



**AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO**

**DOSIMETRIA COM MATERIAIS RADIOCRÔMICOS EM
FEIXES DE ELÉTRONS ACELERADOS - PROCESSOS
DE IRRADIAÇÃO COM DOSES ALTAS**

ROSEMEIRE EVANGELISTA DA SILVA

**Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Reatores Nucleares de Potência e
Tecnologia do Combustível Nuclear.**

**Orientadora:
Dra. Bárbara Maria Rzycki**

**São Paulo
2000**

**DOSIMETRIA COM MATERIAIS RADIOCRÔMICOS EM
FEIXES DE ELÉTRONS ACELERADOS – PROCESSOS DE
IRRADIAÇÃO COM DOSES ALTAS**

ROSEMEIRE EVANGELISTA DA SILVA



**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para a obtenção do grau de
“Mestre em Ciências” na área de Tecnologia
Nuclear.**

Orientadora :

Dra. Bárbara Maria Rzycki

São Paulo

2000

Aos meus pais, irmãos e meus queridos sobrinhos Lucas,
Daniella e Leandro.

E a todos que de uma forma ou outra fizeram parte da
minha vida durante a elaboração deste trabalho.

Quem pode entender os próprios erros?

Expurga-me tu dos que me são ocultos.

(Salmos 19, vs.12)

Agradecimentos

Agradeço ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, na pessoa do seu superintendente Dr. Cláudio Rodrigues pela possibilidade oferecida para a realização deste trabalho. Este agradecimento estende-se ao Dr. Roberto Fúlfaro, chefe da Diretoria T, ao Sr. Wanderley de Lima chefe da Coordenadoria TE e ao Dr. Leonardo G. Andrade e Silva, chefe da Divisão TEP.

Sou muito grata à **Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP)**, pela bolsa de estudos e pelo apoio financeiro que me permitiram realizar este trabalho de Mestrado e pelas sugestões durante a correção dos relatórios semestrais.

Agradeço à Dra. Bárbara M. Rzycki, pela dedicada orientação durante a execução desta dissertação, pela amizade e pelos conselhos úteis.

Os meus agradecimentos estendem-se também:

Ao Eng^o Carlos Gaia da Silveira e Eng^a Elizabeth S. R. Somessari da Coordenadoria de Aplicações na Engenharia e na Indústria, pelas constantes ajudas durante as irradiações realizadas neste trabalho.

À Dra. Linda V. E. Caldas, Presidente da Comissão de pós-graduação do IPEN, e à Dra. Letícia L. Campos, pelas valiosas sugestões.

E a todos os amigos que direta ou indiretamente colaboraram na realização deste trabalho.

Agradeço especialmente à minha mãe, Maria Lizete da Silva, pela sua compreensão, carinho e apoio, que foram indispensáveis nesta fase de minha vida.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | Objetivos..... | 5 |
| 2 | PROCESSAMENTO DE MATERIAIS POR IRRADIAÇÃO | 7 |
| 2.1 | Interação dos elétrons com a matéria..... | 7 |
| 2.1.1 | Poder de freamento..... | 10 |
| 2.1.2 | Alcance dos elétrons..... | 11 |
| 2.2 | Interação da radiação gama com a matéria..... | 15 |
| 2.3 | Dosimetria das radiações..... | 17 |
| 2.3.1 | Grandezas e unidades..... | 19 |
| 2.3.1.1 | Dose Absorvida..... | 19 |
| 2.3.1.2 | Taxa de dose absorvida..... | 20 |
| 2.3.1.3 | Dose absorvida em outros meios..... | 21 |
| 2.3.2 | Materiais dosimétricos..... | 21 |
| 2.3.2.1 | Sistemas padrões e instrumentos de referência..... | 22 |
| 2.3.3 | Dosimetria em processos de irradiação..... | 24 |
| 2.3.4 | Propriedades de dosímetros..... | 26 |
| 2.3.5 | Materiais radiocrômicos..... | 26 |
| 2.3.6 | Espectrofotometria..... | 28 |
| 2.3.7 | Aceleradores de elétrons..... | 31 |
| 3 | MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS | 33 |
| 3.1 | Filmes radiocrômicos utilizados..... | 33 |
| 3.1.1 | Triacetato de celulose – CTA..... | 33 |
| 3.1.2 | Cloreto de polivinila – PVC..... | 33 |
| 3.1.3 | Polimetil metacrilato – PMMA – red perspex..... | 34 |
| 3.1.4 | Gafchromic HD-810..... | 34 |
| 3.1.5 | Sunna..... | 34 |
| 3.1.6 | Amino trifenil metano - FWT-6020..... | 35 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.2 | Espectrofotômetro..... | 35 |
| 3.3 | Acelerador de elétrons..... | 37 |
| 3.4 | Fonte de ⁶⁰ Co – Gammacell 220..... | 38 |
| 3.5 | Micrômetro..... | 39 |
| 3.6 | Estufa..... | 39 |
| 4 | PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS..... | 40 |
| 4.1 | Irradiação na acelerador de elétrons..... | 40 |
| 4.2 | Análise espectrofotométrica..... | 46 |
| 4.3 | Preparo dos filmes para irradiação..... | 46 |
| 4.4 | Irradiação na fonte de ⁶⁰ Co – Gammacell 220..... | 47 |
| 4.5 | Determinação do alcance dos elétrons e energia do feixe de elétrons..... | 48 |
| 4.6 | Escolha do material suporte para irradiação no acelerador de elétrons..... | 49 |
| 4.7 | Curva de calibração..... | 49 |
| 4.8 | Determinação da influência dos fatores ambientais no filme dosimétrico..... | 49 |
| 4.9 | Determinação do limite inferior de detecção da radiação..... | 50 |
| 4.10 | Determinação da uniformidade do feixe de elétrons..... | 51 |
| 4.11 | Determinação da variação da dose em função da distância entre o dosímetro e a janela de titânio do acelerador de elétrons | 52 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 53 |
| 5.1 | Cálculo da dose por passada sob o feixe no acelerador de elétrons..... | 53 |
| 5.2 | Escolha do material suporte para irradiações no acelerador de elétrons..... | 55 |
| 5.3 | Caracterização do filme CTA para aplicação em dosimetria das radiações. | 56 |
| 5.3.1 | Determinação do comprimento de onda ótimo para leitura espectrofotométrica | 56 |
| 5.3.2 | Curva de calibração..... | 57 |
| 5.3.3 | Determinação do limite inferior de detecção da radiação..... | 60 |
| 5.3.4 | Influência das condições ambientais..... | 61 |
| 5.3.4.1 | Luz..... | 61 |
| 5.3.4.2 | Temperatura..... | 62 |
| 5.3.4.3 | Umidade..... | 63 |
| 5.3.5 | Avaliação da resposta do filme CTA para diferentes energias e mesma corrente..... | 64 |
| 5.3.6 | Avaliação da resposta do filme CTA para diferentes correntes e mesma energia..... | 65 |

| | | |
|---------|--|----|
| 5.3.7 | Avaliação da resposta do filme CTA para diferentes velocidades da bandeja mantendo-se fixas a energia e a corrente..... | 66 |
| 5.3.8 | Avaliação da resposta do filme CTA para diferentes larguras do feixe de elétrons com a mesma energia e corrente..... | 67 |
| 5.3.9 | Determinação da uniformidade do feixe de elétrons..... | 68 |
| 5.3.10 | Avaliação da resposta do filme CTA para diferentes sistemas de irradiação | 69 |
| 5.3.11 | Avaliação da resposta do filme CTA para diferentes distâncias entre o dosímetro e a janela de titânio do acelerador de elétrons..... | 70 |
| 5.3.12 | Penetração dos elétrons e determinação da energia dos elétrons..... | 71 |
| 5.3.13 | Simulação de irradiações rotineiras de diversos materiais..... | 73 |
| 5.4 | Caracterização do filme PVC para aplicação em dosimetria das radiações | 78 |
| 5.4.1 | Determinação do comprimento de onda ótimo para leitura espectrofotométrica..... | 78 |
| 5.4.2 | Curva de calibração..... | 78 |
| 5.4.3 | Determinação do limite inferior de detecção da radiação..... | 80 |
| 5.4.4 | Influência das condições ambientais..... | 81 |
| 5.4.4.1 | Luz..... | 81 |
| 5.4.4.2 | Temperatura..... | 82 |
| 5.4.4.3 | Umidade..... | 82 |
| 5.4.5 | Avaliação da resposta do filme PVC com o uso de diferentes energias para a mesma corrente..... | 83 |
| 5.4.6 | Avaliação da resposta do filme PVC para diferentes sistemas de irradiação..... | 84 |
| 5.5 | Caracterização do filme PMMA – Red perspex para aplicação em dosimetria das radiações..... | 85 |
| 5.5.1 | Determinação do comprimento de onda ótimo para leitura espectrofotométrica..... | 85 |
| 5.5.2 | Curva de calibração..... | 85 |
| 5.5.3 | Determinação do limite inferior de detecção da radiação..... | 87 |
| 5.5.4 | Influência das condições ambientais..... | 88 |
| 5.5.4.1 | Luz..... | 88 |
| 5.5.4.2 | Temperatura..... | 89 |
| 5.5.4.3 | Umidade..... | 89 |
| 5.5.5 | Avaliação da resposta do filme red perspex para diferentes sistemas de irradiação..... | 90 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 5.6 | Caracterização do filme FWT - 6020 para aplicação em dosimetria das radiações | 91 |
| 5.6.1 | Determinação do comprimento de onda ótimo para leitura espectrofotométrica | 91 |
| 5.6.2 | Curva de calibração..... | 92 |
| 5.6.3 | Determinação do limite inferior de detecção da radiação..... | 95 |
| 5.6.4 | Influência das condições ambientais..... | 96 |
| 5.6.4.1 | Luz..... | 96 |
| 5.6.4.2 | Temperatura..... | 97 |
| 5.6.4.3 | Umidade..... | 97 |
| 5.6.5 | Avaliação da resposta do filme FWT-6020 com o uso de diferentes energias para a mesma corrente..... | 99 |
| 5.6.6 | Avaliação da resposta do filme FWT-6020 para diferentes sistemas de irradiação..... | 100 |
| 5.7 | Caracterização do filme HD - 810 para aplicação em dosimetria das radiações | 101 |
| 5.7.1 | Determinação do comprimento de onda ótimo para leitura espectrofotométrica | 101 |
| 5.7.2 | Curva de calibração..... | 101 |
| 5.7.3 | Determinação do limite inferior de detecção da radiação..... | 103 |
| 5.7.4 | Influência das condições ambientais..... | 104 |
| 5.7.4.1 | Luz..... | 104 |
| 5.7.4.2 | Temperatura..... | 104 |
| 5.7.4.3 | Umidade..... | 105 |
| 5.7.5 | Avaliação da resposta do filme HD - 810 para diferentes energias e mesma corrente..... | 106 |
| 5.7.6 | Avaliação da resposta do filme HD - 810 para diferentes sistemas de irradiação..... | 107 |
| 5.8 | Caracterização do filme Sunna para aplicação em dosimetria das radiações | 108 |
| 5.8.1 | Determinação do comprimento de onda ótimo para leitura espectrofotométrica. | 108 |
| 5.8.2 | Curva de calibração..... | 109 |
| 5.8.3 | Determinação do limite inferior de detecção da radiação..... | 111 |
| 5.8.4 | Influência das condições ambientais..... | 112 |
| 5.8.4.1 | Luz..... | 112 |
| 5.8.4.2 | Temperatura..... | 113 |
| 5.8.4.3 | Umidade..... | 113 |
| 5.8.5 | Avaliação da resposta do filme Sunna para diferentes energias e mesma corrente..... | 114 |
| 5.8.6 | Avaliação da resposta do filme Sunna para diferentes sistemas de irradiação | 114 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.9 | Comparação da resposta dos filmes radiocrômicos para fins de aplicação em dosimetria rotineira no acelerador de elétrons..... | 115 |
| 6 | CONCLUSÕES..... | 118 |
| | ANEXO I..... | 122 |
| | ANEXO II..... | 127 |
| | ANEXO III..... | 128 |
| | ANEXO VI..... | 129 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 130 |

DOSIMETRIA COM MATERIAIS RADIOCRÔMICOS EM FEIXES DE ELÉTRONS ACELERADOS – PROCESSOS DE IRRADIAÇÃO COM DOSES ALTAS

Rosemeire Evangelista da Silva

RESUMO

Este trabalho, foi dedicado ao estudo das características dosimétricas principais de filmes radiocrômicos, como CTA (triacetato de celulose não colorido), FWT (nylon colorido), PMMA (polimetilmetacrilato Red Perspex 4034), PVC (polyvinylchloride), HD-810 (plástico colorido) e Sunna (plástico não colorido). O estudo foi efetuado para verificar a possibilidade de aplicar aqueles filmes em dosimetria de rotina no acelerador de elétrons, cuja energia varia entre 0,8 MeV e 1,5 MeV e corrente de 0,3 mA a 15 mA. Este estudo foi estendido para a intercomparação da resposta de algumas características dosimétricas com aquelas alcançadas em irradiações com raios gama do ^{60}Co . Todos os resultados foram considerados positivos porque os filmes podem ser usados em dosimetria de rotina para elétrons acelerados e raios gama do ^{60}Co . Os filmes radiocrômicos podem ser aplicados para o controle de qualidade no processo de irradiação junto com equações matemáticas, desenvolvidas por Szulak, que envolvem parâmetros operacionais do equipamento que são fixados de modo a alcançar a dose requerida pelo pesquisador ou cliente. A limitação destas equações também é discutida neste trabalho.

DOSIMETRIA COM MATERIAIS RADIOCRÔMICOS EM FEIXES DE ELÉTRONS ACELERADOS – PROCESSOS DE IRRADIAÇÃO COM DOSES ALTAS

Rosemeire Evangelista da Silva

ABSTRACT

This work was dedicated to study the main dosimetric characteristics of radiochromic films as CTA (undyed cellulose triacetate), FWT (dyed nylon), PMMA (polymethylmethacrilate Red Perspex 4034), PVC (polyvinylchloride), HD-810 (dyed plastic), Sunna (undyed plastic). The study was performed in order to verify the possibility of those film applications for routine dosimetry in an electron accelerator which energy varies between 0,8 MeV to 1,5 MeV and current from 0,3 mA to 15 mA. This study was extended for intercomparison of some dosimetric characteristics responses with that achieved with ^{60}Co gamma rays irradiations. All results were considered positive since the films can be used in routine dosimetry for accelerated electrons and ^{60}Co gamma rays. Radiochromic films can be applied in irradiation process quality control together with mathematical equations, developed by Szulak, that involve operational equipment parameters that are fixed in order to achieve the required dose ordered by the researcher or client. These equations limitation is also discussed in this work.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A dosimetria das radiações, que significa a medida da dose, é fundamental em todos os processos de irradiação porque permite que um processo seja desenvolvido no laboratório, transferido para uma aplicação industrial e finalmente usado no controle rotineiro, de modo que qualquer irradiação possa estar de acordo com os padrões estabelecidos no processo de medida da dose. A dosimetria torna possível o controle dos processos de irradiação e possibilita determinar, com precisão e exatidão, a dose nos produtos irradiados antes que eles sejam usados nas diversas áreas da vida humana.

A dosimetria das radiações é praticada há quase um século e é a forma de se associar a quantidade de radiação à qual um produto é exposto, com o efeito físico-químico produzido nesse produto. A dosimetria pode ser feita de diversas formas e entre elas usando materiais radiosensíveis, sólidos ou líquidos. Os materiais sólidos, mais comuns, podem ser encontrados na forma de filmes, que são produtos fabricados com espessuras menores que 3 mm e com várias dimensões superficiais. Filmes sensíveis à radiação e que possuam algum tipo de composto químico que lhes proporcione qualidades para ser usado em dosimetria, são denominados radiocrômicos.

Os materiais radiocrômicos têm sido usados desde a década de 60 [14] e podem ser adquiridos no comércio externo com facilidade. Inicialmente eram produzidos na forma de filmes plásticos como o nylon, sem aditivos e com qualidades dosimétricas razoáveis. Mais tarde, já na década de 70, foram comercializados filmes com características mais vantajosas por conter corantes como o leucometóxido de trifenilmetano, que permitiu alargar a faixa de dose absorvida.

Desde então, vários corantes tem sido usados na produção dos materiais radiocrômicos e alguns deles podem ser sensíveis não só à radiação mas também à luz ultravioleta.

Na década de 80, foram lançados filmes radiocrômicos mais modernos, cujo corante, à base de pararosanilina [14, 16, 18, 26], proporcionou sensibilidade à doses abaixo de 1 kGy. Este filmes podem ser usados em pesquisa e desenvolvimento, em instalações onde se irradia, por exemplo, produtos biológicos que requerem doses bem baixas.

Desde então, as diferenças entre os diversos tipos de materiais radiocrômicos produzidos hoje em dia, que podem ser usados em diferentes aplicações dosimétricas, são por vezes sutis. As particularidades baseiam-se, por exemplo, em densidade próxima a 1 g.cm^{-3} , sensibilidade ou não à luz UV [25], resistência às mudanças atmosféricas como temperatura e umidade relativa do ar. A maioria é produzida para aplicação na dosimetria em campos gama, mas o uso em instalações com feixes de elétrons acelerados é perfeitamente possível, desde que se determine as suas características neste campo de radiação, onde as taxas de dose são muito altas.

Em 1978, foi instalado na Coordenadoria de Aplicações na Engenharia e na Indústria, TE, do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, um acelerador linear de elétrons da marca Radiation Dynamics Inc. (RDI), modelo Dynamitron Job 188, que emite elétrons acelerados com energia máxima de 1,5 MeV, corrente máxima de 25 mA, potência de 37,5 kW e varredura do feixe de elétrons entre 60 e 112 cm. O objetivo desta instalação é usar feixes de elétrons para a vulcanização de borrachas, *crosslinking* em isolantes para fios e cabos elétricos, esterilização e desinfestação de produtos médicos e gêneros alimentícios, e outros procedimentos ligados à pesquisa e desenvolvimento.

Inicialmente, as irradiações eram feitas em cabos e fios. Os parâmetros operacionais do equipamento eram ajustados de tal forma, que a dose requerida pelo cliente (usuário de instituição externa) ou pesquisador do IPEN, era alcançada através de cálculos com o auxílio de equações matemáticas fornecidas pelo fabricante do acelerador.

Na década seguinte, essas equações foram aperfeiçoadas, resultando um conjunto de equações empíricas melhor ajustadas, formuladas por SZULAK^{1,2}. A determinação da energia do feixe com auxílio de materiais dosimétricos pode ser feita usando outras equações que foram desenvolvidas por SELTZER³, na década de 80, e mais recentemente por LIMA [12].

No início da década de 90 foi construído um calorímetro de grafita, padrão primário, objeto de uma tese de doutorado [20], e feitas várias medidas da dose absorvida para a energia máxima de operação do acelerador e diferentes correntes do feixe. No entanto, este calorímetro não foi incorporado à instalação por motivos técnico e financeiros.

Entre 1980 e 1994 foram usados materiais radiocrômicos como o CTA (triacetato de celulose) e o PVC (cloreto de polivinila), e testados compostos indicadores de irradiação. Naquele período, o filme dosimétrico mais aplicado foi o CTA, embora não tenha sido adotado como dosímetro de rotina. As irradiações baseavam-se apenas em cálculos, com o auxílio das equações anteriormente citadas.

O acompanhamento das irradiações no acelerador de elétrons do TE, com materiais dosimétricos adequados e em caráter rotineiro, é uma lacuna que precisava ser preenchida. Este trabalho possibilita a escolha do material dosimétrico mais adequado para a faixa de dose em que os produtos são irradiados.

¹ Szulak, C. , *Determinação das condições de irradiação no acelerador de elétrons Dynamitron RDI JOB 188*. Relatório interno TE, IPEN-CNEN/SP, 1990.

² Szulak, C. , *Determinação das condições de irradiação no acelerador de elétrons Dynamitron RDI JOB 188*. Relatório interno TE, IPEN-CNEN/SP, 1997.

³ Seltzer, S. , *National Bureau of Standards, (NIST)*, Private Communication to Radiation Dynamics, Inc. , 1988.

Foram caracterizados os filmes CTA (triacetato de celulose), PVC (cloreto de polivinila), PMMA Red Perspex 4034 (polimetil metacrilato), Gafchromic HD-810 e Sunna especificamente para feixes de elétrons. Os resultados obtidos com a irradiação destes materiais com elétrons, foram comparados com os resultados obtidos em irradiações com raios gama na fonte de ^{60}Co Gammacell 220. A intercomparação, usando uma fonte gama calibrada com padrão primário (solução de Fricke), foi necessária porque atualmente, no acelerador de elétrons, não é possível usar nenhum padrão dosimétrico. Através desta intercomparação foi possível determinar também quais filmes estudados são sensíveis às mudanças na taxa de dose, pois a menor taxa de dose que pode ser alcançada no acelerador de elétrons JOB 188 é $0,1067 \text{ kGy}\cdot\text{s}^{-1}$ ($3,84 \times 10^2 \text{ kGy}\cdot\text{h}^{-1}$), a maior é $14,467 \text{ kGy}\cdot\text{s}^{-1}$ ($5,2 \times 10^4 \text{ kGy}\cdot\text{h}^{-1}$) e a taxa de dose na fonte de ^{60}Co Gammacell é de $7 \text{ kGy}\cdot\text{h}^{-1}$ (jan/00).

No elenco de produtos que são irradiados por pesquisadores do IPEN e os mandados por instituições externas, pode-se citar aqueles ligados à saúde pública, como materiais médicos e hospitalares; alimentos; materiais sob pesquisa nos quais se deseja melhorar ou modificar algumas características físico-químicas, como em polímeros; pedras preciosas; insumos; flores; minerais diversos; insumos da indústria automotiva; insumos da indústria farmacêutica etc.

Os feixes de elétrons que são aplicados em polimerização de camadas finas de monômeros em superfícies de papéis, plásticos, madeiras ou tecidos, exigem doses entre 10 kGy e 100 kGy; na reticulação do polietileno usado como isolante de condutores elétricos, doses entre 100 kGy e 200 kGy; na esterilização de materiais, doses próximas a 20 kGy e em muitas outras aplicações doses abaixo de 10 kGy ou excepcionalmente acima de 200 kGy. Não existe um material dosimétrico específico que possa ser usado neste intervalo tão amplo de doses. Por este motivo este trabalho mostra as diferentes opções e as qualidades de cada um dos filmes radiocrômicos estudados.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é determinar as características dosimétricas de vários filmes radiocrômicos, como o CTA (triacetato de celulose), o PVC (cloreto de polivinila), o PMMA, Red Perspex (polimetil metacrilato), o FWT-6020 (amino trifenil metano), o Gafchromic HD-810 e o Sunna, para o uso rotineiro em procedimentos de irradiação dinâmica de materiais com feixes de elétrons, cujas energias estejam entre 0,8 MeV e 1,5 MeV. Algumas dessas características foram estudadas também para os raios gama do ^{60}Co .

Os tópicos analisados são:

- Caracterização dos filmes radiocrômicos para feixes de elétrons e radiação gama quanto a:
 - comprimento de onda ótimo para a leitura óptica;
 - curva de calibração característica;
 - influência das condições ambientais (luz, temperatura e umidade);
 - influência da taxa de dose; e
 - avaliação da resposta dos filmes, com diferentes energias dos elétrons.

- Caracterização dos parâmetros operacionais do acelerador de elétrons do TE, com filmes CTA, para o controle de qualidade dos processos de irradiação. Os tópicos estudados prendem-se às situações seguintes:
 - uso de diferentes tipos de suporte;
 - diferentes energias para a mesma corrente;
 - diferentes correntes para a mesma energia;
 - diferentes velocidades da bandeja (energia e corrente fixas);
 - diferentes larguras do feixe (energia e corrente fixas);
 - avaliação da uniformidade do feixe na largura da bandeja;

- avaliação da profundidade de penetração dos elétrons no filme CTA e utilização de equações específicas para a determinação da energia do feixe;
- avaliação da dose em diferentes distâncias, até 11 cm do suporte;
- avaliação da consistência dos dados, determinando-se a dose absorvida em objetos na forma cilíndrica e em outras formas, com o uso do filme CTA; e
- irradiação dos filmes na fonte de ^{60}Co com a finalidade de comparar a sua resposta para esta radiação com aquelas obtidas para as energias mais usadas no acelerador de elétrons.

Deve-se ressaltar que as características operacionais de irradiação de materiais, com feixes de elétrons, foram analisadas apenas com o filme CTA, embora seja possível usar os outros filmes aqui estudados. A quantidade de amostras necessárias, para tal finalidade, era reduzida e impediu que se fizesse os mesmos testes levados a efeito com o CTA.

CAPÍTULO 2

PROCESSAMENTO DE MATERIAIS POR IRRADIAÇÃO

2.1 Interação dos elétrons com a matéria

A diferença principal entre as interações de partículas não-carregadas e partículas carregadas com a matéria, é que as primeiras sofrem um pequeno número de interações, cada uma envolvendo uma grande perda de energia, enquanto que as partículas carregadas sofrem um elevado número de interações, cada uma com uma pequena perda de energia. Por isso, considera-se que o elétron perde gradativamente sua energia cinética em um processo denominado aproximação de frenagem contínua ou CSDA (*continuous slowing down approximation*) [4, 9, 20, 22] .

O elétron é uma partícula carregada que possui um campo elétrico Coulombiano. Ao passar pela matéria ele interage com um ou mais elétrons ou com o núcleo da maioria dos átomos, transferindo em cada uma destas possíveis interações, uma fração pequena de sua energia cinética. Os elétrons com energias da ordem de milhões de elétron-volts (MeV) sofrem aproximadamente dez mil colisões quando atravessam um alvo, conseqüentemente, seu comportamento pode ser descrito pela teoria estatística do espalhamento múltiplo, que compreende os principais modos de interação seguintes:

- (1) espalhamento inelástico com os elétrons do átomo;
- (2) espalhamento elástico com os átomos;
- (3) espalhamento inelástico com o núcleo (“bremsstrahlung”).

Os modos de interação (1) e (2) são os mecanismos mais importantes de perda de energia do elétron, nos quais ocorrem um grande número de colisões, resultando em excitação e ionização dos átomos do meio atravessado [4, 20, 22].

Espalhamento inelástico: É a colisão entre o elétron incidente e um único elétron atômico, o qual é ejetado com energia cinética elevada e é chamado de raio delta (δ), tendo energia suficiente para provocar novas interações Coulombianas. A probabilidade de ocorrência desta interação aumenta quando o parâmetro de impacto é da ordem do raio atômico. Em relação ao espalhamento elástico, esta interação ocorre com menor frequência, porém, como a fração de energia cedida pelo elétron incidente é elevada, significa que as frações de energia cedidas ao meio, em ambos os tipos de interação, são da mesma ordem de grandeza [6, 20, 28].

Espalhamento elástico de elétrons pelo campo Coulombiano do átomo: É a interação mais provável, onde o elétron incidente perde energia através da ação cumulativa do espalhamento múltiplo. Em cada espalhamento o elétron perde uma pequena quantidade de energia, apenas a necessária para mudar sua trajetória, satisfazendo a conservação do momento da colisão. A seção de choque diferencial, por átomo, para o espalhamento elástico é proporcional a Z^2 [6, 20, 28].

Espalhamento inelástico com o núcleo: Ocorre quando o parâmetro de impacto é menor que o raio atômico, resultando em uma interação radioativa inelástica. Como produto da interação do elétron com o campo Coulombiano do núcleo resulta a aceleração e a deflexão do elétron, com emissão de radiação eletromagnética (“bremsstrahlung”). Neste tipo de interação o elétron pode ceder até 100% de sua energia cinética para o fóton. A seção de choque diferencial, por átomo, para esta interação também é proporcional a Z^2 [6, 20, 28].

Baseados nestes tipos de interação do elétron com a matéria, os mecanismos de perda de energia cinética do elétron podem ser classificados em:

Perda de energia por colisão: É o mecanismo mais importante de perda de energia por meio de um grande número de colisões com elétrons atômicos, resultando na excitação e ionização do material atravessado. A teoria clássica indica que o elétron incidente fornece um impulso ao elétron atômico, o qual é proporcional à força do campo Coulombiano e ao tempo que o elétron atua. O momento transferido ao elétron atômico é proporcional ao tempo de interação ou seja, a $1/v$, onde v é a velocidade do elétron. Assim, a energia recebida pelo elétron atômico é proporcional a $1/v^2$ ou $1/E$, onde E é a energia do elétron incidente. A perda de energia dE ao longo de um incremento de percurso dl será também proporcional à densidade eletrônica do meio atravessado. Quando a energia do elétron é relativística, sua velocidade se aproxima de um valor constante e a variação $1/E$ de dE/dl se modifica. Entretanto, a contração do campo elétrico torna as colisões distantes mais prováveis e dE/dl aumenta levemente [6, 20, 28].

Perda de energia por radiação: Da teoria eletromagnética clássica, uma partícula carregada sob uma aceleração f emite radiação a uma taxa proporcional a f^2 . Para uma partícula carregada no campo de um núcleo de número atômico Z , f é proporcional a ZM , onde M é a massa da partícula. A taxa de emissão de radiação é, por isto, proporcional a $(Z/M)^2$. Por causa da dependência com $1/M^2$, a perda de energia por radiação não é importante para qualquer partícula mais pesada que o elétron, aumentando proporcionalmente com a energia do elétron. A taxa de perda de energia por emissão de radiação representa menos de 1% da perda total de energia para elétrons de 1 MeV em tecido biológico, chegando a ser o processo predominante de perda de energia quando a energia do elétron é superior a 100 MeV, na mesma matéria. Esta situação ocorre em materiais de número atômico elevado, por exemplo o chumbo, para uma energia do elétron da ordem de 10 MeV. A distribuição da emissão da radiação (“bremsstrahlung”) tem um ponto máximo na direção de incidência e aumenta proporcionalmente com a energia do elétron. O ângulo médio de emissão é aproximadamente igual a mc^2/E , onde E é a energia do elétron, m sua massa e c a velocidade da luz [6, 20, 26, 28].

2.1.1 Poder de frenagem

O poder de frenagem (*stopping power*) é a taxa média de perda de energia dos elétrons, em qualquer ponto, ao longo de sua trajetória. É comum separar o poder de frenagem total em dois componentes:

Poder de frenagem por colisão: Energia média cedida por unidade de percurso por causa de colisões Coulombianas com elétrons atômicos do meio, resultando em excitação;

Poder de frenagem por radiação: Energia média cedida por unidade de percurso por causa da emissão de “*bremsstrahlung*” no campo elétrico do núcleo atômico e dos elétrons do átomo. [4, 10, 20].

O poder de frenagem total de massa, S/ρ , de um material irradiado com partículas carregadas é o quociente de dE por ρ/dl onde dE é a energia perdida por uma partícula carregada que atravessa uma distância dl num material com densidade ρ [5, 9, 10, 20, 22].

$$S/\rho = (1/\rho) \cdot (dE / dl) \quad (1)$$

Quando as interações nucleares podem ser desprezadas então pode-se escrever:

$$S/\rho = (1/\rho) \cdot (dE / dl)_{col} + (1/\rho) \cdot (dE / dl)_{rad} \quad (2)$$

Onde $(dE / dl)_{col} = S_{col}$ é o poder de frenagem de colisão linear e $(dE / dl)_{rad} = S_{rad}$ é o poder de frenagem por radiação linear.

2.1.2 Alcance dos elétrons

Quando os elétrons penetram perpendicularmente no material a distribuição de dose, ao longo de seu percurso (espessura do material) assemelha-se às curvas da Figura 1:

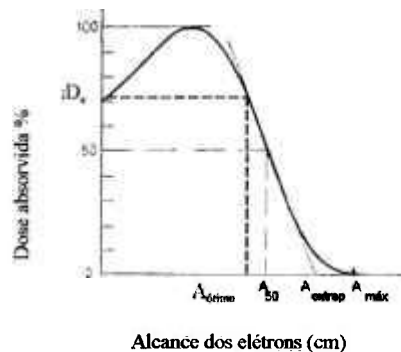


Figura 1 – Alcance dos elétrons na espessura do material

Conforme a Figura 1, D_e = dose na entrada do feixe de elétrons no material; A_{50} = alcance (cm) onde a dose é 50% do valor máximo; A_{extrap} = alcance (cm) extrapolado determinado pela tangente no valor de 50%; $A_{máx}$ = alcance máximo (cm) dos elétrons no material em questão e $A_{ótimo}$ = Alcance ótimo (cm) dos elétrons para a dose no ponto de entrada.

Se E_0 é a energia inicial dos elétrons, que é dissipada ao longo do percurso até ser reduzida a zero, o alcance A_0 é dado por:

$$A_0 = \int_0^{E_0} \frac{dE}{(S/\rho)_{tot}} \quad [kg \cdot m^{-2}] \quad (3)$$

A expressão (3) está baseada na aproximação de frenagem contínua (CSDA), que representa o percurso que um elétron poderia fazer na passagem por um meio uniforme, se a sua taxa de perda de energia ao longo do percurso fosse sempre igual à taxa média de perda de energia. Na realidade a taxa de perda de energia varia, porém este fato é ignorado quando se considera uma aproximação de frenagem contínua.

O alcance por CSDA representa o percurso dos elétrons (às vezes tortuoso) e não a profundidade de penetração na direção de incidência [20] , como mostra a **Figura 2**.

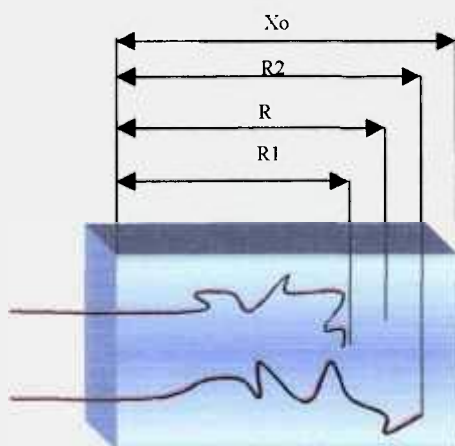


Figura 2 - Diagrama das possíveis trajetórias de dois elétrons com a mesma energia inicial, em um material absorvedor de espessura X_0 . Os alcances, CSDA, R_1 e R_2 (ou caminho total percorrido) seguem uma distribuição estatística e o alcance médio R representa o valor médio da distribuição.

A energia na superfície do material absorvedor é de :

$$E_a^o \text{ (MeV)} = C_1 \text{ (MeV.cm}^{-1}\text{)} A_{\text{extap}} \text{ (cm)} + C_2 \text{ (MeV.cm}^{-1}\text{)} \quad (4)$$

Onde C_1 e C_2 são constantes ajustadas a cada tipo de material.

Conforme a Norma ISO/DIS 15569 [11] as equações empíricas que permitem relacionar o alcance dos elétrons com a energia dos elétrons incidentes, válidas para energias entre 1 MeV e 12 MeV são dadas por:

$$A_{\text{Ótimo}} = \frac{(0,41E - 0,12)}{\rho} \quad (5)$$

$$A_{50} = \frac{(0,46E - 0,20)}{\rho} \quad (6)$$

$$A_{\text{Extrap}} = \frac{(0,57E - 0,19)}{\rho} \quad (7)$$

onde as unidades para o alcance são *cm*, para a energia *MeV* e para a densidade do material irradiado *g.cm⁻³*.

A energia da radiação incidente dada em função dos alcances A_{50} , $A_{\text{Ótimo}}$ e A_{extrap} pode ser calculada por:

$$E = 2,45 A_{\text{Ótimo}} \rho + 0,29 \quad (8)$$

$$E = 2,20 A_{50} \rho + 0,44 \quad (9)$$

$$E = 1,76 A_{\text{extrap}} \rho + 0,33 \quad (10)$$

Outras equações que podem ser usadas, para elétrons com energia inferior a 2 MeV, são aquelas desenvolvidas por SELTZER¹ [24] para aceleradores lineares do tipo Dynamitron. Neste caso SELTZER¹ sugere as equações:

$$E = e^{0,918+0,8727y+0,0332y^2} \quad (11)$$

onde $y = \ln A_{50}$

Ou para o alcance extrapolado como:

$$E = e^{0,7532+0,8736y+0,0316y^2} \quad (12)$$

onde $y = \ln A_{\text{extrap}}$

O cálculo que envolve o número atômico, Z, e o alcance extrapolado foi recentemente desenvolvido por LIMA [12] e é dado por:

$$\frac{3,1E^2 - 0,015E}{1 + 3,1E} = A_{\text{Extrap}} \cdot \frac{(Z + 1,8)}{1,41Z^{0,68}} \quad (13)$$

onde o número atômico dos materiais é : Z (CTA) = 9,93; Z (FWT) = 11,9; Z (PVC) = 13,66; Z (PMMA) = 11,14

2.2 Interação da radiação gama com a matéria

Existe uma diferença muito grande entre a interação da radiação gama com a matéria e a interação de partículas alfa e beta, e isto se torna evidente por causa do poder de penetração dos raios gama ser muito maior. As radiações eletromagnéticas (X e γ) mostram uma característica exponencial de absorção na matéria, e não têm alcance definido como no caso das partículas carregadas. Estas últimas perdem sua energia durante a trajetória por causa de um grande número de colisões com os elétrons atômicos. A perda de energia ocorre em numerosas e pequenas frações e a partícula carregada perde gradualmente sua velocidade até parar e ser absorvida. Entretanto, quando um feixe de fótons incide num absorvedor fino, cada fóton do feixe reage individualmente num único evento, que é um processo de absorção real em que o fóton desaparece, ou ainda pode ser espalhado para fora do feixe [22].

