

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS
ENERGÉTICAS E NUCLEARES (PROTEN)**

**ADAPTAÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORAÇÃO INDIVIDUAL EXTERNA
PARA RAIOS X E GAMA PARA AVALIAÇÃO DO EQUIVALENTE DE DOSE
PESSOAL “ $H_p(10)$ ”, UTILIZANDO A TÉCNICA DA DOSIMETRIA
FOTOGRAFICA**

CHRISTIANA SANTORO

**RECIFE – PERNAMBUCO - BRASIL
SETEMBRO - 2007**

**ADAPTAÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORAÇÃO INDIVIDUAL EXTERNA
PARA RAIOS X E GAMA PARA AVALIAÇÃO DO EQUIVALENTE DE DOSE
PESSOAL “ $H_p(10)$ ”, UTILIZANDO A TÉCNICA DA DOSIMETRIA
FOTOGRAFICA**

CHRISTIANA SANTORO

**ADAPTAÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORAÇÃO INDIVIDUAL EXTERNA
PARA RAIOS X E GAMA PARA AVALIAÇÃO DO EQUIVALENTE DE DOSE
PESSOAL “H_p(10)”, UTILIZANDO A TÉCNICA DA DOSIMETRIA
FOTOGRAFICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Tecnologias Energéticas e Nucleares. Área de concentração: Dosimetria e Instrumentação.

ORIENTADOR: DR. JOÃO ANTONIO FILHO

RECIFE – PERNAMBUCO - BRASIL
SETEMBRO – 2007

S237a

Santoro, Christiana

Adaptação de um sistema e monitoração individual externa para Raios X e Gama para avaliação do equivalente de dose pessoal "Hp(10)", utilizando a técnica da dosimetria fotográfica / Christiana Santoro. - Recife: O Autor, 2007.

114 folhas, il : figs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Energia Nuclear, 2007.

Inclui bibliografia, Apêndice e Anexos.

1. Energia Nuclear. 2. Dosimetria Fotográfica. 3. Programação Linear. 4. Monitoração Individual I. Título.

UFPE

612.01448

CDD (22. ed.)

BCTG/2007-150

**ADAPTAÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORAÇÃO INDIVIDUAL EXTERNA
PARA RAIOS X E GAMA PARA AVALIAÇÃO DO EQUIVALENTE DE DOSE
PESSOAL “H_p(10)”, UTILIZANDO A TÉCNICA DA DOSIMETRIA FOTOGRÁFICA**

Christiana Santoro

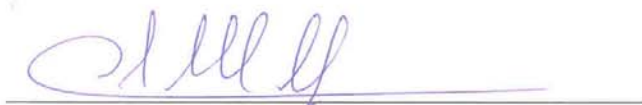
APROVADA EM: 26.09.2007

ORIENTADOR: Prof. Dr. João Antonio Filho

COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Êudice Correia Vilela – CRCN/CNEN-PE



Prof. Dr. Clovis Abrahão Hazin – CRCN/CNEN-PE



Prof. Dr. Francisco Almeida de Melo – DF/UNICAP

Visto e permitida a impressão


Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe Marluce e à minha filha Mariana, pela confiança e incentivo, e por estarem sempre tão presentes em minha vida compartilhando o amor, o respeito, a amizade.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida e por me proporcionar mais essa oportunidade.

Ao meu pai, Fábio Santoro (in memoriam), aparentemente ausente, mas sempre presente inspirando-me coragem e perseverança, dando-me a força necessária para prosseguir na caminhada. A ele dedico todos os méritos.

À minha mãe, pelo amor e confiança dispensados em todas as fazes da minha vida. À minha filha, pela compreensão em nem sempre me ter presente em momentos de sua vida. Ao meu noivo, pela compreensão e colaboração, por estar sempre por perto disposto a ajudar.

Em especial, ao Profº João Antônio Filho, pela orientação segura e equilibrada durante todo o processo de elaboração deste trabalho; pela sua atenção; apoio; incentivo; leitura e discussão deste trabalho.

Ao Centro Regional de Ciências Nucleares, em especial ao Profº Marcus Aurélio P. dos Santos, pela leitura, sugestões e apoio nas irradiações dos dosímetros, como também, aos técnicos: Luiz, Fábio, Alberto e Paulo pelo apoio e as horas me acompanhando na utilização dos aparelhos do Laboratório de Metrologia.

Ao Laboratório de Proteção Radiológica do Departamento de Energia Nuclear, por me ceder os materiais necessários para realização deste trabalho. Em especial a Vigberto e Jutai pela indispensável colaboração durante o processamento dos dosímetros.

Ao amigo Sergio Torres pelas dicas com os softwares utilizados no trabalho.

À secretária Magali pelo incentivo e amizade.

À minha amiga Fernanda Lúcia de Oliveira, pelo incentivo a voltar a estudar e pela grande colaboração com os textos conseguidos.

À Universidade Católica de Pernambuco, em especial ao meu chefe, Profº Augusto O. G. de Lima pela compreensão em todos os momentos. Aos demais amigos da Católica, professores: Luiz Gonzaga; Francisco Melo; Carlos Campos, Adeildo Barbosa, Expedito Fernando, Antonio Miranda, Francisco dos Santos e a secretária Maria pela torcida.

A todos, que direta ou indiretamente estiveram comigo, colegas de curso, que até mesmo com um simples gesto de carinho ou uma palavra amiga ajudaram incentivando na conclusão do trabalho.

SUMÁRIO

Página

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

RESUMO

ABSTRACT

1 INTRODUÇÃO	19
2 REVISÃO DE LITERATURA	22
2.1 Grandezas utilizadas na radioproteção	22
2.2 Monitoração de área	24
2.2.1 O equivalente de dose direcional, $H'(d, \Omega)$	25
2.2.2 O equivalente de dose ambiente, $H^*(d)$	27
2.3 Monitoração pessoal	27
2.3.1 O equivalente de dose pessoal, $H_p(d)$	27
2.4 Dosímetros e dosimetria fotográfica	29
2.5 Curva característica	31
2.6 Calibração de dosímetros individuais	34
2.7 Sistema de cálculo do equivalente de dose	35
3 MATERIAL E MÉTODOS	39
3.1 Material	39
3.1.1 Porta dosímetro	39
3.1.2 Filme dosimétrico	39
3.1.3 Fontes de irradiação	40
3.1.4 Câmara de ionização / eletrômetro	41
3.1.5 Fantoma	41
3.1.6 Câmara escura	42
3.1.7 Densitômetro	42
3.2 Métodos	42
3.2.1 Calibração dos dosímetros	42
3.2.2 Irradiação dos dosímetros	44
3.2.3 Processamento dos filmes	47
3.2.4 Avaliação do equivalente de dose pessoal $H_p(d)$	47
3.2.5 Teste de precisão (curva trombeta)	49
4 RESULTADOS	50

5 CONCLUSÕES	70
REFERÊNCIAS	71
APÊNDICES	75
APÊNDICE A – Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com ^{60}Co; ^{137}Cs e fótons de energias 45 keV; 48 keV; 57 keV; 83 keV; 104 keV; 118 keV; 137 keV; 164 keV; para emulsões mais e menos sensíveis - Tabelas 7 a 26	75
APÊNDICE B – Densidades ópticas de referência sob os filtros: Pl; Cu 0,1; Pb; Cu 0,5 e Ja em função do equivalente de dose pessoal H_p ajustado, para os filmes irradiados com ^{60}Co e fótons de energia 104 keV	85
APÊNDICE C – Comparação entre H_{pa} e o H_{pr} – Avaliação (emulsões mais e menos sensíveis) - Tabelas de 35 e 36	90
ANEXOS	92
ANEXO A – Algoritmo KCALC_UFPE de 18/01/2007	92
ANEXO B – Algoritmo COMBINAÇÕES LINEARES de 22/05/2007	110

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - Relação entre campos de radiação de referência, grandezas físicas e grandezas operacionais	24
Figura 2 - Representação esquemática de campos de radiação: (a) campo real no ponto P de interesse; (b) campo expandido; (c) campo expandido e alinhado	25
Figura 3 - Geometrias da radiação da esfera ICRU: no ponto P' na esfera em que o equivalente de dose é determinado em (a), num campo de radiação expandido e em (b), num campo de radiação expandido e alinhado	26
Figura 4 - Fantomas ICRU e dosímetros	29
Figura 5 - A estrutura de um filme	30
Figura 6 - Curva característica: Densidade Óptica (DO) em função do logaritmo da exposição (Log X)	32
Figura 7 - Sensibilidade em função da energia	33
Figura 8 - O porta dosímetro	39
Figura 9 - Fantoma slab	41
Figura 10 - Esquema ilustrativo do posicionamento dos dosímetros fotográficos sobre o fantoma e o feixe de radiação: (a) Arranjo de irradiação no ^{60}Co e ^{137}Cs ; (b) Arranjo de irradiação no sistema de raios X	45
Figura 11 - Arranjo experimental de irradiação no laboratório com fonte de ^{60}Co	45
Figura 12 - Arranjo experimental de irradiação no laboratório com fonte de ^{137}Cs	46
Figura 13 - Arranjo experimental de irradiação no laboratório com raios X	46
Figura 14 - Limites da curva trombeta, para intercomparação entre o equivalente de dose pessoal avaliado e o equivalente de dose pessoal real	49
Figura 15 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia do ^{60}Co – emulsão mais sensível	50
Figura 16 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia do ^{60}Co – emulsão menos sensível	51
Figura 17 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia do ^{137}Cs – emulsão mais sensível	51

Figura 18 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia do ^{137}Cs – emulsão menos sensível	52
Figura 19 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios X W60 – 45 keV – emulsão mais sensível	52
Figura 20 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios X W60 – 45 keV – emulsão menos sensível	53
Figura 21 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios X N60 – 48 keV – emulsão mais sensível	53
Figura 22 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios X N60 – 48 keV – emulsão menos sensível	54
Figura 23 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios X W80 – 57 keV – emulsão mais sensível	54
Figura 24 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios X W80 – 57 keV – emulsão menos sensível	55
Figura 25 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios X N100 – 83 keV – emulsão mais sensível	55
Figura 26 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios X N100 – 83 keV – emulsão menos sensível	56
Figura 27 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios X W150 – 104 keV – emulsão mais sensível	56
Figura 28 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios X W150 – 104 keV – emulsão menos sensível	57
Figura 29 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios X N150 – 118 keV – emulsão mais sensível	57
Figura 30 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios X N150 – 118 keV – emulsão menos sensível	58
Figura 31 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios X W200 – 137 keV – emulsão mais sensível	58
Figura 32 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios X W200 – 137 keV – emulsão menos sensível	59

