



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**PESQUISA, DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO
DE MATERIAIS DOSIMÉTRICOS PARA MONITORAMENTO
EM PROCESSOS DE IRRADIAÇÃO COM DOSES ALTAS**

ANA MARIA SISTI GALANTE

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear-Aplicações.**

**Orientadora:
Dra. Letícia L.C. Rodrigues**

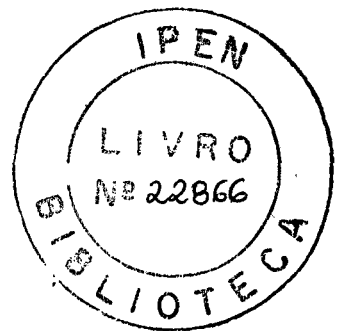
**São Paulo
2003**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia Associada à Universidade de São Paulo

**PESQUISA, DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO
DE MATERIAIS DOSIMÉTRICOS PARA MONITORAMENTO
EM PROCESSOS DE IRRADIAÇÃO COM DOSES ALTAS**

ANA MARIA SISTI GALANTE



**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau
de Doutor em Ciências na Área
de Tecnologia Nuclear – Aplicações**

**Orientadora:
Dra Letícia L. C. Rodrigues**

**São Paulo
2003**

AGRADECIMENTOS

À Dra. Leticia Lucente Campos Rodrigues pela orientação, incentivo, amizade e confiança demonstradas, que possibilitou a realização deste trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares na pessoa do Superintendente Dr. Cláudio Rodrigues pela oportunidade oferecida.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, pelo suporte financeiro e à assessoria científica pelas sugestões apresentadas para a melhoria do trabalho.

À minha família pelo carinho, compreensão, incentivo e colaboração durante a realização deste trabalho.

À Dra. Barbara M. Rzycki pela amizade, sugestões, colaboração e incentivo.

No Departamento de Metrologia das Radiações à todas as pessoas que colaboraram direta ou indiretamente.

No Centro de Tecnologia das Radiações à todas as pessoas que colaboraram direta ou indiretamente, em especial à Eng. Elizabeth S.R. Somessari, ao Eng. Carlos G. da Silveira pela irradiação das amostras e pela amizade demonstrada e à Dra. Anna Lúcia C.H. Villavicencio pela colaboração na apresentação dos trabalhos em congressos e pela simpatia demonstrada.

À Dra. Linda V. E. Caldas pelo incentivo e atenção dispensada.

À todas as pessoas do IPEN que colaboraram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Aos diretores da Indústria TC Acrílicos, Sr. Gerson Trentino e Sr. Lamartine Trentino, pela confecção das placas de polimetilmetacrilato e pela simpatia demonstrada.

À Indústria Bayer pelo fornecimento dos corantes utilizados.

À Indústria Inapel pelo fornecimento dos filmes para a embalagem dos detectores.

À Companhia Brasileira de Esterilização (CBE) pela irradiação dos detectores.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	i
ABSTRACT	ii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	10
1.1.1 Objetivo geral	10
1.1.2 Objetivos específicos	10
1.1.3 Originalidade	11
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	12
2.1 Espectroscopia	12
2.1.1 Espectros de absorção	12
2.1.2 Leis da absorção de luz	14
2.2 Interação da radiação com a matéria	15
2.2.1 Radiação eletromagnética	15
2.2.2 Elétrons	17
2.3 Princípios da dosimetria da radiação	18
2.3.1 Classificação dos dosímetros	18
2.3.2 Calibração dos dosímetros	19
2.3.3 Seleção do sistema dosimétrico	20
2.3.4 Dosímetros Químicos	20
2.3.5 Efeitos das condições ambientais	21
2.3.5.1 Temperatura	21
2.3.5.2 Umidade relativa (U.R.)	22
2.3.5.3 Luz	22
2.3.6 Dose absorvida	23
2.4 Fontes de radiação	24
2.5 Nitrato de Potássio	25
2.6 Polimetilmetacrilato (PMMA)	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 Equipamentos utilizados	28
3.1.1 Preparação das pastilhas e soluções	28
3.1.2 Preparação dos detectores	28
3.1.3 Fontes de radiação	28
3.1.4 Medidas espectrofotométricas	29
3.2 Procedimentos experimentais	31
3.2.1 Nitrato de potássio	31
3.2.1.1 Reagentes utilizados	31
3.2.1.2 Preparação das pastilhas	31
3.2.1.3 Preparação do dosímetro para irradiação	33
3.2.1.4 Análises espectrofotométricas	33
3.2.2 Detectores Radiocrômicos	35
3.2.2.1 Preparação das placas de Polimetilmetacrilato	35

3.2.2.2	Características dos detectores de PMMA desenvolvidos neste trabalho	38
3.2.2.3	Preparação dos detectores de PMMA	44
3.2.2.4	Preparação dos detectores para irradiação	44
3.2.2.5	Análises espectrofotométricas	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1	Nitrato de potássio + compostos	45
4.1.1	Espectros de absorção	45
4.1.2	Influência das condições ambientais	47
4.1.3	Estabilidade da resposta de pastilhas não irradiadas e irradiadas	48
4.1.4	Resposta das pastilhas após a irradiação	50
4.1.5	Curva de calibração para radiação gama do ^{60}Co	54
4.1.6	Reprodutibilidade do lote	57
4.1.7	Dependência da resposta com o posicionamento do dosímetro	57
4.1.8	Dependência da resposta com a taxa de dose	57
4.2	Detectores radiocrômicos (PMMA - colorido)	59
4.2.1	Espectro de absorção dos detectores não irradiados	59
4.2.2	Espectro de absorção dos detectores irradiados com radiação gama	61
4.2.3	Limite inferior de detecção (LID)	65
4.2.4	Sensibilidade à luz ambiente do laboratório	66
4.2.5	Influência da temperatura na resposta dos detectores	72
4.2.6	Efeito da umidade relativa na resposta dos detectores	73
4.2.7	Reprodutibilidade da resposta	77
4.2.8	Dependência energética da resposta para elétrons	78
4.2.9	Dependência da resposta com a taxa de dose	82
4.2.9.1	Elétrons	82
4.2.9.2	Fótons	85
4.2.10	Curva de calibração – Radiação gama	88
4.2.11	Curva de calibração – Elétrons acelerados	100
4.2.12	Coefficiente de variação (CV)	111
4.2.13	Intervalo de dose útil	113
5	CONCLUSÕES	114
5.1	Nitrato de Potássio + composto sensibilizador	114
5.2	Detectores de Polimetilmetacrilato coloridos	115
	APÊNDICE A – Características de dosímetros comercialmente disponíveis	117
	APÊNDICE B – Espectros de transmitância dos detectores de PMMA	124
	APÊNDICE C – Histograma – Frequência de ocorrência das medidas de absorvância dos detectores de PMMA desenvolvidos, não irradiados.	126
	ANEXO 1 – Acelerador de elétrons	128
	ANEXO 2 – Ilustrações da fonte Gammacell 220	130
	ANEXO 3 – Terminologia	133
	ANEXO 4 – Alcance dos elétrons (A)	135
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136

Pesquisa, Desenvolvimento e Caracterização de Materiais Dosimétricos para Monitoramento em Processos de Irradiação com Doses Altas

Ana Maria Sisti Galante

RESUMO

Neste trabalho foram desenvolvidos materiais dosimétricos que podem ser confeccionados no Brasil com matéria-prima adquirida no mercado nacional para substituir os dosímetros importados usados nos processamentos por radiação. Foram preparadas misturas de nitrato de potássio e compostos sensibilizadores como dióxido de manganês, nitrato de bário e brometo de potássio na forma de pastilhas e foram avaliadas suas características dosimétricas em campos de radiação gama do ^{60}Co como: intervalo de dose útil, sensibilidade, influências das condições ambientais e da taxa de dose. Detectores de polimetilmetacrilato coloridos também foram produzidos e suas características dosimétricas foram avaliadas em campos de radiação gama e feixes de elétrons acelerados de 0,8 a 1,5 MeV. Neste caso, as principais características estudadas foram: intervalo de dose útil, sensibilidade, influência das condições ambientais e da taxa de dose e dependência da resposta com a energia da radiação incidente. A técnica analítica adotada foi a espectrofotometria. A calibração dos dosímetros foi executada nas instalações de irradiação pertencentes ao IPEN certificadas pela Agência Internacional de Energia Atômica por meio do programa IDAS (Serviço Internacional de Garantia de Dose) com dosímetro de Fricke. A mistura que contém o nitrato de potássio e o dióxido de manganês apresentou os melhores resultados em um amplo intervalo de dose de utilização entre 200 e 600 kGy. Os detectores de polimetilmetacrilato desenvolvidos apresentam respostas semelhantes aos detectores importados e o intervalo de dose é característico a cada detector e depende do corante adicionado à sua formulação.

Researches, Development and Characterization of Dosimetric Materials for Monitoring in Irradiation Processes with High Doses

Ana Maria Sisti Galante

ABSTRACT

Dosimetric materials that can be produced in Brazil with material acquired in the national market to replace the imported dosimeters used in radiation processing were developed in this work. Mixtures of potassium nitrate and sensitizers compounds as manganese dioxide, barium nitrate and potassium bromide were prepared in the pellet form. Dosimetric characteristics such as dose-response useful range, sensitivity, environmental conditions and dose rate influences were evaluated in ^{60}Co gamma radiation fields. Dyed polymethylmethacrylate detectors were also produced and its dosimetric characteristics were evaluated. The main characteristics evaluated in this case were: dose-response useful range sensitivity, environmental conditions, dose rate influences and radiation energy dependence in gamma radiation fields and accelerated electrons beam of 0.8 to 1.5 MeV. The applied analytic technique was spectrophotometry. The calibration was performed in the irradiation facilities belonging to IPEN and certified by the International Atomic Energy Agency by means of the program IDAS (International Dose Assurance Service) using the Fricke dosimeter. The mixture of potassium nitrate and manganese dioxide presented the best results and a wide dose range between 200 and 600 kGy. The response of the developed polymethylmethacrylate detectors are similar to the imported detectors and the dose range is characteristic to each detector and depends on the dye added in its formulation.

1 INTRODUÇÃO

O século XIX marca o início do desenvolvimento da física atômica, e duas descobertas contribuíram para que isso ocorresse: em 1895, o físico alemão Wilhelm Konrad von Röntgen descobre uma radiação de natureza desconhecida denominando-a radiação X ou raios X. Um ano depois, o físico francês Antonie Henry Becquerel intensifica seus estudos com o mineral urânio e descobre emissões radioativas que podem penetrar na matéria [1].

Várias pesquisas sucederam essas primeiras descobertas, das quais podem ser citadas: descoberta do polônio e do rádio (1898) pela polonesa Marie Sklodowska Curie; identificação de emissões radioativas, partículas alfa e beta e raios gama, por Ernest Rutherford, físico neozelandês (1902); teoria da relatividade por Albert Einstein (1905); postulados de Niels Bohr relativos às órbitas eletrônicas (1913-1915); mecânica quântica e ondulatória por L. de Broglie (1924) e Schrödinger (1926) e a descoberta dos nêutrons por James Chadwick, físico britânico (1932) [1].

A primeira aplicação da radiação foi na medicina, na qual são empregadas técnicas de diagnóstico com raios X e radionuclídeos, e terapia por radiação em doenças. Atualmente não só a medicina é beneficiada por novas técnicas nucleares, mas também as áreas da pesquisa, indústria, notadamente a farmacêutica e a agricultura [2].

A década de 50, do século XX, marca o início do processamento por radiação. Esta técnica se desenvolve rapidamente ano após ano. *Processamento por radiação* é a aplicação da radiação ionizante para produzir efeitos benéficos físicos, químicos e biológicos em escala industrial. As vantagens do uso da radiação ionizante são a redução do tempo de processamento, a temperatura de processamento é a ambiente e a alta confiabilidade, por causa da reduzida quantidade de parâmetros a serem controlados. Os pontos fracos desta técnica são o custo do investimento inicial, que é elevado, e uma maior dificuldade de licenciamento; requer maior qualificação dos funcionários e dificuldade na substituição do material radioativo [3].

As três aplicações principais do processamento por radiação são [4, 5]:

- ***Esterilização de produtos médicos*** ⇒ Foi usada pela primeira vez em 1956, pela ETHICON INC (Johnson & Johnson) em agulhas hipodérmicas, luvas de borracha e curativos cirúrgicos, com a finalidade de eliminar microorganismos patogênicos. A dose mínima necessária para esterilizar produtos médicos é da ordem de 10-30 kGy, mas a dose real depende das exigências do órgão regulador e do nível inicial de contaminação microbiológica.
- ***Tratamento de polímeros*** ⇒ A radiação é usada para polimerização, cura de monômeros, reticulação e formação de polímeros, tomando por base diferentes monômeros para formar novos materiais com características especiais e, ainda, a degradação intencional de polímeros para propósitos comerciais e industriais. A dose varia consideravelmente com o processo e pode chegar a valores maiores que 500 kGy.
- ***Tratamento de alimentos*** ⇒ A irradiação de alimentos pode prevenir, por exemplo, o brotamento em cebolas, alhos e batatas, aumentar a validade de cogumelos, cerejas e morangos, erradicar insetos de grãos e frutas, eliminar microorganismos patogênicos de peixes e carnes e pasteurizar. O intervalo de dose é geralmente menor (0,1 - 15 kGy), dependendo do processo, ou do produto.

Outras atividades em que são aplicados os processamentos por radiação são:

- Tratamento de esgotos;
- Tratamento de resíduos industriais;
- Cura de tintas e resinas;
- Imobilização de resinas;
- Tratamento de resíduos líquidos;
- Preservação de objetos antigos de valor histórico e artístico;
- Purificação de água potável, entre outras.

Atualmente existem várias instalações de processamento por radiação espalhadas por todo o mundo, e podem ser citadas:

- *No Brasil:*

Na década de 80 foram instalados três irradiadores comerciais com fontes de ^{60}Co , a saber:

- JOHNSON & JOHNSON em São José dos Campos / SP;
- IBRAS CBO Indústrias Cirúrgicas e Ópticas S/A em Campinas / SP;
- EMBRARAD (Empresa Brasileira de Radiações Ltda) em Cotia / SP com capacidade de processamento igual a 30 mil metros cúbicos (Atividade = $2,96 \times 10^{16}$ Bq) [6, 7].

A EMBRARAD presta serviços de irradiação de diversos produtos para terceiros, enquanto que a JOHNSON & JOHNSON faz a esterilização de sua própria produção (seringas, cateteres, suturas, fraldas descartáveis e produtos médicos) e a IBRAS CBO encerrou suas atividades de irradiação em dezembro de 2001.

Recentemente novas indústrias foram instaladas:

- CBE (Companhia Brasileira de Esterilização) em Jarinu / Atibaia - SP que presta serviços de irradiação [8, 9].
A instalação conta com um irradiador do tipo universal, com capacidade anual para esterilizar 75 mil metros cúbicos de produtos. O equipamento foi desenvolvido com tecnologia 100% nacional, por pesquisadores do IPEN. A fonte radioativa utilizada é o radioisótopo ^{60}Co e o processo é relativamente simples (Atividade = $4,44 \times 10^{17}$ Bq);
- TECH ION Industrial Brasil em Manaus / AM que foi projetada para realizar irradiação de alimentos e produtos diversos [10];
- EMBRARAD onde um novo irradiador foi instalado, com capacidade de processamento de 40 mil metros cúbicos (Atividade = $2,96 \times 10^{16}$ Bq) [6].

• *No Mundo:*

Na TAB. 1.1 estão apresentados, por país, os irradiadores que estão instalados para o tratamento de alimentos.

TABELA 1.1 – Instalações de processamento por radiação no mundo.

País	Nº de Irradiadores	Tipo de Alimento
África do Sul	4	Condimentos, frutas e alimentos
Argélia	1	Batata
Argentina	1	Condimentos e espinafre
Bangladesh	1	Batata, cebola e peixe seco
Bélgica	1	Comida congelada, condimentos e vegetais desidratados
Brasil	3	Condimentos, vegetais, frutas e grãos
Canadá	1	Condimentos
Chile	1	Condimentos, vegetais, cebola, batata e aves domésticas
China	11	Condimentos, vegetais, temperos, alho, lingüiça, maça, batata, cebola, vegetais desidratados, molho, arroz e tomates
Coréia	1	Condimentos e alho
Croácia	1	Condimentos, ingredientes alimentícios e carne bovina
Cuba	1	Batata, cebola e feijão
Dinamarca	1	Condimentos
Finlândia	1	Condimentos
França	5	Condimentos, vegetais, ervas, frutas secas e camarões
Hungria	1	Condimentos, cebola e enzima
Inglaterra	1	Condimentos
Índia	2	Condimentos, vegetais e batata
Indonésia	2	Condimentos e arroz
Iran	1	Condimentos
Israel	1	Condimentos e ingredientes secos
Iugoslávia	1	Condimentos
Japão	1	Batata
México	1	Condimentos e ingredientes secos
Noruega	1	Condimentos
Peru	1	Condimentos, aditivos alimentícios e alimento animal
Polônia	3	Condimentos e ervas
República Tcheca	1	Condimentos e ingredientes secos
Tailândia	1	Condimentos, lingüiça de porco e enzimas
Ucrânia	1	Grãos
USA	10	Condimentos, aves domésticas, frutas e vegetais

Na TAB. 1.2 é apresentado o número de irradiadores gama e de elétrons instalados em todo o mundo.

TABELA 1.2 – Irradiadores gama e de elétrons instalados em todo o mundo [11].

Intervalo de energia (MeV)	Nº de instalações
Feixe de elétrons 0,1 – 0,3	250
Feixe de elétrons 0,3 – 5	600
Feixe de elétrons 5 – 15	30
Raios gama 1,25	180

As instalações de processamento por radiação devem ser comissionadas, calibradas e o processo deve ser validado, e, para isto, são usadas *técnicas dosimétricas*.

Como pode ser visto, a *dosimetria*, que trata da determinação da dose absorvida pelo material irradiado, não está somente envolvida no controle de qualidade desses processos. A dosimetria da radiação é um meio utilizado para estabelecer, regularizar, controlar e aprovar o processo e, também, aplicada em pesquisa e desenvolvimento.

Para obter qualidade alta nos processamentos por radiação a implantação de práticas dosimétricas é essencial. O estudo da dose empregada a cada material, necessária para introduzir características especiais, tornou-se prioritário em qualquer processo. Valendo-se deste conhecimento, é necessário garantir que a dose esteja num intervalo aceitável pré-estabelecido quando o material é irradiado na instalação industrial [11].

Atualmente são vários os sistemas dosimétricos conhecidos, que podem ser líquidos, sólidos ou gasosos, tais como, filmes dosimétricos, cristais orgânicos como a alanina, soluções químicas como as soluções de Fricke e cérico-cerosa, sistemas fluorescentes, óxido de nitrogênio, dióxido de carbono e vidros [12-16].

Para acompanhar o crescente desenvolvimento dos processamentos por radiação que chega a 20% ao ano, os pesquisadores da área de dosimetria precisam adequar novos dosímetros que atendam à diversidade de produtos e condições de irradiação. No Brasil,

em algumas instalações existem dificuldades como: controle de qualidade dos processamentos por radiação é inviável em razão do custo elevado dos dosímetros importados usados nos mesmos, ou número insuficiente de dosímetros colocados nos produtos que não garantem o controle da dose empregada. Na maioria dos casos, os dosímetros são importados com custo elevado, e podem ter suas características modificadas quando o transporte e a armazenagem durante o processo de importação são inadequados.

Os tipos de dosímetros que melhor se aplicam ao controle de qualidade dos processos de irradiação são os químicos e os plásticos.

Alguns novos materiais vêm sendo estudados para aplicação na dosimetria dos processos de irradiação industrial, com o objetivo de otimizar o controle de qualidade das doses empregadas nestes processos.

Entre eles, o nitrato de potássio p.a. (KNO_3) foi caracterizado anteriormente no IPEN como material dosimétrico, e pode ser utilizado no intervalo de dose de 1 a 150 kGy [17, 18].

Os trabalhos que tratam da pesquisa de misturas de nitrato com outros compostos incorporados, utilizadas como material dosimétrico, são muito escassos. No Brasil, não há trabalhos desenvolvidos utilizando o nitrato de potássio com outro composto incorporado. Na literatura internacional encontram-se alguns trabalhos utilizando misturas de nitrato de potássio e compostos como, PbO , Al_2O_3 , KCl , KBr , KI , entre outros, mas suas características dosimétricas não foram amplamente avaliadas. Os trabalhos, em sua maioria, foram desenvolvidos na Índia [19-26].

Foi citado por Patil e Chiplunkar (1991) que o primeiro a demonstrar a ocorrência da transferência de energia em um sistema heterofase foi Rabe e colaboradores (1966). Concluíram em seu trabalho que o MgO e o Al_2O_3 retardam enquanto o Pb_3O_4 e o Ti_2O aceleram a taxa de radiólise do RbNO_3 e CsNO_3 [19].

Pogge e Jones (1970) estudaram a radiólise gama do nitrato de potássio, em função da temperatura e da dose de radiação, e com a adição de outros compostos como o KNO_2 , KClO_4 e KNO_3 (enriquecido em 84 % de ^{18}O), concluíram que O_2^- e NO_2^- são formados como produto e o rendimento é independente em temperaturas entre 24 e 128°C [21].

O efeito de cátions na decomposição de vários nitratos inorgânicos foi estudado por Parwate e Garg (1984). Os autores concluíram que o rendimento da produção de nitrito depende principalmente da valência e do tamanho iônico [22].

Em 1985, Patil e Bedekar publicaram um estudo da decomposição do nitrato de potássio puro e impurificado com bário, e o efeito da adição de Al_2O_3 e PbO , no qual concluíram que o rendimento da produção de nitrito aumenta com a adição de bário, a adição de óxido de alumínio acelera a taxa de produção de nitrito, enquanto o óxido de chumbo retarda [23].

Kulkarni e Garg (1988) estudaram o efeito da adição de um cátion comum na radiólise do hidróxido de amônia, nitrato de sódio e nitrato de potássio. Os aditivos mostram efeitos de sensibilização causando decomposição extra pelo processo de transferência de energia em estado sólido [24].

O trabalho de Batra e Garg (1989) foi investigar a decomposição provocada pela radiação gama em misturas binárias em solução de KNO_3 com KCl , KBr e KI , concluíram que a adição de haletos retarda a taxa de produção de nitritos, na ordem seguinte $\text{KNO}_3 > \text{KI} > \text{KBr} > \text{KCl}$ [25].

Joshi e colaboradores (1994) estudaram o efeito do tamanho da partícula na decomposição do KI e $\text{KI} + \text{KNO}_3$ irradiado com radiação gama e analisaram usando termoluminescência e espectrofotometria [26].

Em 1999, Agrawal e Garg estudaram o efeito de diversos óxidos na decomposição radiolítica do nitrato de potássio, e constataram que a decomposição é afetada pela concentração do óxido e pela dose absorvida [27].

Outros materiais, principalmente os plásticos, também têm sido amplamente estudados para a aplicação em dosimetria dos processos de irradiação, entre eles, diferentes tipos de matrizes poliméricas, às quais são adicionados corantes específicos.

A técnica de avaliação empregada tanto para os dosímetros químicos, como dosímetros plásticos, é a espectrofotometria.

Em 1951, Day e Stein iniciaram o estudo do polimetilmetacrilato (PMMA) com a finalidade de caracterizá-lo como dosímetro no controle de qualidade dos processamentos por radiação [28]. Eles estudaram o efeito dos raios X em 32 placas de PMMA, que eram utilizadas para a confecção de artefatos diversos (botões, enfeites de cabelo, utensílios de cozinha, entre outros), porém, somente algumas placas mostraram-se promissoras para serem usadas como material dosimétrico. A placa produzida pela I.C.I (Imperial de Indústrias Químicas) denominada “*Perspex Red 400*” mostrou ser a mais promissora (depois de 1970 passou a ser denominada “*Harwell Red 4034 Perspex*”), sendo que os corantes utilizados são do tipo diazo e antraquinona. Ocorreram algumas mudanças em sua formulação na busca de qualidade melhor, sabe-se, que ocorreram três revisões até 1963, visando fornecer melhor estabilidade à luz, essas formulações foram [28-35]:

1ª - 0,093 % Corante – Índice de cor – CI nº 26105 – “Solvent Red 24”;

2ª - 0,077 % Corante – Índice de cor – CI nº 60710 – “Disperse Red 15” e

0,065 % Corante – Índice de cor – CI nº 21240 – “Solvent Yellow 30”;

3ª - 0,044 % Corante – Índice de cor – CI nº 60710 – “Disperse Red 15” e

0,160 % Corante – Índice de cor – CI nº 60505 – “Disperse Red 9”.

Após esses estudos preliminares vários pesquisadores passaram a estudar o efeito da radiação ionizante em polimetilmetacrilato incolor e colorido e em outros materiais

e avaliar seu desempenho como material dosimétrico em campos de radiação gama e em feixes de elétrons acelerados [28-57].

Dos trabalhos publicados podem ser citados, entre outros, os trabalhos realizados com o detector “Red 4034 Perspex” nos quais foram avaliadas suas características dosimétricas como influência das condições ambientais (luz, temperatura e umidade) e com a taxa de dose, variações entre os lotes, distribuição de dose, entre outras, mostrando sua aplicabilidade em dosimetria dos processos de irradiação no intervalo de dose entre 5 e 50 kGy [29-37].

As mesmas características dosimétricas citadas anteriormente também foram estudadas em outros materiais. Os materiais estudados foram plásticos diversos coloridos e incolores [38-46], vidros [47], PVC [48, 49], PMMA coloridos e incolores [50-57], entre outros. Todos os materiais apresentaram propriedades dosimétricas adequadas que permitem sua utilização no controle de qualidade dos processos de irradiação com raios gama e feixe de elétrons acelerados num amplo intervalo de dose.

O desenvolvimento e a caracterização de novos materiais dosimétricos, e sua implantação nos processos de irradiação, contribuem muito para garantir a qualidade das irradiações e adequar as instalações às exigências do mercado atual.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver dosímetros alternativos de fácil obtenção e avaliação e de custo baixo para aplicação na dosimetria dos processos industriais de irradiação, com a finalidade de substituir os dosímetros empregados no controle de qualidade rotineiro destes processos, que na sua maioria são produtos importados com custo elevado, e que, muitas vezes, inviabilizam o controle dosimétrico adequado nas instalações, prejudicando o controle de qualidade

1.1.2 Objetivos específicos

- **Desenvolver dosímetros químicos à base de nitrato de potássio p.a. (KNO_3).**

No sistema que emprega pastilhas de KNO_3 p.a, incorporar um composto radiosensível e ampliar o intervalo de dose de atuação do dosímetro, para ser usado no controle rotineiro dos processos de irradiação com raios gama.

- **Desenvolver dosímetros plásticos.**

Desenvolver e caracterizar dosímetros na forma de placas empregando materiais poliméricos e corantes radiosensíveis, que possam ser confeccionados no Brasil, e com a matéria-prima adquirida no mercado nacional, para serem usados como material dosimétrico nos processos de irradiação com raios gama e feixes de elétrons acelerados.

1.1.3 Originalidade

A originalidade deste trabalho está fundamentada nos seguintes aspectos:

- *Dosímetro à base de KNO_3* – na seleção do composto sensibilizador, na formulação das misturas e na metodologia de preparação dos dosímetros (forma de pastilhas).
- *Dosímetro à base de materiais poliméricos* – na seleção da matriz polimérica e dos corantes.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Espectroscopia

A aplicação de métodos espectroscópicos para análise qualitativa data dos trabalhos realizados por Bunsen e Kirchhoff (1859) [58]. A descoberta de que um elemento produz um espectro característico, conduz à idéia que o mesmo espectro, obtido em uma substância desconhecida, indica a presença deste elemento na mesma [58-60].

A espectrofotometria foi escolhida, neste trabalho, como técnica analítica para a determinação das mudanças nas propriedades ópticas que ocorrem quando um determinado material é exposto à radiação ionizante.

2.1.1 Espectros de absorção

Átomos excitados emitem luz de valores definidos de comprimento de onda. A dispersão desta luz por um espectrofotômetro produz um espectro que é característico do átomo ou molécula. A luz é emitida e absorvida em unidades minúsculas ou corpúsculos chamados fótons ou quanta. O átomo emite ou absorve um quanta de luz de uma determinada cor quando um dos seus elétrons salta de uma órbita para outra. A energia que é envolvida pode ser representada como a diferença em energia de dois estados eletrônicos, e pode ser indicada pela equação [58]:

$$E = E_2 - E_1 = h\nu$$

onde E_1 representa a energia total do átomo no estado eletrônico menor, e E_2 a energia total no estado eletrônico maior. Esta diferença pode ser igualada a $h\nu$, onde h é a constante de Planck e ν é a frequência da luz que é emitida [58].

Os fótons de diferentes energias são classificados em diferentes regiões. Os fótons de todas estas regiões têm a mesma natureza eletromagnética, mas por causa de suas diferentes energias eles interagem com a matéria de modo muito diferente.

O espectro eletromagnético é apresentado na TAB. 2.1.

TABELA 2.1 – Espectro eletromagnético [59,61].

Tipo	Comprimento de onda	Frequência (Hz)	Energia (eV)	Fenômeno físico que produz
Ondas de rádio	> 1 mm	$< 3 \times 10^9$	$< 10^{-5}$	Oscilações de campo elétrico
Microondas	1 mm – 25 μ m	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{12}$	$10^{-5} - 0,01$	Rotação de moléculas poliatômicas
Infravermelho	25 μ m – 2,5 μ m	$3 \times 10^{12} - 4,3 \times 10^{14}$	0,01 – 2	Rotação de pequenas moléculas, vibração molecular
Visível	750 nm* – 400 nm	$4,3 \times 10^{14} - 7,5 \times 10^{14}$	2 – 3	Transições eletrônicas de valências
Ultravioleta	400 nm – 1 nm	$7,5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{17}$	3 - 10^3	Transições eletrônicas de valências e internas
Raios X	1 nm – 1 pm*	$3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{19}$	$10^3 - 10^5$	Transições eletrônicas internas e bremsstrahlung
Raios Gama	< 1 pm	$> 3 \times 10^{19}$	$> 10^5$	Processos nucleares

* 1 nm = 10^{-9} m ; 1 pm = 10^{-12} m.

2.1.2 Leis da absorção de luz

Quando a luz (monocromática ou heterogênea) incide sobre um meio homogêneo, uma parcela da luz incidente é refletida, uma outra parcela é absorvida no meio e o restante é transmitido. Conseqüentemente, a intensidade do feixe que é medida após a passagem pela amostra (intensidade transmitida, I_T) será menor que a intensidade inicial, I_0 [59,60].

Lei de Lambert: A intensidade da luz monocromática transmitida diminui exponencialmente com a espessura do meio absorvedor. A razão I_T / I_0 é a fração da luz incidente que é transmitida por uma espessura l do meio e é chamada de transmitância (T). A absorvância (A) do meio é dada por [59,60]:

$$A = \log I_0 / I_T$$

Lei de Beer: A intensidade de um feixe de luz monocromática transmitido diminui exponencialmente com a concentração da substância absorvedora [59,60].

A equação fundamental da espectrofotometria, muitas vezes chamada de **Lei de Lambert-Beer** define a relação entre T e A , conforme a equação [59,60]:

$$A = \epsilon c l = \log (I_0 / I_T) = \log 1 / T = - \log T$$

Onde:

A = Absorvância

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

c = concentração molar ($\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$)

l = caminho óptico percorrido pela luz na amostra (cm)

2.2 Interação da radiação com a matéria

Quando elétrons, raios X e raios gama de energia alta incidem em um meio ocorrem múltiplas interações que dão origem a elétrons secundários. A transferência de energia de uma partícula ou de um fóton para os átomos do material sob efeito da radiação ocorre, sobretudo, por meio de dois mecanismos: a *excitação e a ionização*. A excitação ocorre se, como resultado da absorção de energia, um elétron é removido para um orbital mais distante do núcleo atômico; a ionização é a ejeção de um elétron do átomo, após a absorção da energia do fóton [5, 11, 62,63].

2.2.1 Radiação eletromagnética

Na interação da radiação eletromagnética com a matéria estão envolvidos vários mecanismos: A principal interação dos fótons ocorre por meio do *Efeito Compton* – espalhamento inelástico do fóton incidente, que perde parte de sua energia, com os elétrons atômicos. Os fótons são espalhados e o elétron secundário é ejetado do átomo. Tanto o fóton quanto o elétron secundário emergem em vários ângulos, cada um com energia menor do que a do fóton incidente. Este processo é predominante em fótons de energia entre 0,05 e 10 MeV em um meio de número atômico baixo, como a água. Fótons de energia baixa, perto da energia de ligação do elétron orbital, sofrem *Absorção Fotoelétrica*, toda energia do fóton incidente é transferida para o elétron e resulta na emissão de fotoelétrons por causa da ejeção de elétrons orbitais. A energia cinética do fotoelétron ejetado é igual à diferença entre a energia do fóton incidente e a energia de ligação dos elétrons. Acompanhando a emissão do fotoelétron está a emissão de raios X característico, um efeito conhecido como fluorescência atômica. Quando a energia do fóton é maior que a massa de repouso dos elétrons e pósitrons ($>1,02$ MeV) pode ocorrer a *Produção de Pares*. Esta porção (1,02 MeV) de energia do fóton é convertida em massa na forma de um elétron e um pósitron, e a energia restante aparece como a energia cinética das duas partículas. A probabilidade da produção de pares aumenta com a energia do fóton incidente e com o quadrado do número atômico do material irradiado. Depois de diminuir a velocidade o pósitron recombina com um elétron, resultando na aniquilação

das partículas, isto é, ocorre a emissão simultânea de dois fótons cada um com energia de 0,51 MeV [11, 62].

No gráfico da **FIG. 2.1** são mostradas as probabilidades de ocorrência de efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares em função da energia da radiação eletromagnética incidente e do número atômico Z do absorvedor. Para fótons de energia baixa o efeito fotoelétrico é dominante. A produção de pares pode ocorrer apenas com fótons com energia superior a 1,02 MeV (o dobro da massa de repouso do elétron) [64, 65].

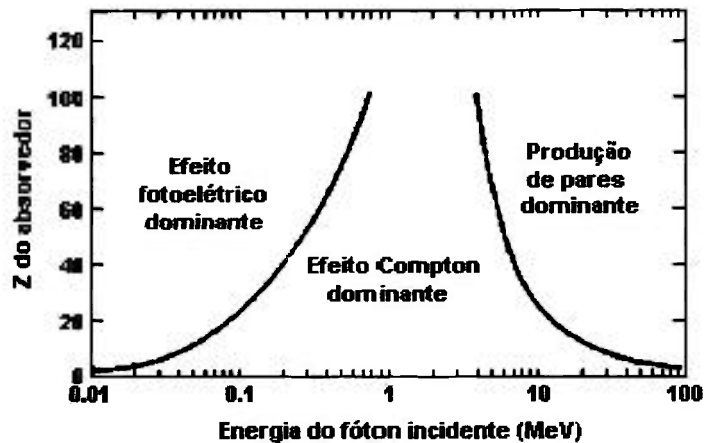


FIGURA 2.1 – Probabilidade de ocorrência de efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares em função da energia da radiação eletromagnética incidente e do número atômico Z do absorvedor [64,65].

2.2.2 Elétrons

Os elétrons interagem com a matéria não somente por colisões diretas com os elétrons orbitais dos átomos, mas também por meio de atrações e repulsões com outras partículas. Suas interações com o material irradiado produzem partículas secundárias que são normalmente elétrons de energia baixa. Estes surgem de espalhamento inelástico e processos de absorção de energia. Os elétrons secundários produzem mais elétrons ao longo do seu caminho até a energia ser finalmente dissipada por excitação molecular e processos térmicos em energias muito baixas. Elétrons de energia alta, particularmente aquelas acima de alguns milhões de elétronvolts (eV), podem produzir bremsstrahlung, que consiste de fótons emitidos pela perda de energia de elétrons rápidos quando eles têm sua velocidade diminuída ou quando são desviados na sua passagem através do campo elétrico do átomo absorvedor. O poder de freamento total do elétron no material irradiado para uma dada energia do elétron incidente é a soma da quantidade de energia perdida no processo de radiação $(dE/dx)_{rad}$ e no processo de colisão inelástica resultando em elétrons secundários $(dE/dx)_{col}$. Na maioria dos casos, a deposição de energia, como um resultado da irradiação com feixes de elétrons, é principalmente por causa da produção de elétrons secundários e o resultado da absorção daquela energia por processos secundários [11, 62].

2.3 Princípios da dosimetria da radiação

A *dosimetria da radiação* trata da determinação da dose absorvida ou da taxa de dose resultante da interação da radiação ionizante com a matéria [66].

A dosimetria, valendo-se de técnicas como espectrofotometria, termoluminescência e ressonância paramagnética eletrônica, detecta as transformações físicas e químicas provocadas pela radiação ionizante em materiais específicos denominados *dosímetros* e pode relacioná-las com a dose absorvida.

A determinação da dose, exata e reprodutível, em um processo de irradiação industrial permite uma verificação da eficiência do mesmo e pode ser usada para o controle de qualidade ou para a otimização da rotina de instalações comerciais.

2.3.1 Classificação dos dosímetros

Os dosímetros podem ser classificados com base em suas aplicações e precisão. Há quatro classes de dosímetros [4, 11, 12]:

O *dosímetro primário* permite medir diretamente a dose absorvida ou a grandeza física que pode ser associada com a dose absorvida, sem necessitar da calibração em um feixe de radiação conhecida. Este tipo de dosímetro é normalmente mantido e operado por um laboratório de padronização primária.

Exemplos: câmara de ionização e calorímetros.

O *dosímetro de referência ou padrão secundário* é definido como um dosímetro de alta qualidade metrológica que foi calibrado contra dosímetros padrão primário e que pode ser usado como um padrão de referência para calibrar outros dosímetros.

Exemplos: dosímetros sulfato ferroso (Fricke), cérico-ceroso, dicromato e alanina.

O *dosímetro de transferência* é definido como um dosímetro que é suficientemente preciso e estável, que pode ser calibrado contra um padrão de referência. É usado para transferir informações da dose de um laboratório de calibração credenciado ou de um laboratório padrão secundário para uma instalação de irradiação.

Exemplo: alanina.

O *dosímetro de rotina* é um padrão de trabalho que pode ser calibrado contra um dosímetro de referência ou de transferência.

Exemplo: filmes radiocrômicos (CTA, PMMA).

Laboratórios padrão primário – Desenvolvem padrões (dosímetros) primários, tais como, calorímetros e câmaras de ionização, entre outros destacam-se:

- UK National Physical Laboratory – **NPL** [3];
- US National Institute of Standards and Technology – **NIST** [67];
- Research and Isotopes Agency's Laboratories Seibersdorf - Agência Internacional de Energia Atômica – **IAEA** [68].

2.3.2 Calibração dos dosímetros

Calibrar um dosímetro é obter a relação entre a dose absorvida e o efeito induzido pela radiação no mesmo. Para fazer a calibração utilizam-se instalações de irradiação, cuja taxa de dose é determinada e certificada por laboratórios padrão. Os dosímetros devem ser irradiados com diferentes doses conhecidas e avaliados, para determinar o intervalo de dose útil. Os requisitos a seguir são também necessários: a) a dose absorvida deve ser especificada na calibração em função da dose absorvida na água, ou em outro meio material apropriado; b) a localização do dosímetro na fonte de radiação de calibração deve ser reproduzível; c) quando utilizar fontes de radiação gama o dosímetro deve ser envolvido com quantidade de material que assegure as condições de equilíbrio eletrônico; d) o campo de calibração dentro do volume ocupado pelo dosímetro deve ser mantido o mais uniforme possível e e) as condições ambientais devem ser controladas. A calibração deve ser realizada para cada lote produzido e o lote deve ser testado periodicamente para certificar que não ocorreram alterações de suas características [11, 69-71].

2.3.3 Seleção do sistema dosimétrico

Um sistema dosimétrico, para ser adequado para um controle rotineiro nas irradiações industriais, deve apresentar algumas características, a saber [11, 66, 69, 72].

- Resposta independente da energia da radiação incidente e do ângulo de incidência da radiação;
- Característica de absorção equivalente ao produto que vai ser irradiado;
- Estabilidade da resposta antes e depois da irradiação;
- Resposta independente das condições ambientais;
- Dose mínima $> [(\bar{k}_0 \pm 3\sigma) \cdot f_{\text{cal}}]$, onde $\bar{k}_0 = \text{absorvância específica (não irradiado)}$, $f_{\text{cal}} = \text{fator de calibração do lote}$ e $\sigma = \text{desvio padrão}$;
- Independência da resposta com a taxa de dose;
- Reprodutibilidade e exatidão;
- Simplicidade de preparo e facilidade de uso.

2.3.4 Dosímetros Químicos

Na dosimetria química, a dose absorvida é determinada por meio da mudança química que ocorre em um material irradiado, que pode ser líquido, sólido ou gasoso [62, 66].

A dosimetria é facilitada quando o dosímetro empregado e a espécie estudada têm aproximadamente a mesma densidade e composição atômica; os dosímetros químicos oferecem estas condições [11, 72].

O dosímetro de Fricke, que foi desenvolvido em 1927, e que se fundamenta na oxidação de uma solução de sulfato ferroso é um dosímetro amplamente aceito e utilizado em aplicações práticas de dosimetria da radiação ionizante [72, 73].

Uma variedade de outros dosímetros químicos é citada por vários autores – *dosímetros sólidos*: filmes radiocrômicos, sistemas com corantes orgânicos, filmes fotográficos, entre outros; *dosímetros líquidos*: solução cérico-cerosa, solução ferroso-céfrica, sulfato cérico, entre outros; *dosímetros gasosos*: óxido de nitrogênio, dióxido de carbono, entre outros. [12-14].

Todos os efeitos produzidos em um dosímetro químico exposto à radiação ionizante são causados por elétrons rápidos, provenientes, diretamente, de um acelerador de elétrons ou indiretamente como fotoelétrons ou elétrons Compton originados pela interação dos raios X ou da radiação gama com o material. Quando o elétron de energia alta passa através do material, ele perde energia gradualmente pela interação com elétrons e átomos do material absorvedor. As moléculas excitadas ejetam elétrons secundários que são normalmente bastante energéticos e causam mais excitações e ionizações, estes processos eventualmente levam a reações químicas [62].

2.3.5 Efeitos das condições ambientais

O desempenho da maioria dos dosímetros usados rotineiramente em processos de irradiação industrial depende de sua estabilidade com relação às variações das condições ambientais, tais como, umidade relativa, temperatura e luz.

Estas condições podem apresentar diferenças entre o momento da calibração do dosímetro e o momento da irradiação; se o dosímetro for sensível à mudanças dos fatores ambientais, é necessário prever seu comportamento para, se necessário, corrigir os desvios da resposta [12].

2.3.5.1 Temperatura

A temperatura é o fator ambiental mais importante que pode causar erros na determinação da dose. A dependência da resposta do dosímetro varia de uma relação linear com a temperatura a relações mais complicadas, no caso em que a resposta não é completamente estável [12].

Variações de temperatura depois da irradiação podem ser controladas diminuindo o tempo entre a irradiação e a leitura do dosímetro.

2.3.5.2 Umidade relativa (U.R.)

Muitos materiais usados como dosímetros são higroscópicos, então o efeito da umidade na resposta dos dosímetros precisa ser estudado. O efeito da umidade pode levar a incertezas na determinação da dose. Para evitar este problema é necessário proteger o dosímetro das mudanças da umidade relativa, embalando-o em materiais adequados.

O ar em equilíbrio com água pura fica saturado com vapor de água, assim a umidade relativa U.R é considerada U.R = 100 %. As soluções saturadas de sal são usadas para produzir umidade relativa conhecida, algumas soluções e seus respectivos valores de U.R. são apresentados na TAB. 2.2. A condição de U.R. = 0 % é obtida em um recipiente contendo sílica gel.

TABELA 2.2 – Umidade Relativa de soluções saturadas [74].

Compostos	Umidade Relativa (U.R.) % 20 °C
MgCl ₂ .6H ₂ O	33,6
Na ₂ Cr ₂ O ₇ .2H ₂ O	55,2
NaCl	75,5
Na ₂ CO ₃	93,0
KNO ₃	93,2

2.3.5.3 Luz

Alguns dosímetros são sensíveis à luz e precisam ser protegidos antes, durante e após a irradiação quando expostos. Alguns são fotossensíveis somente após a irradiação. Um estudo rigoroso da influência deste fator deve ser feito para que medidas possam ser tomadas a fim de minimizar estes efeitos [12].

2.3.6 Dose absorvida

Os diferentes tipos de sistemas dosimétricos têm a propriedade de serem mais ou menos adequados para a medida de dois parâmetros de interesse para o uso da radiação [62]:

- 1- A dose absorvida em um ponto particular no material de interesse (ou taxa em que a dose é absorvida em um ponto particular em dadas condições de irradiação);
- 2- A distribuição da dose em uma amostra.

A determinação prática da dose absorvida envolve a introdução de um elemento detector que responda à radiação ionizante no campo de radiação num ponto de interesse. É importante que o dosímetro simule o objeto a ser irradiado em número atômico efetivo ou que o efeito do espalhamento da radiação pela introdução do dosímetro no campo de radiação, seja conhecido [62].