Os processos responsáveis pela absorção da radiação eletromagnética são:

- (1) Efeito fotoelétrico;
- (2) Espalhamento Compton, e
- (3) Produção de pares

No processo fotoelétrico toda a energia $h\nu$ do fóton incidente é transferida para um elétron ligado, que é ejetado do átomo com uma energia cinética $T = h\nu - I$, onde I é o potencial de ionização do elétron.

A probabilidade de ocorrência do efeito fotoelétrico depende fortemente do número atômico (Z) do meio absorvedor, é proporcional a Z^5 , e inversamente proporcional à energia do fóton incidente. A dependência com Z^5 significa que, para uma dada energia do fóton, o processo de absorção fotoelétrica é muito mais importante em metais pesados como o chumbo, do que em metais leves como o alumínio.

Os estudos de dependência energética mostram que, para um dado elemento, o efeito é muito maior em energias baixas de fótons do que em altas. Portanto, o efeito fotoelétrico é especialmente importante na absorção de fótons de energias baixas por elementos pesados [2, 20, 22].

À medida que a energia da radiação aumenta, a ocorrência de espalhamento Compton substitui a do efeito fotoelétrico como principal meio de remoção de fótons do feixe inicial. Neste fenômeno, o fóton incidente é espalhado por um dos elétrons atômicos e este é separado de seu átomo. O fóton sai em um certo ângulo em relação à sua direção original e com energia mais baixa do que tinha inicialmente. A mudança de direção serve para remover o fóton do feixe de raios gama incidente. O processo pode ser visto como o espalhamento de um fóton por um elétron livre (fracamente ligado), inicialmente em repouso, no qual o fóton transfere parte de sua energia para o elétron, que então é ejetado.

O elétron que recua tem uma energia cinética dada por $T = h\nu_0 - h\nu$, onde $h\nu_0$ é a energia do fóton incidente e $h\nu$ é a energia do fóton que recua [20].

A probabilidade de ocorrer o espalhamento Compton, por átomo, dependerá da quantidade de elétrons por grama de material, ou densidade eletrônica do meio; desta forma aumenta linearmente com o número atômico do meio absorvedor [2, 22].

Em energias suficientemente altas, maiores que 1,02 MeV, tanto a absorção fotoelétrica como o espalhamento Compton perdem sua importância em comparação com a produção de pares. Neste último processo, no campo Coulombiano de um núcleo atômico, um raio gama com energia suficiente desaparece e são criados um elétron e um pósitron [2, 22].

Para que a produção de pares ocorra, a energia do fóton incidente deve ser equivalente a $2m_0^2$ ou 1,02 MeV, que corresponde à quantidade de energia de repouso das duas partículas. Na

interação com fótons de energias maiores que 1,02 MeV, o excesso de energia se transforma em energia cinética do pósitron e do elétron.

A probabilidade de ocorrência do fenômeno da formação de pares é proporcional a Z^2 , de modo que, para uma dada energia de fóton, a formação de pares aumenta rapidamente com o número atômico do material. Conclui-se, então que este processo é importante para altas energias e para materiais de elementos pesados.

A absorção de raios gama pelo processo de produção de pares é acompanhada pelo processo inverso, o da aniquilação elétron-pósitron. Um pósitron, após ser formado, é moderado por colisões com átomos até que esteja praticamente em repouso. Ele, então, interage com um elétron que também está praticamente em repouso. As duas partículas desaparecem e surgem dois fótons se movendo em sentidos opostos, cada um com a energia de 0,511 MeV, igual à energia de repouso de um elétron [2, 20, 22].

2.3 Dosimetria das radiações

As atividades onde são aplicadas as radiações, vem prosperando gradativamente desde a descoberta dos raios-X por Roentgen, em 1895, e da radioatividade, em 1896, por Becquerel. Atualmente as radiações são utilizadas tanto na área industrial quanto na área da saúde [13].

Para que as práticas de irradiação de materiais sejam confiáveis, é necessário inicialmente estabelecer um cronograma para as práticas da dosimetria. Uma das partes mais importantes deste cronograma é a determinação da dose. Irradia-se materiais dosimétricos com densidade semelhante ao produto a ser irradiado trazido pelo requerente . Esses materiais dosimétricos, irradiados junto com o produto, são processados e a dose absorvida é calculada. O valor da dose é, então, associado às modificações físico-químicas, ou biológicas, observadas no produto irradiado. Todo este processo dosimétrico é *denominado dosimetria da radiações* [22].

Os materiais conhecidos como detetores de radiação, ou dosímetros (quando é usada a capa de equilíbrio eletrônico), podem ser do tipo sólido, por exemplo filmes radiocrômicos, ou líquido.

Em todos os processos de irradiação, a prática da dosimetria é adotada como um controle necessário e imprescindível para estabelecer os parâmetros do processo, assim como é usada para o acompanhamento de pesquisas e desenvolvimento. Como a dosimetria permite estabelecer valores quantitativos, que são associados às mudanças físicas, químicas ou biológicas, induzidas pela radiação, conseqüentemente é a metodologia aplicada para assegurar que o processo de irradiação, além de atender às especificações estabelecidas em normas, também assegure que os resultados obtidos no laboratório possam ser reproduzidos em outros laboratórios semelhantes, ou em uma instalação de irradiação de porte industrial [7, 19, 20].

A dosimetria é aplicada também para a otimização e controle rotineiro das operações de irradiação. A fixação de certos parâmetros de processo, em diferentes casos de irradiação, onde podem estar expostos materiais com densidades, formas geométricas e homogeneidades variadas, é particular a cada um deles.

Antes de ser iniciado todo o processo de irradiação deve ser testado: fixa-se os parâmetros da fonte de irradiação (acelerador ou fonte gama) em função da dose, máxima e mínima, requerida pelo portador do material a ser irradiado; confirma-se as curvas de isodose do volume útil do recipiente onde é colocado esse material; e outros elementos importantes.

A determinação de dose absorvida, cujos valores sejam elevados, em um amplo intervalo de taxas de dose para diferentes meios e ambientes, pode apresentar alguns desvios influenciados por efeitos de saturação, problemas atmosféricos diversos, dependência da resposta com a energia da radiação incidente e com a taxa de dose. A habilidade para corrigir estes desvios e minimizar a imprecisão, consiste na correta aplicação dos procedimentos e na utilização de materiais dosimétricos adequados para fazer a dosimetria [5, 8, 23].

Mesmo quando o processo envolve parâmetros de irradiação conhecidos e produtos bem homogêneos, a dosimetria não pode ser dispensada. Esta prática faz parte dos itens de auditorias que originam a documentação em processos de irradiação de materiais para a medicina e biologia, irradiação de alimentos, cura de tintas e vernizes, irradiação de gases tóxicos, águas ou em diversos trabalhos de pesquisa de novos materiais.

O objetivo da dosimetria é associar quantitativamente a dose com os efeitos causados pela interação da radiação na matéria, e na maioria das aplicações de doses altas a grandeza de maior importância na análise quantitativa desta interação é a *dose absorvida* [8, 13, 20, 22] .

2.3.1 Grandezas e unidades

2.3.1.1 Dose Absorvida

A dose absorvida é definida como o quociente entre a energia média, $d\bar{\epsilon}$, depositada em um elemento infinitésimo de matéria e o elemento de massa da matéria, dm :

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \text{ [Gy]} \quad (14)$$

Embora esta definição seja válida para a dose absorvida em um só ponto do meio absorvedor da radiação, geralmente é feita uma média sobre a massa finita do material. A dose absorvida é determinada com um dosímetro calibrado, em termos de energia depositada por unidade de massa em um dado material. No processamento por radiação o material de referência na maioria das

calibrações é a água. A unidade de dose absorvida no Sistema Internacional de Unidades é o J.kg^{-1} e a unidade restrita é o **gray** (Gy) (homenagem dada a um dos pioneiros da física das radiações, medicina e biologia, L.H.Gray), e seus múltiplos ($\text{kGy}=10^3\text{Gy}$ ou $\text{MGy}=10^6\text{Gy}$). A dose absorvida pode ser denominada apenas dose. A unidade especial (antiga) de dose absorvida, era o **rad** (Roentgen absorbed dose), definido como 100erg.g^{-1} ou 10^{-2}J.kg^{-1} , então atualmente 1Gy equivale a 100 rad ($1\text{Gy}=100\text{ rad}$) [8, 20, 22].

2.3.1.2 Taxa de dose absorvida

A dose absorvida por unidade de tempo é expressa como a taxa de dose absorvida \dot{D} :

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad [\text{Gy.s}^{-1}] \quad (15)$$

onde dD é a variação da dose absorvida no intervalo de tempo dt , num ponto P e num determinado instante .

A unidade de taxa de dose absorvida no Sistema Internacional de Unidades é $\text{J.kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$, e Gy.s^{-1} é a unidade restrita [8, 10, 20, 22].

2.3.1.3 Dose absorvida em outros meios

Quando se deseja calcular a dose absorvida em outros meios, D_m , diferentes da água ou ar, D_A ou D_{ar} , deve-se levar em conta $(\mu_{en}/\rho)_A$ ou $(\mu_{en}/\rho)_{ar}$ e $(\mu_{en}/\rho)_M$, os coeficientes de absorção de massa da água ou ar e do material.

A dose no meio, para uma dada energia da radiação incidente neste meio será dada por:

$$D_M = D_A \cdot \frac{(\mu_{en}/\rho)_M}{(\mu_{en}/\rho)_A} \quad [\text{Gy}] \quad (16)$$

2.3.2 Materiais dosimétricos

Para determinar a dose absorvida são utilizados materiais denominados *dosímetros*. Os dosímetros são compostos pelo material radiosensível e uma camada externa, ou quando necessário suporte que permite manter o equilíbrio eletrônico durante a irradiação. Podem ser classificados como *dosímetros de referência*, *dosímetros de transferência* e *dosímetros de rotina*.

O equilíbrio eletrônico é a condição na qual a energia cinética dos elétrons (ou partículas carregadas), exceto a energia em repouso, que entram num volume infinitesimal de material irradiado é igual a energia cinética dos elétrons emergentes deste mesmo volume de material.

Os dosímetros devem ser calibrados em arranjos experimentais adequados. A calibração de um sistema dosimétrico consiste em determinar a sua resposta para uma exposição à radiação

conhecida (ou uma dose absorvida conhecida), envolvendo sempre o uso de pelo menos um sistema de referência ou padrão internacional [2, 13, 22].

2.3.2.1 Sistemas padrões e instrumentos de referência

O padrão dosimétrico é um instrumento de medida usado para definir, representar fisicamente, conservar ou reproduzir a unidade de uma grandeza (múltiplo ou submúltiplo desta unidade), com o objetivo de transferi-la para outros instrumentos ou sistemas de medida. O padrão pode ser classificado como primário, secundário, terciário ou nacional [22].

Padrão primário: Instrumento da mais alta qualidade metrológica, que permite determinar a unidade de uma grandeza a partir de medidas de grandezas físicas básicas. É usado em intercomparações internacionais.

Padrão secundário: Instrumento calibrado por comparação com um padrão primário.

Padrão terciário: Instrumento calibrado por comparação com um padrão secundário.

Instrumento de referência : Instrumento de medida, de desempenho e estabilidade altos, usados apenas para calibração de outros instrumentos.

Dosímetro primário ou de referência: Dosímetro de qualidade metrológica alta, que é capaz de medir diretamente a dose absorvida ou a grandeza física que pode ser associada com a dose absorvida. Os calorímetros, as câmaras de ionização e o dosímetro de sulfato ferroso (solução de Fricke) são dosímetros de referência de reconhecida qualidade internacional e usado como padrão [2, 13, 22]. Os padrões encontram-se em laboratórios de qualidade internacional reconhecida

como o CEN (Centre des Études Nucleaires – Saclay, Giv-sur Yvette, França) ou o NBS (National Bureau of Standards, Washington, DC, USA)

Dosímetro de campo ou transferência: Dosímetro suficientemente preciso e estável, que pode ser calibrado com um padrão de referência. Este tipo de dosímetro pode ser transportado para uma instalação de irradiação para a avaliação apropriada da dose, ou para calibrar dosímetros de rotina. A alanina e o etanol-clorobenzeno são exemplos deste tipo de dosímetros [2, 13, 20, 22].

Dosímetro de rotina: É um sistema padrão de trabalho, usado rotineiramente nas instalações de irradiação, mas deve ser frequentemente calibrado com dosímetros de referência. Este dosímetro deve ser fácil de manusear e se possível apresentar uma resposta rápida [2, 13, 20, 22].

Os dosímetros de rotina podem ser usados para determinar a dose absorvida nos materiais, detectar variações no campo de irradiação, mapear a dose no local da irradiação e nas embalagens que contém produtos a serem irradiados e garantir a qualidade da irradiação. [7].

A utilização dos dosímetros de rotina pode encontrar algumas dificuldades quando existe a variação da resposta com :

- (a) taxa de dose;
- (b) condições ambientais (temperatura, umidade, luz) ;
- (c) impurezas ou efeitos químicos no próprio material dosimétrico;
- (d) variações de lote para lote do material dosimétrico, e

(e) não linearidade com a resposta com a dose absorvida.

Todos os filmes usados neste trabalho são classificados como dosímetros de rotina.

2.3.3 Dosimetria em processos de irradiação

A dosimetria para o controle de processos de irradiação divide-se em três funções:

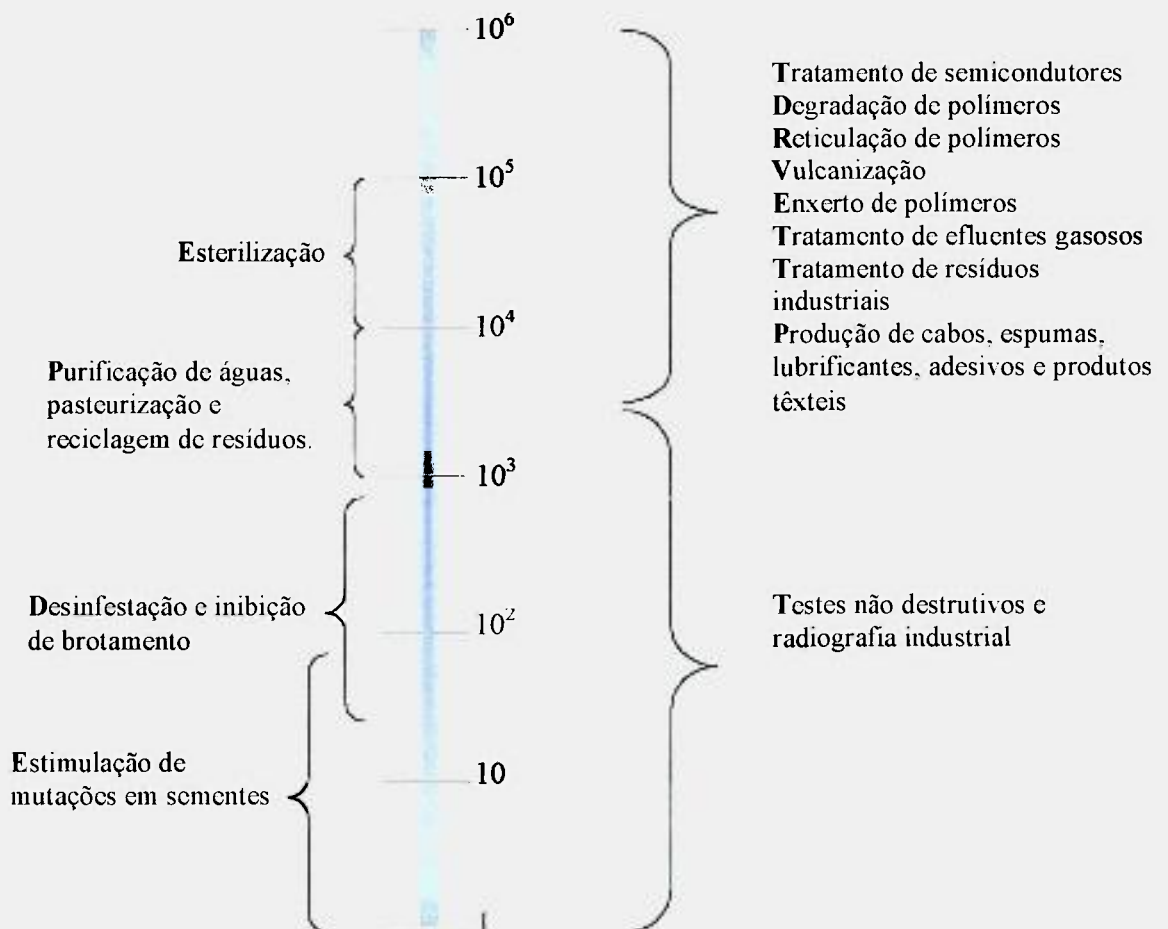
- (a) Comissionamento, ou autorização, para o funcionamento de uma instalação de irradiação;
- (b) Validação de um processo novo de irradiação em uma instalação já estabelecida; e
- (c) Dosimetria para o controle da qualidade na operação de rotina do processo.

A determinação da dose absorvida em materiais irradiados, por exemplo, por um feixe de elétrons gerado em um acelerador, baseada nos parâmetros operacionais deste acelerador é freqüentemente utilizada. Se estes parâmetros são estáveis ao longo do tempo, a dose determinada é correta. Mas se ocorrer qualquer desvio daqueles parâmetros, a dose fica alterada e o operador não pode afirmar seu valor. Neste caso, os produtos devem ser eliminados o que torna o processo de irradiação economicamente caro.

Na realidade, a precisão no cálculo da dose absorvida depende sempre da energia dos elétrons, da intensidade do feixe e da geometria da amostra [13, 16]. Por este motivo é imprescindível usar os dosímetros de rotina em todas as irradiações.

Os intervalos de dose absorvida, utilizados em alguns processos [13], são:

**Área de aplicação em função da dose absorvida
(Gy)**



2.3.4 Propriedades dos dosímetros

Um material, a ser empregado como dosímetro de irradiação, é escolhido de acordo com algumas propriedades que facilitem seu uso em processos de irradiação. Entre elas [2, 13, 22]:

- ◆ Resposta linear com a dose absorvida, se possível,;
- ◆ Resposta independente da taxa de dose;
- ◆ Resposta em amplo intervalo de dose;
- ◆ Se possível, resposta independente da energia da radiação incidente;
- ◆ Resposta reprodutível (repetitividade);
- ◆ Estabilidade de resposta ao longo do tempo, antes e após a irradiação (no intervalo de dose usado);
- ◆ Resposta independente das condições ambientais como umidade, luz e temperatura;
- ◆ Resposta independente do ângulo de incidência.
- ◆ Manuseio e sistemas de leituras fáceis; e
- ◆ Custo baixo;

2.3.5 Materiais radiocrômicos

Os materiais radiocrômicos podem ser encontrados sob diversas formas e a mais comum é a de filmes, que são películas compostas por polímeros com um aditivo sensível à radiação ionizante. Podem ser feitos de nylon, polivinil, poliestireno e outros tipos de compostos poliméricos com uma porcentagem, em massa, de corante cromóforo cuja cor é intensificada pela radiação. Estes filmes são produzidos numa infinidade de espessuras variando desde alguns

microns até três milímetros [1, 24]. São amplamente usados em dosimetria, em que as doses estejam acima de 10 Gy, portanto em instalações consideradas pela Agência Internacional de Energia Atômica como de porte industrial [7, 8]. Neste aspecto, pode-se incluir também as instalações hospitalares em que existam aceleradores lineares para diagnóstico e terapia.

Os filmes radiocrômicos são usados como dosímetros de rotina e devem ser calibrados no mínimo uma vez por semestre com um padrão primário, ou na falta deste por um dosímetro de transferência. O mesmo filme pode ser usado previamente em procedimentos como a validação do processo de irradiação, mapeamento de doses e licenciamento, se o intervalo de doses ao qual o dosímetro é capaz de responder for suficientemente amplo e se a leitura da dose for suficientemente exata e precisa. A Tabela I mostra alguns exemplos de filmes radiocrômicos.

Tabela I – Dosímetros radiocrômicos e intervalos de dose [1, 4, 7, 13, 23].

| Dosímetro | Descrição (Métodos de análise) | Intervalo de doses (Gy) |
|--|---|--------------------------------|
| Filme fino | Plástico incolor com várias dimensões, torna-se colorido com a irradiação (espectrofotometria ou densitometria) | $10^2 - 10^6$ |
| Filme revestido com película radiosensível | Torna-se colorido com a irradiação (espectrofotometria ou densitometria) | $10^2 - 10^4$ |
| Papel impregnado ou revestido | Geralmente branco, torna-se colorido com a irradiação (densitometria de reflexão) | $10^2 - 10^6$ |
| Opti-crômicos | Pequenos guias de onda (densitometria) | $10 - 3 \times 10^4$ |
| Soluções | Ampolas de vidro ou plástico, contendo soluções incolores que se tornam coloridas com a irradiação (espectrofotometria) | $1 - 3 \times 10^4$ |
| Pastilhas | Suportes plásticos com filme incolor que se torna colorido com a irradiação (espectrofotometria) | $10^2 - 5 \times 10^3$ |

2.3.6 Espectrofotometria

A identificação de um filme irradiado daquele não irradiado, pode ser feita por espectrofotometria óptica, em comprimentos de onda característicos, na região do espectro visível e/ou ultravioleta. Desta forma a absorção óptica permite determinar a dose de radiação, pela variação da absorvância em cada filme.

Os espectrofotômetros são formados por fontes de radiação contínua, que emitem luz em um intervalo de comprimento de onda que se estende desde a região espectral visível à região ultravioleta. Para que possam utilizar bandas de comprimento de onda estreito, é necessário um monocromador ou filtros que permitam selecionar o comprimento de onda.

A absorção óptica nas regiões dos espectros visível, VIS, e ultravioleta, UV, depende do número e do arranjo dos elétrons nas moléculas ou íons absorvedores dos materiais sob estudo.

Para o bom entendimento do fenômeno de absorção óptica pode-se usar a equação que combina os princípios conhecidos como Lei de Lambert e Lei de Beer [13].

Lei de Lambert : A proporção de luz absorvida por um meio transparente independe da intensidade da luz incidente (considerando-se que nenhum outro agente físico ou químico modifique o meio). Então, camadas sucessivas de espessura igual vão transmitir uma proporção igual da energia incidente na amostra, de uma camada para outra. Esta lei é expressa por:

$$I / I_0 = T \quad (17)$$

Onde: I = intensidade da luz transmitida;

I_0 = intensidade da luz incidente; e

T = transmitância

A transmitância costuma ser expressa em valores percentuais:

$$\%T = I / I_0 \times 100 \quad (18)$$

Lei de Beer : A absorção da luz é diretamente proporcional à concentração do cromóforo no meio absorvedor como da espessura deste meio, no caminho percorrido pela luz.

Lei de Lambert-Beer : A combinação das duas leis, de Lambert e de Beer, define a relação existente entre transmitância (T) e absorvância (A) e vem dada por [27]:

$$A = \log (I_0 / I) = \log 100 / T = \epsilon C x \quad (19)$$

Onde: A = Absorção óptica após a irradiação (não há unidade)

ϵ = Absorptividade molar ($\text{dm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)

C = Concentração molar ($\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$), e

x = Caminho óptico percorrido pela luz na amostra (cm)

O valor de ϵ é função do comprimento de onda, portanto a lei (19) só é verdadeira para um comprimento de onda específico. À medida que se aumenta a concentração do elemento cromóforo na solução ou na amostra sólida, a resposta da absorvância A e da transmitância T varia.

Nos filmes radiocrômicos, submetidos à irradiação, o aumento da absorvância é resultante da intensificação da cor, não pelo aumento da concentração do cromóforo, mas induzida pela radiação ionizante na substância radiosensível, misturada ou depositada na película. Neste caso, não se aplicam os valores de concentração molar, C, nem absorptividade molar, ϵ , que são desconsiderados.

A diferença entre a absorvância depois da irradiação e aquela determinada antes da irradiação, é representada por $\Delta A = (A - A_0)$. Como nem todos os filmes do mesmo lote apresentam a mesma espessura, é feita uma correção, dividindo a diferença ΔA pela espessura X do filme [6, 7, 16]. Escreve-se então :

$$\alpha \cong \Delta A / X \quad \text{ou} \quad \alpha \cong (A - A_0) / X \quad (20)$$

Onde: A = Absorção óptica após a irradiação (não há unidade);

A_0 = Absorção óptica antes da irradiação (não há unidade);

X = Espessura do filme (mm), e

σ = Coeficiente de absorção óptica (mm^{-1}).

As curvas de calibração, a partir das quais são feitos os cálculos da dose absorvida, relacionam o valor α com a dose absorvida (em Gy ou seus múltiplos e submúltiplos).

A curva de calibração é a relação gráfica, ou matemática, em um sistema dosimétrico, e também pode ser considerada a função resposta de um dosímetro.

2.3.7 Aceleradores de elétrons

Diversos tipos de aceleradores de elétrons são utilizados para o processamento por radiação de materiais e para pesquisa e desenvolvimento, em diversos laboratórios e centros internacionais. Um acelerador de elétrons de 200 kW de potência, por exemplo, é equivalente a uma fonte de ^{60}Co com atividade de $5 \times 10^{17} \text{Bq}$ (13,4 MCi).

A maioria dos processos industriais emprega aceleradores que são construídos para energias compreendidas entre 150 keV e 5 MeV. Uma tensão constante é usada para acelerar os elétrons emitidos por um filamento aquecido na região de potencial mais elevado, resultando em um feixe de elétrons constante. Para energias abaixo de 0,3 MeV é possível acelerar elétrons emitidos por um filamento longo mantendo-os confinados a uma região do espaço de forma a obter uma cortina de elétrons.

Para atender às diferentes dimensões dos materiais a serem irradiados, o feixe de elétrons abrange uma largura entre 30 cm e 300 cm. Isto é conseguido por varredura magnética ou pela utilização do filamento longo. A taxa média de dose absorvida no produto pode atingir $10^6 \text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ [3, 5, 20].

Toda a região de produção e aceleração dos elétrons deve ser mantida em alto vácuo para permitir sua focalização e aceleração em direção à janela de saída. A janela é constituída por uma folha fina de metal de resistência mecânica alta, para poder suportar a diferença de pressão entre o interior (vácuo) e o exterior (pressão atmosférica), e ter um poder de interação com os elétrons extremamente baixo. O material que geralmente é utilizado na janela de emissão dos elétrons é o titânio metálico, com espessura entre 30 e 40 μm [3, 5, 20].

Em relação à geração de alta tensão, os aceleradores tipo cortina empregam transformadores que geram alta tensão (em corrente alternada), que após a retificação, alimentam o acelerador .

Acima de 300 kV o melhor desempenho é obtido com sistemas capacitivos que energizam circuitos retificadores multi-estágios, obtendo, assim tensões elevadas, sob regime de corrente contínua, a partir de baixa tensão em regime de corrente alternada. O acelerador de elétrons tipo Dynamitron da Radiation Dynamics [esquema do Anexo 3] emprega este princípio, oferecendo máquinas com energia máxima de 4,5 MeV e potências de até 150 kW [3, 5, 20].

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

3.1 Filmes radiocrômicos utilizados

3.1.1 Triacetato de celulose – CTA

Fabricado pela *Fuji Film Co- Japão*, este filme é adquirido em rolos de 100 m de comprimento por 0,8 cm de largura e 0,125 mm de espessura média. Ele é produzido com 85% de triacetato de celulose ($C_{12}H_{16}O_8$) e 15% de um aditivo (trifenilfosfato – $C_{18}H_{15}PO_4$) que permite estabilizar a absorvância depois da irradiação. Possui densidade igual a $1,32 \text{ g.cm}^{-3}$ e sensibilidade radiométrica no intervalo de doses entre 10 kGy e 300 kGy. A leitura espectrofotométrica é feita no comprimento de onda de 280 nm [7, 16, 21, 24, 26].

3.1.2 Cloreto de polivinila – PVC

Filme incolor produzido em rolos de 1 m de largura e 0,260 mm de espessura média. Possui densidade aproximadamente igual a $1,4 \text{ g.cm}^{-3}$, e 0,250 mm de espessura média. Apresenta sensibilidade radiométrica no intervalo de doses entre 5 kGy e 60 kGy e a leitura espectrofotométrica é feita no comprimento de onda de 395 nm. Dependendo da dose, sua coloração muda do incolor para vários tons de verde, amarelo e marron. Para o desenvolvimento total da cor após a irradiação, o filme deve ser submetido a um tratamento térmico [1, 7, 13, 16].

O filme usado neste trabalho foi doado pelo Instituto de Qu ımica e Tecnologia das Radiações, IchTJ (Instytut Chemii i Techniki Jadrowej), localizado em Vars ovia – Pol onia.

3.1.3 Polimetil metacrilato – PMMA 4034 – RED PERSPEX

Fabricado pela *Harwell Dosimeters - Inglaterra*, este filme vem envolto em envelope selado de alumínio. Cada unidade possui 3 cm de comprimento por 1 cm de largura e 0,3 cm de espessura média. Possui densidade igual a $1,35 \text{ g.cm}^{-3}$ e sensibilidade radiométrica no intervalo de doses entre 5 kGy e 50 kGy. A leitura espectrofotométrica   feita no comprimento de onda de 640 nm [6, 7, 28].

3.1.4 Gafchromic HD-810

Fabricado pela *ISP Technologies Inc.*, este filme   adquirido na forma de folhas de 20 cm x 25 cm e possui espessura média de 0,110 mm. Possui sensibilidade radiométrica no intervalo de doses entre 0,1 kGy e 50 kGy. A leitura espectrofotométrica   feita nos comprimentos de onda de 400 nm , para doses entre 1 kGy e 50 kGy; 500 nm , para doses entre 0,1 kGy e 5 kGy e 580 nm para doses entre 0,01 kGy e 1 kGy.

3.1.5 Sunna

Este filme, lançado no mercado em 1999, pela *Sunna Systems Corporation – USA*,   recomendado para doses entre 10 kGy e 100 kGy. Possui uma espessura média de 0,250 mm e a leitura da densidade óptica deve ser feita entre 240 nm e 250 nm.

3.1.6 Amino Trifenil Metano - FWT – 60.20

Filme de nylon, fabricado pela Far West Technology, Inc..   recomendado para doses entre 0,01 kGy e 150 kGy. Possui uma espessura média de 0,050 mm, densidade de 1,14 g.cm⁻³ e precisão nominal de 3%. A leitura da absorvância deve ser feita em 605 nm, para doses entre 0,01 kGy e 1 kGy e em 510 nm, para doses entre 0,8 kGy e 150 kGy [1, 7, 16].

2.1 Espectrofot metro

Foi utilizado o espectrofotômetro da marca Shimadzu, modelo UV-1601 PC, acoplado a um microcomputador com programa Windows 98, como pode ser visto na Figura 3. O programa associado, fornecido pela Shimadzu, permite selecionar a fun o Absorvância ou Transmitância, para as faixas do espectro ultravioleta ou visível, ou ambos.



Figura 3 - Espectrofot metro Shimadzu UV-1601 PC

No sistema óptico, ver Figura 4, existem duas lâmpadas, uma de deutério (D₂) para a região ultravioleta e a de tungst nio (W), para a região visível do espectro de luz. Na cela onde se deposita as amostras existem duas posi es para colocar o material a ser analisado: uma, a referência ou o ar, e outra para a amostra de filme.

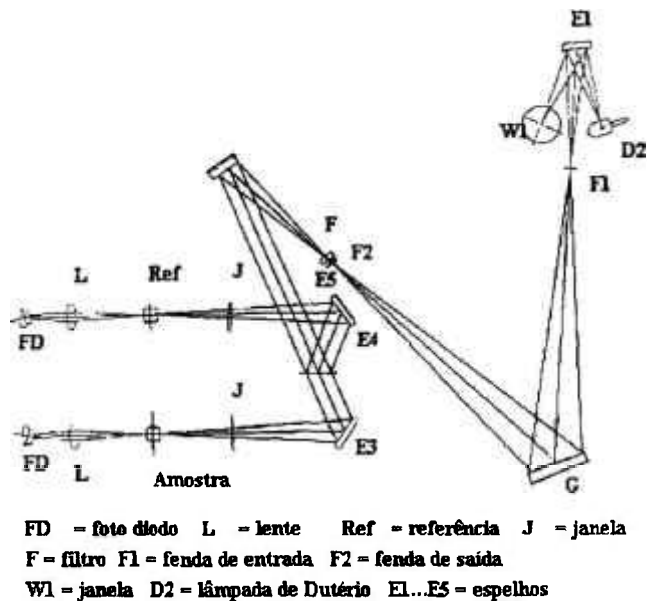


Figura 4 - Esquema simplificado do funcionamento do espectrof tmetro UV-1601PC

O sistema fotométrico compõe-se dos feixes da luz transmitida por cada uma das duas amostras que saem paralelos entre si, e encontram os espelhos refletores. A luz refletida   então analisada por um complexo de outro sistema de espelhos e detetor

Outros dados técnicos importantes:

- Intervalo de opera o = 190 a 1100 nm
- Abertura de janela = 2 nm
- Grade = com 900 linhas / mm que permite assimilar energias ópticas altas e um mínimo de aberra es.
- Intervalo de leitura = entre 1 nm e 0,1 nm
- Preci o de leitura = ± 0,5 nm
- Velocidade de varredura do espectro = ajustável entre 200 nm/min e 2800 nm/min

3.3 Acelerador de elétrons

Foi utilizado o acelerador de elétrons tipo Dynamitron Job 188 (ver Figura 5), fabricado pela Radiation Dynamics Inc.,USA, com 37,5 kW de potência e os parâmetros:

- Energia dos elétrons: entre 0,5 MeV e 1,5 MeV (seleccionável)
- Corrente: entre 0,01 mA e 25 mA (seleccionável)
- Área de Irradiação: 2,5 cm, a 10 cm da janela de titânio, com largura de varredura, ajustável entre 60 cm e 112 cm.

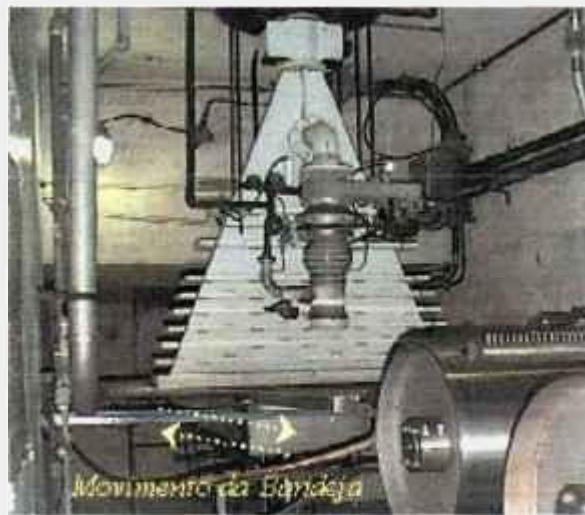


Figura 5 – Acelerador de elétrons Dynamitron Job 188

Câmara de irradiação construída em concreto pesado, com $2,8 \text{ g.cm}^{-3}$ de densidade específica para blindar radiação espalhada. As dimensões da área de irradiação no acelerador de elétrons encontram-se na Figura 6.

