horizontais.

As Figuras de 22 a 31 mostram as isodoses no plano horizontal O e no plano vertical N-S, nas diferentes aberturas e número de tubos ativos. As simetrias das curvas de isodoses nessas figuras confirmam a uniformidade das atividades das fontes.

Como consequência da utilização do número máximo de tubos ativos (Geometria II e V) pode-se notar uma distribuição mais circular das isodoses (os valores das taxas de exposição são praticamente iguais em todas as direções). Para as demais geometrias a uniformidade das isodoses diminui à medida que decresce o número de fontes, sendo que as mais externas não conseguiram ser fechadas dentro dos limites da cavidade interna.

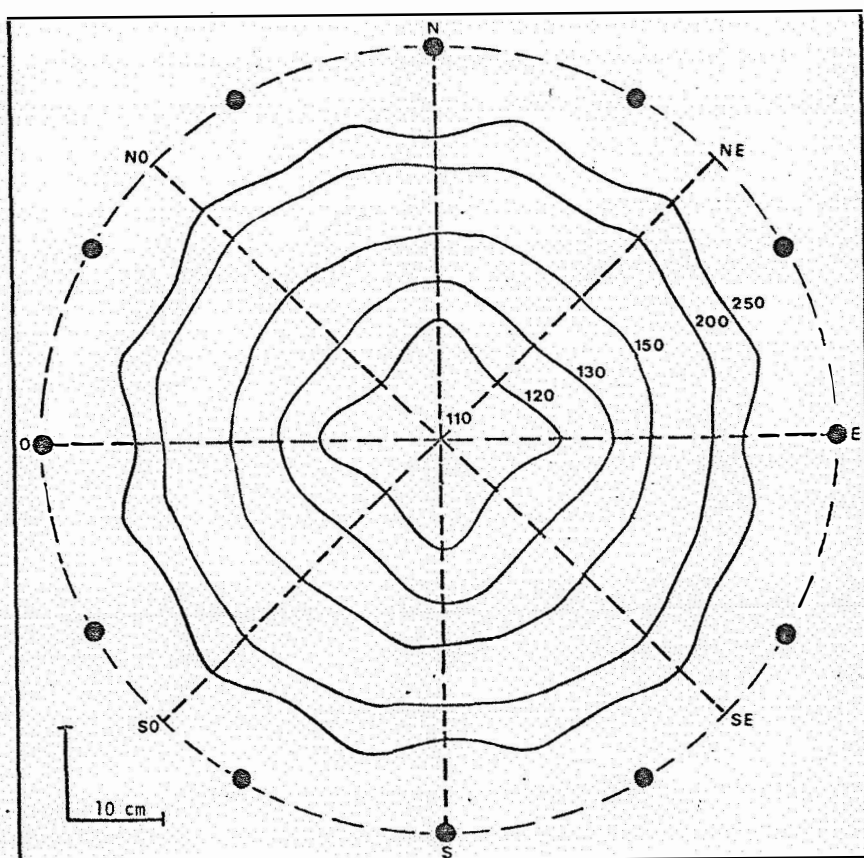


Figura 22 - Curvas de isodoses (em KR/h) no plano horizontal 0, com 12 tubos ativos e 84 cm de abertura (geometria II).

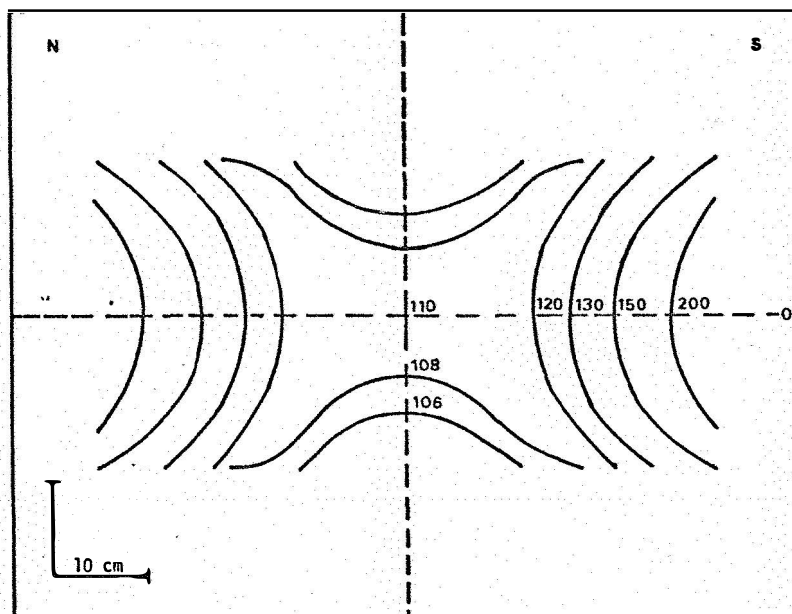


Figura 23 - Curvas de isodoses (em KR/h) no plano vertical N-S, com 12 tubos ativos e 84 cm de abertura (geometria II).