Quando o dosímetro é colocado no meio durante o processo de irradiação constitui uma descontinuidade ou uma cavidade no meio, uma vez que o dosímetro difere normalmente do meio em número atômico e densidade. A energia absorvida no dosímetro não é a mesma que a absorvida pelo meio. A resposta do detector depende da energia depositada por unidade de massa que é definida como *dose absorvida*. É medida em unidades de 100 ergs (0,01 Gy) por grama de matéria irradiada. Para a determinação da dose no meio de interesse, é necessário o cálculo por meio do uso dos coeficientes de atenuação de massa (μ / ρ) do meio [12].

Para medir a dose absorvida ou a taxa de dose no material procede-se da maneira seguinte: A fonte de referência é calibrada por meio de um padrão primário (calorímetro de grafite) ou por métodos de referência padronizados (dosímetro Fricke) e o sinal do dosímetro é então convertido para dose absorvida ou taxa de dose na água baseado na teoria da cavidade. A fonte de referência é usada para irradiar o dosímetro de rotina em condições idênticas. O dosímetro é então exposto junto com o produto na instalação

de irradiação. Caso estas condições sejam diferentes devem ser feitas correções para converter o sinal do dosímetro de rotina no produto ou na água.

2.4 Fontes de radiação

As principais fontes de radiação usadas nos processos de irradiação em aplicações industriais são a radiação gama de radionuclídeos como o ^{60}Co e o ^{137}Cs , feixes de elétrons de energia alta num intervalo de energia de 0,2 a 10 MeV e fontes de raios X (ANEXOS 1 e 2). Em razão de sua grande capacidade de penetração, raios X e gama podem ser usados no processamento de um grande número de produtos com várias espessuras e densidades. Para situações em que são processados materiais que necessitam de uma penetração menor, feixes de elétrons de energia alta podem fornecer um processamento com custo menor por unidade de produto quando estão envolvidas grandes quantidades de produtos. [11, 12, 61].

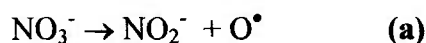
O ^{60}Co é a fonte de radiação mais empregada e conveniente para o processamento industrial por radiação. O ^{60}Co emite dois raios gama com energias de 1,17 e 1,33 MeV, e sua meia vida é de 5,27 anos. É preparado na forma de pequenas pastilhas que são colocadas dentro de tubos de aço inoxidável ou liga de zircônio. Este tubo é selado em uma cápsula de aço inoxidável para maior segurança [12].

2.5 Nitrato de Potássio

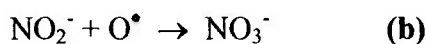
O estudo da radiólise de nitratos sólidos, conforme exposto por Khare e colaboradores, teve início antes de 1914, quando Baudrish mostrou que o NaNO_3 quando era exposto à luz UV produzia O_2 [75].

O processo primário na decomposição radiolítica dos nitratos é a dissociação unimolecular de uma espécie NO_3 produzindo NO_2^- e O^\bullet . A sensível variação tem sido atribuída: A) à diferença do poder de polarização dos cátions; B) à competição entre íons nitrato e átomos de oxigênio para os fragmentos de oxigênio produzidos e C) às diferenças na densidade de empacotamento da estrutura do cristal [76].

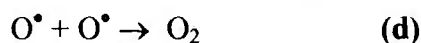
O primeiro passo na decomposição dos nitratos inorgânicos tem sido postulado como [77]:



Os fragmentos de oxigênio produzidos em (a) reagem como:



Possivelmente ocorre também a reação a seguir:



A decomposição radiolítica de nitratos inorgânicos é afetada por muitos fatores, tais como, a natureza e tamanho do cátion, a água de cristalização, a dose absorvida e a natureza e concentração do aditivo. Foi sugerido que, o aumento ou diminuição, da decomposição radiolítica dos nitratos podem ser relacionados com a natureza dos compostos, se doador ou receptor de elétrons, a introdução de um composto que age como doador de elétrons acelera a radiólise e um receptor retarda a radiólise [19, 20].

2.6 Polimetilmetacrilato (PMMA)

A técnica de fabricação é o processo pelo qual as unidades básicas, os monômeros, são reunidos (polimerização). Este mecanismo foi melhor explicado, em 1954, por Karl Zieger e Giulio Natta. Há dois tipos de polimerização: a polimerização por adição e a polimerização por condensação. Na polimerização por adição, também chamada de poliadição, não há formação de subprodutos de massa molecular baixa. Neste caso o polímero é o único produto resultante. Como nas reações de adição, os reagentes se somam e não há perda de matéria, todos os átomos das moléculas do monômero estão na molécula do polímero. Portanto, monômero e polímero têm a mesma composição centesimal e igual fórmula mínima, e a massa molecular do polímero é múltiplo inteiro da massa molecular do monômero. No polímero por condensação isso não ocorre, por causa da formação de subprodutos durante o processo de polimerização. A polimerização por adição forma cadeias articuladas, com vários graus de ramificação. Isso normalmente conduz a materiais flexíveis, com a rigidez aumentando com o comprimento das cadeias e a quantidade de ramificações. Também produz, geralmente, propriedades "termoplásticas", permitindo que o material seja amolecido sob aquecimento. Os materiais característicos são o *cloreto de polivinila* (PVC) e o *polimetilmetacrilato* (PMMA ou acrílico), na FIG. 2.2 são mostradas as reações envolvidas na polimerização do metil metacrilato [78].

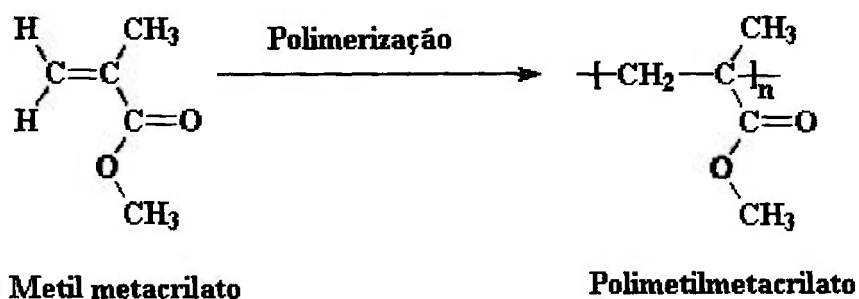


FIGURA 2.2 – Reação de polimerização do metil metacrilato [78].

Os polímeros são materiais orgânicos que consistem de átomos de carbono e hidrogênio, ligados por ligações covalentes que são facilmente rompidas, ou novas ligações podem ser formadas, pela ação da energia da radiação. Entre as mudanças induzidas pela radiação nos polímeros podem ser citadas [65].

- Mudanças na aparência – são causadas de efeitos de cor temporários ou permanentes;
- Mudanças químicas – incluem formação de dupla ligação, reticulação, degradação oxidativa e polimerização;
- Mudanças físicas – envolvem viscosidade, solubilidade e condutividade;
- Mudanças nas propriedades mecânicas – tensão, módulo, dureza, alongamento e flexibilidade.

O PMMA colorido, isto é, com corantes específicos adicionados, começou a ser usado como dosímetro a partir de 1951 depois das pesquisas de Day e Stein, como apresentado no item 1.

O efeito da radiação nos corantes, normalmente, é a mudança ou a perda da cor e depende da concentração do corante na composição. Mudanças em nível molecular incluem distúrbio da estrutura e ligações químicas, resultando em discreta banda de absorção em plásticos, vidros e materiais coloridos. Mudanças na cor ou densidade óptica em filmes podem ou não ser visíveis, isto é, a mais estável e intensa redução ou indução da banda de absorção pode ser no ultravioleta. Novas bandas ou mudanças na posição das bandas são freqüentes por causa dos contaminantes [62].

No **APÊNDICE A** são apresentadas as características de alguns dos dosímetros plásticos comercialmente disponíveis.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Equipamentos utilizados

3.1.1 Preparação das pastilhas e soluções

Balança Analítica Mettler, Modelo H-35

Prensa hidráulica Fred Frey

Tri-destilador MA-079 Marconi

Estufa de secagem e esterilização Fanen[®] Modelo 315 SE

3.1.2 Preparação dos detectores

Seladora Matsumoto / Haramura – H-mini

Micrômetro de bancada Peacock

3.1.3 Fontes de radiação

Acelerador de elétrons Modelo JOB 188 marca Dynamitron – Radiation Dynamics, INC (RDI) pertencente ao Centro de Tecnologia das Radiações CTR / IPEN que apresenta as características seguintes: *Energia* - 0,5 a 1,5 MeV; *Corrente* - 0,3 a 25,0 mA; *Potência* - 0,5 a 37,5 kW; *Varredura do feixe* – 60 a 120 cm e *Taxa de dose* - 1,0 a 301,4 kGy/s (ANEXO 1).

Fonte ⁶⁰Co Gammacell 220 pertencente ao Centro de Tecnologia das Radiações CTR/IPEN que possui as características seguintes:

- Fonte tipo Câmara com 3,6 L de capacidade útil, apresenta formato cilíndrico com 26 lápis dispostos simetricamente, cada lápis contém 7 pastilhas de ⁶⁰Co. A atividade da fonte em janeiro/2003 era de $22,9 \times 10^{13}$ Bq e a taxa de dose igual a 5,78 kGy/h, determinada por dosimetria Fricke¹ (ANEXO 2).

¹ O dosímetro de Fricke foi empregado para calibrar a fonte de ⁶⁰Co segundo o programa de certificação da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA).

3.1.4 Medidas espectrofotométricas

O espectrofotômetro utilizado é da Marca Shimadzu, Modelo UV-2101PC e as suas características são apresentadas na **TAB. 3.1**.

TABELA 3.1 – Características do Espectrofotômetro Shimadzu UV-2101PC [79].

Descrição	Parâmetros
Intervalo de comprimento de onda	190 ~ 900 nm
Fonte luminosa	tungstênio WI , deutério D2
Sistema fotométrico	feixe duplo
Largura da fenda	0,1 ~ 5,0 nm
Intervalo fotométrico	Abs -9,999 ~ 9,999
	T% -999,9 ~ 999,9
Velocidade de varredura	1600 nm/min (rápido e intervalo de 2 nm)
	menor que 4 nm/min (muito lento
	intervalo de 0,05 nm)
Precisão	0,1 nm

O sistema fotométrico é mostrado na **FIG 3.1**. A luz emitida pela fonte de luz (lâmpada de deutério, D2 ou lâmpada de halogênio, WI) é refletida pelos espelhos M1 e M2 e projetada sobre o monocromador. A fonte de luz é trocada automaticamente dependendo do comprimento de onda utilizado. Todos os elementos ópticos, exceto as fontes de luz, são hermeticamente selados da atmosfera por janelas W, para manter livre da presença de poeira. A largura da fenda pode variar entre 0,1 e 5 nm. O monocromador é composto de S1 (fenda de entrada), M3 (espelho), G (grade de difração), M4 (espelho) e S2 (fenda de saída). Os desvios que possam ocorrer são minimizados pelos espelhos M3 e M4 que estão arranjados simetricamente. O feixe que passa através do monocromador é dividido em feixe de amostra e feixe de referência pelo meio

do espelho M6 e modulado em 50 Hz (ou 60 Hz) pelo cortador (CH). Após passar através da célula da amostra e pela célula de referência, os dois feixes são detectados pela fotomultiplicadora (PM). O sistema está acoplado a um microcomputador que converte o sinal, obtendo os valores de transmitância ou absorvância conforme os parâmetros previamente configurados [79].

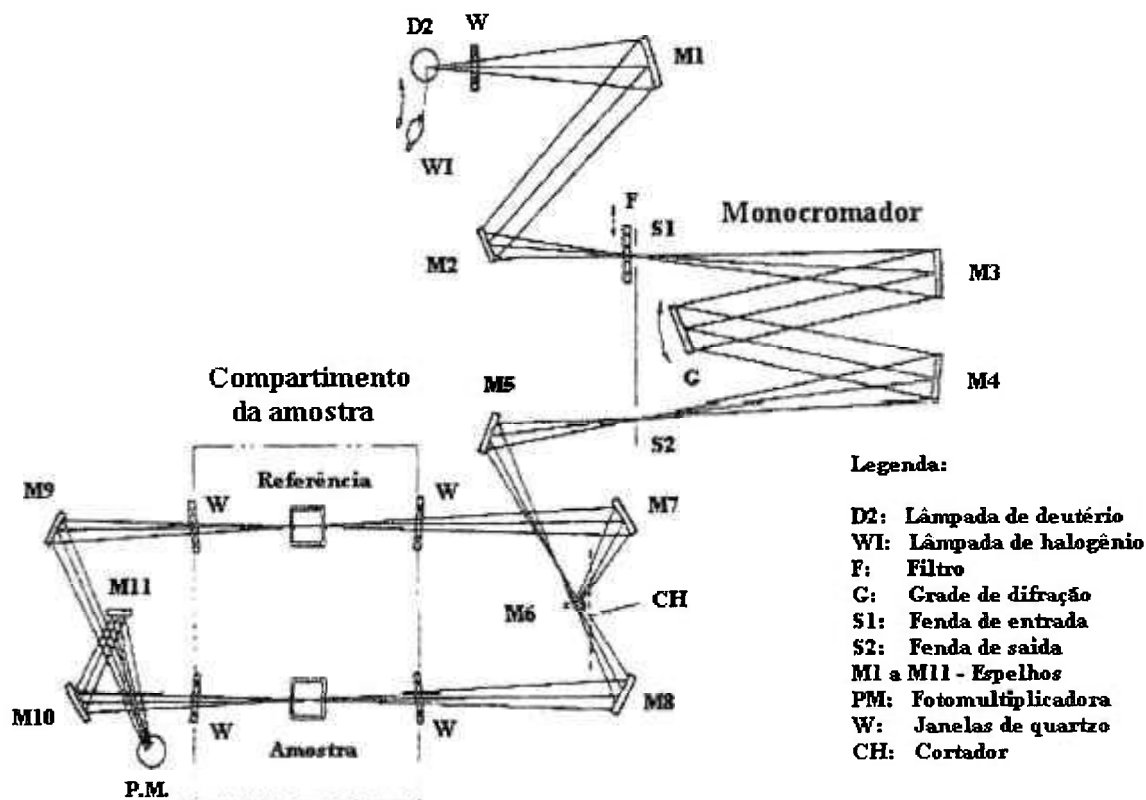


FIGURA 3.1 – Esquema óptico do espectrofotômetro Shimadzu UV-2101PC [79].

3.2 Procedimentos experimentais

3.2.1 Nitrato de potássio

3.2.1.1 Reagentes utilizados

Todos os reagentes são da marca Merck e de grau analítico.

- Nitrato de Potássio – KNO_3 ;
- Dióxido de Manganês – MnO_2 ;
- Nitrato de Bário – $Ba(NO_3)_2$;
- Brometo de Potássio – KBr ;
- Ácido Acético Glacial – CH_3COOH ;
- Sulfanilamida – $C_6H_8N_2O_2S$;
- Diidrocloreto de N – (1-Naftil) etilenodiamina – $C_{12}H_{16}Cl_2N_2$.

3.2.1.2 Preparação das pastilhas

O KNO_3 adquirido na forma de pó recebeu tratamento térmico em estufa por 2 horas à temperatura de $80^\circ C$, com a finalidade de eliminar a umidade presente.

As misturas $KNO_3 + MnO_2$; $KNO_3 + Ba(NO_3)_2$ e $KNO_3 + KBr$ foram preparadas com diferentes concentrações dos componentes e diferentes massas. O KNO_3 e os compostos foram pesados separadamente, misturados em almofariz até a completa homogeneização nas proporções apresentadas na **TAB. 3.2**, e foi realizada uma padronização granulométrica em peneira malha 80 ABNT (abertura da tela = 0,177 mm). A mistura foi prensada a frio na forma de pastilhas com diâmetro de 6 mm, utilizando molde de aço inoxidável mostrado na **FIG 3.2**. A espessura das pastilhas variou entre 0,3 e 1,0 mm, de acordo com a massa total. Na prensa Fred Frey podem ser posicionados três moldes para cada prensagem, em cada molde são confeccionadas três pastilhas, por conseguinte, foram prensadas 9 pastilhas de cada vez, com pressão aplicada de 5 toneladas. As pastilhas foram seladas em folhas de polietileno e armazenadas em dessecador até o momento da utilização para evitar a absorção de umidade ambiente.

TABELA 3.2 – Composições utilizadas para preparação das pastilhas de KNO_3 .

Misturas	KNO_3 (mg)	MnO_2 (mg)	KBr (mg)	$\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ (mg)
I	20 (100%)			
II	25 (100%)			
III	30 (100%)			
IV	50 (100%)			
V	20 (40%)	30 (60%)		
VI	25 (50%)	25 (50%)		
VII	30 (60%)	20 (40%)		
VIII	50 (70%)	21,4 (30%)		
IX	50 (80%)	12,5 (20%)		
X	50 (90%)	5,55 (10%)		
XI	20 (40%)		30 (60%)	
XII	25 (50%)		25 (50%)	
XIII	30 (60%)		20 (40%)	
XIV	20 (40%)			30 (60%)
XV	25 (50%)			25 (50%)
XVI	30 (60%)			20 (40%)

**FIGURA 3.2** – Molde fabricado em aço inoxidável para prensagem de pastilhas.

3.2.1.3 Preparação do dosímetro para irradiação

O dosímetro foi montado na forma seguinte: duas placas de PMMA de 3 mm de espessura garantem as condições de equilíbrio eletrônico, entre estas duas placas há uma placa central, cuja espessura varia de acordo com a espessura da pastilha, com três furos onde é posicionado o material dosimétrico (pastilhas). Este arranjo foi selado, e colocado sobre um suporte, para permitir o seu posicionamento na fonte de radiação, e, para ser irradiado.

3.2.1.4 Análises espectrofotométricas

Para as medidas de absorvância, tanto do material irradiado, como do não irradiado, utiliza-se o método de Shinn modificado.

O método de Shinn modificado descreve os procedimentos gerais para a determinação dos nitritos. Usualmente são fundamentados em alguma reação de diazotação. O íon nitrito provoca a diazotação da sulfanilamida e o produto é acoplado ao diidrocloreto de N – (1-Naftil) etilenodiamina conferindo cor à solução, a intensidade da cor depende da concentração de íons nitrito presentes, e o método é descrito a seguir [59, 80-83]:

- Dissolver a pastilha do material dosimétrico (KNO_3) em 50 mL de água tri-destilada, em balão volumétrico de 100 mL;
Filtrar a solução obtida pela dissolução da pastilha contendo $\text{KNO}_3 + \text{MnO}_2$ através de um filtro de papel, com a finalidade de separar o MnO_2 insolúvel.
- Adicionar 20 mL de solução corante indicadora da presença de nitrito, preparação descrita abaixo;
- Aguardar 10 minutos, necessários para a estabilização da solução e proceder a leitura no espectrofotômetro.

Método de preparação da solução corante:

Solução A: Dissolver 2 g de Sulfanilamida em 1 L de solução 30% de Ácido Acético Glacial.

Solução B: Dissolver 1 g de Diidrocloreto de N – (1-Naftil) etilenodiamina em 1 L de solução 30% de Ácido Acético Glacial.

Utilização da solução corante:

No momento de preparar a solução para a medida espectrofotométrica, misturar as soluções corantes **A e B** na proporção 5:1, respectivamente.

As soluções **A e B** devem ser armazenadas em local abrigado da luz e sob temperaturas baixas (aproximadamente 8°C); nestas condições podem ser conservadas por até 3 meses.

A absorção óptica das soluções é medida no espectrofotômetro Shimadzu UV-2101PC.

3.2.2 Detectores Radiocrômicos

3.2.2.1 Preparação das placas de Polimetilmetacrilato²

➤ **Materiais utilizados:**

- **Monômero** - *Metil Metacrilato* - TOP – 20 (o inibidor de polimerização – topanol – presente é eliminado por evaporação);
- **Plastificante** - *Dibutilftalato* - DBP;
- **Catalisador** - *Vazo 6H - 2,2'* azobis (2 metil propano nitrila) - Cas nº 78671 – Dupont;
- **Inibidor de luz UV** - *Tinuvin[®] P* – 2-(2H-benzotriazol-2-yl)-p-cresol – Ciba – aumenta o grau de fotoestabilidade quando exposto à luz por longos períodos [84];
- **Clareador óptico** – *Uvitex[®] OB* – 2,5-tiofenodiybis (5-tert-butil-1,3 benzoxazol) – Ciba – realça a brancura em substratos e em combinação com corantes produz tonalidades luminosas [84];

Corantes - linha *Macrolex[®]* - Bayer - Os corantes empregados são orgânicos, de uso indicado para o PMMA, apresentam excelentes características de coloração e são listados abaixo. Os diferentes corantes escolhidos foram cedidos pela indústria *Bayer S.A* [85].

- Macrolex Yellow 3G Gran;
- Macrolex Yellow 4G Gran;
- Macrolex Red G Gran;
- Macrolex Red H;
- Macrolex Red 5B;
- Macrolex Blue RR;
- Macrolex Green 5B;
- Macrolex Green G.

² As placas foram confeccionadas pela Indústria *TC Acrílicos Ltda*, indústria nacional fundada há mais de 30 anos, cujo processo de fabricação de placas de PMMA está estabelecido. A formulação utilizada é de propriedade da indústria.

➤ **Formulações do PMMA**

Para a obtenção do PMMA colorido, é necessário a preparação de 2 misturas, que são as seguintes:

▪ **Mistura A – Preparação do PMMA**

O peso total da mistura A é de 190 kg. Proporções adequadas do monômero, do plastificante, do catalisador, do inibidor de UV e do clareador óptico são previamente preparadas para compor a mistura.

▪ **Mistura B – Preparação da solução corante**

O corante é preparado dissolvendo-o no monômero líquido na proporção de 1:100. A quantidade da mistura B utilizada na mistura A depende da espessura das placas que se deseja produzir. *Ex.*: Para placas com espessura de 2,4 mm utiliza-se 0,5 g por quilo da mistura A.

➤ **Procedimento de preparação do PMMA:**

O monômero é processado em um reator, com a finalidade de se obter viscosidade conveniente para o manuseio, deste modo, a contração e a evolução do calor durante a polimerização são reduzidas. No processo que tem duração aproximada de 1:30 horas, a temperatura é elevada gradativamente até atingir 100°C. Após o resfriamento do monômero são adicionados os outros componentes da mistura A. Quando se pretende fabricar placas coloridas, o corante previamente preparado (mistura B) é incorporado nesta etapa do processo [13, 38].

As placas de PMMA são moldadas em células feitas de platôs de vidro temperado, com espessura de 10 mm, separados por gaxetas de PVC que determinam a espessura da placa de polimetilmetacrilato (Processo Casting).

Os moldes são colocados em autoclaves preenchidas com água, e uma temperatura de 100°C é necessária para que ocorra o processo de polimerização. O tempo de processamento na autoclave depende da espessura das placas. A polimerização total ocorre entre 24 a 48 horas após as placas serem retiradas da autoclave.

As placas de PMMA são facilmente removidas pela separação dos platôs de vidro, depois de resfriadas são recobertas com filme adesivo para proteger a superfície de arranhões.

Foram confeccionadas placas de PMMA com as dimensões de: 120 cm x 60 cm e espessuras entre 2,1 e 2,5 mm, utilizando-se os corantes descritos anteriormente. Cada placa foi considerada como sendo um lote produzido.

3.2.2.2 Características dos detectores de PMMA desenvolvidos neste trabalho

I – Material: *PMMA - Corante Macrolex® Amarelo 3G*

- TC-Acrílicos (corante – Bayer)
- Corante: Amarelo 3G - Bayer [86].
 - Índice de cor CI: solvente yellow 93;
 - N° CI: 48160;
 - Cas: 4702-90-3;
 - Classe genérica: Pirazolona;
 - Nome químico: não especificado;
 - Fórmula molecular: $C_{21}H_{18}N_4O_2$;
 - Fórmula estrutural: não especificada;
 - Massa molecular: não especificada;
 - Densidade: $1,32 \text{ g.cm}^{-3}$;
 - Ponto de fusão: 181°C .
- Dimensões: 1 cm x 3 cm; espessura - 2,4 mm;
- Embalagem Inapel®: Polietileno/ papel / alumínio.

II – Material: *PMMA – Corante Macrolex® Amarelo 4G*

- TC-Acrílicos (corante – Bayer)
- Corante: Amarelo 4G – Bayer
 - Índice de cor CI: disperse yellow 241;
 - N° CI: não especificado;
 - Cas: não especificado;
 - Classe genérica: Azo;
 - Nome químico: não especificado;
 - Fórmula molecular: não especificada ;
 - Fórmula estrutural: não especificada;
 - Massa molecular: não especificada;
 - Densidade: $1,55 \text{ g.cm}^{-3}$;
 - Ponto de fusão: 254°C .
- Dimensões: 1 cm x 3 cm; espessura - 2,4 mm;
- Embalagem Inapel®: Polietileno/ papel / alumínio.

III – Material: *PMMA* – Corante *Macrolex*[®] *Azul RR*

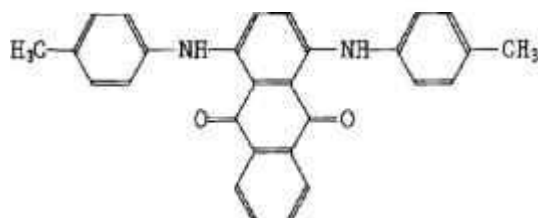
- TC-Acrílicos
- Corante: Azul RR – Bayer [86].
 - Índice de cor CI: solvente blue 97;
 - N° CI: não especificado;
 - Cas: 61969-44-6;
 - Classe genérica: Antraquinona;
 - Nome químico: não especificado;
 - Fórmula molecular: não especificada;
 - Fórmula estrutural: não especificada;
 - Massa molecular: não especificada;
 - Densidade: 1,18 g.cm⁻³;
 - Ponto de fusão: 200°C.
- Dimensões: 1 cm x 3 cm; espessura - 2,5 mm;
- Embalagem Inapel[®]: Polietileno/ papel / alumínio.

IV – Material: *PMMA* – Corante *Macrolex*[®] *Verde G*

- TC-Acrílicos (corante – Bayer)
- Corante: Verde G – Bayer
 - Índice de cor CI: solvente green 28;
 - N° CI: não especificado;
 - Cas: 71839-01-5;
 - Classe genérica: Antraquinona;
 - Nome químico: não especificado;
 - Fórmula molecular: C₃₄H₃₄N₂O₄;
 - Fórmula estrutural: não especificada;
 - Massa molecular: não especificada;
 - Densidade: 1,17 g.cm⁻³;
 - Ponto de fusão: 245°C
- Dimensões: 1 cm x 3 cm; espessura - 2,5 mm;
- Embalagem Inapel[®]: Polietileno/ papel / alumínio.

V – Material: **PMMA – Corante Macrollex® Verde 5B**

- TC-Acrílicos (corante – Bayer)
- Corante: Verde 5B - Bayer [87].
 - Quinizarina green ss – green n° 202
 - Índice de cor CI: solvente green 3;
 - N° CI: 61565;
 - Cas:128-80-3;
 - Classe genérica: Antraquinona;
 - Nome químico: UIPAC - 1,4-Bis (p-toulidino) antraquinona;
 - Cas 9,10-antracenediona,1,4-bis[(4-metilfenil)amino];
 - (1,4-bis[(4-metilfenil)amino]antraquinona);
 - Fórmula molecular: $C_{28}H_{22}N_2O_2$;
 - Fórmula estrutural:



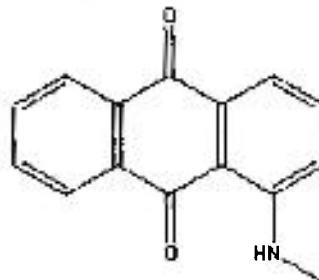
- Massa molecular: 446,46 g/mol;
- Densidade: $1,35 \text{ g.cm}^{-3}$;
- Ponto de fusão: 213°C .
- Dimensões: 1 cm x 3 cm; espessura - 2,4 mm;
- Embalagem Inapel®: Polietileno/ papel / alumínio.

VI – Material: *PMMA* – Corante *Macrolex[®] vermelho H*

- TC-Acrílicos
- Corante: Vermelho H - Bayer
 - Índice de cor CI: não especificado;
 - N° CI: não especificado;
 - Cas: não especificado;
 - Classe genérica: Azo;
 - Nome químico: não especificado;
 - Fórmula molecular: não especificada;
 - Fórmula estrutural: não especificada;
 - Massa molecular: não especificada;
 - Densidade: 1,20 g.cm⁻³;
 - Ponto de fusão: 175°C.
- Dimensões: 1 cm x 3 cm; espessura - 2,1 mm;
- Embalagem Inapel[®]: Polietileno/ papel / alumínio.

VII – Material: **PMMA – Corante Macrolex® Vermelho G**

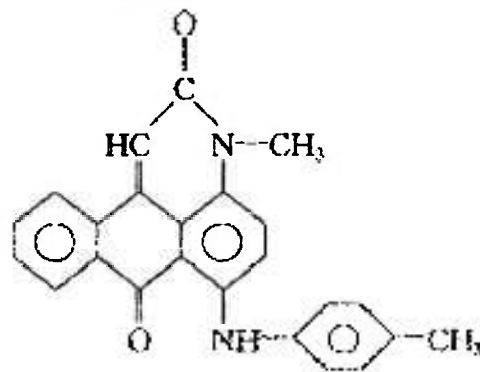
- TC-Acrílicos
- Corante: Vermelho G - Bayer [87].
 - Índice de cor CI: solvante red 111;
 - N° CI: 60505;
 - Cas: 82-38-2;
 - Classe genérica: Antraquinona;
 - Nome químico: 1-N-metilamino-9-10 antraquinona
1-(metilamino)9-10 antracenediona
(1-(metilamino)-antraquinona)
 - Fórmula molecular: $C_{15}H_{11}NO_2$;
 - Fórmula estrutural:



- Massa molecular: 237,3 g/mol;
- Densidade: 1,43 g.cm⁻³;
- Ponto de fusão: 170°C.
- Dimensões: 1 cm x 3 cm; espessura - 2,4 mm;
- Embalagem Inapel®: Polietileno/ papel / alumínio.

VIII - Material: **PMMA – Corante Macrolex® Vermelho 5B**

- TC-Acrílicos
- Corante: Vermelho 5B – Bayer [87].
 - Índice de cor CI: solvente red 52;
 - N° CI: 68210;
 - Cas: 81-39-0;
 - Classe genérica: Antraquinona;
 - Nome químico: (3-metil-6-[(4-metilfenil)amino]-dibenz(f,i,j)isoquinolin-2,7-dion);
 - Fórmula molecular: $C_{24}H_{18}N_2O_2$;
 - Fórmula estrutural:



- Massa molecular: 352 g/mol;
- Densidade: 1,37 g.cm⁻³;
- Ponto de fusão: 280°C.
- Dimensões: 1 cm x 3 cm; espessura - 2,4 mm;
- Embalagem Inapel®: Polietileno/ papel / alumínio.

3.2.2.3 Preparação dos detectores de PMMA

As placas foram cortadas em pequenos pedaços com dimensões de 1 cm x 3 cm, de modo a se ajustarem convenientemente no porta-amostra do espectrofotômetro. Foram selecionadas, ao acaso, as amostras a serem utilizadas nos testes de desempenho do material. Cada amostra foi identificada e selada entre filmes de alumínio/papel/polietileno³ para evitar o contato com a luz e a umidade durante a armazenagem, e prevenir contra riscos durante o manuseio. Estes materiais foram denominados detectores.

3.2.2.4 Preparação dos detectores para irradiação

Com o objetivo de determinar a absorvância de todos os tipos de detectores não irradiados foram realizadas medidas espectrofotométricas. Após a avaliação, os detectores foram dispostos entre placas de PMMA de 1 mm de espessura (determinado experimentalmente), para garantir as condições de equilíbrio eletrônico, e posicionados na fonte de radiação (*Fonte Gammacell*).

Os detectores (sem o invólucro) também foram irradiados com elétrons acelerados (*Acelerador de elétrons JOB 188*), dispostos sobre bandejas de madeira.

3.2.2.5 Análises espectrofotométricas

As medidas da resposta óptica dos detectores não irradiados e irradiados foram realizadas no espectrofotômetro Shimadzu UV-2101PC.

³ A indústria *Inapel Embalagens Ltda* (www.inapel.com.br), localizada em Guarulhos/SP, forneceu os filmes utilizados para a selagem dos detectores. Consistem de laminados, multicamadas (polietileno/papel/alumínio), embalagens que garantem ótima eficiência e alta barreira à umidade e luz.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Cada valor experimental, apresentado neste trabalho, é resultado da média dos valores da absorvância obtidos das medidas de três amostras (dosímetros), as barras de erro de $\pm 5\%$ representam a incerteza estimada nas medidas.

4.1 Nitrato de potássio + compostos

As pastilhas confeccionadas com as misturas (KNO_3 + compostos) foram irradiadas na fonte de ^{60}Co , tipo Gammacell, em condições de equilíbrio eletrônico, e suas características foram analisadas e comparadas com os resultados obtidos com pastilhas de KNO_3 p.a. As doses empregadas encontram-se em um intervalo entre 200 e 600 kGy.

4.1.1 Espectros de absorção

Os espectros obtidos de pastilhas não irradiadas, e irradiadas com 300 kGy são mostrados nas **FIG. 4.1, 4.2 e 4.3**, para as misturas $\text{KNO}_3 + \text{Ba}(\text{NO}_3)_2$; $\text{KNO}_3 + \text{KBr}$ e $\text{KNO}_3 + \text{MnO}_2$, respectivamente. O espectro de absorção das pastilhas irradiadas mostra mudanças nos valores de absorvância induzidas pela radiação no intervalo de comprimento de onda entre 450 e 600 nm, atingindo um valor máximo em 540 nm. O comprimento de onda de 540 nm, onde ocorre o valor máximo, foi escolhido como o comprimento de onda do *pico dosimétrico*. Neste comprimento de onda foram analisadas as demais características.

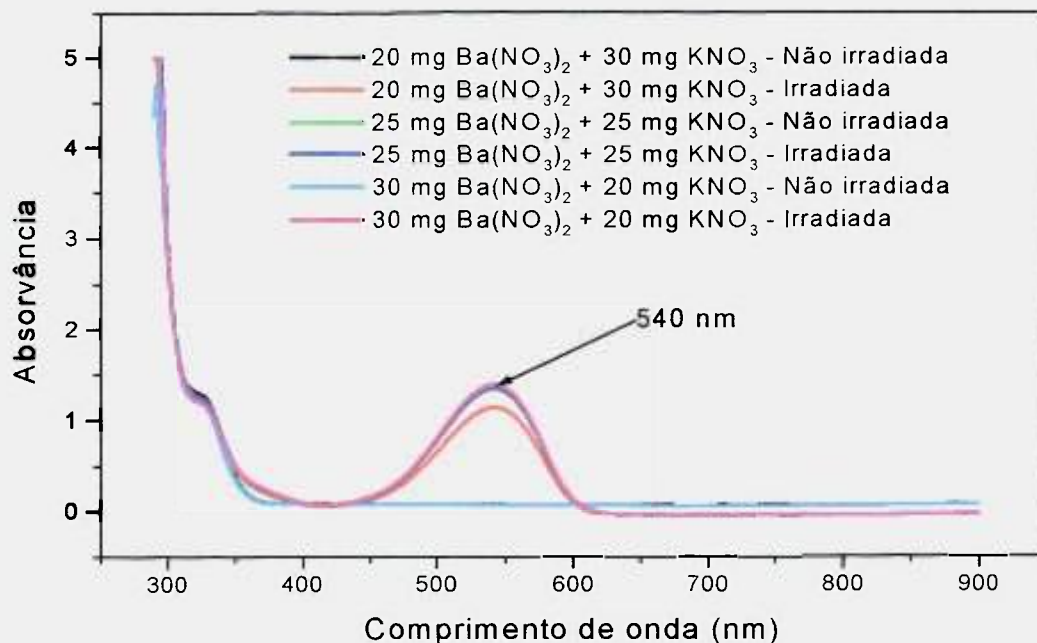


FIGURA 4.1 – Espectros de absorção de pastilhas de Ba(NO₃)₂ + KNO₃, não irradiadas e irradiadas com dose de 300 kGy de ⁶⁰Co.

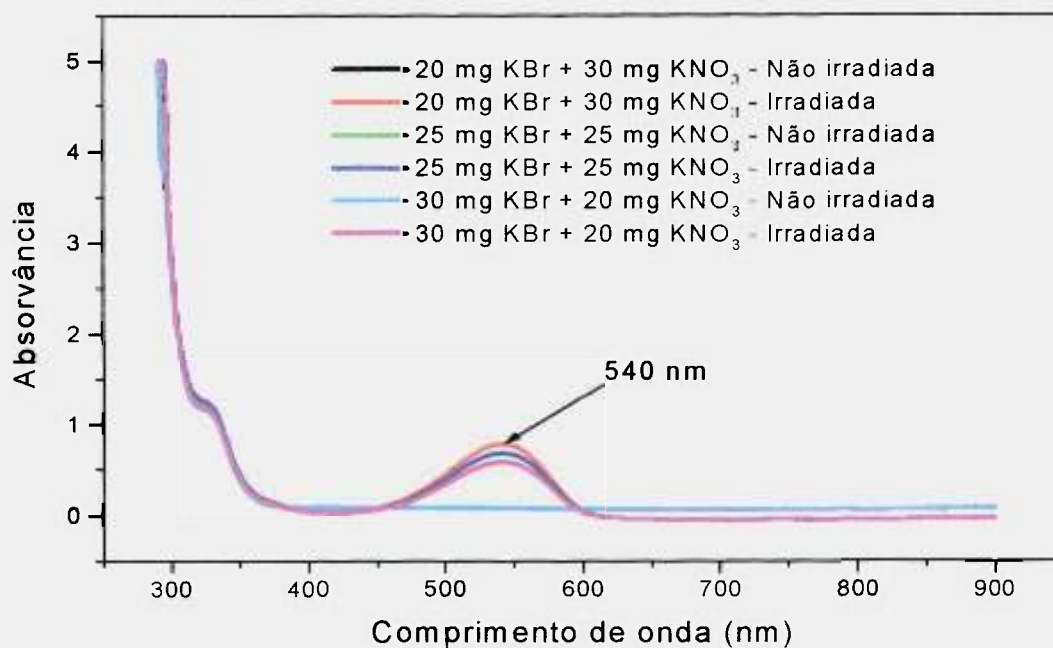


FIGURA 4.2 – Espectros de absorção de pastilhas de KBr + KNO₃, não irradiadas e irradiadas com dose de 300 kGy de ⁶⁰Co.

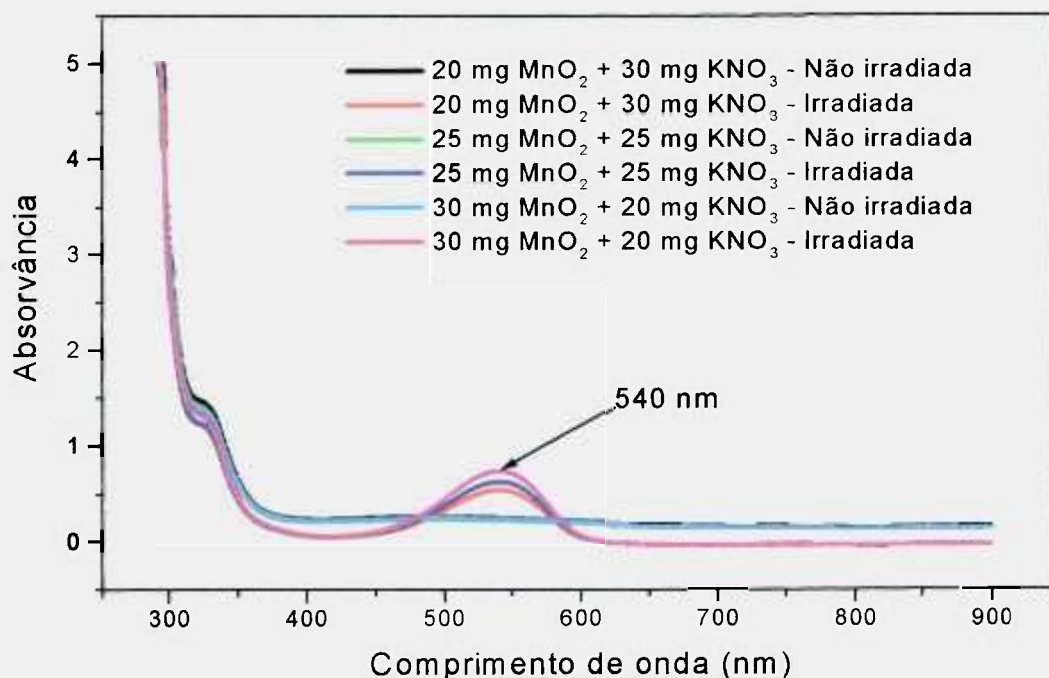


FIGURA 4.3 – Espectros de absorção de pastilhas de MnO₂ + KNO₃, não irradiadas e irradiadas com dose de 300 kGy de ⁶⁰Co.

4.1.2 Influência das condições ambientais

Certos cuidados devem ser tomados no manuseio das pastilhas, em virtude do composto ser higroscópico. Depois da prensagem as pastilhas foram seladas entre folhas de polietileno para evitar a absorção de água do ar e perda de material durante o processo de preparação e análise, e então mantidas em dessecador, até o momento da utilização. Estes procedimentos devem ser realizados em ambiente com pouca umidade.

Nenhuma influência foi observada quando ocorreram diferenças de temperatura ambiente entre 10°C e 35°C durante o manuseio.

Não houve alteração da resposta quando as pastilhas foram manuseadas ao abrigo da luz ou em luz ambiente do laboratório.

4.1.3 Estabilidade da resposta de pastilhas não irradiadas e irradiadas.

Para a avaliação da estabilidade da resposta da solução, pastilhas preparadas com a mistura $\text{KNO}_3 + \text{MnO}_2$, não irradiadas e irradiadas, foram armazenadas em dessecador, temperatura ambiente e ao abrigo da luz, e foram realizadas medidas da absorvância em tempos pré-determinados, observando as condições a seguir:

- **Medidas espectrofotométricas realizadas imediatamente após a preparação das soluções:**

As soluções (método de Shinn) foram preparadas com as pastilhas irradiadas e não irradiadas, e as medidas de absorvância foram realizadas imediatamente após a preparação. A cada dia, foram preparadas novas soluções com pastilhas não irradiadas e irradiadas, de um mesmo lote, mantidas em dessecador, e foram efetuadas medidas da absorvância, em dias pré determinados, até completar 30 dias da primeira análise. As soluções preparadas do segundo dia em diante foram sempre descartadas após as avaliações.

- **Medidas espectrofotométricas da solução preparada imediatamente após a irradiação:**

As soluções preparadas no primeiro dia foram guardadas para avaliações subsequentes e comparação com as medidas realizadas nos dias posteriores.

Comportamento semelhante foi observado entre pastilhas não irradiadas e irradiadas com 200 kGy de ^{60}Co . Por meio dos resultados mostrados na **FIG. 4.4**, pode ser afirmado, que não ocorreu variação significativa nas medidas efetuadas no mesmo dia de preparo da solução, no entanto, observando os resultados da **FIG. 4.5**, pode ser constatado um aumento acentuado nas respostas obtidas com soluções preparadas e lidas em dias subsequentes. Para evitar erros causados pela variação da resposta, as medidas devem ser efetuadas logo após a preparação da solução ou após 1 dia no máximo.

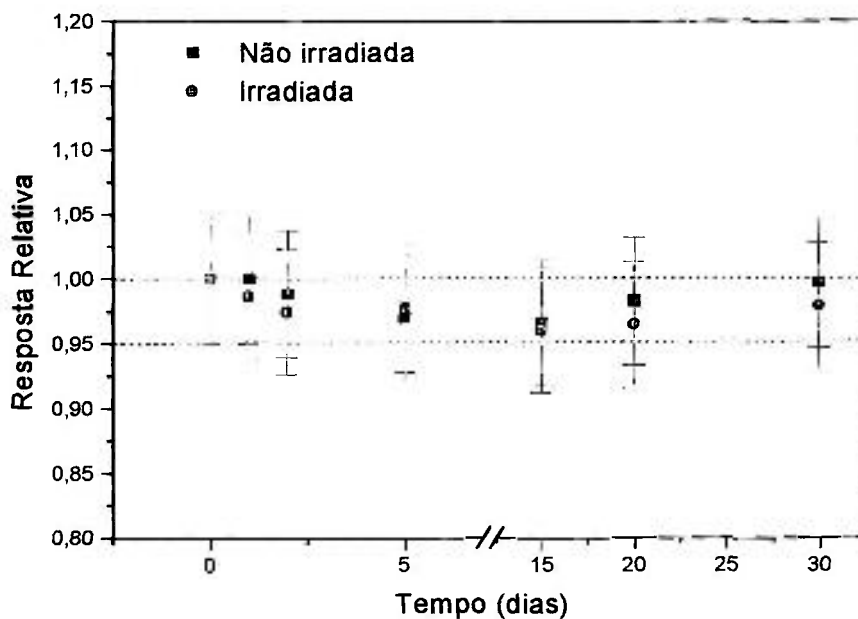


FIGURA 4.4 – Resposta relativa das soluções preparadas e lidas no mesmo dia. Pastilhas de $\text{KNO}_3 + \text{MnO}_2$ não irradiadas e irradiadas com dose de 200 kGy de ^{60}Co .