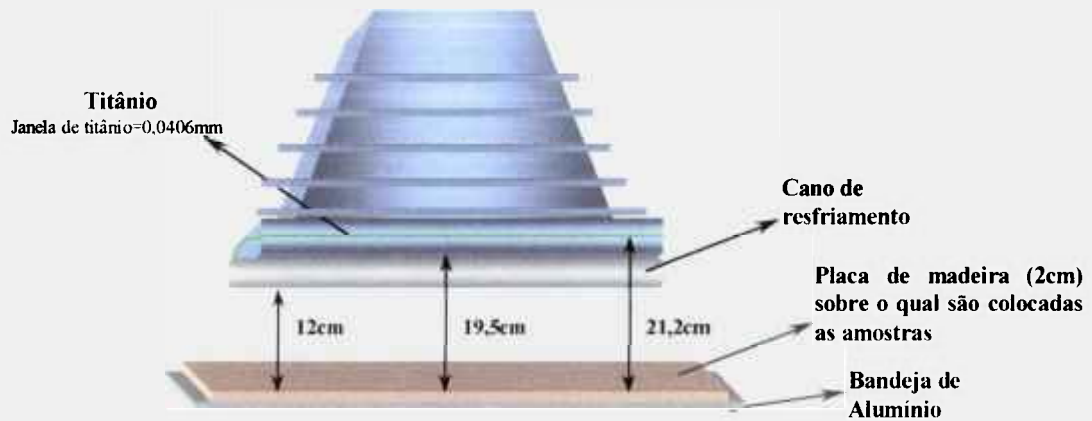


Figura 6 – Dimensões da área de irradia o no acelerador de elétrons

3.4 Fonte de ^{60}Co – Gammacell 220

A fonte de ^{60}Co denominada Gammacell 220   um dispositivo blindado no qual está o sistema de irradia o que   composto por uma câmara cilíndrica onde estão dispostos 16 lápis contendo pastilhas de ^{60}Co . Esta fonte possui um dispositivo que permite levar a amostra a ser irradiada até o centro deste cilindro onde estão as fontes. O sistema   mecânico e permite fixar o tempo de irradia o com o auxílio de um temporizador.

A fonte Gammacell pode ser vista na Figura 7, com a câmara aberta onde se v  uma amostra que   levada   posi o de irradia o após o fechamento da câmara.



Figura 7 - Fonte de ^{60}Co Gammacell 220.

3.5 Micr metro

A espessura dos filmes   determinada num equipamento portátil denominado micr metro, Figura 8. O micr metro de bancada usado neste trabalho   da Marca Peacock.



Figura 8 - Micr metro de bancada para medir a espessura de filmes dosimétricos.

O filme   colocado sobre uma plataforma e manualmente abaixa-se um embolo conectado a um relógio onde   marcada a espessura do material.

3.6 Estufa

O tratamento térmico do filme PVC e o estudo da influência da temperatura nos filmes utilizados, foi feito na estufa marca  tica, que possui um controlador de temperatura que pode ser fixada entre 50 C a 300 C.

CAPÍTULO 4

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

4.1 Irradiação no acelerador de elétrons

No acelerador de elétrons, para irradiar qualquer tipo de material, deve-se conhecer o valor da espessura, a densidade e a dose requerida pelo cliente ou pesquisador. Neste caso a taxa de dose também é muito importante porque permite calcular quantas vezes o material deve passar sob o feixe de elétrons.

Esses dados permitem verificar se o material pode ser irradiado com feixes de elétrons entre 0,5 MeV e 1,5 MeV e, em caso afirmativo, quais as formas de irradiação e os parâmetros primários de operação a serem fixados no acelerador isto é, energia (E) e corrente (I). Os parâmetros secundários como o número de vezes em que o material deve passar sob o feixe, (P), a largura do feixe, (L), e a velocidade da bandeja, (V), são determinados à partir da equação da dose total (D_T) Szulak² [24] .

É necessário conhecer os parâmetros abaixo para operar o acelerador de elétrons Dynamitron :

E (MeV) = Energia dos elétrons incidentes;

I (mA) = Corrente do feixe de elétrons;

L (cm) = Largura da varredura do feixe;

V (m/min) = Velocidade de transporte da bandeja onde são posicionados os materiais;

P = Número de passadas do material sob o feixe de elétrons;

K = Fator que corrige o valor da dose em função da energia dos elétrons incidentes;

D_T (kGy) = Dose absorvida total no material irradiado;

D_T/ t (kGy/s) = Taxa de dose = \dot{D} ;

t (s) = Tempo de exposição;

x (cm) = Espessura do material a ser irradiado;

ρ (g/cm³) = Densidade do material a ser irradiado;

σ (g/cm²) = Espessura correspondente à penetração de elétrons no material

$$\sigma = x \cdot \rho \text{ (materiais planos)} \quad \text{ou} \quad \sigma = (\theta_e^2 - \theta_i^2) \cdot \rho \text{ (materiais cilíndricos)}$$

θ_e (cm) = Diâmetro externo

θ_i (cm) = Diâmetro interno

HVD (μA) = Valor da corrente no divisor de alta voltagem;

SCAN(%) = Varredura- prefixação dos parâmetros da máquina, correspondentes ao L selecionado.

A determinação da dose absorvida em materiais diversos, baseia-se em parâmetros operacionais do acelerador e deve ser atestada em conjunto com a dose calculada à partir das curvas de calibração dos dosímetros (filmes) de rotina.

Limites do acelerador

O acelerador Dynamitron possui alguns limites de operação, aqui denominados incondicionais, que são adotados nas operações e que podem ser vistos na TABELA II .

A corrente do feixe é fixada conforme o valor da energia dos elétrons, entre 0,501 MeV e 1,500 MeV, e pode variar entre 0,3 mA e 25 mA, mas para efeito de conservação da máquina a corrente máxima adotada é de 15 mA. A equação que permite relacionar a energia com a corrente no feixe de elétrons é dada por:


$$I \leq 80 \cdot (E - 0,5) + 5 \quad (21)$$

Tabela II - Limites de operação adotados para o acelerador Dynamitron.

| Parâmetros | Mínimo | Máximo |
|------------|--------|--------|
| I (mA) | 0,3 | 15 |
| E (MeV) | 0,501 | 1,5 |
| L (cm) | 60 | 112 |

Profundidade de penetração dos elétrons em diversos materiais. A penetração σ , de elétrons com determinada energia e corrente, pode ser calculada para diferentes formas geométricas [Szulak²]:

1. Materiais Planos

$$\sigma = \rho \cdot x \text{ (g/cm}^2\text{)}$$


The diagram shows three downward-pointing arrows labeled 'e-' above a horizontal black bar representing a planar material.

(22)

2. Materiais Cilíndricos

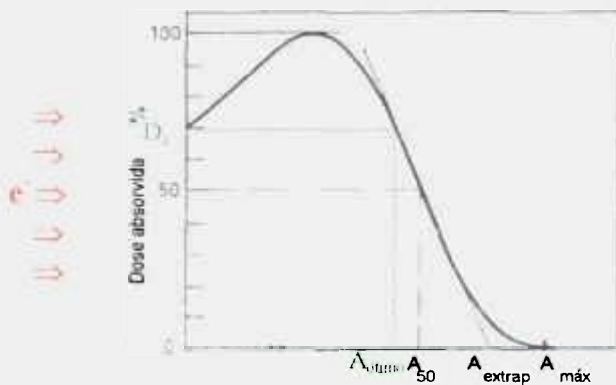
$$\sigma = \rho \cdot (\theta_e^2 - \theta_i^2) \text{ (g/cm}^2\text{)}$$


The diagram shows three downward-pointing arrows labeled 'e-' above a shaded semi-circle representing a cylindrical material.

(23)

Formas de irradiação. Muitos materiais, de acordo com a sua densidade e espessura, são irradiados de um só lado e isto proporciona um processamento mais homogêneo. Em outros casos, a homogeneidade da irradiação é alcançada irradiando os materiais em dois lados opostos.

Forma de irradiação 1: Esta forma é adotada quando a penetração dos elétrons, σ , é igual à espessura do material, de modo que a dose no ponto de entrada e de saída são iguais. A homogeneidade da irradiação é atingida ao irradiar o material de um só lado, como pode ser visto na Figura 9.



$$\text{HVD } (\mu\text{A}) = 25,6 + 187,8 \cdot \sigma \quad (24)$$

Figura 9 - Representação gráfica da dose absorvida em função da penetração dos elétrons no material irradiado de um só lado.

Forma de irradiação 2: Esta forma é adotada quando a penetração dos elétrons, σ , é menor que a espessura do material. A homogeneidade da irradiação é atingida ao irradiar o material dos dois lados, se plano, ou posições diametralmente opostas, se cilíndrico [3, 8], como pode ser visto na Figura 10.

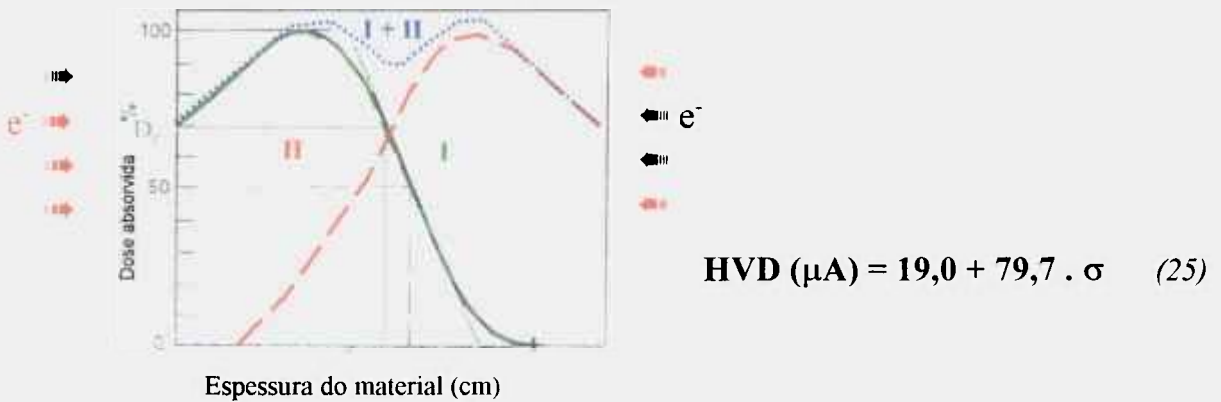


Figura 10 - Representação gráfica da dose absorvida em função da penetração dos elétrons no material irradiado dos dois lados.

Para os dois critérios, a energia (E) em função do HVD é obtida por intermédio de Tabelas que se encontram nos Anexos I e II .

Determinação do valor K: O valor K é determinado pela equação exponencial:

$$K = A \cdot e^{(B \cdot E)} \tag{26}$$

Onde: $A = 227$ e $B = -0,427$ é para $1 \leq E \leq 1,50$ MeV

$A = 315$ e $B = -0,745$ é para $0,5 \leq E \leq 1,03$ MeV

Cálculo do número de passadas, P, sob o feixe de elétrons, em função da dose requerida pelo usuário. O número de vezes em que o material plano passa sob o feixe de elétrons pode ser determinado a partir do cálculo da dose por passada, D_1 , que é dada pela equação (27) e (28) .

1. Para materiais planos: (Formas de irradiação 1 e 2)

$$D_1 = \frac{K.I.P}{2.L.V} \quad (27)$$

Então, o número de passadas, P, será dado por:

$$P = \frac{D_1.2.L.V}{K.I} \quad (28)$$

2. Para materiais cilíndricos:

$$D_1 = \frac{K.I.P}{L.V} \quad (\text{Forma de irradiação 1}) \quad (29)$$

$$D_1 = \frac{K.I.P}{2.L.V} \quad (\text{Forma de irradiação 2}) \quad (30)$$

De onde se calcula o valor de P, como foi feito anteriormente.

Taxa de dose: A fórmula para determinação da taxa de dose no acelerador de elétrons é :

$$\dot{D} = \frac{K.I}{3.L} \quad (31)$$

As equações (21) a (31), foram ajustadas por Szulak² e para a validação das mesmas foi usado o calorímetro de grafita [20] e também feitas curvas de calibração com filmes radiocrômicos.

4.2 Análise espectrofotométrica

As leituras da absorvância do filme são feitas antes e depois da irradiação. O filme é colocado em um porta amostra e este por sua vez é encaixado na câmara de leitura do espectrofotômetro. Através do programa de computador, acoplado ao espectrofotômetro, seleciona-se o comprimento de onda desejado, na qual é feita a medida, ou um intervalo. Neste último caso, o espectro pode ser determinado, varrendo comprimentos de onda seqüenciais para a determinação do comprimento de onda mais adequado. Quando existem dosímetros em que não há formação de picos de máxima absorção, neste caso escolhe-se o comprimento de onda onde a variação da absorvância com a dose absorvida é perceptível e uniforme .

4.3 Preparo dos filmes para irradiação

As amostras são preparadas de forma seguinte: corta-se o filme em tiras com dimensões de aproximadamente 0,8 cm x 3 cm (alguns filmes já são fornecidos nestas dimensões), com uma etiqueta adesiva identifica-se uma das extremidades do filme, tendo o cuidado de não tocar a região onde será feita a leitura para evitar que impurezas possam interferir no resultado. Após cumprir estas duas etapas ajusta-se os parâmetros de leitura do espectrofotômetro e fixa-se o comprimento de onda mais adequado. Introduce-se o filme no porta amostras e procede-se a leitura da absorção óptica antes e após a irradiação. São utilizados no mínimo três filmes para a determinação do valor de cada dose, tanto na construção das curvas de calibração quanto nos outros experimentos, portanto, todos os valores encontrados experimentalmente são resultados

das médias dos três filmes processados em conjunto. Com os resultados obtidos é determinado o desvio padrão.

O filme PVC, após a irradiação, deve ser submetido a um tratamento térmico para obter o desenvolvimento completo da cor. O filme deve ser aquecido por uma hora em temperatura de 50°C, ou durante 5 a 10 minutos em temperatura de 80°C. Neste trabalho foi utilizada uma estufa e os filmes foram aquecidos por 10 minutos à 80°C [1, 7, 15].

Após a leitura feita da absorção óptica do filme já irradiado, mede-se a espessura e procede-se os cálculos da dose.

Em operações rotineiras os filmes são colados no material a ser irradiado, nos pontos de interesse em que se deseja determinar a dose absorvida.

4.4 Irradiação na fonte de ^{60}Co – Gammacell 220

A irradiação na fonte de ^{60}Co Gammacell é muito simples, porque conhecendo-se a taxa de dose, previamente determinada com a solução de Fricke, multiplica-se este valor pelo tempo de exposição do material e se obtém a dose absorvida.

4.5 Determinação do alcance dos elétrons (penetração) num material e energia do feixe de elétrons

Para conhecer a profundidade de penetração dos elétrons no material irradiado, foram sobrepostos vários filmes e submetidos à irradiação. Desta maneira pode-se observar como a dose varia na profundidade desse material, bem como é possível determinar o valor da energia do feixe incidente de elétrons através dessa curva de penetração contra a dose.

Neste trabalho, para verificar a possibilidade dessa avaliação, foi usada a energia de 1,201 MeV. Pela Tabela do Anexo I obtém-se o valor do HVD, que é igual a 84,1 μA . O valor da espessura correspondente à penetração do elétron no material, σ , é obtida pela equação (24). O valor encontrado, para o filme CTA, foi de 0,3115 $\text{g}\cdot\text{cm}^2$. Como a densidade deste filme é 1,32 $\text{g}\cdot\text{cm}^3$, determina-se a espessura necessária para que a dose no ponto de entrada e saída sejam iguais, ou seja:

$$\sigma = \rho \cdot X \Rightarrow 0,3115 = 1,32 \cdot X$$

$$X = 0,236 \text{ cm} = 2,36 \text{ mm}$$

Conclui-se, portanto que, para que a dose nos pontos de entrada e saída sejam iguais deve-se utilizar 2,36 mm de filme. Como cada filme tem aproximadamente 0,125 mm de espessura, devem ser sobrepostos aproximadamente 20 filmes, embora tenham sido sobrepostos 35 filmes, para determinar o cálculo do alcance extrapolado e do alcance máximo.

A determinação da energia do feixe por este método é a forma mais comum de testar os parâmetros do acelerador.

4.6 Escolha do material suporte para irradiação no acelerador de elétrons

Para verificar qual o material mais adequado para colocar sob os dosímetros e os produtos a serem irradiados, foi feito um estudo com diferentes suportes: cobre, madeira, acrílico, vidro, alumínio e aço. A energia usada foi de 1,3 MeV e a corrente de 5 mA. Nesta avaliação foi utilizado o filme CTA, na forma de “sanduíches” com 22 filmes sobrepostos, com espessura nominal de 2,75 mm. Estes filmes sobrepostos foram colocados sobre cada um dos materiais. Os materiais que mais espalham elétrons não devem ser usados nas irradiações porque aumentam o valor da dose.

4.7 Curva de calibração

A curva de calibração é construída com a dose em função do coeficiente de absorção óptica (dose absorvida (kGy) $\times \alpha$ (mm^{-1} ou cm^{-1})). A curva de calibração pode ser uma regressão linear ou polinomial, dependendo do tipo de material dosimétrico [2, 4, 7]. Cada ponto da curva, representa a média dos resultados obtidos, para no mínimo três filmes.

4.8 Determinação da influência dos fatores ambientais no filme dosimétrico

É importante verificar o comportamento dos filmes, em diferentes condições ambientais como luz, temperatura e umidade relativa do ar [6, 8]. Este estudo é importante também para observar se a variação na leitura é causada pela radiação ou a outros fatores que podem vir a ocorrer durante a irradiação. No acelerador de elétrons para cada 10 kGy em uma irradiação contínua há um aumento de aproximadamente 3°C na temperatura do ambiente próximo ao material irradiado.

Para determinar a influência da luz sobre o filme, este ficou exposto à luz do laboratório, composta por luz fluorescente e luz natural diurna, por vários dias e foram feitas, periodicamente, leituras da absorvância.

Para determinar a influência da temperatura, o filme foi submetido a uma temperatura de 50°C por 60 minutos e as medidas da absorvância foram feitas de 10 em 10 minutos.

Para a determinação da influência da umidade foi feita uma avaliação da variação da umidade relativa do ar nos ambientes do laboratório e câmara de irradiação, tendo-se verificado que a mesma oscilava entre 65% e 90% [6, 18]. Os filmes ficaram expostos, suspensos em um “varal” de nylon, em ambiente ausente de luz e mantidos à temperatura ambiente por 120 horas. A leitura da absorvância foi feita periodicamente.

4.9 Determinação do limite inferior de detecção da radiação

Para determinar o limite inferior de detecção da radiação, foram separados 20 filmes e para cada um determinada a absorvância (A_0) e a espessura. Como os filmes não foram irradiados, a absorvância $A = 0$. À partir destes dados determina-se o coeficiente de absorção óptica, α (mm^{-1}) = $|(A - A_0) / x|$ e faz-se a média dos coeficientes de absorção óptica, $\bar{\alpha}$. Em seguida calcula-se o desvio padrão (σ). O limite inferior de detecção da radiação é: $\alpha \pm 3\sigma$, considerou-se então que qualquer valor da dose imediatamente acima de $\bar{\alpha} + 3\sigma$, corresponde a dose mínima detectável.

Para determinar o coeficiente de absorção óptica mínimo dos filmes, detectável para a operação em que o acelerador de elétrons entra em operação e é imediatamente desligado, foram colocados filmes dispostos na bandeja de irradiação, em três distâncias diferentes à partir da direção do feixe de elétrons, conforme mostra a Figura 11. Foram ajustados todos os parâmetros no painel para iniciar uma irradiação, mas a máquina foi apenas ligada e desligada em seguida, e a bandeja manteve-se estática. Desta forma foi possível observar a sensibilização dos filmes no

período em que se dá início ao processo de irradiação e na situação em que ocorre a emissão de elétrons não diretamente sobre as amostras (tempo de inércia para o funcionamento da bandeja).

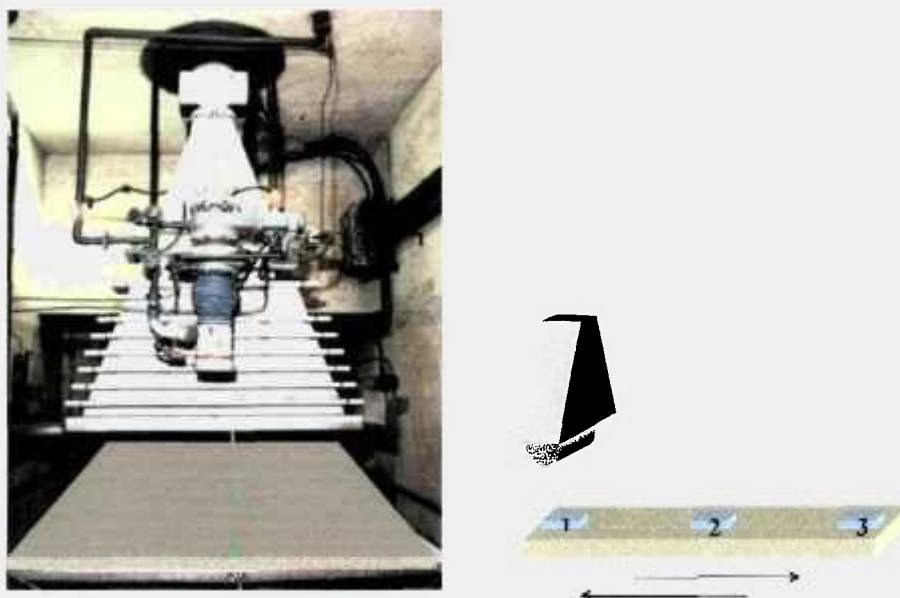


Figura 11 - Filmes dispostos sobre a bandeja de irradiação para a determinação da dose mínima detectável no acelerador de elétrons.

4.10 Determinação da uniformidade do feixe de elétrons

Quando os materiais são irradiados no acelerador de elétrons, eles podem ser dispostos ao longo da bandeja de irradiação, até uma largura de 100 cm. Quando a quantidade de amostras a serem irradiadas é pequena, são colocadas preferencialmente no centro da bandeja, mas se esta quantidade é grande usa-se todo o espaço útil da bandeja.

Para observar a uniformidade da incidência do feixe de elétrons em toda a largura da bandeja foram confeccionadas tiras de papelão com 100 cm de comprimento onde foram dispostos diversos filmes CTA, espaçados entre si, como mostra a Figura 12.

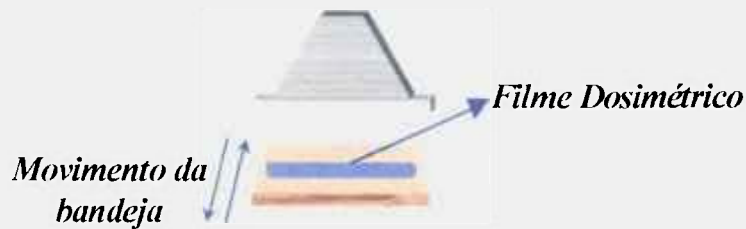


Figura 12 - Localização dos filmes ao longo da largura da bandeja no acelerador de elétrons

4.11 Determinação da variação da dose em função da distância entre o dosímetro e a janela de titânio do acelerador

A distância entre a bandeja de irradiação do acelerador e a janela de titânio é de 21,2 cm (ver Figura 6), no entanto por causa do sistema de esfriamento a distância útil é de aproximadamente 12 cm.

Foi estudada a variação do valor da dose à medida que a amostra é colocada mais próximo da janela de titânio, ou saída dos elétrons. Foram confeccionados suportes de madeira que permitem posicionar os filmes dosimétricos, entre 1 cm e 8 cm de altura à partir da bandeja. Os filmes foram fixados pelas extremidades, de forma a não ter contato com a madeira e evitar possíveis alterações dos resultados, como mostra a Figura 13.

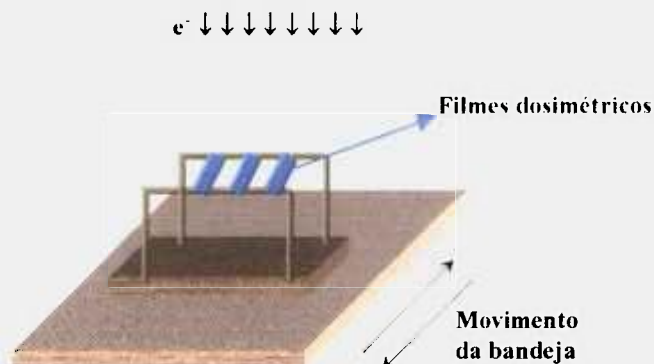


Figura 13 - Esquema do suporte utilizado para irradiação de filmes dosimétricos em diferentes distâncias (filme - janela)

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Cálculo da dose por passada sob o feixe de elétrons no acelerador

A dose por passada foi calculada para diferentes energias e correntes, usadas neste trabalho, em função da velocidade da bandeja que se desloca sob o feixe de elétrons em movimento de ida e volta e da largura do feixe. Os resultados obtidos encontram-se nas Tabelas III, IV e V.

Tabela III – Valores de dose (kGy), por passada, com velocidade da bandeja = 1,68 m/min

| E (MeV) → | 0,800 | | | 1,000 | | | 1,201 | | | 1,500 | | |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|
| | 60 cm | 100 cm | 112 cm | 60 cm | 100 cm | 112 cm | 60 cm | 100 cm | 112 cm | 60 cm | 100 cm | 112 cm |
| 0,3 | 2,58 | 1,55 | 1,38 | 2,23 | 1,34 | 1,19 | 2,02 | 1,21 | 1,08 | 1,78 | 1,07 | 0,95 |
| 0,5 | 4,31 | 2,58 | 2,31 | 3,71 | 2,23 | 1,99 | 3,37 | 2,02 | 1,81 | 2,97 | 1,78 | 1,59 |
| 0,8 | 6,89 | 4,13 | 3,69 | 5,93 | 3,56 | 3,18 | 5,39 | 3,24 | 2,89 | 4,75 | 2,85 | 2,54 |
| 1,2 | 10,33 | 6,20 | 5,54 | 8,90 | 5,34 | 4,77 | 8,09 | 4,85 | 4,33 | 7,12 | 4,21 | 3,81 |
| 1,5 | 12,92 | 7,75 | 6,92 | 11,12 | 6,67 | 5,96 | 10,11 | 6,07 | 5,42 | 8,90 | 5,34 | 4,77 |
| 3,0 | 25,83 | 15,50 | 13,84 | 22,25 | 13,35 | 11,92 | 20,22 | 12,13 | 10,83 | 17,80 | 10,68 | 9,53 |
| 4,5 | 38,75 | 23,25 | 20,76 | 33,37 | 20,02 | 17,88 | 30,34 | 18,20 | 16,25 | 26,70 | 16,02 | 14,30 |
| 6,0 | 51,67 | 31,00 | 27,68 | 44,49 | 26,70 | 23,84 | 40,45 | 24,27 | 21,67 | 35,60 | 21,36 | 19,07 |
| 7,5 | 64,58 | 38,75 | 34,60 | 55,62 | 33,37 | 29,80 | 50,56 | 30,34 | 27,08 | 44,49 | 26,70 | 23,84 |
| 9,0 | 77,50 | 46,50 | 41,52 | 66,74 | 40,05 | 35,75 | 60,67 | 36,40 | 32,50 | 53,39 | 32,04 | 28,60 |
| 10,5 | 90,42 | 54,25 | 48,44 | 77,87 | 46,72 | 41,71 | 70,78 | 42,47 | 37,92 | 62,29 | 37,38 | 33,37 |
| 12,0 | 103,33 | 62,00 | 55,36 | 88,99 | 53,39 | 47,67 | 80,89 | 48,54 | 43,34 | 71,19 | 42,71 | 38,14 |
| 13,5 | 116,25 | 69,75 | 62,28 | 100,11 | 60,07 | 53,63 | 91,01 | 54,60 | 48,75 | 80,09 | 48,05 | 42,91 |
| 15,0 | 129,17 | 77,50 | 69,20 | 111,24 | 66,74 | 59,59 | 101,12 | 60,67 | 54,17 | 88,99 | 53,39 | 47,67 |

Tabela IV – Valores de dose (kGy), por passada, com velocidade da bandeja = 3,36 m/min

| E (MeV) → | 0,800 | | | 1,000 | | | 1,201 | | | 1,500 | | |
|-----------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| | 60 cm | 100 cm | 112 cm | 60 cm | 100 cm | 112 cm | 60 cm | 100 cm | 112 cm | 60 cm | 100 cm | 112 cm |
| 0,3 | 1,29 | 0,78 | 0,69 | 1,11 | 0,67 | 0,60 | 1,01 | 0,61 | 0,54 | 0,89 | 0,53 | 0,48 |
| 0,5 | 2,15 | 1,29 | 1,15 | 1,85 | 1,11 | 0,99 | 1,69 | 1,01 | 0,90 | 1,48 | 0,89 | 0,79 |
| 0,8 | 3,45 | 2,07 | 1,85 | 2,97 | 1,78 | 1,59 | 2,70 | 1,62 | 1,44 | 2,37 | 1,42 | 1,27 |
| 1,2 | 5,17 | 3,10 | 2,77 | 4,45 | 2,67 | 2,38 | 4,05 | 2,43 | 2,17 | 3,25 | 1,95 | 1,74 |
| 1,5 | 6,46 | 3,88 | 3,46 | 5,56 | 3,34 | 2,98 | 5,06 | 3,03 | 2,71 | 4,45 | 2,67 | 2,38 |
| 3,0 | 12,92 | 7,75 | 6,92 | 11,12 | 6,67 | 5,96 | 10,11 | 6,07 | 5,42 | 8,90 | 5,34 | 4,77 |
| 4,5 | 19,38 | 11,63 | 10,38 | 16,69 | 10,01 | 8,94 | 15,17 | 9,10 | 8,13 | 13,35 | 8,01 | 7,15 |
| 6,0 | 25,83 | 15,50 | 13,84 | 22,25 | 13,35 | 11,92 | 20,22 | 12,13 | 10,83 | 17,80 | 10,68 | 9,53 |
| 7,5 | 32,29 | 19,38 | 17,30 | 27,81 | 16,69 | 14,90 | 25,28 | 15,17 | 13,54 | 22,25 | 13,35 | 11,92 |
| 9,0 | 38,75 | 23,25 | 20,76 | 33,37 | 20,02 | 17,88 | 30,34 | 18,20 | 16,25 | 26,70 | 16,02 | 14,30 |
| 10,5 | 45,21 | 27,13 | 24,22 | 38,93 | 23,36 | 20,86 | 35,39 | 21,23 | 18,96 | 31,15 | 18,69 | 16,69 |
| 12,0 | 51,67 | 31,00 | 27,68 | 44,49 | 26,70 | 23,84 | 40,45 | 24,27 | 21,67 | 35,60 | 21,36 | 19,07 |
| 13,5 | 63,13 | 37,88 | 33,82 | 50,06 | 30,03 | 26,82 | 45,50 | 27,30 | 24,38 | 40,05 | 24,03 | 21,45 |
| 15,0 | 64,58 | 38,75 | 34,60 | 55,62 | 33,37 | 29,80 | 50,56 | 30,34 | 27,08 | 44,49 | 26,70 | 23,84 |

Tabela V – Valores de dose (kGy), por passada, com velocidade da bandeja = 6,72 m/min

| E (MeV) → | 0,800 | | | 1,000 | | | 1,201 | | | 1,500 | | |
|-----------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|
| | 60 cm | 100 cm | 112 cm | 60 cm | 100 cm | 112 cm | 60 cm | 100 cm | 112 cm | 60 cm | 100 cm | 112 cm |
| 0,3 | 0,65 | 0,39 | 0,35 | 0,56 | 0,33 | 0,30 | 0,51 | 0,30 | 0,27 | 0,45 | 0,27 | 0,24 |
| 0,5 | 1,08 | 0,65 | 0,58 | 0,93 | 0,56 | 0,50 | 0,84 | 0,51 | 0,45 | 0,74 | 0,45 | 0,40 |
| 0,8 | 1,72 | 1,03 | 0,92 | 1,48 | 0,89 | 0,79 | 1,35 | 0,81 | 0,72 | 1,19 | 0,71 | 0,64 |
| 1,2 | 2,58 | 1,55 | 1,38 | 2,23 | 1,34 | 1,19 | 2,02 | 1,21 | 1,08 | 1,78 | 1,07 | 0,95 |
| 1,5 | 3,23 | 1,94 | 1,73 | 2,78 | 1,67 | 1,49 | 2,53 | 1,52 | 1,35 | 2,23 | 1,34 | 1,19 |
| 3,0 | 6,46 | 3,88 | 3,46 | 5,56 | 3,34 | 2,98 | 5,06 | 3,03 | 2,71 | 4,45 | 2,67 | 2,38 |
| 4,5 | 9,69 | 5,81 | 5,19 | 8,34 | 5,01 | 4,47 | 7,58 | 4,55 | 4,06 | 6,67 | 4,00 | 3,58 |
| 6,0 | 12,92 | 7,75 | 6,92 | 11,12 | 6,67 | 5,96 | 10,11 | 6,07 | 5,42 | 8,90 | 5,34 | 4,77 |
| 7,5 | 16,15 | 9,69 | 8,65 | 13,91 | 8,34 | 7,45 | 12,64 | 7,58 | 6,77 | 11,12 | 6,67 | 5,96 |
| 9,0 | 19,38 | 11,63 | 10,38 | 16,69 | 10,01 | 8,94 | 15,17 | 9,10 | 8,13 | 13,35 | 8,01 | 7,15 |
| 10,5 | 22,61 | 13,56 | 12,11 | 19,47 | 11,68 | 10,43 | 17,70 | 10,62 | 9,48 | 15,57 | 9,34 | 8,34 |
| 12,0 | 25,83 | 15,50 | 13,84 | 22,25 | 13,35 | 11,92 | 20,22 | 12,13 | 10,83 | 17,80 | 10,68 | 9,53 |
| 13,5 | 29,06 | 17,44 | 15,57 | 25,03 | 15,02 | 13,41 | 22,75 | 13,65 | 12,19 | 20,02 | 12,01 | 10,73 |
| 15,0 | 32,29 | 19,38 | 17,30 | 27,81 | 16,69 | 14,90 | 25,28 | 15,17 | 13,54 | 22,25 | 13,35 | 11,92 |

Analisando as Tabelas III, IV e V, pode-se observar uma variação muito grande do valor da dose, por passada. Em uma única passada pode-se atingir tanto 0,24 kGy como 129,17 kGy, dependendo dos parâmetros utilizados. O cliente deve informar quais os parâmetros mais adequados ao material que está trazendo para irradiar, caso contrário, usam-se os parâmetros que provocam menos desgaste no equipamento.

5.2 Escolha do material suporte para irradiações no acelerador de elétrons

A Figura 14 ilustra como os filmes foram colocados no suporte em formas de “sanduíches”. As curvas de dose em função do alcance dos elétrons no filme CTA permitiram escolher os materiais que causam menos espalhamento.

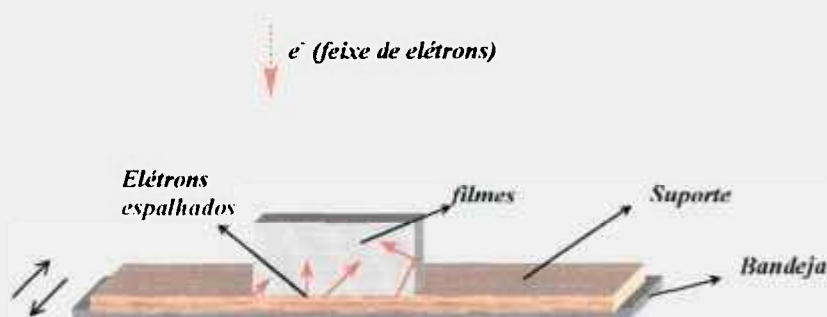


Figura 14 - Arranjo dos filmes CTA sobrepostos, colocados sobre diferentes suportes que foram colocados sobre a bandeja de irradiação do acelerador.

Na Figura 15, observa-se que, a partir de $0,20 \text{ g.cm}^{-2}$, ocorreu um decréscimo no valor da dose em função do alcance dos elétrons. Observa-se que as curvas foram agrupadas em três conjuntos, I; II e III. O grupo I, refere-se aos suportes que provocaram maior espalhamento, aço e cobre, e os mais adequados foram os suportes do grupo III, acrílico e madeira. Como o acrílico é um composto que se degrada com muita facilidade em irradiações sucessivas com feixes de elétrons, optou-se pelo suporte de madeira.