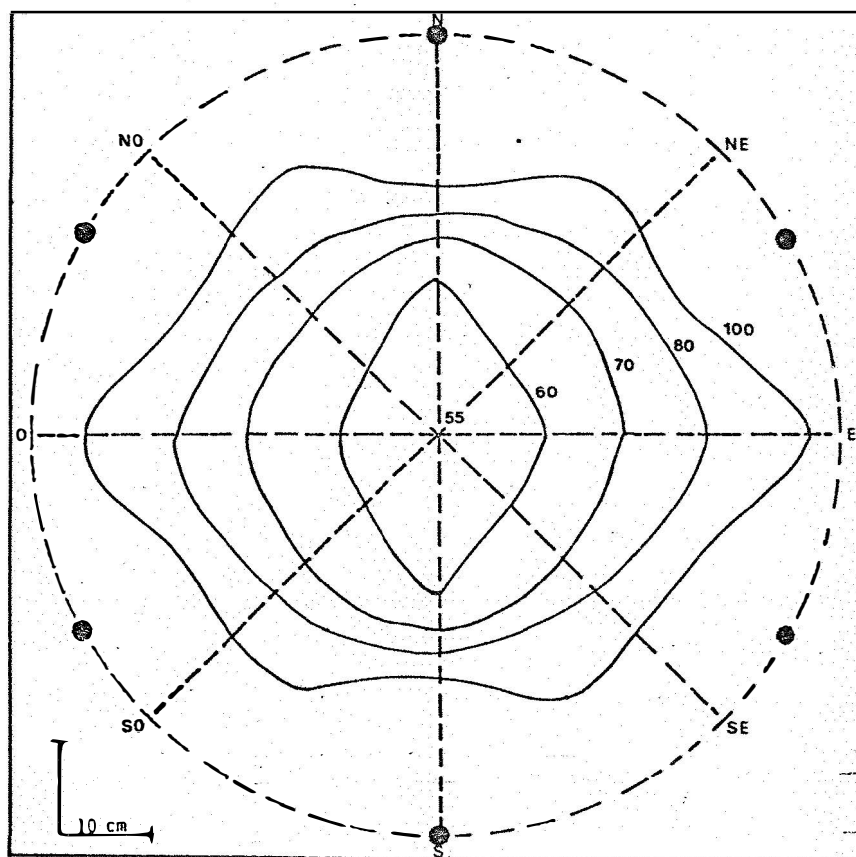


Figura 24 - Curvas de isodoses (em KR/h) no plano horizontal 0, com 6 tubos ativos e 84 cm de abertura (geometria III).

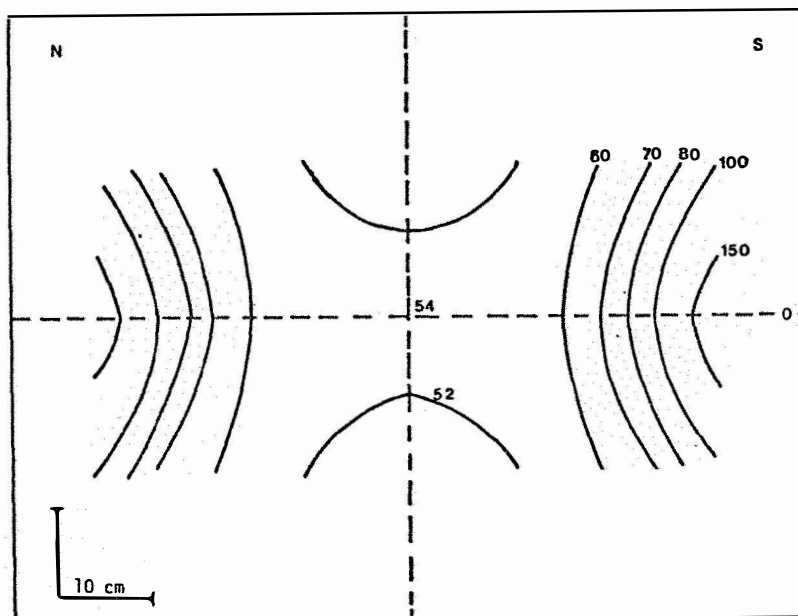


Figura 25 - Curvas de isodoses (em KR/h) no plano vertical N-S, com 6 tubos ativos e 84 cm de abertura (geometria III).

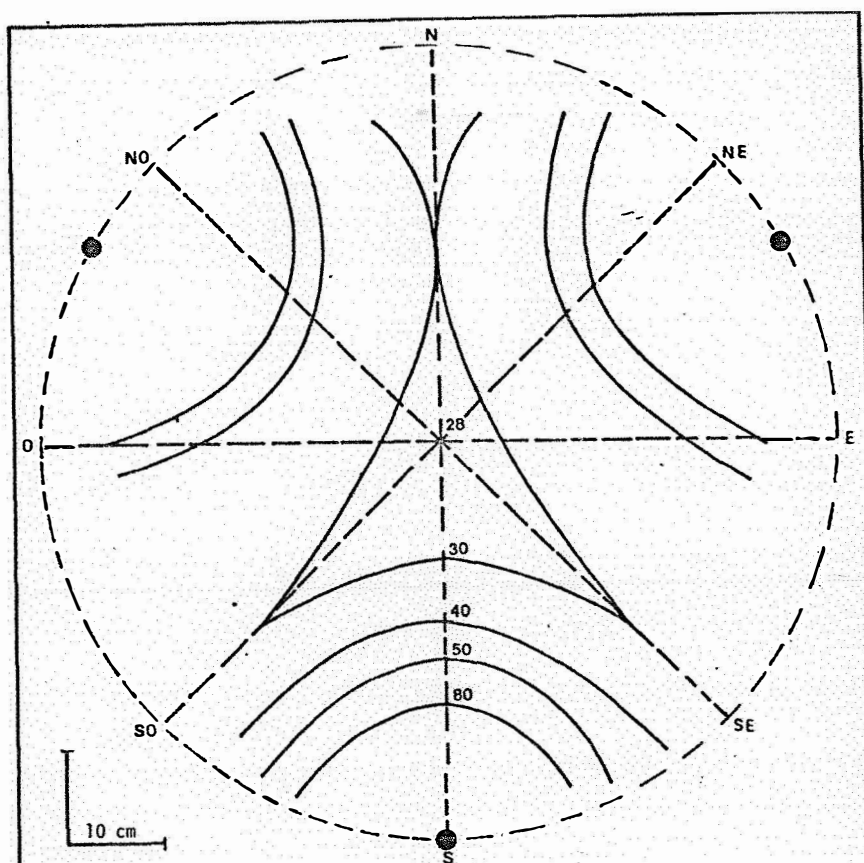


Figura 26 - Curvas de isodoses (em KR/h) no plano horizontal 0, com 3 tubos ativos e 84 cm de abertura (geometria IV).