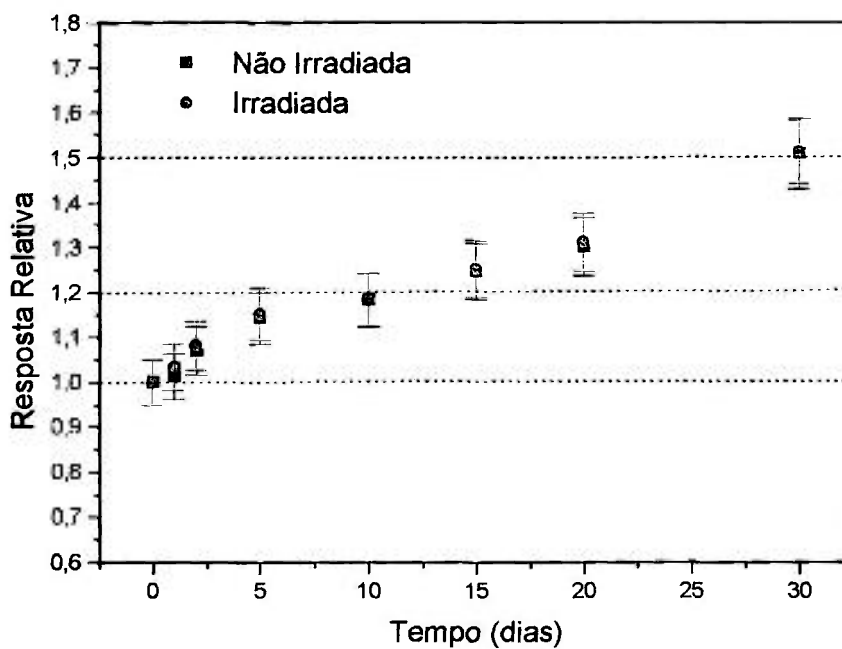
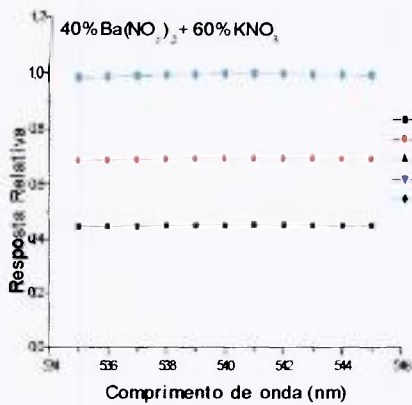


FIGURA 4.5 – Resposta relativa de soluções preparadas e lidas, no mesmo dia da preparação, e guardadas e lidas em dias subsequentes. Pastilhas de $\text{KNO}_3 + \text{MnO}_2$ não irradiadas e irradiadas com dose de 200 kGy de ^{60}Co .

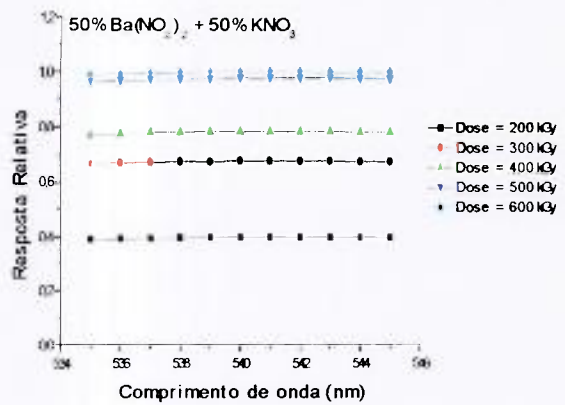
4.1.4 Resposta das pastilhas após a irradiação

Com a finalidade de verificar o comportamento da resposta (absorvância) das pastilhas após a irradiação, elas foram irradiadas com doses entre 200 e 600 kGy de ^{60}Co . Nos gráficos das **FIG. 4.6 (a), (b), (c) e (d); 4.7 (a), (b), (c) e (d) e 4.8 (a), (b), (c) e (d)** são mostrados os resultados obtidos para as pastilhas com $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, KBr e MnO_2 , respectivamente. As pastilhas foram preparadas conforme exposto no item 3.2.1.2 e Tabela 3.2.

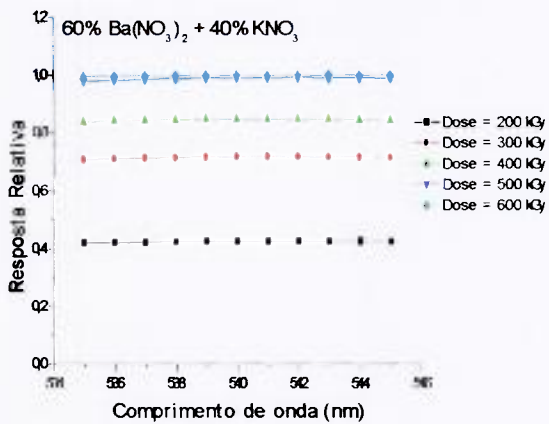
Para todas as misturas observa-se um aumento da amplitude da resposta com o aumento da dose absorvida, embora a sensibilidade de cada mistura seja característica do composto sensibilizador adicionado ao KNO_3 . Ainda que a quantidade de íons nitrito formados seja derivada dos íons nitratos presentes na solução. O comportamento da mistura com o $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ não é linear, ocorre uma tendência à saturação da resposta.



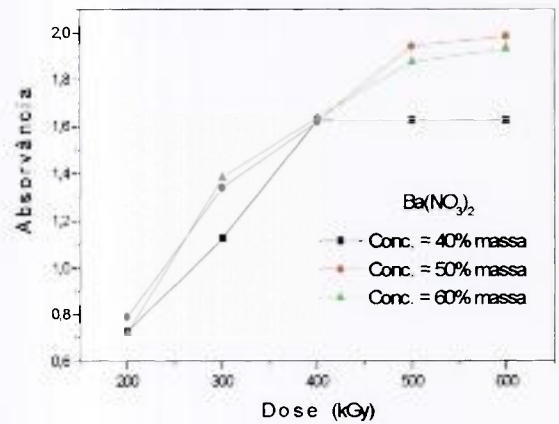
(a)



(b)



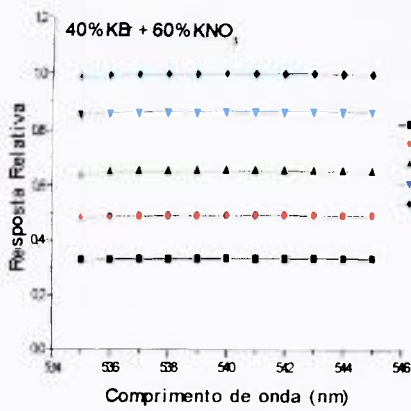
(c)



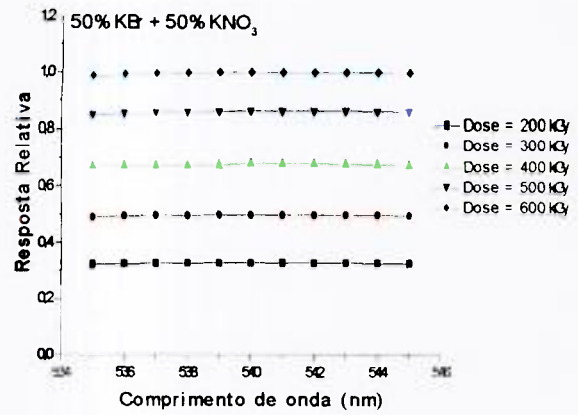
(d)

FIGURA 4.6 – Comportamento da resposta das pastilhas que contém o composto $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, intervalo de comprimento de onda entre 535 e 545 nm, irradiadas com doses entre 200 e 600 kGy de ^{60}Co .

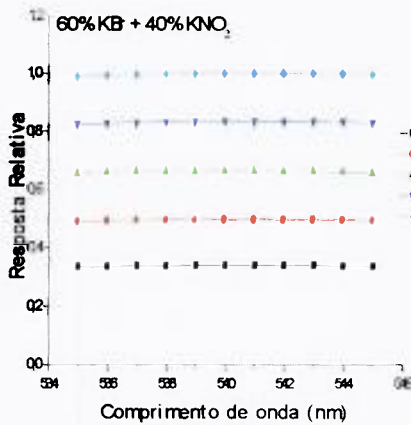
- (a) Mistura 40% $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ + 60% KNO_3
- (b) Mistura 50% $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ + 50% KNO_3
- (c) Mistura 60% $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ + 40% KNO_3
- (d) Misturas com massas diferentes ($\lambda=540$ nm)



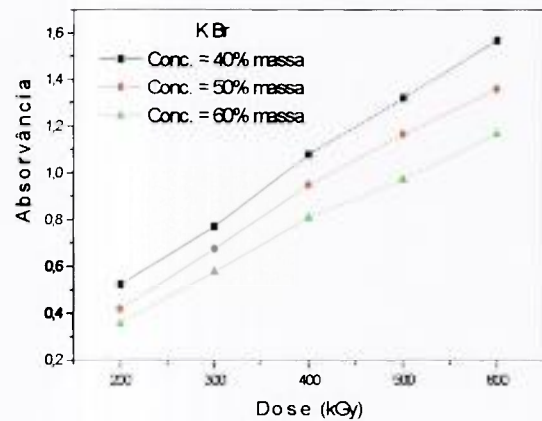
(a)



(b)



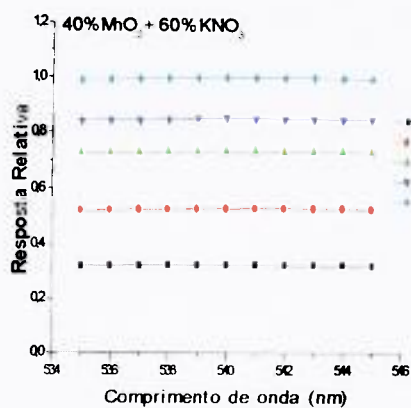
(c)



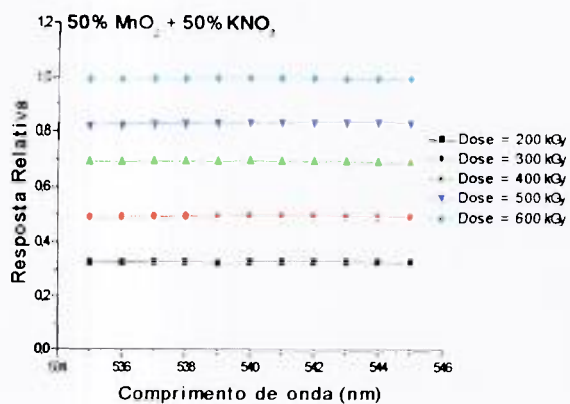
(d)

FIGURA 4.7 – Comportamento da resposta das pastilhas que contém o composto KBr, intervalo de comprimento de onda entre 535 e 545 nm, irradiadas com doses entre 200 e 600 kGy de ^{60}Co .

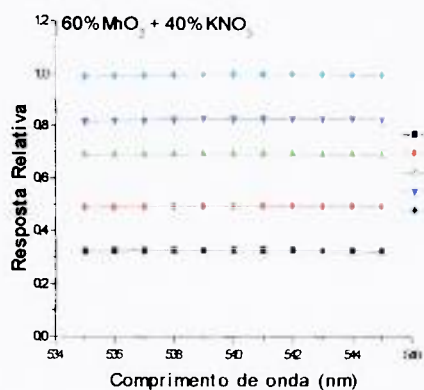
- (a) Mistura 40% KBr + 60% KNO_3
- (b) Mistura 50% KBr + 50% KNO_3
- (c) Mistura 60% KBr + 40% KNO_3
- (d) Misturas com massas diferentes ($\lambda=540$ nm)



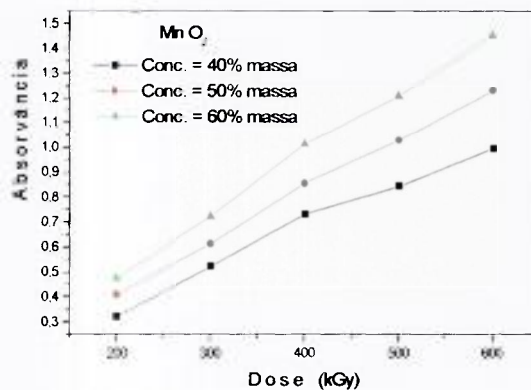
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 4.8 – Comportamento da resposta das pastilhas que contém o composto MnO₂, intervalo de comprimento de onda entre 535 e 545 nm, irradiadas com doses entre 200 e 600 kGy de ⁶⁰Co.

- (a) Mistura 40% MnO₂ + 60% KNO₃
- (b) Mistura 50% MnO₂ + 50% KNO₃
- (c) Mistura 60% MnO₂ + 40% KNO₃
- (d) Misturas com massas diferentes ($\lambda=540$ nm)

4.1.5 Curva de calibração para radiação gama do ^{60}Co

Com os dados obtidos com as pastilhas irradiadas, foram construídas as curvas de calibração para cada mistura. Nos gráficos das FIG. 4.9, 4.10 e 4.11 são mostrados os resultados obtidos com pastilhas de diferentes massas e também os resultados obtidos com as pastilhas de KNO_3 p.a.. Observando-se os gráficos das três Figuras pode-se concluir que todas as misturas, com exceção da mistura contendo 40% de MnO_2 , apresentam uma taxa de produção de íons NO_2^- superior ao KNO_3 p.a., (sensibilidade) comportamento que não atende ao requisito de ampliar o intervalo de dose útil, uma vez que a resposta irá saturar para doses menores. O interessante é a redução da taxa de produção de íons NO_2^- , com a finalidade de estender o intervalo de linearidade. As misturas $\text{KBr} + \text{KNO}_3$ e $\text{MnO}_2 + \text{KNO}_3$ em todas as concentrações apresentam comportamento linear da resposta e a mistura $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2 + \text{KNO}_3$ apresenta comportamento não linear, tendendo à saturação.

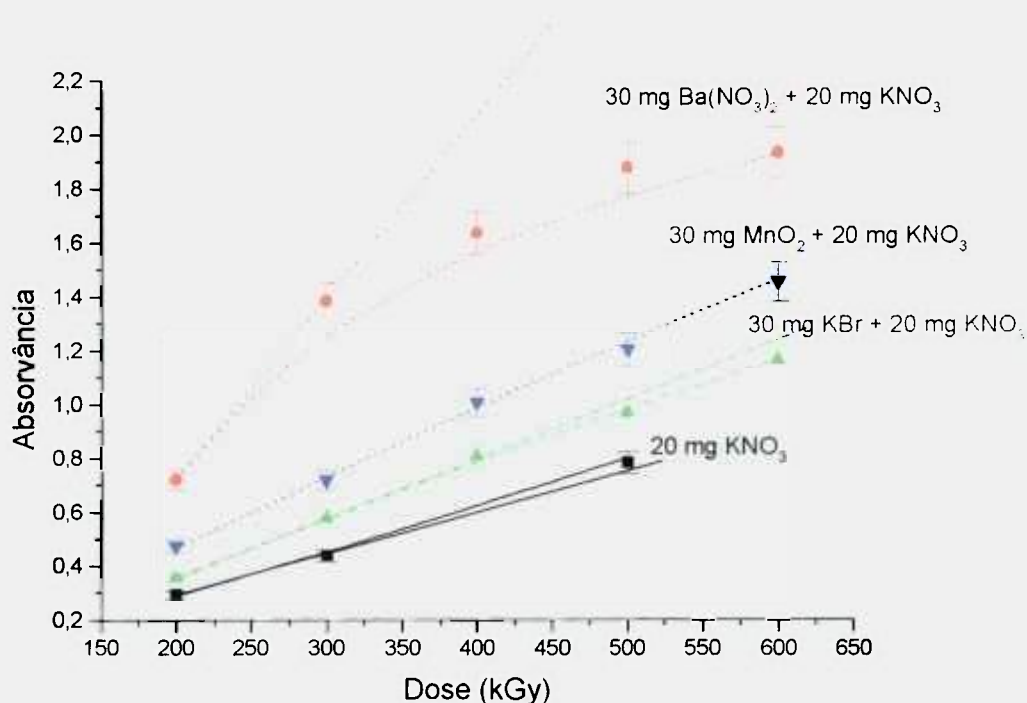


FIGURA 4.9 – Resultados de medida de absorvância obtidos com pastilhas confeccionadas com as misturas:
 20 mg KNO_3 + 30 mg $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$
 20 mg KNO_3 + 30 mg KBr
 20 mg KNO_3 + 30 mg MnO_2
 20 mg KNO_3 p.a.

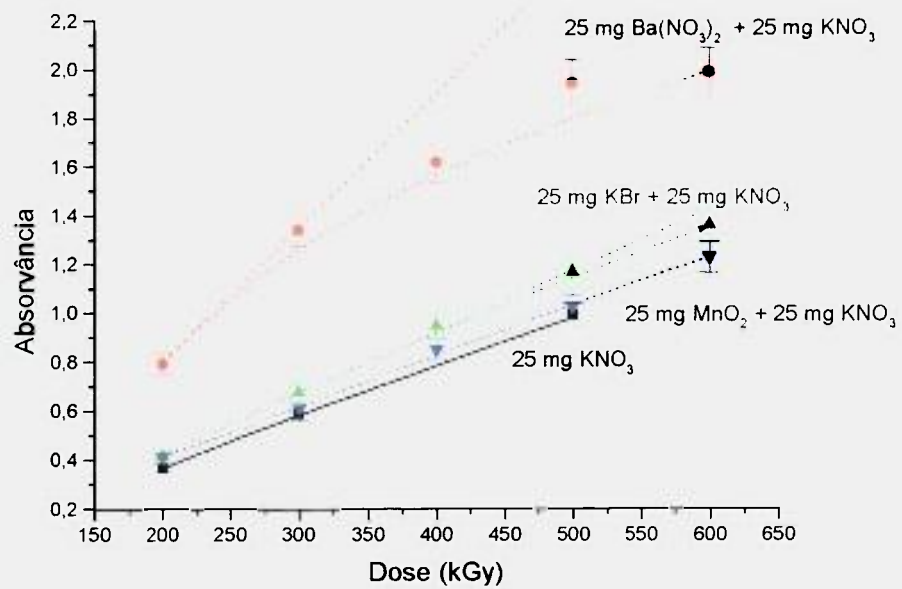


FIGURA 4.10 – Resultados de medida de absorvância obtidos com pastilhas confeccionadas com as misturas:
 25 mg KNO₃ + 25 mg Ba(NO₃)₂
 25 mg KNO₃ + 25 mg KBr
 25 mg KNO₃ + 25 mg MnO₂
 25 mg KNO₃ p.a.

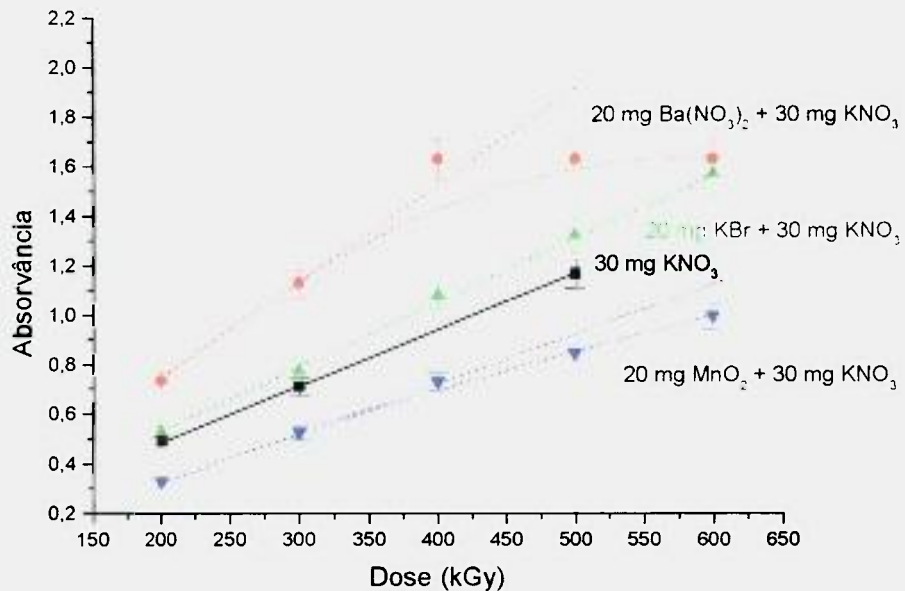


FIGURA 4.11 – Resultados de medida de absorvância obtidos com pastilhas confeccionadas com as misturas:
 30 mg KNO₃ + 20 mg Ba(NO₃)₂
 30 mg KNO₃ + 20 mg KBr
 30 mg KNO₃ + 20 mg MnO₂
 30 mg KNO₃ p.a.

A finalidade deste estudo foi determinar uma mistura na qual a taxa de produção de íons NO_2^- seja menor que a produzida no KNO_3 p.a., nas mesmas condições de irradiação; deste modo, estas pastilhas poderão ser empregadas em irradiações que empregam doses maiores, sem que ocorra saturação da resposta. A mistura que apresenta este comportamento é a mistura $40\% \text{MnO}_2 + 60\% \text{KNO}_3$, como pode ser visto nos gráficos da FIG. 4.11.

Para confirmação destes resultados, foram preparadas as misturas $30\% \text{MnO}_2 + 70\% \text{KNO}_3$, $20\% \text{MnO}_2 + 80\% \text{KNO}_3$ e $10\% \text{MnO}_2 + 90\% \text{KNO}_3$, todas com a mesma massa de KNO_3 (50 mg) e determinados os valores da absorvância. Os resultados são mostrados na FIG. 4.12. Em todas as misturas a taxa de produção de NO_2^- foi menor que a do KNO_3 p.a, porém, a mistura $40\% \text{MnO}_2 + 60\% \text{KNO}_3$ é a que apresenta menor taxa, portanto, é a que apresenta melhores resultados, por conseguinte, as características dosimétricas foram avaliadas para as pastilhas preparadas com esta mistura.

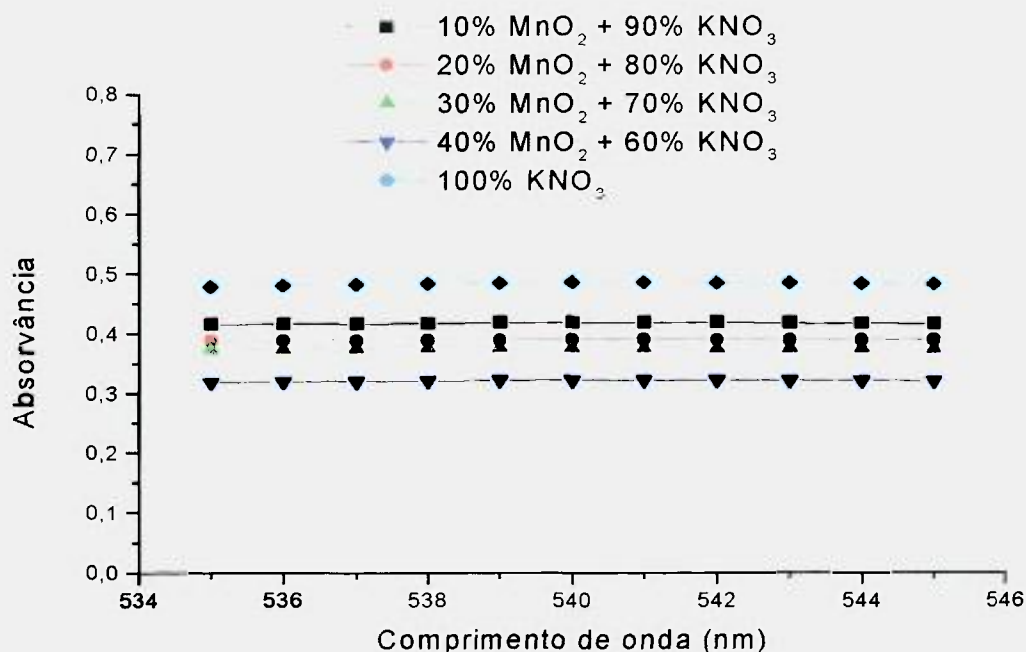


FIGURA 4.12 – Resposta das medidas de absorvância com as pastilhas preparadas com diferentes concentrações de MnO_2 e massa constante de 50mg de KNO_3 . Irradiadas com dose de 200 kGy de ^{60}Co .

4.1.6 Reprodutibilidade do lote

Um lote com 500 pastilhas contendo 40% de MnO_2 foi produzido. Deste lote, 10 pastilhas foram irradiadas na fonte Gammacell, com dose de 200 kGy. Foram realizadas medidas da absorvância das soluções preparadas com as pastilhas e os valores foram comparados. A reprodutibilidade do lote é melhor que 98% (1σ), os erros associados podem ser causados durante a irradiação em virtude do posicionamento das pastilhas na fonte de radiação ou durante a preparação das pastilhas e das soluções.

4.1.7 Dependência da resposta com o posicionamento do dosímetro

As pastilhas contendo 40% de MnO_2 foram irradiadas na fonte Gammacell, com dose de 200 kGy, variando o ângulo de posicionamento das pastilhas (0° , 45° e 90°) com relação à base da fonte. Embora para esse tipo de fonte, a incidência de radiação é feita em todas as direções, não foi observada dependência da resposta com o posicionamento do dosímetro no campo de radiação.

4.1.8 Dependência da resposta com a taxa de dose

As pastilhas não apresentaram variação da resposta em função da taxa de dose superior a 5% no intervalo analisado. Os resultados podem ser vistos nas **FIG. 4.13 e 4.14** para o KNO_3 p.a. e para a mistura $\text{MnO}_2 + \text{KNO}_3$, respectivamente. As pastilhas foram irradiadas com 200 kGy de ^{60}Co com três taxas de dose: sem atenuador – 5,65 kGy/h, com atenuação de 50% - 2,83 kGy/h e com atenuação de 70% - 1,70 kGy/h. A variação encontrada pode estar relacionada ao fato de que em dosimetria química a manipulação das soluções (pesagem de reagentes e preparação) pode ser fonte de erros.

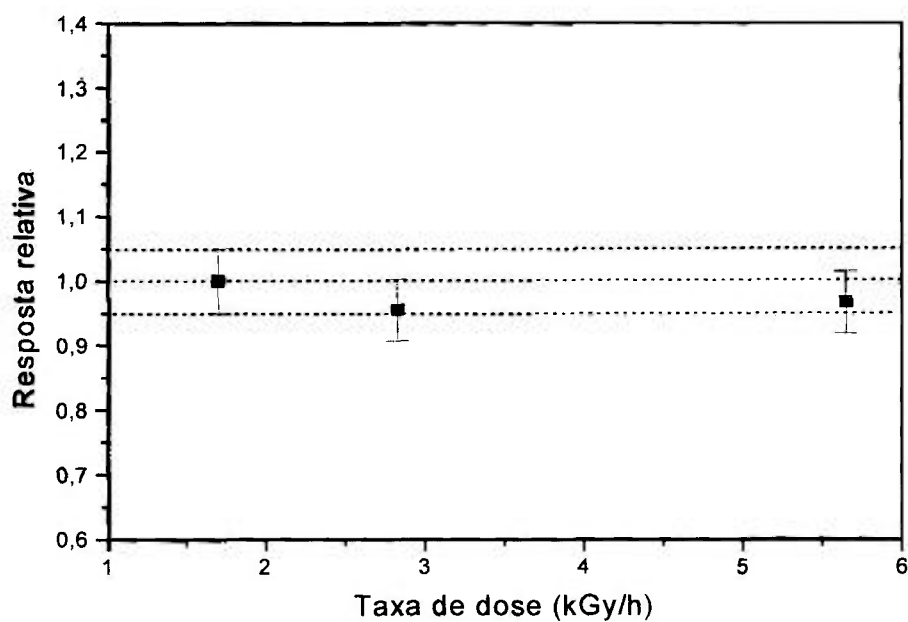


FIGURA 4.13 – Variação da resposta em função da taxa de dose para pastilhas produzidas com KNO_3 p.a., irradiadas na fonte Gammacell com dose de 200 kGy.

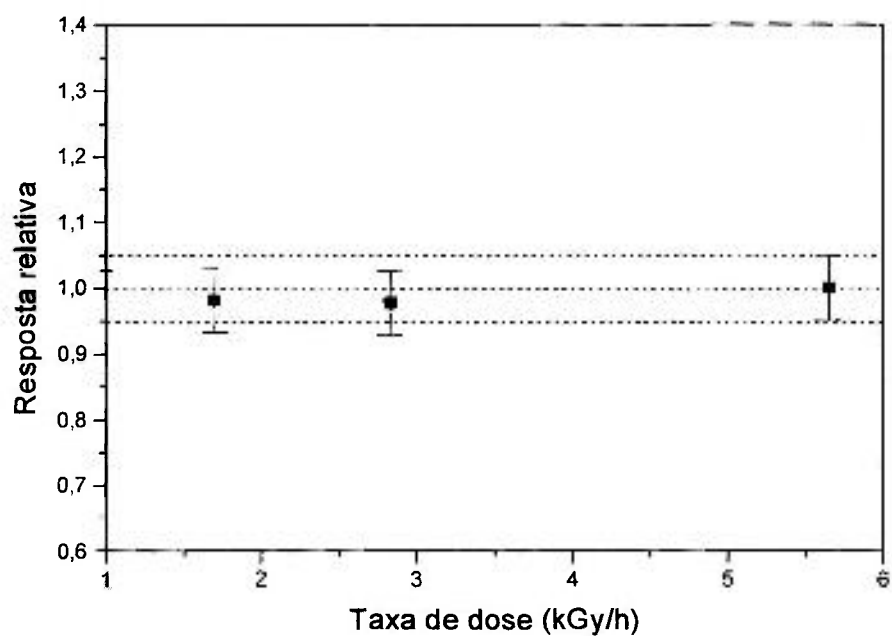


FIGURA 4.14 – Variação da resposta em função da taxa de dose para pastilhas produzidas com a mistura 40% MnO_2 + 60% KNO_3 , irradiadas na fonte Gammacell com dose de 200 kGy.

4.2 Detectores radiocrômicos (PMMA - colorido)

4.2.1 Espectro de absorção dos detectores não irradiados

Foram realizadas medidas de absorvância num intervalo de comprimento de onda entre 190 e 900 nm de todos os detectores desenvolvidos e dos padrões comparativos (Red 4034 Perspex e Gammachrome YR). Nos gráficos da **FIG. 4.15** são mostrados os resultados obtidos para 40 amostras não irradiadas de cada detector. Como foi apresentado no item 2.1.1 o espectro é característico ao átomo ou molécula da substância presente, portanto, cada detector apresenta espectro característico ao corante presente em sua composição. No **APÊNDICE C** são mostrados os gráficos de frequência das medidas de absorvância efetuadas em 40 amostras de cada um dos detectores.

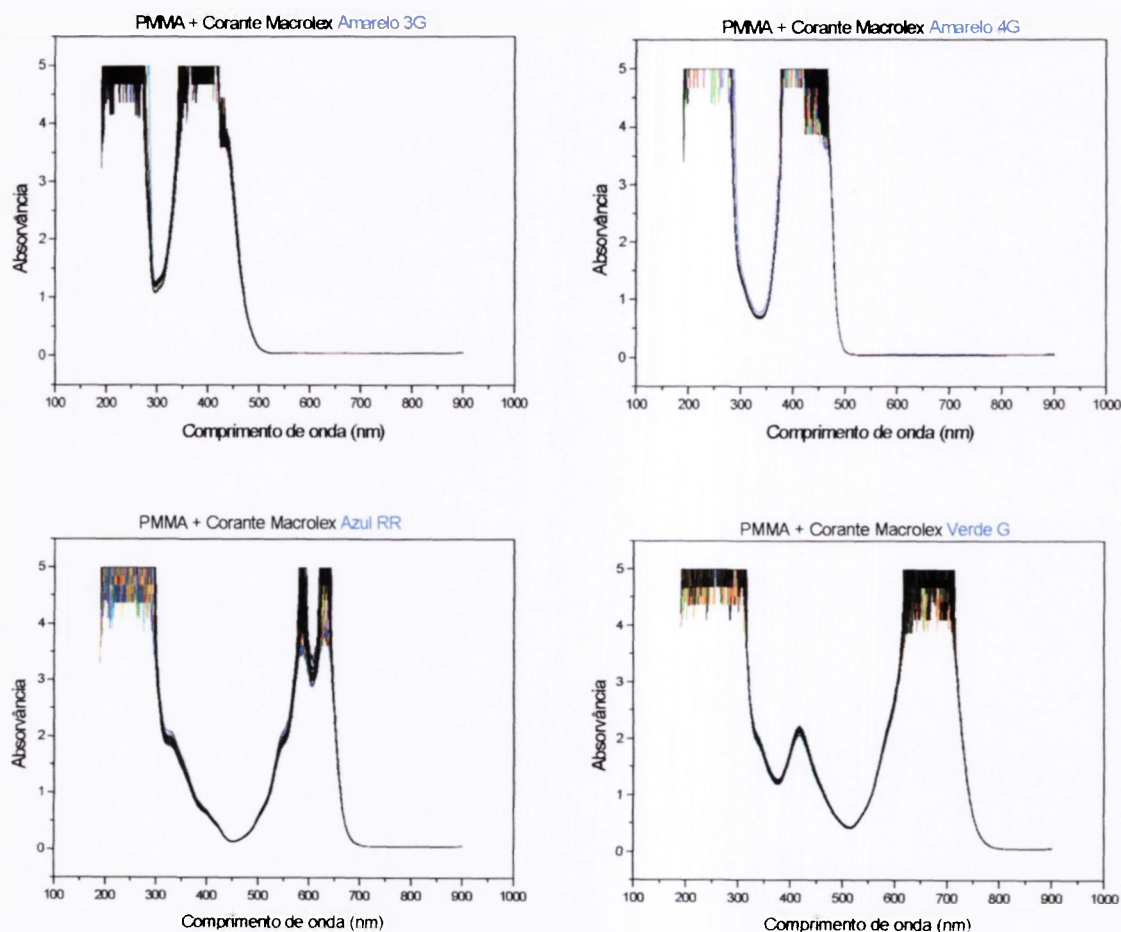


FIGURA 4.15 – Espectros de absorção dos detectores desenvolvidos e dos padrões comparativos não irradiados. *Continua.*

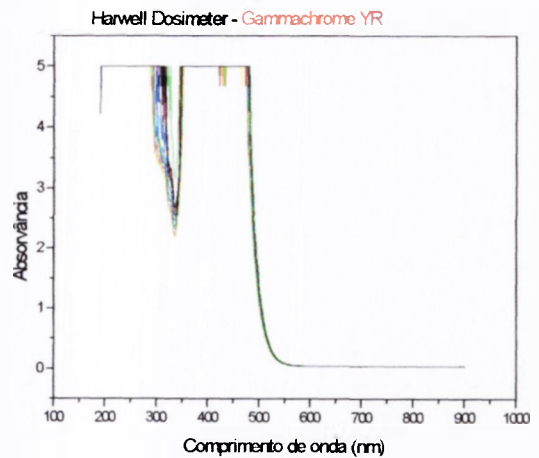
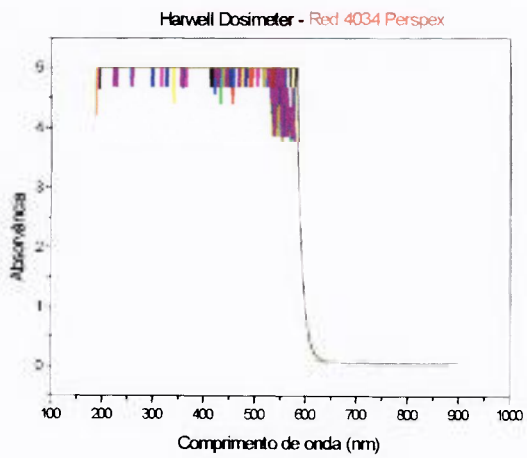
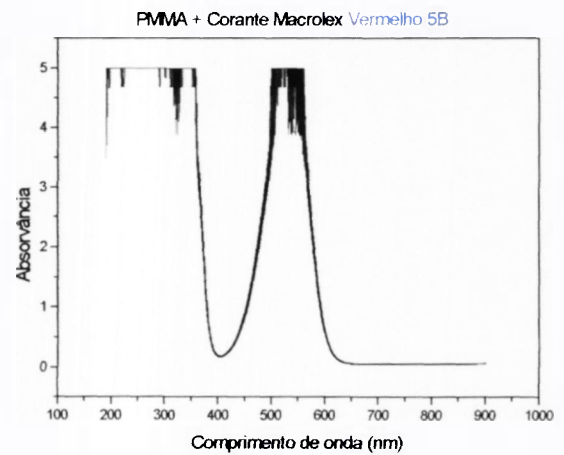
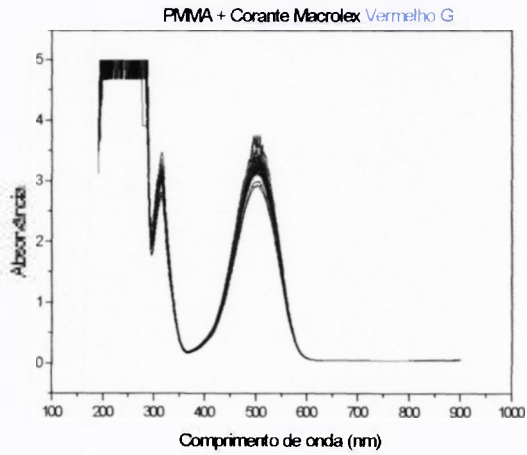
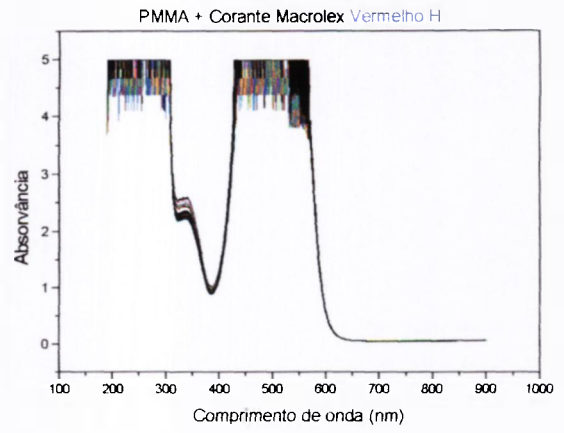
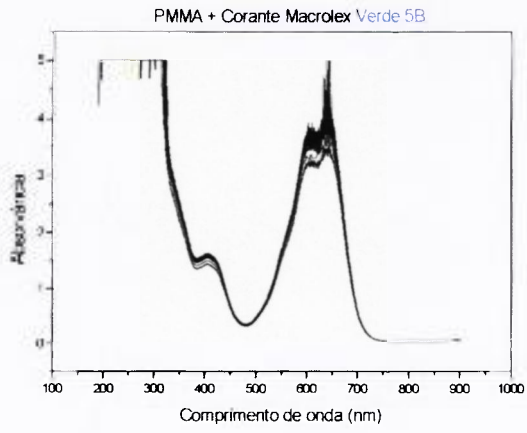


FIGURA 4.15 – *Continuação* – Espectros de absorção dos detectores desenvolvidos e dos padrões comparativos não irradiados.

4.2.2 Espectro de absorção dos detectores irradiados com radiação gama

Como teste preliminar os detectores foram irradiados na fonte Gammacell com três doses: 5,72 kGy, 50,82 kGy e 80,00 kGy, com a mesma taxa de dose, com a finalidade de verificar se os detectores apresentam mudanças no espectro induzidas pela radiação. Os gráficos são mostrados na **FIG. 4.16** para cada detector. Observa-se que o espectro de absorção de cada detector de PMMA irradiado mostra mudanças nos valores de absorvância induzidas pela radiação em um intervalo característico. Essa mudança ocorre em razão da variação da cor dos detectores quando expostos à radiação. Nos espectros podem ser obtidos os comprimentos de onda no qual as características dosimétricas podem ser detectadas. O padrão comparativo Gammachrome YR não foi irradiado, pois, as doses empregadas excedem o intervalo de dose utilizável deste detector.

Os espectros de absorção dos detectores PMMA / corante *Macrolex Amarelo 3G*, PMMA / corante *Macrolex Amarelo 4G*, PMMA / corante *Macrolex Azul RR*, PMMA / corante *Macrolex Verde G*, PMMA / corante *Macrolex Verde 5B*, PMMA / corante *Macrolex Vermelho H*, PMMA / corante *Macrolex Vermelho G*, PMMA / corante *Macrolex Vermelho 5B* e do padrão comparativo *Red 4034 Perspex* apresentam mudanças na absorvância induzidas pela radiação no intervalo entre 290-350 nm, 290-550 nm, 300-700 nm, 350-800 nm, 350-750 nm, 300-700 nm, 300-700 nm, 380-700 nm e 600-850 nm, respectivamente. Verifica-se que os valores de absorvância podem aumentar ou diminuir como função da dose absorvida, dependendo do comprimento de onda de análise. Após a análise dos resultados foram estabelecidos os valores que se encontram na **TAB. 4.1**. Estes valores indicam o comprimento de onda no qual o detector é sensível à radiação e onde ocorreu variação perceptível e estável da resposta e que pode ser utilizado para a análise das propriedades dosimétricas do detector.

Para uma observação mais detalhada da resposta dos detectores irradiados foram determinadas as curvas de transmitância para os detectores que contém os corantes: amarelo 3G, amarelo 4G, azul RR, verde G e vermelho 5B (**APÊNDICE B**), em razão de seus comprimentos de onda para análises dosimétricas terem sido determinados onde o espectro de absorção apresentou um mínimo de absorvância.