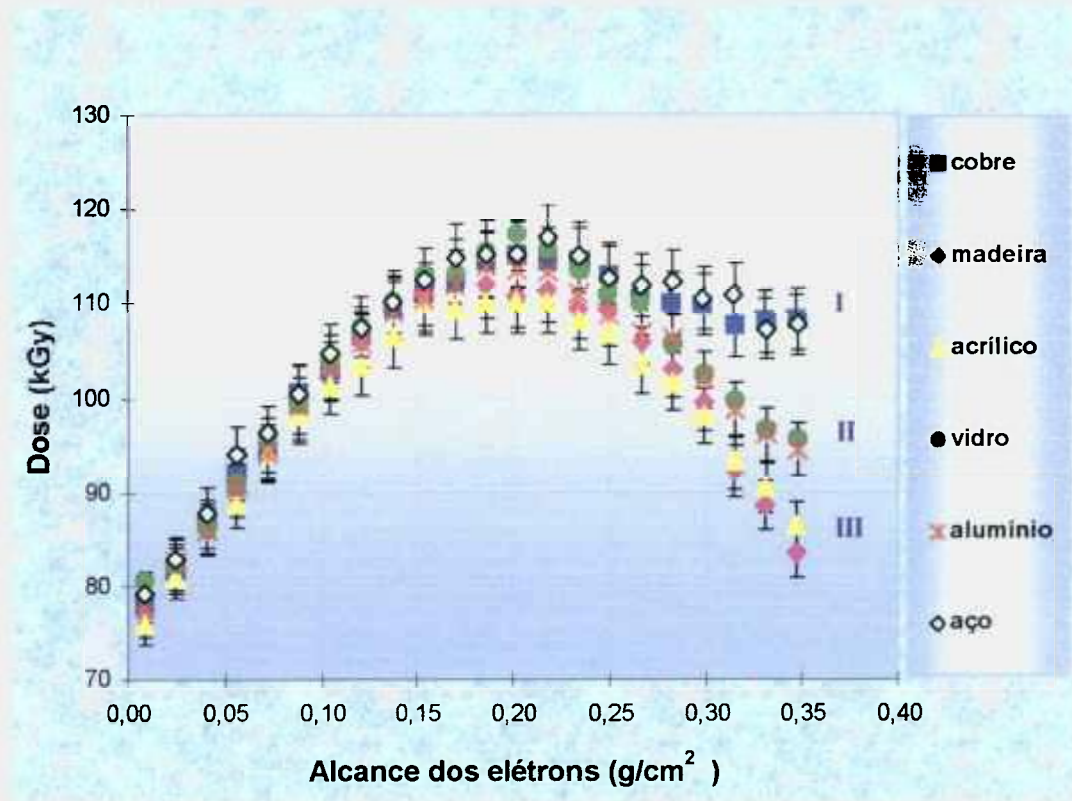


Figura 15 - Curva da dose absorvida para o filme CTA colocado sobre diversos materiais, em função do alcance dos elétrons.(E = 1,3 MeV, I = 5 mA, V = 3,36 m/min e L = 100 cm).

5.3 Caracterização do filme CTA para aplicação em dosimetria das radiações

5.3.1 Determinação do comprimento de onda ótimo para leitura espectrofotométrica

O comprimento de onda, no qual ocorreu uma variação perceptível e uniforme da absorvância, com o aumento da dose, foi 280 nm como mostra a Figura 16. Este valor é o mesmo encontrado na literatura [6, 7, 13] e está de acordo com as informações do fabricante.

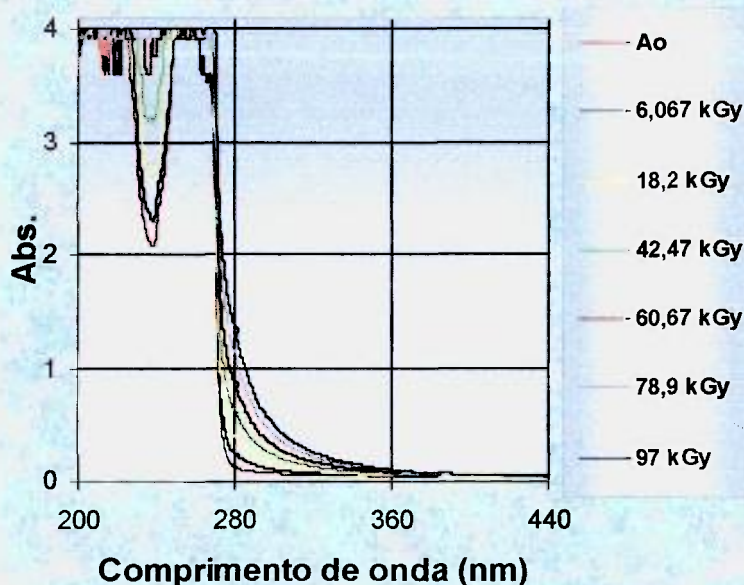


Figura 16 - Espectro de absorção do filme CTA, entre 200 nm e 400 nm, após ser submetido a diferentes doses de irradiação no acelerador de elétrons ($E = 1,2$ MeV, $I = 3$ mA, $V = 3,36$ m/min e $L = 100$ cm).

5.3.2 Curva de calibração

A Figura 17, mostra a curva de calibração do filme CTA em todo o intervalo de doses em que apresenta sensibilidade radiométrica. Acima de 280 kGy não é possível fazer a leitura óptica pois o CTA torna-se quebradiço e difícil de ser manuseado, por causa de mudanças em sua estrutura química se a irradiação for efetuada de forma contínua.

A curva de calibração, mostrada na Figura 17, é linear. Como o intervalo de doses é grande, foram construídas curvas independentes, para três intervalos de dose: 6,067 kGy a 103,14 kGy, 103,14 kGy a 200,21 kGy e 200,21 kGy a 279,08 kGy. Desta forma é possível assegurar que a linearidade é mantida em todos os intervalos de doses. A representação gráfica dessas curvas encontra-se nas Figuras 18, 19 e 20.

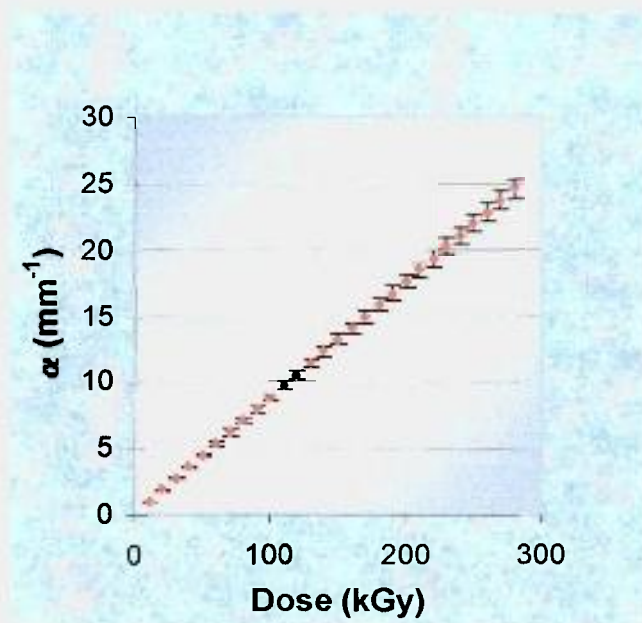


Figura 17 - Representação gráfica da relação entre a dose e o coeficiente de absorção óptica do filme CTA, irradiado no acelerador de elétrons. ($E = 1,2$ MeV, $I = 3$ mA, $V = 3,36$ m/min, $L = 100$ cm e intervalo de doses entre 6,067 kGy e 279,08 kGy).

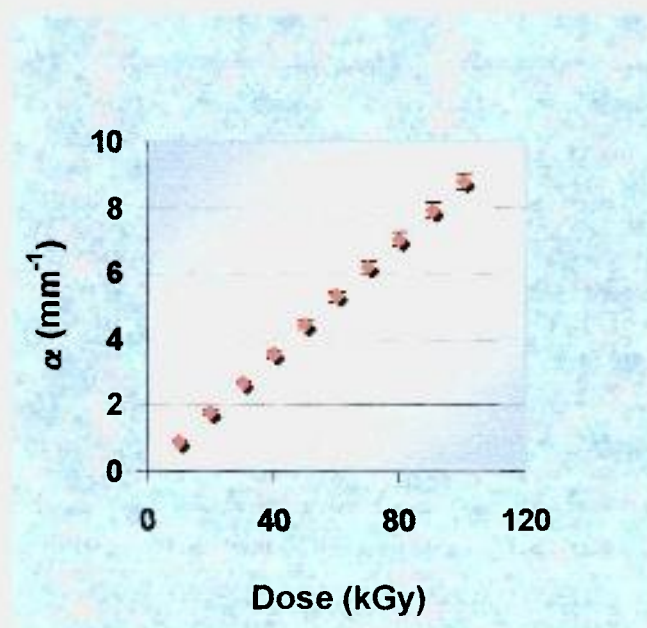


Figura 18 - Representação gráfica da curva de calibração do filme CTA, irradiado no acelerador de elétrons. ($E = 1,2$ MeV, $I = 3$ mA, $V = 3,36$ m/min, $L = 100$ cm e intervalo de doses entre 6,067 kGy e 103,14 kGy).

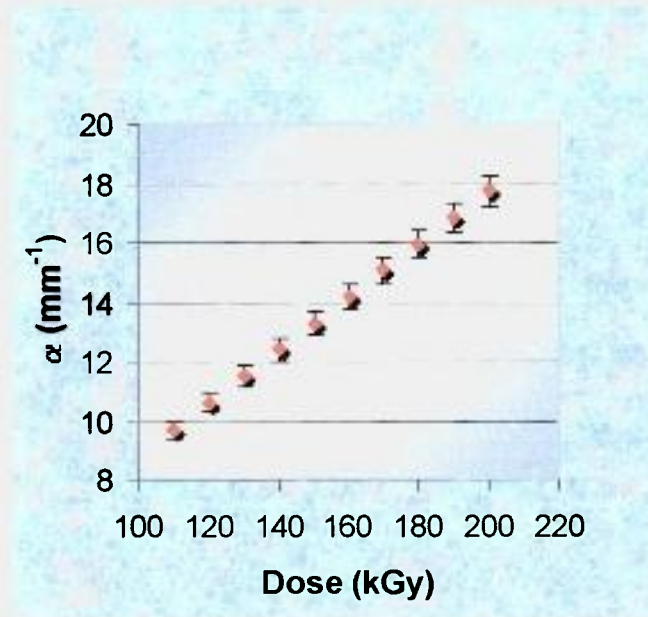


Figura 19 - Representação gráfica da curva de calibração do filme CTA, irradiado no acelerador de elétrons. ($E = 1,2$ MeV, $I = 3$ mA, $V = 3,36$ m/min, $L = 100$ cm e intervalo de doses entre 103,14 kGy e 200,21 kGy).

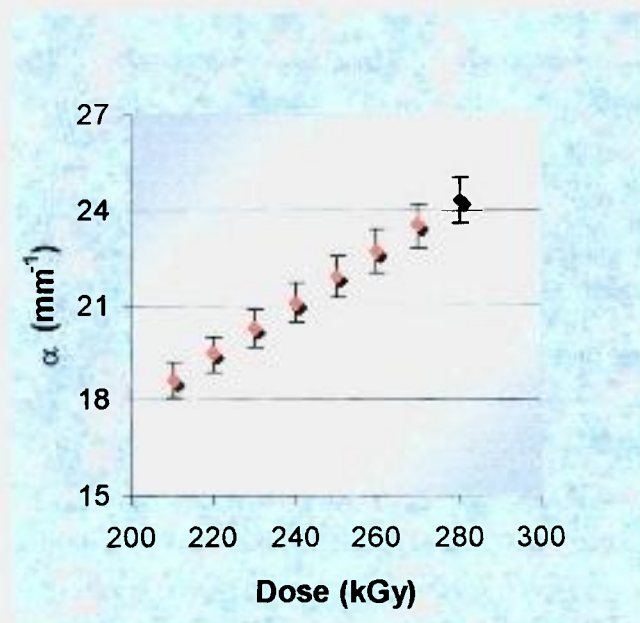


Figura 20 - Representação gráfica da curva de calibração do filme CTA, irradiado no acelerador de elétrons. ($E = 1,2$ MeV, $I = 3$ mA, $V = 3,36$ m/min, $L = 100$ cm e intervalo de doses entre 200,21 kGy e 279,08 kGy).

5.3.3 Determinação do limite inferior de detecção da radiação

Foram usados 20 filmes virgens, para os quais foi determinado o coeficiente de absorção médio, $\bar{\alpha}$, e o desvio padrão, σ . O valor calculado, para $\bar{\alpha} \pm 3\sigma$, resultou em $0,8092 \pm 0,0678$, que corresponde ao intervalo em que se considera que o filme não tenha sido irradiado. Qualquer valor acima de 0,877 passou a ser considerado correspondente à dose mínima detectável.

Os filmes foram dispostos na bandeja de irradiação conforme a Figura 11. O feixe de elétrons foi ajustado para uma energia de 1,5 MeV, corrente de 3 mA e largura do feixe 100 cm e velocidade da bandeja 3,36 m/min. Nestas condições a dose absorvida por passada corresponde a 5,339 kGy. Quando o acelerador foi posto em operação, a dose mínima detectável foi considerada como aquela em que o equipamento, apenas ligado e desligado, sem que a bandeja entrasse em movimento, resultou em um valor de coeficiente de absorção acima de 0,877 correspondente a $\bar{\alpha} + 3\sigma$.

No ponto 1, mais próximo do feixe de elétrons o valor encontrado foi 1,0489, isto é 19,6% maior. Nos pontos 2 e 3, no meio e na outra extremidade da bandeja de irradiação, os valores encontrados foram de 0,8482 e 0,8392, dentro do intervalo, indicando que a radiação nesses locais não afeta os materiais ali depositados.

Assim pode-se concluir, que os materiais que são colocados na extremidade da bandeja próximo ao feixe de elétrons, no momento que o equipamento é ligado recebem uma parcela da dose, antes mesmo que a bandeja entre em movimento.

5.3.4 Influência das condições ambientais

5.3.4.1 Luz

Após 72 horas de exposição à luz ambiente (lâmpadas fluorescentes e luz natural diurna) o filme CTA apresentou um aumento no coeficiente de absorção óptica de 16,8%, como pode ser visto na Figura 21. O filme pode ficar exposto à luz, antes e durante a irradiação, no máximo por 3 horas, pois além deste tempo a variação é significativa para doses baixas (3 horas de exposição = 0,8% de aumento no coeficiente de absorção óptica).

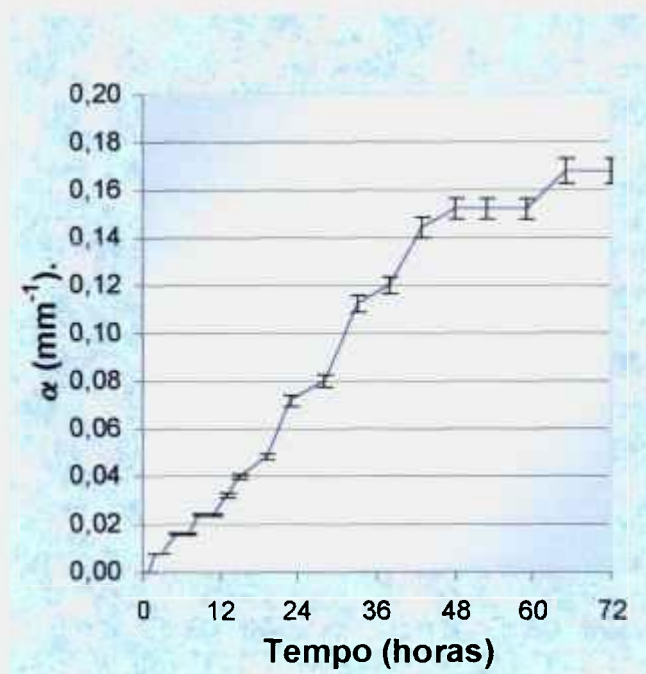


Figura 21 - Influência da luz ambiente (fluorescente e natural) no filme CTA não irradiado.

5.3.4.2 Temperatura

O filme CTA não irradiado foi submetido a uma temperatura de 50°C por 60 minutos, em ambiente sem luz. Observou-se um aumento no coeficiente de absorção óptica de 1,6%, como pode ser visto na Figura 22.

Sabe-se que durante a irradiação com elétrons, por causa das altas taxas de dose, ocorre um aumento de temperatura de $\approx 3^\circ\text{C}$ para cada 10 kGy. Neste caso, para que os filmes sejam aquecidos até 50°C, a dose deve ser de 100 kGy, em irradiação contínua. Como a taxa de dose é alta ($\text{kGy}\cdot\text{s}^{-1}$), conseqüentemente o tempo de irradiação para chegar aos 100 kGy é curto, portanto o filme não fica exposto a temperaturas tão elevadas por muito tempo.

É recomendável que o filme virgem seja estocado em temperatura ambiente, para evitar que o valor da absorvância não seja comprometido.

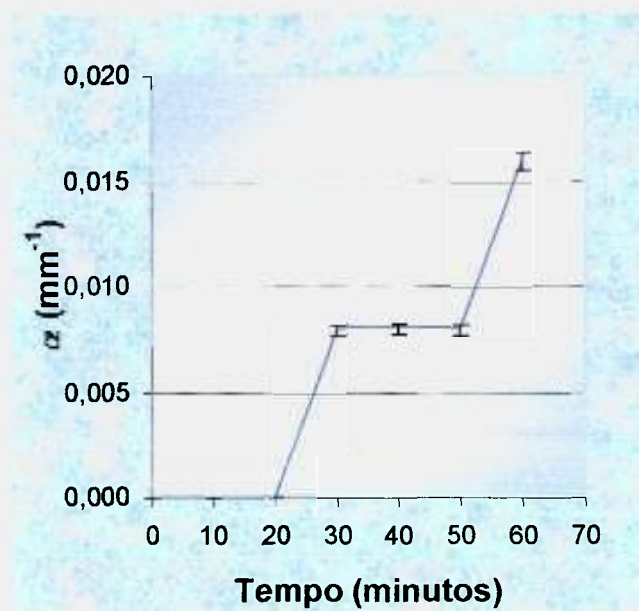


Figura 22 - Resposta do filme CTA, não irradiado, quando exposto , por 60 min, a ambiente com temperatura de 50°C.

5.3.4.3 Umidade

Após permanecer exposto por 120 horas, em um ambiente ausente de luz, com temperatura ambiente e umidade relativa entre 68% e 90%, observou-se um aumento no coeficiente de absorção óptica de 9,6%, como pode ser visto na Figura 23.

Alguns filmes foram colocados em envelopes plásticos pretos, para evitar a interferência da luz e da umidade, e mantidos à temperatura ambiente. Foram feitas leituras, e não houve variação nos valores das absorvâncias dos filmes. Portanto, a umidade não afeta a resposta do filme CTA, desde que esteja protegido.

Durante a irradiação no acelerador de elétrons, embora a taxa de dose seja alta ($\text{kGy}\cdot\text{s}^{-1}$), o tempo de irradiação é curto, portanto o filme CTA não é influenciado por eventual umidade na câmara de irradiação. Porém, se forem irradiados produtos congelados, os filmes devem ser envolvidos em fina camada de plástico protetor, caso fiquem em contato com os mesmos. A resposta, neste caso, deve ser corrigida para a espessura do plástico protetor.

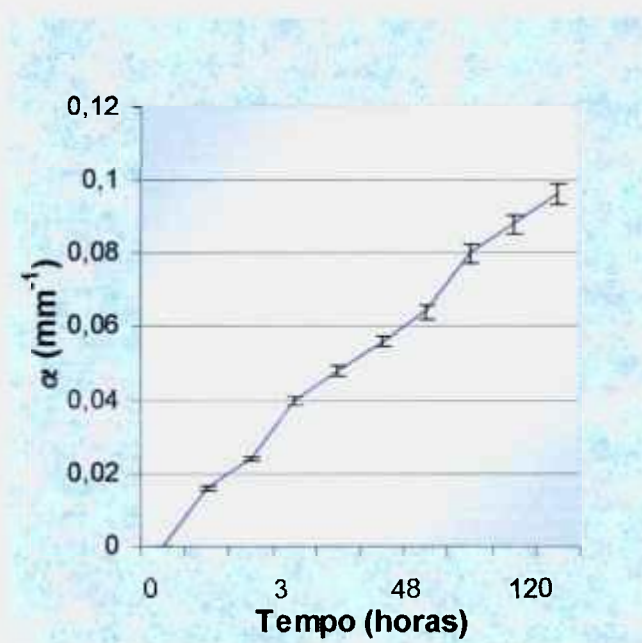


Figura 23 - Resposta do filme CTA, não irradiado, quando exposto a ambiente com umidade relativa do ar entre 68% e 90%.

5.3.5 Avaliação da resposta do filme CTA para diferentes energias e corrente fixa

O filme CTA irradiado com feixe de elétrons, por exemplo no intervalo de doses entre 6,067 kGy e 97,07 kGy, não apresentou dependência com a energia de radiação incidente, pois a flutuação na curva de calibração, de uma energia para outra, foi de 0,9% a 3%, conforme é visto na Figura 24. Nesta flutuação estão inclusos os erros provenientes dos fatores ambientais, desvios na medida espectrofotométrica, oscilações na rede elétrica e a contribuição da dose no momento em que o equipamento é ligado e a bandeja ainda não entrou em movimento.

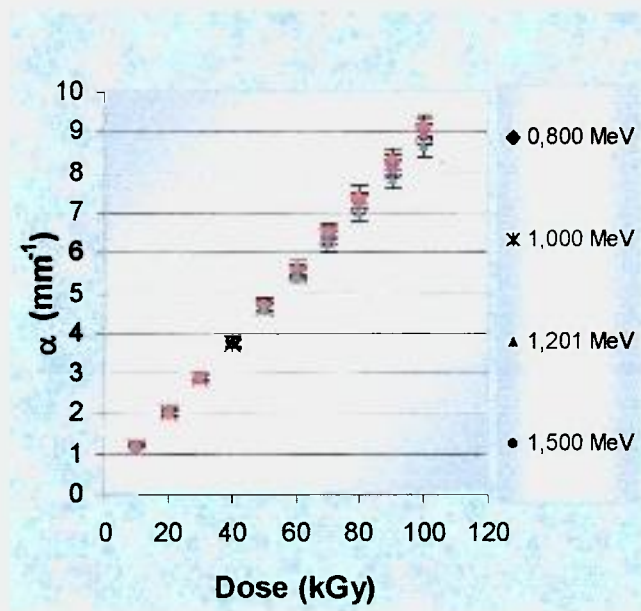


Figura 24 - Representação gráfica das curvas de calibração, do filme CTA, irradiado no acelerador de elétrons. (E = 0,8 MeV; 1,0 MeV; 1,201 MeV e 1,5 MeV, I = 3 mA, V = 3,36 m/min, L = 100 cm e intervalo de dose entre 6,067 kGy e 97,07 kGy).

5.3.6 Avaliação da resposta do filme CTA para diferentes correntes e mesma energia

Na Figura 25 pode-se observar que, mesmo para valores de corrente tão diferentes, a flutuação do coeficiente de absorção óptica em função da dose foi de 3,2% a 8%.

Freqüentemente ocorrem oscilações na rede elétrica, quando isto acontece durante a operação do acelerador, observam-se flutuações no valor da dose. Estas oscilações tornam-se mais problemáticas quando o material é irradiado com correntes baixas, pois a flutuação pode chegar a 0,1 mA.

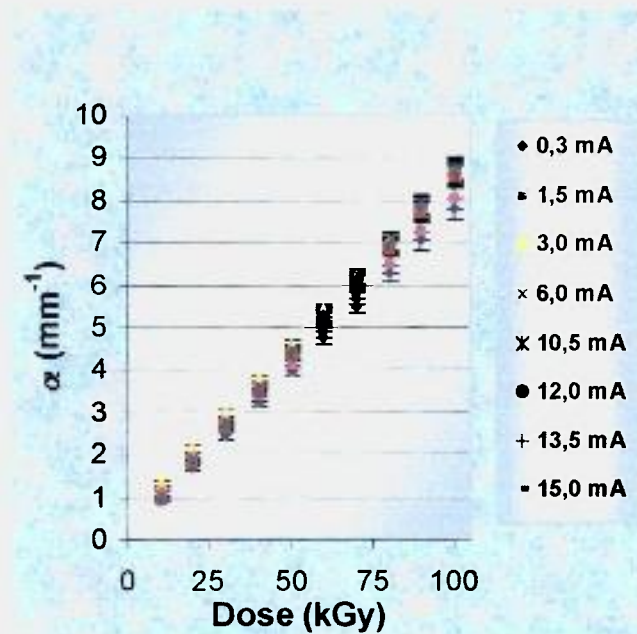


Figura 25 - Representação gráfica das curvas de calibração do filme CTA irradiado no acelerador de elétrons. (E = 1,2 MeV, V = 3,36 m/min, L =100 cm)

5.3.7 Avaliação da resposta do filme CTA para diferentes velocidades da bandeja mantendo-se fixas a energia e a corrente

Mantendo-se fixas a energia e a corrente e variando a velocidade da bandeja, constatou-se que, para velocidades mais baixas, a dose por passada é maior pois o material demora mais tempo para passar sob o feixe de elétrons. Esta diferença no tempo de exposição do material pode provocar variações na dose total requerida.

Foram irradiados filmes com três velocidades da bandeja diferentes. A flutuação no valor do coeficiente de absorção óptica não excedeu 3%, como mostra a Figura 26. A velocidade mais utilizada em irradiações de rotina é de 3,36 m/min, por isso a maior parte dos experimentos foi feita neste parâmetro.

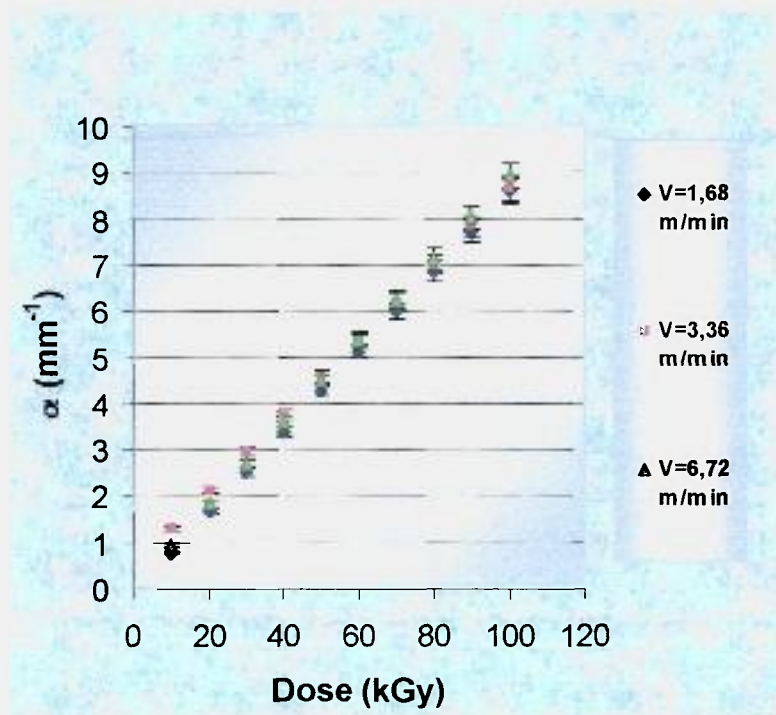


Figura 26 - Representação gráfica das curvas de calibração do filme CTA irradiados no acelerador de elétrons. ($E = 1,2 \text{ MeV}$, $I = 3 \text{ mA}$, $L = 100 \text{ cm}$)

5.3.8 Avaliação da resposta do filme CTA para diferentes larguras do feixe de elétrons com a mesma energia e corrente

A dose acusada pelo filme dosimétrico, por passada sob o feixe de elétrons, é maior para feixes mais estreitos ($D_1 = K.I.P / 2.L.V$), se for mantida fixa a energia e a corrente.

Neste experimento, foram utilizadas três larguras do feixe: mínima de 60 cm, intermediária, mais utilizada, de 100 cm e a máxima de 112 cm. Manteve-se fixas a energia em 1,2 MeV e a corrente em 3 mA. A variação do valor da dose não ultrapassou 5%, como pode ser visto na Figura 27.

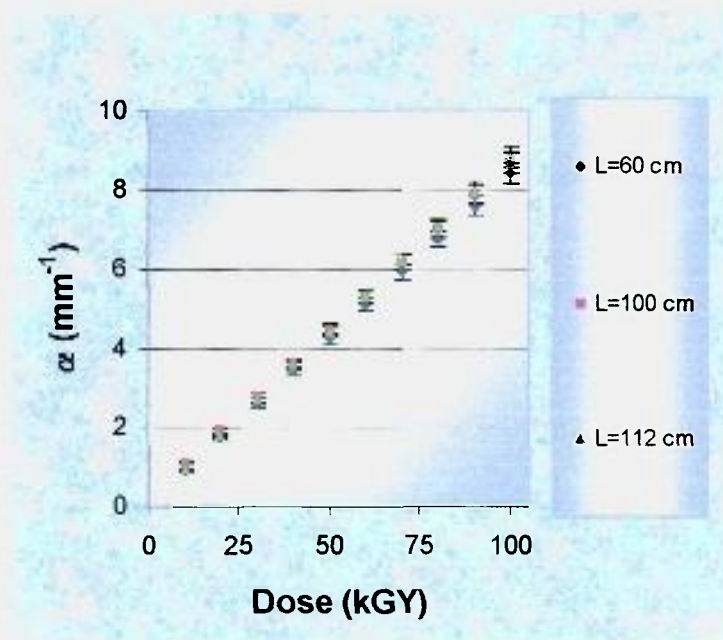


Figura 27 - Representação gráfica das curvas de calibração do filme CTA irradiados no acelerador de elétrons. ($E = 1,2$ MeV, $I = 3$ mA, $V = 3,36$ m/min).

5.3.9 Determinação da uniformidade do feixe de elétrons

Observa-se na Figura 28, que o feixe de elétrons não é uniforme em toda a largura da bandeja de irradiação. A linha tracejada em vermelho indica a dose determinada por cálculos.

Nota-se que ocorreu uma diferença maior, nas extremidades, entre as doses calculadas e as determinadas experimentalmente, e menor no centro da bandeja.

Na parte direita da bandeja, indicada na Figura 28 de 0 a 25 cm, a dose encontrada experimentalmente foi menor que a dose determinada por cálculos, e, na parte esquerda da bandeja, isto é entre 75 cm e 100 cm, a dose encontrada experimentalmente foi maior que aquela determinada por cálculos. Esta variação torna-se mais evidente para larguras do feixe de elétrons de 60 cm e 112 cm, no entanto esta diferença não ultrapassou a 5% no valor da dose. Deve-se ressaltar que a distância entre a lateral da bandeja e a parede adjacente é maior do lado esquerdo que do direito. Isto pode estar influenciando os resultados conquanto do lado direito pode estar ocorrendo retroespalhamento dos elétrons.

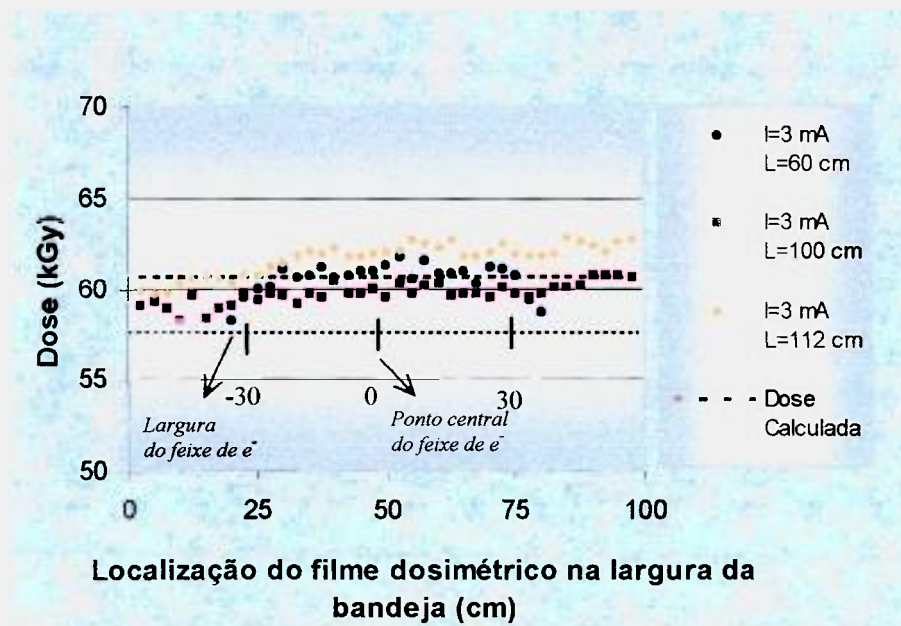


Figura 28 - Uniformidade do feixe de elétrons. ($E = 1,2$ MeV, $I = 3$ mA, $V = 3,36$ m/min, $L = 60$ cm, 100 cm e 112 cm e $D = 60,67$ kGy).

5.3.10 Avaliação da resposta do filme CTA para diferentes sistemas de irradiação

Na Figura 29, observa-se que para fontes de irradiação diferentes a resposta do filme CTA variou de 1,7% a 8%. O filme CTA pode ser usado tanto para dosimetria com feixes de elétrons como para radiação gama.

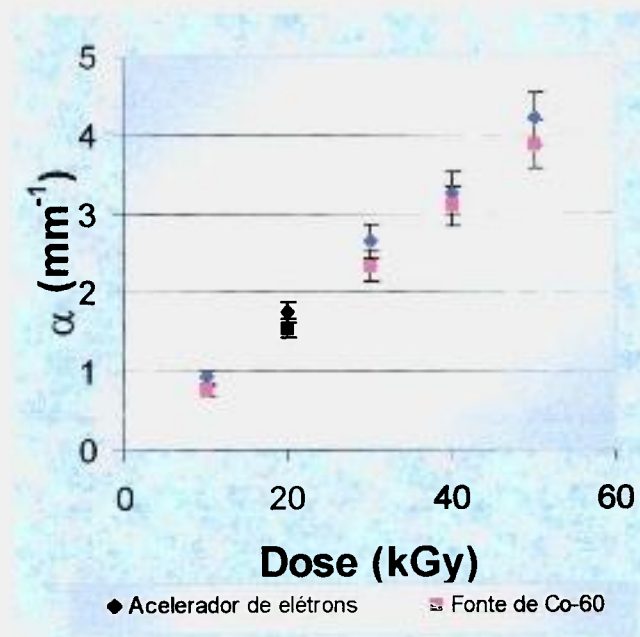


Figura 29 - Representação gráfica das curvas de calibração do filme CTA no acelerador de elétrons ($E = 1,201 \text{ MeV}$, $I = 3 \text{ mA}$, $V = 3,36 \text{ m/min}$, $L = 100 \text{ cm}$ e $\dot{D} \cong 5 \times 10^4 \text{ kGy.h}^{-1}$), e na fonte de ^{60}Co ($\dot{D} \cong 7 \text{ kGy.h}^{-1}$).

5.3.11 Avaliação da resposta do filme CTA para diferentes distâncias entre o dosímetro e a janela de titânio do acelerador de elétrons.

Os resultados apresentados na Figura 30 mostraram que a variação máxima no valor da dose, para diferentes distâncias entre o filme e a janela de titânio, foi de 2,5%.

Como os filmes não foram apoiados sobre qualquer tipo de material, não se detectou a intensificação da dose por causa do retroespalhamento. Em doses mais elevadas, a 4 cm e 5 cm, ocorreu um aumento de 2,5% comparado com os valores observados para as outras distâncias. Este aumento não é tão alto para supor que nesta distância da janela seja necessário corrigir a resposta sempre que os materiais sejam colocados nestas posições.

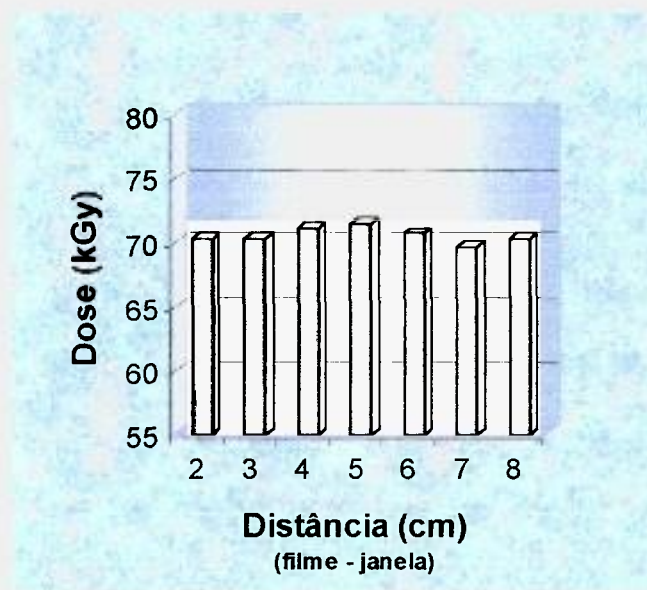


Figura 30 - Variação da dose determinada com o uso do filme CTA, para diferentes distâncias entre o dosímetro e a janela de titânio do acelerador ($E = 1,2$ MeV, $I = 3$ mA, $V = 3,36$ m/min, $L = 100$ cm e $D = 66,74$ kGy).