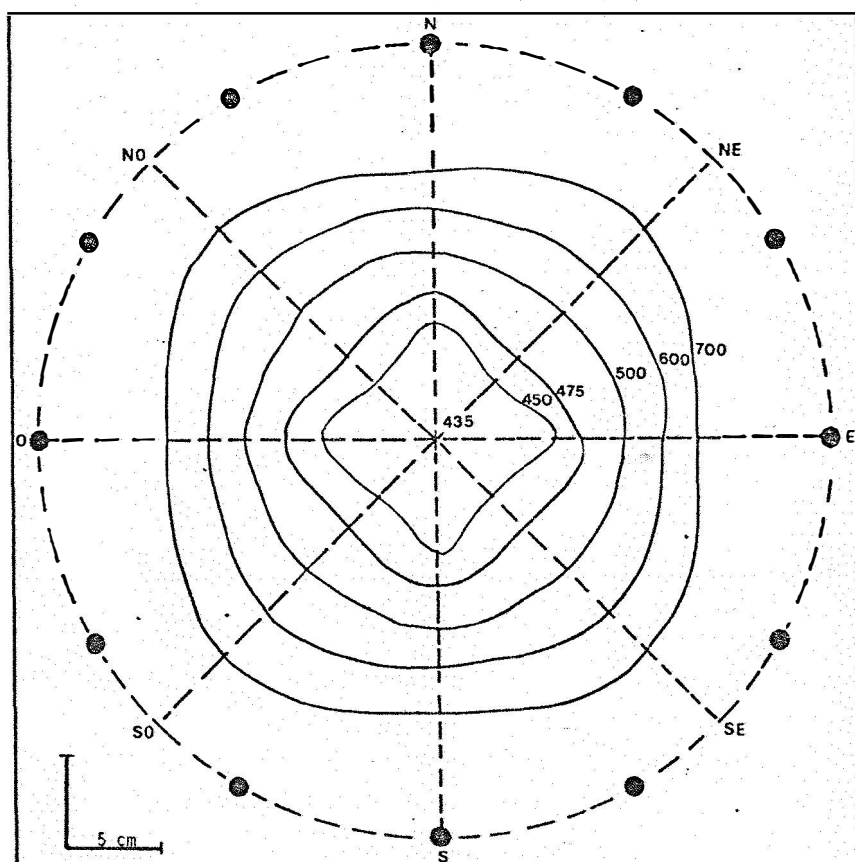


Figura 27 - Curvas de isodoses (em KR/h) no plano horizontal 0, com 12 tubos ativos e 42 cm de abertura (geometria V).

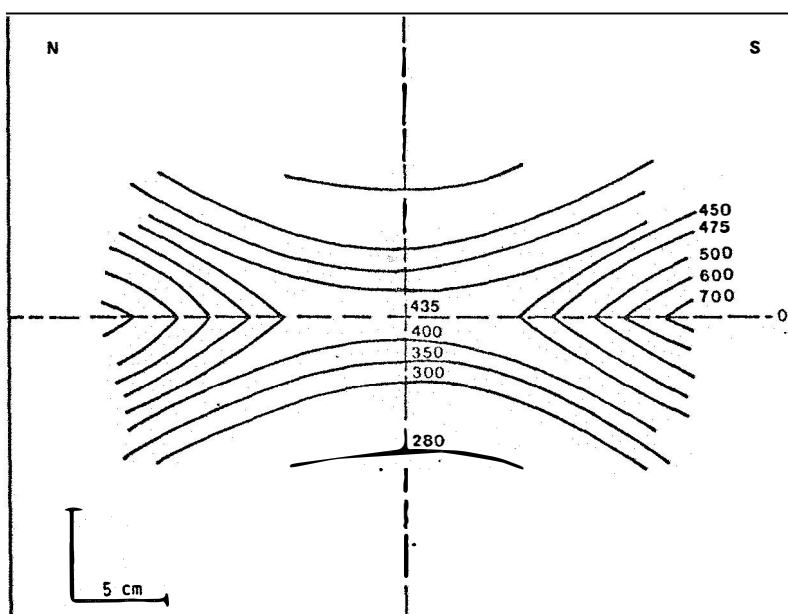


Figura 28 - Curvas de isodoses (em KR/h) no plano vertical N-S, com 12 tubos ativos e 42 cm de abertura (geometria V).

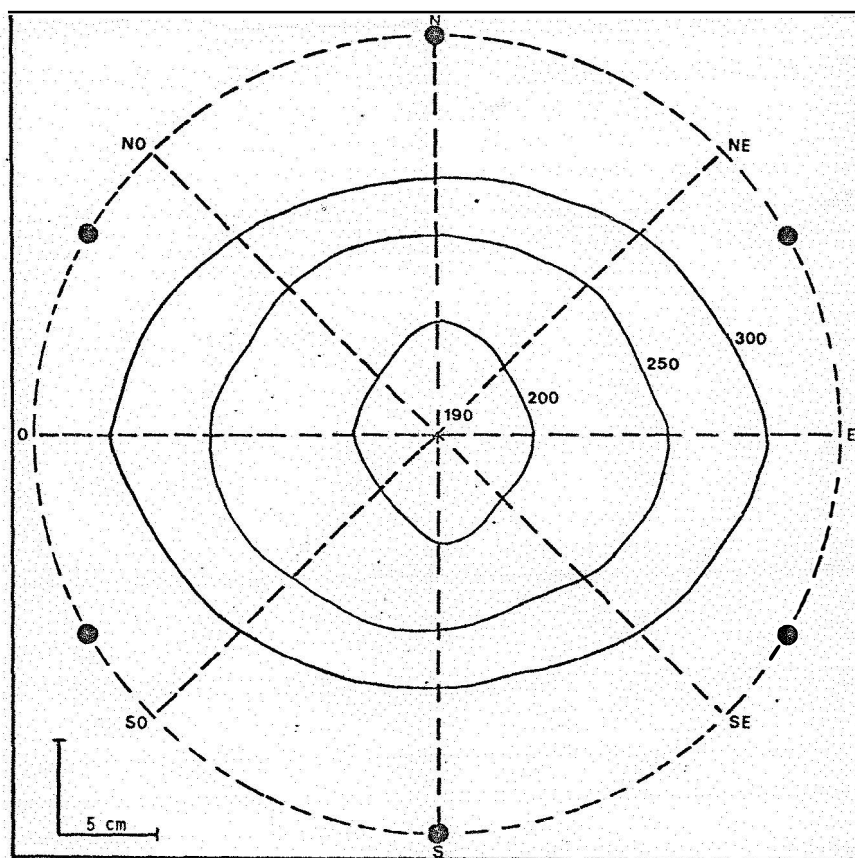


Figura 29 - Curvas de isodoses (em KR/h) no plano horizontal 0, com 6 tubos ativos e 42 cm de abertura (geometria VI).