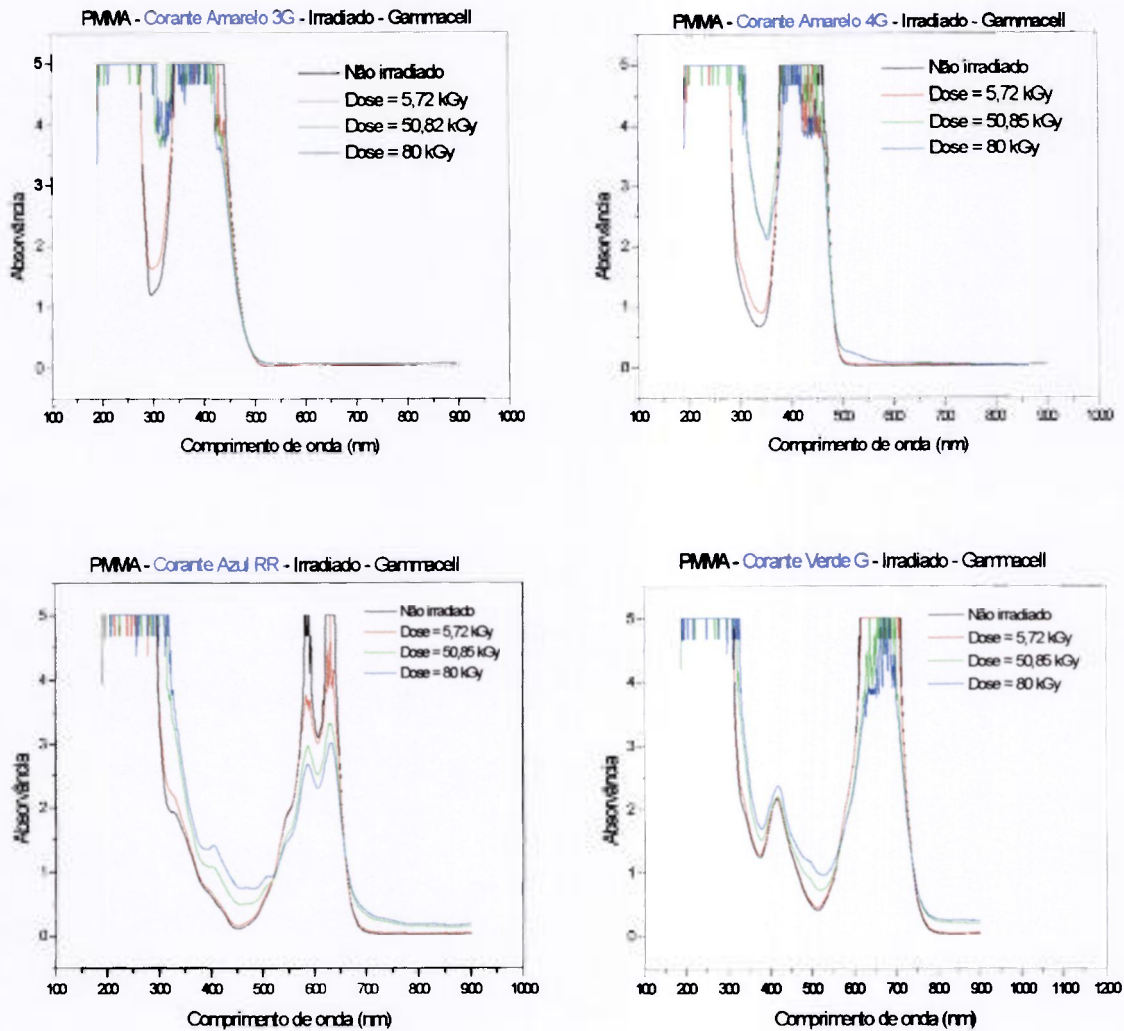


FIGURA 4.16 – Espectros de absorção óptica do padrão comparativo (Red 4034 Perspex) e dos detectores desenvolvidos não irradiados e irradiados na fonte de ^{60}Co com doses de 5,72 kGy, 50,85 kGy e 80,00 kGy. *Continua.*

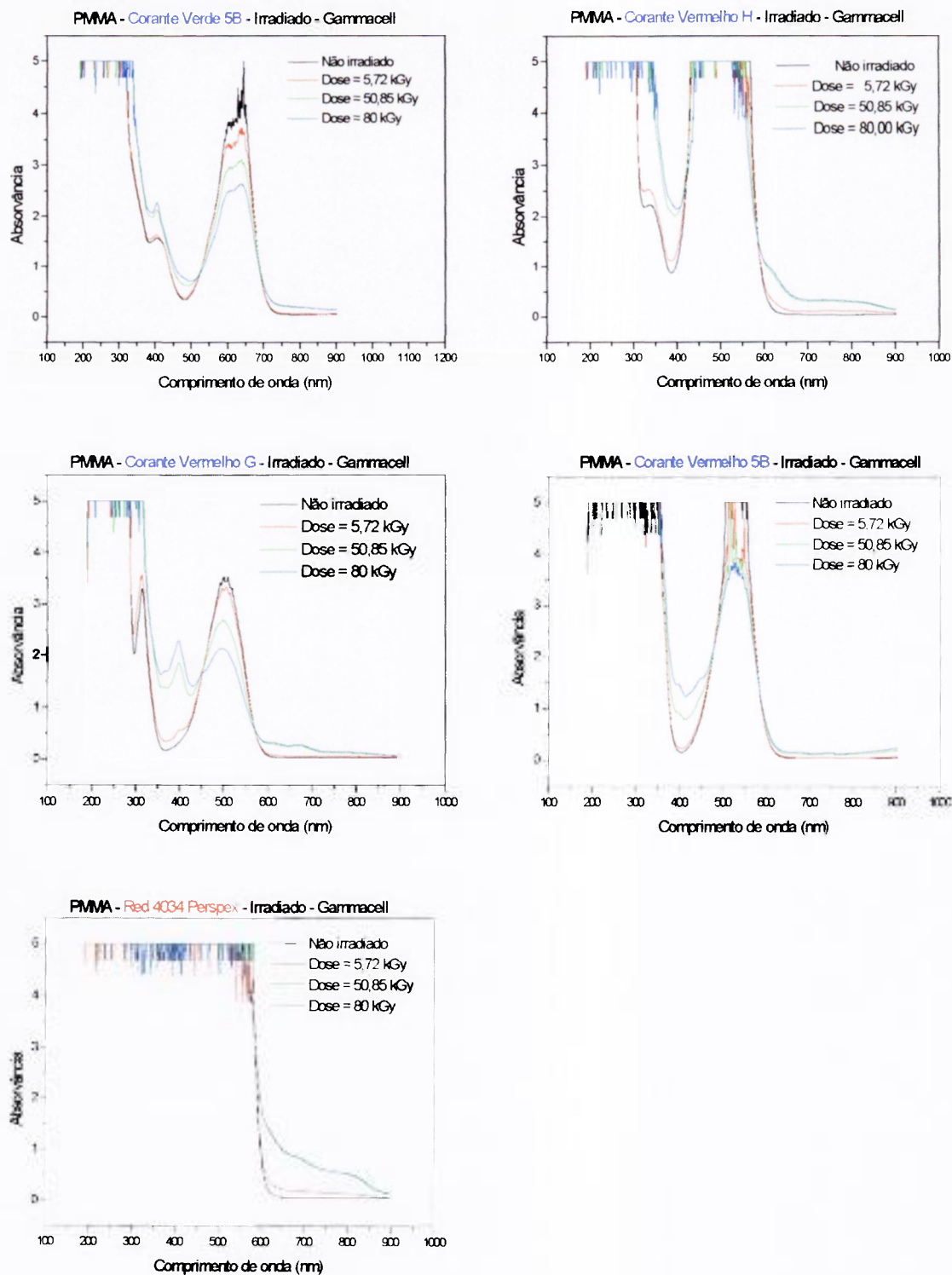


FIGURA 4.16 – Continuação – Espectros de absorção óptica do padrão comparativo (Red 4034 Perspex) e dos detectores desenvolvidos não irradiados e irradiados na fonte de ^{60}Co com doses de 5,72 kGy, 50,85 kGy e 80,00 kGy.

TABELA 4.1 – Comprimento de onda no qual ocorre variação perceptível e estável da resposta dos detectores desenvolvidos e dos padrões comparativos quando irradiados.

Detector	Comp. de onda (nm)
Macrolex Amarelo 3G	300
Macrolex Amarelo 4G	353
Macrolex Azul RR	450
Macrolex Verde G	528
Macrolex Verde 5B	405
Macrolex Vermelho H	620
Macrolex Vermelho G	397
Macrolex Vermelho 5B	415
Red 4034 Perspex	640
Gammachrome YR	530

4.2.3 Limite inferior de detecção (LID)

Foram usados 20 detectores não irradiados de cada tipo de corante nos quais foi medida a absorvância e a espessura. A absorvância específica média $\left(\bar{k}\right)$ e o desvio padrão (σ) foram determinados. O limite inferior de detecção é calculado pela expressão:

$$\bar{k} + 3\sigma$$

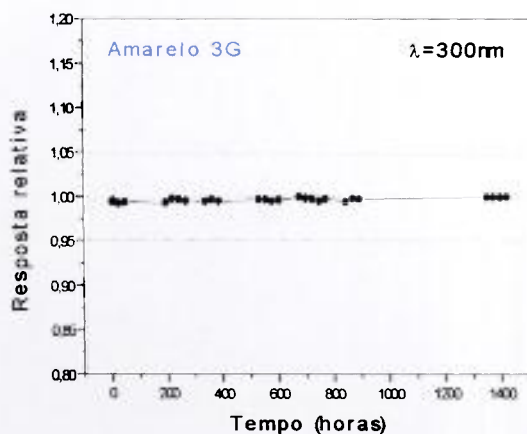
Na **TAB. 4.2** são apresentados os valores obtidos de limite inferior de detecção.

TABELA 4.2 – Valores de limite inferior de detecção dos detectores desenvolvidos e dos padrões.

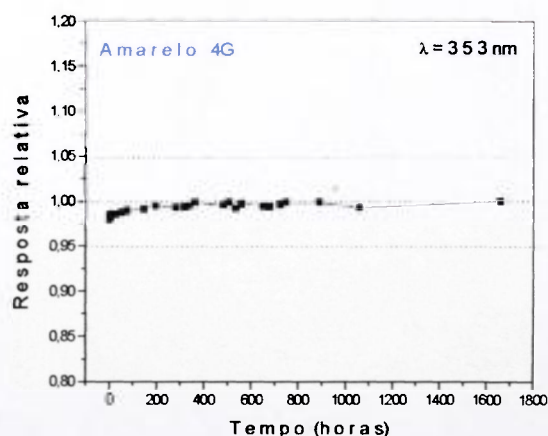
Detector	Comp. de onda (nm)	$\bar{k} + 3\sigma$ (mm ⁻¹)
<i>Macrolex Amarelo 3G</i>	300	0,5053 + 0,0739
<i>Macrolex Amarelo 4G</i>	353	0,3973 + 0,0204
<i>Macrolex Azul RR</i>	450	0,0540 + 0,0051
<i>Macrolex Verde G</i>	528	0,1973 + 0,0132
<i>Macrolex Verde 5B</i>	405	0,6501 + 0,0381
<i>Macrolex Vermelho H</i>	620	0,0713 + 0,0092
<i>Macrolex Vermelho G</i>	397	0,1319 + 0,0124
<i>Macrolex Vermelho 5B</i>	415	0,0896 + 0,0066
<i>Red 4034 Perspex</i>	640	0,0246 + 0,0055
<i>Gammachrome YR</i>	530	0,1454 + 0,0233

4.2.4 Sensibilidade à luz ambiente do laboratório

Os detectores, não irradiados, foram expostos por vários dias à luz ambiente do laboratório, que consiste de lâmpadas fluorescentes e luz natural. Em vários dias consecutivos foram realizadas medidas de absorvância dos detectores e dos padrões comparativos. Na FIG. 4.17 (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h), (i) e (j) são mostrados os gráficos dos detectores PMMA / corante *Macrolex Amarelo 3G*, PMMA / corante *Macrolex Amarelo 4G*, PMMA / corante *Macrolex Azul RR*, PMMA / corante *Macrolex Verde G*, PMMA / corante *Macrolex Verde 5B*, PMMA / corante *Macrolex Vermelho H*, PMMA / corante *Macrolex Vermelho G*, PMMA / corante *Macrolex Vermelho 5B* e dos padrões comparativos *Red 4034 Perspex* e *Gammachrome YR*, respectivamente. A resposta relativa foi determinada quanto ao valor de absorvância por unidade de espessura normalizada para o maior valor de resposta obtido no decorrer do tempo. Em razão dos resultados obtidos pode-se afirmar que os detectores podem ser manipulados, sem necessitar de cuidados especiais, em condições normais de luz ambiente.



(a)

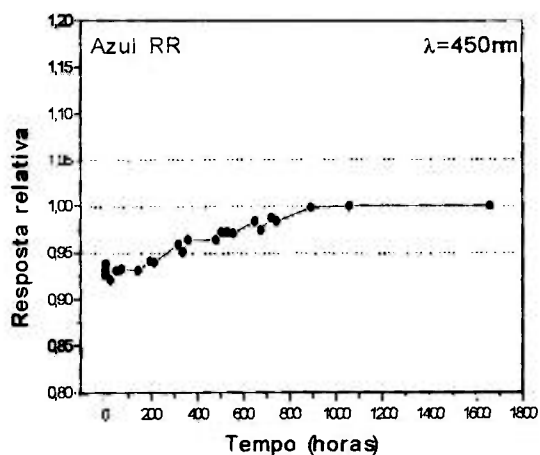


(b)

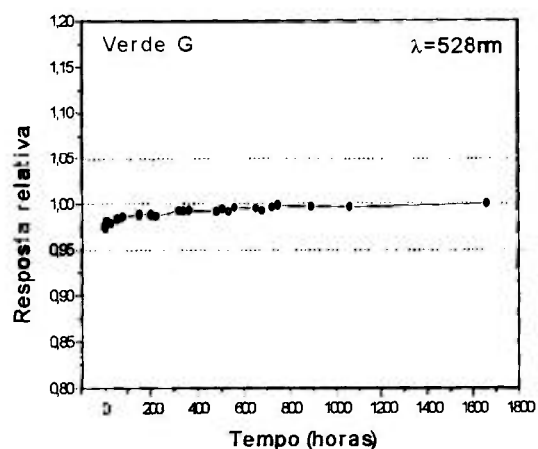
FIGURA 4.17 – Variação da resposta dos detectores de PMMA desenvolvidos e dos padrões com o tempo, medidas de absorvância realizadas em tempos pré-determinados.

(a) Influência da luz ambiente na resposta do detector com o corante *Macrolex Amarelo 3G*, $\lambda = 300$ nm.

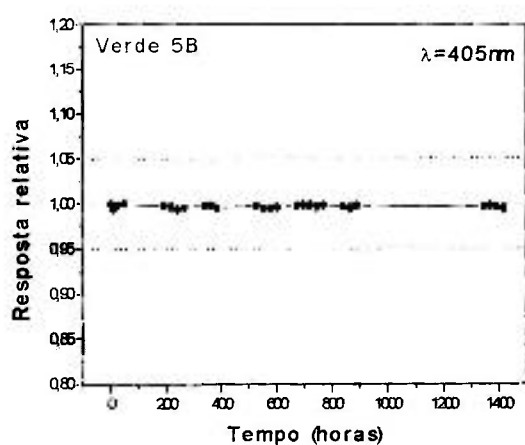
(b) Influência da luz ambiente na resposta do detector com o corante *Macrolex Amarelo 4G*, $\lambda = 353$ nm. *Continua.*



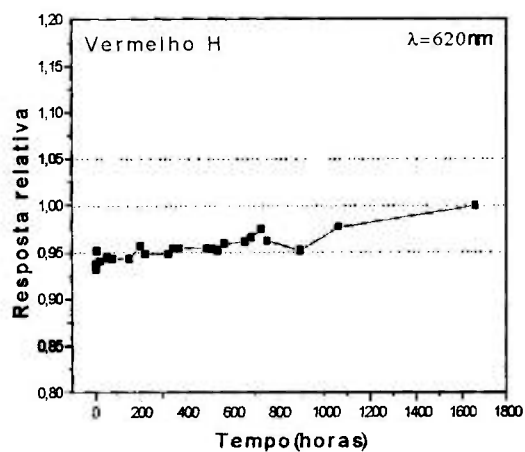
(c)



(d)



(e)



(f)

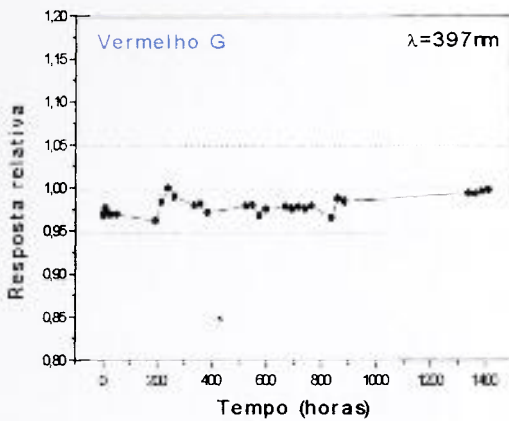
FIGURA 4.17 – Continuação – Variação da resposta dos detectores de PMMA desenvolvidos e dos padrões com o tempo, medidas de absorvância realizadas em tempos pré-determinados.

(c) Influência da luz ambiente na resposta do detector com o corante Macrolex Azul RR, $\lambda = 450 \text{ nm}$.

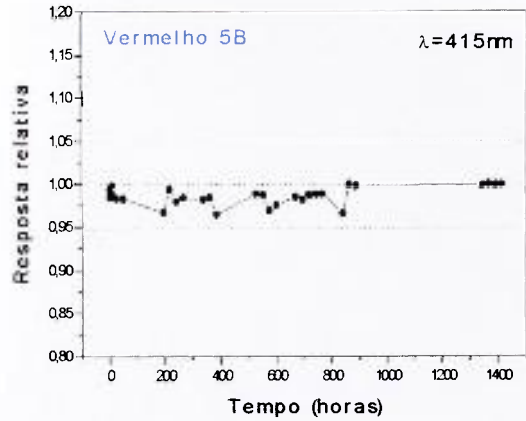
(d) Influência da luz ambiente na resposta do detector com o corante Macrolex Verde G, $\lambda = 528 \text{ nm}$.

(e) Influência da luz ambiente na resposta do detector com o corante Macrolex Verde 5B, $\lambda = 405 \text{ nm}$.

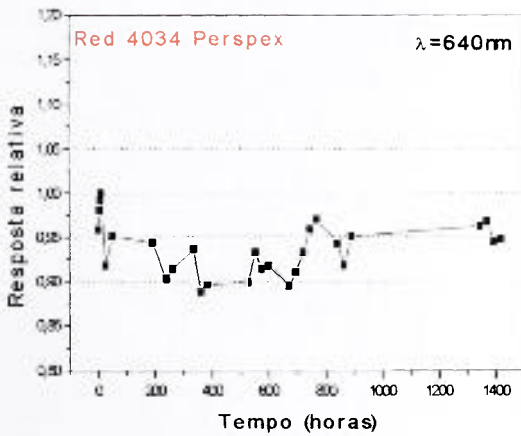
(f) Influência da luz ambiente na resposta do detector com o corante Macrolex Vermelho H, $\lambda = 620 \text{ nm}$. *Continua.*



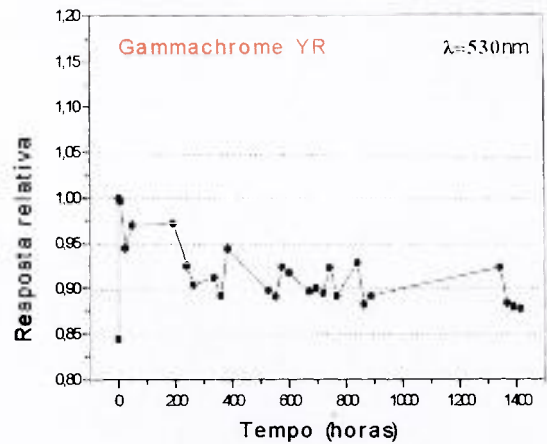
(g)



(h)



(i)



(j)

FIGURA 4.17 – *Continuação* – Variação da resposta dos detectores de PMMA desenvolvidos e dos padrões com o tempo, medidas de absorvância realizadas em tempos pré-determinados.

(g) Influência da luz ambiente na resposta do detector com o corante Macrolex Vermelho G, $\lambda = 397 \text{ nm}$.

(h) Influência da luz ambiente na resposta do detector com o corante Macrolex Vermelho 5B, $\lambda = 415 \text{ nm}$.

(i) Influência da luz ambiente na resposta do padrão comparativo Red Perspex 4034, $\lambda = 640 \text{ nm}$.

(j) Influência da luz ambiente na resposta do padrão comparativo Gammachrome YR, $\lambda = 530 \text{ nm}$.

Alguns materiais são fotossensíveis somente após a irradiação, deste modo, é necessário determinar o quanto esse fator pode influenciar no desempenho do dosímetro a fim de se evitar ou minimizar esta influência na resposta.

Para verificar esta característica, detectores de cada tipo de corante foram irradiados na fonte Gammacell com as doses de 10, 30 e 40 kGy e expostos à luz ambiente do laboratório. As medidas da absorvância de todos os detectores foram feitas em tempos pré-determinados. Os resultados são mostrados no gráfico da **FIG. 4.18**. A resposta relativa foi determinada quanto ao valor de absorvância por unidade de espessura normalizada para o valor obtido no detector que não foi exposto à luz.

Os detectores apresentaram variações na resposta entre 4% para o padrão Red Perspex e 20% para o amarelo 4G, desse modo, o efeito da luz incidente nos detectores irradiados é significativa, devendo ser tomados cuidados adequados ou ser considerado para efeito de correção. Para evitar a aplicação destas correções os detectores devem ser mantidos ao abrigo da luz e as leituras realizadas logo após a irradiação ou entre 1 e 2 dias no máximo.

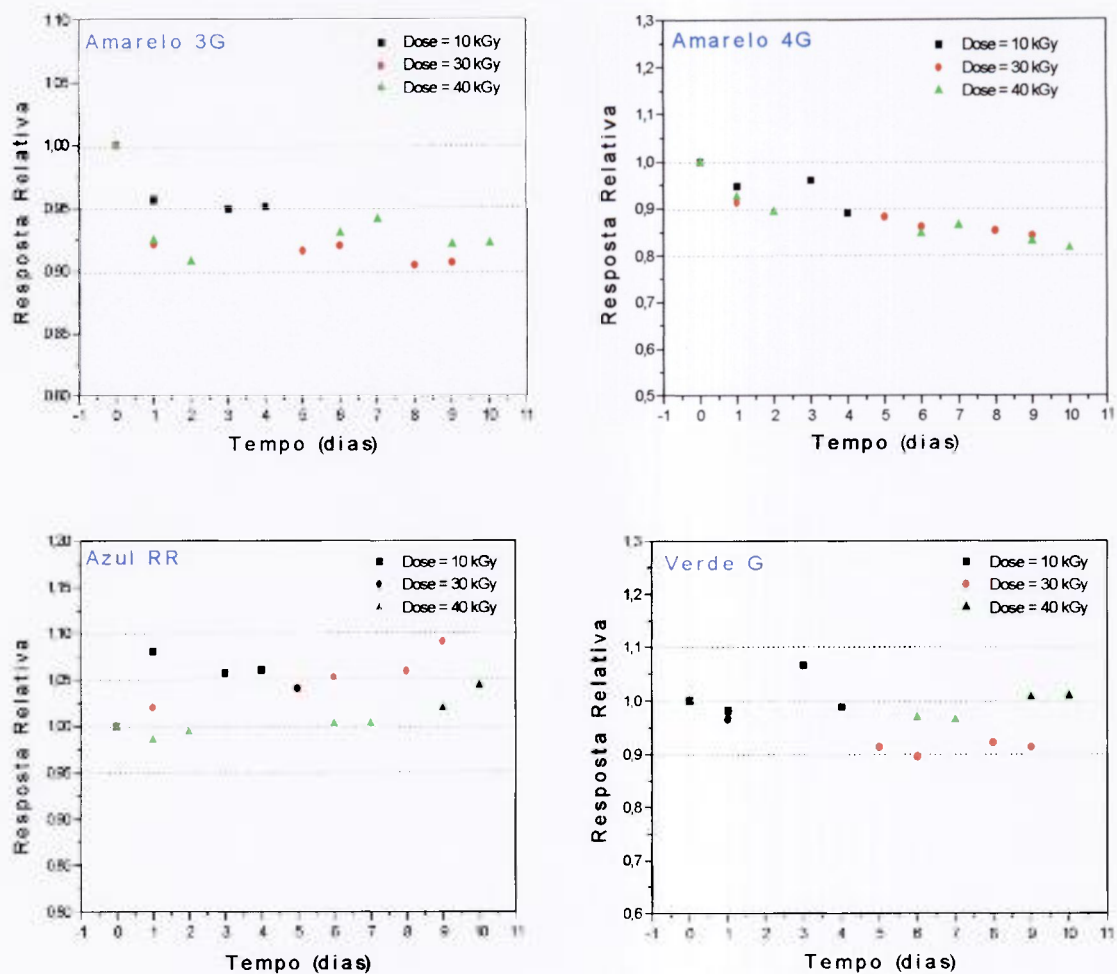


FIGURA 4.18 – Variação da resposta com o tempo de exposição à luz, dos detectores de PMMA desenvolvidos e do padrão Red 4034 Perspex irradiados com doses de 10, 30 e 40 kGy de ^{60}Co . Medidas de absorvância realizadas em tempos pré-determinados. *Continua.*

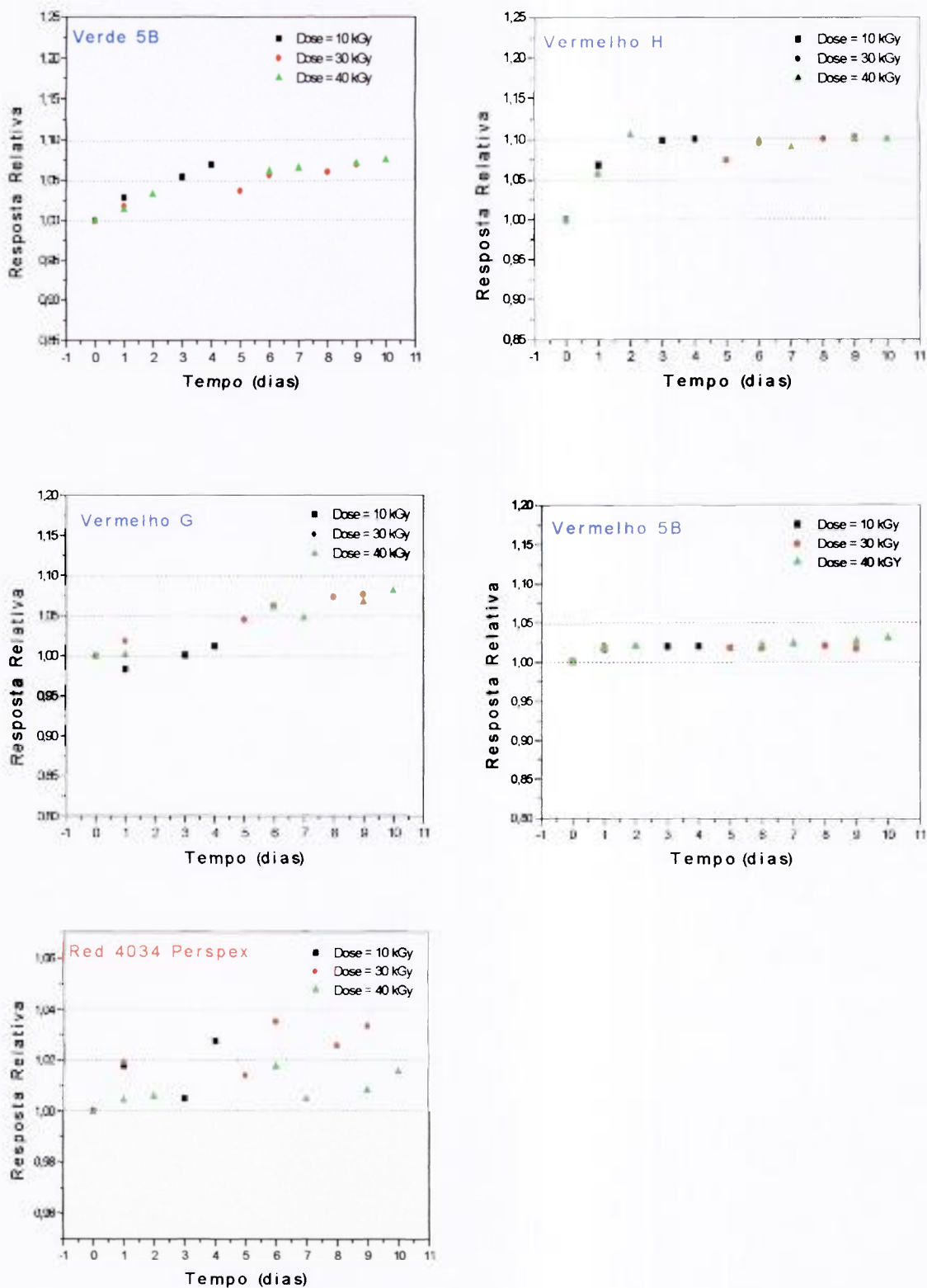


FIGURA 4.18 – *Continuação* – Variação da resposta com o tempo de exposição à luz, dos detectores de PMMA desenvolvidos e do padrão Red 4034 Perspex irradiados com doses de 10, 30 e 40 kGy de ^{60}Co . Medidas de absorvância realizadas em tempos pré-determinados.

4.2.5 Influência da temperatura na resposta dos detectores

Os detectores não irradiados foram expostos por uma hora a temperaturas de 4, 40, 80 e 100°C, após estabilização. Foram realizadas medidas de absorvância dos detectores não expostos e expostos ao tratamento térmico. Os dados obtidos para cada detector são mostrados na **FIG. 4.19**. Os detectores que contém os corantes amarelo 4G e vermelho G foram os que apresentaram a maior variação da resposta. Os detectores, após serem irradiados na fonte Gammacell com dose de 20 kGy, foram expostos às mesmas condições descritas anteriormente. Os resultados obtidos são mostrados na **FIG. 4.20**. Pode ser observado que o comportamento dos detectores irradiados é semelhante ao dos detectores não irradiados. Nas duas situações, a resposta relativa foi determinada quanto ao valor de absorvância por unidade de espessura normalizada para o valor obtido na situação na qual os detectores não foram expostos a variação de temperatura.

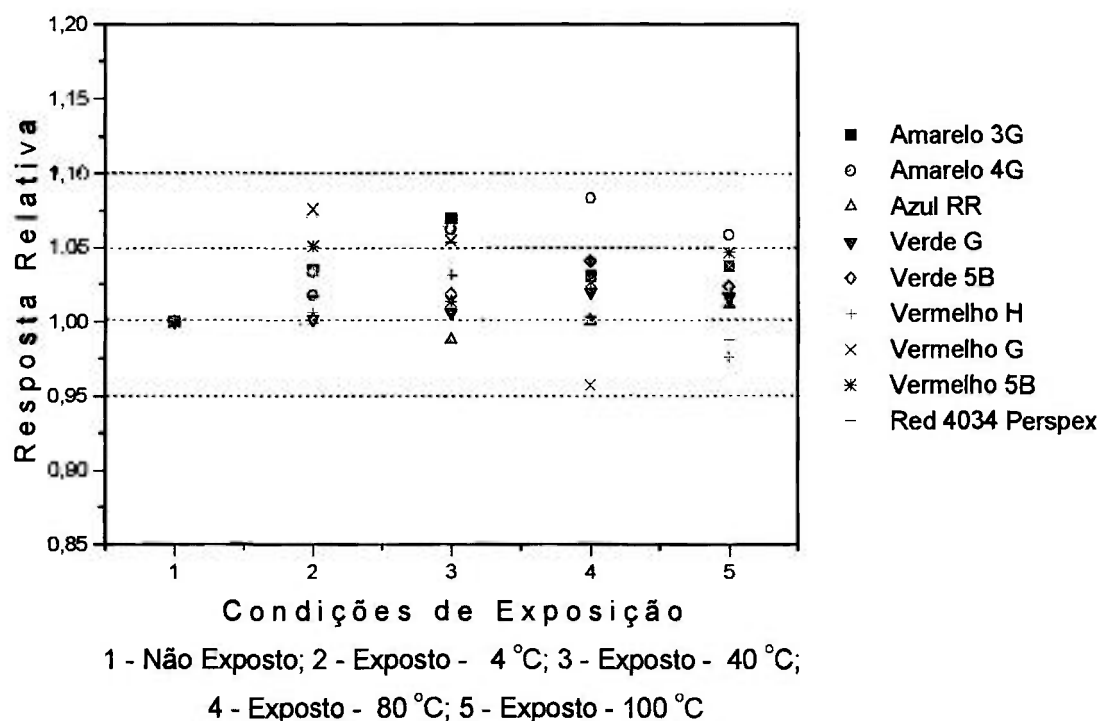


FIGURA 4.19 – Variação da resposta dos detectores de PMMA, não irradiados, não expostos e expostos a temperaturas entre 4 e 100°C.

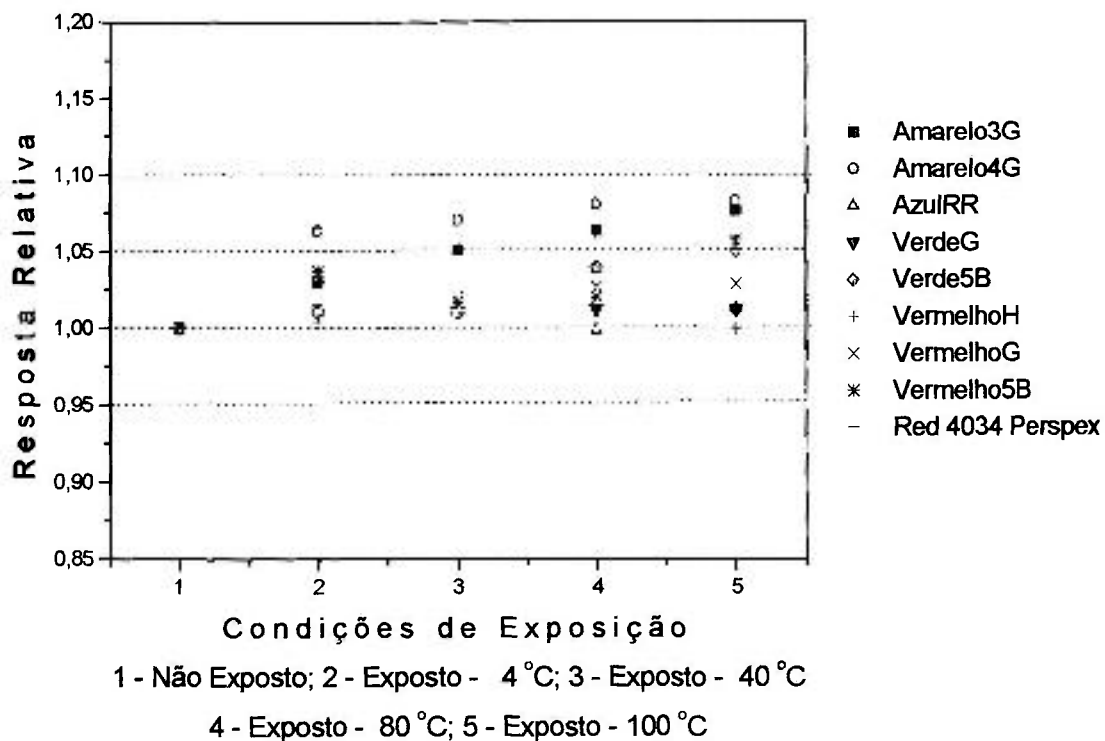


FIGURA 4.20 – Variação da resposta dos detectores de PMMA irradiados com dose de 20 kGy de ^{60}Co , não expostos e expostos a temperaturas entre 4 e 100°C.

4.2.6 Efeito da umidade relativa na resposta dos detectores

As condições de umidade relativa foram preparadas conforme exposto no item 2.3.5.2. Os detectores não irradiados foram expostos, por várias horas, em ambiente com valores de umidade relativa 0%, 75,5%, 93,0% e 100,0%, e, em tempos pré-determinados, foram realizadas medidas de absorvância. A resposta relativa foi determinada quanto ao valor de absorvância por unidade de espessura normalizada para a resposta obtida nas condições de umidade relativa 0%. Os valores obtidos são mostrados no gráfico da **FIG. 4.21**. Foi observado que os detectores que contém o corante verde foram os que apresentaram menor variação na resposta (< 2,5%), no entanto, não foi observada variação significativa nos demais detectores, o maior valor encontrado foi de 5,0% para os corantes vermelho H e vermelho G, para os padrões foi encontrado 5% para o Red Perspex e 10% para o Gammachrome YR.

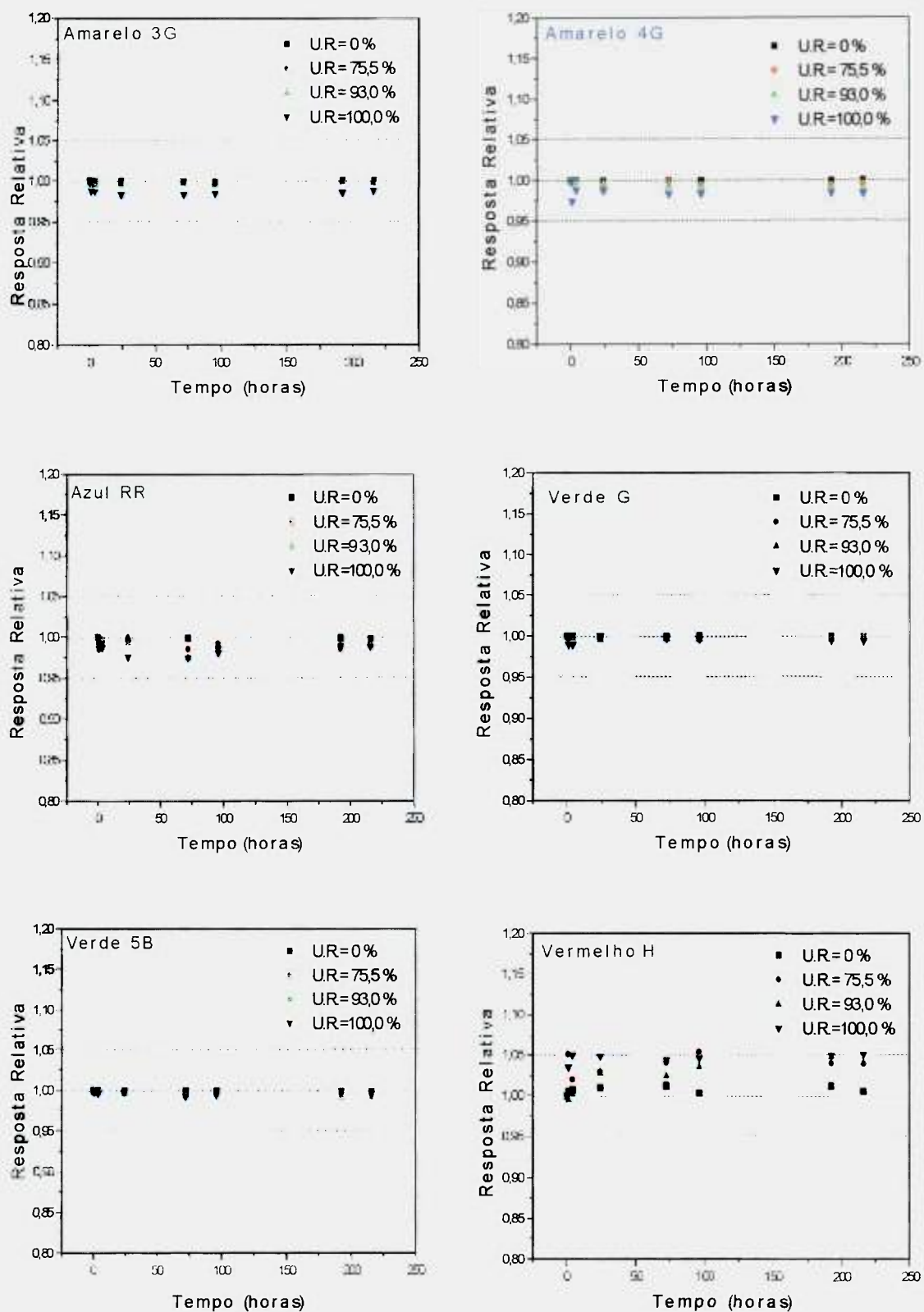


FIGURA 4.21 – Efeito da variação da umidade relativa na resposta dos detectores de PMMA não irradiados. *Continua.*

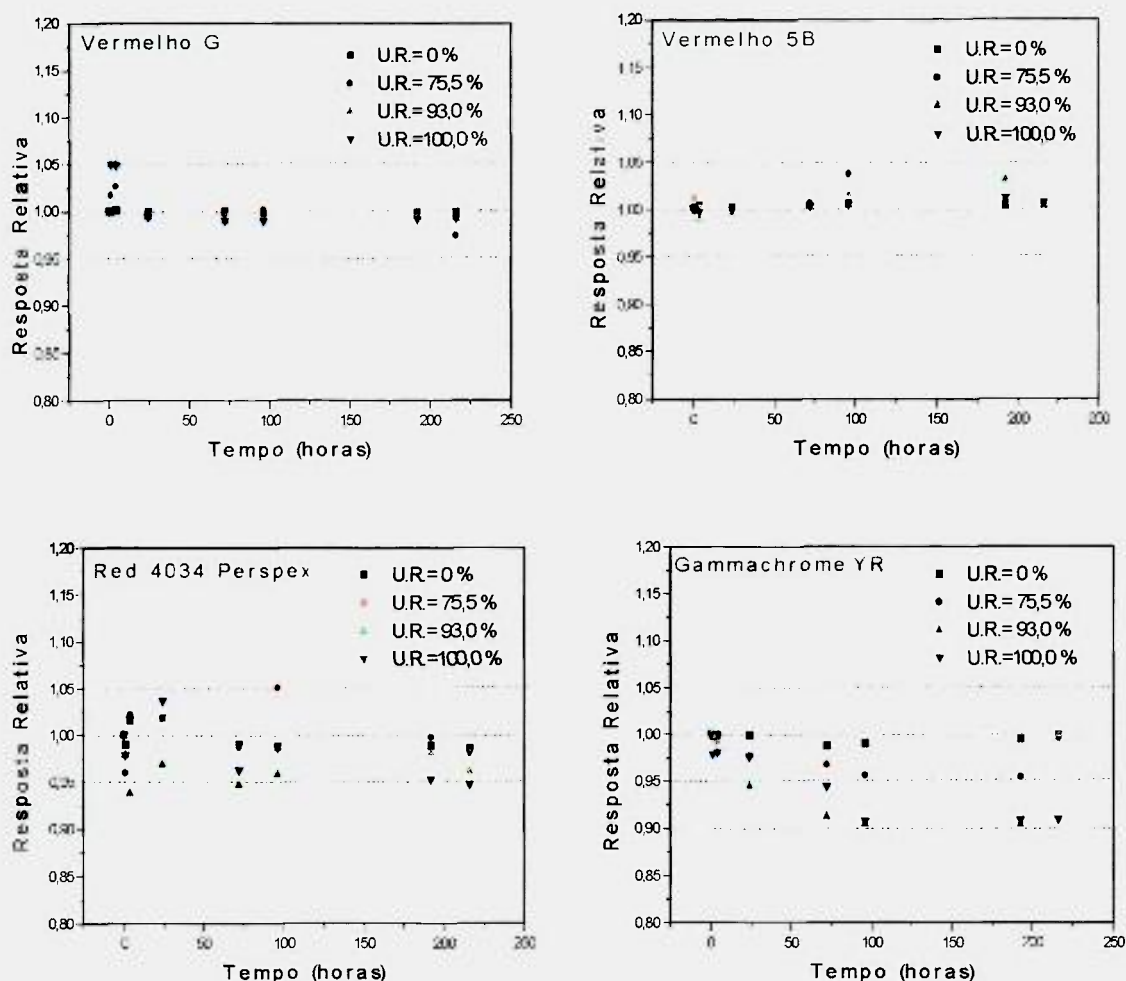


FIGURA 4.21 – *Continuação* – Efeito da variação da umidade relativa na resposta dos detectores de PMMA não irradiados.

Para determinar o efeito da U.R. em detectores irradiados, os detectores foram expostos durante 24 horas às variações de U.R. descritas anteriormente, após a exposição foram irradiados na fonte Gammacell com dose igual a 20 kGy, nas mesmas condições de U.R.. Logo após a irradiação e após 24 horas da irradiação foram realizadas medidas de absorvância. Os resultados obtidos são mostrados no gráfico da **FIG. 4.22**. A resposta relativa foi determinada quanto ao valor de absorvância por unidade de espessura normalizada para a resposta obtida nas condições de umidade relativa ambiente (60%), mantida constante com o uso de desumidificadores. A variação apresentada nos valores da resposta é menor que 5 %, inclusive para o Red Perspex, somente os detectores que contém

o corante vermelho H e vermelho G apresentaram variação superior a 5 % em ambientes com valores de U.R. altos.

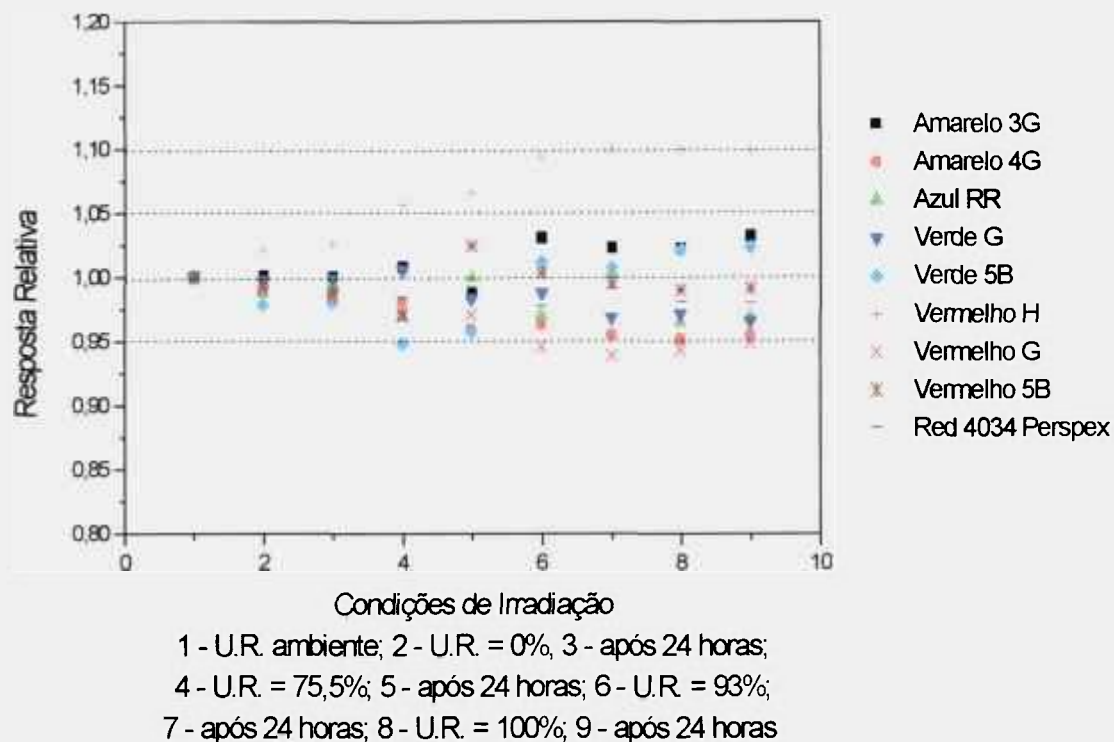


FIGURA 4.22 – Efeito da variação da umidade relativa na resposta dos detectores de PMMA irradiados com dose de 20 kGy de ^{60}Co .

4.2.7 Reprodutibilidade da resposta

A reprodutibilidade da resposta na medida da absorvância de diferentes amostras de um lote foi determinada irradiando-se vários detectores selecionados ao acaso, de um mesmo lote, com dose de 20 kGy. Os resultados para todos os detectores diferentes são mostrados no gráfico da FIG. 4.23 e mostram que a reprodutibilidade do lote de detectores é melhor que 98% (1σ). A diferença da resposta pode ser por causa do posicionamento do detector, na fonte de radiação.