Figura 33 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios X N200 – 164 keV – emulsão mais sensível	59
Figura 34 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios X N200 – 164 keV – emulsão menos sensível	60
Figura 35 - Densidade óptica sob filtro de Pb em função do equivalente de dose pessoal H_p para a energia do ^{60}Co – emulsão mais sensível	63
Figura 36 - Densidade óptica sob filtro de Pb em função do equivalente de dose pessoal H_p para a energia do ^{60}Co – emulsão menos sensível	63
Figura 37 - Dose aparente (DA) sob filtros: Ja; Pl; Cu 0,1; Cu 0,5 e Pb em função da D_r , na região linear, para todas as energias e filtros - emulsão mais sensível	64
Figura 38 - Dose aparente (DA) sob filtros: Ja; Pl; Cu 0,1; Cu 0,5 e Pb em função da D_r , na região linear, para todas as energias e filtros – emulsão menos sensível	65
Figura 39 - Densidades ópticas de referência sob filtro de plástico em função do equivalente de dose pessoal H_p ajustado – na energia do ^{60}Co	85
Figura 40 - Densidades ópticas de referência sob filtro de cobre 0,1 mm em função do equivalente de dose pessoal H_p ajustado – na energia do ^{60}Co	85
Figura 41 - Densidades ópticas de referência sob filtro de chumbo em função do equivalente de dose pessoal H_p ajustado – na energia do ^{60}Co	86
Figura 42 - Densidades ópticas de referência sob filtro de cobre 0,5 mm em função do equivalente de dose pessoal H_p ajustado – na energia do ^{60}Co	86
Figura 43 - Densidades ópticas de referência sob a janela em função do equivalente de dose pessoal H_p ajustado – na energia do ^{60}Co	87
Figura 44 - Densidades ópticas de referência sob filtro de plástico em função do equivalente de dose pessoal H_p ajustado – fótons de energia 104 keV	87
Figura 45 - Densidades ópticas de referência sob filtro de cobre 0,1 mm em função do equivalente de dose pessoal H_p ajustado – fótons de energia 104 keV	88
Figura 46 - Densidades ópticas de referência sob filtro de chumbo em função do equivalente de dose pessoal H_p ajustado – fótons de energia 104 keV	88
Figura 47 - Densidades ópticas de referência sob filtro de cobre 0,5 mm em função do equivalente de dose pessoal H_p ajustado – fótons de energia 104 keV	89

Figura 48 - Densidades ópticas de referência sob a janela em função do equivalente de dose pessoal H_p ajustado – fótons de energia 104 keV	89
Figura 49 - Curva dos coeficientes angulares de cada filtro em função da energia – emulsão mais sensível	67
Figura 50 - Curva dos coeficientes angulares de cada filtro em função da energia – emulsão menos sensível	67
Figura 51 - Razão H_{pa}/H_{pr} em função de H_{pr}	69

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 - Fatores de peso da radiação (W_R)	22
Tabela 2 - Fatores de peso para os órgãos ou tecidos T (W_T)	23
Tabela 3 - Grandezas limitantes e operacionais	23
Tabela 4 - Fontes de radiação X, γ e β utilizadas no experimento	40
Tabela 5 - Qualidades dos feixes de radiação γ e X	43
Tabela 6 - Coeficientes de conversão, h (ISO 4037-3)	44
Tabela 7 - Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com ^{60}Co (emulsão mais sensível)	75
Tabela 8 - Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com ^{60}Co (emulsão menos sensível)	75
Tabela 9 - Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com ^{137}Cs (emulsão mais sensível)	76
Tabela 10 - Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com ^{137}Cs (emulsão menos sensível)	76
Tabela 11 - Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 45 keV – W60 (emulsão mais sensível)	77

Tabela 12 - Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 45 keV – W60 (emulsão menos sensível)	77
Tabela 13 - Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 48 keV – N60 (emulsão mais sensível)	78
Tabela 14 - Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 48 keV – N60 (emulsão menos sensível)	78
Tabela 15 - Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 57 keV – W80 (emulsão mais sensível)	79
Tabela 16 - Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 57 keV – W80 (emulsão menos sensível)	79
Tabela 17 - Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 83 keV – N100 (emulsão mais sensível)	80
Tabela 18 - Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 83 keV – N100 (emulsão menos sensível)	80

Tabela 19 - Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 104 keV – W150 (emulsão mais sensível)	81
Tabela 20 - Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 104 keV – W150 (emulsão menos sensível)	81
Tabela 21 - Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 118 keV – N150 (emulsão mais sensível)	82
Tabela 22 - Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 118 keV – N150 (emulsão menos sensível)	82
Tabela 23 - Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 137 keV – W200 (emulsão mais sensível)	83
Tabela 24 - Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 137 keV – W200 (emulsão menos sensível)	83
Tabela 25 - Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 164 keV – N200 (emulsão mais sensível)	84
Tabela 26 - Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 164keV – N200 (emulsão menos sensível)	84

Tabela 27 - Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb, Cu 0,1, Janela, Cu 0,5 e Plástico em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com ^{60}Co (emulsão mais sensível)	61
Tabela 28 - Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb, Cu 0,1, Janela, Cu 0,5 e Plástico em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com ^{60}Co (emulsão menos sensível)	61
Tabela 29 - Densidades ópticas em função do equivalente de dose pessoal H_p utilizando o modelo proposto por Borasi a partir da equação: $D_{ij} = 5,68(1 - e^{-0,07 \times H_p})$ para a emulsão mais sensível	62
Tabela 30 - Densidades ópticas em função do equivalente de dose pessoal H_p utilizando o modelo proposto por Borasi a partir da equação: $D_{ij} = 140,69 (1 - e^{-0,00003 \times H_p})$ para a emulsão menos sensível	62
Tabela 31 - Dose aparente (DA) em função da densidade óptica de referência (D_r), na região linear, para todas as energias e filtros (emulsão mais sensível)	64
Tabela 32 - Dose aparente (DA) em função da densidade óptica de referência (D_r), na região linear, para todas as energias e filtros (emulsão menos sensível)	65
Tabela 33 - Coeficientes angulares K_{ij} normalizados para o K_{ij} do Pb em 1250 keV (emulsão mais sensível)	66
Tabela 34 - Coeficientes angulares K_{ij} normalizados para o K_{ij} do Pb em 1250 keV (emulsão menos sensível)	66
Tabela 35 - Comparação entre o H_{Pa} e o H_{Pr} – Avaliação (emulsão mais sensível)	90
Tabela 36 - Comparação entre o H_{Pa} e o H_{Pr} – Avaliação (emulsão menos sensível)	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CRCN	Centro Regional de Ciências Nucleares
CSR	Camada Semi Redutora
Cu 0,1	Filtro de cobre 0,1 mm
Cu 0,5	Filtro de cobre 0,5 mm
D_{ij}	Densidade óptica líquida sob o filtro “j” para a energia “i”
D_{T,R}	Dose absorvida no tecido ou órgão T
DA	Dose Aparente
DA_j	Dose Aparente sob filtro “j”
DEN	Departamento de Energia Nuclear
DO	Densidade Óptica
EURADOS	European Radiation Dosimetry Group
GBq	Giga Becquerel
GHz	Giga Hertz
H_p(d)	Equivalente de dose pessoal
H_{pa}	Equivalente de dose pessoal avaliado
H_{pr}	Equivalente de dose pessoal real
H_x	Dose individual ou equivalente de dose para fótons
H'(d, Ω)	Equivalente de dose direcional
H*(d)	Equivalente de dose ambiente
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements
IRD	Instituto de Radioproteção e Dosimetria
ISO	International Organization for Standardization

IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
Ja	Janela
K_a	Kerma ar
NE	Nuclear Enterprises
NRPB	National Radiological Protection Board
Pb	Filtro de chumbo 0,8 mm
PI	Filtro de plástico 0,3 mm
PL	Programação Linear
PMMA	PoliMetil MetAcrilato
RAM	Random Access Memory
TLD	Dosímetro ThermoLuminescente
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
X	Exposição
$\bar{Z}$	Número atômico efetivo
W_R	Fator de peso da radiação R
W_T	Fator de peso para o tecido T

ADAPTAÇÃO DE UM SISTEMA DE MONITORAÇÃO INDIVIDUAL EXTERNA PARA RAIOS X E GAMA PARA AVALIAÇÃO DO EQUIVALENTE DE DOSE PESSOAL “ $H_p(10)$ ”, UTILIZANDO A TÉCNICA DA DOSIMETRIA FOTOGRÁFICA

Autor: Christiana Santoro

Orientador: Prof. Dr. João Antonio Filho

RESUMO

A monitoração individual avalia a exposição às fontes externas de radiação ionizante X, γ , β e n, as quais trabalhadores ocupacionais estão submetidos, para assegurar condições radiológicas aceitáveis e seguras em seus locais de trabalho. A avaliação da dose recebida por trabalhadores deve atender aos limites autorizados por organismos nacionais regulatórios. Atualmente, dois sistemas de unidades radiométricas convivem, baseados em resoluções da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e da International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU): no sistema convencional (CNEN), as doses recebidas pelos trabalhadores são avaliadas através da dose individual H_x , onde dosímetros usados na superfície do tórax são calibrados em termos do kerma ar; no sistema recente (ICRU), as doses são avaliadas através do equivalente de dose pessoal $H_p(d)$, onde dosímetros são calibrados em termos da dose sobre um fantoma. O sistema recente aprimora a forma de avaliar, por considerar a influência do espalhamento e absorção da radiação pelo corpo humano. Este trabalho adapta um serviço de dosimetria fotográfica às recentes publicações da ICRU, para avaliação de monitores individuais em função do equivalente de dose pessoal $H_p(10)$ para radiações fortemente penetrantes. Para tal, utiliza uma metodologia baseada na Programação Linear e determina curvas de calibração para as qualidades de radiação, espectros largos (W) e estreitos (N), descritos pela International Organization for Standardization (ISO 4037-1, 1995). Estas curvas de calibração oferecem uma melhor exatidão na determinação das doses e energias, aperfeiçoando a qualidade do serviço prestado à sociedade.

Palavras-chave: Monitoração Individual; Dosimetria Fotográfica; Programação Linear.

ADAPTATION OF AN INDIVIDUAL EXTERNAL MONITORING SYSTEM FOR GAMMA AND X RAY EVALUATION OF THE INDIVIDUAL DOSE EQUIVALENT " $H_p(10)$ ", UTILIZING A PHOTOGRAPHIC DOSEMETRY TECHNIQUE.