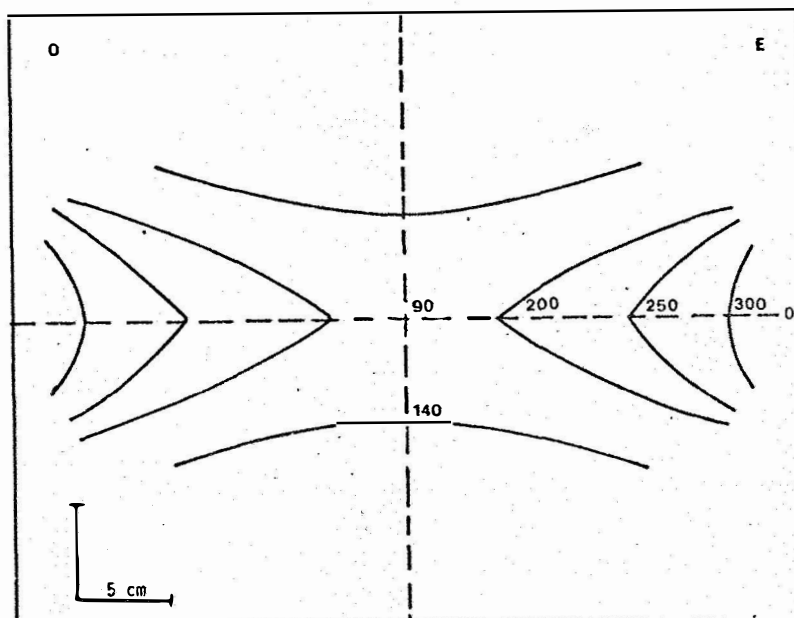


Figura 30 - Curvas de isodoses (em KR/h) no plano vertical O-E, com 6 tubos ativos e 42 cm de abertura (geometria VI).

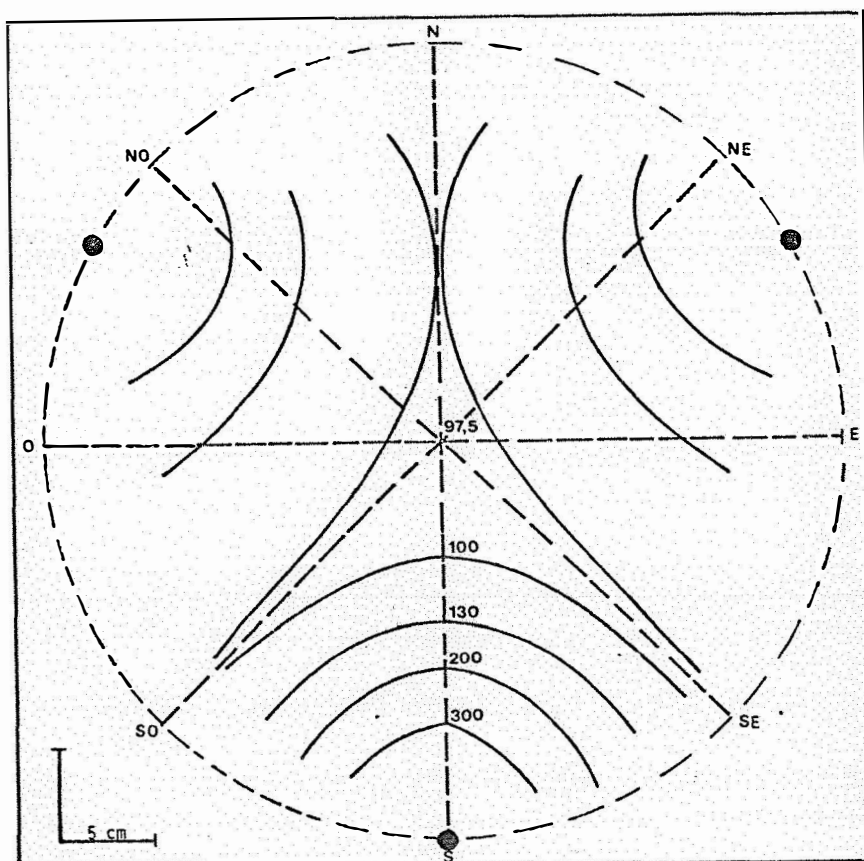


Figura 31 - Curvas de isodoses (em KR/h) no plano horizontal 0, com 3 tubos ativos e 42 cm de abertura (geometria VII)

Nos planos horizontais das diferentes geometrias utilizadas, as isodoses mais externas têm um formato aproximadamente circular, apresentando flutuações ao longo de seu contorno devido à distribuição discreta das fontes radioativas, e essas flutuações se invertem nas isodoses mais internas. Como a inversão é comum em todas as geometrias, será discutido a mais simples que é II (abertura de 84 cm e 12 tubos ativos), sendo a isodose no plano horizontal 0 representada na Figura 22.

Neste caso considerado, existe dois grupos de direções que são simétricas com relação à distribuição de fontes, ou seja, as direções S, O, N e E estão na linha de ação das fontes 1, 4, 7 e 10, respectivamente, com relação ao centro da cavidade, enquanto que as direções SO, NO, NE e SE estão entre os 8 tubos ativos restantes. Como os tubos ativos têm a mesma atividade, as taxas de exposição ao longo das duas direções quando representadas num mesmo gráfico em função da distância, deveriam resultar em curvas distintas, com maiores taxas na direção da linha dos tubos ativos e convergindo para uma mesma taxa de exposição no ponto central da cavidade. Tal fato não aconteceu, como pode ser observado na Figura 32 a qual ilustra a distribuição das taxas de exposição nas direções S e SO, representando cada um dos grupos de simetria.