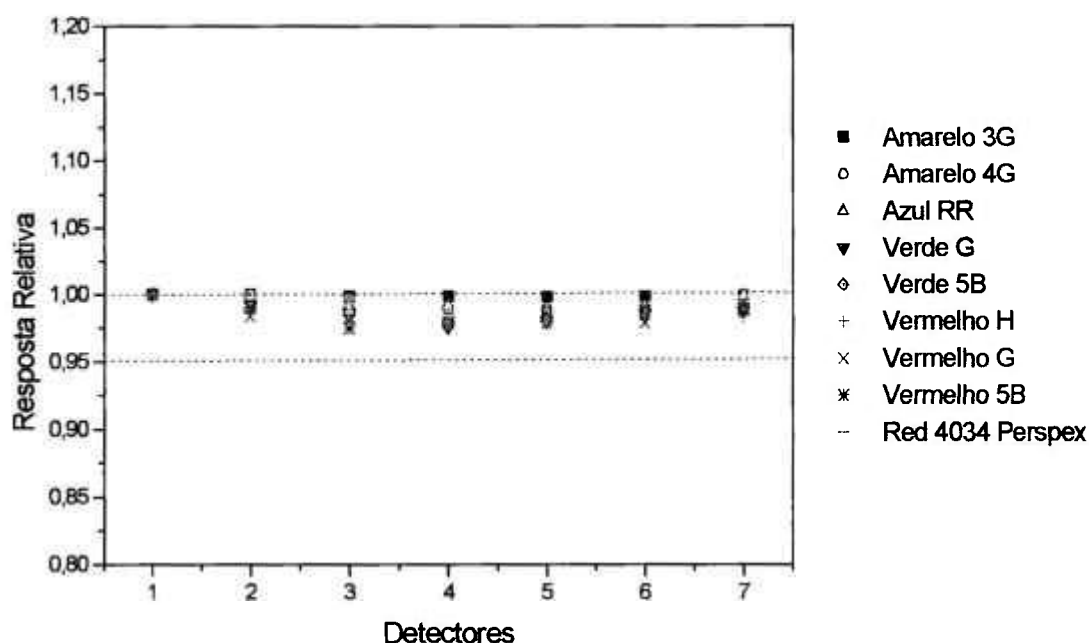


FIGURA 4.23 – Reprodutibilidade da resposta do lote dos detectores de PMMA irradiados com dose de 20 kGy.

4.2.8 Dependência energética da resposta para elétrons

A resposta relativa dos detectores para a irradiação com elétrons foi determinada quanto ao valor de mudança na absorvância por unidade de espessura normalizada para o valor de menor energia dos elétrons.

Os detectores foram irradiados no acelerador de elétrons, com dose de 20 kGy variando os parâmetros conforme exposto na **TAB. 4.3**. Após a análise dos resultados que são mostrados na **FIG. 4.24**, foram irradiadas, com os mesmos parâmetros, amostras de PMMA (sem a presença de corantes) com espessuras que variaram entre 1,2 e 5,6 mm, os resultados são mostrados na **FIG. 4.25**. Considerando-se que o alcance dos elétrons com energias de 0,80, 1,25 e 1,50 MeV é 1,75, 3,29 e 4,16 mm, respectivamente (**ANEXO 4**). Pode-se observar pela **FIG. 4.25** que se as espessuras dos detectores forem mantidas dentro dos limites de alcance dos elétrons não se observa dependência energética da resposta nos detectores no intervalo analisado.

TABELA 4.3 – Parâmetros de irradiação no acelerador de elétrons JOB 188 – diferentes energias.

Parâmetro	Energia (MeV)	Corrente (mA)
I	0,80	0,6
II	1,25	0,6
III	1,50	0,6

Outros parâmetros: Dose = 20 kGy; Velocidade = 6,72 m/min.; Varredura = 100 cm.

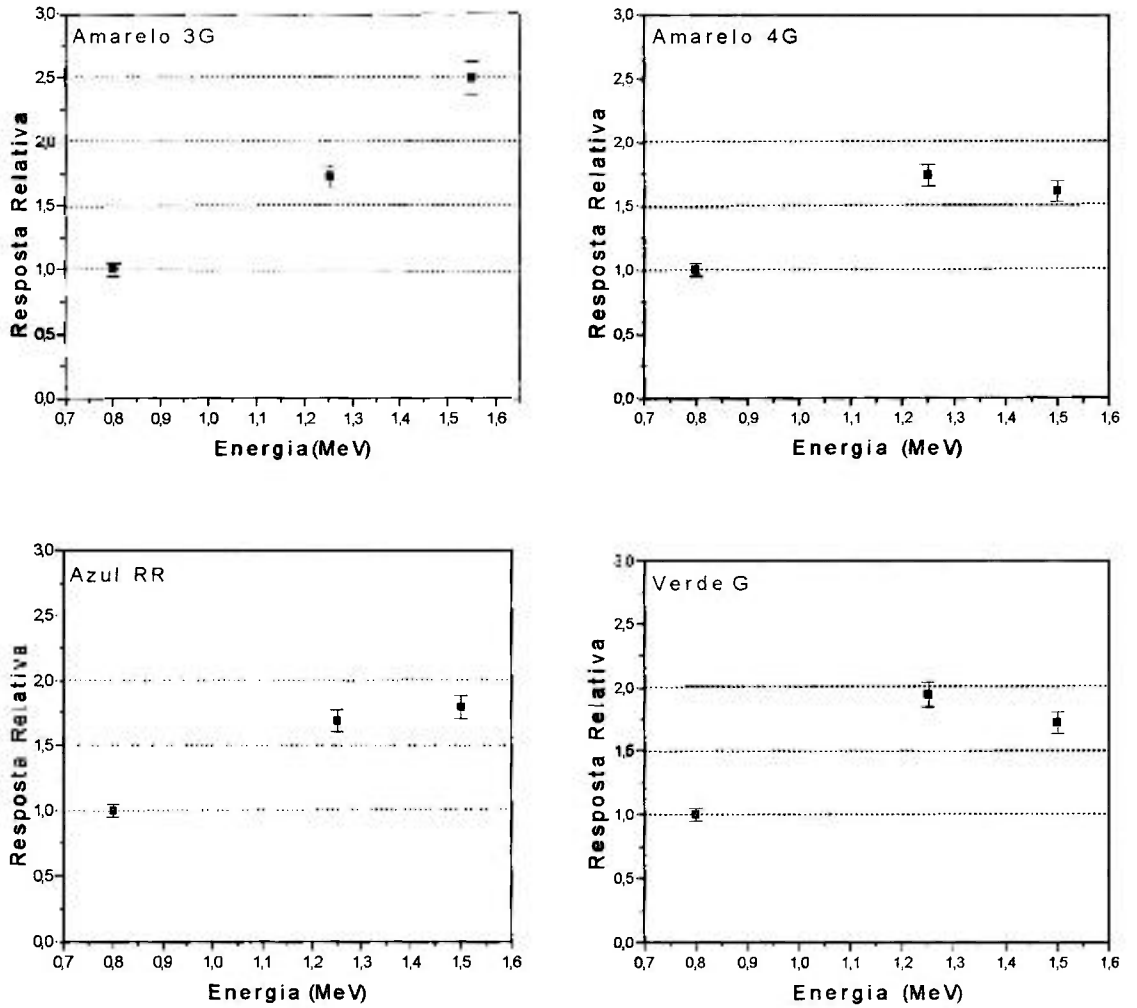


FIGURA 4.24 – Dependência energética da resposta dos detectores de PMMA e do padrão comparativo (Red 4034 Perspex), irradiados no acelerador de elétrons com dose de 20 kGy.

Continua.

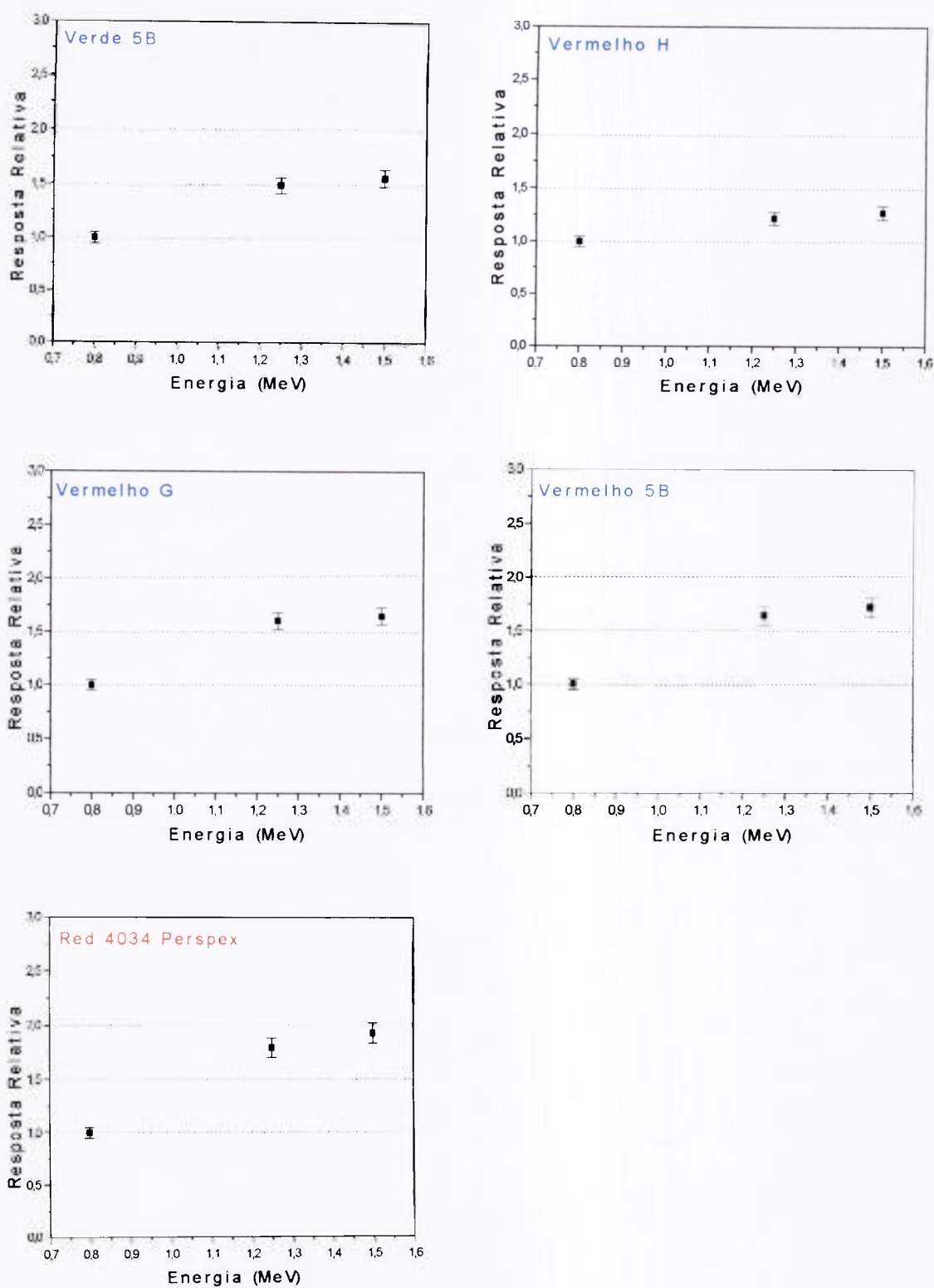


FIGURA 4.24 – *Continuação* – Dependência energética da resposta dos detectores de PMMA e do padrão comparativo (Red 4034 Perspex), irradiados no acelerador de elétrons com dose de 20 kGy.

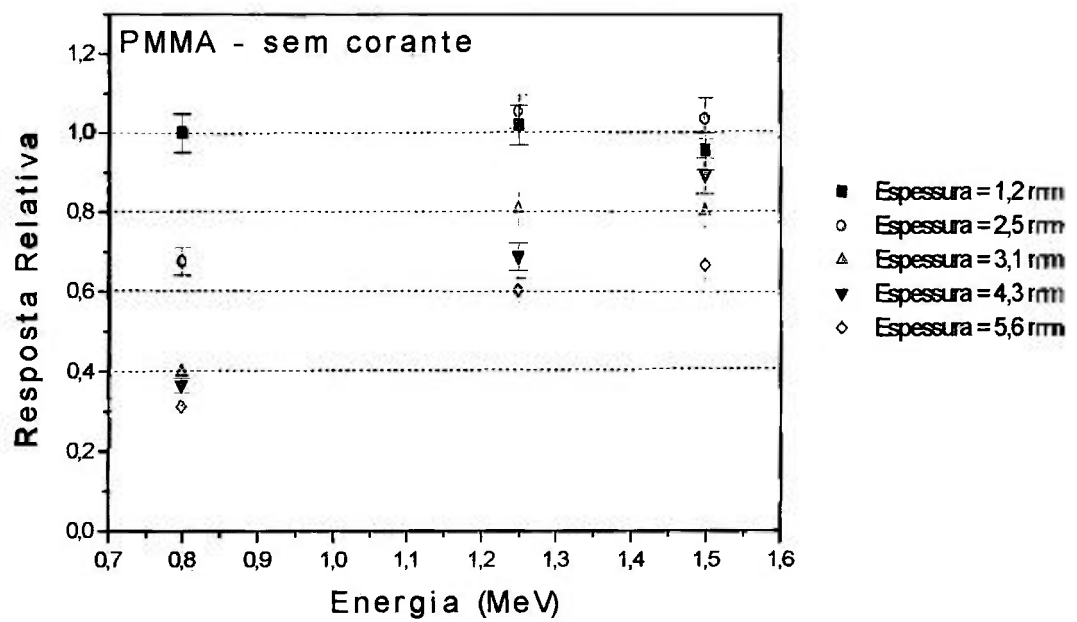


FIGURA 4.25 – Dependência energética da resposta de amostras de PMMA (sem corante) irradiadas no acelerador de elétrons com dose de 20 kGy.

4.2.9 Dependência da resposta com a taxa de dose

A resposta relativa do detector foi determinada quanto ao valor de mudança na absorvância por unidade de espessura normalizada para o valor de menor taxa de dose.

4.2.9.1 Elétrons

Os detectores foram irradiados no acelerador de elétrons com dose de 20 kGy variando os parâmetros conforme apresentado na **TAB. 4.4** para obtenção de diferentes taxas de dose. Os resultados são mostrados nos gráficos da **FIG. 4.26**. Os detectores apresentaram variação menor que 10% no intervalo entre 2,66 e 45,22 kGy/s, com exceção do detector com o corante amarelo 3G que apresentou até 20% de variação.

TABELA 4.4 – Parâmetros de irradiação no acelerador de elétrons JOB 188 - diferentes taxas de dose.

Parâmetro	Energia (MeV)	Corrente (mA)	Taxa de dose (kGy/s)
I	1,25	0,6	2,66
II	1,25	5,1	22,61
III	1,25	10,2	45,22

Outros parâmetros: Dose = 20 kGy; Velocidade = 6,72 m/min.; Varredura = 100 cm

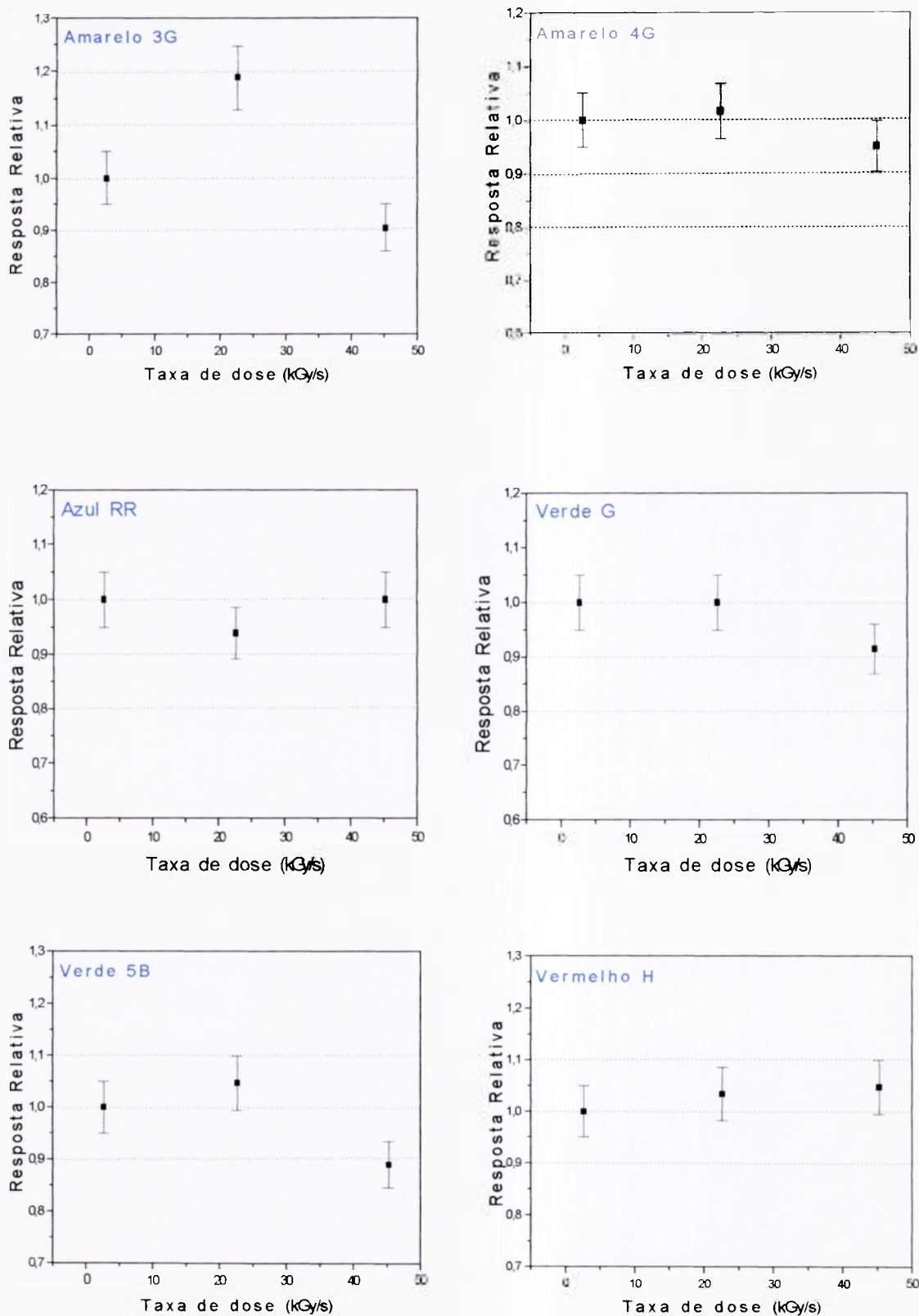


FIGURA 4.26 – Variação da resposta de detectores de PMMA e do padrão em função da taxa de dose, irradiados no acelerador de elétrons com dose de 20 kGy. *Continua.*

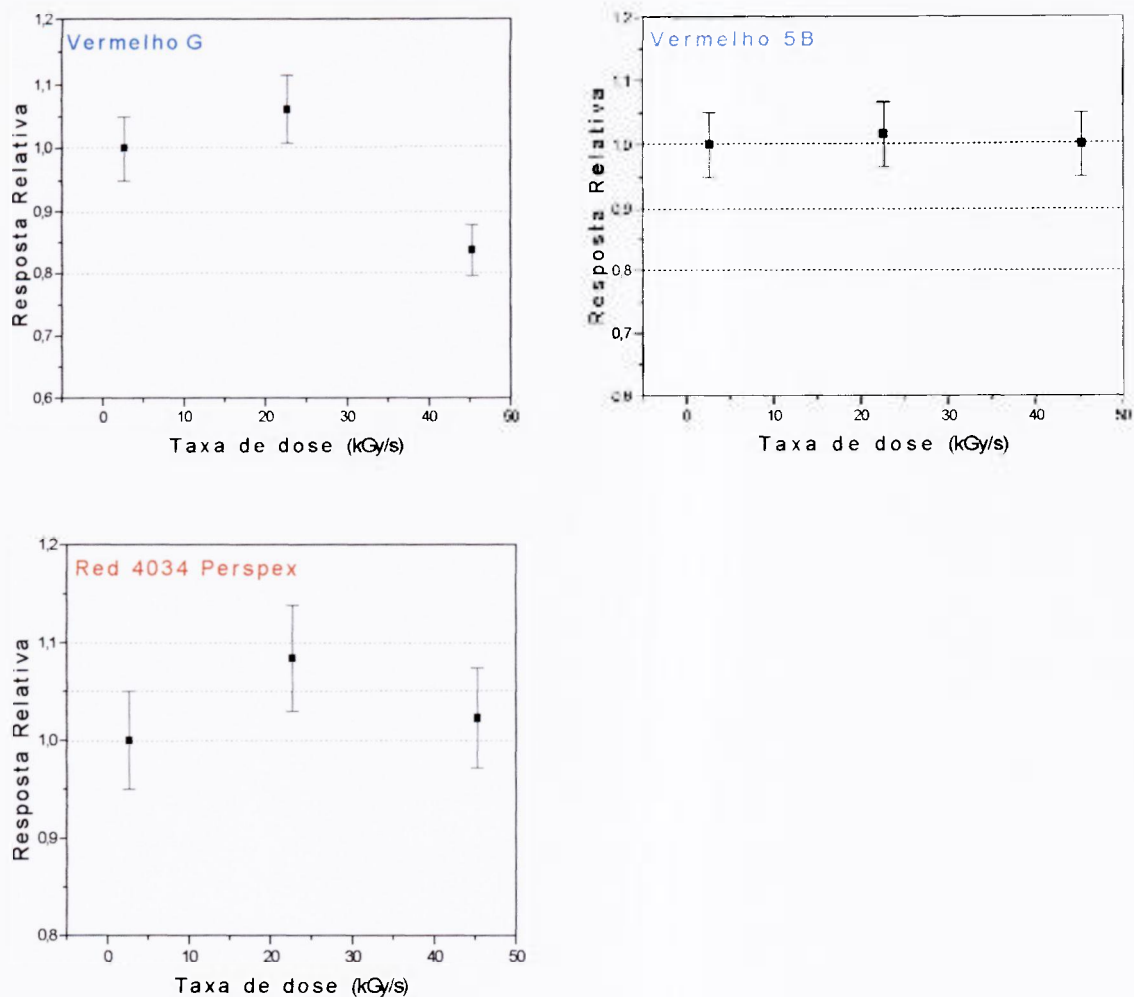


FIGURA 4.26 – Continuação – Variação da resposta de detectores de PMMA e do padrão red perspex, em função da taxa de dose, irradiados no acelerador de elétrons com dose de 20 kGy.

4.2.9.2 Fótons

Utilizando a fonte Gammacell, também foi verificada a influência da taxa de dose na resposta dos detectores. Empregando-se atenuadores de chumbo, os detectores foram irradiados com 20 kGy e com as taxas de dose de: 4,90 kGy/h (sem atenuador); 2,45 kGy/h (com atenuador de 50%); 1,47 kGy/h (com atenuador de 70%) e com 0,49 kGy/h (com atenuador de 90%), os resultados são mostrados nos gráficos da **FIG. 4.27**.

Os detectores que contém os corantes amarelo 4G, verde G, verde 5B, vermelho H e vermelho G apresentaram comportamento semelhante ao padrão comparativo Red 4034 Perspex, isto é, para diferenças entre as taxas de dose de até três vezes a variação é menor que 5%, diferenças entre as taxas de dose acima de três vezes até dez vezes a variação é menor que 10%. Para os detectores que contém os corantes amarelo 3G, azul RR e vermelho 5B a variação chegou a valores acima de 20% para diferenças entre as taxas de dose acima de cinco vezes.

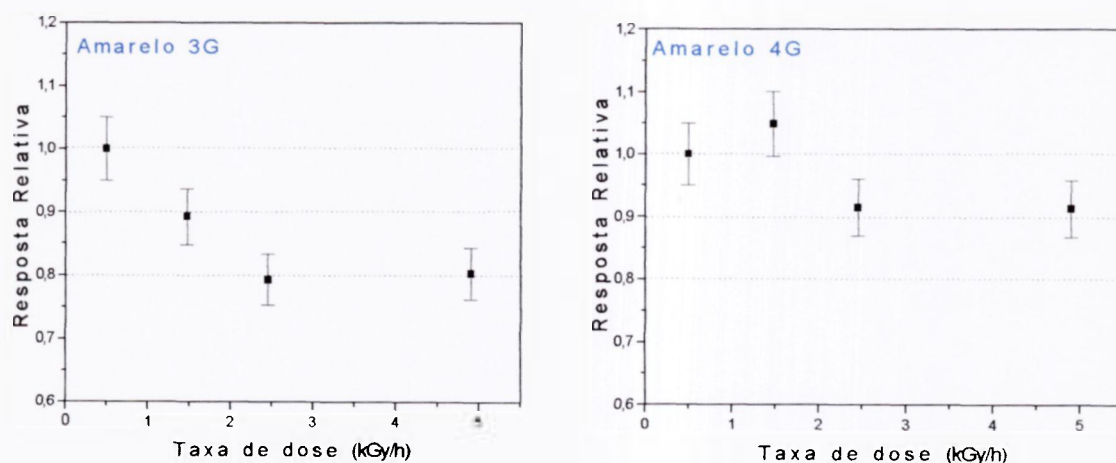


FIGURA 4.27 – Variação da resposta de detectores de PMMA e do padrão em função da taxa de dose, irradiados com dose de 20 kGy de ^{60}Co . *Continua.*

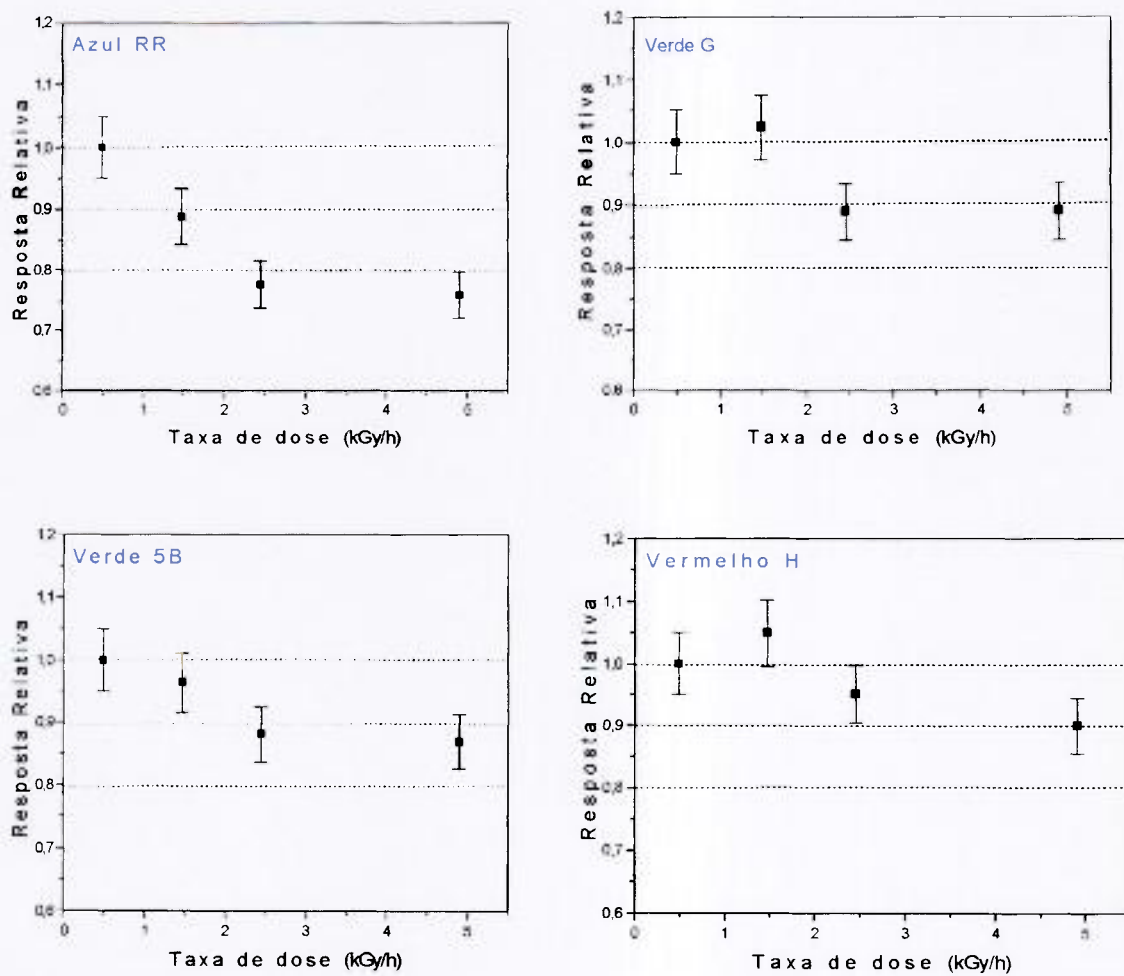


FIGURA 4.27 – Continuação – Variação da resposta de detectores de PMMA e do padrão em função da taxa de dose, irradiados com dose de 20 kGy de ^{60}Co . *Continua.*

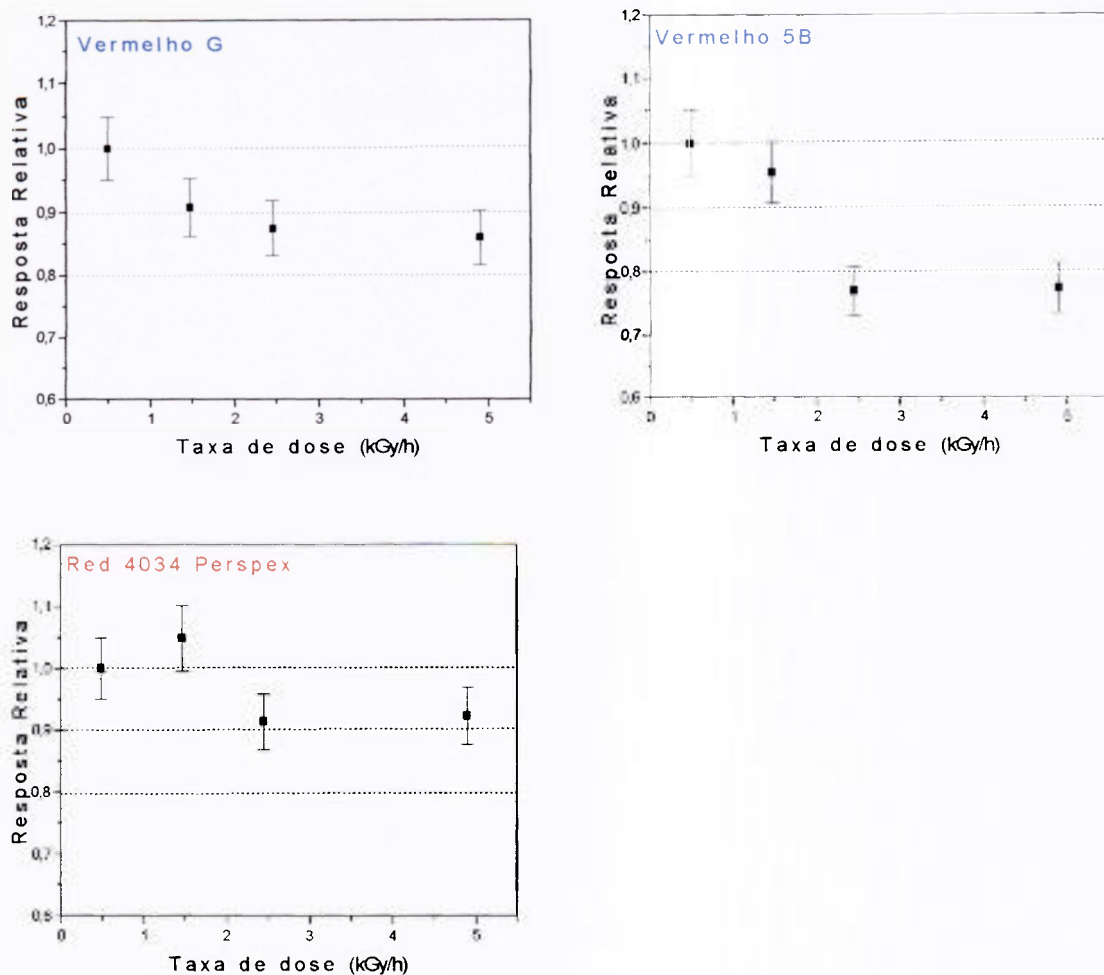


FIGURA 4.27 – *Continuação* – Variação da resposta de detectores de PMMA e do padrão em função da taxa de dose, irradiados com dose de 20 kGy de ^{60}Co .

4.2.10 Curva de calibração – Radiação gama

São mostradas na FIG. 4.28 (a) e (b) as curvas de calibração dos padrões comparativos *Red 4034 Perspex* e *Gammachrome YR* obtidas pela *Harwell Dosimeters* [81].

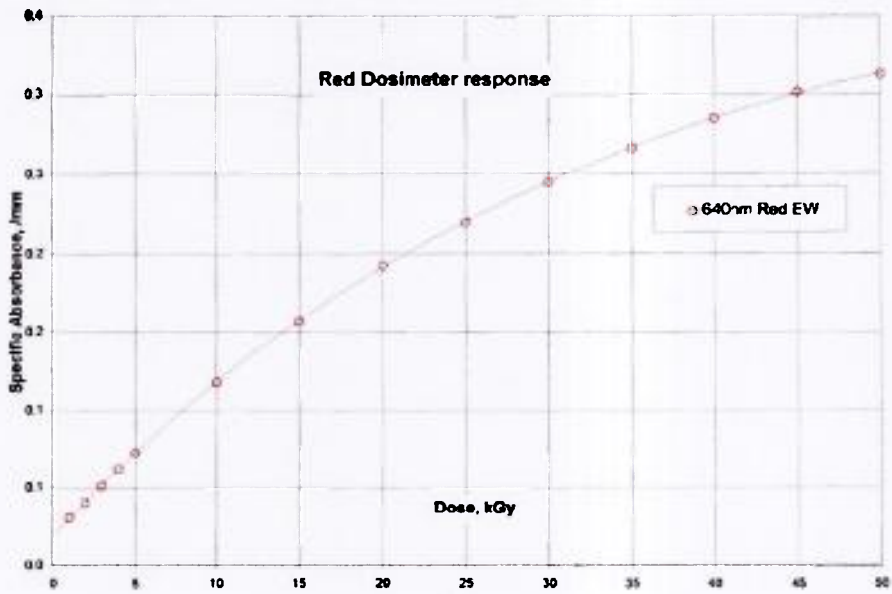
Após os testes preliminares, os detectores foram irradiados no intervalo de dose entre 0,5 e 100 kGy. Na FIG. 4.29 (a), (b), (c) e (d); FIG. 4.30 (a), (b), (c) e (d); FIG. 4.31 (a), (b), (c) e (d); FIG. 4.32 (a), (b), (c) e (d); FIG. 4.33 (a), (b), (c) e (d); FIG. 4.34 (a), (b), (c) e (d); FIG. 4.35 (a), (b), (c) e (d); FIG. 4.36 (a), (b), (c) e (d); FIG. 4.37 (a), (b), (c) e (d) e FIG. 4.38 (a) e (b) são mostrados os resultados obtidos com os detectores PMMA / corante *Macrolex Amarelo 3G*, PMMA / corante *Macrolex Amarelo 4G*, PMMA / corante *Macrolex Azul RR*, PMMA / corante *Macrolex Verde G*, PMMA / corante *Macrolex Verde 5B*, PMMA / corante *Macrolex Vermelho H*, PMMA / corante *Macrolex Vermelho G*, PMMA / corante *Macrolex Vermelho 5B* e dos padrões *Red 4034 Perspex* e *Gammachrome YR*, respectivamente.

Nas curvas mostradas nas Figuras 4.29 a 4.38, índice (a), foi adotado um ajuste polinomial de terceira ordem e nas demais Figuras são mostradas a região linear da curva.

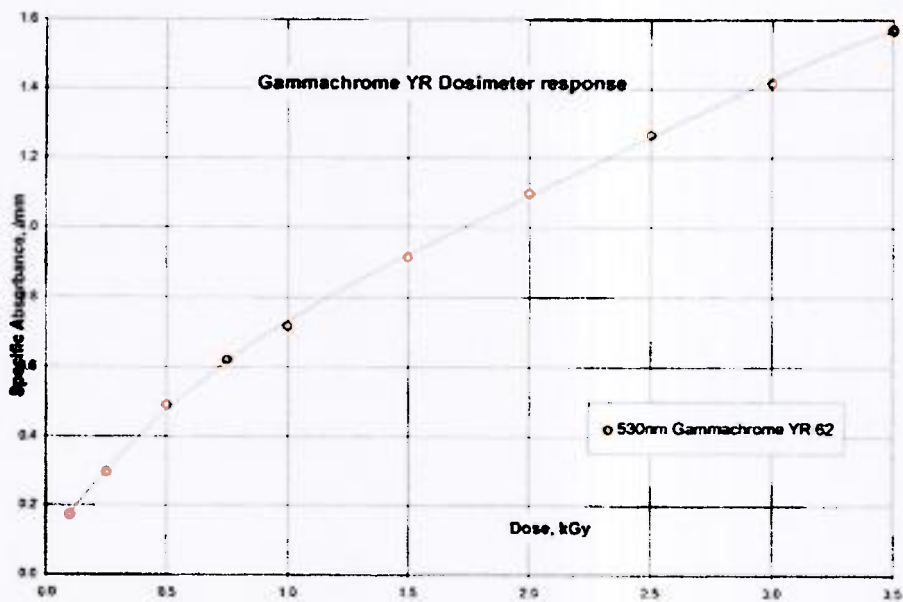
Para a análise matemática são utilizadas as equações:

- Ajuste linear - $k = a + (b \cdot D)$
- Ajuste polinomial de terceira ordem - $k = a + (b \cdot D) + (c \cdot D^2) + (d \cdot D^3)$

onde D é a dose absorvida, k é absorvância específica e a, b, c e d são coeficientes que foram determinados usando um programa de computador que ajusta a curva (Origin versão 5.0).



(a)

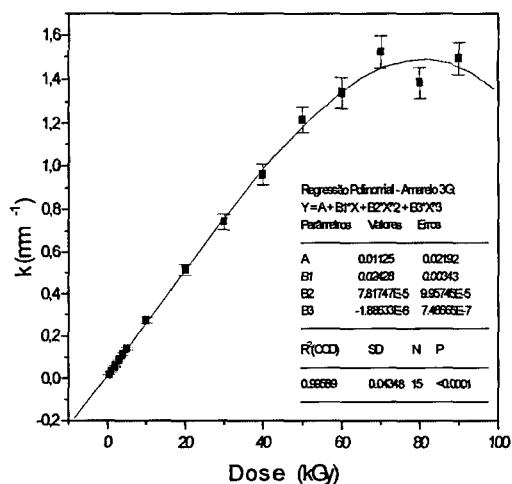


(b)

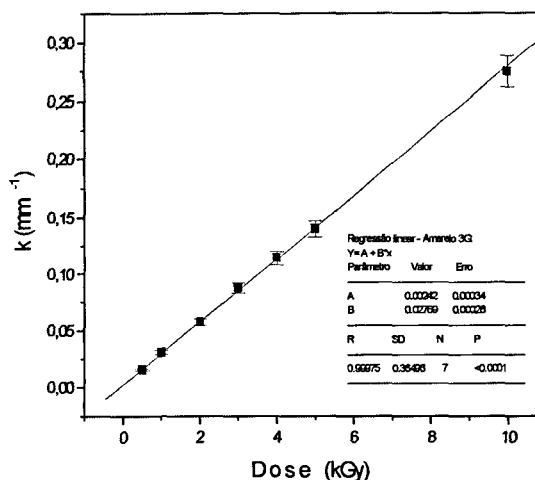
FIGURA 4.28 – Dose-resposta dos detectores de PMMA fabricados pela Harwell Dosimeters [81].

(a) Curva dose-resposta do detector *Red 4034 Perspex*, $\lambda = 640$ nm.

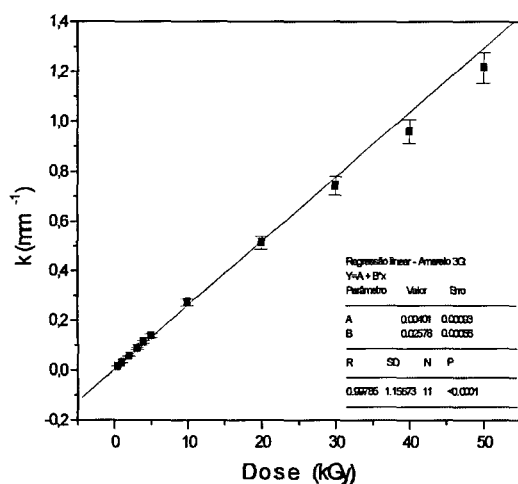
(b) Curva dose-resposta do detector *Gammachrome YR*, $\lambda = 530$ nm.



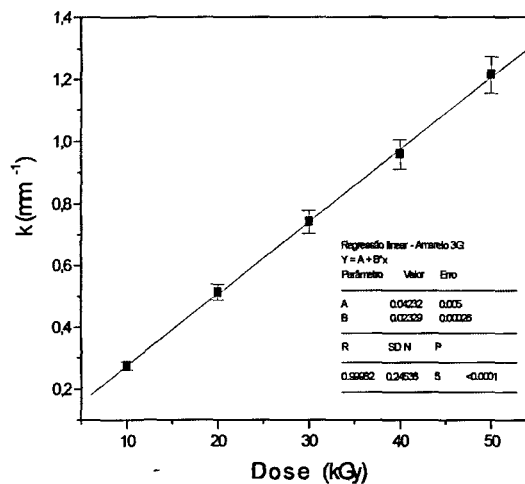
(a)



(b)



(c)



(d)

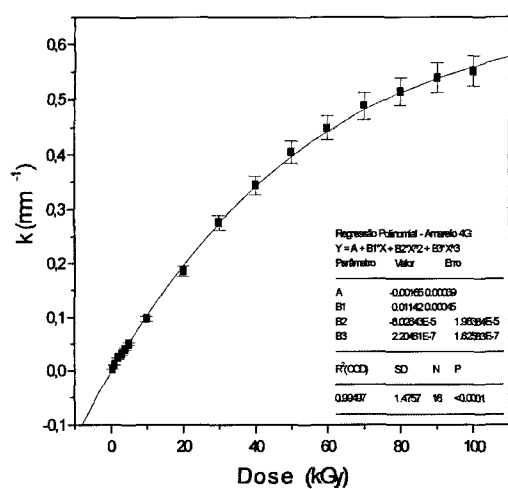
FIGURA 4.29 – Dose-resposta dos detectores de PMMA / corante *Macrolex Amarelo 3G* irradiados na fonte ^{60}Co . Doses no intervalo entre 0,5 e 100 kGy

(a) Curva dose-resposta, $\lambda = 300 \text{ nm}$.

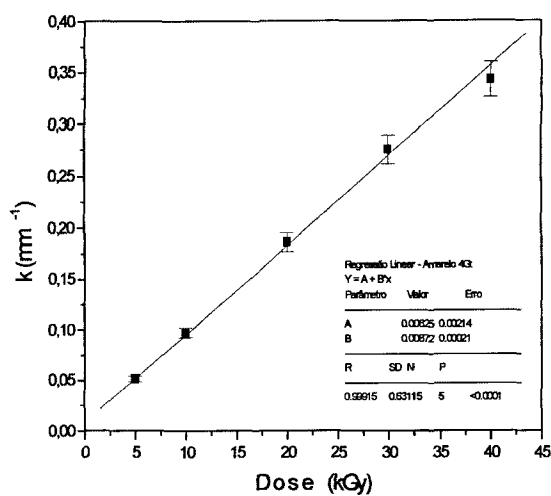
(b) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 0,5 a 10 kGy, $\lambda = 300 \text{ nm}$.

(c) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 0,5 a 50 kGy, $\lambda = 300 \text{ nm}$.

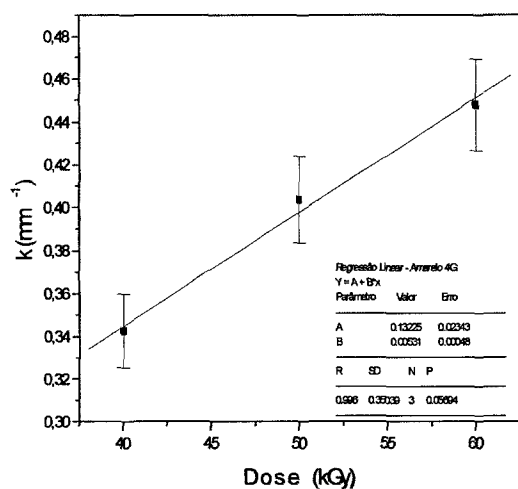
(d) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 10 a 50 kGy, $\lambda = 300 \text{ nm}$.