Author: Christiana Santoro

Advisor: Prof. Dr. João Antonio Filho

ABSTRACT

Individual monitoring evaluates external sources of ionizing radiation X , γ , β and n , to which workers are occupationally exposed, for ensuring safe and acceptable radiological conditions in their places of employment. The dose received by workers should attend the limits authorized by national regulatory organs. Nowadays, there are two radiometric unit systems, based on resolutions of the Nacional Nuclear Energy Commission (NNEC) and the International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU); in the conventional (NNEC) system, the doses received by workers are evaluated through the individual dose H_x , where dosimeters used on surface of thorax are calibrated in terms of air kerma; in the recent system (ICRU), the doses are evaluated through the individual dose equivalent $H_p(d)$, where dosimeters are calibrated in terms of dose from phantom. The recent system improves the method of evaluation, by taking into account the scattering effect and absorption of radiation in the human body. This work adapts a photographic dosimetry service to the recent ICRU publications, for evaluation of individual monitoring, in function of the individual dose equivalent $H_p(10)$ of strong penetrating radiation. For this, a methodology based on linear programming and determination of calibration curves is used for radiation capacities, wide (W) and narrow (N) spectra, as described by the International Organization for Standardization (ISO 4037-1, 1995). These calibration curves offer better accuracy in the determination of doses and energy, which will improve the quality of the service given to society.

Keywords: Individual monitoring, Photographic Dosimetry, Linear Programming.

1 INTRODUÇÃO

As primeiras aplicações dos raios X, descobertos pelo físico alemão Wilhelm Conrad Röntgen em 1895, iniciaram na medicina através da radiografia conseguindo investigar o interior do corpo humano, sendo plausível assim diagnosticar precocemente e com maior exatidão doenças que até então, não se tinha como obter maiores detalhes. Tais aplicações tornaram-se uma poderosa ferramenta de trabalho. Por outro lado, relata-se que: “Uma grande parte das descobertas científicas, que trazem benefício à humanidade, quando não aplicadas corretamente, produzem também certa quantidade de danos à saúde. Os raios X de Röntgen não são uma exceção a essa regra – considerando-se estruturas da pele ou tecido – diversas lesões já haviam sido registradas” (CROCKER, 1897). Com esse relato, Crocker, um dos pioneiros da pesquisa dos efeitos da radiação X à saúde, demonstrava a preocupação de parte dos cientistas do final do século XIX com as conseqüências do uso dos raios X. Na verdade, semanas após a descoberta de Röntgen, jornais já publicavam artigos descrevendo os efeitos dos misteriosos raios em pacientes e trabalhadores (ARCHER, 1995).

O emprego da radiação ionizante tem causado admirável impulso na sociedade, desenvolvendo aplicações em diversos setores. Na indústria, é utilizada na detecção de falhas em solda, medidas de densidade e de nível, por exemplo, até a identificação de autenticidade de obras de artes; porém, na área de saúde, as radiações ionizantes têm sido mais utilizadas em radiodiagnóstico e terapia.

Organismos internacionais como a ICRP - International Commission on Radiological Protection e a ICRU - International Commission on Radiation Units and Measurements, publicam recomendações sobre os princípios básicos e as diretrizes para a radioproteção, apresentando definições para grandezas e limites de doses oriundas das exposições às radiações ionizantes, tanto para profissionais como para o público.

As grandezas limitantes foram instituídas com a finalidade de relacionar o risco da exposição humana às radiações ionizantes e as grandezas operacionais aplicadas na avaliação da exposição externa da radiação X, γ , β e n, através da monitoração de área e monitoração individual. Das grandezas limitantes usadas em radioproteção para radiação externa, definidas na

publicação 26 e atualizadas no relatório 60 da ICRP, são definidas: a dose equivalente num órgão ou tecido (H_T) e a dose efetiva (E) (ICRP, 1977 e 1990). As grandezas operacionais têm suas determinações publicadas nos relatórios 39, 43, 47 e 51 da ICRU, são usadas tanto para monitoração de área, definindo o equivalente de dose direcional ($H'(d, \Omega)$) e o equivalente de dose ambiente ($H^*(d)$), quanto para monitoração individual, o equivalente de dose pessoal ($H_p(d)$) (ICRU, 1985, 1988, 1992 e 1993).

As diferenças entre as técnicas de monitoração de área (ambiente) e a monitoração individual (pessoal) são: o controle do nível de radiação no local de trabalho através da definição de áreas controladas e a avaliação da dose oriunda da exposição do indivíduo à radiação através da avaliação de dosímetros pessoais, respectivamente.

A monitoração externa de trabalhadores ocupacionalmente expostos às radiações ionizantes, vem sendo desempenhada há pouco mais de meio século e aperfeiçoada continuamente. Ela tem o objetivo de estimar a exposição às fontes externas de radiação ionizante a que os trabalhadores estão submetidos para assegurar que as condições radiológicas para o local de trabalho estejam aceitáveis, seguras e satisfatórias. A dose recebida por estes trabalhadores não deve exceder os limites autorizados por organismos nacionais regulatórios, ou seja, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

A grandeza operacional para uso em monitoração individual atualmente recomendada é o equivalente de dose pessoal $H_p(d)$, definido como o “equivalente de dose profunda” em tecido mole, numa profundidade d (em milímetros), abaixo de um ponto específico do corpo. Para estimar a dose efetiva devido à exposição externa deve ser utilizado um monitor individual posicionado no ponto mais exposto do tórax, calibrado em $H_p(10)$, para a profundidade 10mm e para radiações fortemente penetrantes (ICRU, 1985).

No Brasil, a grandeza operacional utilizada na monitoração individual externa para radiação X e gama é o equivalente de dose pessoal $H_p(d)$, porém ainda admite-se o uso da grandeza “dose individual” H_x , também chamada de equivalente de dose para fótons, onde os trabalhadores vêm sendo avaliados por dosímetros individuais usados na superfície do tórax calibrados em termos do kerma ar, sendo H_x , o produto do valor determinado através do dosímetro individual pelo fator $f = 1,14 \text{ Sv/Gy}$ (CNEN-NN-3.01/005, 2005).

O presente trabalho tem como objetivo a adaptação de um sistema de monitoração individual externa para raios X e gama para avaliação do equivalente de dose pessoal $H_p(10)$, utilizando o método matemático Simplex e a Combinação Linear.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Grandezas utilizadas na radioproteção

As recomendações da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP), em suas publicações nº 26 e 60 servem de base para as normas de proteção radiológica atualmente utilizadas no Brasil. A ICRP 60 recomenda a revisão das grandezas definidas na ICRP 26 e estabelece:

a) A dose equivalente (H_T) é o somatório do valor médio da dose absorvida $D_{T,R}$ no órgão ou tecido T, devido à radiação R, multiplicado por w_R : $H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$, onde w_R é o fator de peso da radiação R, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Fatores de peso da radiação (w_R)

Tipo e intervalo de energia	w_R
Fótons, todas as energias	1
Elétrons e muons, todas as energias.	1
Nêutrons, energia < 10 keV	5
> 10 keV a 100 keV	10
> 100 keV a 2 MeV	20
> 2 MeV a 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Prótons, (não de recuo) energia > 2 MeV	5
Partículas alfa, fragmentos de fissão e núcleos pesados	20

Fonte: ICRP, 1990

b) A dose efetiva (E) é a soma ponderada das doses equivalentes em todos os órgãos e tecidos do corpo, expressa por: $E = \sum_T w_T H_T$, onde w_T é o fator de peso para o tecido T, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Fatores de peso para os órgãos ou tecidos T (w_T)

Órgão ou tecido	w_T
Gônadas	0,20
Medula óssea (vermelha)	0,12
Cólon	0,12
Pulmão	0,12
Estômago	0,12
Bexiga	0,05
Mama	0,05
Fígado	0,05
Esôfago	0,05
Tireóide	0,05
Pele	0,01
Superfície óssea	0,01
Restantes *	0,05

* cérebro, intestino grosso superior, intestino delgado, rins, útero, pâncreas, vesícula, timo, adrenais e músculo.

Fonte: ICRP, 1990

Tais grandezas limitantes não são mensuráveis e devem ser estimadas com o uso das grandezas chamadas grandezas operacionais. Essas são definidas sob certas condições, em termos de um receptor. Para monitoração de área esse receptor é a esfera ICRU e para a monitoração pessoal, o corpo humano.

Na Tabela 3 estão apresentadas as grandezas limitantes e operacionais, de acordo com o tipo de penetração da radiação.

Tabela 3 – Grandezas limitantes e operacionais

Radiação externa	Grandezas Limitantes	Grandezas operacionais	
		Monitoração de área	Monitoração pessoal
“Fortemente penetrante”	Dose Efetiva	$H^*(10)$	$H_p(10)$
“Fracamente penetrante”	Dose pele	$H'(0,07, \Omega)$	$H_p(0,07)$
	Dose cristalino	$H'(3, \Omega)$	$H_p(3)$

Fonte: IAEA, 2000

A Figura 1 mostra a relação das grandezas físicas utilizadas que caracterizam as propriedades dosimétricas dos campos de radiação de referência e as grandezas usadas para calibrações e testes. Os campos de referência indicados pela ISO são estabelecidos em laboratórios de calibração (ISO 4037-1, 1995). As grandezas básicas da radiação que caracterizam o campo de radiação de referência são medidas com instrumentos de referência. As grandezas associadas às calibrações e aos testes são derivadas das grandezas básicas da radiação multiplicadas por coeficientes de conversão apropriados (IAEA, 2000).