A taxa de exposição na direção entre fontes (di

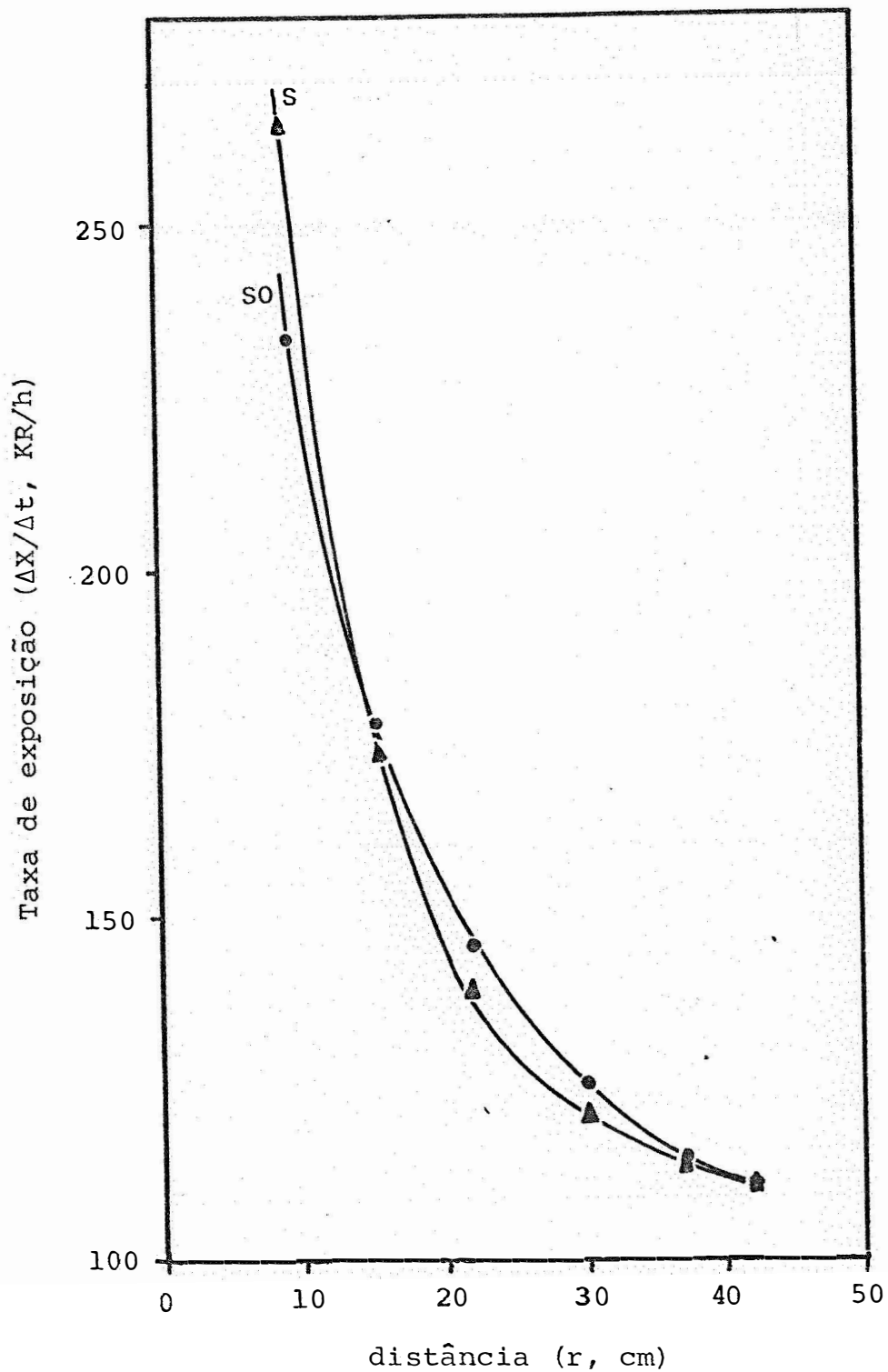


Figura 32 - Distribuição da taxa de exposição em função da distância ao longo das direções S e SO, com 12 tubos ativos e 84 cm de abertura (geometria II).

reção S0) decresce mais lentamente que na linha da fonte (direção S), havendo uma interceptação aproximadamente a 15 cm do círculo formado pelos tubos. À princípio pensou-se em efeito de espalhamento da radiação produzida principalmente na blindagem do irradiador, mas como este efeito é isotrópico devido ao formato circular da blindagem, influi igualmente em todas as direções. Posteriormente, uma inspeção visual rigorosa no conjunto de tubos ativos expositores, revelou que a linha que passa por tubos opostos não coincide com o eixo central da cavidade e isto pode causar distorções nas taxas de exposição ao longo das direções, acarretando inversão nas curvas de isodoses mais internas.

6. CONCLUSÕES

Da discussão dos resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que:

- 1) o dosímetro de *Fricke* confirmou ser preciso e simples de utilização nas medições das taxas de exposição;
- 2) cada um dos doze tubos ativos do irradiador contém três cápsulas de ^{60}Co , sendo a posição média das fontes na exposição 32 cm acima da plataforma de irradiação;
- 3) devido a distribuição uniforme de atividade das fontes, as curvas de isodoses na irra

dição panorâmica são simétricas em torno do eixo central do irradiador;

- 4) para o cálculo de taxa de exposição pode-se utilizar um dos três modelos teóricos apresentados, preferindo o de fonte pontual por ser o mais simples;
- 5) dentro da cavidade interna a forma das curvas de isodoses depende do número de tubos ativos;
- 6) na maioria das direções dentro da cavidade interna a taxa de exposição determinadas experimentalmente pôde ser correlacionadas com a distância através de uma regressão polinomial ao nível de 1 e 5% de significância.

7. SUMMARY : Dosimetry of a ^{60}Co - Gammabeam 650 irradiator

The main objective of this work was to make a survey of the isodose curves from the ^{60}Co -Gammabeam 650 source using the *Fricke* dosimeter.

In this equipment the radioactive sources in the lead shield are raised up to the point of exposure through 12 pneumatic tubes, radially arranged to form a cylinder with a diameter varying between 10 and 84 cm.

With the use a glass dosimeter, it was noted that each tube has three capsules of ^{60}Co , the mean position of these sources being 32 cm above the radiation table.

Since the possible geometries of radiation sources are infinite, seven of those most used in practice were selected,

with an internal exposure rates ranging from 1 KR/h to 1 MR/h (one geometry for panoramic radiation and six for the internal cavity).

Considering the routine use of the irradiator, an attempt was made to adjust a mathematical model to the geometries under study. In the panoramic irradiation the 12 active tubes form a circle 10 cm diameter, and the dosimeters were directionally arranged at 5 horizontal levels, so the resulting isodoses from these measurements were concentric circles around the central axis of the irradiator. Exposure rates for this radiation geometry were theoretically calculated using three mathematical models (linear source, three discrete point sources, and point source). With the corresponding correction for radioactive decay and absorption radiation all three models adjusted to experimental data, except those points close to the shield of the irradiator walls, floor and ceiling of the chamber. For routine work it is advisable to use the point source model, as this is the simplest one.

Six radiation geometries were considered within the internal cavity using 12, 6 and 3 active tubes making a circle with 84 and 42 cm diameter; and in this geometry the dosimeters were radiated in eight directions at five horizontal levels. The shape of the isodoses depends on the number of active tubes, being approximately concentric circles when 12 and 6 tubes are used. With three tubes the isodoses do not close within the cavity limits. Because it was not possible to fit the experimental

exposure rates in a mathematical model, they were related to distance using a polynomial regression; the significance of these regressions, for the majority of the directions was at 1 and 5% levels.