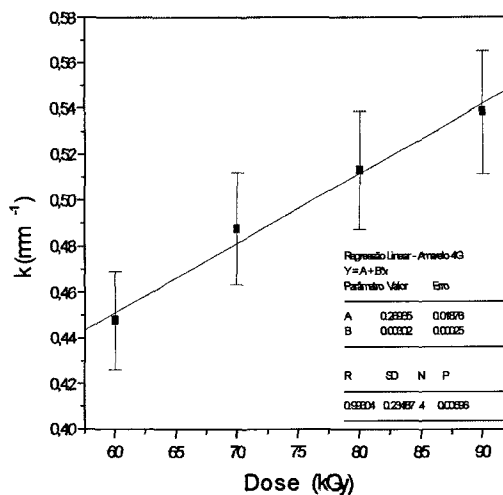
(a)



(b)



(c)



(d)

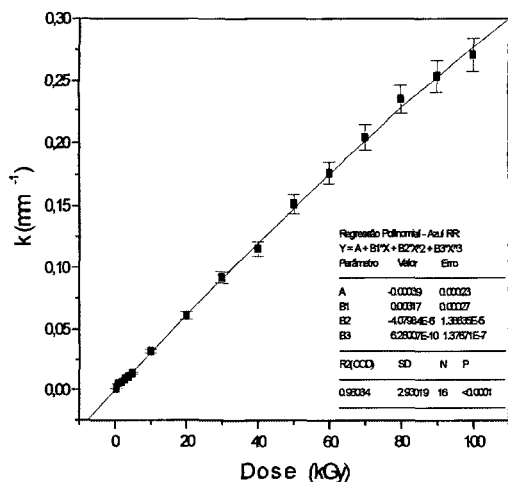
FIGURA 4.30 – Dose-resposta dos detectores de PMMA / corante *Macrolex Amarelo 4G* irradiados na fonte ^{60}Co . Doses no intervalo entre 0,5 e 100 kGy

(a) Curva dose-resposta, $\lambda = 353 \text{ nm}$.

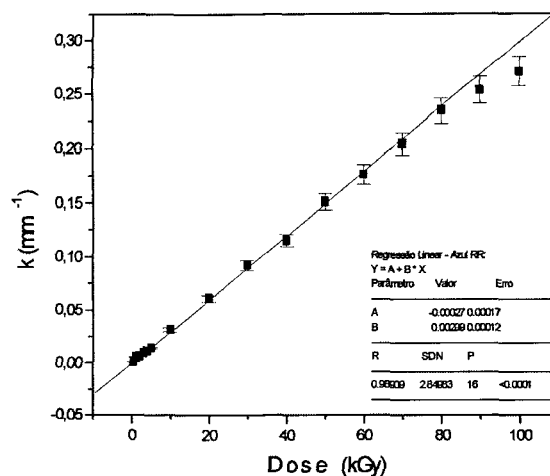
(b) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 5 a 40 kGy, $\lambda = 353 \text{ nm}$.

(c) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 40 a 60 kGy, $\lambda = 353 \text{ nm}$.

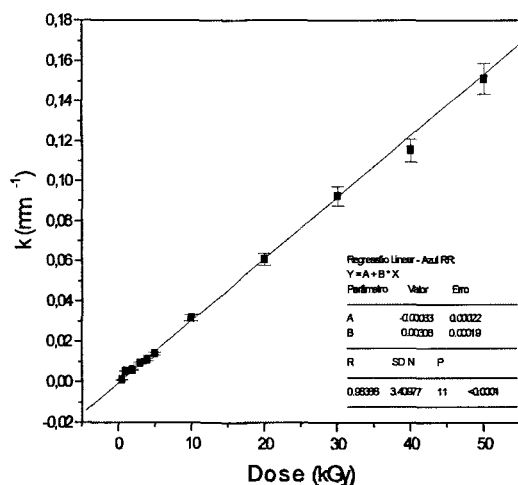
(d) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 60 a 90 kGy, $\lambda = 353 \text{ nm}$.



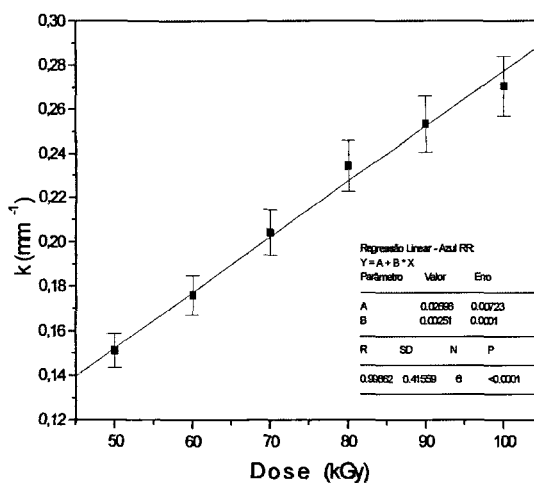
(a)



(b)



(c)



(d)

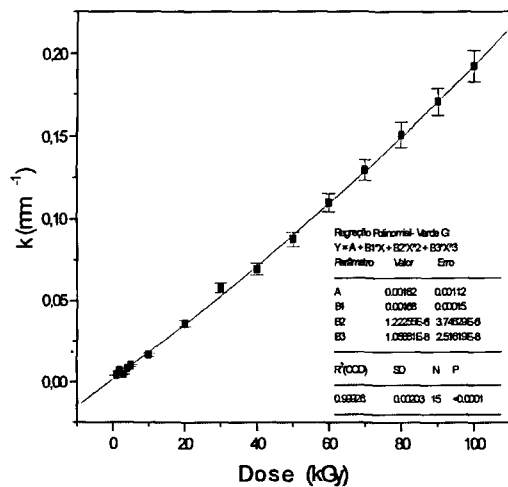
FIGURA 4.31 - Dose-resposta dos detectores com PMMA / corante *Macrolex Azul RR* irradiados na fonte ^{60}Co . Doses no intervalo entre 0,5 e 100 kGy.

(a) Curva dose-resposta, $\lambda = 450$ nm.

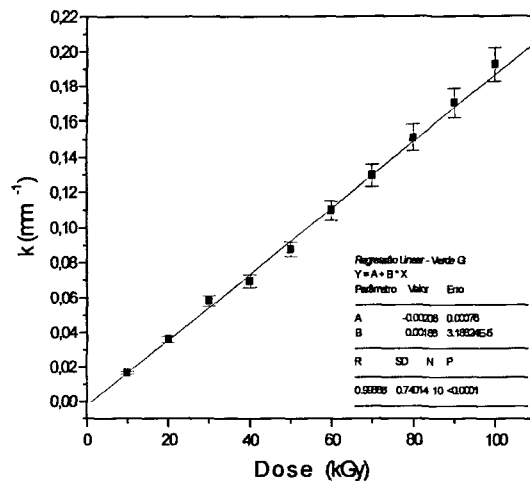
(b) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 0,5 a 100 kGy, $\lambda = 450$ nm.

(c) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 0,5 a 50 kGy, $\lambda = 450$ nm.

(d) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 50 a 100 kGy, $\lambda = 450$ nm.



(a)

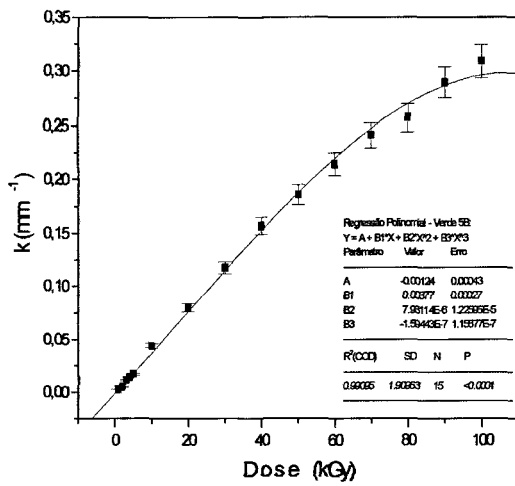


(b)

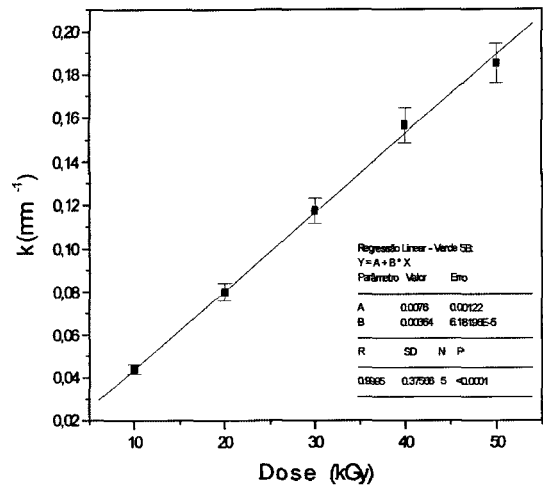
FIGURA 4.32 – Dose-resposta dos detectores com PMMA / Corante *Macrolex Verde G*, irradiados na fonte ^{60}Co . Doses no intervalo entre 1 e 100 kGy.

(a) Curva dose-resposta, $\lambda = 528$ nm.

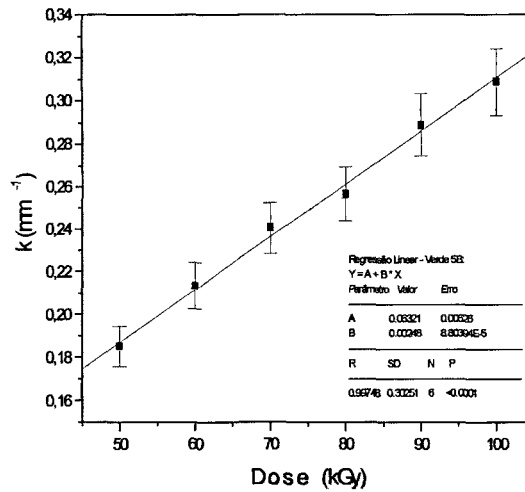
(b) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 10 a 100 kGy, $\lambda = 528$ nm.



(a)



(b)



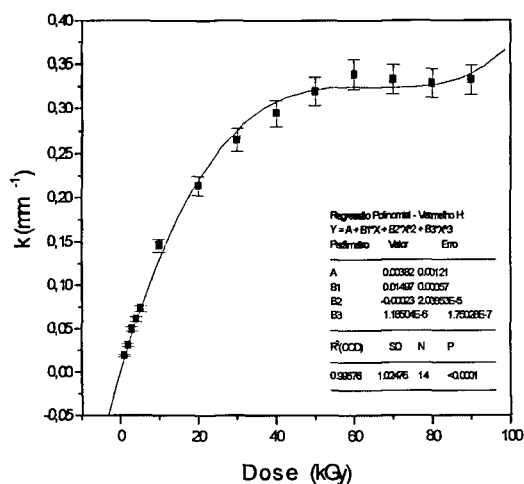
(c)

FIGURA 4.33 – Dose-resposta dos detectores com PMMA / Corante *Macrolex Verde 5B*, irradiados na fonte ^{60}Co . Doses no intervalo entre 1 e 100 kGy.

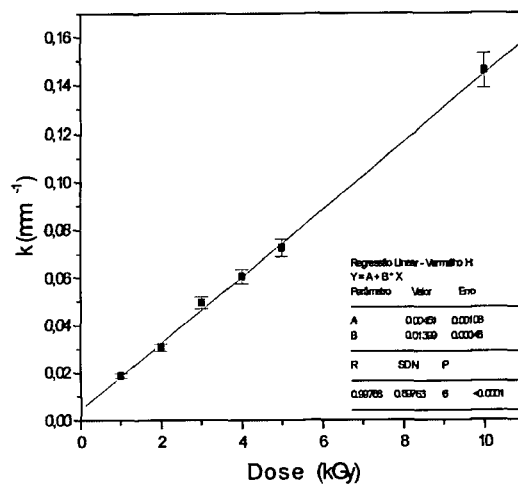
(a) Curva dose-resposta, $\lambda = 405$ nm.

(b) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 10 a 50 kGy, $\lambda = 405$ nm.

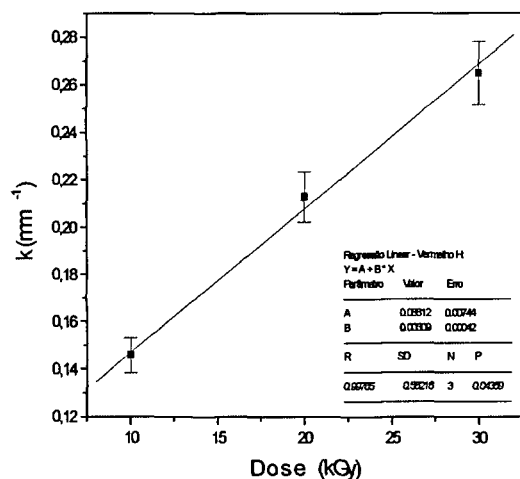
(c) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 50 a 100 kGy, $\lambda = 405$ nm.



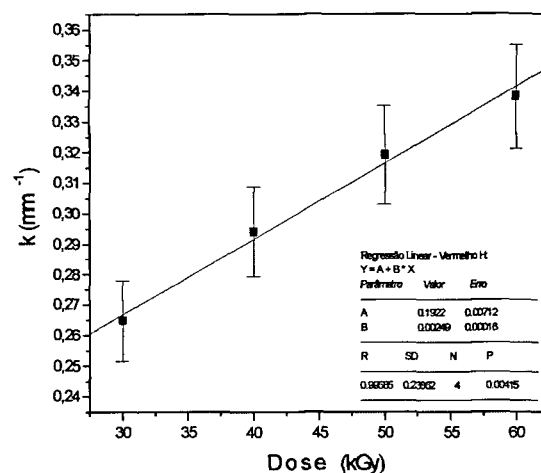
(a)



(b)



(c)



(d)

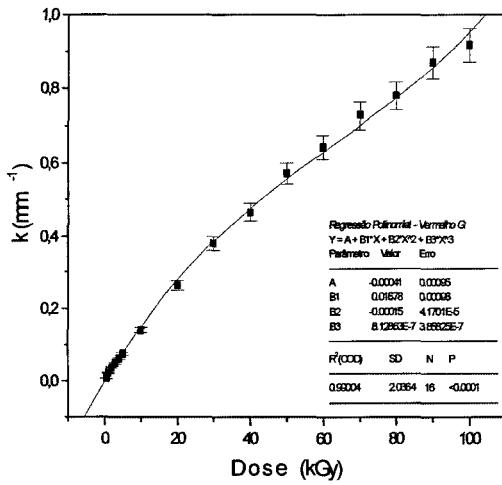
FIGURA 4.34 – Dose-resposta dos detectores com PMMA / corante *Macrolex Vermelho H* irradiados na fonte ^{60}Co . Doses no intervalo entre 1 e 90 kGy.

(a) Curva dose-resposta, $\lambda = 620$ nm.

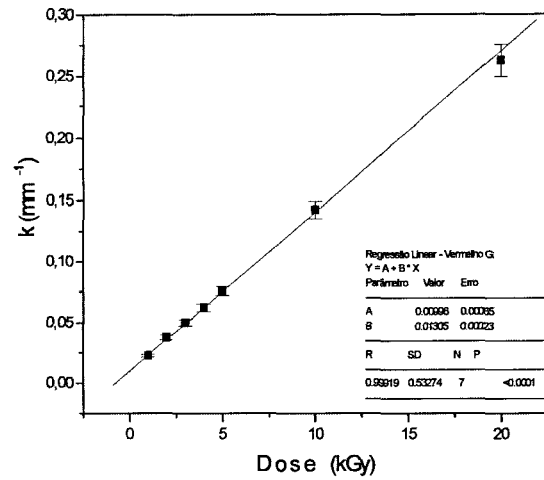
(b) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 1 a 10 kGy, $\lambda = 620$ nm.

(c) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 10 a 30 kGy, $\lambda = 620$ nm.

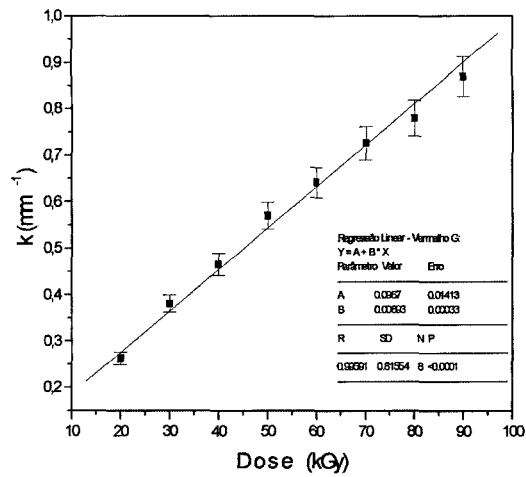
(d) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 30 a 60 kGy, $\lambda = 620$ nm.



(a)



(b)



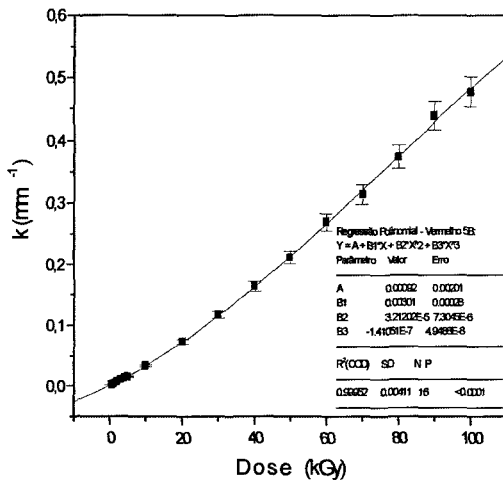
(c)

FIGURA 4.35 – Dose-resposta dos detectores com PMMA / Corante *Macrolex Vermelho G*, irradiados na fonte ^{60}Co . Doses no intervalo entre 0,5 e 100 kGy.

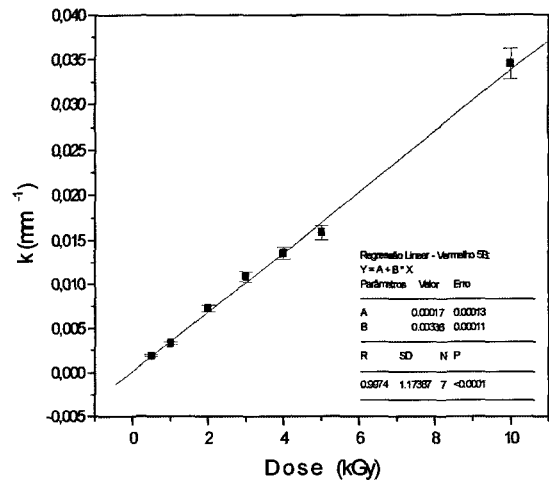
(a) Curva dose-resposta, $\lambda = 397$ nm.

(b) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 1 a 20 kGy, $\lambda = 397$ nm.

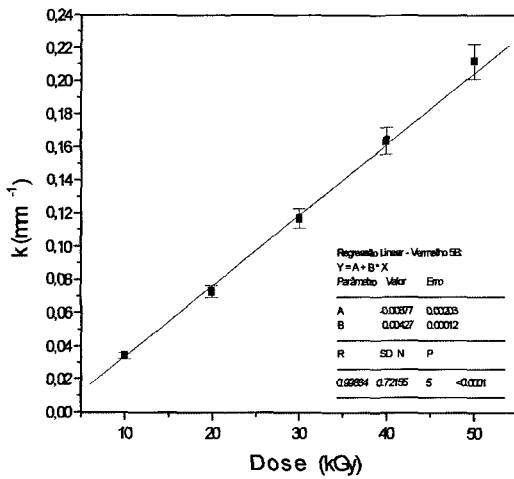
(c) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 20 a 90 kGy, $\lambda = 397$ nm.



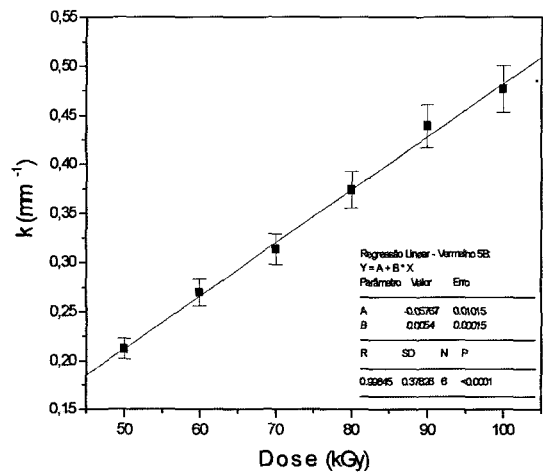
(a)



(b)



(c)



(d)

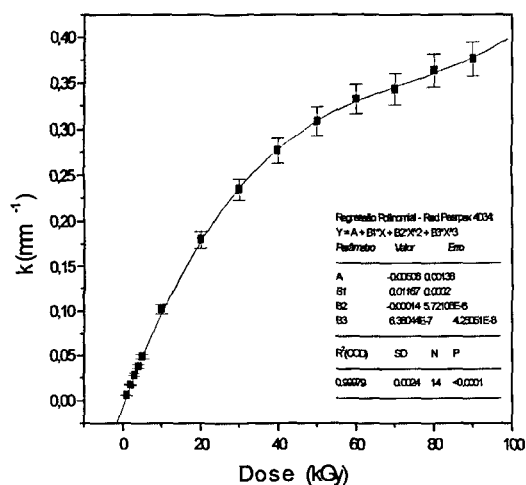
FIGURA 4.36 – Dose-resposta dos detectores com PMMA / Corante *Macrolex Vermelho 5B*, irradiados na fonte ^{60}Co . Doses no intervalo entre 0,5 e 100 kGy.

(a) Curva dose-resposta, $\lambda = 415$ nm.

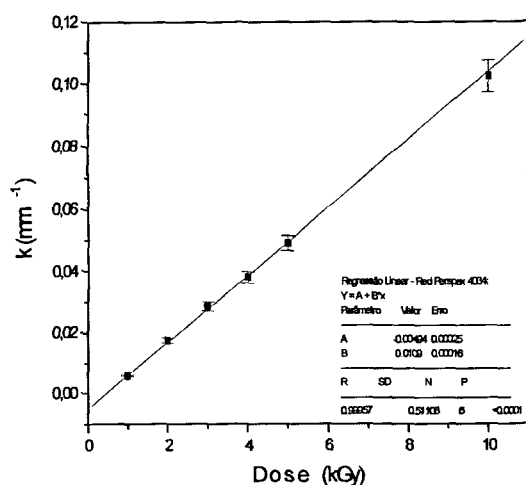
(b) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 0,5 a 10 kGy, $\lambda = 415$ nm.

(c) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 10 a 50 kGy, $\lambda = 415$ nm.

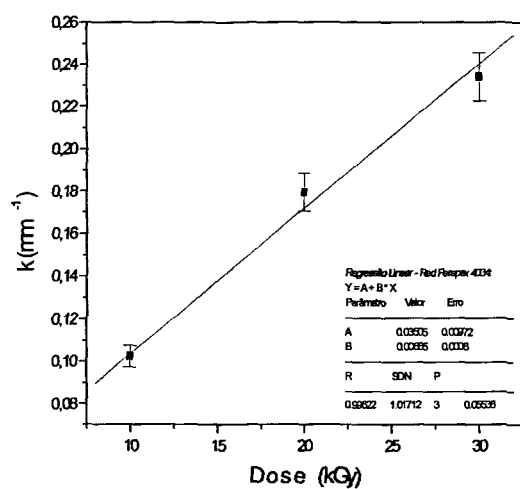
(d) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 50 a 100 kGy, $\lambda = 415$ nm.



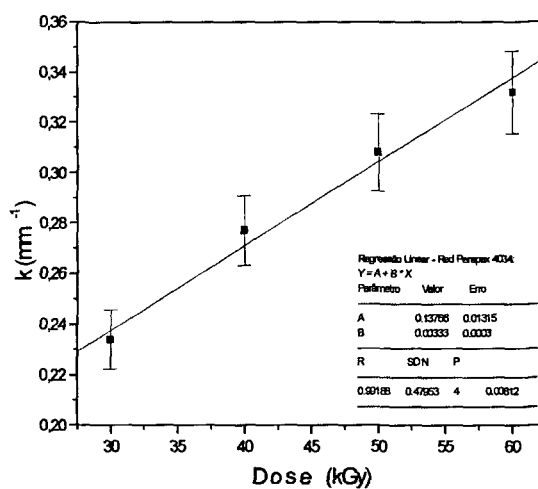
(a)



(b)



(c)



(d)

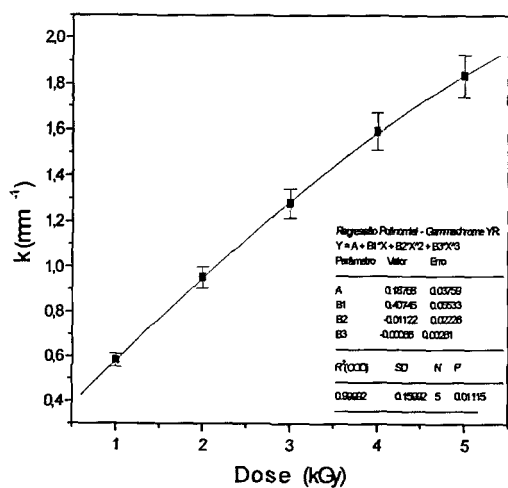
FIGURA 4.37 – Dose-resposta dos detectores *Red 4034 Perspex*, padrão comparativo, irradiados na fonte ^{60}Co . Doses no intervalo entre 1 e 90 kGy.

(a) Curva dose-resposta, $\lambda = 640$ nm.

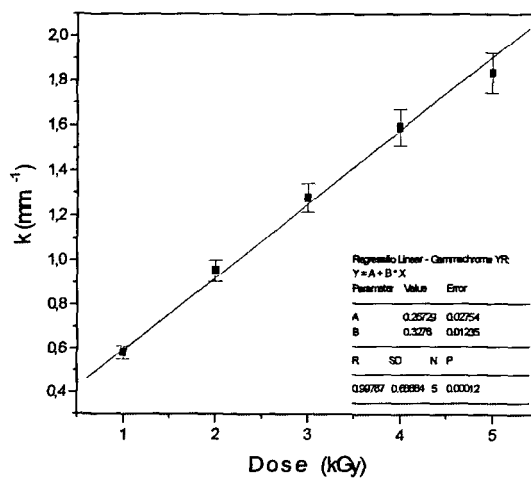
(b) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 1 a 10 kGy, $\lambda = 640$ nm.

(c) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 10 a 30 kGy, $\lambda = 640$ nm.

(d) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 30 a 60 kGy, $\lambda = 640$ nm.



(a)



(b)

FIGURA 4.38 – Dose-resposta dos detectores *Gammachrome YR*, padrão comparativo, irradiados na fonte ^{60}Co . Doses no intervalo entre 1 e 5 kGy.

(a) Curva dose-resposta, $\lambda = 530 \text{ nm}$.

(b) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 1 a 5 kGy, $\lambda = 530 \text{ nm}$.

4.2.11 Curva de calibração – Elétrons acelerados

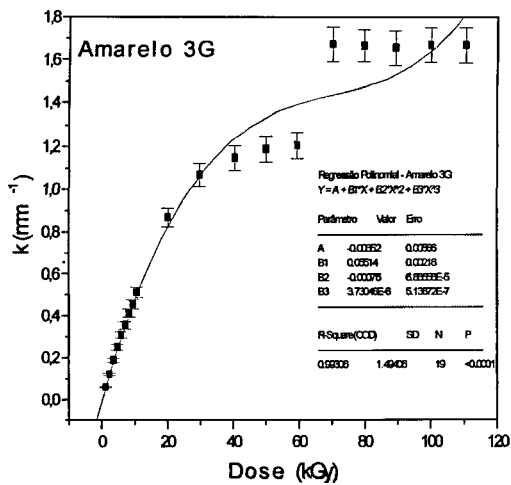
Para a determinação da curva de calibração dos detectores de PMMA, os detectores foram irradiados no Acelerador de Elétrons : energia 1,25 MeV e corrente 0,6 mA – no intervalo de dose entre 1,2 e 110,5 kGy. Nas FIG. 4.39 (a) e (b); FIG. 4.40 (a), (b), (c) e (d); FIG. 4.41 (a), (b) e (c); FIG. 4.42 (a), (b), (c) e (d); FIG. 4.43 (a), (b), (c) e (d); FIG. 4.44 (a) e (b); FIG. 4.45 (a), (b), (c) e (d); FIG. 4.46 (a), (b), (c) e (d); FIG. 4.47 (a), (b), (c) e (d) e FIG. 4.48 (a) e (b) são mostrados os resultados obtidos com os detectores PMMA / corante *Macrolex Amarelo 3G*, PMMA / corante *Macrolex Amarelo 4G*, PMMA / corante *Macrolex Azul RR*, PMMA / corante *Macrolex Verde G*, PMMA / corante *Macrolex Verde 5B*, PMMA / corante *Macrolex Vermelho H*, PMMA / corante *Macrolex Vermelho G*, PMMA / corante *Macrolex Vermelho 5B*, padrão *Red Perspex 4034* e o padrão *Gammachrome YR*, respectivamente.

Nas curvas mostradas nas Figuras 4.39 a 4.48 - índice (a) foi adotado um ajuste polinomial de terceira ordem e nas demais Figuras são mostradas a região linear da curva.

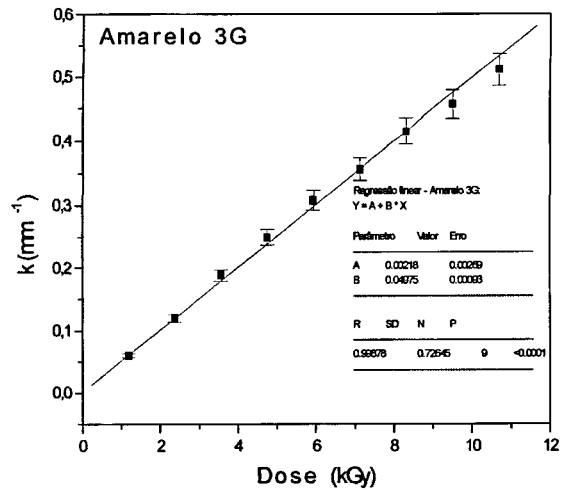
Para a análise matemática são utilizadas as equações:

- Ajuste linear - $k = a + (b \cdot D)$
- Ajuste polinomial de terceira ordem - $k = a + (b \cdot D) + (c \cdot D^2) + (d \cdot D^3)$

onde D é a dose absorvida, k é absorvância específica e a, b, c e d são coeficientes que foram determinados usando um programa de computador que ajusta a curva (Origin versão 5.0).



(a)

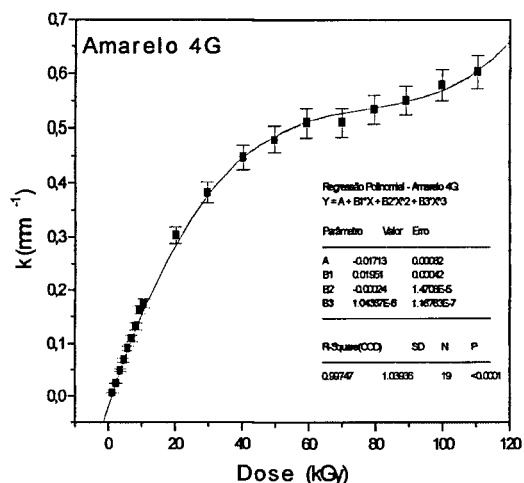


(b)

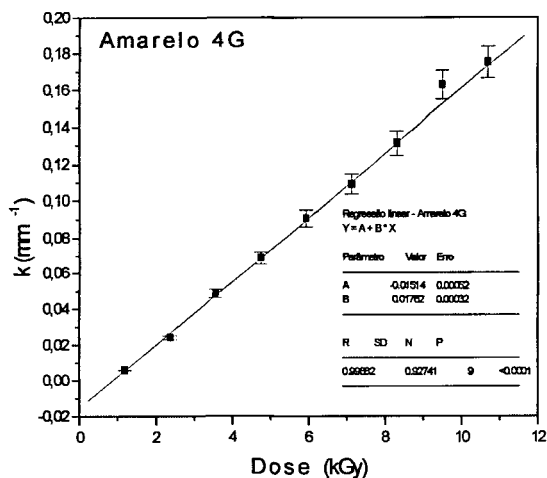
FIGURA 4.39 – Dose-resposta dos detectores de PMMA / corante *Macrolex Amarelo 3G* irradiados no Acelerador de Elétron. Doses no intervalo entre 1,2 e 110,5 kGy

(a) Curva dose-resposta, $\lambda = 300 \text{ nm}$.

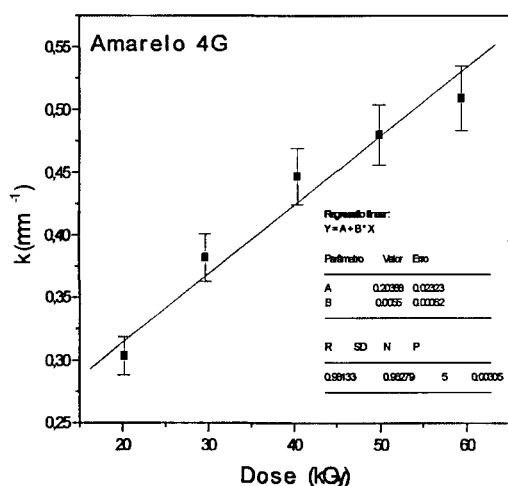
(b) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 1,2 a 10,7 kGy, $\lambda = 300 \text{ nm}$.



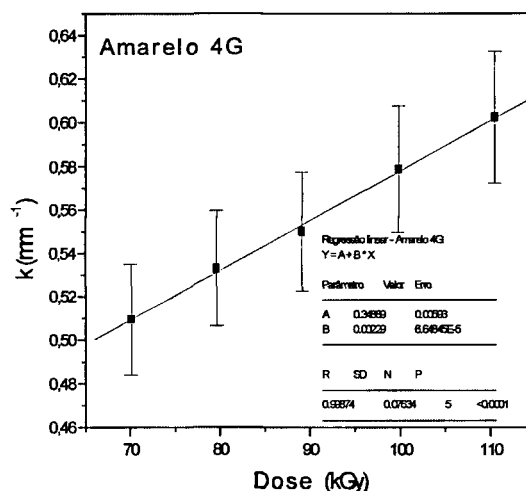
(a)



(b)



(c)



(d)

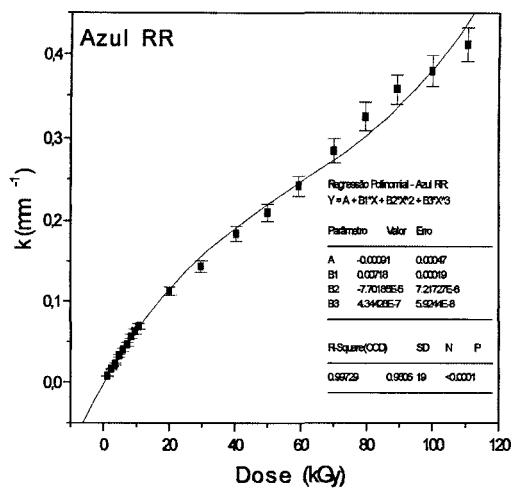
FIGURA 4.40 – Dose-resposta dos detectores de PMMA / corante *Macrolex Amarelo 4G* irradiados no Acelerador de Elétons. Doses no intervalo entre 1,2 e 110,5 kGy.

(a) Curva dose-resposta, $\lambda = 353$ nm.

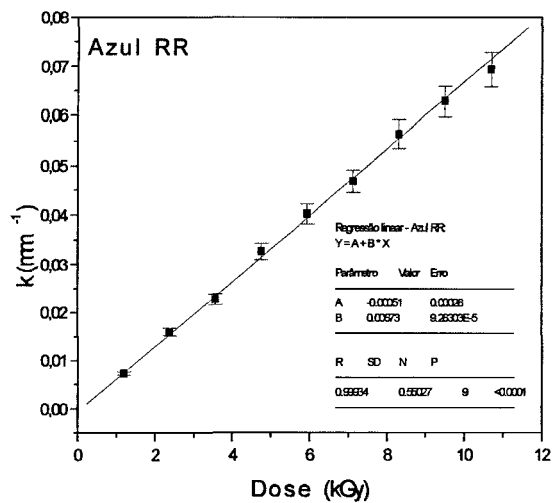
(b) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 1,2 a 10,7 kGy, $\lambda = 353$ nm.

(c) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 20,2 a 59,4 kGy, $\lambda = 353$ nm.

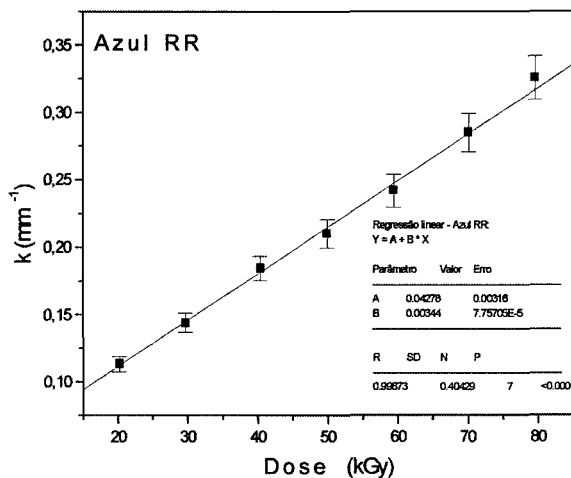
(d) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 70,1 a 110,5 kGy, $\lambda = 353$ nm.



(a)



(b)



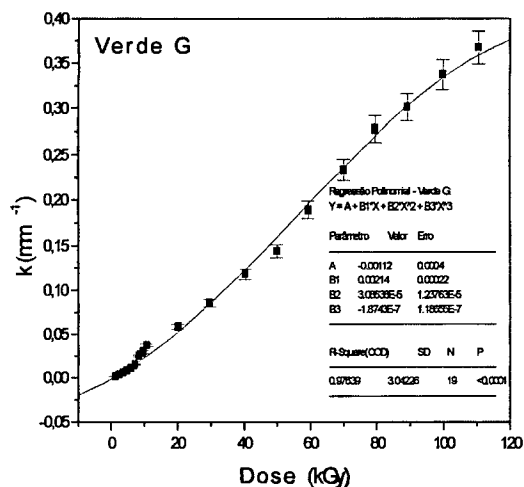
(c)

FIGURA 4.41 – Dose-resposta dos detectores de PMMA / corante *Macrolex Azul RR*, irradiados no Acelerador de Elétron. Doses no intervalo entre 1,2 e 110,5 kGy.

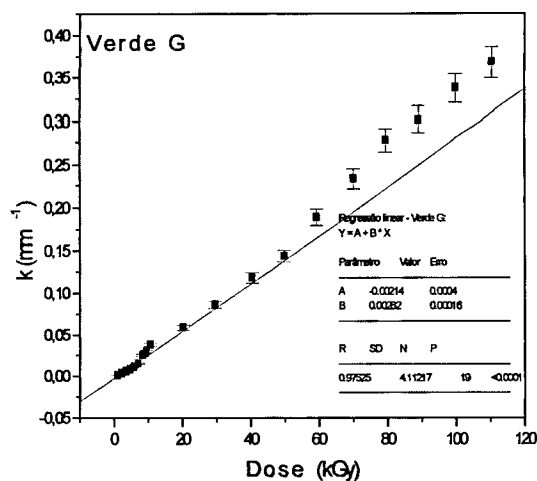
(a) Curva dose-resposta, $\lambda = 450$ nm.

(b) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 1,2 a 10,7 kGy, $\lambda = 450$ nm.

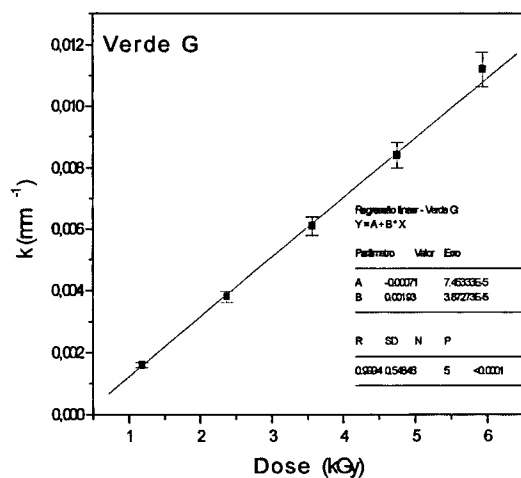
(c) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 20,2 a 79,6 kGy, $\lambda = 450$ nm.



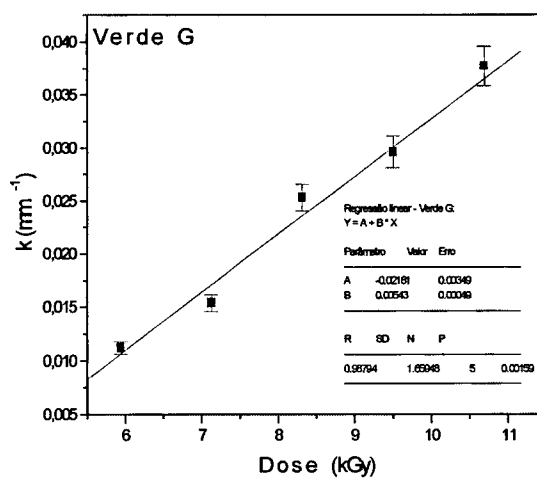
(a)



(b)



(c)



(d)

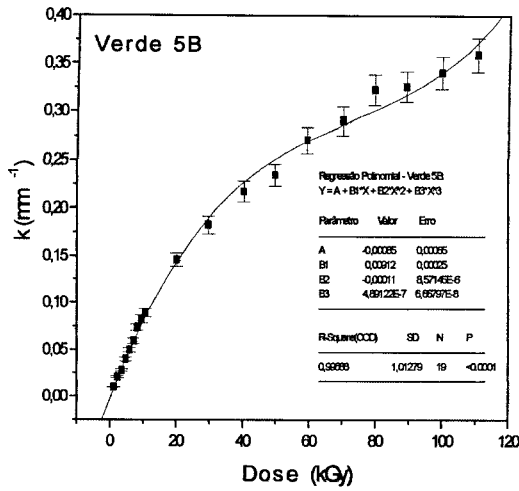
FIGURA 4.42 – Dose-resposta dos detectores de PMMA / Corante *Macrolex Verde G*, irradiados no Acelerador de Elétrons. Doses no intervalo entre 1,2 e 110,5 kGy.

(a) Curva dose-resposta, $\lambda = 528$ nm.

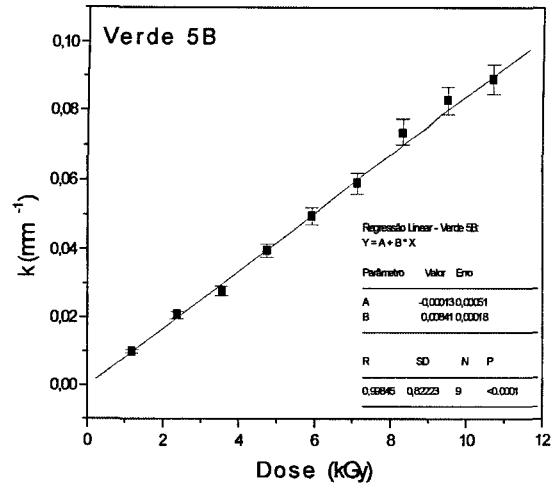
(b) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 1,2 e 110,5 kGy, $\lambda = 528$ nm.

(c) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 1,2 e 5,9 kGy, $\lambda = 528$ nm.

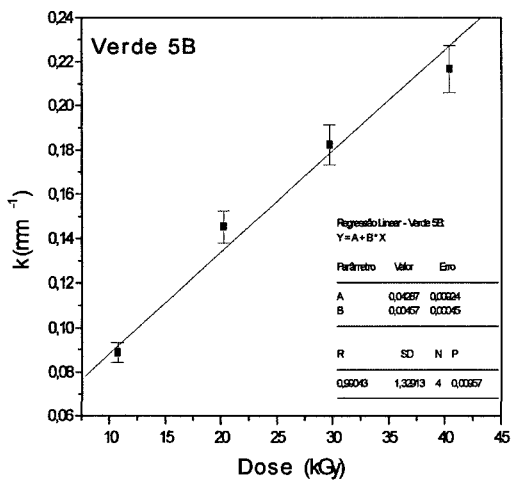
(d) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 5,9 e 10,7 kGy, $\lambda = 528$ nm.