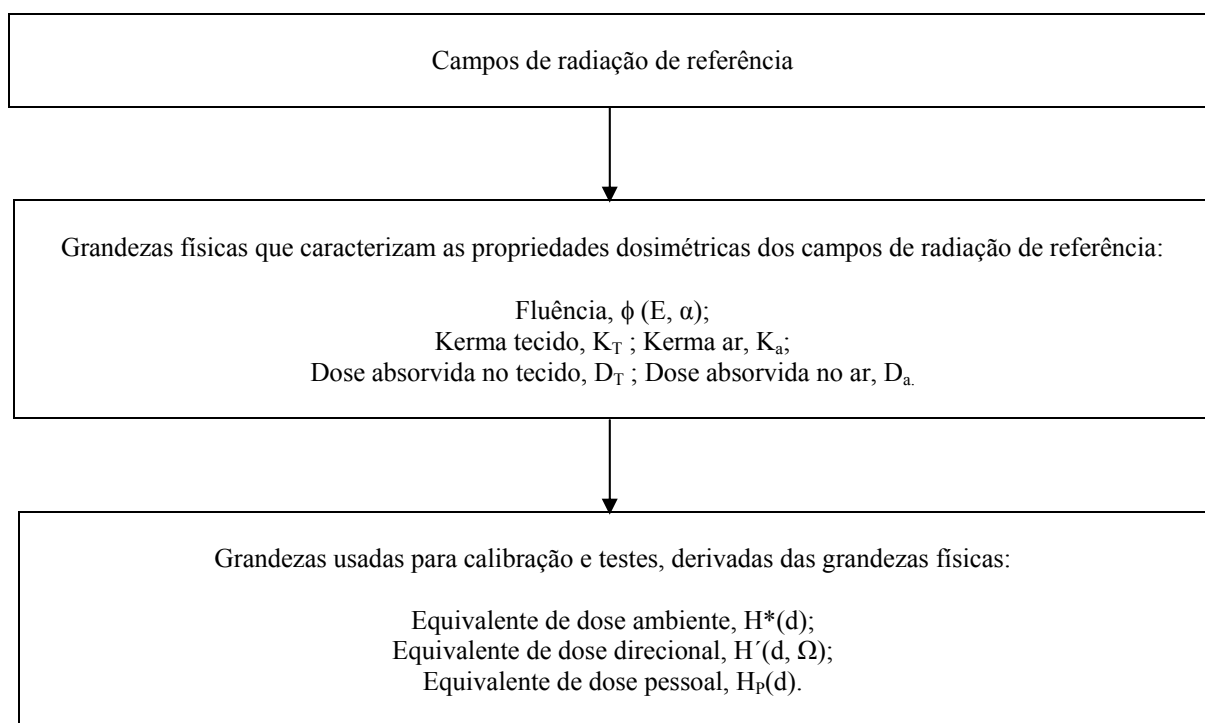


Figura 1 - Relação entre campos de radiação de referência, grandezas físicas e grandezas operacionais
Fonte: (IAEA, 2000)

2.2 Monitoração de área

Na rotina da proteção radiológica é necessário caracterizar a irradiação potencial dos indivíduos em termos de uma única grandeza, o equivalente de dose, que possa ser avaliada sobre um fantoma chamado de esfera ICRU. A esfera ICRU tem 300 mm de diâmetro e consiste de um material (chamado de tecido ICRU) com densidade de 1g/cm^3 e composição de: 76,2% de oxigênio, 11,1% de carbono, 10,1% de hidrogênio e 2,6 % de nitrogênio (ICRU, 1992).

Na monitoração de área, é necessário determinar e caracterizar campos de radiação expandidos, e também, campos de radiação expandidos e alinhados, conforme as Figuras 2 (b) e 2 (c), respectivamente. Tais campos são derivados do campo de radiação real, Figura 2 (a). No campo expandido, a fluência e suas distribuições direcionais da energia têm o mesmo valor em todo o volume de interesse como no campo real no ponto de referência “P”. No campo expandido e alinhado, a distribuição da energia é a mesma que no campo expandido, mas a fluência é unidirecional. Uma apresentação esquemática dos campos de radiação é apresentada na Figura 2 (AMBROSI et al., 1995).

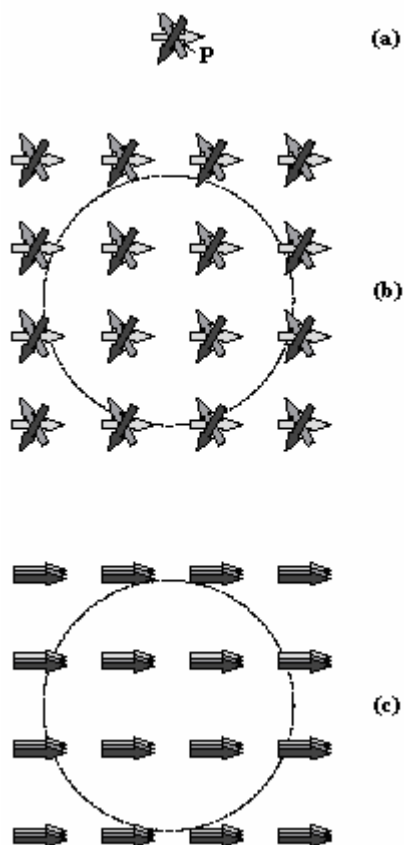


Figura 2 - Representação esquemática de campos de radiação: (a) campo real no ponto P de interesse; (b) campo expandido; (c) campo expandido e alinhado
 Fonte: (IAEA, 2000)

2.2.1 O equivalente de dose direcional, $H'(d, \Omega)$.

O equivalente de dose direcional, em um ponto de um campo de radiação, é o valor que seria produzido pelo correspondente campo expandido, na esfera ICRU para uma profundidade d ,

radial, em diferentes direções Ω . A unidade no SI é J/kg, tem o nome especial de sievert (Sv). Toda a indicação do equivalente de dose direcional deve incluir uma especificação da profundidade “d” de referência, o ângulo Ω e o sentido do campo. A geometria da radiação na esfera ICRU para $H'(d, \Omega)$ é mostrada na Figura 3 (a).

Para radiação fracamente penetrante, uma profundidade de 0,07 mm para a pele e 3 mm para cristalino é empregada, sendo que o equivalente de dose direcional para estas profundidades tem a notação: $H'(0,07, \Omega)$ e $H'(3, \Omega)$, respectivamente.

Em um caso particular de um campo unidirecional, a direção pode ser especificada em termos do ângulo α entre o raio oposto ao campo incidente e o raio especificado (ICRU, 1985).

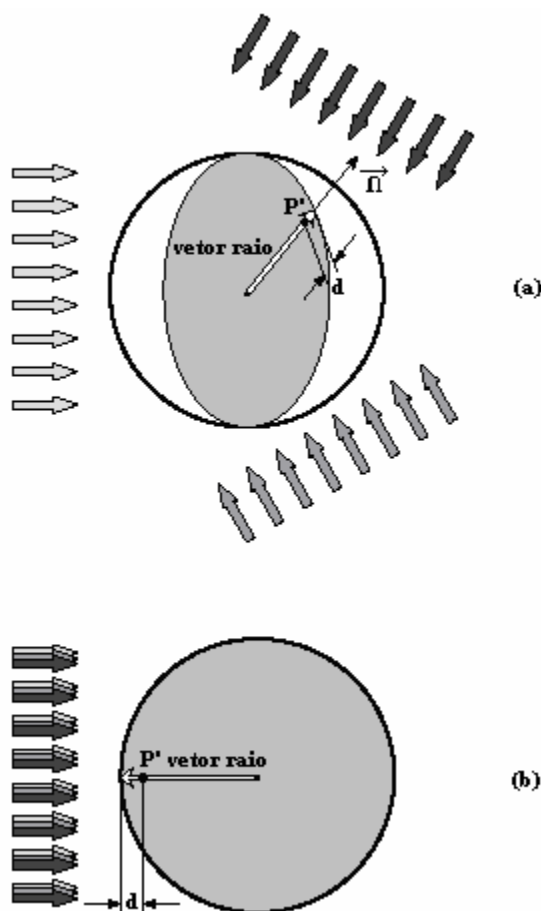


Figura 3 - Geometrias da radiação da esfera ICRU: no ponto P' na esfera em que o equivalente de dose é determinado em (a), num campo de radiação expandido e em (b), num campo de radiação expandido e alinhado

Fonte: (IAEA, 2000)

2.2.2 O equivalente de dose ambiente, $H^*(d)$

Observando a geometria da radiação na esfera ICRU para $H^*(d)$, conforme Figura 3 (b), pode-se definir o equivalente de dose ambiente, para um ponto de um campo de radiação, como o valor que seria produzido por esse correspondente campo de radiação expandido e alinhado, na esfera ICRU, para uma profundidade d , no ponto P, no raio oposto à direção do campo alinhado. A unidade no SI é J/kg, tem o nome especial de sievert (Sv). Toda indicação do equivalente de dose ambiente deve incluir uma especificação da profundidade de referência, d .

Para radiação fortemente penetrante, uma profundidade de 10 mm é recomendada. O equivalente de dose ambiente para esta profundidade tem notação $H^*(10)$. Já para a radiação fracamente penetrante, uma profundidade de 0,07 mm para a pele e 3 mm para o cristalino é empregada, como notação análoga (ICRU, 1985).

2.3 Monitoração pessoal

2.3.1 O equivalente de dose pessoal, $H_p(d)$

É o equivalente de dose no tecido mole, em uma profundidade apropriada “ d ” abaixo de um ponto específico do corpo. A unidade no SI é J/kg, sendo o nome especial para a unidade, o sievert (Sv). Toda a indicação do equivalente de dose pessoal deve incluir uma especificação da profundidade de referência “ d ” (ICRU, 1985).

Para a radiação fracamente penetrante, uma profundidade de 0,07 mm para a pele e 3 mm para o cristalino é empregada, sendo o equivalente de dose pessoal para estas profundidades representados por $H_p(0,07)$ e $H_p(3)$, respectivamente. Para radiação fortemente penetrante, uma profundidade de 10 mm é freqüentemente empregada, com notação análoga (ICRU, 1985).

Como a grandeza operacional $H_p(d)$ é definida no corpo humano, Dietze e Menzel (1994) relataram que ficou evidente que a definição desta grandeza não era permitida em aplicações práticas, visto que procedimentos de calibração de dosímetros individuais não poderiam ser realizados sob um corpo humano real.

A ICRU 39 (1985) recomendava a esfera ICRU como possível fantoma para calibração dos dosímetros. Posteriormente, a ICRU 47 (1992) recomenda um fantoma mais conveniente para calibração de dosímetros individuais em termos de $H_p(d)$, o fantoma slab, feito de PMMA

(PoliMetil MetAcrilato), porque sua densidade é próxima da densidade do tecido ICRU e seu retroespalhamento é também similar ao da esfera ICRU, sendo muito próximos ao tecido, tanto para fótons como para nêutrons (GROSSWENDT, 1991 e BÖHM; SUAREZ, 2001).