8. BIBLIOGRAFIA

ALLEN, A.O. e W.G. ROTHSCHILD, 1957. Studies in the Radiolysis of ferrous sulfate solutions. I. Effect of oxygen concentration in 0.8N Sulfuric Acid. Radiation Research, New York, 7: 591-602.

ALLEN, A.O., V.D. HOGAN e W.G. ROTHSCHILD, 1957. Studies in the Radiolysis of ferrous sulfate solutions. II. Effect of Acid Concentration in Solutions Containing Oxygen. Radiation Research, New York, 7: 603-608.

ANTA, M.C., 1961. Dosimetria de radiações por método químico. Revista Portuguesa de Química, Lisboa, 3: 95-98.

ATOMIC ENERGY OF CANADA LIMITED, 1970 . Instruction manual
Gammabeam 650 cobalt 60 irradiation type IR31. Ottawa. 3rd ed.
23p.

AUXIER, J.A., 1967. Special Methods in Radiation Dosimetry. IN:
MORGAN, K. & J.E. TURNER, eds. Principles of Radiation
Protection. New York, (s.ed.), cap. 7 p. 215-241.

BARR, N.F. & C.G. KING, 1956 . The γ - ray induced oxidation of
ascorbic acid and ferrous ion. J. Am. Chem. Soc., Easton,
78: 303-305.

BROSKIEWICZ, R.K., 1967. Chemical Dosimetry of Ionizing Radiation
IN I.A.E.A., eds. Solid State and Chemical Radiation
dosimetry in Medicine and Biology. Vienna, 1966. Anais,
Vienna, I.A.E.A., p. 213-237.

BURLIN, T.E. & F.K. CHAN, 1969. The effect of the wall on the
Fricke Dosemeter. Intern. J. Appl. Rad. Isotopes, Oxford,
20: 767-775.

BURLIN, T.E. & F.K. CHAN, 1971. Physical Measurements on a ^{60}Co
Irradiation Unit. Intern. J. Appl. Rad. Isotopes, Oxford,
22: 73-83.

CHAPPEL, D.G., 1956. Gamma-Ray Attenuation. Nucleonics, New York,
14: 40-42.

CORMACK, D.V., R.W. HUMMEL, A.E. JOHNS e J.W.I. SPINKS, 1954.

Irradiation of ferrous ammonium sulfate solutions: Energy Absorption and Ionization Calculation for Cobalt 60 and Betatron radiation. J. Chem. Phys., New York, 23: 162-164.

DAITON, F.S. e SUTTON, H.C., 1953. Hydrogen peroxide formation in the oxidation of sulfate by ionizing radiation. J. Chim. Soc. 49: 1011-1025.

DAVIES, J.V., D. GREENE, J.P. KEENE, J. LAW e J.B. MASSEY, 1963.

A comparison of ionization, calorimetric, and ferrous sulfate dosimetry. Phys. Med. Bio., Bristol, Eng., 8: 97-104.

DAVISON, S., S.A. GOLDBLITH, E.B. PROCTOR, M.KARGL, B.KAN e C.J.

BATGS, 1953. Dosimetry of a Kilocurie Cobalt - 60 Source Nucleonics, New York, 7: 22-26.

DEWHURST, H.A., 1952. Effect of aliphatic alcohols on the γ ray oxidation of aerated aqueous ferrous sulfate. J. Chem. Soc. 48: 905-909.

DEWHURST, H.A., 1953. The X - and γ ray induced oxidation of ferrous sulfate in aqueous solution. J. Chem. Soc. Far. Trans. 49: 1174-1190.

DICKSON, H.W. e G.D. KERR, 1975. Dose Rates from Plane Sources of Gamma Rays. Health Physics, Oxford, Eng., 29: 131-134.

- DILLMAN, L.T., 1969. Radionuclide decay schemes an nuclear parameter. Journal of Nuclear Medicine, New York, 10:7-32.
- DONALDSON, D.M. e N.MILLER, 1955. Études quantitatives de réactions radiochimiques. III.Oxidation de sulfate ferreus par les particules β . J. Chem. Phys., New York, 52: 578-585.
- DONALDSON, D.M. e N.MILLER, 1958. Radical Yield Measurements in Irradiated Aqueous Solutions.I.Radical Yields with Co^{60} Gamma Radiation. Radiation Research, 9: 487-497.
- DRAGANIC, I., N.W. HOLM e J.E. MAUL, 1961. Laboratory manual for some high leve chemical dosimeters - ferrous sulphate, ceric sulphate, oxalic acid, and polyvinyl foils. Denmark. Risø Report, N: 22, p. 1-26.
- EWING, G.W., 1972. Métodos Instrumentais de Análise Química. São Paulo, Edgar Bucher Ltda. 514p.
- FOLDIAK, G., Z. HORVATH e V. STENGER, 1973.Routine dosimetry for Higt-Activity Gamma - irradiation facilities. IN: I.A.E.A. eds. Dosimetry in Agriculture, Industry, Biology and Medicine. Vienna, 1972. Anais.Vienna, I.A.E.A., p. 367-381.
- FRICKE, H. e S. MORSE,1927. The action of X - rays on ferrous sulfate solutions.Phil. Mag, (S.L.) 78: 129-141.
- FRICKE, H. e E.J. HART, 1966. Chemical Dosimetry. In: ATTIX, F.G. e W.C. ROESCH, eds. Radiation Dosimetry. New York, Academic Press, v. 2, cap. 12, p. 167-239.

- HARDWICK, T.J., 1952. The oxidation of ferrous sulphate solutions by γ - rays - The absolute yield. Can. J. Chem., Ottawa, 30: 17-22.
- HART, E.J., 1952. Mechanism of the γ ray induced chain oxidation of aqueous ferrous sulphate - formic acid oxygen solutions. J. Am. Chem. Soc., Easton, 74: 4174-4178.
- HAYBITTLE, J.L., R.D. SAUNDERS A.J. SWALLOW, 1956. X and γ irradiations of iron sulphate. J. Chem. Phys. New York, 25: 1213-1217.
- HENDERSEN, C.M. e N. MILLER, 1964. A study of the extinction coefficient for ferric and ceric ions. Radiation Research, New York, 13: 641-642.
- HINE, G.J. e G.L. BROWNELL, eds., 1958. Radiation Dosimetry. New York, Academic Press., 752p.
- HOCHANADEL, C.J. e J.A. GHORMLEY, 1953. A calorimetric calibration of Gamma-Ray actinometers. J. Chem. Phys., New York, 21: 880-885.
- HOCHANADEL, C.J. e J.A. GHORMLEY, 1962. Effect of temperature on the decomposition of water by Gamma ray. Radiation Research, New York, 16: 653-655.