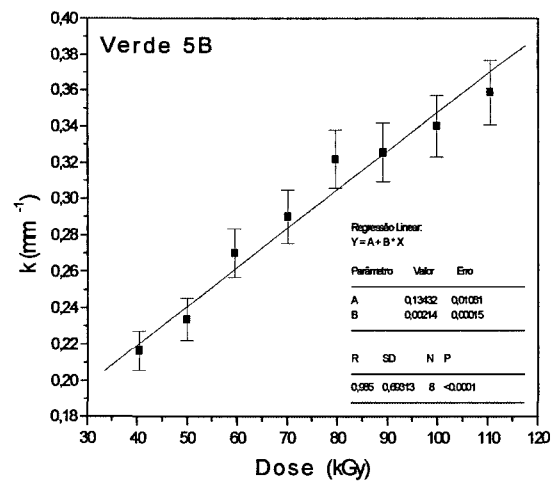
(a)



(b)



(c)



(d)

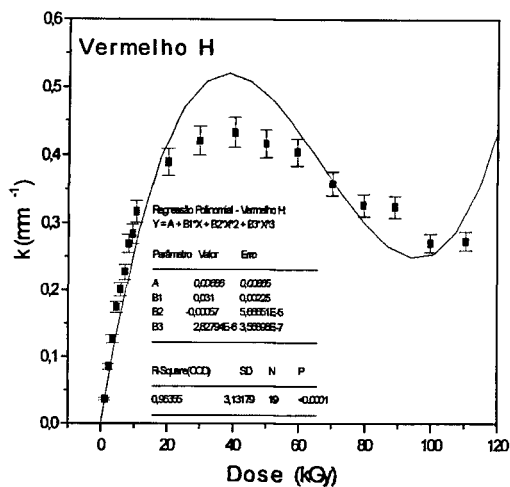
FIGURA 4.43 – Dose-resposta dos detectores de PMMA / Corante *Macrolex Verde 5B*, irradiados no Acelerador de Elétrons. Doses no intervalo entre 1,2 e 110,5 kGy.

(a) Curva dose-resposta, $\lambda = 405$ nm.

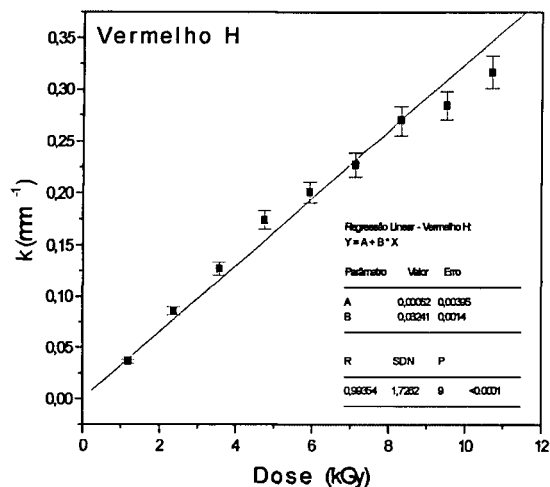
(b) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 1,2 e 10,7 kGy, $\lambda = 405$ nm.

(c) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 10,7 e 40,4 kGy, $\lambda = 405$ nm.

(d) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 40,4 e 110,5 kGy, $\lambda = 405$ nm.



(a)

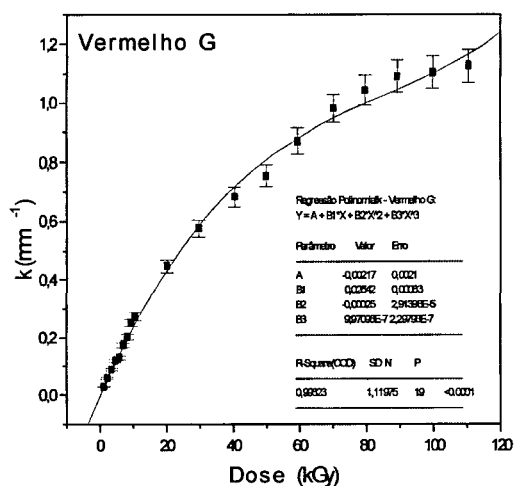


(b)

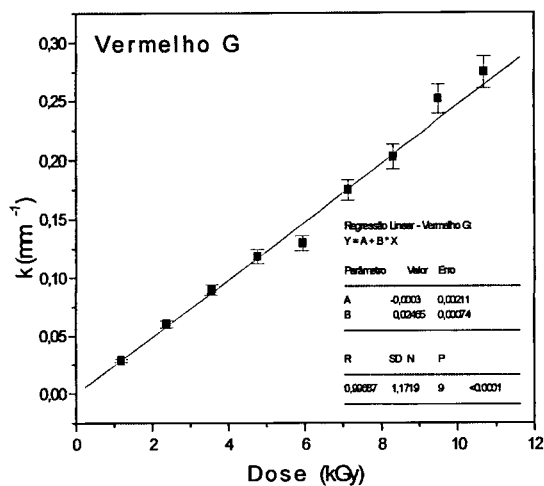
FIGURA 4.44 – Dose-resposta dos detectores de PMMA / corante *Macrolex Vermelho H* irradiados no Acelerador de Elétrons. Doses no intervalo entre 1,2 e 110,5 kGy

(a) Curva dose-resposta, $\lambda = 620 \text{ nm}$.

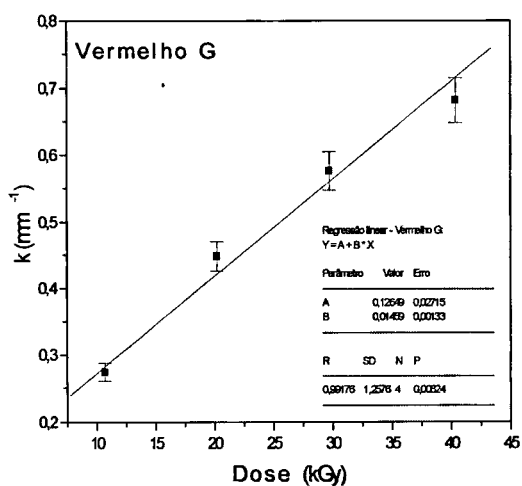
(b) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 1,2 a 10,7 kGy, $\lambda = 620 \text{ nm}$.



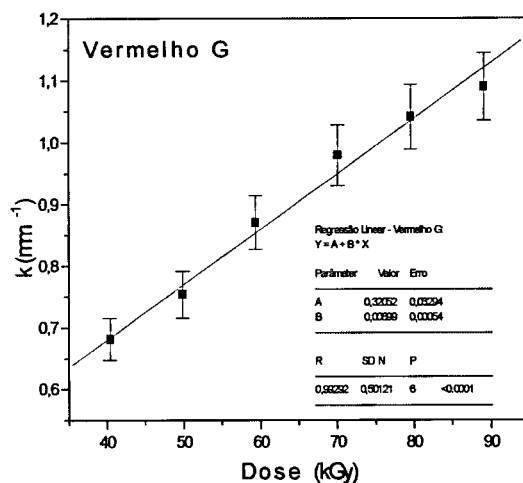
(a)



(b)



(c)



(d)

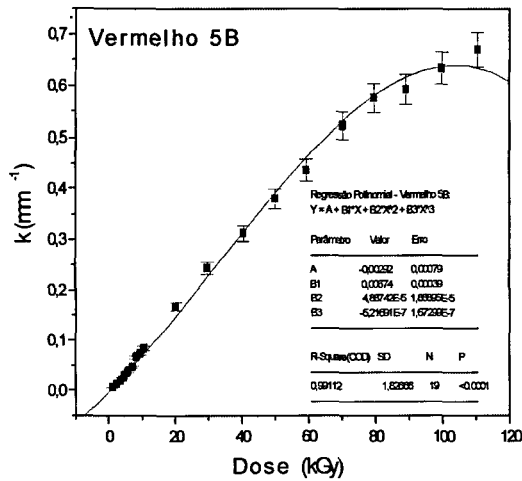
FIGURA 4.45 – Dose-resposta dos detectores de PMMA / Corante *Macrolex Vermelho G*, irradiados no Acelerador de Elétron. Doses no intervalo entre 1,2 e 110,5 kGy.

(a) Curva dose-resposta, $\lambda = 397$ nm.

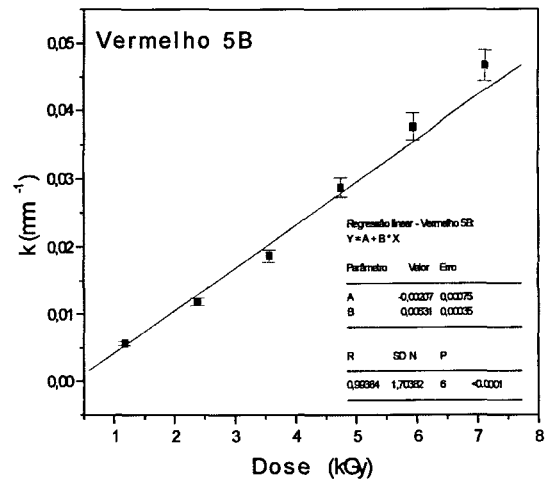
(b) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 1,2 e 10,7 kGy, $\lambda = 397$ nm.

(c) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 10,7 e 40,4 kGy, $\lambda = 397$ nm.

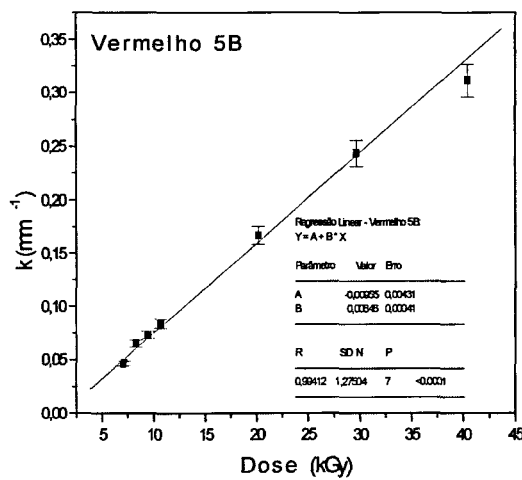
(d) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 40,4 e 89,1 kGy, $\lambda = 397$ nm.



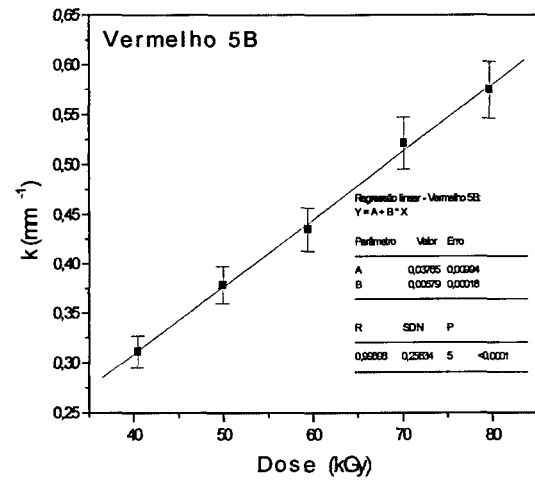
(a)



(b)



(c)



(d)

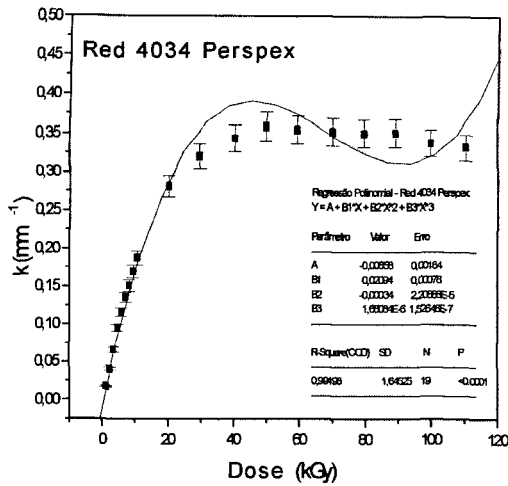
FIGURA 4.46 – Dose-resposta dos detectores de PMMA / Corante *Macrolex Vermelho 5B*, irradiados no Acelerador de Elétrons. Doses no intervalo entre 1,2 e 110,5 kGy.

(a) Curva dose-resposta, $\lambda = 415$ nm.

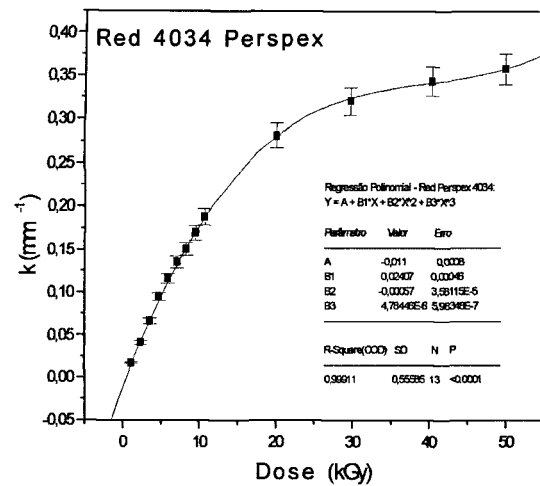
(b) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 1,2 e 7,1 kGy, $\lambda = 415$ nm.

(c) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 7,1 e 40,4 kGy, $\lambda = 415$ nm.

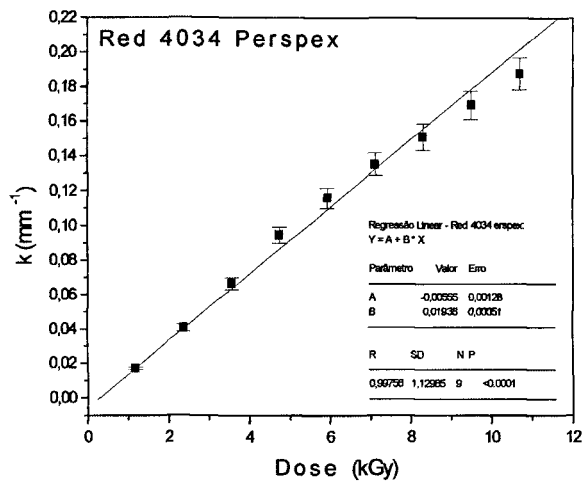
(d) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 40,4 e 79,6 kGy, $\lambda = 415$ nm.



(a)



(b)



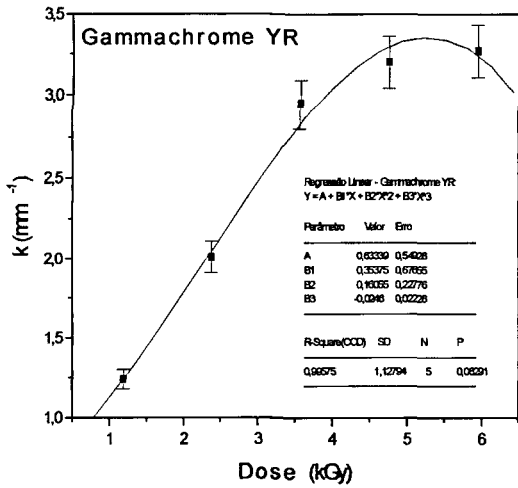
(c)

FIGURA 4.47 – Dose-resposta dos detectores *Red 4034 Perspex*, irradiados no Acelerador de Elétrons. Doses no intervalo entre 1,2 e 110,5 kGy.

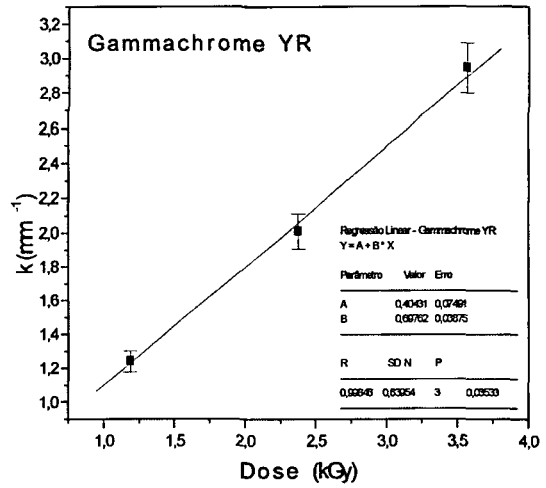
(a) Curva dose-resposta, $\lambda = 640$ nm.

(b) Curva dose-resposta (doses 1,2 a 49,9 kGy), $\lambda = 640$ nm.

(c) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 1,2 e 10,7 kGy, $\lambda = 640$ nm.



(a)



(b)

FIGURA 4.48 – Dose-resposta dos detectores *Gammachrome YR*, irradiados no Acelerador de Elétrons. Doses no intervalo entre 1,2 e 5,9 kGy.

(a) Curva dose-resposta, $\lambda = 530$ nm.

(b) Curva dose-resposta da região linear compreendida entre 1,2 a 3,6 kGy, $\lambda = 530$ nm.

Pode ser observado dos resultados obtidos que os detectores com o corante vermelho H e o padrão Red 4034 Perspex apresentam comportamento da resposta com a dose semelhante, o que pode indicar que os corantes empregados possuem formulação similar. Quanto aos detectores contendo o corante amarelo 3G, a descontinuidade observada na curva de resposta pode ser atribuída a outro tipo de defeito ou dano induzido pela radiação, indicando que esse tipo de detector é adequado para doses mais baixas.

4.2.12 Coeficiente de variação (CV)

Com a finalidade de determinar a dispersão relativa dos valores obtidos nas medidas de absorvância específica foram calculados os coeficientes de variação da resposta dos detectores.

Os valores de coeficiente de variação foram calculados por meio da equação a seguir, na qual foram usados os desvios padrão determinados durante a calibração para cada valor de dose.

$$CV = \frac{S_{n-1}}{\bar{k}} \times 100 (\%)$$

onde, S_{n-1} = desvio padrão e \bar{k} = absorvância específica média

Nas TAB. 4.5 e 4.6 são apresentados os valores calculados dos coeficientes de variação das medidas efetuadas nos detectores irradiados em várias doses com radiação gama e elétrons acelerados, respectivamente. Conforme normas ASTM valores menores que 2 % são desejados e asseguram a reprodutibilidade do dosímetro na respectiva dose [70], no entanto, valores acima deste limite até 4 % foram considerados [29], por se tratar de dosímetros terciários que são empregados no controle de qualidade rotineiro das irradiações e calibrados contra dosímetros de referência.

TABELA 4.5 – Coeficiente de variação (CV) calculado para os detectores de PMMA irradiados com radiação gama

Dose (kGy)	Amarelo 3G	Amarelo 4G	Azul RR	Verde G	Verde 5B	Vermelho H	Vermelho G	Vermelho 5B	Red 4034 Perspex
0,5	2,85	-	-	-	-	-	-	-	-
1,0	2,96	-	-	-	-	-	-	-	-
2,0	2,72	-	-	-	-	-	-	-	-
3,0	1,85	-	-	-	-	-	2,34	3,50	-
4,0	1,87	1,42	-	-	0,82	1,19	2,86	4,05	2,89
5,0	1,79	2,05	-	-	2,15	0,40	2,56	2,37	2,55
10,0	2,11	1,40	-	3,94	2,26	1,33	2,77	1,33	2,83
20,0	0,11	2,85	1,68	1,64	0,50	0,56	1,49	0,62	1,13
30,0	1,28	2,57	1,62	1,77	1,51	0,72	2,20	0,58	0,81
40,0	3,42	2,96	2,38	1,46	0,73	0,52	2,27	2,16	2,13
50,0	-	2,44	1,73	1,17	1,69	0,63	2,58	1,14	1,38
60,0	-	2,41	1,59	2,56	0,74	1,56	1,69	1,24	1,36
70,0	-	1,42	2,56	1,03	1,42	1,98	1,29	0,93	1,85
80,0	-	0,74	2,31	1,62	1,45	3,19	2,73	0,90	1,77
90,0	-	1,33	1,28	1,53	2,61	1,36	0,56	1,69	1,49
100,0	-	-	2,26	3,79	2,37	-	0,80	-	1,85

TABELA 4.6 – Coeficiente de variação calculado para os detectores de PMMA irradiados com elétrons acelerados.

Dose (kGy)	Amarelo 3G	Amarelo 4G	Azul RR	Verde G	Verde 5B	Vermelho H	Vermelho G	Vermelho 5B	Red 4034 Perspex
1,2	1,99	-	-	-	-	-	-	-	-
2,4	2,24	0,41	-	-	1,45	-	-	-	-
3,6	1,11	2,06	3,95	-	2,89	-	3,68	-	-
4,8	2,09	0,44	3,67	3,57	2,52	-	1,01	-	-
5,9	2,70	1,21	3,48	3,92	1,82	0,15	1,00	1,86	0,86
7,1	1,35	0,82	1,92	1,95	1,87	2,42	0,52	2,79	2,55
8,3	2,55	1,45	2,30	3,56	0,82	1,34	2,31	2,37	1,19
9,5	1,14	2,15	2,71	1,35	2,18	1,48	2,15	2,32	1,77
10,7	1,02	2,59	1,87	1,44	2,25	0,32	1,31	0,83	1,60
20,2	3,66	0,43	1,68	0,68	1,65	1,36	0,99	0,84	2,10
29,7	3,93	1,57	2,16	2,59	2,47	1,85	2,62	2,01	1,72
40,4	-	0,80	2,22	2,29	3,23	2,31	2,66	0,51	2,24
49,9	-	1,23	2,24	2,36	3,00	3,02	1,50	2,61	0,67
59,4	-	0,73	1,24	0,48	1,68	2,87	2,47	1,98	1,72
70,1	-	2,41	1,79	1,24	4,79	-	0,87	0,71	1,31
79,6	-	2,34	1,08	1,40	3,17	-	2,36	1,98	0,43
89,1	-	0,65	2,08	1,86	0,80	-	0,70	0,88	1,09
99,8	-	2,33	-	1,10	4,14	-	0,42	0,71	1,75
110,5	-	1,23	-	0,81	1,73	-	1,51	-	1,84

4.2.13 Intervalo de dose útil

O intervalo de dose útil foi determinado para cada detector no comprimento de onda no qual ocorreu variação mais intensa da resposta, os valores encontrados são apresentados na TAB. 4.7.

TABELA 4.7 – Intervalo de dose útil dos detectores de PMMA desenvolvidos.

Detector	Comprimento de onda (nm)	Dose Mínima (kGy)	Dose Máxima (kGy)
Amarelo 3G	300	< 0,5	40
Amarelo 4G	353	5	80
Azul RR	450	10	100
Verde G	528	10	100
Verde 5B	405	5	100
Vermelho H	620	5	50
Vermelho G	397	5	100
Vermelho 5B	415	5	100

A dose máxima para alguns detectores poderá ser estendida, no entanto, neste trabalho optou-se por caracterizá-los até a dose máxima de 100 kGy, por motivo de limitações técnicas nas irradiações e também, porque não serem rotineiras aplicações de doses acima de 100kGy.

A dose mínima do detector que contém o corante amarelo 3G, deve ser melhor avaliada, pois, os resultados sinalizam que o detector é sensível à doses menores que 0,5 kGy e como o objetivo do trabalho é a caracterização em doses altas, sugere-se este estudo para trabalho futuro.

5 CONCLUSÕES

5.1 Nitrato de Potássio + composto sensibilizador

A preparação do dosímetro é fácil. Por se tratar de um dosímetro químico, está envolvida a manipulação de alguns reagentes, deste modo, devem ser tomados alguns cuidados básicos durante o manuseio.

A mistura nitrato de potássio (KNO_3) e dióxido de manganês (MnO_2) foi a que apresentou melhores resultados.

O comprimento de onda no qual a absorvância é máxima é de 540 nm.

A reprodutibilidade do lote obtido foi melhor que 98% (1σ).

As pastilhas não irradiadas e irradiadas podem ser armazenadas por longos períodos sem sofrerem alteração de suas características, no entanto, depois de preparadas as soluções, as leituras devem ser realizadas imediatamente ou no máximo em até um dia.

As variações das condições ambientais entre 10 e 35 °C, umidade relativa entre 40 e 60% e exposição à luz ambiente do laboratório não afetam a resposta do dosímetro, as pastilhas conservam-se em perfeitas condições quando embaladas em filmes de polietileno.

Não foram observadas dependências da resposta, com a variação da taxa de dose no intervalo analisado e com o ângulo de posicionamento do dosímetro em relação à base da fonte de radiação.

O intervalo útil de dose foi ampliado de 150 kGy, limite máximo do dosímetro preparado com KNO_3 p.a., para 600 kGy com a mistura de $\text{KNO}_3 + \text{MnO}_2$.

Os resultados obtidos comprovaram que as pastilhas preparadas com a mistura 60 % KNO_3 e 40 % MnO_2 apresentaram desempenho adequado e suas características a qualificam como um dosímetro eficiente para o controle de qualidade das irradiações rotineiras, no intervalo de dose analisado entre 150 e 600 kGy.

5.2 Detectores de Polimetilmetacrilato coloridos

Os detectores desenvolvidos são fáceis de preparar e de custo baixo. O mercado nacional tem domínio da tecnologia para a produção das placas de polimetilmetacrilato com qualidade alta e as matérias-primas são de fácil aquisição. Apresentam características dosimétricas adequadas para serem classificados como dosímetro. A técnica analítica, espectrofotometria, é adequada para determinar as mudanças que ocorrem no detector após a irradiação. Podem ser utilizados em um amplo intervalo de dose abrangendo várias atividades de irradiação como, esterilização de alimentos e produtos médicos.

Todos os detectores desenvolvidos apresentaram comportamento semelhante aos detectores considerados como padrão comparativo (Red 4034 Perspex e Gammachrome YR), no entanto, os detectores que contém os corantes vermelho G e vermelho 5B apresentaram características melhores que os detectores que contém os outros corantes. As diferenças de absorvância específica entre as doses absorvidas são mais acentuadas, desta maneira, erros de medida de dose são minimizados.

O comprimento de onda no qual as propriedades dosimétricas são avaliadas é característico a cada detector.

A reprodutibilidade do lote é melhor que 98% (1σ) para todos os detectores estudados.

No intervalo de taxa de dose entre 2,66 e 45,22 kGy/s a variação da resposta está entre 5 e 10 % para irradiação com elétrons acelerados. Na fonte gama no intervalo de taxa

de dose analisado, 0,49 a 4,90 kGy/h, a variação da resposta encontrada foi um pouco maior, chegando a aproximadamente 20% entre a taxa de dose menor e a maior para os detectores que contém os corantes amarelo 3G, azul RR e vermelho 5B. Variações de até 10% em aplicações com doses altas é aceitável em razão do tipo de detector usado. Caso a dependência da resposta seja superior a 10%, é necessária a determinação da resposta do dosímetro para os intervalos de taxas de dose empregados nos processos para a possível correção. No caso do Red 4034 Perspex, usado como padrão comparativo, é de 10%.

Os detectores não apresentaram variação significativa da resposta em função da variação das condições de temperatura, entre 4 e 100°C, umidade relativa, entre 0 e 100%, e luz ambiente do laboratório, porém, esta variação pode ser minimizada se forem tomados certos cuidados durante o manuseio: os detectores devem estar selados em envelopes para evitar riscos e o contato com a luz e umidade do ambiente quando armazenados, e durante as medidas deve-se evitar o contato direto com a luz ambiente.

Não apresentaram dependência da resposta em função da energia dos elétrons no intervalo entre 0,8 e 1,5 MeV, desde que a espessura do dosímetro seja compatível com o alcance dos elétrons na energia empregada.

Podem ser utilizados em campos de radiação gama e de elétrons acelerados. É aconselhável proceder a calibração do detector no campo em que será utilizado para evitar erros em razão da geometria da fonte utilizada e do tipo de radiação.

Mudanças na formulação das placas de polimetilmetacrilato, como a concentração do corante, podem favorecer a resposta do detector. Sugere-se que o estudo de outras formulações seja realizado em trabalhos futuros.

Os resultados obtidos comprovam a possibilidade da produção de detectores de PMMA de qualidade e a preços reduzidos. Os detectores vermelho G e vermelho 5B comparados com os padrões utilizados foram os que apresentaram melhor desempenho, podendo ser utilizados em um intervalo de doses entre 5 e 100 kGy, embora todos os outros também podem ser utilizados em intervalos de doses diferentes.

APÊNDICE A – Características de dosímetros comercialmente disponíveis.

Dos dosímetros mostrados a seguir, somente o Red 4034 Perspex e o Gammachrome YR foram utilizados como padrões comparativos neste trabalho.

I – Material: *Sunna Dosimeter* (Single-Point Radiation Dosimetry System) [88].

- Sunna Systems Corporation – Richland – USA ;
- Usado em dosimetria de irradiações com doses altas;
- Composição: não especificada;
- Comprimento de onda de leitura (λ): 530 nm;
- Intervalo de dose dinâmico: 300Gy – 200 kGy;
- Insensível a luz ambiente;
- Baixa dependência com a taxa de dose;
- Dimensões: comprimento = 3 cm; largura = 1 cm; espessura = 0,25 mm;
- Espectro de absorção do dosímetro não irradiado, mostrado na FIG. 1.A.

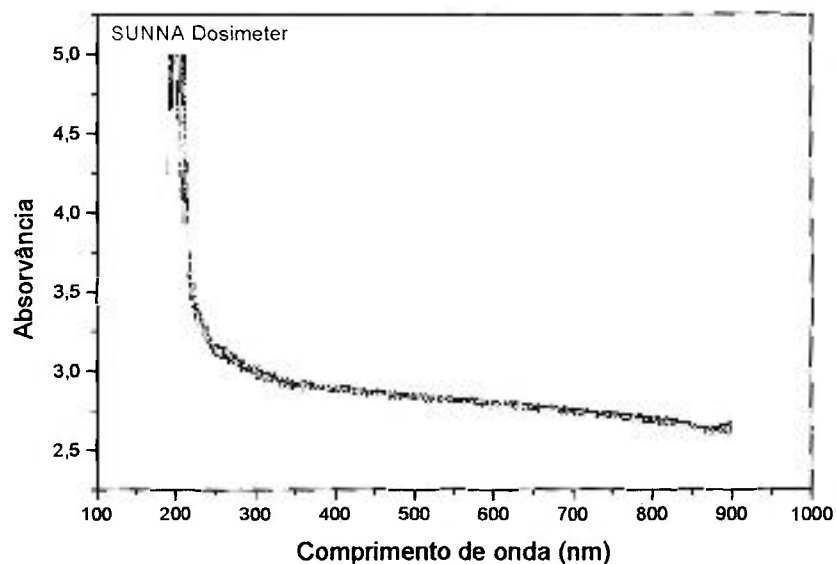


FIGURA 1.A – Espectro de absorção do dosímetro SUNNA não irradiado.

II – Material: *FWT - 60.20* [32, 46].

- Far West Technology, INC. – Goleta – USA;
- Composição: Amino Trifenil Metano;
- Intervalo de dose: 0,01-150 kGy;
- Dimensões: espessura – 0,05 mm;
- Densidade: $1,14 \text{ g.cm}^{-3}$;
- Comprimento de onda de leitura: 605 nm – 0,01 – 1 kGy /
510 nm – 0,8 – 150 kGy;
- Espectro de absorção do dosímetro não irradiado, mostrado na **FIG. 2.A**.

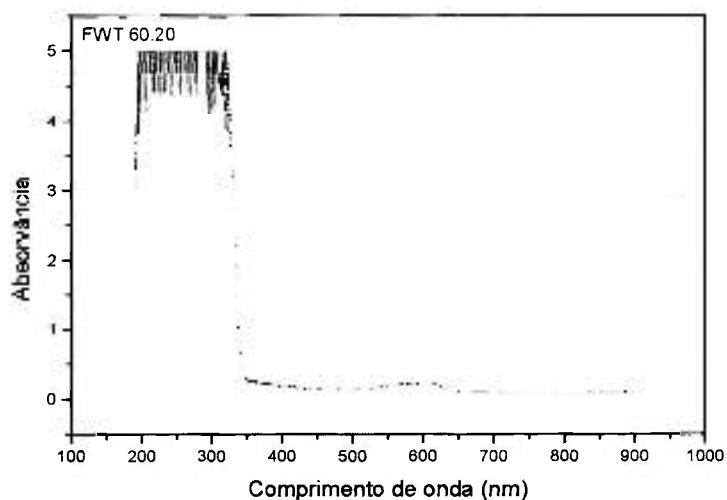


FIGURA 2.A – Espectro de absorção do dosímetro FWT 60.20 não irradiado.

III – Material: *CTA* [39].

- Fuji Photo Film CO., LTD. – Tokio – Japão;
- Composição: 85% triacetato de celulose ($C_{12}H_{16}O_8$)
15% aditivo (trifenilfosfato – $C_{12}H_{16}PO_4$)
obs.: permite estabilizar a absorvância;
- Dimensões: comprimento – rolo de 100 m; largura = 0,8 cm;
espessura = 0,125 mm;
- Densidade – $1,32 \text{ g.cm}^{-3}$;
- Comprimento de onda de leitura: 280 nm;
- Intervalo de dose: 10 - 300 kGy
- Espectro de absorção do dosímetro não irradiado, mostrado na **FIG. 3.A**.

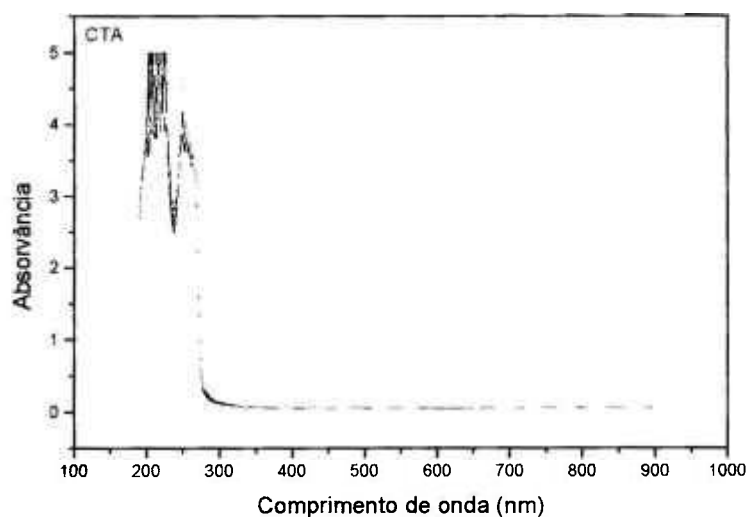


FIGURA 3.A – Espectro de absorção do dosímetro CTA não irradiado.

IV – Material: *Polimetilmetacrilato* [89].

▪ Tipo: *Red 4034 Perspex*

- Harwell Dosimeters – Oxfordshire – United Kingdom (Reino Unido);
- Batch – EA;
- Embalagem: envelope feito de poliéster / alumínio/ polietileno;
- Dimensões: comprimento = 3 cm; largura = 1 cm; espessura = 3 mm;
- Intervalo de dose: 5 – 50 kGy;
- Comprimento de onda de leitura: 640 nm;
- Densidade: $1,35 \text{ g.cm}^{-3}$;
- Espectro de absorção do dosímetro não irradiado, mostrado na **FIG. 4.A**.

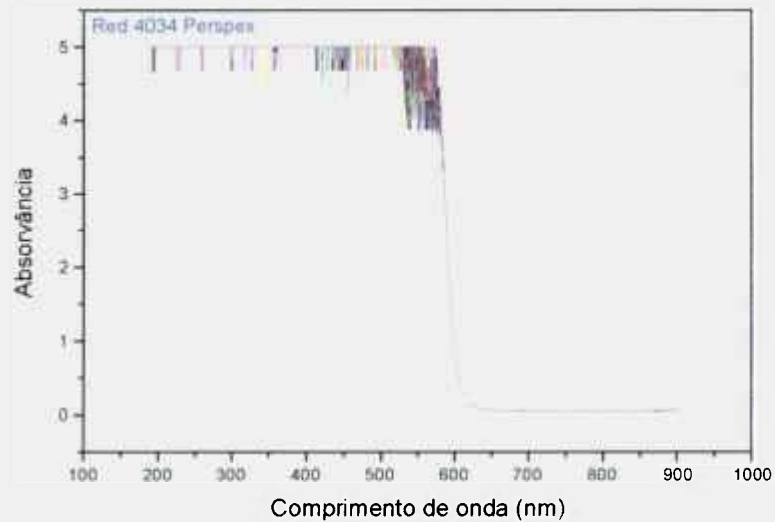


FIGURA 4.A – Espectro de absorção do dosímetro Red 4034 Perspex não irradiado.

▪ Tipo: *Gammachrome YR*

- Harwell Dosimeters – Oxfordshire – United Kingdom (Reino Unido);
- Batch – 6;
- Embalagem: envelope feito de poliéster / alumínio/ polietileno;
- Dimensões: comprimento = 3 cm; largura = 1 cm; espessura = 1,7 mm;
- Intervalo de dose: 0,1 – 3 kGy;
- Comprimento de onda de leitura: 530 nm;
- Densidade: $1,35 \text{ g.cm}^{-3}$;
- Espectro de absorção do dosímetro não irradiado, mostrado na FIG 5.A.

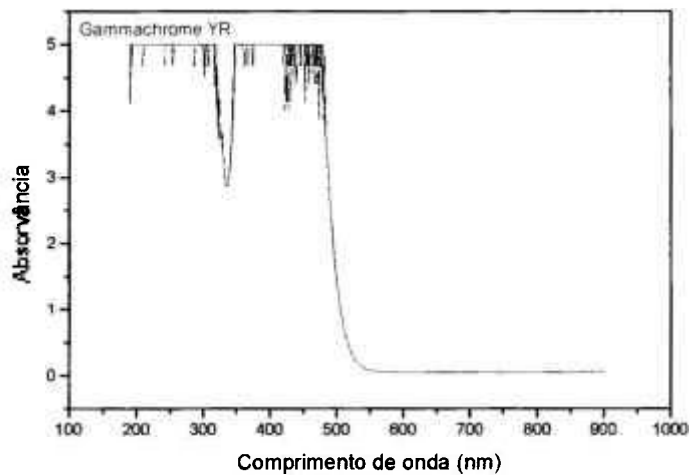


FIGURA 5.A– Espectro de absorção do dosímetro Gammachrome YR não irradiado.

V – Material: *PVC* [49].

- Instituto de Química e Tecnologia das Radiações (ICHTJ – Instytut Chemii i Techniki Jadrowej- Varsóvia - Polônia);
- Composição: Cloreto de polivinila;
- Dimensões: espessura – 0,260 mm;
- Intervalo de dose: 5 – 60 kGy;
- Densidade: 1,4 g.cm⁻³;
- Comprimento de onda de leitura: 395 nm;
- Tratamento térmico após irradiação: 50°C – 1 hora / 80°C – 10 minutos;
- Espectro de absorção do dosímetro não irradiado, mostrado na **FIG 6.A**.

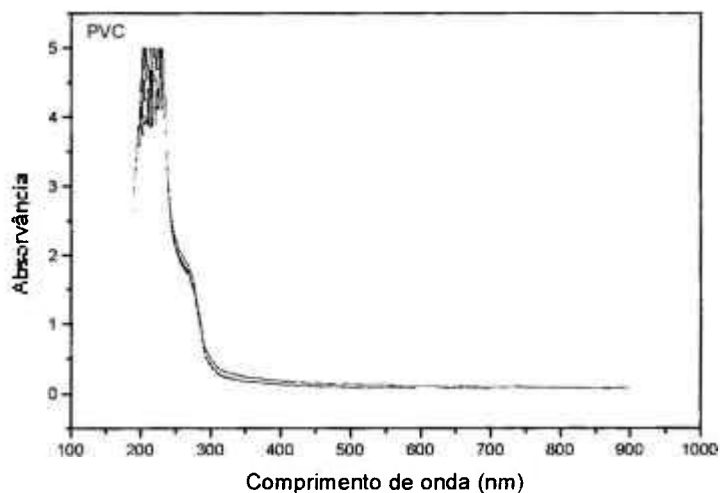


FIGURA 6.A – Espectro de absorção do dosímetro PVC não irradiado.

VI – Material: *Gafchromic HD – 810* [90].

- ISP Technologies INC., USA;
- Dimensões: folhas de 20 x 25 cm; espessura – 0,11 mm;
- Estrutura: o dosímetro apresenta três camadas; sendo que a primeira camada, com aproximadamente 0,75 microns de espessura é formada por uma gelatina, a segunda camada de 6,5 microns é a camada ativa e a terceira camada é um substrato de poliéster que mede aproximadamente 97 microns;
- Intervalo de dose: 0,1 – 50 kGy;
- Comprimento de onda: 615 nm e 675 nm;
- Espectro de absorção do dosímetro não irradiado, mostrado na **FIG. 7.A**.

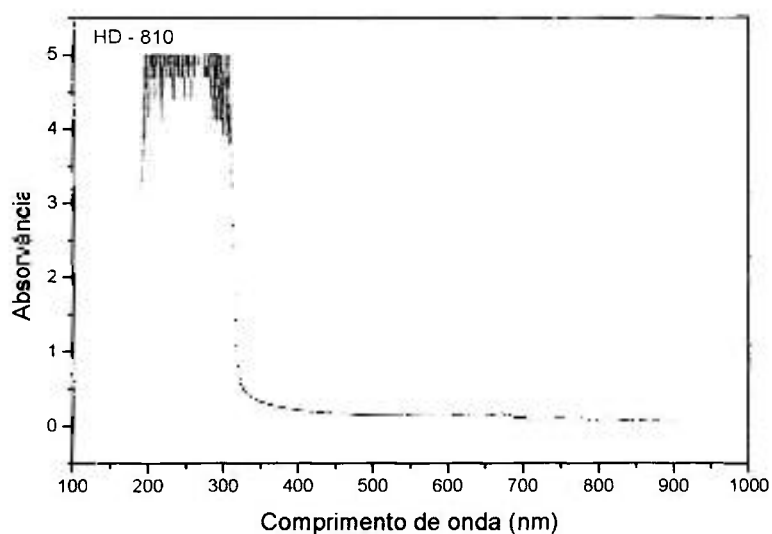


FIGURA 7.A – Espectro de absorção do dosímetro Gafchromic HD – 810 não irradiado.

APÊNDICE B – Espectros de transmitância dos detectores de PMMA.

Na FIG. 1.B são mostrados os espectros de transmitância obtidos dos detectores que contém os corantes amarelo 3G, amarelo 4G, azul RR, verde G e vermelho 5B. Pode ser observado que o comprimento de onda selecionado no espectro de absorção e no qual as propriedades dosimétricas foram analisadas corresponde a um máximo no espectro de transmitância.

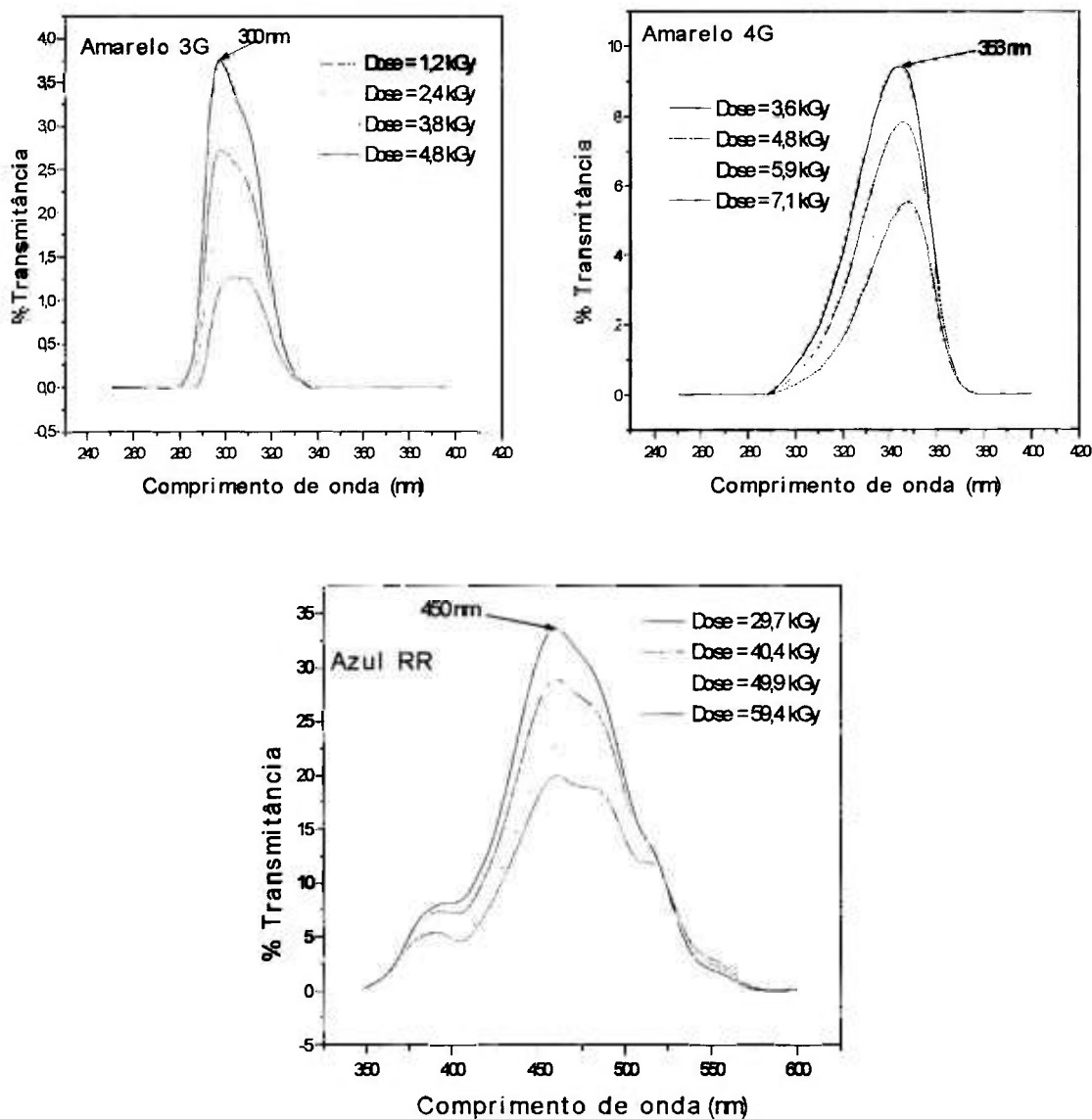


Figura 1.B – Espectros de transmitância dos detectores que contém os corantes amarelo 3G, amarelo 4G, azul RR, verde G e vermelho 5B irradiados no acelerador de elétrons. Continua.