Como os dosímetros pessoais devem, a princípio, ser irradiados em fantasmas padronizados, três fantasmas foram selecionados para as calibrações e testes com radiação de fótons, beta e nêutrons (ALBERTS et al., 1994; ISO 4037-1, 1995):

a) O fantoma slab de água, de 300 mm × 300 mm × 150 mm de profundidade, representa o tronco humano no que diz respeito ao retroespalhamento da radiação incidente, usado para calibração de dosímetros de corpo inteiro. O lado frontal do fantoma consiste de uma placa com 2,5 mm de espessura de PMMA (PoliMetil MetAcrilato) com uma densidade de 1,19 g/cm³ e uma composição de 8,05% de H, 59,99% de C e 31,96% de O. Os outros lados do fantoma são de espessura de 10 mm de PMMA.

b) O fantoma coluna de água, cilindro circular com um diâmetro de 73 mm e 300 mm de comprimento, representa um braço ou tornozelo no que diz respeito ao retroespalhamento da radiação incidente, usado para calibração de dosímetros de pulso ou tornozelo. Suas paredes consistem de PMMA, sendo as paredes circulares com espessura de 2,5 mm e as paredes de extremidade, com espessura de 10 mm.

c) O fantoma haste, cilindro circular com um diâmetro de 19 mm e 300 mm de comprimento, de PMMA, representa um dedo no que diz respeito ao retroespalhamento da radiação incidente, usado para calibração de dosímetros de dedo.

Os três tipos de fantoma são apenas representações grosseiras das respectivas partes do corpo; entretanto, servem à finalidade porque de acordo com a definição de $H_p(d)$, um dosímetro pessoal deve ser construído de tal maneira que seja sensível à radiação retroespalhada do corpo. Desta forma, as três formas diferentes de fantoma suprem as necessidades das calibrações e testes dos:

- 1) Dosímetros de corpo inteiro usados no tronco para estimar a dose efetiva;
- 2) Dosímetros de pulso ou tornozelo;
- 3) Dosímetros de dedo para estimar as doses parciais do corpo.

Os fantasmas usados para a calibração de dosímetros pessoais em $H_p(d)$ são compostos de tecido ICRU.

Os coeficientes de conversão estabelecidos nos padrões referenciam-se unicamente aos fantasmas de referência; o uso consistente dos fantasmas recomendados faz possível comparar as calibrações testadas em laboratórios diferentes. Quando estes fantasmas são usados, nenhum fator de correção deve ser aplicado para as diferenças em retroespalhamento relativo ao tecido ICRU. Um desenho esquemático dos fantasmas e dos exemplos de dosímetros pessoais é mostrado na Figura 4 (IAEA, 2000).

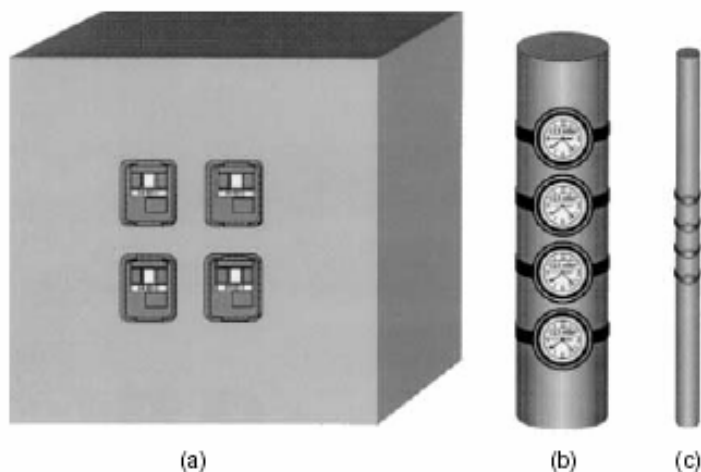


Figura 4 - Fantasmas ICRU e dosímetros
Fonte: (IAEA, 2000)

2.4 Dosímetros e dosimetria fotográfica.

As emulsões fotográficas foram, de certa forma, os primeiros detectores utilizados para radiações ionizantes, pois foi através de chapas fotográficas guardadas por acaso junto com material radioativo que Henri Becquerel descobriu, em 1896, a radioatividade natural. A seguir, desenvolveu-se um dosímetro individual a ser empregado na detecção das radiações ionizantes, mais precisamente o filme fotográfico dental, servindo também para radiografia. Conservando o seu formato original, as emulsões foram sendo modificadas para responder às necessidades da dosimetria fotográfica (BECKER, 1973; DUDLEY, 1966).

A dosimetria fotográfica é uma técnica utilizada para avaliar a dose recebida pelo trabalhador, utilizando como sensor ou medidor o filme fotográfico dentro de um porta dosímetro. Esse tipo de avaliação apresenta como vantagens: o baixo custo do dosímetro; a facilidade de armazenamento dos filmes após a revelação; pode ser reavaliado a qualquer instante

após revelação; o dosímetro fotográfico sempre está pronto para medir, não requerendo alimentação elétrica e transportando-se com comodidade, além de o filme revelado constituir um elemento durável com o tempo; a possibilidade de inclusão de medidores alternativos, no porta dosímetro, e.g., TLD. Junto a essas vantagens, também apresenta como principal desvantagem a alta dependência energética, especialmente para energias abaixo de 140 keV, razões pelas quais se empregam filtros metálicos de diferentes espessuras e materiais, e combinações de emulsões de sensibilidades distintas.

O filme fotográfico é composto de uma base ou suporte transparente e flexível de nitrato de celulose (com espessura da ordem de 200 μm), recoberto por uma emulsão sensível.

As emulsões fotográficas empregadas na dosimetria de Raios-X e gama consistem de 50% de brometo de prata (com um pequeno percentual de iodeto de prata) e de aproximadamente 50% de gelatina. São aplicadas em ambos os lados da base ou do suporte, em camadas de 5 μm a 20 μm de espessura cada. A Figura 5 mostra a estrutura de um filme (ANTONIO FILHO, 1982).

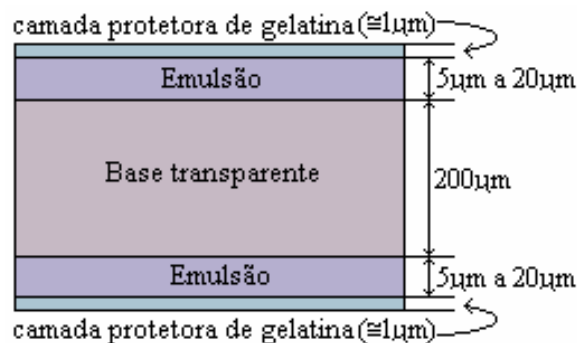


Figura 5 - A estrutura de um filme
Fonte: (ANTONIO FILHO, 1982)

O dosímetro fotográfico, consistindo do porta dosímetro e do filme dosimétrico propriamente dito, é capaz de estimar com razoável exatidão a dose absorvida na superfície do corpo para exposições externas de raios X e gama, num grande intervalo de exposição.

Por efeito da radiação, seus componentes radiosensíveis, os cristais de haleto de prata, experimentam modificações quando expostos à radiação. Com uma calibração adequada, a densidade óptica do filme, uma vez revelado, pode servir de índice de exposição às radiações ionizantes.

Esta técnica permite avaliar doses obtidas sob ótimas condições de avaliação, com precisão de até $\pm 20\% - 50\%$ do valor real (BECKER, 1966). De um modo geral, a Comissão Internacional de Radioproteção tem informado que, na prática, a monitoração individual está sendo possível alcançar uma precisão de aproximadamente 10% para um nível de confiança de 95% das medidas realizadas em campos de radiação que são simulados em laboratórios com boas condições de avaliação (ICPR 75, 1997).

2.5 Curva característica

A curva característica, também conhecida como curva sensitométrica ou curva de Hurter e Driffield (curva H-D) oferece uma indicação de como a película fotográfica responde quando é submetida a um campo de radiação externa X e/ou gama, representando o procedimento para avaliar como os materiais sensíveis (as emulsões fotográficas) respondem à exposição à radiação – luz visível, raios X, gama, após processamento químico.

A sensitometria estuda a ação fotoquímica da luz (energia) sobre as emulsões sensíveis, fornecendo um meio para medir essa ação e determinando a relação que existe entre a quantidade de luz recebida por uma capa sensível e a quantidade de sal de prata que se reduzirá por enegrecimento direto ou por um revelador posterior, permitindo resolver diversos problemas de ordem prática e fazendo mensurável a ação da luz (LOBEL; DUBOIS, 1967).

O dado que interessa conhecer da película para o traçado da curva característica é a densidade óptica, ou seja, a quantidade de prata metálica formada relativa à quantidade de radiação ionizante absorvida. A densidade óptica é a medida do grau de escurecimento da película após sua revelação. O valor da densidade óptica em função do logaritmo da exposição resulta numa curva de fácil interpretação. Matematicamente, expressa-se a densidade óptica como sendo igual ao logaritmo da razão entre a intensidade de luz visível que incide no filme e a intensidade que é transmitida: $DO = \log \frac{I_0}{I}$, onde I_0 = intensidade de luz incidente e I = intensidade de luz transmitida.

A forma mais apropriada de estabelecer a resposta do filme é através da curva característica indicada na Figura 6, que relaciona a densidade óptica (DO) em função do logaritmo da exposição (X) (BECKER, 1973).

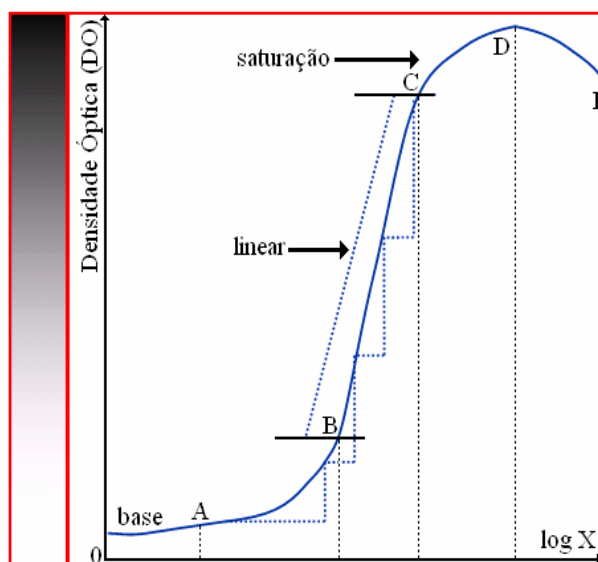


Figura 6 - Curva característica: Densidade Óptica (DO) em função do logaritmo da exposição (Log X)
 Fonte: (BECKER, 1973)

A curva da densidade óptica em função do logaritmo da exposição X é subdividida em cinco regiões:

1. A região $0A$ representa a densidade óptica de base, ou seja, para valores muito baixos da exposição inferiores ao ponto A , na Figura 6, a densidade é praticamente invariável e, neste limite, a emulsão comporta-se como se não reagisse à luz. A margem não exposta de um filme processado tem essa densidade, também denominada densidade base mais velamento, que é a densidade natural da emulsão; este valor mínimo representa a densidade inerente ao suporte da emulsão e à prata depositada pelo véu natural que se forma na revelação. Mesmo que não tenha sido submetida à ação da luz, uma emulsão revelada apresentará sempre esta densidade mínima. A densidade óptica virtualmente não aumenta com o logaritmo da exposição nesta região sendo assim chamada de região de inércia.