5.3.12 Penetração dos elétrons e determinação da energia dos elétrons

Neste experimento foram sobrepostos vários filmes CTA, conforme esquematizado na Figura 13. Pelos cálculos efetuados (seção 4.5) deveriam ser sobrepostos apenas 21 filmes para que a dose no ponto de entrada e saída fossem iguais, ou seja, para que a dose no primeiro filme fosse igual a dose no último filme. No entanto, para poder observar a penetração dos elétrons no CTA e para fins de cálculo da energia da radiação incidente foi necessário adotar uma espessura tal que a dose no último filme, apoiado sobre um suporte, seja praticamente zero. Neste estudo foram usados 35 filmes sobrepostos na forma de “sanduíche”.

Na Figura 31, constata-se a concordância entre os dados teóricos (Figura 1) e os encontrados experimentalmente. Os triângulos verdes representam a dose de entrada e a dose de saída. A penetração que corresponde à dose máxima representa o ponto de equilíbrio eletrônico da interação.

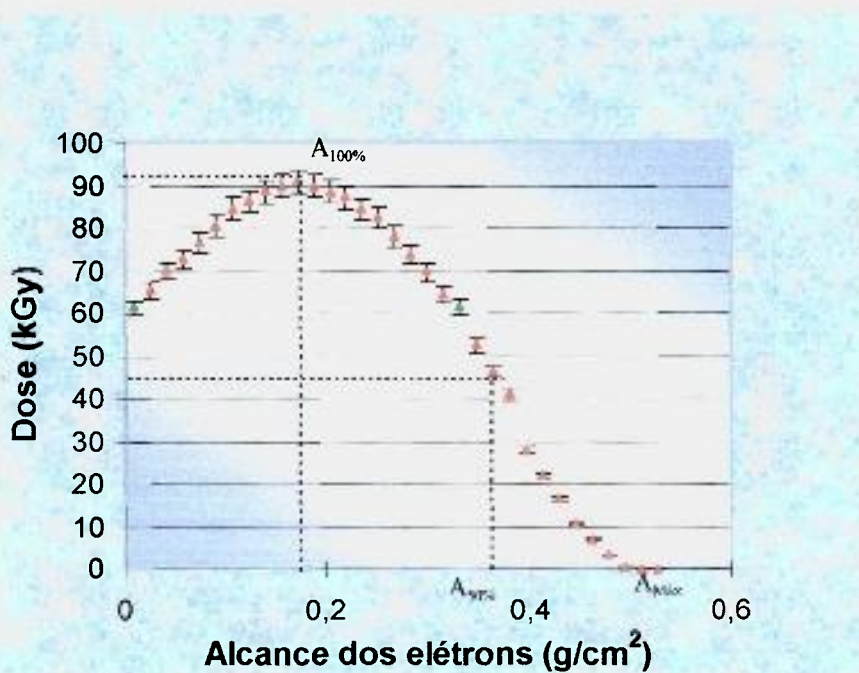


Figura 31 - Curva da penetração dos elétrons em função da dose em filmes CTA (E = 1,2 MeV, I = 3 mA, V = 3,36 m/min, L = 100 cm e D = 60,67 kGy).

Uma vez obtida a curva de dose em função da penetração dos elétrons no material dosimétrico, a energia da radiação incidente foi determinada, de forma aproximada, através das equações seguintes:

De acordo com a norma ISO/DIS 15569 [11]

Determinando-se o alcance extrapolado, e usando a equação (8), obtém-se:

$$\text{Se } A_{\text{extrap}} = 0,4698$$

$$\text{Então } E = 1,76 \cdot 0,4698 \cdot 1,32 + 0,33$$

$$\text{Assim } E = 1,4214 \text{ MeV}$$

De acordo com Seltzer¹

Neste caso, usa-se a equação (12),

$$\text{Se } A_{\text{extrap}} = 0,4698$$

$$\text{Então } E = e^{0,7532+0,8736 \cdot (-0,7554)+0,0316 \cdot (-0,7554)^2}$$

$$\text{Assim } E = 1,12 \text{ MeV}$$

Conforme a teoria de Lima [12]

Neste caso, usa-se a equação 13

$$\text{Se } A_{\text{extrap}} = 0,4698 \text{ e } Z(\text{CTA}) = 9,93$$

Então,

$$\frac{3,1E^2 - 0,015E}{1 + 3,1E} = 0,4698 \cdot \frac{(9,93 + 1,8)}{1,41 \cdot (9,93)^{0,68}}$$

Assim $E = 1,072 \text{ MeV}$

Tabela VI – Comparação entre valores calculados de energia

| Teoria de | Energia fixada (MeV) | Energia calculada (MeV) | Desvio (%) |
|------------------|----------------------|-------------------------|------------|
| Norma ISO | 1,201 | 1,421 | + 18,3 |
| Seltzer | 1,201 | 1,12 | - 6,9 |
| Lima | 1,201 | 1,072 | - 10,7 |

Conclui-se que a equação que fornece o valor da energia mais próximo daquele fixado no painel de controle da acelerador foi a formulada por Seltzer, com uma diferença de -2,5%. O desvio maior entre a energia calculada e a aplicada foi de +18,3%, quando se aplica as equações propostas pela norma ISO. Deve-se acrescentar ainda, que o valor do alcance extrapolado foi obtido manualmente no desenho da curva, e neste caso, qualquer modificação na inclinação da tangente pode afetar o encontro desta com o eixo onde estão os valores do alcance. Portanto, nenhuma das equações pode ser considerada imprópria.

No Anexo IV está a Tabela referente aos valores de dose encontrados à medida que aumentou o alcance dos elétrons no filme CTA.

5.3.13 Simulação de irradiações rotineiras de diversos materiais

Foram irradiados alguns materiais no acelerador de elétrons, com os parâmetros seguintes: $E = 1,2 \text{ MeV}$, $I = 3 \text{ mA}$, $V = 3,36 \text{ m/min}$ e $D = 60,67 \text{ kGy}$. Foi usado o filme CTA e os resultados foram os seguintes:

Placas de polietileno : Foram sobrepostas duas placas de polietileno, uma colada na outra, como mostra a Figura 32. Os filmes foram colocados na parte superior e inferior de cada conjunto. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela VI.

Para cada posição do filme foi calculado o alcance dos elétrons (σ = espessura x densidade). A placa superior (placa 1), possuía uma espessura de 0,130 cm e a placa inferior (placa 2), 0,125 cm. A densidade do material utilizado é $1,23 \text{ g.cm}^{-3}$, portanto, o valor calculado de σ :

(I) Para filmes sobre a placa 1 : Espessura do CTA = 0,0124 cm e densidade do CTA = $1,32 \text{ g.cm}^{-3}$ $\sigma = (0,0124 \text{ cm})/2 \cdot 1,32 \text{ g.cm}^{-3} = 0,0082 \text{ g.cm}^{-2}$

(II) Para filmes sob a placa 1 : $\sigma = 0,130 \text{ cm} \cdot 1,23 \text{ g.cm}^{-3} = 0,1599 \text{ g.cm}^{-2}$

(III) Para filmes sob a placa 2: $\sigma = (0,125 \text{ cm} + 0,130 \text{ cm}) \cdot 1,23 \text{ g.cm}^{-3} = 0,3137 \text{ g.cm}^{-2}$.

Observa-se, que os valores dos alcances determinados experimentalmente aproximaram-se muito dos valores dos alcances calculados acima, como pode ser visto na Tabela VII.



Figura 32 - Localização do filme CTA nas placas de polietileno irradiadas

Tabela VII - Valores de doses encontradas da irradiação de placas de polietileno no acelerador de elétrons.

| Posição do filme no material | Alcance dos elétrons, σ (g.cm⁻²) | Dose (kGy) |
|---|--|-----------------------|
| Sobre a placa 1 | 0,0082 | 61,2 |
| Sob a placa 1 | 0,1602 | 92,9 |
| Sobre a placa 2 | 0,1683 | 93,9 |
| Sob a placa 2 | 0,3227 | 61,3 |

Os alcances determinados experimentalmente, conforme a Tabela VII, foram comparados com os alcances determinados com o uso do sistema “sanduíche” de CTA encontrados no Anexo IV. Observa-se que os valores de dose absorvida para cada alcance, nos dois casos (Anexo IV e Tabela VII), são muito próximos. A pequena variação observada é justificada pelo valor da densidade dos materiais ($\rho_{\text{CTA}} = 1,32 \text{ g.cm}^{-3}$ e $\rho_{\text{placa}} = 1,23 \text{ g.cm}^{-3}$).

Portanto, conclui-se, que os valores encontrados no Anexo IV, podem ser utilizados para determinar a dose para cada valor do alcance, em materiais com densidades semelhantes ao CTA.

Tubo de ensaio de vidro: Os filmes foram colocados na parte superior externa, na parte inferior interna e inferior externa do tubo, como mostra a Figura 33. Os resultados das doses obtidas encontram-se na Tabela VIII. Para cada posição do filme foi calculado o alcance dos elétrons ($\sigma = \text{espessura} \times \text{densidade}$). A parede do do tubo possui uma espessura de 0,12 cm e o diâmetro interno 1,14 cm. A densidade do material utilizado é $1,86 \text{ g.cm}^{-3}$ e a densidade do ar $0,00012 \text{ g.cm}^{-3}$. Portanto, sabendo que o CTA possui espessura = 0,124 cm e densidade = $1,32 \text{ g.cm}^{-3}$, o valor de σ calculado é:

(I) Para filmes sobre o tubo de ensaio :

$$\sigma = (0,0124 \text{ cm})/2 \cdot 1,32 \text{ g.cm}^{-3} = 0,0082 \text{ g.cm}^{-2}$$

(II) Para filmes na parte interna inferior:

$$\sigma = 0,12 \text{ cm} \cdot 1,86 \text{ g.cm}^{-3} + 1,14 \text{ g.cm}^{-3} \cdot 0,00012 \text{ g.cm}^{-3} = 0,223 \text{ g.cm}^2$$

(III) Para filmes sob o tubo:

$$\sigma = 0,12 \text{ cm} \cdot 1,86 \text{ g.cm}^{-3} + 1,14 \text{ g.cm}^{-3} \cdot 0,00012 \text{ g.cm}^{-3} + 0,12 \text{ cm} \cdot 1,86 \text{ g.cm}^{-3} = 0,4465 \text{ g.cm}^2$$

Observa-se, que os valores dos alcances determinados experimentalmente aproximaram-se muito dos valores dos alcances calculados acima, como pode ser visto na Tabela VIII.

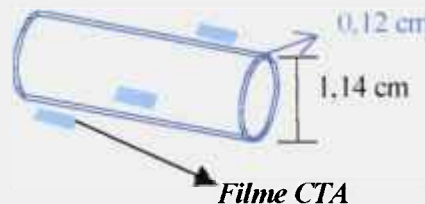


Figura 33 - Localização do filme CTA no tubo de ensaio irradiado.

Tabela VIII - Valores de doses encontradas da irradiação de um tubo de ensaio

| Posição do filme no material | Alcance dos elétrons, σ (g.cm^{-2}) | Dose (kGy) |
|------------------------------|---|------------|
| Parte superior externa | 0,0082 | 60,1 |
| Parte inferior interna | 0,2314 | 75,8 |
| Parte inferior externa | 0,4546 | 11,0 |

Neste caso, para que a dose de entrada e saída fossem iguais, o material deveria ser irradiado dos dois lados, ou então serem usados outros parâmetros da máquina isto é outra energia e corrente.

Placa de madeira: Os filmes foram colocados na parte superior e na parte inferior de uma placa de madeira, como mostra a Figura 34. A placa de madeira possui uma espessura de 0,6 cm e densidade igual a 0,5515 g.cm⁻³. Considerando a espessura do CTA = 0,0124 cm e densidade do CTA = 1,32 g.cm⁻³. O valor de σ calculado é de:

(I) Para filmes sobre a placa de madeira :

$$\sigma = (0,0123 \text{ cm})/2 \cdot 1,32 \text{ g.cm}^{-3} = 0,0081 \text{ g.cm}^{-2}$$

(II) Para filmes sob a placa de madeira :

$$\sigma = 0,6 \text{ cm} \cdot 0,5515 \text{ g.cm}^{-3} = 0,3309 \text{ g.cm}^{-2}$$

Os resultados experimentais encontram-se na Tabela IX. Observa-se que os valores dos alcances calculados aproximaram-se muito dos valores determinados experimentalmente.



Figura 34 - Localização do filme CTA nas placa de madeira irradiada.

Tabela IX - Valores de doses encontradas da irradiação de uma placa de madeira

| Posição do filme no material | Alcance dos elétrons, σ (g.cm ⁻²) | Dose (kGy) |
|------------------------------|--|------------|
| Parte superior | 0,0081 | 63,3 |
| Parte inferior | 0,3390 | 56,9 |

5.4 Caracterização do filme PVC para aplicação em dosimetria das radiações

5.4.1 Determinação do comprimento de onda ótimo para leitura espectrofotométrica

Na Figura 35, observam-se vários picos, no entanto o comprimento de onda em que ocorreu uma variação perceptível e uniforme da absorvância com o aumento da dose foi 395 nm. Este valor está de acordo com a literatura [6, 7, 16].

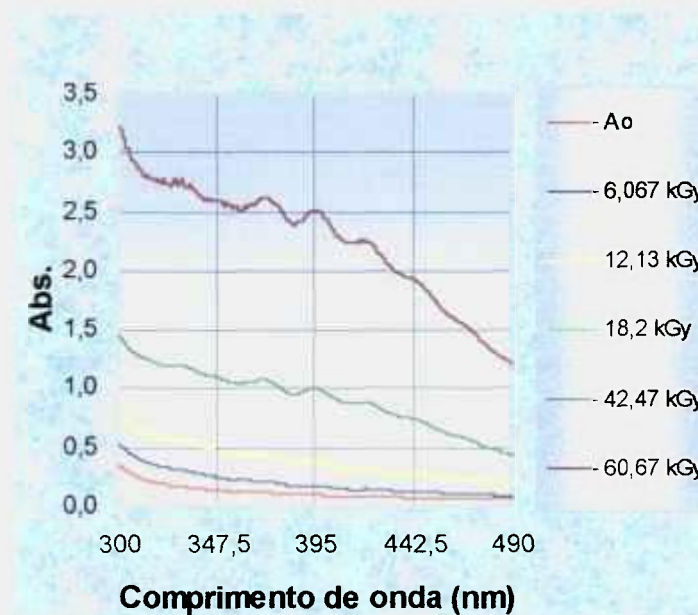


Figura 35 - Espectro de absorção do filme PVC, entre 300 e 490 nm, após ser submetido a diferentes doses de irradiação no acelerador de elétrons. (E = 1,2 MeV, I = 3 mA, V = 3,36 m/min, L = 100 cm).

5.4.2 Curva de calibração

A curva de calibração do filme PVC é um polinômio de segundo grau (R^2) $\alpha = A + B_1 \cdot (\text{Dose}) + B_2 \cdot (\text{Dose})^2$. A Figura 36 mostra esta curva.

Foram construídas curvas independentes, para a percepção de possível saturação nos últimos pontos da curva, como pode ser visto nas Figuras 37 e 38.

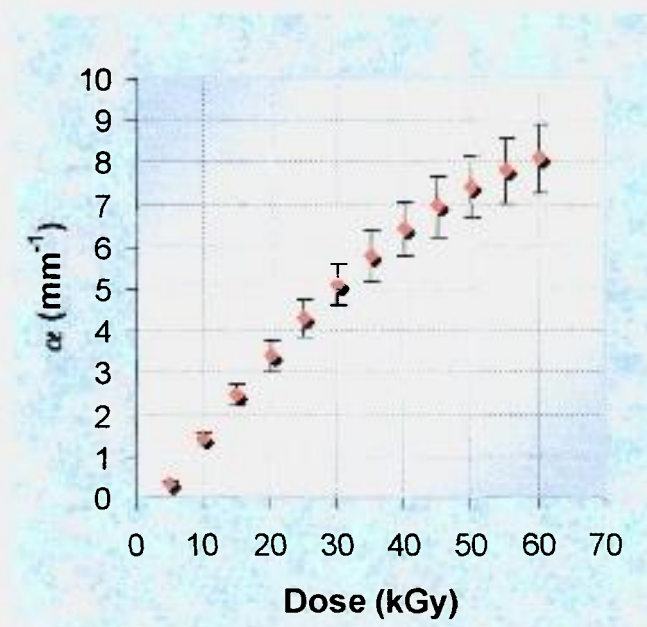


Figura 36 - Representação gráfica da curva de calibração do filme PVC, irradiado no acelerador de elétrons. ($E = 1,2$ MeV, $I = 3$ mA, $V = 3,36$ m/min, $L = 100$ cm e intervalo de doses entre 6,067 kGy e 60,67 kGy).

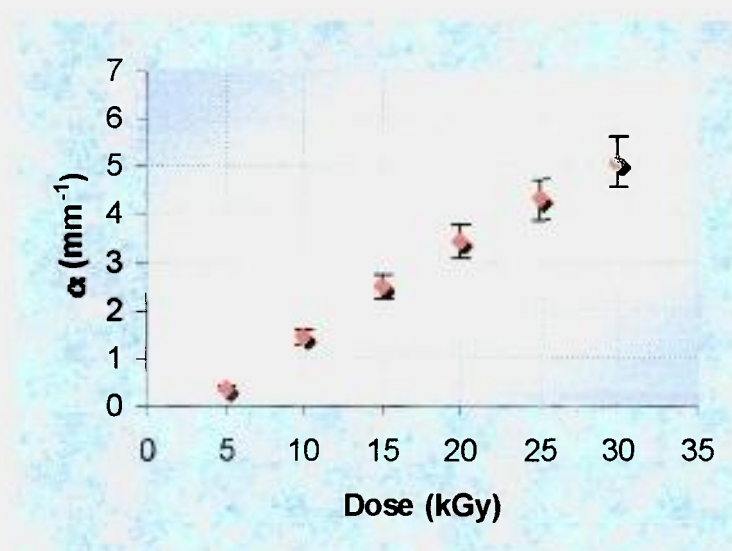


Figura 37 - Representação gráfica da curva de calibração do filme PVC, irradiado no acelerador de elétrons. ($E = 1,2$ MeV, $I = 3$ mA, $V = 3,36$ m/min, $L = 100$ cm e intervalo de doses entre 6,067 kGy e 30,335 kGy).

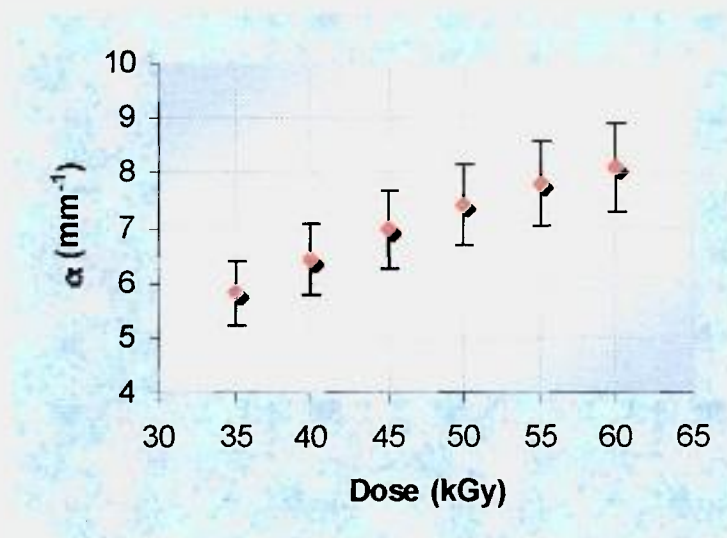


Figura 38 - Representação gráfica da curva de calibração do filme PVC, irradiado no acelerador de elétrons. ($E = 1,2$ MeV, $I = 3$ mA, $V = 3,36$ m/min, $L = 100$ cm e intervalo de doses entre 30,335 kGy e 60,67 kGy).

Dividindo a curva de calibração em duas partes, pode-se adotar para o primeiro intervalo a regressão linear, para determinar a equação que relaciona a dose com o coeficiente de absorção, e para o segundo intervalo, pode-se adotar a regressão linear se for desconsiderado o último ponto da curva (60,67 kGy), admitindo ter ocorrido saturação.

5.4.3 Determinação do limite inferior de detecção da radiação

Foram usados 20 filmes virgens, para os quais foi determinado o coeficiente de absorção médio, $\bar{\alpha}$, e o desvio padrão, σ . O valor calculado, para $\bar{\alpha} \pm 3\sigma$, resultou em $0,4185 \pm 0,0495$, que corresponde ao intervalo em que se considera que o filme não tenha sido irradiado. Qualquer valor acima de 0,468 passou a ser considerado a dose mínima detectável.

Os filmes foram dispostos na bandeja de irradiação conforme a Figura 11. O feixe de elétrons foi ajustado para uma energia de 1,5 MeV, corrente de 3 mA, largura do feixe de 100 cm e

velocidade da bandeja de 3,36 m/min. A dose que corresponde a estes parâmetros é de 5,339 kGy e o filme PVC possui sensibilidade radiométrica à partir de 5 kGy. Mas quando o acelerador foi posto em operação e imediatamente desligado, este filme não acusou valores de coeficiente de absorção óptica acima do mínimo de 0,468. Conclui-se que nesta situação o dosímetro não recebeu nenhuma dose.

5.4.4 Influência das condições ambientais

5.4.4.1 Luz

Após 72 horas de exposição à luz do laboratório (lâmpada fluorescente e luz natural diurna) ocorreu variação de 0,8% no coeficiente de absorção óptica do filme PVC, como pode ser visto na Figura 39. Conclui-se que este filme não apresentou aumento do coeficiente de absorção óptica significativo durante a estocagem em ambientes expostos à luz e pode ser submetido à radiação com a luz acesa como ocorre no acelerador de elétrons, sem nenhuma proteção.

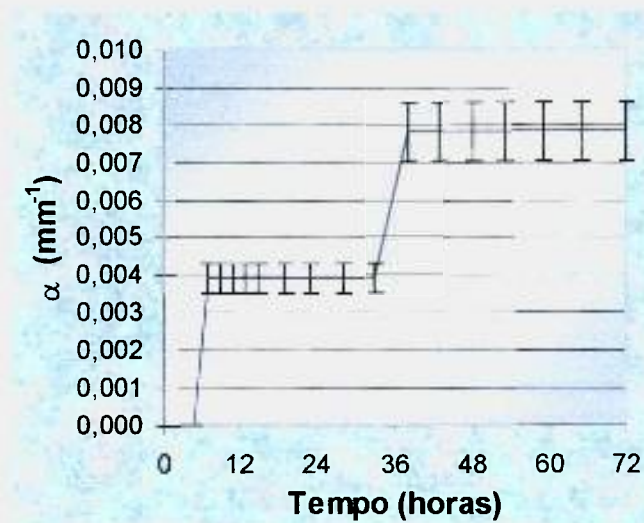


Figura 39 - Influência da luz no filme PVC não irradiado.

5.4.4.2 Temperatura

O filme PVC não irradiado foi submetido à uma temperatura de 50°C por 60 minutos. Foram feitas leituras da absorvância de 10 em 10 minutos. Não ocorreram variações no coeficiente de absorção do filme e isto indica que a temperatura não interfere na resposta do filme PVC não irradiado. Após a irradiação, a exposição ao calor interfere no resultado, pois o tratamento térmico serve para desenvolver e fixar a coloração adquirida durante a irradiação.

5.4.4.3 Umidade

Após permanecer exposto por 120 horas, em um ambiente ausente de luz, com temperatura ambiente e umidade relativa do ar entre 68% e 90%, observou-se um decréscimo no coeficiente de absorção óptica de 0,15%, como pode ser visto na Figura 40. Portanto, o filme não necessita de cuidados rigorosos para a estocagem.

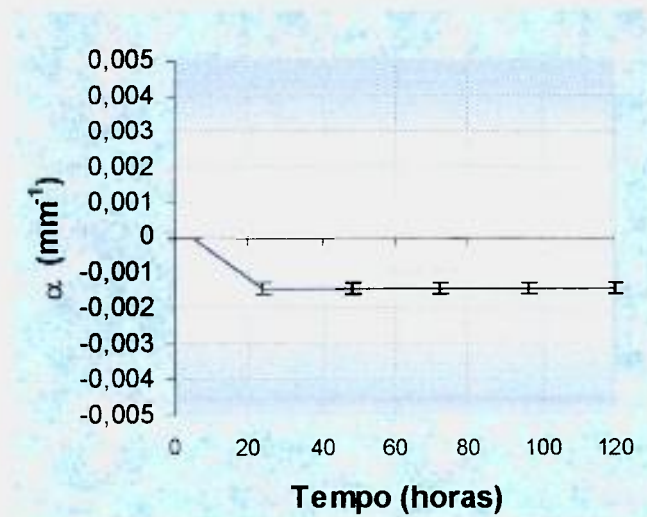


Figura 40 - Influência da umidade relativa do ar entre 68% e 90% no filme PVC não irradiado.

5.4.5 Avaliação da resposta do filme PVC para diferentes energias de elétrons e mesma corrente

Analisando a Figura 41, pode-se concluir que o filme PVC, para as energias estudadas, não apresentou dependência significativa com a energia de radiação incidente, embora a flutuação na curva de calibração, de uma energia para outra, foi de 10,5%. Esta flutuação é mundialmente aceita para este filme, especificamente quando usado em dosimetria de rotina como nas instalações da Europa [7]. A precisão nominal deste filme é 10% [13].

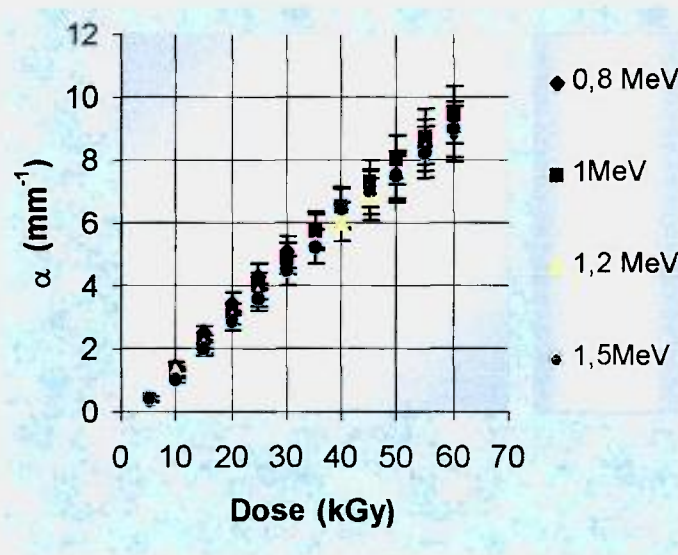


Figura 41 - Representação gráfica das curvas de calibração do filme PVC irradiados no acelerador de elétrons. (E = 0,8 MeV; 1,0 MeV; 1,2 MeV e 1,5 MeV, I = 3 mA, V = 3,36 m/min, L = 100 cm).

5.4.6 Avaliação da resposta do filme PVC para diferentes sistemas de irradiação

A Figura 42 mostra que, utilizando fontes de irradiação diferentes a resposta do filme PVC varia em média 8,1% (dentro da variação observada em situação de rotina). Esta variação ocorre mesmo quando se utiliza a mesma fonte de irradiação, ou seja, quando se usa diferentes taxas de dose no acelerador por exemplo. O filme PVC pode ser usado tanto para dosimetria com feixes de elétrons como para radiação gama.

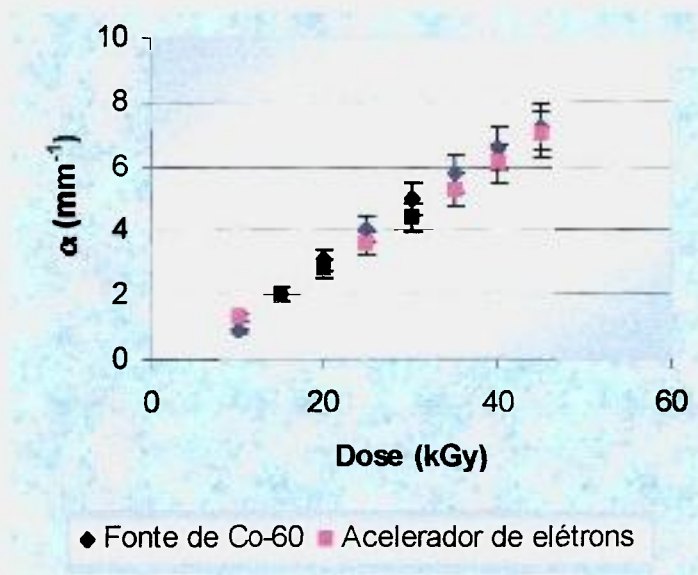


Figura 42 - Representação gráfica das curvas de calibração do filme PVC no acelerador de elétrons ($E = 1,201 \text{ MeV}$, $I = 3 \text{ mA}$, $V = 3,36 \text{ m/min}$, $L = 100 \text{ cm}$ e $\dot{D} \cong 5 \times 10^4 \text{ kGy.h}^{-1}$), e na fonte de ^{60}Co ($\dot{D} \cong 7 \text{ kGy h}^{-1}$).

5.5 Caracterização do filme PMMA – Red Perspex 4034 para aplicação em dosimetria das radiações no acelerador de elétrons

5.5.1 Determinação do comprimento de onda ótimo para leitura espectrofotométrica

Pode-se observar na Figura 43 que o comprimento de onda em que ocorre uma variação perceptível e uniforme da absorvância, com o aumento da dose, foi 640 nm, concordando com a literatura [6, 7, 13, 28].

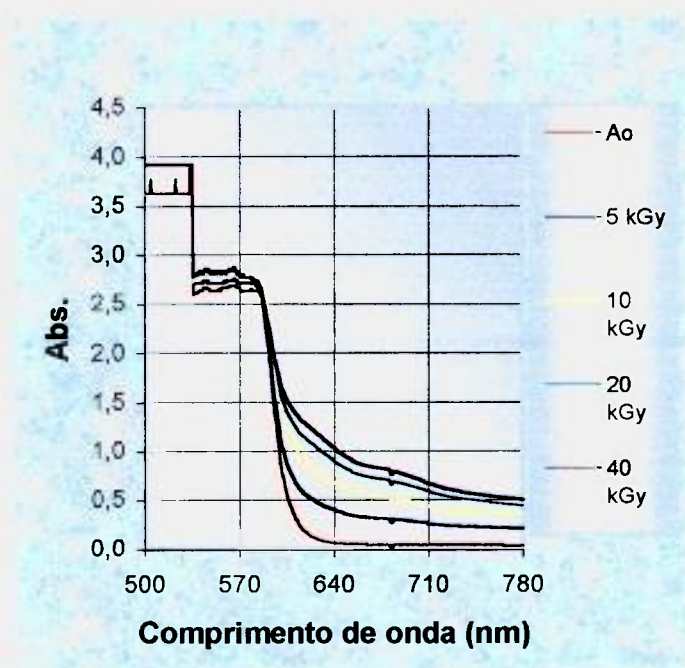


Figura 43 - Espectro de absorção do filme Red Perspex, entre 500 e 780 nm, após ser submetido a diferentes doses de irradiação no acelerador de elétrons. ($E = 1,2$ MeV, $I = 3$ mA, $V = 3,36$ m/min e $L = 100$ cm).

5.5.2 Curva de calibração

A curva resposta do filme Red Perspex é um polinômio de terceiro grau (R^3) $\alpha = A + B_1 \cdot (\text{Dose}) + B_2 \cdot (\text{Dose})^2 + B_3 \cdot (\text{Dose})^3$, como mostra a Figura 44. Foram construídas

curvas independentes, para a percepção de possível saturação nos últimos pontos da curva, como pode ser visto nas Figuras 45 e 46.

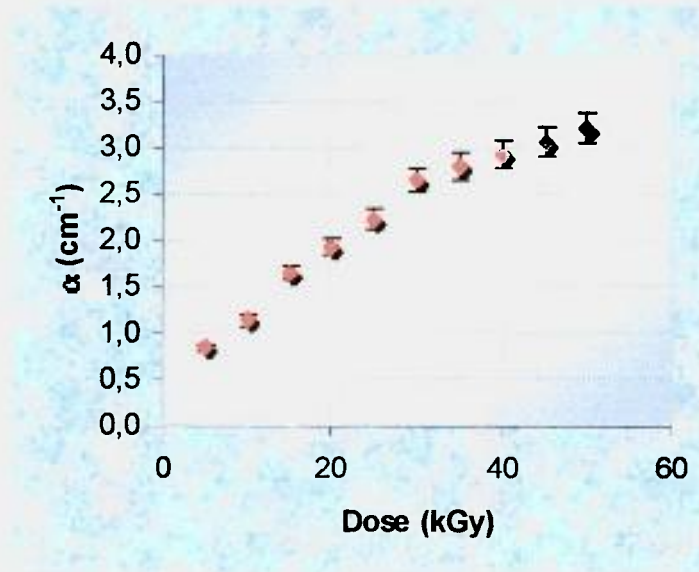


Figura 44 - Representação gráfica da curva de calibração do filme Red Perspex, irradiado no acelerador de elétrons. (E = 1,2 MeV, I = 3 mA, V = 3,36 m/min, L =100 cm e intervalo de doses entre 6,067 kGy e 54,6 kGy).

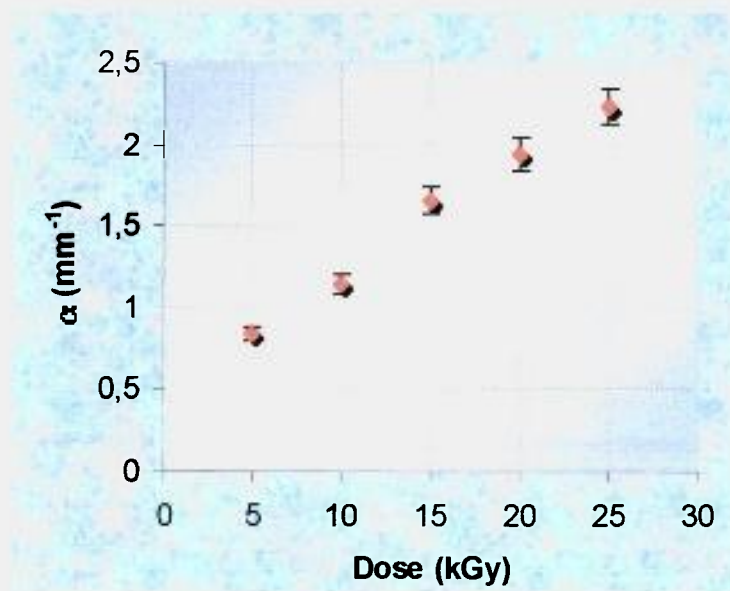


Figura 45 - Representação gráfica da curva de calibração do filme Red Perspex, irradiado no acelerador de elétrons. (E = 1,2 MeV, I = 3 mA, V = 3,36 m/min, L =100 cm e intervalo de doses entre 6,067 kGy e 24,268 kGy).

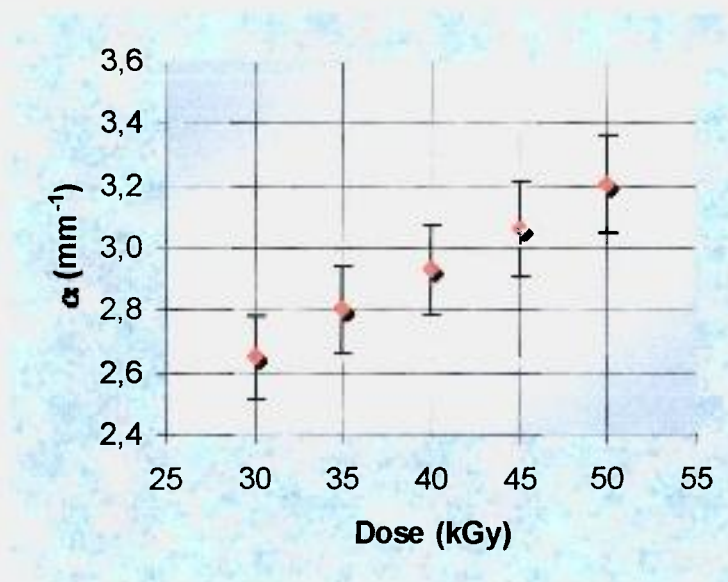


Figura 46 - Representação gráfica da curva de calibração do filme Red Perspex, irradiado no acelerador de elétrons. ($E = 1,2 \text{ MeV}$, $I = 3 \text{ mA}$, $V = 3,36 \text{ m/min}$, $L = 100 \text{ cm}$ e intervalo de doses entre $30,335 \text{ kGy}$ e $48,536 \text{ kGy}$).

Dividindo a curva de calibração em duas partes, pode-se adotar a regressão linear, para os dois intervalos.