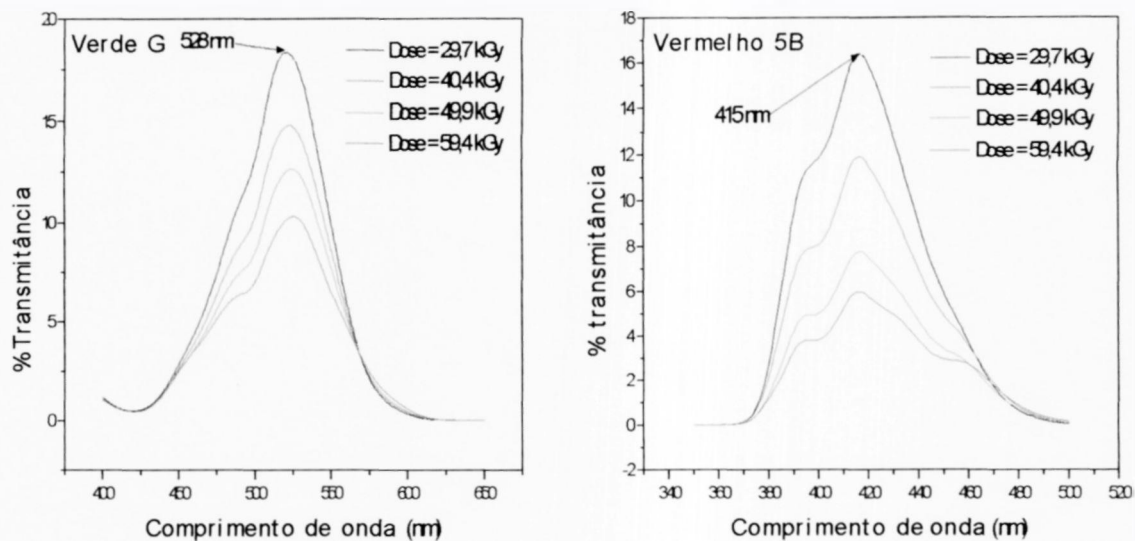


Figura 1.B – Continuação. Espectros de transmitância dos detectores que contém os corantes amarelo 3G, amarelo 4G, azul RR, verde G e vermelho 5B irradiados no acelerador de elétrons.

APÊNDICE C - Histograma – Frequência de ocorrência das medidas de absorvância dos detectores de PMMA desenvolvidos, não irradiados.

Na FIG. 1C são mostrados os histogramas dos detectores de PMMA não irradiados.

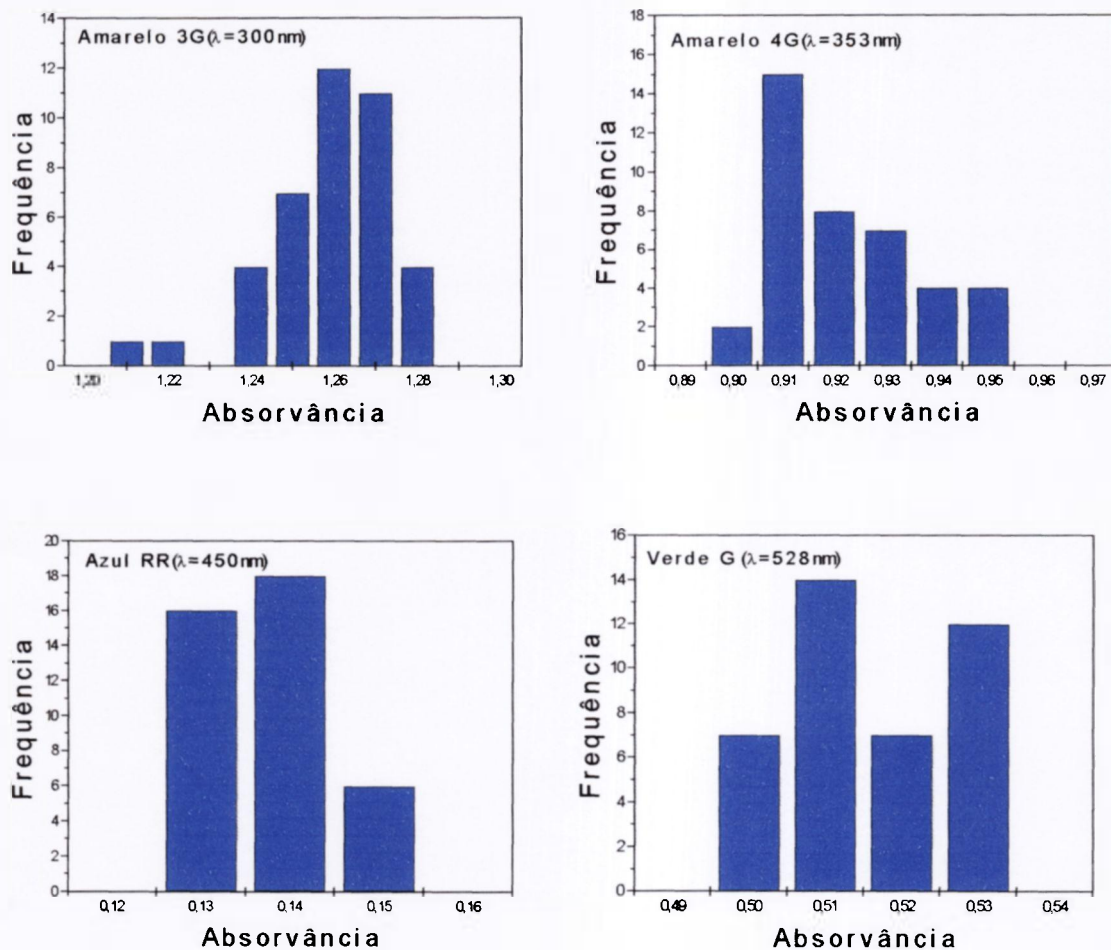


FIGURA 1C – Histograma – Frequência de ocorrência das medidas de absorvância dos detectores de PMMA desenvolvidos, não irradiados. Continua.

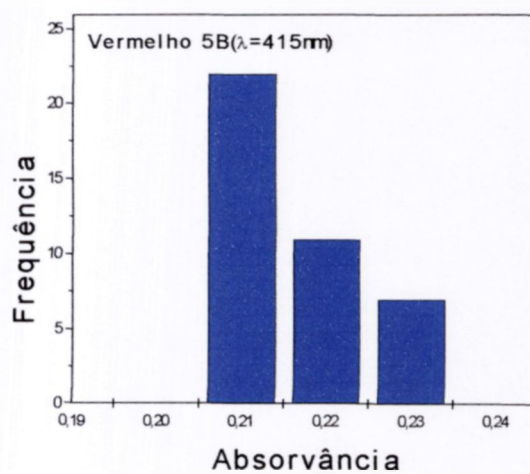
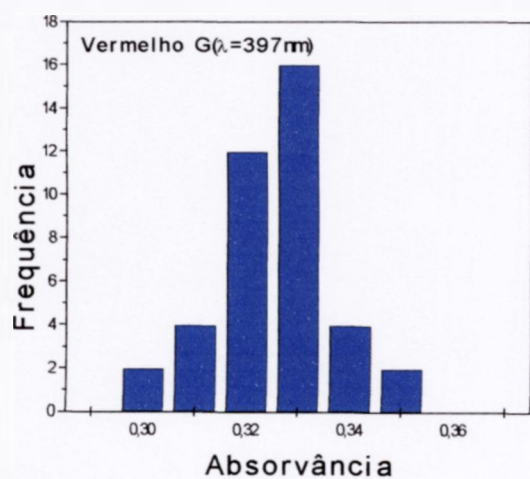
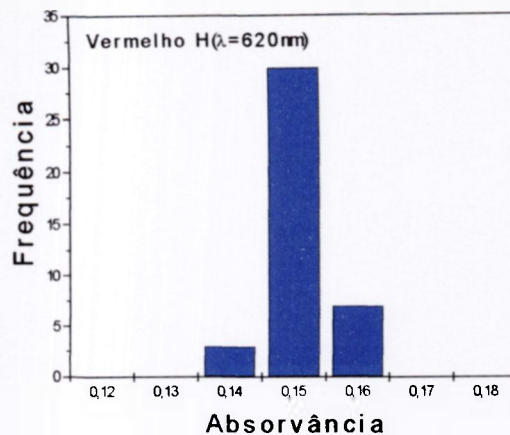
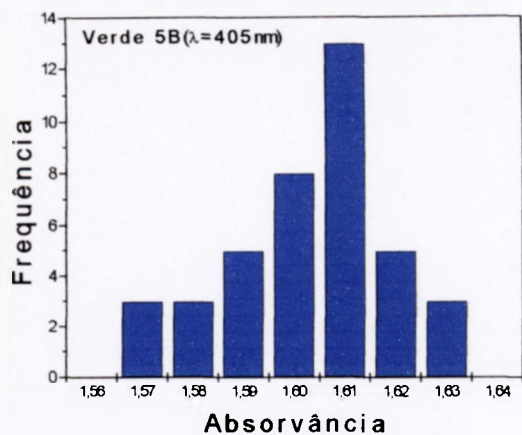


FIGURA 1C – Continuação. Histograma – Frequência de ocorrência das medidas de absorvância dos detectores de PMMA desenvolvidos, não irradiados.

ANEXO 1 - Acelerador de elétrons

Na **FIG. 1** é mostrado o desenho esquemático do acelerador de elétrons Dynamitron.

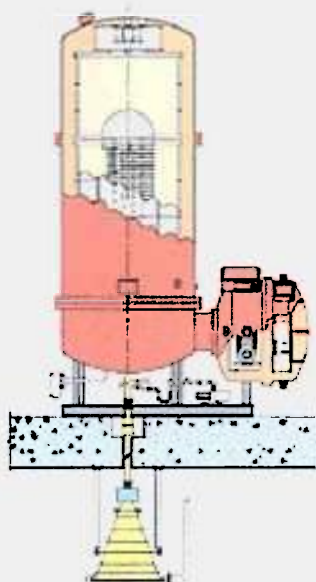


FIGURA 1 – Desenho esquemático do acelerador de elétrons Dynamitron [91].

Nestes equipamentos são geradas altas tensões (1500 kV) e feixes de elétrons são produzidos por um filamento de tungstênio aquecido e são acelerados dentro de uma estrutura aceleradora (guia de ondas e cavidades ressonantes). No sistema de varredura o feixe de elétrons é centralizado e varrido entre 60 e 120 cm. Os componentes do equipamento ficam em um sistema de vácuo fechado por uma janela de titânio. Os componentes do acelerador de elétrons são [92]:

- Painel oscilador transforma 440 volts corrente alternada, AC (fornecido pela Eletropaulo) para até 10.000 volts com uma frequência de 100 kHz, é conectado ao vaso de pressão.
- Uma tensão de até 10.000 volts / 100 kHz gerada pelo painel oscilador entra no vaso de pressão onde há um circuito ressonante eletrônico (grande porte) e é transformada em uma tensão da ordem de 1.500 kV (1.500.000 volts) de corrente contínua, DC; como

a tensão dentro do vaso é muito alta, é utilizado um gás isolante (SF_6 - Hexafluoreto de enxofre) para isolamento elétrico.

- Com a tensão gerada no vaso de pressão de até 1.500.000 volts DC o tubo de aceleração é polarizado, onde é determinada a energia de penetração do feixe de elétrons.

Exemplo: Polarizando o tubo de aceleração com 1.500.000 volts a energia obtida é de 1,5 MeV.

Para polarizar o filamento de tungstênio é retirada uma pequena tensão de 0 a 8,2 volts da alta tensão (gerada no vaso de pressão), e mediante seu aquecimento é gerada a corrente de feixe do acelerador de elétrons.

- Sistema de varredura contém várias bobinas que são utilizadas para centralizar e varrer o feixe de elétrons de 60 a 120 cm. Essas bobinas são polarizadas com uma certa tensão/freqüência, no qual é determinada a freqüência de varredura.
- Sistema de vácuo: no Dynamitron JOB 188 é utilizado uma bomba mecânica de vácuo, uma difusora e outros periféricos de vácuo, chegando o vácuo na ordem de 10^{-7} Torr.
- Sistema de controle: no Dynamitron JOB 188 todo controle é feito por meio de sistemas e sinais analógicos de controle.
- Sistema de segurança, conforme padrões internacionais e norma CNEN. São utilizados “interlocks” (“microswitches” nas portas e acessos aos aceleradores), fotocélulas, tapetes capacitivos e também detectores de radiação controlados por microcomputadores e circuito fechado de TV.

ANEXO 2 – Ilustrações da fonte Gammacell 220

Na FIG. 1 é mostrada foto da fonte Gammacell 220.

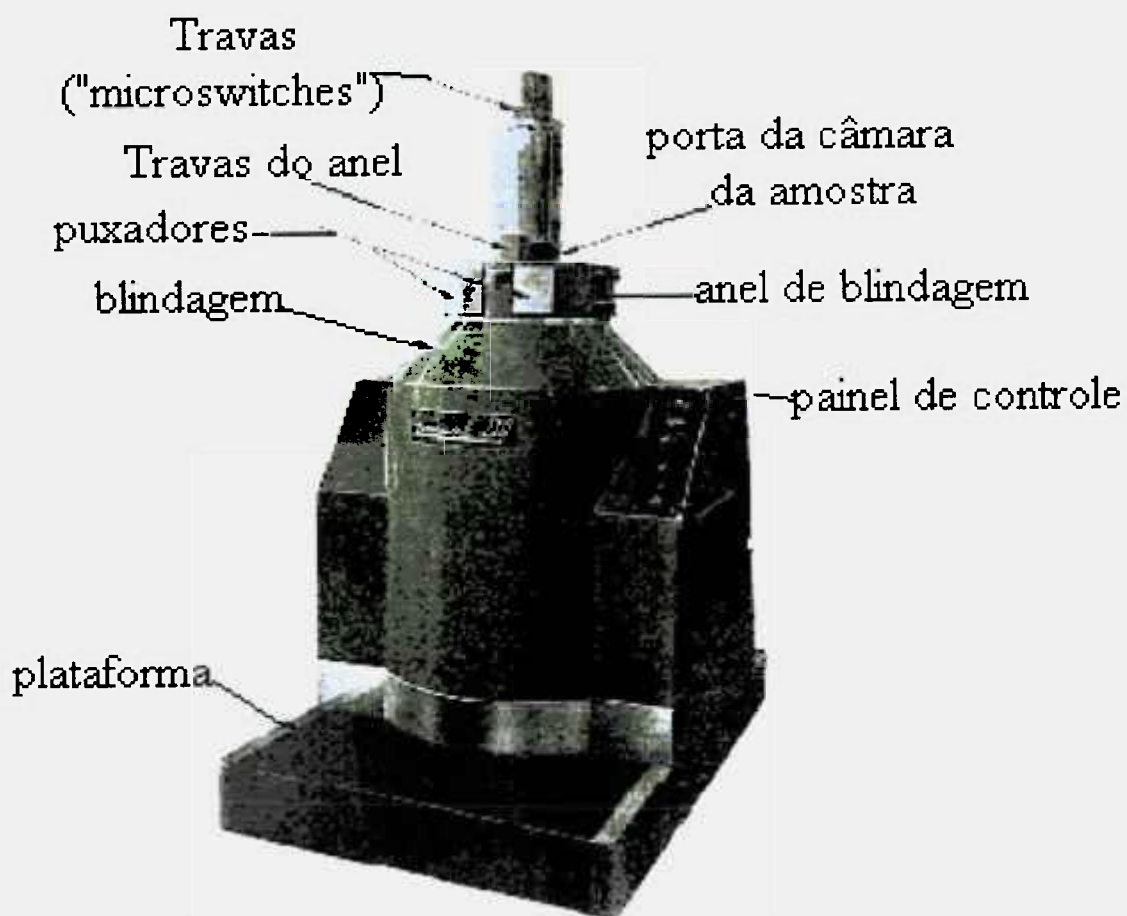


FIGURA 1 – Fonte de ^{60}Co Gammacell 220

Na FIG. 2, a câmara de irradiação aparece em destaque mostrando o local de colocação dos materiais a serem irradiados.

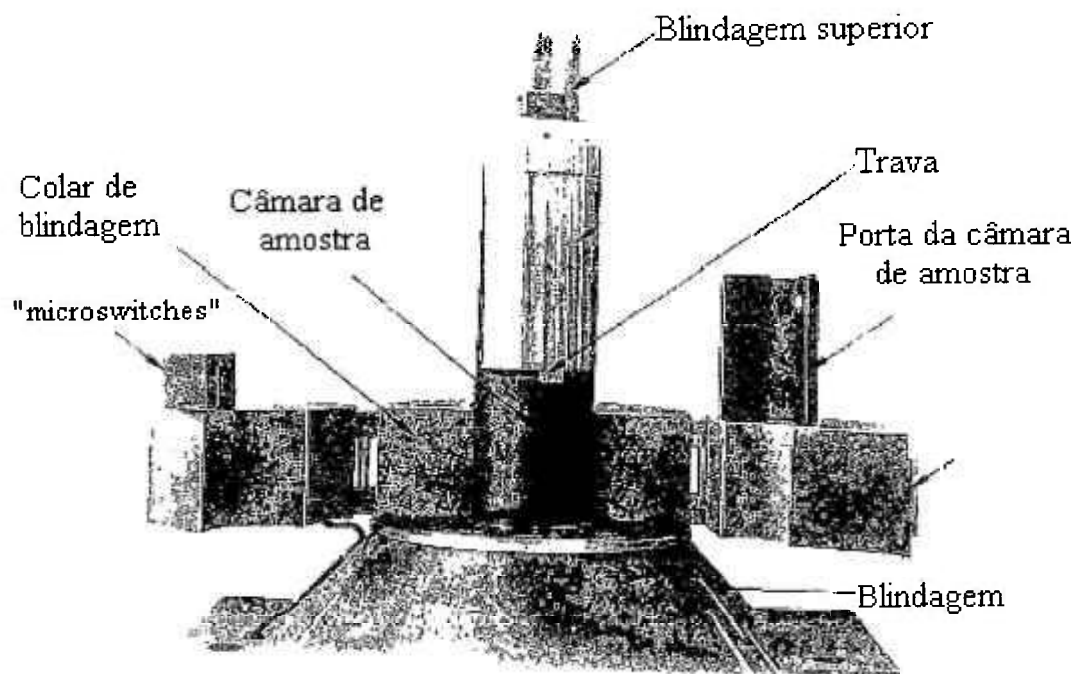


FIGURA 2 – Destaque da câmara de irradiação.

Na FIG. 3 é mostrado o arranjo dos lápis na fonte.

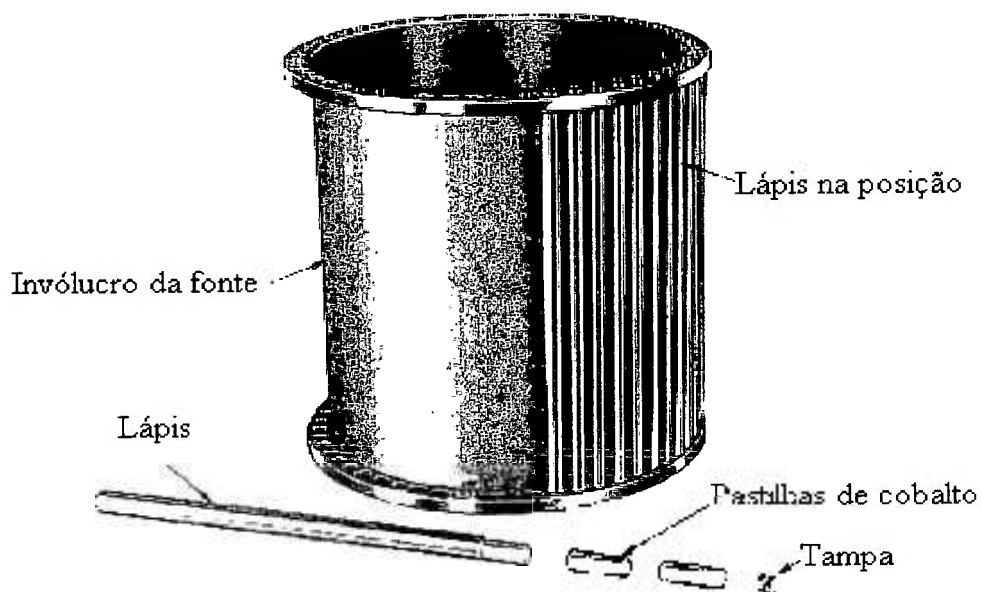


FIGURA 3 – Disposição dos lápis na fonte e lápis com as pastilhas de ^{60}Co .

Na **FIG. 4** são mostrados os atenuadores de chumbo que são utilizados para reduzir a taxa de dose em aproximadamente 90%, 70% e 50%.

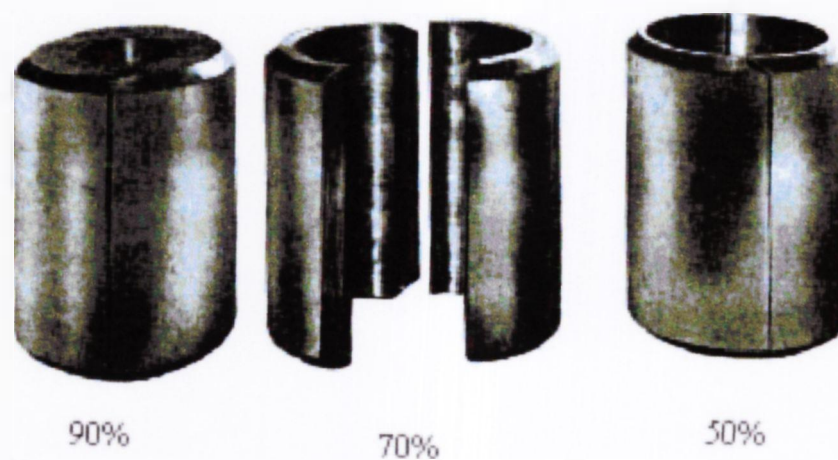


FIGURA 4 – Atenuadores de chumbo.

ANEXO 3 – Terminologia [11, 17, 59-61, 73, 93].

- **Absorvância líquida** (ΔA) – Mudança na medida de absorvância induzida pela radiação em um comprimento de onda selecionado.

$$\Delta A = A - A_0$$

- **Absorvância específica** (k) - Absorvância líquida (ΔA) em um comprimento de onda selecionado dividido pela espessura t do dosímetro.

$$k = \frac{\Delta A}{t}$$

- **Atividade** (A) - Quociente de dN por dt , onde dN é o número de transformações nucleares que ocorrem no tempo dt .

$$A = \frac{dN}{dt} = \lambda N = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} N \quad (\text{Bq - becquerel})$$

λ = constante de decaimento

N = número de átomos radioativos

$t_{1/2}$ = meia vida

- **Coefficiente de absorção molar** (ϵ) – absorção de luz por unidade de espessura e por unidade de concentração.
- **Comprimento de onda** (λ) - Distância entre dois picos de ondas adjacentes.
- **Concentração molar** (M) – quociente do número de mols do soluto pelo volume da solução.

$$M = \frac{n}{V}$$

- **Dose Absorvida** (D) – Quociente entre a energia média $d\bar{E}$ por dm , onde $d\bar{E}$ é a energia média transferida pela radiação ionizante para a matéria no volume do elemento e dm é a massa de matéria contida no volume deste elemento.

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm} \quad (\text{Gy})$$

- **Espectroscopia** – É o uso da absorção, emissão ou espalhamento da radiação eletromagnética pela matéria em estudos quantitativos ou qualitativos. A interação

da radiação com a matéria pode causar o redirecionamento da radiação e/ou transições entre níveis de energia do átomo ou molécula.

▪ **Frequência** (ν) - Número de vibrações da onda por segundo.

▪ **Taxa de Dose** (\dot{D}) - Dose absorvida, dD , no intervalo de tempo, dt

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

▪ **Ajuste das curvas – Método dos mínimos quadrados**

- **R – coeficiente de correlação** – é um índice que varia entre -1 e $+1$, apontando o quanto as diversas medidas obtidas, tomando-se por base a amostra, se ajustam à equação matemática proposta. Quanto maior o valor absoluto de R (seja positivo ou negativo), maior a concordância entre os dados e a curva de regressão.

Valor 0 – total ausência de relação;

Valor 1 – relação perfeita.

R² – percentual da variância de uma das variáveis que pode ser explicada a partir da outra.

Sinal da correlação – uma correlação positiva indica que as duas variáveis tendem a aumentar ou diminuir concomitantemente. Uma correlação negativa diz que quando uma variável tende a aumentar de valor a outra tende a diminuir.

- **P – probabilidade** – toda correlação apresenta uma probabilidade de ter ocorrido por causa do puro acaso. Quando $P \leq 0,5$ considera-se que a correlação é estatisticamente significativa, ou seja, que não é fortuita. Caso contrário, é como se não houvesse correlação.

ANEXO 4 – Alcance dos elétrons (A)

Quando os elétrons penetram perpendicularmente no material sob irradiação, ocorre a distribuição da dose ao longo da espessura deste material. Se E_0 é a energia inicial dos elétrons, que é dissipada ao longo do percurso até reduzir a zero, o alcance, A , é dado por [14, 62, 94]:

$$A = \int_0^{E_0} \frac{dE}{(S/\rho)_{tot}} \quad (\text{kg.m}^{-2})$$

onde $(S/\rho)_{tot} = (1/\rho) \cdot (dE/dl)$ é o poder de freamento total (quociente de dE (energia perdida por uma partícula carregada) por ρ/dl (distância atravessada dl num material com densidade ρ)).

A seguir são apresentadas as equações para a determinação do alcance dos elétrons:

$$A_{\acute{o}timo} = \frac{(0,41.E - 0,12)}{\rho}$$

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

$$A_{extrapolado} = \frac{(0,57.E - 0,19)}{\rho}$$

Onde:

A = alcance (cm);

E = energia dos elétrons incidentes (MeV);

ρ = densidade do material absorvedor (g.cm^{-3}).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS*

- 1 MARTINS, J.B. **História da energia nuclear** - Apostilas CNEN. Disponível em: < <http://www.cnem.gov.br/> >. Acesso em: 04 abr. 2003.
- 2 RZYSKI, B.M.; SORDI, G.M.A.A. Medicina contemporânea e energia nuclear. **Médicos**. n.7, abr/mar, 1999.
- 3 NATIONAL PHYSICAL LABORATORY. Disponível em: < <http://www.npl.co.uk> >. Acesso em: 02 out. 2003.
- 4 MILLER, A.; SHARPE, P.; CHU, R. Dosimetry for industrial radiation processing. **ICRU News 2000**. Disponível em: < http://www.icru.org/n_001_3.htm >. Acesso em: 10 dez. 2002.
- 5 O'DONELL, J.H.; SANGSTER, D.F. **Principles of radiation chemistry**. Edward Arnold LTD, London, 1970.
- 6 DANTAS, V. Técnicas nucleares na agricultura. **Revista Brasil Nuclear**, ano 6, n.19, abr/jun, 1999.
- 7 EMPRESA BRASILEIRA DE RADIAÇÕES. Disponível em: <<http://www.embrarad.com.br>>. Acesso em: 02 out. 2003.
- 8 GIURLANDI, S. Fabricantes de produtos naturais despertam para os benefícios da irradiação. **Revista Brasil Nuclear**, ano 8, n. 23, abr/set, 2001.
- 9 COMPANHIA BRASILEIRA DE ESTERILIZAÇÃO. Disponível em: < <http://www.cbe-as.com.br/> >. Acesso em: 20 agos. 2003.
- 10 TECH ION. Disponível em: < <http://www.techion.com.br> >. Acesso em: 10 set. 2003.
- 11 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Dosimetry for food irradiation**. Technical Reports Series No. 409, Vienna, 2002. – Disponível em: < http://www-pub.iaea.org/MTC/publications/PDF/TRS409_scr.pdf >. Acesso em: 05 jun. 2003.
- 12 McLAUGHLIN, W.L.; BOYD, A.W.; CHADWICK, K.H; McDONALD, J.C.; MILLER, A. **Dosimetry for radiation processing**. Taylor & Francis, New York, 1989.
- 13 McLAUGHLIN, W.L.; DESROSIERS, M.C. Dosimetry systems for radiation processing. **Radiat. Phys. Chem.**, v. 46, n. 4/6, p. 1163-1174, 1995.

- 14 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.
- 15 INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Proceedings Series. **High dose dosimetry for radiation processing**. Proceedings of an International Symposium Vienna, 1991.
- 16 CALDAS, L.V.E.; TEXEIRA, M.I. Commercial glass for high doses using different dosimetric techniques. **Radiat. Protec. Dosim.**, v. 101, n. 1/4, p. 149-152, 2002.
- 17 GALANTE, A.M.S. **Caracterização de compostos químicos para dosimetria das radiações em processos industriais**. 1999. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.
- 18 GALANTE, A.M.S.; RZYSKI, B.M.; CAMPOS, L.L.; VILLAVICENCIO, A.L. The response of potassium nitrate for high-dose radiation dosimetry. **Radiat. Phys. Chem.**, v. 63, p. 719-722, 2002.
- 19 PATIL, S.F.; CHIPLUNKAR, N.R. Influence of oxides on the radiolysis of RbNO_3 e CsNO_3 . **Radiat. Phys. Chem.**, v. 37, n. 2, p. 241-244, 1991.
- 20 JOSHI, N.G.; GARG, A.N.; NATARAJAN, V.; SASTRY, M. Effect of oxide additives on radiolytic decomposition of zirconium and thorium nitrates. **Radiation Measurements**, v. 26, n.1, p. 131-137, 1996.
- 21 POGGE, H.B.; JONES F.T. The effect of temperature and additives in the radiolysis of potassium nitrate. **J. Phys. Chem.**, v. 74, n. 8, p. 1700-1705, 1970.
- 22 PARWATE, D.V.; GARG A.N. Effect of outer cations and water of crystallization on the radiolytic decomposition of nitrates. **J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett.**, v. 85, n. 4, p. 203-212, 1984.
- 23 PATIL, S.F.; BEDEKAR, A.G. Radiation decomposition of pure and barium doped potassium nitrate and effect of oxides thereon. **Radiochimica Acta**, v. 38, p. 165-168, 1985.
- 24 KULKARNI, S.P.; GARG, A.N. Effect of additives with common cation on the radiolysis of ammonium, sodium and potassium nitrates in admixtures. **Radiat. Phys. Chem.**, v. 32, n. 4, p. 609-614, 1988.

- 25 BATRA, R.J.; GARG, A.N. Gamma radiolytic decomposition of solid binary mixtures of potassium nitrate with halide. **J. Radioanal. Nucl. Chem. Art.**, v. 129, n. 1, p. 155-162, 1989.
- 26 JOSHI, N.G.; DHOBLE, S.J.; MOHARIL, S.V.; GARG, A.N. Effect of particle size on gamma ray induced decomposition in KI-KNO₃ crystals. **Radiat. Phys. Chem.**, v. 44, n. 3, p. 317-322, 1994.
- 27 AGRAWAL, N.; GARG, A.N. Effects of oxide additives on radiolytic decomposition of potassium nitrate. In: TSRP-98 TROMBAY SYMPOSIUM ON RADIATION AND PHOTOCHEMISTRY. Mumbai, India, 1999.
- 28 DAY, M.J.; STEIN, G. Effects of x-rays upon plastic. **Nature**, v. 168, p. 644, 1951.
- 29 WHITTAKER, B.; BETT, R.; PLESTED, M.E.; WATTS, M.F. Extending the dose range of the red 4034 PMMA dosimeter. **Radiat. Phys. Chem.**, v. 49, n. 4, p. 505-508, 1997.
- 30 WHITTAKER, B. **Radiation dosimetry technique using commercial red "perspex"**. AERE-R3360, Wantage Research Laboratory, 1964.
- 31 ORTON, C.G. Red perspex dosimetry. **Phys. Med. Biol.**, v. 11, n. 4, p. 551-562, 1966.
- 32 MARSHALL, C.H.; ORTON, C.G. Measurement of dose distributions with red perspex. **Phys. Med. Biol.**, v. 11, n. 4, p. 563-568, 1966.
- 33 WHITTAKER, B.; WATTS, M.F.; MELLOR, S.; HENEGHAN, M. **Some parameters affecting the radiation response and post-irradiation stability of red 4034 perspex dosimeter**. High-Dose Dosimetry – IAEA / SM 272/5, 1985.
- 34 BARRET, J.H.; GLOVER, W.L.; MCLAUGHLIN, W.L.; SHARPE, P.H.G.; WATTS, M.F.; WHITTAKER, B. A high-dose intercomparison study involving red 4034 perspex and FWT-60-00 radiochromic dye films. **Radiat. Phys. Chem.**, v. 36, n. 3, p. 505-507, 1990.
- 35 GALINDO, S.; LÓPEZ, R. A red perspex 4034 dose reader. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, v. 374, p. 105-107, 1996.
- 36 WHITTAKER, B.; WATTS, M.F. The influence of dose rate, ambient temperature and time on the radiation response of Harwell PMMA dosimeters. **Radiat. Phys. Chem.**, v. 60, p. 101-110, 2001.

- 37 BETT, R.; WATTS, M.F.; PLESTED, M.E. The shelf life of dyed polymethylmethacrylate dosimeter. **Radiat. Phys. Chem.**, v. 63, n. 3/6, p. 793-797, 2002.
- 38 MILLER, A.; BJERGBAKKE, E.; McLAUGHLIN, W.L. Some limitations in the use of plastic and dyed plastic dosimeters. **Int. J. Appl. Radiat. Isot.**, v. 26, p. 611-620, 1975.
- 39 McLAUGHLIN, W.L.; HUMPHEYS, J.C.; RADAK, B.B.; MILLER, A.; OLEJNIK, T.A. The response of plastic dosimeter to gamma rays and electrons at high absorbed rates. **Radiat. Phys. Chem.**, v. 14, p. 535-550, 1979.
- 40 BARAKAT, M.F.; EL-SALAMAWY, K.; EL-BANNA, M.; ABDEL-HAMID, M.; TAHA, A. ABDEL-REHIM. Radiation effects on some dyes in non-aqueous solvents and in some polymeric films. **Radiat. Phys. Chem.**, v. 61, p. 129-136, 2001.
- 41 VILLARREAL-BARAJAS, J.E.; GONZALEZ-MARTINEZ, P.R.; URENA-NUNEZ, F.; MARTINEZ-AYALA, L.; TOVAR-MUNOZ, V.M. Intercomparasion of absorbed dose to water measurements for ^{60}Co gamma rays using Fricke, alanina and radiochromic dye film dosimetry. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 101, n. 1/4, p. 449-452, 2002.
- 42 AKHAVAN, A.; SOHRABPOUR, M.; SHARIFZADEH, M. Preparation of a new chemical radiochromic film dosimeter. **Radiat. Phys. Chem.**, v. 63, n. 3/6, p. 773-775, 2002.
- 43 WATTS, M.F.; BETT, R. A new dosimetry system using a portable reader. **Radiat. Phys. Chem.**, v. 63, n. 3/6, p. 799-801, 2002.
- 44 EBRAHEEM, S.; EID, S.; KOVÁKS, A. A new dye poly(vinyl alcohol) film for high-dose applications. **Radiat. Phys. Chem.**, v. 63, n. 3/6, p. 807-811, 2002.
- 45 McLAUGHLIN, W.L. Radiation chemistry of anionic diazo dyes in cellophane films applications for high-dose dosimetry. **Radiat. Phys. Chem.**, v. 67, n. 3/4, p. 561-567, 2003
- 46 RICKEY, J.D.; HANDLOSER Jr, J.S.; WILDE, W.O. Effects of several parameters on a thickness-independent radiochromic thin-film dosimetry system. **Radiat. Phys. Chem.**, v. 46, n. 4/6, p. 1269-1272, 1995.
- 47 CALDAS, L.V.E.; QUEZADA, V.A.C. Influence of thermal treatments on the response decay of glass radiation detectors. **Radiat. Protec. Dosim.**, v. 100, n. 1/4, p. 433-436, 2002.

- 48 UENO, K. Development of a plastic dosimeter for industrial use with high doses. **Radiat. Phys. Chem.**, v. 31, n. 4/6, p. 467-472, 1988.
- 49 SIDNEY, L.N.; LYNCH, D.C.; WILLET, P.S. A new radiochromic dosimeter film. **Radiat. Phys. Chem.**, v. 35, n. 4/6, p. 779-782, 1990.
- 50 BOAG, J.W.; DOLPHIN, G.W.; ROTBLAT, J. Radiation dosimetry by transparent plastics. **Radiation Research**, v. 9, p. 589-610, 1958.
- 51 BARRETT, J.H. Dosimetry with dyed and undyed acrylic plastic. **Int. J. Appl. Radiat. Isot.**, v. 33, p. 1177-1187, 1982.
- 52 KHAN, H.M.; AHMAD, G. Spectrophotometric analysis of blue polymethylmethacrylate as high-dose dosimeter. **Radiat. Phys. Chem.**, v. 35, n. 4/6, p. 732-738, 1990.
- 53 WHITTAKER, B. A new PMMA dosimeter for low doses and low temperatures. **Radiat. Phys. Chem.**, v. 35, n. 4/6, p. 699-702, 1990.
- 54 BIRAMONTRI, S.; HANEDA, N.; TACHIBANA, H.; KOJIMA, T. Effect of low irradiation temperature on the gamma-ray response of dyed and undyed PMMA dosimeter. **Radiat. Phys. Chem.**, v. 48, n. 1, p. 105-109, 1996.
- 55 FAIRAND, B. Calibration of a polymethylmethacrylate routine dosimetry system. **Radiat. Phys. Chem.**, v. 52, n. 1/6, p. 523-526, 1998.
- 56 WATTS, M.F. The influence of dose rate, irradiation temperature and post-irradiation storage conditions on the radiation response of Harwell Gammachromic YR PMMA dosimeter. Techniques for High Dose Dosimetry in Industry, Agriculture and Medicine. (Proc. Symp Vienna, 1998), **IAEA-TECDOC-1070**, SM 356 / 75, p. 127-134, 1999.
- 57 MEHTA, K.; FUOCHI, P. G.; KOVACS, A.; LAVALLE, M.; HARGITTAI, P. Dose distribution in electron-irradiated PMMA: effect of dose and geometry. **Radiat. Phys. Chem.**, v. 55, p. 773-779, 1999.
- 58 BRODE, W.R. **Chemical spectroscopy**. John Wiley & Sons, New York, 1943.
- 59 JEFFERY, G.H.; BASSET, J.; MENDHAN, J.; DENNEY, R.C. **Análise química quantitativa**. Vogel, 5. ed., Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, 1992. Tradução de: Macedo, H.

- 60 ENCYCLOPEDIA OF ANALYTICAL INSTRUMENTATION – Spectroscopy –
Direitos Autorais de Brian M. Tissue, 2000. Disponível em:
< www.chemistry.vt.edu/chem-ed/spec/spectros.html >. Acesso em: 24 jun. 2003.
- 61 RAABE, O.G. **Internal radiation dosimetry**. Health Physics Society, Summer School, 1994. Medical Physics, Madison, 1994.
- 62 HOLM, N.W.; BERRY, R.J. **Manual on radiation dosimetry**. Marcel Dekker, New York, 1970.
- 63 SABOL, J.; WENG, P.S. **Introduction to radiation protection dosimetry**. World Scientific, London, 1995.
- 64 KNOLL, G.F. **Radiation detection and measurement**. John Wiley & Sons, New York, 2. ed., 1989.
- 65 KIRCHER, J.F.; BOWMAN, R.E. **Effects of radiation on materials and components**. Reinhold, New York, 1964.
- 66 ATTIX, F.H. **Introduction to radiological physical and radiation dosimetry**. John Wiley & Sons, London, 1986.
- 67 NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. Disponível em:
< <http://nist.gov/> >. Acesso em: 10 jun. 2003.
- 68 INTERNACIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Department of Technical Co-operation. Disponível em: < <http://www.iaea.org> >. Acesso em: 10 jun. 2003.
- 69 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard guide for selection and application of dosimetry systems for radiation processing food**. (ASTM E 1261), Annual Book, v. 12.02, 1994.
- 70 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard practice for use of a polymethylmethacrylate dosimetry system**. (ASTM E 1276 – 96), Annual Book, v. 12.02, 1996.
- 71 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard practice for use of a radiochromic film dosimetry system**. (ASTM E 1275 – 93), Annual Book, v. 12.02, 1993.
- 72 FRICKE, H.; HART, E.J. **Chemical dosimetry**. In: Attix, F.H.; Roesch, W.C. Radiation dosimetry. New York, Academic, v. 3, p. 167, 1968.
- 73 SHANI, G. **Radiation dosimetry instrumentation and methods**. CRC, London 1991.

- 74 WEXLER, A.; HASEGAWA, S. Relative humidity-temperature relationships of some saturated salt solutions in the temperature range 0° to 50°C. **Journal of Research of the National Bureau of Standards**, v. 53, p. 19-26, 1954.
- 75 KHARE, V.S.; RAMSHESH, V.; VENKATESWARLU, K.S. Radiolysis of ferrous ammonium sulphate in alkali nitrate and alkali halide matrices. **Radiation Effects**, v. 20, p. 153-157, 1973.
- 76 CUNNINGHAM, J. Radiation chemistry of ionic solids. I. Diffusion-controlled mechanism for radiolysis of ionic nitrates. **J. Phys. Chem.**, v. 65, p. 628, 1961.
- 77 JOHNSON, E.R. Effect of intensity on the radiation induced decompositions of inorganic nitrates. **J. Phys. Chem.**, v. 66, p. 755-758, 1962.
- 78 DEPARTMENT OF POLYMER SCIENCE. University of Southern Mississippi. Disponível em: < <http://www.psrc.usm.edu/macrog/vinyl.htm> > Acesso em: 15 agos. 2003.
- 79 INSTRUCTION MANUAL UV-2101/3101PC Shimadzu Corporation Chromatography & Spectrophotometric – Instruments Division, 1993.
- 80 SHINN, M.B. Colorimetric method for determination of nitrite. **Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.**, v. 13, n. 1, p. 33-35, 1941.
- 81 KERSHAW, N.F.; CHAMBERLIN, N.S. Determination of nitrites. **Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.**, v. 14, n. 4, p. 312-313, 1942.
- 82 DORDA, E.M.; MUÑOZ, S.S. Potassium nitrate / nitrite dosimeter for high – doses. In: PROCEEDING OF AN INTERNATIONAL SYMPOSIUM – HIGH DOSIMETRY, Vienna, 1984. IAEA SM 272 / 1, p. 193-203, 1985.
- 83 TORRES C., R.R. **Medición de altas dosis de radiación gamma por el sistema nitrato – nitrito de potasio**. 1993. Tese (para obter el título de Ingeniero Químico) Universidade Nacional del Callao. Facultad de Ingeniería Química. Callao, Peru.
- 84 TECHNICAL DATA SHEET – Ciba SC Products – Disponível em: < <http://www.cibasc.com> >. Acesso em: 12 dez. 2002.
- 85 BAYER CHEMICAL – **Plásticos e Polímeros** – Disponível em: < <http://www.bayer.com.br> >. Acesso em: 12 dez. 2002.

- 86 CHINISE CHEMICAL SUPPLIERS. eChinaChem. Disponível em:
< <http://www.echinachem.com> > Acesso em: 10 dez. 2002.
- 87 DANISH ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Danish Ministry of the Environment. Disponível em: < <http://www.mst.dk> >. Acesso em: 10 dez. 2002.
- 88 SUNNA SYSTEMS CORPORATION. Disponível em: < <http://www.sunnasys.com/> >. Acesso em: 21 mai. 2003.
- 89 HARWELL DOSIMETERS LTD. Systems for radiation processing. Specifications. Disponível em: <<http://harwell-dosimeters.co.uk/>>. Acesso em: 10 dez. 2002.
- 90 ISP TECHNOLOGIES INC. International Specialty Products. Disponível em: < <http://www.ispcorp.com/> > Acesso em: 21 mai. 2003.
- 91 IBA TECHNOLOGY GROUP. Dynamitron Electron Beam Accelerators. Disponível em: < <http://www.iba-tg.com> >. Acesso em: 25 jun. 2003.
- 92 APLICAÇÃO DE FONTES INTENSAS DE RADIAÇÃO – Apostila da Disciplina de Pós-Graduação TNA 5744, 1998.
- 93 RADIATION QUANTITIES AND UNITS – **ICRU REPORT 33** – USA, 1980.
- 94 TABATA, T.; ITO, R.; KURIYAMI, I.; MORIUCHI, Y. Simple method of evaluating absorbed dose um electron-beam processing. **Radiat. Phys. Chem.**, v. 33, p. 441, 1989.
- * De acordo com o guia para elaboração de dissertações e teses, organizado por Mery P. Zamudio Igami e Lia Maria Carlotti Zarpelon, Divisão de Informação e Documentação Científicas, Biblioteca Terezine Arantes Ferraz, IPEN, 2002.