2. A partir do ponto A (conhecido por limiar de sensibilidade) até o ponto B , a emulsão começa a responder à luz, mas a densidade não varia proporcionalmente ao logaritmo da exposição. Esta parte do diagrama é designada por região de subexposição.

3. A região BC , região média da curva característica de um filme, chamada de região de exposição correta, é constituída essencialmente por uma linha reta onde a densidade óptica é proporcional ao logaritmo da exposição; essa região tem resposta praticamente linear.

4. Na região CD, a densidade óptica não aumenta proporcionalmente com o aumento da exposição, a emulsão mostra menor sensibilidade e perda de capacidade de resposta a aumentos de exposição, sendo denominada de região de saturação.

5. E finalmente, a região DE, onde a densidade óptica diminui com o aumento da exposição, apesar dos valores de exposição se tornarem ainda maiores; esta região é chamada de solarização (BECKER, 1966).

A dosimetria fotográfica opera na região onde existe uma relação linear entre o escurecimento (densidade óptica) do filme dosimétrico e o logaritmo da exposição X (DUDLEY, 1954).

Devido à presença do brometo de prata na composição da emulsão fotográfica, o número atômico efetivo, que é o número atômico de um elemento hipotético que atenua fótons na mesma proporção do material, torna-se elevado ($\bar{Z} = 43,5$). Para baixas energias da radiação incidente ($E \leq 100$ keV), a absorção por efeito fotoelétrico é predominante e apresenta uma dependência direta com $\bar{Z}$. Os elétrons secundários liberados no ponto de interação desenvolvem um processo rápido de transferência de energia. Como a seção de choque para o efeito fotoelétrico varia rapidamente com a energia, isto ocasiona uma forte dependência energética do dosímetro fotográfico, conforme Figura 7.

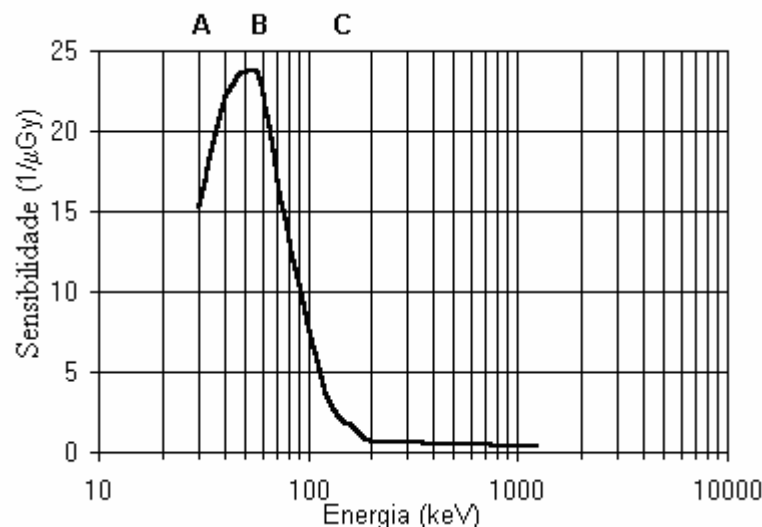


Figura 7 - Sensibilidade em função da energia
Fonte: (BONAMINI, 1997)

Devido à dependência energética, a utilização do filme em monitoração pessoal deve ser feita com o auxílio de filtros metálicos, para se obter uma estimativa de energia efetiva da radiação incidente. Os filtros metálicos mais utilizados são de cobre e chumbo.

A conversão do valor de uma determinada densidade óptica (DO) de um filme em dose equivalente necessita de curvas de calibração obtidas com irradiações de filmes com diferentes doses e energias, em feixes de radiação padronizados. Deste modo, com as relações entre os valores das densidades ópticas sob os diferentes filtros metálicos obtidos nas diferentes regiões do filme, é possível obter-se o valor da energia efetiva e da dose absorvida. O valor obtido pode sofrer pequenas modificações devido a fatores de correção de emulsão e de revelação.

2.6 Calibração de dosímetros individuais.

A calibração consiste num conjunto de operações destinadas a fazer com que as indicações de um instrumento correspondam a valores pré-estabelecidos das grandezas a medir (CNEN-NE-3.02, 1988).

Segundo Becker (1966), os dosímetros fotográficos, por não serem medidores absolutos, devem ser calibrados de modo a permitir o estabelecimento de relações entre as leituras das densidades ópticas e a grandeza dosimétrica de interesse.

O procedimento usual para calibração de dosímetros individuais é determinar o kerma ar para fótons, a dose absorvida no tecido para elétrons ou a fluência para nêutrons, no ponto de teste do campo de radiação; a seguir a superfície frontal do fantoma (junto com os dosímetros) deve ser posicionada neste ponto de teste no campo de radiação. O equivalente de dose pessoal $H_p(d)$, para o campo de radiação incidente na face frontal do fantoma, é então calculado multiplicando-se a medida do kerma ar por coeficiente de conversão $H_p(d)/K_a$ (ISO, 1997) recomendado por laboratórios de padrão primário (BARTLETT, 2006). O ponto de teste acima mencionado é definido como sendo o ponto no campo de radiação no qual o valor real da grandeza $H_p(d)$ será avaliado (IEC/FDIS 61066, 2006).

Ainda como procedimento de calibração, o fantoma e os dosímetros (fotográficos, no caso deste trabalho) já posicionados no ponto de teste, devem agora ser irradiados com feixes de radiação de energias conhecidas, submetendo-os a diferentes valores de doses para cada energia. Deste modo, para a área de leitura j sob um dado filtro e para cada sensibilidade do filme, poder-

se-á construir uma família de curvas de resposta, cada uma delas relacionando a densidade óptica à dose $H_p(10)$, para uma dada energia de calibração.

Daniels e Schubauer-Berigan (2005) mostram que as diferenças nos procedimentos de calibração resultam em incertezas nas avaliações das doses, e.g., as calibrações de dosímetros ao ar livre não incluem a contribuição do retroespalhamento da radiação que resultariam de dosímetros usados junto ao corpo, sendo essencial o uso de um fantoma.

Alguns pesquisadores, Mikami et al. (2006) e posteriormente, Cardoso et al. (2007), desenvolveram um protótipo, chamado câmara $H_p(10)$, que consiste de uma câmara de ionização dentro do próprio fantoma slab, para avaliar diretamente o $H_p(10)$, isto é, a grandeza $H_p(10)$ avaliada no campo de radiação incluindo a contribuição do retroespalhamento da radiação pelo fantoma slab. Entretanto seus resultados ainda apresentam dependência da energia e de ângulos de incidência da radiação, além de baixa resposta elétrica da câmara de ionização. Observa-se que com a otimização do desempenho da câmara de ionização será possível obter melhores resultados na avaliação da dose $H_p(10)$, além da indicação de que o protótipo deva ser calibrado em laboratórios de padrão primário onde os coeficientes de conversão $H_p(d)/K_a$ (ISO, 1997) foram determinados para todo o espectro de qualidades de radiação.

2.7 Sistema de cálculo do equivalente de dose

A Programação Linear (PL) é uma técnica de otimização largamente utilizada na resolução de problemas que tenham seus modelos representados por expressões lineares.

Inicialmente a PL foi mais utilizada na resolução de problemas de economia, onde os problemas referiam-se à distribuição eficiente de recursos limitados entre atividades competitivas, com a finalidade de atender a um determinado objetivo (maximização de lucros ou minimização de custos) expresso por uma função linear, denominada de função objetiva, sendo necessário informar quais atividades consomem cada recurso e em que proporção é feito esse consumo. Essas informações são fornecidas por equações ou inequações lineares para cada recurso e ao conjunto dessas equações ou inequações lineares dá-se o nome de restrições do modelo. Uma vez obtido o modelo linear, constituído pela função objetiva linear e pelas restrições lineares, compete à PL, achar a sua solução ótima (PUCCINI, 1985).

Posteriormente a PL passa a ser aplicada em uma escala diversa da economia: a pesquisa de operações e a otimização combinatória. De um ponto de vista teórico, o estudo da PL motivou avanços no estudo da geometria convexa, da matemática combinatória, e da teoria de complexidade (DANTZIG, 1951).

O algoritmo Simplex de George Dantzig para a PL é citado como um dos “10 algoritmos com a maior influência no desenvolvimento e na prática da ciência de projetar no século 20” (DONGARRA; SULLIVAN, 2000).

Alguns autores identificaram-no como um problema de otimização de pesquisa operacional. Este método de resolver problemas é comparável àqueles aplicados nos problemas econômicos (BERMANN; CHANOURDIE, 1973).

O Método Simplex consiste numa técnica usada para encontrar, algebricamente, a solução ótima de um modelo de programação linear. A PL é provavelmente a mais conhecida e utilizada técnica de otimização em todo o mundo. Qualquer problema que possa ser formulado com variáveis de decisões reais, com uma função objetiva linear e funções de restrição lineares, pode ser a princípio, solucionado através da programação linear.

O Método Simplex é um procedimento iterativo, algebricamente exato, onde uma função objetiva é minimizada ou maximizada num número finito de passos, usando variáveis não negativas e fornecendo uma solução única. Desta forma, ele permite a avaliação da energia da radiação ionizante e da dose que resultou desta energia, tanto para irradiações monoenergéticas como para irradiações mistas.

Alguns pesquisadores do Instituto de Radioproteção e Dosimetria IRD vêm utilizando o Método Simplex na dosimetria fotográfica. Sabendo que a sensibilidade de um filme em função da energia apresenta forte dependência para baixas energias das radiações X e gama, utilizaram um método para tratar esta questão, que determinou o projeto de um porta-dosímetro e o modo de avaliar a grandeza dosimétrica (HUNT et al., 1993).

O sistema utilizado na avaliação da grandeza dosimétrica permitiu determinar qual a dose e a energia da radiação ionizante à qual o dosímetro foi exposto, tanto para irradiações monoenergéticas, quanto para campos de energias mistas. A partir dos valores de Dose Aparente (DA_j) medidos em cada região do filme sob o filtro (j), foi possível avaliar as combinações possíveis de energia e intensidades que deram origem às densidades ópticas, tornando-se um problema típico de otimização de pesquisa operacional. Utilizaram o Método Simplex para sua

solução, considerando uma função objetiva; conseqüentemente, o que foi feito: tornaram os erros associados à determinação das exposições reais os menores possíveis (HUNT et al., 1993).