5.5.3 Determinação do limite inferior de detecção da radiação

Foram usados 20 filmes virgens, para os quais foi determinado o coeficiente de absorção médio, $\bar{\alpha}$, e o desvio padrão, σ . O valor calculado, para $\bar{\alpha} \pm 3\sigma$, resultou em $0,2034 \pm 0,0040$, que corresponde ao intervalo em que se considera que o filme não tenha sido irradiado. Qualquer valor acima de 0,207 passou a ser considerado correspondente à dose mínima detectável.

Os filmes foram dispostos na bandeja de irradiação conforme a Figura 11. O feixe de elétrons foi ajustado para uma energia de $1,5 \text{ MeV}$, corrente de 3 mA , largura do feixe de 100 cm e velocidade da bandeja de $3,36 \text{ m/min}$. A dose que corresponde a estes parâmetros é de $5,339 \text{ kGy}$ e o filme Red Perspex possui sensibilidade radiométrica a partir de 5 kGy . Mas

quando o acelerador foi posto em operação e imediatamente foi desligado, este filme não acusou valores de coeficiente de absorção óptica acima do mínimo de 0,207. Conclui-se que nesta situação o dosímetro não recebe nenhuma dose.

5.5.4 Influência das condições ambientais

5.5.4.1 Luz

O filme Red Perspex vem lacrado em envelopes de alumínio, hermeticamente fechados, para evitar influências ambientais. Após ser retirado do envelope e ser exposto à luz do laboratório (lâmpada fluorescente e luz natural diurna), durante um período de 72 horas, a variação na absorvância do filme foi desprezível, <0,1%, como pode ser visto na Figura 47.

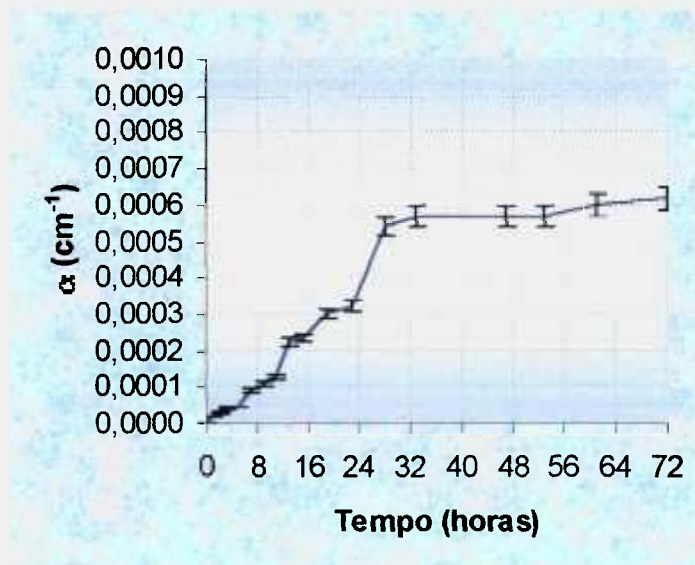


Figura 47 - Influência da luz ambiente (lâmpada fluorescente e luz natural diurna), no filme Red Perspex não irradiado.

5.5.4.2 Temperatura

O filme Red Perspex foi submetido à uma temperatura de 50°C por 60 minutos. Foram feitas leituras da absorvância de 10 em 10 minutos. Na Figura 48 pode-se ver que houve um aumento no coeficiente de absorção óptica de 0,2%, após uma hora de exposição à 50°C. Neste caso considerou-se que o Red Perspex é um material resistente e pode ser usado em temperaturas até 50°C desde que o tempo de processamento não seja superior a uma hora.

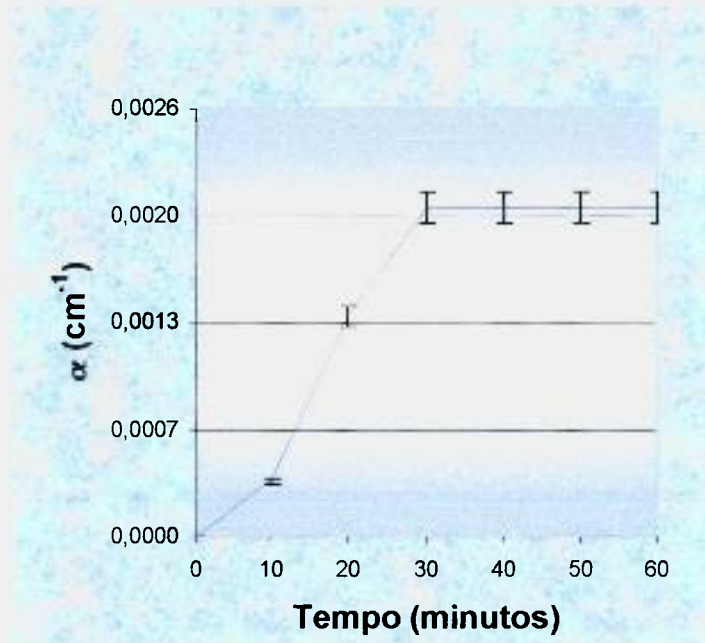


Figura 48 - Influência da temperatura de 50°C, durante 60 minutos, no filme Red Perspex 4034 não irradiado.

5.5.4.3 Umidade

Após permanecer exposto por 120 horas em um ambiente ausente de luz, com temperatura ambiente e umidade relativa entre 68% e 90%, ocorreu um aumento de 0,17% no coeficiente de absorção óptica, como pode ser visto na Figura 49. Este resultado permitiu concluir que o filme não foi influenciado pela umidade.

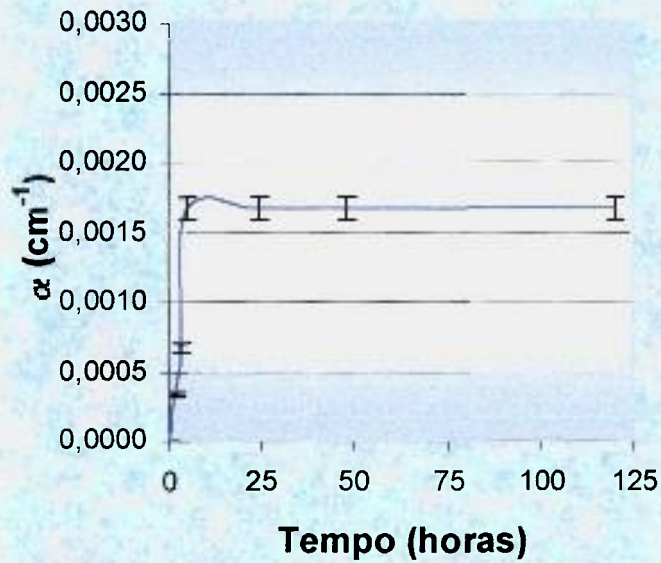


Figura 49 – Resposta do filme Red Perspex, não irradiado, quando exposto a ambiente com umidade relativa do ar entre 68% e 90%.

5.5.5 Avaliação da resposta do filme Red Perspex para diferentes sistemas de irradiação

O filme Red Perspex pode ser usado em irradiações com ^{60}Co , ^{137}Cs e elétrons [19]. Foram feitas curvas de calibração deste filme no acelerador de elétrons, e na fonte de ^{60}Co Gammacell. A comparação destas duas curvas com aquela fornecida pelo fabricante (Harwell), encontra-se na Figura 50.

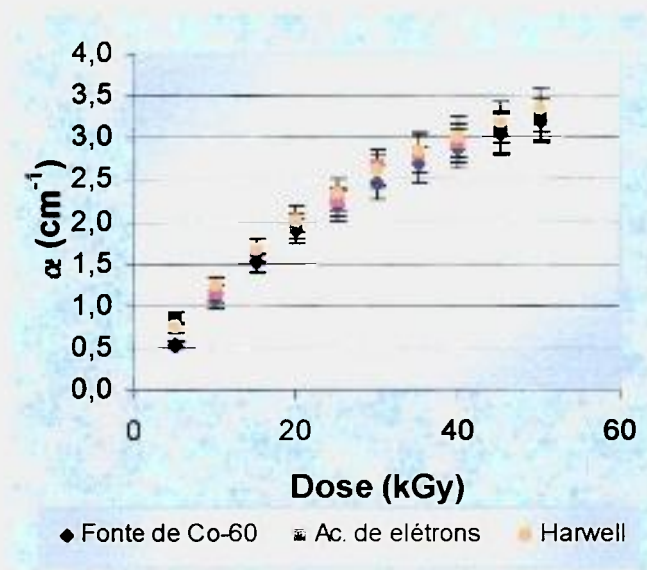


Figura 50 -Representação gráfica das curvas de calibração do filme Red Perspex no acelerador de elétrons ($E = 1,201 \text{ MeV}$, $I = 3 \text{ mA}$, $V = 3,36 \text{ m/min}$, $L = 100 \text{ cm}$ e $\dot{D} \cong 5 \times 10^4 \text{ kGy.h}^{-1}$), na fonte de ^{60}Co ($\dot{D} \cong 7 \text{ kGy h}^{-1}$) e a fornecida pela Harwell, radiação gama, ($\dot{D} \cong 4,93 \text{ kGy h}^{-1}$).

5.6 Caracterização do filme FWT-60.20 para aplicação em dosimetria das radiações

5.6.1 Determinação do comprimento de onda ótimo para leitura espectrofotométrica

Para doses acima de 5 kGy, o comprimento de onda recomendado para a leitura da absorção óptica do filme FWT-60.20 é 510 nm [1, 7, 16] e para doses abaixo de 5 kGy é 605 nm. Pode-se observar na Figura 51, que o comprimento de onda em que as variações da absorvância foram perceptíveis e uniformes com o aumento da dose são 510 nm e 605 nm, de acordo com a literatura.

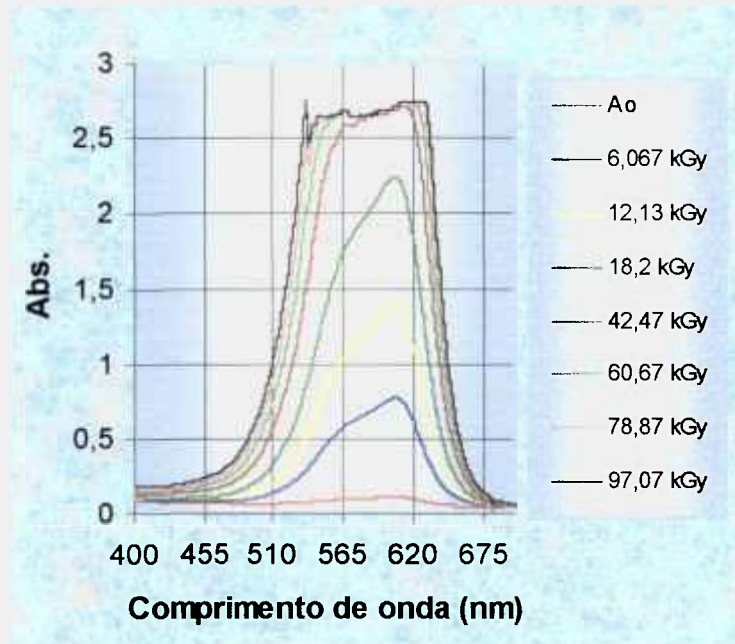


Figura 51 - Espectro de absorção do filme FWT-60.20, entre 400 nm e 675 nm, após ser submetido a diferentes doses de irradiação no acelerador de elétrons. ($E = 1,2 \text{ MeV}$, $I = 3 \text{ mA}$, $V = 3,36 \text{ m/min}$ e $L = 100 \text{ cm}$).

5.6.2 Curva de calibração

Se for considerado o intervalo de doses entre 6,067 kGy e 150 kGy, a curva de calibração do filme de nylon FWT-60.20 é um polinômio de segundo grau, como pode ser visto na Figura 52. No entanto, como o filme apresenta uma sensibilidade apreciável num intervalo de doses muito amplo, foi feita a divisão do mesmo em três partes : 6,067 kGy a 54,6 kGy, 54,6 kGy a 103,14 kGy e 103,14 kGy a 151,67 kGy, para que o cálculo de dose fosse mais preciso. A representação gráfica encontra-se nas Figuras 53, 54 e 55.

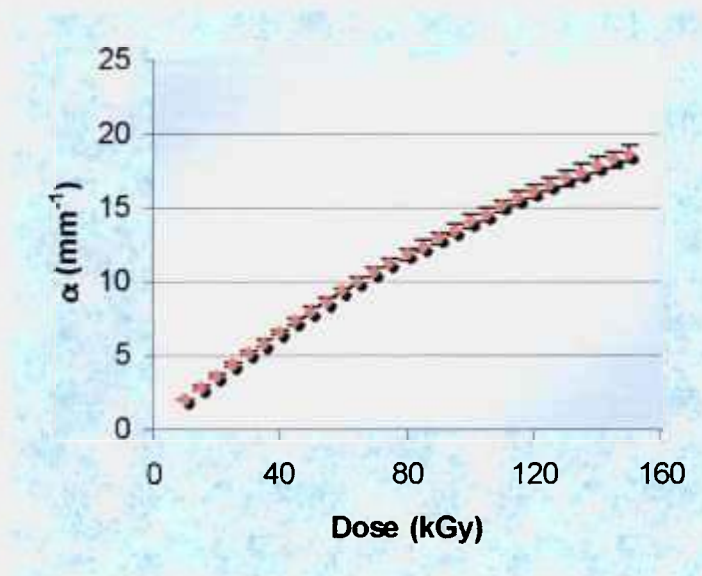


Figura 52 - Representação gráfica da curva de calibração do filme FWT-60.20, irradiado no acelerador de elétrons. ($E = 1,2$ MeV, $I = 3$ mA, $V = 3,36$ m/min, $L = 100$ cm e intervalo de doses entre 6,067 kGy e 151,67 kGy).

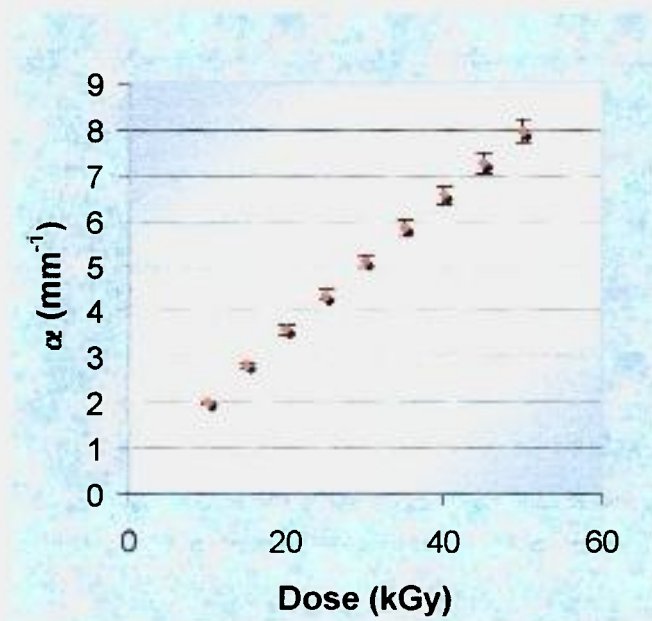


Figura 53 - Representação gráfica da curva de calibração do filme FWT-60.20, irradiado no acelerador de elétrons. ($E = 1,2$ MeV, $I = 3$ mA, $V = 3,36$ m/min, $L = 100$ cm e intervalo de doses entre 6,067 kGy e 54,6 kGy).

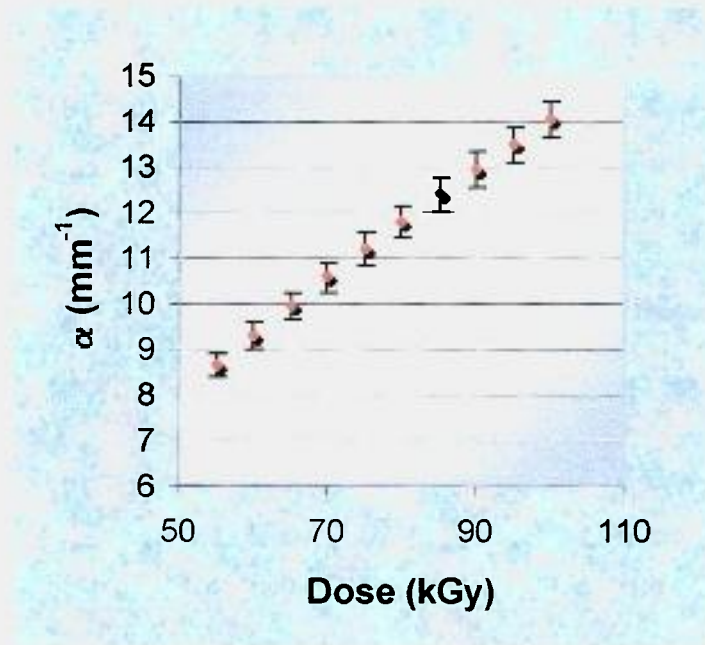


Figura 54 - Representação gráfica da curva de calibração do filme FWT-60.20, irradiado no acelerador de elétrons. ($E = 1,2$ MeV, $I = 3$ mA, $V = 3,36$ m/min, $L = 100$ cm e intervalo de doses entre 54,6 kGy e 103,14 kGy).

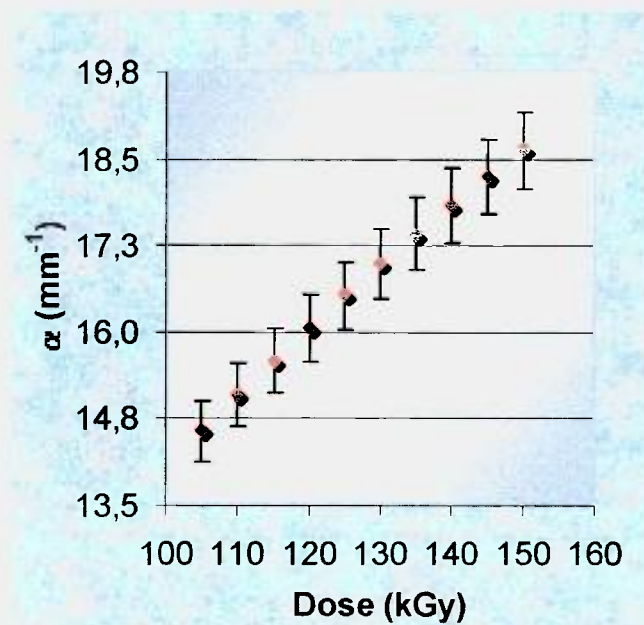


Figura 55 - Representação gráfica da curva de calibração do filme FWT-6020, irradiado no acelerador de elétrons. ($E = 1,2$ MeV, $I = 3$ mA, $V = 3,36$ m/min, $L = 100$ cm e intervalo de doses entre 103,14 kGy e 151,67 kGy).

Dividindo a curva de calibração em três partes pode-se adotar a regressão linear para determinar a equação que relaciona a dose com o coeficiente de absorção. Mas se for usada a equação polinomial de segundo grau referente ao intervalo, entre 6,067 kGy e 151,67 kGy, o valor da dose sofre uma alteração inferior à 0,5%. Portanto, seja a equação linear como a polinomial podem ser usadas. Em dosimetria de rotina dá-se preferência a resposta linear, neste caso deve ser feita a divisão do intervalo de doses.

5.6.3 Determinação do limite inferior de detecção da radiação

Foram usados 20 filmes virgens, para os quais foi determinado o coeficiente de absorção médio, $\bar{\alpha}$, e o desvio padrão, σ . O valor calculado, para $\bar{\alpha} \pm 3\sigma$, resultou em $1,265 \pm 0,0124$, que corresponde ao intervalo em que se considera que o filme não tenha sido irradiado. Qualquer valor acima de 1,277 passou a ser considerado correspondente à dose mínima detectável.

Os filmes foram dispostos na bandeja de irradiação conforme mostra a Figura 11. O feixe de elétrons foi ajustado para uma energia de 1,5 MeV, corrente de 3 mA, largura do feixe de 100 cm e velocidade da bandeja de 3,36 m/min. A dose que corresponde a esses parâmetros é de 5,339 kGy e o filme FWT-60.20 possui sensibilidade radiométrica à partir de 0,01 kGy. Mas quando o acelerador foi posto em operação e imediatamente desligado, este filme não acusou valores de coeficiente de absorção óptica acima do mínimo de 1,277. Conclui-se que nesta situação o dosímetro não recebe nenhuma dose.

5.6.4 Influência das condições ambientais

5.6.4.1 Luz

O filme FWT-6020 é muito sensível à luz ultravioleta. A Figura 56 mostra que, após 72 horas de exposição à luz do laboratório (lâmpada fluorescente e luz natural diurna), o valor do coeficiente de absorção óptica, $\alpha_{72 \text{ horas}}$, encontrado após a exposição foi quarenta vezes maior que o valor do coeficiente de absorção óptica em uma hora de exposição. Por este motivo recomenda-se usar um invólucro adequado que impeça a influência da luz, e manipular o filme, antes e após a irradiação, em ausência de luz artificial e penumbra em ambiente com luz natural.

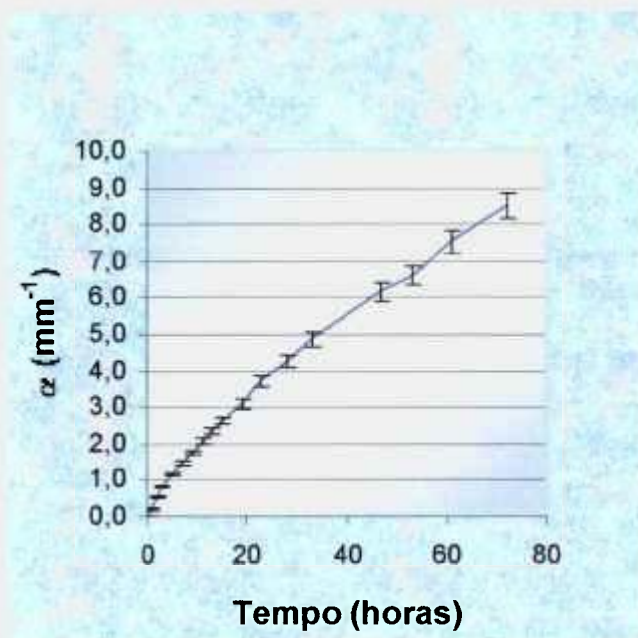


Figura 56 - Influência da luz ambiente (lâmpada fluorescente e luz natural diurna) no filme FWT-60.20 não irradiado.

5.6.4.2 Temperatura

O filme FWT-60.20 foi submetido à uma temperatura de 50°C por 60 minutos. Para temperatura no entorno de 30°C pode ocorrer um aumento de até 0,1% no coeficiente de absorção, e para temperatura no entorno de 50°C pode ocorrer um aumento de até 0,3% [13]. Foram feitas leituras da absorvância de 10 em 10 minutos. Houve um aumento do coeficiente de absorção óptica de 0,1%, como pode ser visto na Figura 57. Este aumento não interfere no cálculo da dose.

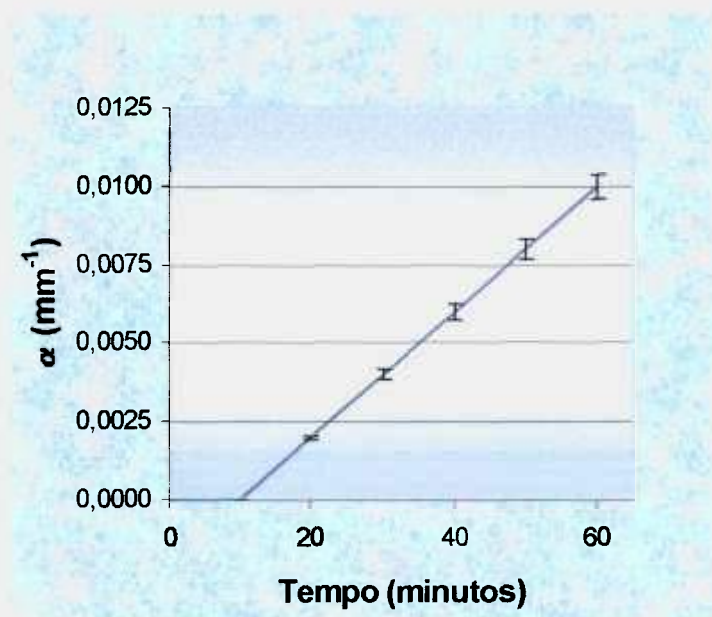


Figura 57 - Influência da temperatura de 50°C, por 60 minutos, no filme FWT-6020 não irradiado.

5.6.4.3 Umidade

Após permanecer 120 horas, em um ambiente ausente de luz, em temperatura ambiente com umidade relativa entre 68% e 90%, o valor do coeficiente de absorção óptica, $\alpha_{120 \text{ horas}}$, foi 360 vezes maior que o coeficiente de absorção óptica em uma hora, como pode ser visto na Figura 58. Portanto, o filme deve ser estocado em local seco e arejado. A umidade na instalação de

irradiação, pode afetar o filme deixando-o ligeiramente opaco. Esta opacidade pode ser eliminada se o filme for limpo com papel muito macio por fricção. Para evitar o inconveniente da umidade o filme deve ser usado dentro de invólucro selado.

Quando se usa a fonte de ^{60}Co Gammacell, o filme deve ser colocado em invólucro de alumínio, ou papel preto, e plástico de parede muito fina e no acelerador de elétrons deve-se tomar o cuidado de considerar a espessura e a densidade desses materiais nos cálculos da dose.

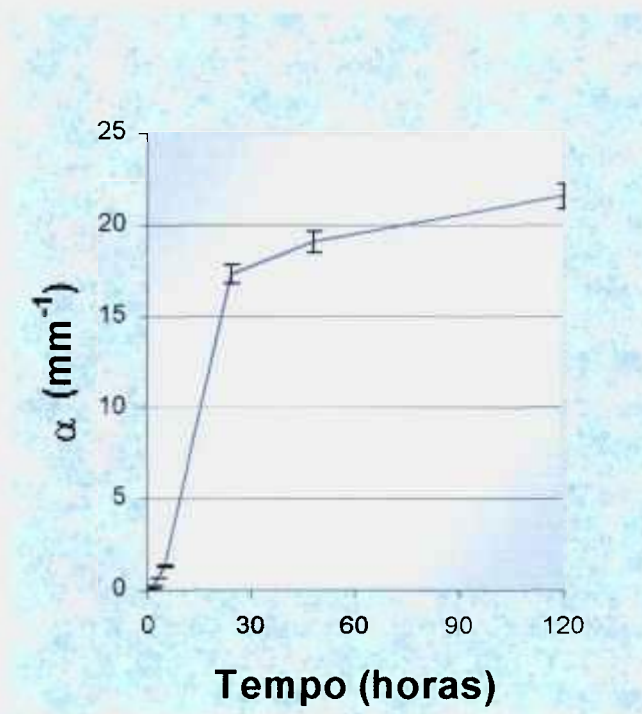


Figura 58 - Resposta do filme FWT-60.20, não irradiado, quando exposto a ambiente com umidade relativa do ar entre 68% e 90%.

5.6.5 Avaliação da resposta do filme FWT-60.20 para diferentes energias de elétrons e corrente fixa

Para diferentes energias e corrente fixa, o filme FWT-60.20 não apresentou dependência significativa, como pode ser visto na Figura 59. Houve uma flutuação entre a curva de calibração construída com energia de 0,8MeV e 1,201 MeV de 2,34%, e, entre estas e a de 1,5 MeV, houve uma flutuação de 8,29%.

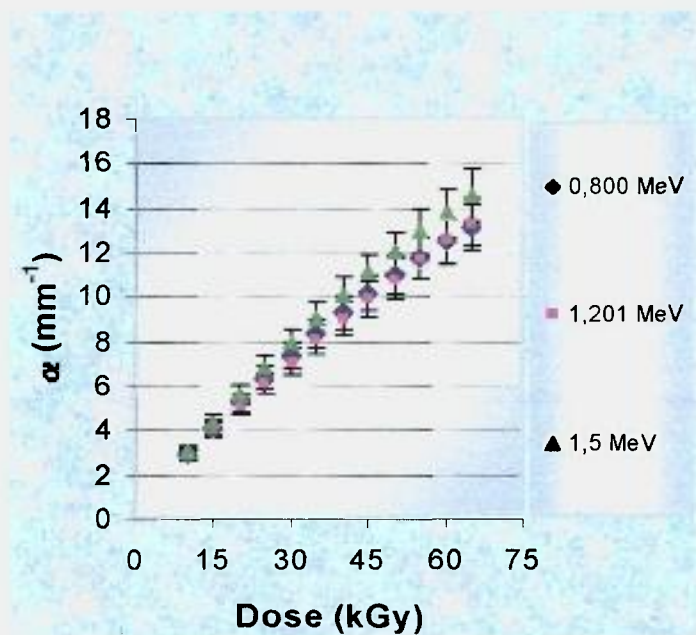


Figura 59 - Representação gráfica das curvas de calibração do filme FWT-60.20 irradiado no acelerador de elétrons. (E = 0,8 MeV; 1,2 MeV e 1,5 MeV, I = 3 mA, V = 3,36 m/min, L = 100 cm e intervalo de doses entre 6,067 kGy e 72,8 kGy).

5.6.6 Avaliação da resposta do filme FWT-6020 para diferentes sistemas de irradiação.

Para doses acima de 40 kGy, o filme FWT-60.20 não apresenta dependência se for irradiado com taxas de dose acima de $3,6 \times 10^{13}$ kGy.h⁻¹, para taxas de dose abaixo deste valor podem ocorrer variações significativas [13]. Quando o filme FWT-60.20 foi irradiado em fontes emissoras gama e elétrons observou-se, entre as duas curvas de calibração, uma flutuação em média de 50%. Os resultados encontram-se na Figura 60.

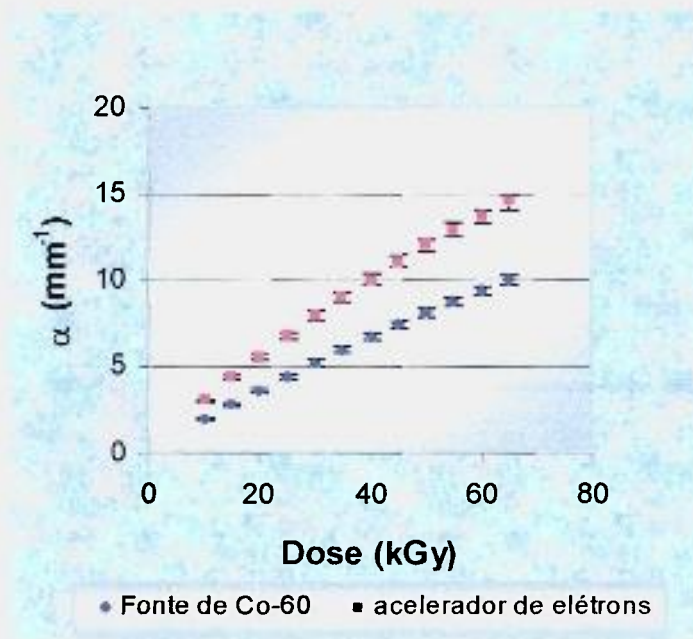


Figura 60 - Representação gráfica das curvas de calibração do filme FWT-6020 irradiado no acelerador de elétrons. ($E = 1,201$ MeV, $I = 3$ mA, $V = 3,36$ m/min, $L = 100$ cm e $\dot{D} \cong 5 \times 10^4$ kGy.h⁻¹), e na fonte de ⁶⁰Co ($\dot{D} \cong 7$ kGy h⁻¹).

5.7 Caracterização do filme HD-810 para aplicação em dosimetria das radiações

5.7.1 Determinação do comprimento de onda para leitura espectrofotométrica

Para doses entre 1 kGy e 50 kGy o comprimento de onda recomendado pelo fabricante do filme HD-810, para a leitura da absorção óptica é 400 nm. Foi analisado apenas esse comprimento de onda, porque os outros comprimentos de onda recomendados, 500 nm e 580 nm, são para intervalos de doses baixos, 0,05 kGy e 5 kGy. Pode-se observar na Figura 61, que em 400 nm a variação da absorvância foi perceptível e uniforme com o aumento da dose.

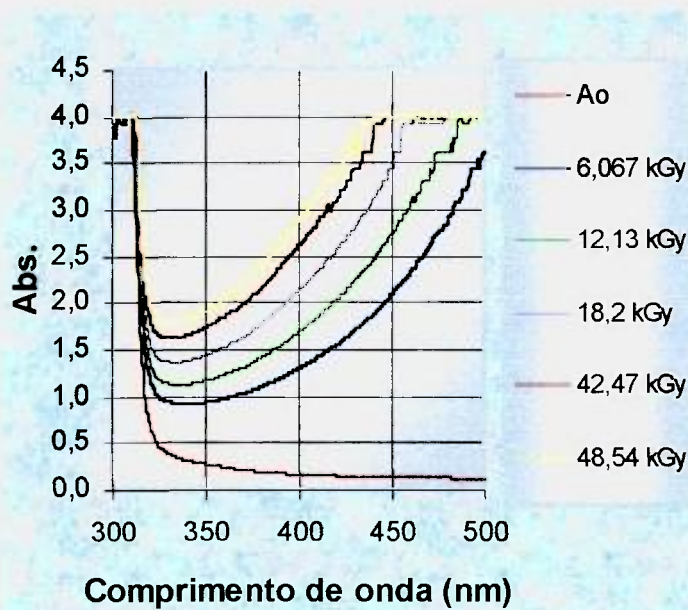


Figura 61 - Espectro de absorção do filme HD-810, entre 300 e 500 nm, após ser submetido a diferentes doses de irradiação no acelerador de elétrons. ($E = 1,201$ MeV, $I = 3$ mA, $V = 3,36$ m/min, $L = 100$ cm e intervalo de doses entre 6,067 kGy e 48,54 kGy).

5.7.2 Curva de calibração

A curva de calibração do filme HD-810 quando irradiado no acelerador de elétrons com energia de 1,201 MeV e corrente de 3 mA é um polinômio do segundo grau (R^2), como mostra

a Figura 62. As doses aplicadas estão no intervalo de 6,067 kGy e 48,54 kGy. Foram construídas curvas independentes, para a percepção de possível saturação nos últimos pontos da curva, como pode ser visto nas Figuras 63 e 64.

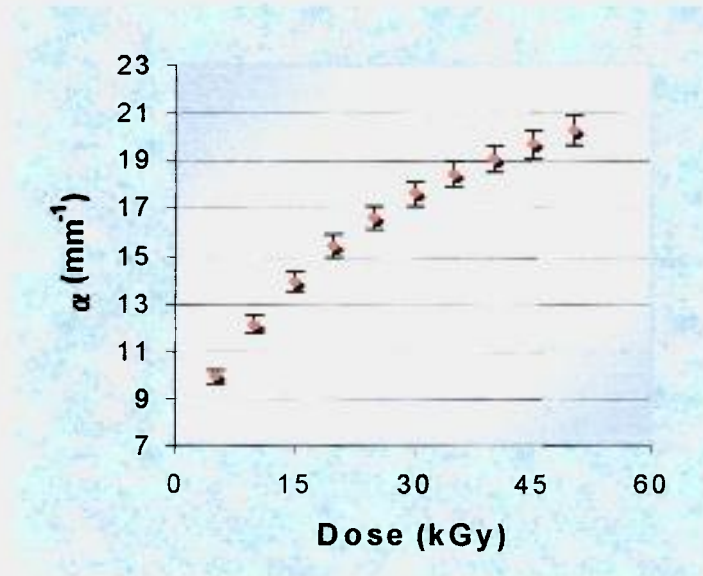


Figura 62 - Representação gráfica da curva de calibração do filme HD-810, irradiado no acelerador de elétrons. ($E = 1,201 \text{ MeV}$, $I = 3 \text{ mA}$, $V = 3,36 \text{ m/min}$, $L = 100 \text{ cm}$ e intervalo de doses entre 6,067 kGy e 48,54 kGy).