- HOLM, N.W., A. BRYNJOLFSSON e J.E. MAUL, 1961. Absolute measurements on the Co^{60} irradiation facility at Risø. In: I.A.E.A. Selected Topics in Radiation Dosimetry. Vienna, 1960.
- HUFFMAN, R.E. e N. DAVIDSON, 1956. Kinetics of the ferrous iron-oxygen reaction in sulfuric acid solutions. J. Am. Chem. Soc., 78: 4836-4842.
- JAYSON, G.G., B.J. PARSONS e A.J. SWALLOW, 1975. The Mechanism of the Fricke Dosimeter. Int. J. Radiat. Phys. Chem., New York, 7: 363-370.
- KEENE, J.P. e J. LAW, 1963. A determination of the G value of ferrous sulfate for ^{60}Co radiation using calorimetric dosimetry. Phys. Med. Biol. Bristol, Eng., 8: 83-88.
- KURIEM, K.C. e P.V. BURTON, 1959. Radiolysis of aqueous solutions of Benzene and of Phenol. Radiation Research, New York, 11: 283-290.
- LAZO, R.M., H.A. DEWHURST e M. BURTON, 1954. The ferrous sulfate radiation dosimeter, a calorimetric calibration with Gamma rays. J. Chem. Phys., New York, 22: 1370-1375.
- LEWIS, J.G., J.V. NEHEMIAS, D.E. HARMER e J.J. MARTIN, 1954. Analysis of Radiations fields of two Gamma Radiation Sources. Nucleonics, New York, 12: 40-44.

MANOWITZ, B., R.H. BRETTON, L. GOLANTER e F.X. RIZZO, 1964.

Computational Methods of Gamma Irradiator Design. Brookhaven National Laboratory, 889 (4.361).

MILLER, H. 1953. Chemical dosimetry at high dose rates. Nature, Hampshire, 171: 688-694.

MOTTE, F.G. 1961. Solving Design Problems for food Irradiators. I, Dose Rates from Rectangular Plaques. Nucleonics, New York, 7: 102.

NOVOTNY, J. e Z. SPURNY, 1968. G(Fe³⁺) yield of the Fricke - Miller ferrous sulphate dosimeter for 60 KeV X - rays from an X - ray tube. Intern. J. Appl. Rad. Isotopes, Oxford, 19: 403-406.

OLLER, W., D.F. MENKER e M. DAUR, 1969. Evaluation of the dosimeter with other dosimeter systems. Health Physics, Oxford, 17: 653-659.

OSVAY, M., V. STENGER e G. FOLDIAK, 1975. Silicon Detectors for Measurement of High Exposure rate Gamma rays. IN: I.A.E.A.eds. Biomedical Dosimetry, Vienna, 1975. Anais. Vienna, I.A.E.P., P. 623-631.

PEISACH, M. e J. STEYN, 1960. Radiolytic oxidation of ferrous solutions with standardized internal sources of phosphorus-32. Nature, Hampshire, 187: 58-65.

PETTERSON, C. e G. HETTINGER, 1967. Dosimetry of High Energy electron Radiation Based on the ferrous sulphate dosimeter. Acta radiologica Ser. 2: therapy, Physics, Biology. Stockholm, 6: 160-176.

RAB MOLLA, A.M., S.A. ABDULLAH e F.KARIN , 1969. Calibration of A 520 Ci Cobalt 60 Source. Health Physics, Oxford, 16: 135-143.

RALSTON, A.e H.S. WILF, 1960. Mathematical Methods for Computers. New York, John Wiley and Sons. Inc. p. 197-202.

RAZEM, D. e I. DVORNIK, 1973. Application of the Ethanol - chloro benzene dosimeter to electron-beam and Gamma - radiation dosimetry : Cobalt-60 gamma rays. In: I.A.E.A., eds. Dosimetry in Agriculture, Industry, Biology and Medicine.p. 405 - 412.

RITZ, H.V. e F.H. ATTIX, 1962. An ionization chamber of kilocurie source calibration. Radiation Research, New York, 16: 401-406.

ROTHSCHILD, W.G. e A.O. ALLEN, 1958. Studies in the Radiolysis of ferrous sulfate solutions. III. Air free at Higher pH. Radiation Research, New York, 8: 101-110.

SCHARF, K. e R.M. LEE, 1962. Investigation of the Spectrophotometric Method of Measuring the Ferric Ion Yield in the ferrous sulfate Dosimeter. Radiation Research, 16: 115-124.

WEISS, J., W. BERNSTEIN e J.B.H. KUPER, 1954. Absolute yield of the ferrous sulfate oxidation reaction. J. Chem. Phys., New York, 22: 1593-1596.

WEISS, J., A.O. ALLEN e H.A. SCHWARZ, 1956. Use of the Fricke sulfate dosimeter for gamma ray doses in the range 4 to 40 kiloroentgen. International Conference Peaceful Uses Atomic Energy, Genebra, 1955. Proceedings. New York, Columbia University Press (I.D.S.), v. 14, p. 155-179.

- SCHULER, R.H. e A.O. ALLEN, 1956. Yield of the ferrous sulfate radiation dosimeter: an improved cathode-ray determination. J. Chem. Phys., New York, 24: 56-62.
- SCHWARZ, H.A. 1954. Temperature coefficient of the radiation induced oxidation of ferrous sulfate. J. Am. Chem. Soc. Easton, 76: 1587-1588.
- SHALEK, R.J., W.K. SINCLAIR e J.C. CALKINS, 1962. The relative biological effectiveness of 22-Mevp X-rays, Cobalt-60 Gamma rays, and 200-Kucp X-rays.II. The use of the ferrous sulfate dosimeter for X-ray and Gamma-Ray Beam . Radiation Research. New York, 16: 344-351.
- SPIEGEL, R.M., 1971 . Cálculo avançado. Rio de Janeiro, McGraw-Hill, p. 289-334.
- SVENSSON, H. e C. PETERSON, 1967. Absorbed dose calibration of thimble chamber with hig energy eletron of different phantom depts. ARKIV för Fysik, 34: 377-383.
- VERESHCHINSKII, I.V. e A.K. PIKAEV, 1964. Chemical dosimetry of ionizing. In: Introduction to Radiation Chemistry. Israel, cap. 9, p. 271-320.
- WEISS, J., 1952. Chemical dosimetry using ferrous and ceric sulfate. Nucleonics, New York, 10: 28-31.