Outros autores têm também utilizado o Método Simplex, e.g., no artigo sobre “o estudo comparativo de dosímetros de múltiplos elementos por meio de uma fórmula empírica e da programação linear para campos de radiação mistos”, através de um software de PL, obtiveram as melhores combinações da energia da radiação e do kerma ar, com a suposição de um kerma ar minimizado e maximizado. Os dosímetros fotográficos com vários filtros foram selecionados, a resposta energética dos fótons sobre cada filtro foi determinada e finalmente a fórmula empírica e o Método Simplex, para campos mistos simulados, foram implementados e testados. Na comparação dos resultados entre os métodos, duas observações foram enfatizadas: o desempenho da fórmula empírica permaneceu apropriado para a rotina que monitora os trabalhadores e deve ser usado para os locais de trabalho onde se utilizam feixes de radiação monoenergéticos, com incertezas aceitáveis. Por outro lado, as doses que necessitaram de maior verificação foram para os locais de trabalho onde se utilizam feixes desconhecidos de energias mistas de fótons; neste caso, o uso do método de programação linear foi fortemente recomendado, porque forneceu mais informações sobre a natureza e a qualidade das exposições (IMATOUKENE et al., 2004).

O grupo de dosimetria EURADOS publicou em 2004, um catálogo dos dosímetros e serviços dosimétricos na Europa com a perspectiva de acelerar a implementação de regulamentos nacionais na área de radioproteção. Os regulamentos indicam que trabalhadores ocupacionalmente expostos à radiação ionizante devam ser monitorados por dosímetros individuais habilitados a avaliar a grandeza operacional equivalente de dose pessoal $H_p(d)$. Nos serviços de monitoração individual da Europa, onde a técnica de dosimetria fotográfica é empregada, foi constatado que para a avaliação do $H_p(d)$, normalmente é utilizado um algoritmo de combinação linear de leituras das densidades ópticas sob os diferentes filtros dos dosímetros (PONTE et al., 2004).

As técnicas para monitoração individual utilizadas na avaliação do equivalente de dose pessoal $H_p(d)$ têm um alto potencial para significativas mudanças num futuro próximo, não apenas no uso de novos dispositivos, e.g., dispositivos eletrônicos passivos ou ativos como dosímetros individuais, mas também, através do desenvolvimento de sistemas de redes de computadores integradas e de softwares avançados dedicados as técnicas de monitoração individual que mudarão a rotina na monitoração individual. Como conseqüência, tais redes de

dados transformar-se-ão em um aspecto muito relevante e cada vez mais importante para informar e guardar os registros das doses. Além disso, pesquisadores, como Wernli e Scherrer (2004), relataram que, acima de tudo, a prioridade máxima na radioproteção é a implementação das novas grandezas e unidades definidas pelas ICRU/ICRP para dosimetria externa em legislações, regulamentos e procedimentos no trabalho.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

3.1.1 Porta dosímetro

O porta dosímetro do Laboratório de Monitoração Individual (DEN – UFPE) utilizado consiste de uma pequena caixa de polietileno de dimensões 42 mm x 52 mm x 8 mm, que contém 6 filtros metálicos, 3 em cada face (anterior – posterior) e 2 regiões sem filtros, como pode ser visto na Figura 8. Na região A está posicionado um filtro de chumbo com 0,8 mm de espessura (filtro: Pb); na região B, um filtro de cobre com espessura de 0,5 mm (filtro: Cu 0,5); a região C, janela (Ja), sem filtro metálico, possui uma abertura na face anterior do porta dosímetro; na região D, um filtro de cobre com 0,1 mm de espessura (filtro: Cu 0,1); e na região central E, a filtração é a do próprio plástico do porta dosímetro, que funciona como um filtro com 0,3 mm de polietileno (filtro: Pl).

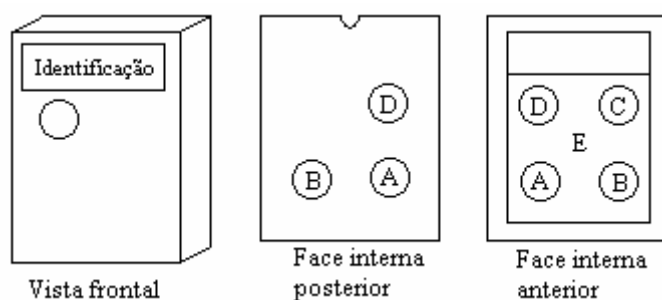


Figura 8 - O porta dosímetro

3.1.2 Filme dosimétrico

O filme dosimétrico utilizado foi da marca Agfa-Gevaert, tipo Agfa personal monitoring, com dimensões 33 mm x 45 mm x 1 mm. O filme dosimétrico é acondicionado em um envelope plástico para proteção dos efeitos da luz e da umidade. O envelope contém duas películas com emulsões de sensibilidades distintas (uma de baixa e outra de alta sensibilidade). O que define a

sensibilidade da emulsão é a sua granulometria (dimensão dos grãos de haletos de prata contidos na emulsão).

3.1.3 Fontes de radiação

As fontes de radiação utilizadas no experimento foram: ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{90}Sr e raios X. As características dos equipamentos utilizados na irradiação dos filmes dosimétricos estão descritas na Tabela 4.

Tabela 4 - Fontes de radiação X, γ e β utilizadas no experimento

Fonte	Atividade	Itens	Especificação
^{60}Co	17,17GBq em 07/10/1998	Fabricante Modelo / N° de série Blindagem da fonte Sistema de abertura do irradiador	IPEN / CNEN 616 / CoS132 Chumbo Pneumático
^{137}Cs	444GBq em 13/05/2003	Fabricante Modelo / N° de série Blindagem da fonte Sistema de abertura do irradiador	J.L. SHEPHERD & ASSOCIATES 28 – 8A CALIBRATOR / 10354 Chumbo Pneumático
^{90}Sr	1,11MBq em 22/01/1996	Fabricante Modelo / N° de série Blindagem da fonte Sistema de abertura do irradiador	NUCLEAR ENTERPRISES (NE) 2576A / 330 Chumbo Manual
Aparelho de raios X	—	Fabricante Modelo / N° de série Tubo Filtração inerente do tubo Material da janela do tubo Faixa de kV Faixa de corrente Sistema de retificação Ânodo Potência máxima Tamanho de ponto focal	PANTAK HF-320 / 9710 – 2779 COMET AG, tipo MXR-320 3 mm Be Belírio 5 – 320 kV 0,5 – 30 mA Potencial constante Rotatório 3,2 kW 1,2 mm e 3,0 mm

3.1.4 Câmara de Ionização / Eletrômetro.

O sistema de medidas utilizado para realização da dosimetria foi constituído por um eletrômetro, modelo NE 2670, série 148; uma câmara de ionização de 600cc, modelo NE 2575C, série 518, polaridade – 250V, ambos fabricados pela Nuclear Enterprises (NE). O certificado de calibração do eletrômetro, emitido pelo National Radiological Protection Board (NRPB) e a câmara de ionização com certificação emitida pelo Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD/CNEN).

3.1.5 Fantoma

A calibração dos dosímetros foi realizada com o auxílio de um fantoma que simula a região do tórax do corpo humano, chamado fantoma slab (Figura 9). Este fantoma é constituído de PMMA com dimensões de 300 mm x 300 mm x 150 mm, sendo preenchido com água, conforme descrito na página 28 - item a.

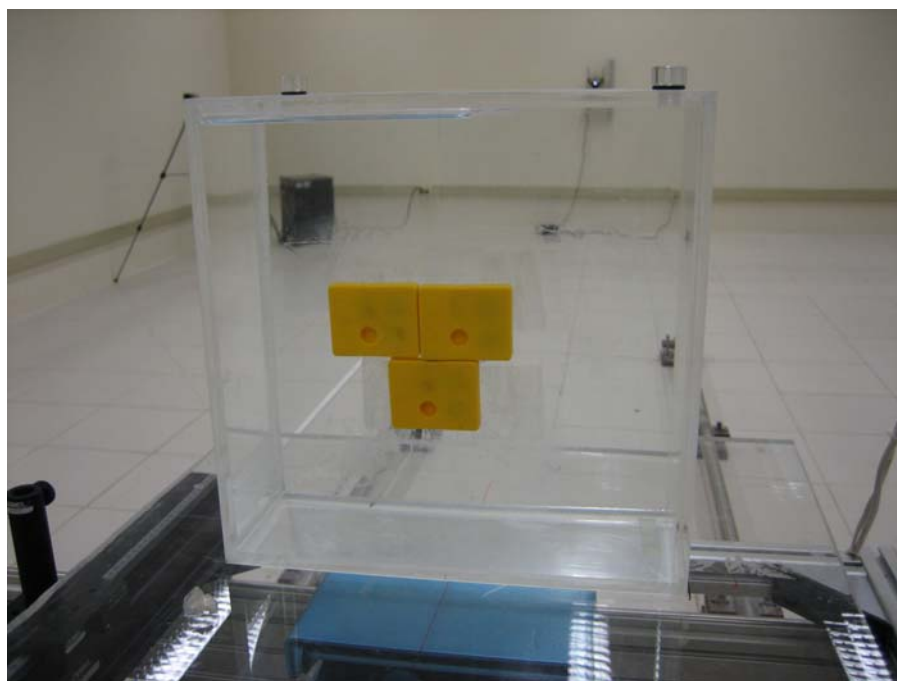


Figura 9 - Fantoma slab

3.1.6 Câmara escura

O Laboratório de revelação do serviço de monitoração individual do Departamento de Energia Nuclear da UFPE possui uma câmara clara, ante-sala que permite o acesso à câmara escura; esta por sua vez é blindada contra luz externa e é composta por: uma bancada com iluminação de segurança utilizada na preparação dos filmes para revelação; colgaduras utilizadas para fixar os filmes; um termômetro para controlar temperatura ambiente; e cinco cubas de aço inoxidável (com os banhos de revelação, parada, fixação, lavagem final e umectante) imersas em um tanque contendo água refrigerada com serpentina.

Após a revelação, os filmes são colocados para secar em estufa.

3.1.7 Densitômetro

Após secagem, as leituras das densidades ópticas dos filmes são realizadas por um densitômetro óptico, marca Macbeth, modelo TD931, com área de leitura de 1 mm^2 , previamente calibrado segundo as especificações do fabricante. A precisão do equipamento é de 0,01 %. Para obtenção das curvas de calibração foi usado um computador Pentium 4, 2,66GHz, 512MB de RAM e programas especiais de tratamento de dados.