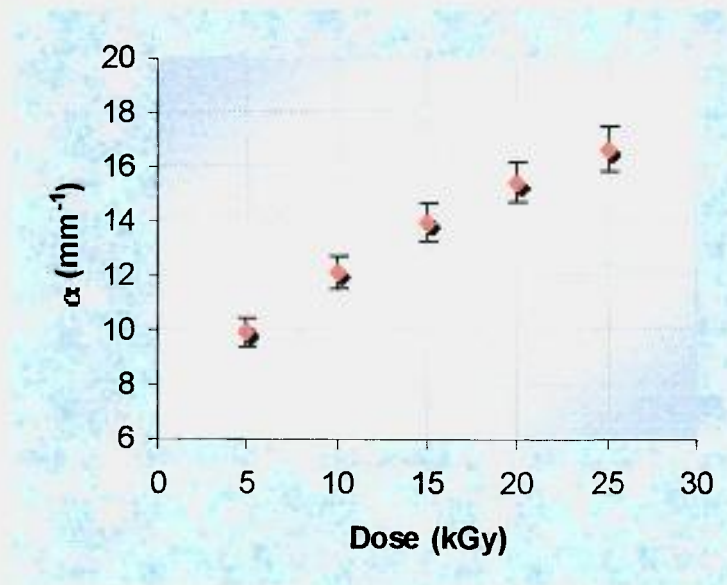


Figura 63 - Representação gráfica da curva de calibração do filme HD-810, irradiado no acelerador de elétrons. ($E = 1,201 \text{ MeV}$, $I = 3 \text{ mA}$, $V = 3,36 \text{ m/min}$, $L = 100 \text{ cm}$ e intervalo de doses entre 6,067 kGy e 24,268 kGy).

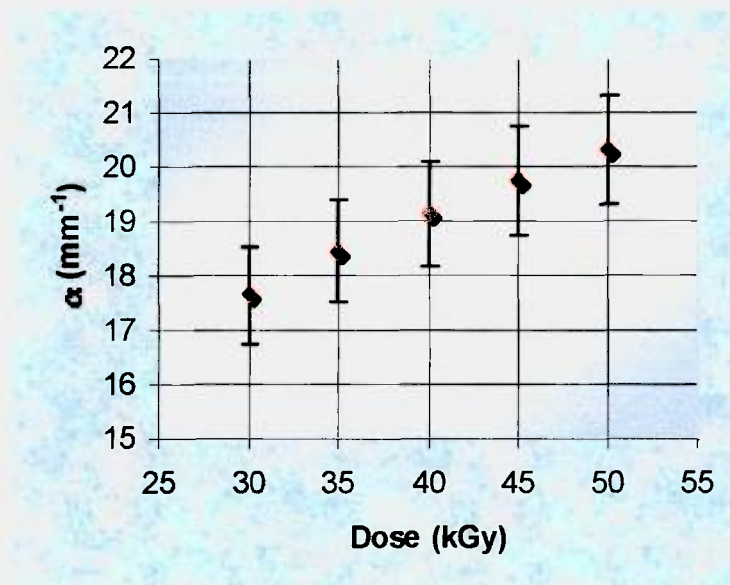


Figura 64 - Representação gráfica da curva de calibração do filme HD-810, irradiado no acelerador de elétrons. ($E = 1,201$ MeV, $I = 3$ mA, $V = 3,36$ m/min, $L = 100$ cm e intervalo de doses entre 30,335 kGy e 48,54 kGy).

Dividindo a curva de calibração em duas partes, pode-se adotar a regressão linear, para os dois intervalos.

5.7.3 Determinação do limite inferior de detecção da radiação

Foram usados 20 filmes virgens, para os quais foi determinado o coeficiente de absorção médio, $\bar{\alpha}$, e o desvio padrão, σ . O valor calculado, para $\bar{\alpha} \pm 3\sigma$, resultou em $1,4065 \pm 0,0270$, que corresponde ao intervalo em que se considera que o filme não tenha sido irradiado. Qualquer valor acima de 1,4335 passou a ser considerado correspondente à dose mínima detectável.

Os filmes foram dispostos na bandeja de irradiação conforme a Figura 11. O feixe de elétrons foi ajustado para uma energia de 1,5 MeV, corrente de 3 mA, largura do feixe 100 cm

e velocidade da bandeja de 3,36 m/min. A dose que corresponde a estes parâmetros é de 5,339 kGy e o filme HD-810 possui sensibilidade radiométrica à partir de 0,05 kGy. Quando o acelerador foi posto em operação e imediatamente desligado, este filme acusou valores de coeficiente de absorção óptica acima do mínimo de 1,4335. No ponto 1, mais próximo do feixe de elétrons o valor encontrado foi 2,036, isto é, 42% maior que 1,4335, e nos pontos 2 e 3 foram encontrados valores inferiores a 1,4335. Conclui-se que o filme é muito sensível nesta situação, quando colocado sob a janela do acelerador, pois nesta posição o filme detecta uma parcela de dose antes mesmo que a bandeja de irradiação se movimente.

5.7.4 Influência das condições ambientais

5.7.4.1 Luz

Após 72 horas de exposição à luz do laboratório (lâmpada fluorescente e luz natural diurna), o filme HD-810 não apresentou variação no valor do coeficiente de absorção óptica. O filme não apresentou sensibilidade à luz ambiente, o que permite manuseá-lo em condições naturais do ambiente, seja com luz artificial, natural ou ambas.

5.7.4.2 Temperatura

O filme HD-810 foi submetido à uma temperatura de 50°C por 60 minutos. Foram feitas leituras da absorvância de 10 em 10 minutos. Observa-se na Figura 65, que ocorreu um aumento da absorvância à partir dos 10 min iniciais que se estende até os 15 min subsequentes (25 min) e acima deste intervalo de tempo a resposta tende a uma estabilização nos 35 min seguintes. Este comportamento indicou que o filme, quando submetido a temperatura de 50°C por mais de 10 min sofreu uma modificação que aumenta a resposta em cerca de 50%. O filme deve ser estocado e manuseado em temperatura ambiente.

O aumento da temperatura durante a irradiação, por exemplo no acelerador de elétrons, não é preocupante, pois o intervalo útil do filme quanto a sua sensibilidade radiométrica é pequeno (0,05 kGy a 50 kGy), e para doses até 50 kGy a temperatura do ambiente da câmara do acelerador não chega a 35°C e o tempo de irradiação é 47 segundos.

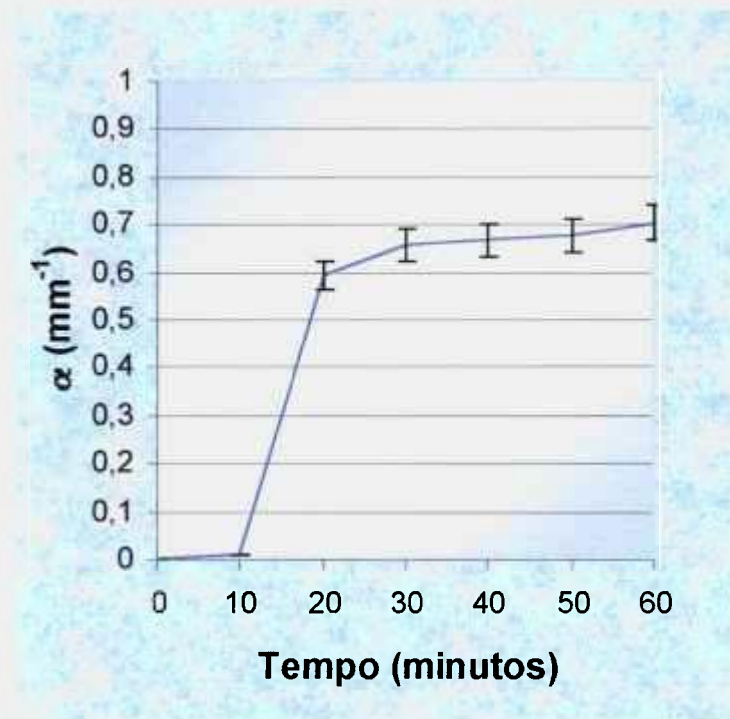


Figura 65 – Resposta do filme HD-810 não irradiado quando submetido a temperatura de 50°C durante 60 min.

5.7.4.3 Umidade

Após permanecer exposto por 120 horas em um ambiente escuro, com temperatura ambiente e umidade relativa do ar entre 68% e 90%, observou-se um aumento muito acentuado no coeficiente de absorção óptica do filme HD-810, como pode ser visto na Figura 66. Este resultado indica que o filme deve ser estocado em local seco e arejado e protegido durante as irradiações e manipulação para a leitura fotométrica.

Quando se usa a fonte de ^{60}Co Ganmacell o filme deve ser colocado em invólucro de alumínio, ou papel preto, e plástico de parede muito fina e no acelerador de elétrons deve-se tomar o cuidado de considerar a espessura e a densidade desses materiais nos cálculos da dose.

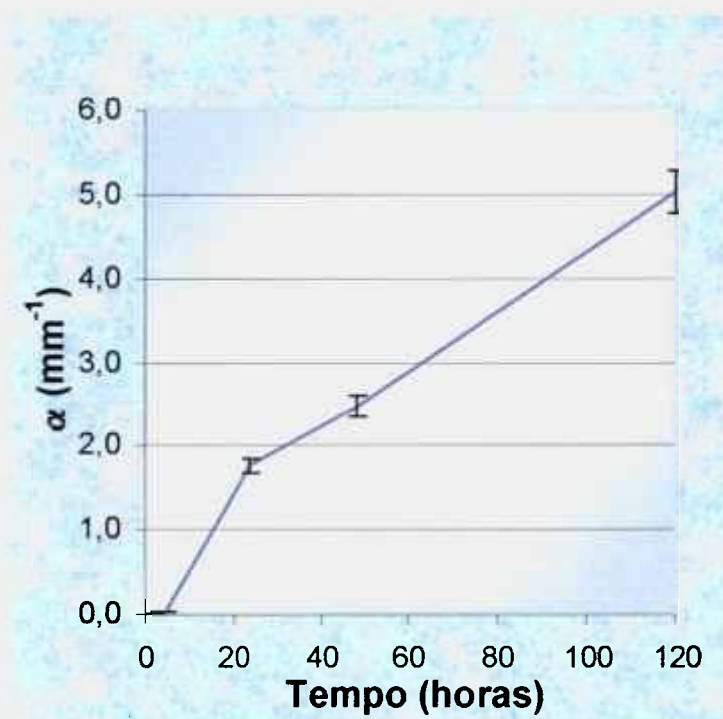


Figura 66 - Resposta do filme HD-810, não irradiado, quando exposto a ambiente com umidade relativa do ar entre 68% e 90%.

5.7.5 Avaliação da resposta do filme HD-810 para diferentes energias e mesma corrente

Para diferentes energias e corrente fixa, o filme HD-810 não apresentou dependência significativa, como pode ser visto na Figura 67. Houve uma flutuação entre a curva de calibração construída com energia de 0,8 MeV e 1,5 MeV de 2,12%, e, entre estas e a de 1,201 MeV de 7,55%.

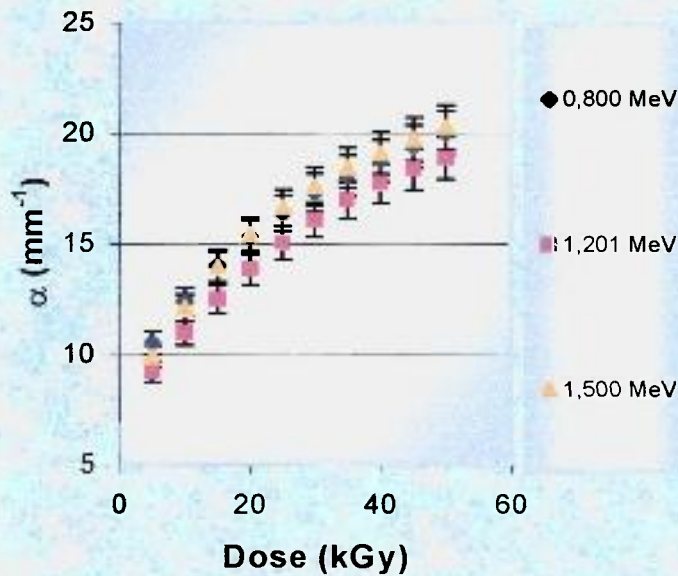


Figura 67 - Representação gráfica das curvas de calibração do filme HD-810 irradiado no acelerador de elétrons ($E = 0,8 \text{ MeV}$; $1,201 \text{ MeV}$ e $1,5 \text{ MeV}$, $I = 3 \text{ mA}$, $V = 3,36 \text{ m/min}$, $L = 100 \text{ cm}$ e intervalo de doses entre $6,067 \text{ kGy}$ e $54,25 \text{ kGy}$).

5.7.6 Avaliação da resposta do filme HD-810 para diferentes sistemas de irradiação

Observa-se na Figura 68, que utilizando fontes de irradiação diferentes (taxas de dose diferentes), o coeficiente de absorção do filme HD-810 apresentou uma variação em média de 3,6%. Esta variação também é observada quando se aplica diferentes taxas de dose no acelerador de elétrons. Conclui-se que o filme HD-810 não apresentou dependência com a taxa de dose.

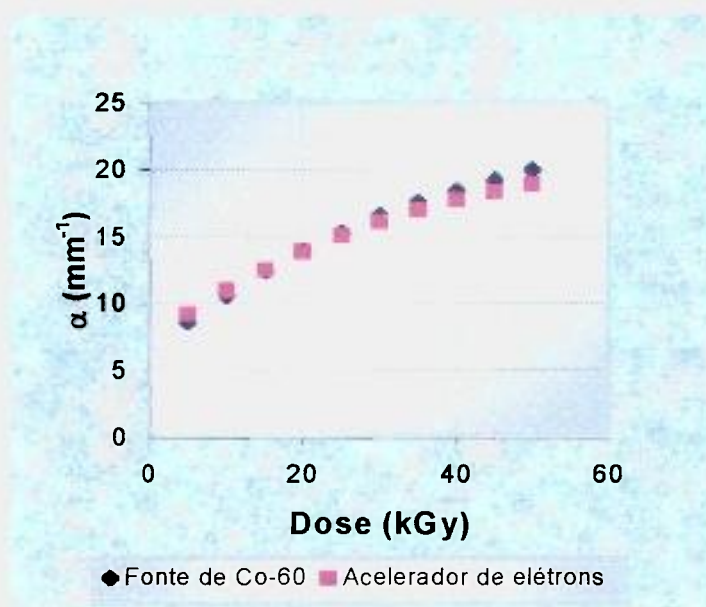


Figura 68 - Representação gráfica das curvas de calibração do filme HD-810 no acelerador de elétrons ($E = 1,201 \text{ MeV}$, $I = 3 \text{ mA}$, $V = 3,36 \text{ m/min}$, $L = 100 \text{ cm}$ e $\dot{D} \cong 5 \times 10^4 \text{ kGy.h}^{-1}$) e na fonte de ^{60}Co ($\dot{D} \cong 7 \text{ kGy h}^{-1}$).

5.8 Caracterização do filme Sunna para aplicação em dosimetria das radiações

5.8.1 Determinação do comprimento de onda ótimo para leitura espectrofotométrica

A leitura espectrofotométrica do filme Sunna, segundo informações do fabricante do filme, deve ser feita entre 240 nm e 250 nm. No entanto, como pode ser observado na Figura 69, neste comprimento de onda não houve uniformidade na resposta da absorvância em função da dose, para filmes irradiados no acelerador de elétrons. Se for usado esse comprimento de onda não haverá variação da leitura da absorvância para doses acima de 20 kGy.

O comprimento de onda fixado e utilizado neste trabalho foi de 280 nm, onde a variação da absorvância em função do aumento da dose foi perceptível e uniforme.

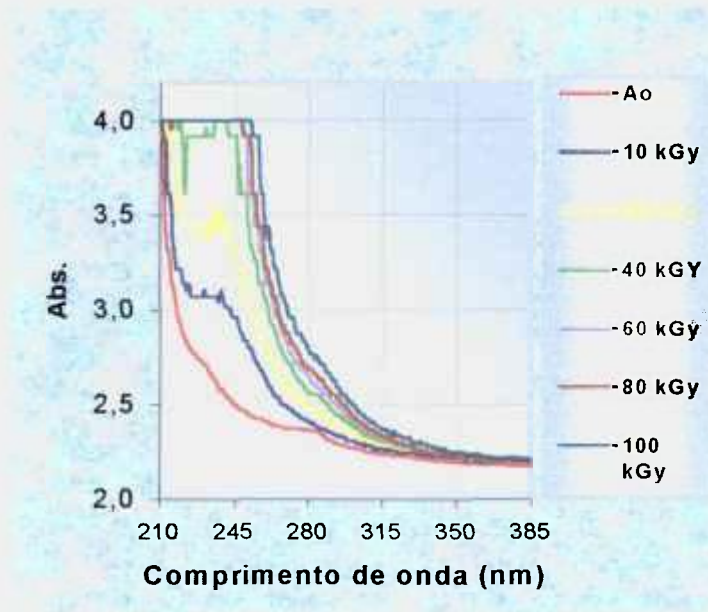


Figura 69 - Espectro da absorção do filme Sunna, entre 210 e 385 nm, após ser submetido a diferentes doses de irradiação no acelerador de elétrons. ($E = 1,2$ MeV, $I = 3$ mA, $V = 3,36$ m/min e $L = 100$ cm).

5.8.2 Curva de calibração

A curva de calibração do filme Sunna é um polinômio do segundo grau, (R^2). A Figura 70 mostra o aumento não linear do coeficiente de absorção em função da dose. Foram construídas curvas independentes, para a percepção de possível saturação nos últimos pontos da curva, como pode ser visto nas Figuras 71 e 72.

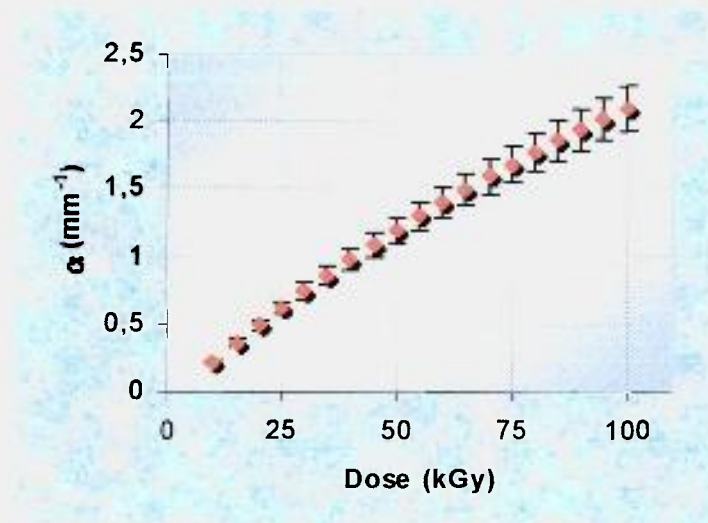


Figura 70 - Representação gráfica da curva de calibração do filme Sunna, irradiado no acelerador de elétrons. ($E = 1,201$ MeV, $I = 3$ mA, $V = 3,36$ m/min, $L = 100$ cm e intervalo de doses entre 6,067 kGy e 103,14 kGy).

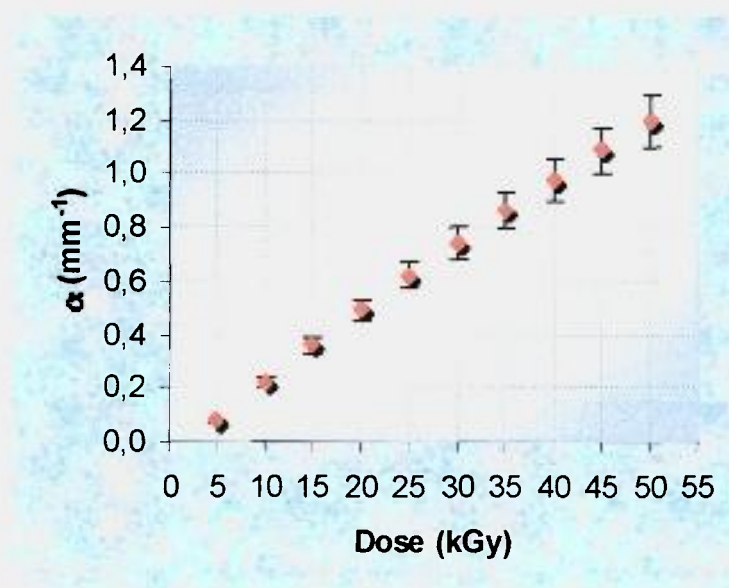


Figura 71 - Representação gráfica da curva de calibração do filme Sunna, irradiado no acelerador de elétrons. ($E = 1,201$ MeV, $I = 3$ mA, $V = 3,36$ m/min, $L = 100$ cm e intervalo de doses entre 6,067 kGy e 48,536 kGy).

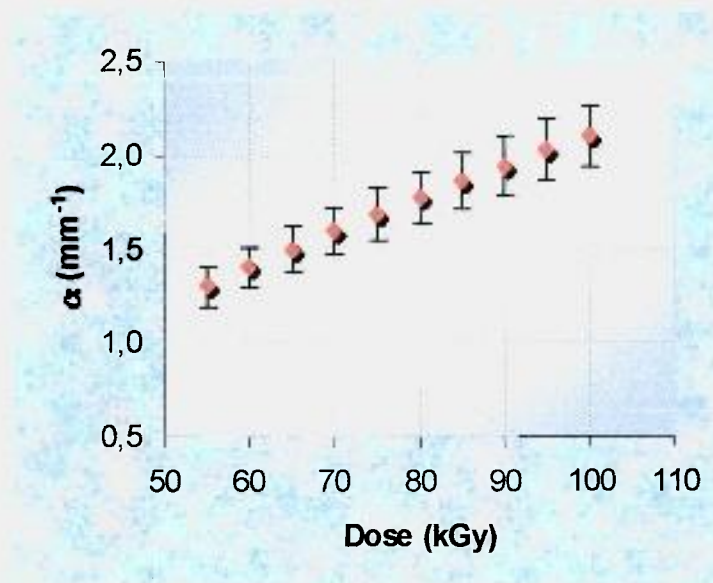


Figura 72 - Representação gráfica da curva de calibração do filme Sunna, irradiado no acelerador de elétrons. ($E = 1,201$ MeV, $I = 3$ mA, $V = 3,36$ m/min, $L = 100$ cm e intervalo de doses entre 54,603 kGy e 97,072 kGy).

Dividindo a curva de calibração em duas partes, pode-se adotar a regressão linear, para os dois intervalos.

5.8.3 Deteminação do limite inferior de detecção da radiação

Foram usados 20 filmes virgens, para os quais foi determinado o coeficiente de absorção médio, $\bar{\alpha}$, e o desvio padrão, σ . O valor calculado, para $\bar{\alpha} \pm 3\sigma$, resultou em $0,0454 \pm 0,0009$, que corresponde ao intervalo em que se considera que o filme não tenha sido irradiado. Qualquer valor acima de 0,048 passou a ser considerado correspondente à dose mínima detectável.

Os filmes foram dispostos na bandeja de irradiação conforme mostra a Figura 11. O feixe de elétrons foi ajustado para uma energia de 1,5 MeV, corrente de 3 mA, largura do feixe de

100 cm e velocidade da bandeja de 3,36 m/min. A dose que corresponde a esses parâmetros é de 5,339 kGy e o filme Sunna possui sensibilidade radiométrica a partir de 10 kGy. Mas quando o acelerador foi posto em operação e imediatamente desligado, este filme não acusou valores de coeficiente de absorção óptica acima do mínimo de 0,048. Conclui-se que nesta situação o dosímetro não recebe nenhuma dose.

5.8.4 Influência das condições ambientais

5.8.4.1 Luz

Após 72 horas de exposição à luz do laboratório (lâmpada fluorescente e luz natural diurna) ocorreu um aumento na absorvância do filme Sunna de 3%, como pode ser visto na Figura 73. Esta flutuação deve ser levada em conta para cálculos de doses baixas.

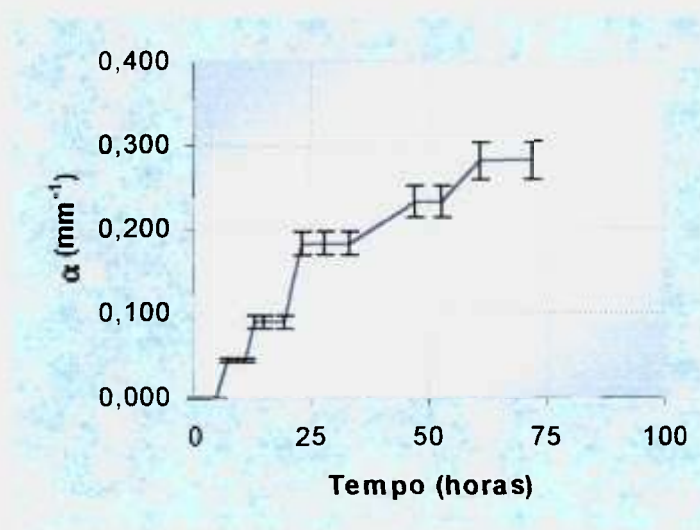


Figura 73 - Influência da luz ambiente do laboratório (lâmpada fluorescente e luz natural diurna) no filme Sunna não irradiado.

5.8.4.2 Temperatura

O filme foi submetido à uma temperatura de 50°C, por 60 minutos. Foram feitas leituras da absorvância de 10 em 10 minutos. Não ocorreu aumento da absorvância com o aumento do tempo de permanência do filme à temperatura de 50°C e isto significa que a temperatura não interferiu na absorvância do filme Sunna.

5.8.4.3 Umidade

Observa-se na Figura 74, que após permanecer por 120 horas, em um ambiente escuro, com temperatura ambiente e umidade relativa do ar entre 68% e 90%, o filme Sunna apresentou um aumento no coeficiente de absorção de 1%.

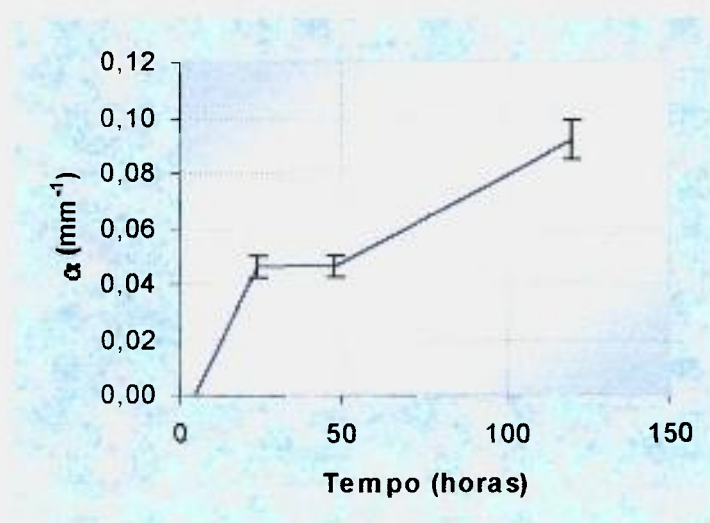


Figura 74 - Influência da umidade, entre 68% e 90%, no filme Sunna não irradiado.

5.8.5 Avaliação da resposta do filme Sunna para diferentes energias e corrente fixa

A Figura 75 mostra que para as energias de 0,8 MeV, 1,2 MeV e 1,5 MeV, para a mesma corrente, o filme Sunna não apresentou dependência significativa com a energia da radiação incidente, pois a flutuação entre as curvas foi de 3,4% em média.

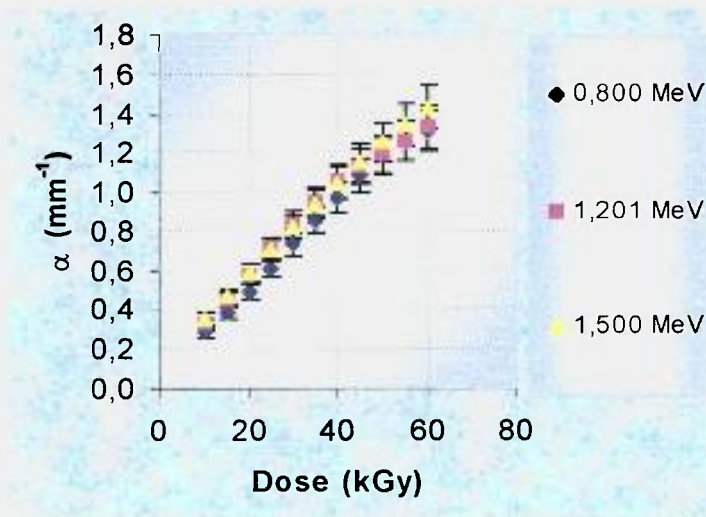


Figura 75 - Representação gráfica das curvas de calibração do filme Sunna irradiados no acelerador de elétrons ($E = 0,8 \text{ MeV}$; $1,201 \text{ MeV}$; $1,5 \text{ MeV}$, $I = 3 \text{ mA}$, $V = 3,36 \text{ m/min}$, $L = 100 \text{ cm}$ no intervalo de doses entre $6,067 \text{ kGy}$ e $54,25 \text{ kGy}$).

5.8.6 Avaliação da resposta do filme Sunna para diferentes sistemas de irradiação.

Na Figura 76 observa-se que utilizando fontes de irradiação diferentes, acelerador de elétrons e fonte de ^{60}Co , a resposta do filme Sunna apresentou uma flutuação de 5,14% até os 50 kGy e acima desta dose, até o limite superior de detecção da radiação, a resposta para elétrons acelerados aumenta até 13,8% em comparação com a radiação gama.

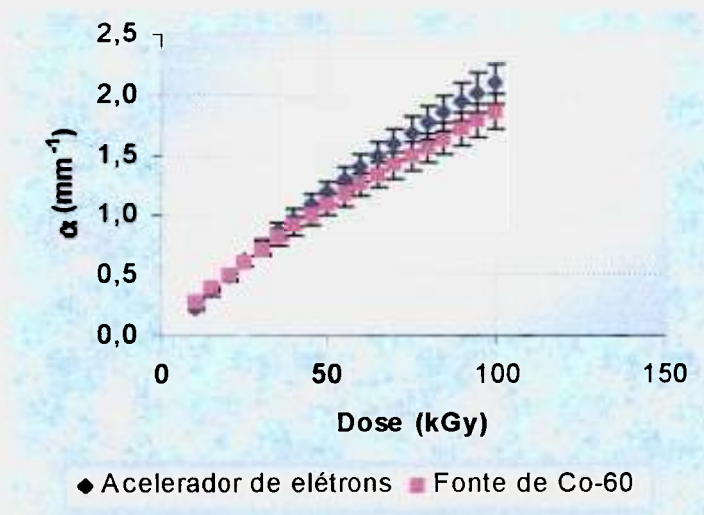
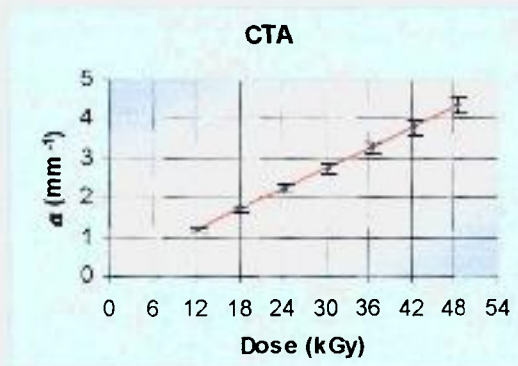


Figura 76 - Representação gráfica das curvas de calibração do filme Sunna no acelerador de elétrons. ($E = 1,201 \text{ MeV}$, $I = 3 \text{ mA}$, $V = 3,36 \text{ m/min}$, $L = 100 \text{ cm}$ e $\dot{D} \cong 5 \times 10^4 \text{ kGy.h}^{-1}$) e na fonte de ^{60}Co ($\dot{D} \cong 7 \text{ kGy h}^{-1}$).

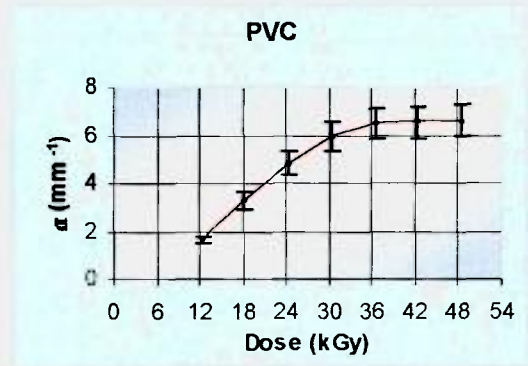
5.9 Comparação da resposta dos filmes radiocrômicos para fins de aplicação em dosimetria rotineira no acelerador de elétrons

Os filmes radiocrômicos utilizados neste trabalho destinam-se à dosimetria de rotina, mas na realidade a instalação do TE não necessita possuir todos estes tipos de filmes.

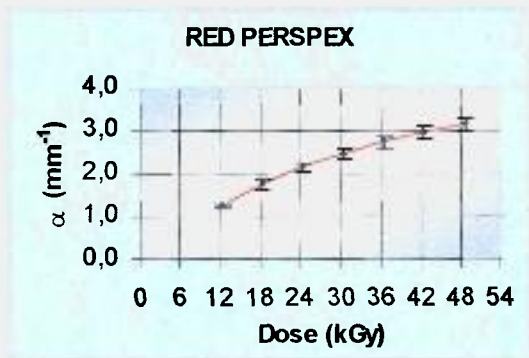
Foram feitas curvas de calibração neste intervalo, para cada filme e foram determinadas as equações, linear ou polinomial, como mostra a Figura 77. Posteriormente, todos os filmes foram irradiados no acelerador nas mesmas condições, energia de 1,201 MeV; corrente de 3 mA; largura da bandeja de 100 cm e velocidade da bandeja de 3,36 m/min, para a intercomparação dos resultados, no intervalo de dose comum à todos eles, isto é entre 12,134 kGy e 48,536 kGy.



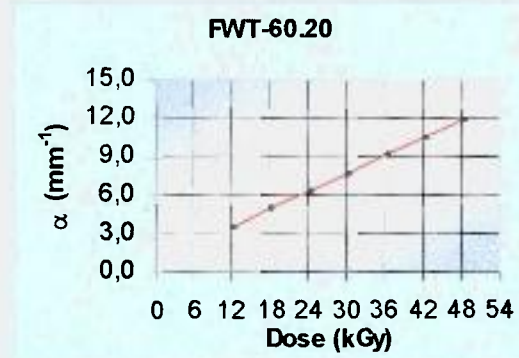
$$\alpha = 0,1472 + 0,0861D$$



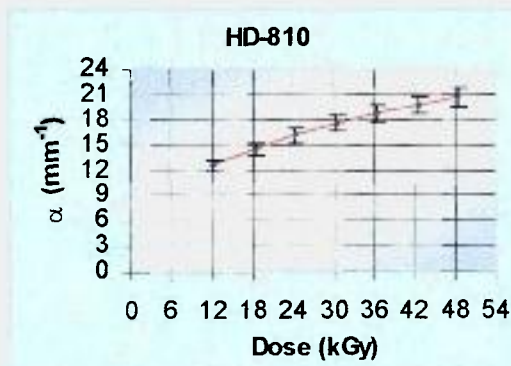
$$\alpha = (-3,1829) + 0,4589D + (-0,0053)D^2$$



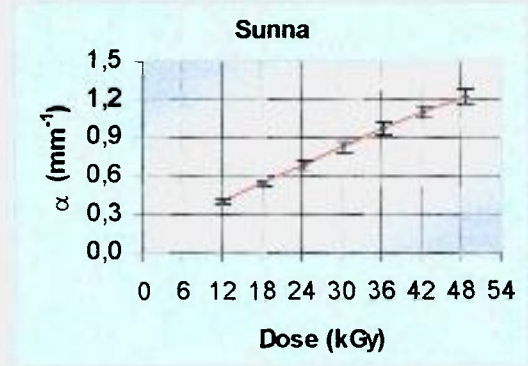
$$\alpha = (-0,0837) + 0,1333D + (-0,0020)D^2 + 1,33 \times 10^{-5}D^3$$



$$\alpha = 0,7929 + 0,2284D$$



$$\alpha = 8,4241 + 0,3781D + (-0,0026)D^2$$



$$\alpha = 0,0971 + 0,0254D + (-4,5 \times 10^{-5})D^2$$

Figura 77 – Resposta dos filmes radiocrômicos irradiados no acelerador de elétrons (E = 1,201 MeV, I = 3 mA, V = 3,36 m/min, L = 100 cm e intervalo de doses entre 12,134 kGy e 48,536 kGy).