A P Ê N D I C E

APÊNDICE

Devido a sua grande utilização em caráter rotineiro, foi também determinada a taxa de exposição no ponto central da cavidade (a 32 cm acima da plataforma de irradiação) em função do diâmetro do círculo formado pelos 12 tubos ativos. As determinações experimentais foram feitas com 3 repetições seguindo-se a metodologia descrita no item 4.4., e as taxas de exposição, calculadas para o dia 19 de maio de 1977, são mostradas na Tabela 1.A e Figura 1.A.

O manual de instruções de operação do irradiador *Gammabeam - 650* (ATOMIC ENERGY OF CANADA LIMITED, 1970) mostra um gráfico linear de taxa de exposição por unidade de atividade ($\text{KR.h}^{-1}.\text{Ci}^{-1}$) versus diâmetro entre fontes para o ponto central da cavidade. Desse modo, foi possível através de cotações gráficas, estimar a taxa de exposição para vários diâmetros entre fontes, calculando-se previamente a atividade em 19 de maio de 1977 a partir da nominal de 29080 Ci em 19 de abril de 1974. Essas taxas estimadas são também mostradas na Tabela 1.A, variando relativamente pouco em relação à determinada experimentalmente.

Um outro dado que vem confirmar os nossos resultados, é uma determinação experimental feita no próprio irradiador em questão, realizada pela Atomic Energy of Canada

Limited. Assim, conforme descrição dada no certificado de medida fornecido pela firma, foi obtido em 9 de abril de 1977, a taxa de exposição de 1225,7 KR/h no ponto central da cavidade com 30 cm de diâmetro entre fontes. Corrigindo-se o decaimento, a taxa de exposição em 1º de maio de 1977 é de 816,6 KR/h, valor muito próximo a 807,6 KR/h, determinado por nós experimentalmente.

Tabela 1.A. - Taxas de exposição no ponto central (32 cm acima da plataforma de irradiação) em função do diâmetro do círculo formado pelos 12 tubos ativos.

Diâmetro (r, cm)	Taxa de exposição ($\Delta X/\Delta t$, KR/h)		Variação ^{c/} (%)
	experimental ^{a/}	Estimada ^{b/}	
11	3631,1	3637	+ 0,16
20	1591,3	1526	- 4,10
30	807,6	830	+ 2,77
35	609,8	632	+ 3,64
40	483,7	506	+ 4,61
45	388,9	401	+ 3,11
50	321,2	320	- 0,37
55	266,8	260	- 2,55
60	226,5	224	- 1,10
65	193,9	186	- 4,07
70	167,6	758	- 5,73
80	131,1	127	- 3,13
84	116,8	-	-

^{a/} média de 3 repetições

^{b/} a partir de dados fornecidos pelo manual de operação do irradiador.

^{c/} = $\frac{\text{estimada} - \text{experimental}}{\text{experimental}} \cdot 100$

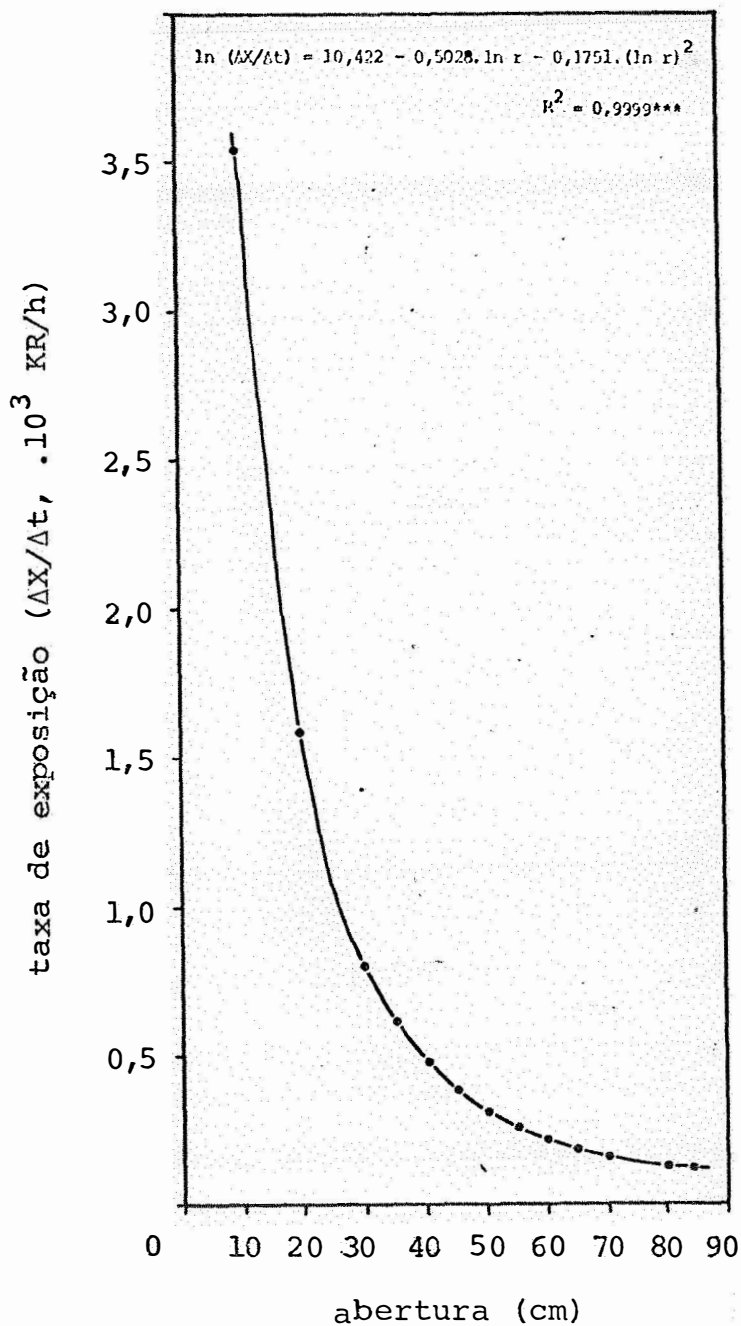


Figura 1.A - Taxa de exposição no ponto central da cavidade (32 cm acima da plataforma de irradiação) em função do diâmetro do círculo formado pelos 12 tubos ativos.