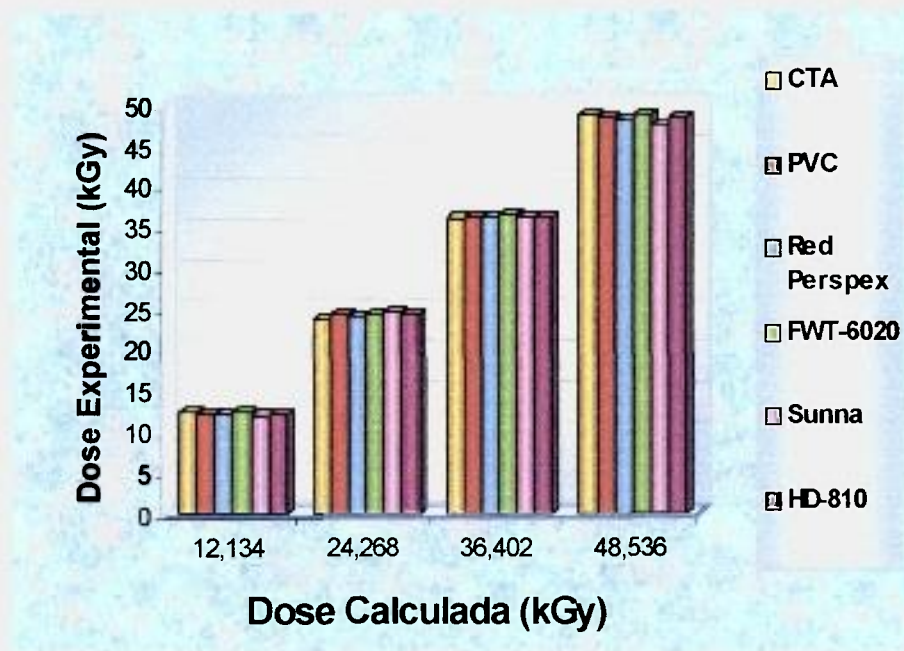


Figura 78 - Comparação entre os valores da dose absorvida experimental e calculada para filmes radiocrômicos irradiados no acelerador de elétrons. ($E = 1,201$ MeV, $I = 3$ mA, $V = 3,36$ m/min, $L = 100$ cm e intervalo de doses entre 12,134 kGy e 48,536 kGy).

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

A irradiação de materiais no acelerador de elétrons do TE-IPEN precisa ser cuidadosamente feita porque alguns parâmetros podem provocar flutuações no cômputo do valor da dose absorvida, embora não tão significativos que invalidem o processo de irradiação como um todo. Estas flutuações podem ser reduzidas, ou eliminadas, *adaptando* a forma de irradiação e a posição dos produtos sob o feixe de elétrons. Perez [20], ao usar o calorímetro de grafita, observou um erro sistemático no valor da dose, estimado em 10%, que foi associado à metodologia de cálculo dessa dose, baseado nos parâmetros operacionais do acelerador. Após substituições de alguns componentes eletrônicos no equipamento, os desvios observados anteriormente foram corrigidos por Szulak ^{1,2} ao modificar as equações por ele formuladas e nelas algumas constantes.

O filme CTA foi utilizado para avaliar os parâmetros do acelerador, quanto

- ***a escolha do material suporte*** : O material considerado adequado para colocar sob os produtos a serem irradiados foi a madeira.
- ***a distância entre o dosímetro e a janela de titânio*** : a flutuação na dose não foi considerada significativa, uma vez que a maior dose encontrada, entre 4 cm e 5 cm, não ultrapassou a 2,5%, e a precisão nominal deste filme varia de 3% a 5%.
- ***a uniformidade do feixe de elétrons*** : o feixe de elétrons não é uniforme em toda a largura da bandeja de irradiação, entretanto a variação que ocorre ao longo da largura não ultrapassa a 5%.
- ***diferentes larguras do feixe de elétrons*** : quando foram utilizadas três larguras diferentes, 60 cm, 100 cm e 112 cm, ocorreu uma variação entre 2% e 6%.

- **diferentes velocidades da bandeja** : quando foram utilizadas três velocidades da bandeja diferentes, 1,68 m/min, 3,36 m/min e 6,72 m/min, ocorreu uma variação máxima de 3%.
- **diferentes correntes** : quando foram utilizadas várias correntes ocorreu uma variação entre 3,2% e 8%. As flutuações maiores ocorreram quando foram utilizadas correntes baixas, menores que 1,5 mA.
- **determinação da energia dos elétrons** : pela equação da norma ISO/DIS 15569 a energia calculada foi 18,3% menor que a utilizada na irradiação. Pela equação de Seltzer¹ a energia encontrada foi 6,9% menor que a utilizada, e pela equação sugerida por LIMA a energia encontrada foi 10,7% menor que a utilizada na irradiação. Nenhuma das equações foram consideradas impróprias.

Os filmes CTA, PVC, Red Perspex, FWT-60.20, Gafchromic HD-810 e Sunna foram avaliados, quanto

- **comprimento de onda ótimo** : quando o filme Sunna for irradiado em acelerador de elétrons, a leitura espectrofotométrica deve ser feita no comprimento de onda de 280 nm. O comprimento de onda recomendado pelo fabricante, 240 nm, deve ser usado apenas quando o filme for irradiado em fontes gama. Os demais filmes estão de acordo com as recomendações do fabricante e com a literatura.
- **curva de calibração** : o filme CTA apresenta linearidade em todo o intervalo de doses, a curva de calibração deste filme foi desmembrada para melhor percepção de sua linearidade. A curva de calibração do filme FWT-60.20, no intervalo de doses entre 6,067 kGy e 151,67 kGy , é um polinômio de segundo grau. Quando este intervalo foi desmembrado, a curva de calibração, para cada intervalo, passou a ser linear. As curvas de calibração de todos os outros filmes são polinômios, o que não os fazem impróprios para uso rotineiro, apenas traz maior dificuldade para o cálculo da dose.
- **limite inferior de detecção** : o material a ser irradiado, que estiver posicionado sob o feixe de elétrons, recebe uma parcela de radiação no momento que o acelerador de elétrons é ligado e a bandeja ainda está imóvel. Esta contribuição de dose foi perceptível no filme CTA e no filme HD-810. Nos outros filmes, embora houve um aumento na

absorvância, o limite inferior de detecção da radiação de cada filme não foi ultrapassado.

- *Influência das condições ambientais:*

| Filmes → | CTA | PVC | RED PERSPEX | FWT-60.20 | HD-810 | Sunna |
|---|-------|-------|----------------|-----------|---------|-------|
| Luz (72 horas) | 16,8% | 0,8% | < 0,1% | INTENSA | - | 3% |
| Temperatura (60 min à 50°C) | 1,6% | - | 0,2% | 0,1% | > 50% | - |
| Umidade 68% e 90% (120 horas) | 9,6% | 0,15% | 0,17% | INTENSA | INTENSA | 1% |

Os filmes mais influenciados pelas condições ambientais é o FWT-60.20 e o Gafchromic HD-810. O primeiro não pode ser manuseado e irradiado em ambiente iluminado, para o segundo deve ser feito um controle da temperatura de armazenagem e irradiação, e ambos deve ser mantidos e irradiados em ambiente com umidade relativa controlada.

- *diferentes energias* : todos os filmes utilizados não apresentaram dependência energética, quando foram utilizadas energias entre 0,8 MeV e 1,5 MeV. A maior variação encontrada foi no filme PVC, que variou no máximo 10,5% entre uma energia e outra. Mas, a precisão nominal deste filme é 10%, então a variação não é atribuída à energia da radiação incidente.
- *diferentes sistemas de irradiação diferentes* : quando foi utilizada a fonte de ⁶⁰Co para intercomparação dos resultados, o filme que apresentou maior variação foi o FWT-60.20. Esta variação chegou a 50% em alguns pontos da curva. O filme CTA apresentou variação entre 1,7 e 8%, o filme PVC apresentou variação em média de 8,1%, o filme Red Perspex apresentou variação de 5%, o filme HD-810 apresentou variação de 3,6% e o filme Sunna apresentou variação de 5,15% até 50 kGy e de 13,8% de 50 kGy a 100 kGy.

- *intervalo de doses e custo por unidade para cada filme radiocrômico :*

| Filme Radiocrômico | Intervalo de doses (kGy) | Custo USS/ unidade |
|-------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| CTA | 10 - 300 | 0,14 |
| PVC | 5 - 60 | 0,05 |
| Red Perspex – 4034 | 5 - 50 | 0,42 |
| FWT - 60.20 | 0,01 - 150 | 0,32 |
| HD – 810 | 0,05 - 50 | 0,27 |
| SUNNA | 10 - 100 | 0,35 |

Se forem levadas em consideração todas as características necessárias para que um filme radiocrômico seja utilizado como dosímetro de rotina, o mais flexível de todos é o CTA. No entanto, como a dose limite inferior é 10 kGy, pois abaixo deste valor a absorvância é instável, a instalação de irradiação deve aplicar outro filme para doses inferiores a 10 kGy.

Sempre que o equipamento passar por algum tipo de manutenção, as curvas de calibração dos filmes dosimétricos devem ser refeitas. Para cada lote de filme adquirido deve ser feita uma nova curva de calibração, e os filmes estocados devem ser calibrados no mínimo semestralmente.

ANEXOS

Anexo I

| Energia do feixe de elétrons (MeV) em função da corrente no divisor de alta tensão (μA) | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| HVD(μA) | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
| 12,0 | 0,194 | 0,196 | 0,198 | 0,199 | 0,201 | 0,202 | 0,204 | 0,206 | 0,207 | 0,209 |
| 13,0 | 0,210 | 0,212 | 0,214 | 0,215 | 0,217 | 0,218 | 0,220 | 0,222 | 0,223 | 0,225 |
| 14,0 | 0,226 | 0,228 | 0,230 | 0,231 | 0,233 | 0,234 | 0,236 | 0,238 | 0,239 | 0,241 |
| 15,0 | 0,242 | 0,244 | 0,246 | 0,247 | 0,249 | 0,250 | 0,252 | 0,254 | 0,255 | 0,257 |
| 16,0 | 0,258 | 0,260 | 0,261 | 0,263 | 0,265 | 0,266 | 0,268 | 0,269 | 0,271 | 0,272 |
| 17,0 | 0,274 | 0,276 | 0,277 | 0,279 | 0,280 | 0,282 | 0,284 | 0,285 | 0,287 | 0,288 |
| 18,0 | 0,290 | 0,291 | 0,293 | 0,294 | 0,296 | 0,298 | 0,299 | 0,301 | 0,302 | 0,304 |
| 19,0 | 0,305 | 0,307 | 0,309 | 0,310 | 0,312 | 0,313 | 0,315 | 0,316 | 0,318 | 0,319 |
| 20,0 | 0,321 | 0,323 | 0,324 | 0,326 | 0,327 | 0,329 | 0,330 | 0,332 | 0,333 | 0,335 |
| 21,0 | 0,336 | 0,338 | 0,340 | 0,341 | 0,343 | 0,344 | 0,346 | 0,347 | 0,349 | 0,350 |
| 22,0 | 0,352 | 0,353 | 0,355 | 0,356 | 0,358 | 0,360 | 0,361 | 0,363 | 0,364 | 0,366 |
| 23,0 | 0,367 | 0,369 | 0,370 | 0,372 | 0,373 | 0,375 | 0,376 | 0,378 | 0,379 | 0,381 |
| 24,0 | 0,383 | 0,384 | 0,386 | 0,387 | 0,389 | 0,390 | 0,392 | 0,393 | 0,395 | 0,396 |
| 25,0 | 0,398 | 0,399 | 0,401 | 0,402 | 0,404 | 0,405 | 0,407 | 0,408 | 0,410 | 0,411 |
| 26,0 | 0,413 | 0,414 | 0,416 | 0,417 | 0,419 | 0,420 | 0,422 | 0,423 | 0,425 | 0,426 |
| 27,0 | 0,428 | 0,429 | 0,431 | 0,432 | 0,434 | 0,435 | 0,437 | 0,438 | 0,440 | 0,441 |
| 28,0 | 0,443 | 0,444 | 0,446 | 0,447 | 0,449 | 0,450 | 0,452 | 0,453 | 0,455 | 0,456 |
| 29,0 | 0,458 | 0,459 | 0,461 | 0,462 | 0,464 | 0,465 | 0,467 | 0,468 | 0,470 | 0,471 |
| 30,0 | 0,473 | 0,474 | 0,476 | 0,477 | 0,479 | 0,480 | 0,482 | 0,483 | 0,485 | 0,486 |
| 31,0 | 0,488 | 0,489 | 0,491 | 0,492 | 0,493 | 0,495 | 0,496 | 0,498 | 0,499 | 0,501 |
| 32,0 | 0,502 | 0,504 | 0,505 | 0,507 | 0,508 | 0,510 | 0,511 | 0,513 | 0,514 | 0,516 |
| 33,0 | 0,517 | 0,519 | 0,520 | 0,521 | 0,523 | 0,524 | 0,526 | 0,527 | 0,529 | 0,530 |
| 34,0 | 0,532 | 0,535 | 0,535 | 0,536 | 0,538 | 0,539 | 0,540 | 0,542 | 0,543 | 0,545 |
| 35,0 | 0,546 | 0,548 | 0,549 | 0,551 | 0,552 | 0,554 | 0,555 | 0,556 | 0,558 | 0,559 |
| 36,0 | 0,561 | 0,562 | 0,564 | 0,565 | 0,567 | 0,568 | 0,569 | 0,571 | 0,572 | 0,574 |
| 37,0 | 0,575 | 0,577 | 0,578 | 0,580 | 0,581 | 0,582 | 0,584 | 0,585 | 0,587 | 0,588 |

Cont.

| Energia do feixe de elétrons (MeV) em função da corrente no divisor de alta tensão (μA) | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| HVD(μA) | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
| 38,0 | 0,590 | 0,591 | 0,592 | 0,594 | 0,595 | 0,597 | 0,598 | 0,600 | 0,601 | 0,603 |
| 39,0 | 0,604 | 0,605 | 0,607 | 0,608 | 0,610 | 0,611 | 0,613 | 0,614 | 0,615 | 0,617 |
| 40,0 | 0,618 | 0,620 | 0,621 | 0,623 | 0,624 | 0,625 | 0,627 | 0,628 | 0,630 | 0,631 |
| 41,0 | 0,632 | 0,634 | 0,635 | 0,637 | 0,638 | 0,640 | 0,641 | 0,642 | 0,644 | 0,645 |
| 42,0 | 0,647 | 0,648 | 0,649 | 0,651 | 0,652 | 0,654 | 0,655 | 0,657 | 0,658 | 0,659 |
| 43,0 | 0,661 | 0,662 | 0,664 | 0,665 | 0,666 | 0,668 | 0,669 | 0,671 | 0,672 | 0,673 |
| 44,0 | 0,675 | 0,676 | 0,678 | 0,679 | 0,680 | 0,682 | 0,683 | 0,685 | 0,686 | 0,687 |
| 45,0 | 0,689 | 0,690 | 0,692 | 0,693 | 0,694 | 0,696 | 0,697 | 0,699 | 0,700 | 0,701 |
| 46,0 | 0,703 | 0,704 | 0,706 | 0,707 | 0,708 | 0,710 | 0,711 | 0,713 | 0,714 | 0,715 |
| 47,0 | 0,717 | 0,718 | 0,720 | 0,721 | 0,722 | 0,724 | 0,725 | 0,726 | 0,728 | 0,729 |
| 48,0 | 0,731 | 0,732 | 0,733 | 0,735 | 0,736 | 0,737 | 0,739 | 0,740 | 0,742 | 0,743 |
| 49,0 | 0,744 | 0,746 | 0,747 | 0,749 | 0,750 | 0,751 | 0,753 | 0,754 | 0,755 | 0,757 |
| 50,0 | 0,758 | 0,760 | 0,761 | 0,762 | 0,764 | 0,765 | 0,766 | 0,768 | 0,769 | 0,770 |
| 51,0 | 0,772 | 0,773 | 0,775 | 0,776 | 0,777 | 0,779 | 0,780 | 0,781 | 0,783 | 0,784 |
| 52,0 | 0,786 | 0,787 | 0,788 | 0,790 | 0,791 | 0,792 | 0,794 | 0,795 | 0,796 | 0,798 |
| 53,0 | 0,799 | 0,800 | 0,802 | 0,803 | 0,805 | 0,806 | 0,807 | 0,809 | 0,810 | 0,811 |
| 54,0 | 0,813 | 0,814 | 0,815 | 0,817 | 0,818 | 0,819 | 0,821 | 0,822 | 0,823 | 0,825 |
| 55,0 | 0,826 | 0,828 | 0,829 | 0,830 | 0,832 | 0,833 | 0,834 | 0,836 | 0,837 | 0,838 |
| 56,0 | 0,840 | 0,841 | 0,842 | 0,844 | 0,845 | 0,846 | 0,848 | 0,849 | 0,850 | 0,852 |
| 57,0 | 0,853 | 0,854 | 0,856 | 0,857 | 0,858 | 0,860 | 0,861 | 0,862 | 0,864 | 0,865 |
| 58,0 | 0,866 | 0,868 | 0,869 | 0,870 | 0,872 | 0,873 | 0,874 | 0,876 | 0,877 | 0,878 |
| 59,0 | 0,880 | 0,881 | 0,882 | 0,884 | 0,885 | 0,886 | 0,888 | 0,889 | 0,890 | 0,892 |
| 60,0 | 0,893 | 0,894 | 0,896 | 0,897 | 0,898 | 0,900 | 0,901 | 0,902 | 0,904 | 0,905 |
| 61,0 | 0,906 | 0,908 | 0,909 | 0,910 | 0,912 | 0,913 | 0,914 | 0,916 | 0,917 | 0,918 |
| 62,0 | 0,919 | 0,921 | 0,922 | 0,923 | 0,925 | 0,926 | 0,927 | 0,929 | 0,930 | 0,931 |
| 63,0 | 0,933 | 0,934 | 0,935 | 0,937 | 0,938 | 0,939 | 0,941 | 0,942 | 0,943 | 0,944 |

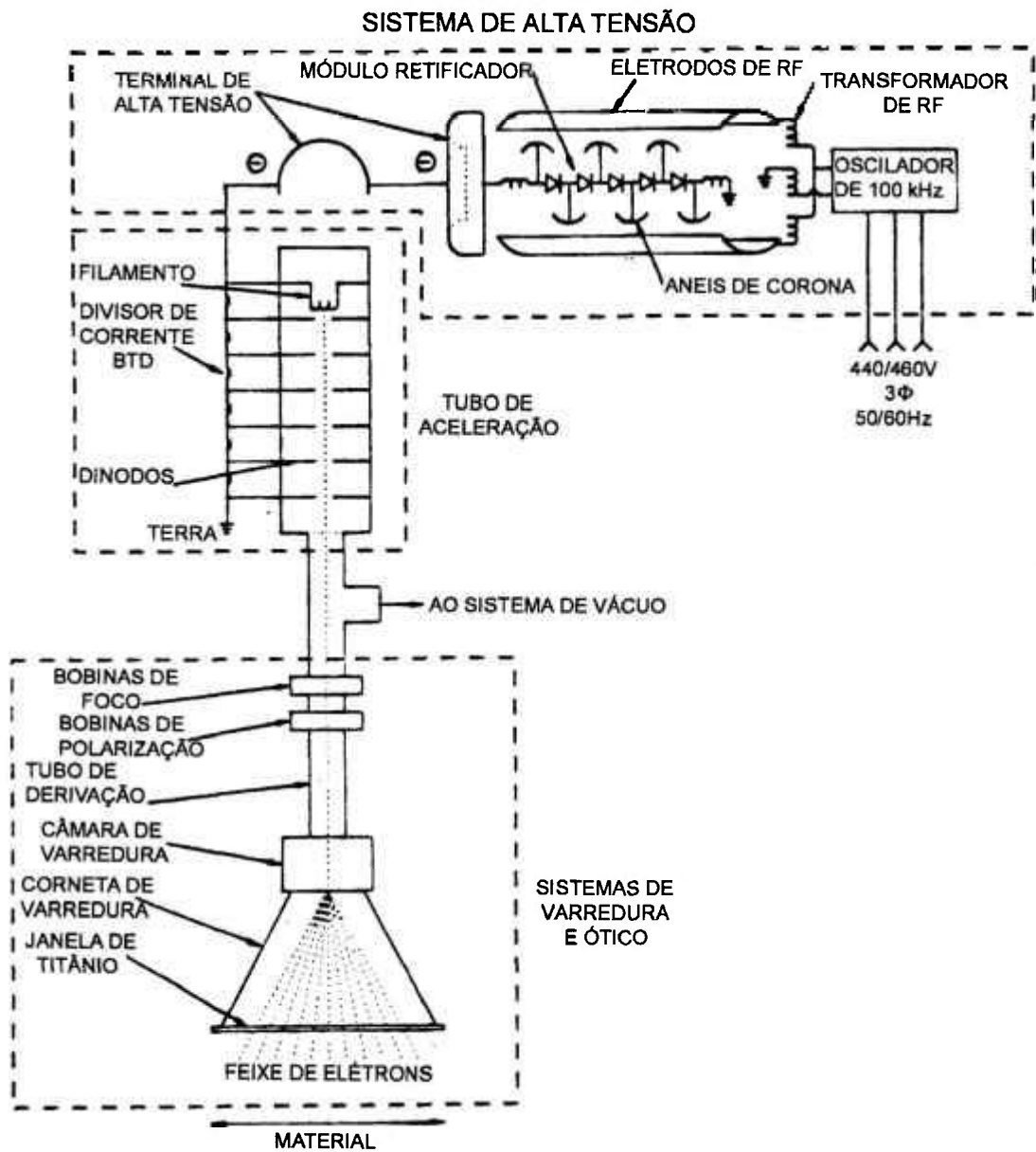
Cont.

| Energia do feixe de elétrons (MeV) em função da corrente no divisor de alta tensão (μA) | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| HVD(μA) | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
| 64,0 | 0,946 | 0,947 | 0,948 | 0,950 | 0,951 | 0,952 | 0,954 | 0,955 | 0,956 | 0,958 |
| 65,0 | 0,959 | 0,960 | 0,961 | 0,963 | 0,964 | 0,965 | 0,967 | 0,968 | 0,969 | 0,971 |
| 66,0 | 0,972 | 0,973 | 0,974 | 0,976 | 0,977 | 0,978 | 0,980 | 0,981 | 0,982 | 0,984 |
| 67,0 | 0,985 | 0,986 | 0,987 | 0,989 | 0,990 | 0,991 | 0,993 | 0,994 | 0,995 | 0,996 |
| 68,0 | 0,998 | 0,999 | 1,000 | 1,002 | 1,003 | 1,004 | 1,005 | 1,007 | 1,008 | 1,009 |
| 69,0 | 1,011 | 1,012 | 1,013 | 1,014 | 1,016 | 1,017 | 1,018 | 1,020 | 1,021 | 1,022 |
| 70,0 | 1,023 | 1,025 | 1,026 | 1,027 | 1,029 | 1,030 | 1,031 | 1,032 | 1,034 | 1,035 |
| 71,0 | 1,036 | 1,038 | 1,039 | 1,040 | 1,041 | 1,043 | 1,044 | 1,045 | 1,047 | 1,048 |
| 72,0 | 1,049 | 1,050 | 1,052 | 1,053 | 1,054 | 1,055 | 1,057 | 1,058 | 1,059 | 1,061 |
| 73,0 | 1,062 | 1,063 | 1,064 | 1,066 | 1,067 | 1,068 | 1,069 | 1,071 | 1,072 | 1,073 |
| 74,0 | 1,074 | 1,076 | 1,077 | 1,078 | 1,080 | 1,081 | 1,082 | 1,083 | 1,085 | 1,086 |
| 75,0 | 1,087 | 1,088 | 1,090 | 1,091 | 1,092 | 1,093 | 1,095 | 1,096 | 1,097 | 1,098 |
| 76,0 | 1,100 | 1,101 | 1,102 | 1,104 | 1,105 | 1,106 | 1,107 | 1,109 | 1,110 | 1,111 |
| 77,0 | 1,112 | 1,114 | 1,115 | 1,116 | 1,117 | 1,119 | 1,120 | 1,121 | 1,122 | 1,124 |
| 78,0 | 1,125 | 1,126 | 1,127 | 1,129 | 1,130 | 1,131 | 1,132 | 1,134 | 1,135 | 1,136 |
| 79,0 | 1,137 | 1,139 | 1,140 | 1,141 | 1,142 | 1,144 | 1,145 | 1,146 | 1,147 | 1,149 |
| 80,0 | 1,150 | 1,151 | 1,152 | 1,154 | 1,155 | 1,156 | 1,157 | 1,159 | 1,160 | 1,161 |
| 81,0 | 1,162 | 1,164 | 1,165 | 1,166 | 1,167 | 1,168 | 1,170 | 1,171 | 1,172 | 1,173 |
| 82,0 | 1,175 | 1,176 | 1,177 | 1,178 | 1,180 | 1,181 | 1,182 | 1,183 | 1,185 | 1,186 |
| 83,0 | 1,187 | 1,188 | 1,189 | 1,191 | 1,192 | 1,193 | 1,194 | 1,196 | 1,197 | 1,198 |
| 84,0 | 1,199 | 1,201 | 1,202 | 1,203 | 1,204 | 1,205 | 1,207 | 1,208 | 1,209 | 1,210 |
| 85,0 | 1,212 | 1,213 | 1,214 | 1,215 | 1,217 | 1,218 | 1,219 | 1,220 | 1,221 | 1,223 |
| 86,0 | 1,224 | 1,225 | 1,226 | 1,228 | 1,229 | 1,230 | 1,231 | 1,232 | 1,234 | 1,235 |
| 87,0 | 1,236 | 1,237 | 1,238 | 1,240 | 1,241 | 1,242 | 1,243 | 1,245 | 1,246 | 1,247 |
| 88,0 | 1,248 | 1,249 | 1,251 | 1,252 | 1,253 | 1,254 | 1,256 | 1,257 | 1,258 | 1,259 |
| 89,0 | 1,260 | 1,262 | 1,263 | 1,264 | 1,265 | 1,266 | 1,268 | 1,269 | 1,270 | 1,271 |

Cont.

| Energia do feixe de elétrons (MeV) em função da corrente no divisor de alta tensão (μA) | | | | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| HVD(μA) | 0,0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 |
| 90,0 | 1,272 | 1,274 | 1,275 | 1,276 | 1,277 | 1,279 | 1,280 | 1,281 | 1,282 | 1,283 |
| 91,0 | 1,285 | 1,286 | 1,287 | 1,288 | 1,289 | 1,291 | 1,292 | 1,293 | 1,294 | 1,295 |
| 92,0 | 1,297 | 1,298 | 1,299 | 1,300 | 1,301 | 1,303 | 1,304 | 1,305 | 1,306 | 1,307 |
| 93,0 | 1,309 | 1,310 | 1,311 | 1,312 | 1,313 | 1,315 | 1,316 | 1,317 | 1,318 | 1,319 |
| 94,0 | 1,321 | 1,322 | 1,323 | 1,324 | 1,325 | 1,327 | 1,328 | 1,329 | 1,330 | 1,331 |
| 95,0 | 1,333 | 1,334 | 1,335 | 1,336 | 1,337 | 1,338 | 1,340 | 1,341 | 1,342 | 1,343 |
| 96,0 | 1,344 | 1,346 | 1,347 | 1,348 | 1,349 | 1,350 | 1,352 | 1,353 | 1,354 | 1,355 |
| 97,0 | 1,356 | 1,357 | 1,359 | 1,360 | 1,361 | 1,362 | 1,363 | 1,365 | 1,366 | 1,367 |
| 98,0 | 1,368 | 1,369 | 1,370 | 1,372 | 1,373 | 1,374 | 1,375 | 1,376 | 1,378 | 1,379 |
| 99,0 | 1,380 | 1,381 | 1,382 | 1,383 | 1,385 | 1,386 | 1,387 | 1,388 | 1,389 | 1,391 |
| 100,0 | 1,392 | 1,393 | 1,394 | 1,395 | 1,396 | 1,398 | 1,399 | 1,400 | 1,401 | 1,402 |
| 101,0 | 1,403 | 1,405 | 1,406 | 1,407 | 1,408 | 1,409 | 1,410 | 1,412 | 1,413 | 1,414 |
| 102,0 | 1,415 | 1,416 | 1,418 | 1,419 | 1,420 | 1,421 | 1,422 | 1,423 | 1,425 | 1,426 |
| 103,0 | 1,427 | 1,428 | 1,429 | 1,430 | 1,432 | 1,433 | 1,434 | 1,435 | 1,436 | 1,437 |
| 104,0 | 1,439 | 1,440 | 1,441 | 1,442 | 1,443 | 1,444 | 1,446 | 1,447 | 1,448 | 1,449 |
| 105,0 | 1,450 | 1,451 | 1,452 | 1,454 | 1,455 | 1,456 | 1,457 | 1,458 | 1,459 | 1,461 |
| 106,0 | 1,462 | 1,463 | 1,464 | 1,465 | 1,466 | 1,468 | 1,469 | 1,470 | 1,471 | 1,472 |
| 107,0 | 1,473 | 1,474 | 1,476 | 1,477 | 1,478 | 1,479 | 1,480 | 1,481 | 1,483 | 1,484 |
| 108,0 | 1,485 | 1,486 | 1,487 | 1,488 | 1,489 | 1,491 | 1,492 | 1,493 | 1,494 | 1,495 |
| 109,0 | 1,496 | 1,497 | 1,499 | 1,500 | 1,501 | 1,502 | 1,503 | 1,504 | 1,506 | 1,507 |
| 110,0 | 1,508 | 1,509 | 1,510 | 1,511 | 1,512 | 1,514 | 1,515 | 1,516 | 1,517 | 1,518 |
| 111,0 | 1,519 | 1,520 | 1,522 | 1,523 | 1,524 | 1,525 | 1,526 | 1,527 | 1,528 | 1,530 |
| 112,0 | 1,531 | 1,532 | 1,533 | 1,534 | 1,535 | 1,536 | 1,538 | 1,539 | 1,540 | 1,541 |
| 113,0 | 1,542 | 1,543 | 1,544 | 1,545 | 1,547 | 1,548 | 1,549 | 1,550 | 1,551 | 1,552 |
| 114,0 | 1,553 | 1,555 | 1,556 | 1,557 | 1,558 | 1,559 | 1,560 | 1,561 | 1,563 | 1,564 |
| 115,0 | 1,565 | 1,566 | 1,567 | 1,568 | 1,569 | 1,570 | 1,572 | 1,573 | 1,574 | 1,575 |

Anexo III



Anexo IV

Valores de dose encontrados com o uso do filme CTA em vários alcances dos elétrons

| Alcance dos elétrons, σ (g.cm ⁻²) | Dose (kGy) |
|---|---------------|
| 0,0081 | 61,3 |
| 0,0243 | 65,5 |
| 0,0405 | 66,7 |
| 0,0568 | 72,6 |
| 0,0730 | 76,7 |
| 0,0892 | 80,5 |
| 0,1054 | 84,6 |
| 0,1216 | 86,4 |
| 0,1378 | 88,6 |
| 0,1540 | 89,9 |
| 0,1701 | 91,1 |
| 0,1861 | 89,9 |
| 0,2024 | 88,4 |
| 0,2186 | 87,2 |
| 0,2349 | 84,5 |
| 0,2510 | 82,3 |
| 0,2672 | 78,1 |
| 0,2833 | 73,7 |
| 0,2995 | 69,6 |
| 0,3158 | 64,6 |
| 0,3321 | 61,3 |
| 0,3483 | 52,5 |
| 0,3645 | 46,3 |
| 0,3808 | 40,8 |
| 0,3971 | 28,0 |
| 0,4133 | 22,0 |
| 0,4294 | 16,6 |
| 0,4456 | 10,7 |
| 0,4618 | 6,9 |
| 0,4780 | 3,5 |
| 0,4942 | 0,5 |
| 0,5103 | 0,1 |
| 0,5265 | 0,0 |

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AMERICAN STANDARD AND TESTING MATERIALS **Standard practice for use of a radiochromic film dosimetry system.** ASTM Designation E:1275-88, Subcommittee E10.01, 1992.
- [2] ATTIX, F.H **Introduction to radiological physics and radiation dosimetry.** London : John Wiley & Sons, 1986.
- [3] DE WILTON, M.S. High power, high reliability, electron accelerators for industrial processing. **Radiat. Phys. Chem.** , 25(4-6) : 643-6 52 , 1985.
- [4] GREENING, J.R. , FUNDAMENTALS OF RADIATION, In: KASEK R. ;BJARNGARD, B.E; ATTIX, F.H.eds, **The dosimetry of ionization radiation dosimetry.** New York, Academic, v.2, p.245-319, 1987.
- [5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY **Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams.** Technical Reports Series - TRS - 277, Vienna,1987.
- [6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY **High dose dosimetry** STI/PUB- 671, Vienna, 1985
- [7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY **Manual of Food Irradiation Dosimetry.** Technical Reports Series - TRS - 178, Vienna,1977.
- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY **Measurement Assurance in Dosimetry.** STI/PUB - 846, Vienna, 1987.

- [9] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS
Electron beams with energies between 1 and 50MeV. **Radiation dosimetry**. Sept. 1984 (ICRU-35).
- [10] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS.
Radiation dosimetry stopping powers for electrons and positrons. Oct. 1984 (ICRU-37).
- [11] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION Dosimetry in an electron-beam facility for radiation processing at energies between 300 keV and 25 MeV. **ISO/DIS 15569**, 1997
- [12] LIMA, W. ; POLY, D. C. R. Generalized empirical equation for the extrapolated range of electrons in elemental and compound materials. IAEA-SM-356/9, **International Symposium on Techniques for High-Dose Dosimetry in Industry, Agriculture and Medicine**, Vienna-Austria, 2-5 Nov. 1998
- [13] McLAUGHLIN, W. L.; BOYD, A. W.; CHADWICK, K. H.; McDONALD, J. C.; MILLER, A. **Dosimetry for radiation processing**. Taylor & Francis, London , 1989.
- [14] McLAUGHLIN, W. L. , CHALKLEY, L. , Low atomic number dye systems for ionizing radiation measurement . **Phot. Sci. Engr.** , V.9 p. 195, 1965
- [15] McLAUGHLIN, W.L., DESROSIERS, M. F. Dosimetry systems for radiation processing **Rad. Phys.Chem.** , 46 (4-6):1163-1174, Elsevier Science Ltd., Great Britain, 1995.
- [16] McLAUGHLIN, W. L. . Films, dyes and photographic systems. **Manual on radiation dosimetry**. MARCELL DEKKER, Inc. , New York, 1970.

- [17] McLAUGHLIN, W. L ., HUMPHREYS, J.C., HOCKEN, D., CHAPPAS, W. J., Radiochromic dosimetry for validation and commissioning of industrial radiation processes. In: Progress in radiation processing. Proceedings of 6th International symposium . **Rad. Phys. Chem.** V.31, p.236 - 481, Ottawa, 1987.
- [18] McLAUGHLIN, W. L ., MILLER, A., FIDAN, S., PEJTERSEN, K., PEDERSEN, W.B. Radiochromic plastic films for accurate measurement of radiation absorbed doses and dose distributions. **Rad. Phys. Chem.** , V.10, p.119, 1977
- [19] MILLER A. Status of electron and gamma-ray dosimetry. **Radiat. Phys. Chem.**, 25 (4-6) : 777-8, 1985.
- [20] PÉREZ , H.E.B **Desenvolvimento de um Sistema Calorimétrico para Dosimetria de Feixes de Elétrons em Processos por Radiação.** Tese de Doutorado, IPEN, 1994.
- [21] PUIG, J.R.; LAZIER, J; SUNDARDI, F. Le filme TAC, dosimetre plastique pour la mesure pratique des doses d'irradiation recues en sterilisation. In: Radiosterilisation of medical products. **Proceedings of symposium.** Bombay, 1974. STI/PUB-383 (Vienna-IAEA), p.113
- [22] QUEZADA, V.A.C. **Estabelecimento de um sistema dosimétrico para altas doses utilizando vidros.** Dissertação de Mestrado, IPEN/SP – 1997.
- [23] RZYSKI, B.M.; PINO, E.S; SILVA, L.G.A. Some physical properties of dosimetric materials used in industrial irradiation. **Proceed. Symp. Nucl. Rad. for Development of Latin America.** LAS/ANS, Rio de Janeiro, 1996. CD-ROM
- [24] RZYSKI, B. M., YAMASAKI, M. C. R., LIMA, V. Electron Beam Parameters Determination by means of Celulose Triacetate Dosimetric Films. **VI Congresso Geral de Energia Nuclear, CGEN, 27-31 Out / 1996, Rio de Janeiro, R.J., Brasil, 1996.** CD-ROM.

- [25] RZYSKI, B. M.; YAMASAKI, M. C. R.; PINO, E. S.; GALANTE, A. M. S.; SILVA, R. E. UV dosimetry with polymeric materials. **IV Congreso Iberoamericano de Polímeros**. Viña del Mar, Chile. 25-28/Out 1998
- [26] TANAKA, R.; MITOMO, S.; SUNAGA, H.; MATSUDA, K. ; TAMURA, N. **Manual on CTA film dosimeter** JAERI-M82-033, 1982.
- [27] TSOULFANIDIS, N. **Measurement and detection of radiation**. New York, Hemisphere, 1983.
- [28] WHITTAKER, B. **Manual on Radiation dosimetry**. Ed. N.W.Holm and R.J.Berry, pub. Marcell Dekker, New York, 1970.