3.2 Métodos

3.2.1 Calibração dos dosímetros

As características dos feixes de radiação γ e X, utilizados neste trabalho, foram: para fontes de ^{60}Co e ^{137}Cs , conforme descrito na Tabela 5; para os feixes de raios X, determinadas de acordo com a norma ISO 4037 – 1 (1995).

Tabela 5 - Qualidades dos feixes de radiação γ e X

Radionuclídeo	Energia média (keV)	Meia-vida (anos)	Taxa de Kerma ar	Atividade
^{60}Co	1250	5,3	2,281 mGy/h em 10/11/2006	17,17GBq em 07/10/1998
^{137}Cs	662	30,2	29,663 mGy/h em 30/11/2006	444GBq em 13/05/2003

Especificação das qualidades dos feixes de raios X (espectro estreito N e largo W)

Qualidade ISO 4037 – 1	Energia Efetiva Média (keV)	Potencial do Tubo (kV)	Filtração Inerente (mm Al)	Filtração Adicional (mm)	1ª CSR (mm)	2ª CSR (mm)
N-30	24	30	3,91	4,00(Al)	1,15(Al)	1,30(Al)
N-40	33	40	3,91	0,21(Cu)	0,08(Cu)	0,09(Cu)
N-60	48	60	3,91	0,60 (Cu)	0,24(Cu)	0,26(Cu)
N-100	83	100	3,91	5,00 (Cu)	1,11(Cu)	1,17(Cu)
N-150	118	150	3,91	2,50 (Sn)	2,36(Cu)	2,47(Cu)
N-200	164	200	3,91	1(Pb)+3(Sn)+2(Cu)	3,99(Cu)	4,05(Cu)
W-60	45	60	3,91	0,30 (Cu)	0,18(Cu)	0,21(Cu)
W-80	57	80	3,91	0,50 (Cu)	0,35(Cu)	0,44(Cu)
W-150	104	150	3,91	1,00 (Sn)	1,86(Cu)	2,10(Cu)
W-200	137	200	3,91	2,00 (Sn)	3,08(Cu)	3,31(Cu)

Fonte: ISO, 1995

Antes da irradiação dos dosímetros fotográficos, foram realizados os seguintes procedimentos:

1º) Uma câmara de ionização (CI) acoplada ao seu respectivo eletrômetro foi posicionada de acordo com esquema ilustrativo da Figura 10, exatamente no ponto de teste do campo de radiação, sobre o fantoma slab;

2º) Esta câmara foi irradiada para cada energia de calibração e foram obtidas as leituras da taxa do kerma ar $\dot{K}_a$ no eletrômetro;

3º) Através dos coeficientes de conversão $H_P(10)/K_a$ mostrados na Tabela 6 (para cada qualidade de radiação), foram calculados os tempos necessários para se irradiar os dosímetros sobre o fantoma slab, a fim de obter, naquele mesmo ponto de teste, o valor do equivalente de dose pessoal $H_P(10)$, através da relação: $t = \frac{H_P(10)}{\dot{K}_a \times h}$, onde h é o coeficiente de conversão

$H_p(10)/K_a$. Tais coeficientes de conversão são recomendados pela ISO 4037-3 (1995) para a radiação incidente na direção normal ao plano do fantoma slab.

Tabela 6 – Coeficientes de conversão, h (ISO 4037-3)

Qualidade da Radiação	h $H_p(10)/K_a$ (Sv/Gy)
N-30	0,79
N-40	1,17
N-60	1,65
N-100	1,88
N-150	1,73
N-200	1,57
W-60	1,55
W-80	1,77
W-150	1,77
W-200	1,65
S-Cs	1,21
S-Co	1,15

Fonte: ISO, 1995

4º) A seguir, a CI foi substituída pelos dosímetros para serem irradiados no mesmo ponto de teste do campo de radiação.

3.2.2 Irradiação dos dosímetros.

Um total de 432 filmes divididos em 144 conjuntos, cada um destes contendo três filmes, foram irradiados na energia do ^{60}Co , ^{137}Cs e com feixes de raios X com energias médias de 24 keV, 33 keV, 45 keV, 48 keV, 57 keV, 83 keV, 104 keV, 118 keV, 137 keV e 164 keV, perfazendo assim 12 energias, onde para cada energia foram utilizados três filmes expostos a uma faixa de 12 doses: 0,2 mSv, 0,4 mSv, 0,6 mSv, 0,8 mSv, 1 mSv, 2 mSv, 5 mSv, 10 mSv, 20 mSv, 50 mSv, 100 mSv e 200 mSv.

Os dosímetros foram posicionados sobre a superfície do fantoma voltada para o feixe de radiação, conforme indicado na Figura 10 (a) e (b). O fantoma, por sua vez, foi fixado sobre um carrinho móvel sobre trilhos fixos ao piso. Os dosímetros foram irradiados com doses que variaram de 0,2 a 200 mSv em feixes γ do ^{60}Co e ^{137}Cs e em feixes de raios X, nas seguintes

qualidades de radiação: N-30; N-40; N-60; N-100; N-150; N-200; W-60; W-80; W-150 e W-200 (ISO 4037 – 1, 1995).

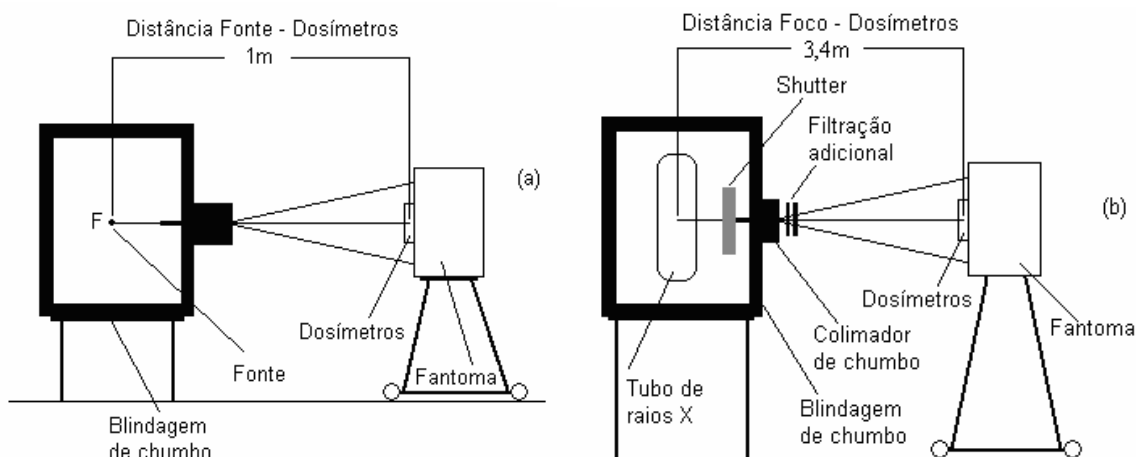


Figura 10 - Esquema ilustrativo do posicionamento dos dosímetros fotográficos sobre o fantoma e o feixe de radiação: (a) Arranjo de irradiação no ^{60}Co e ^{137}Cs ; (b) Arranjo de irradiação no sistema de raios X

Os dosímetros foram irradiados no Laboratório de Metrologia do Centro Regional de Ciências Nucleares (CRCN), conforme arranjo experimental apresentado nas Figuras 11, 12 e 13.

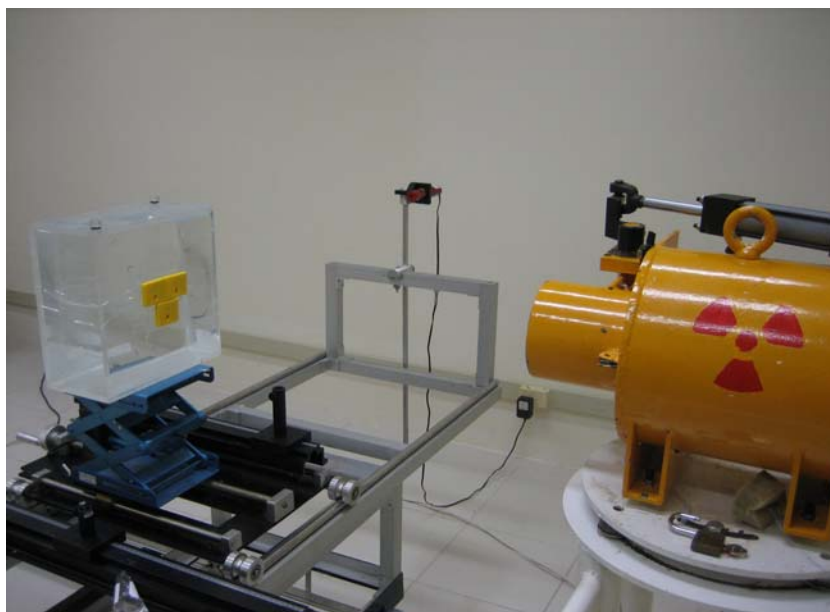


Figura 11 - Arranjo experimental de irradiação no laboratório com fonte de ^{60}Co

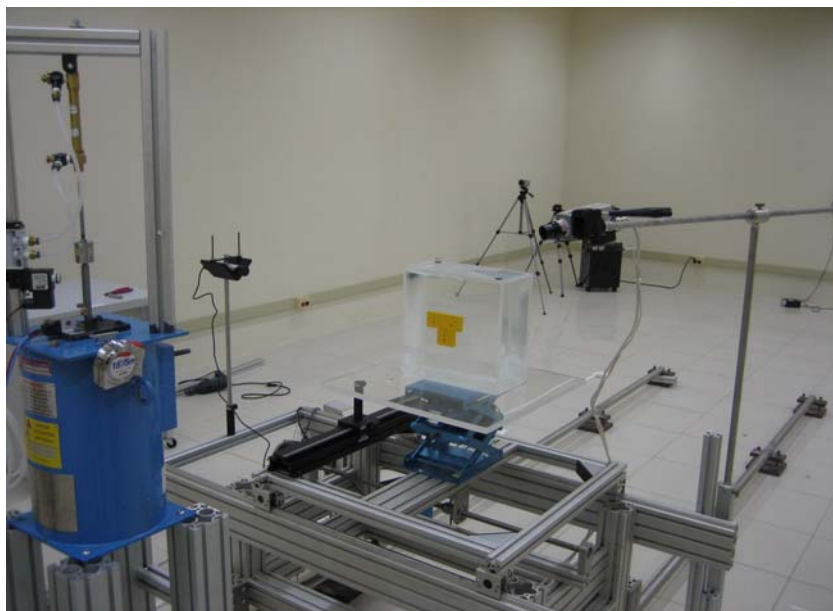


Figura 12 - Arranjo experimental de irradiação no laboratório com fonte de ^{137}Cs

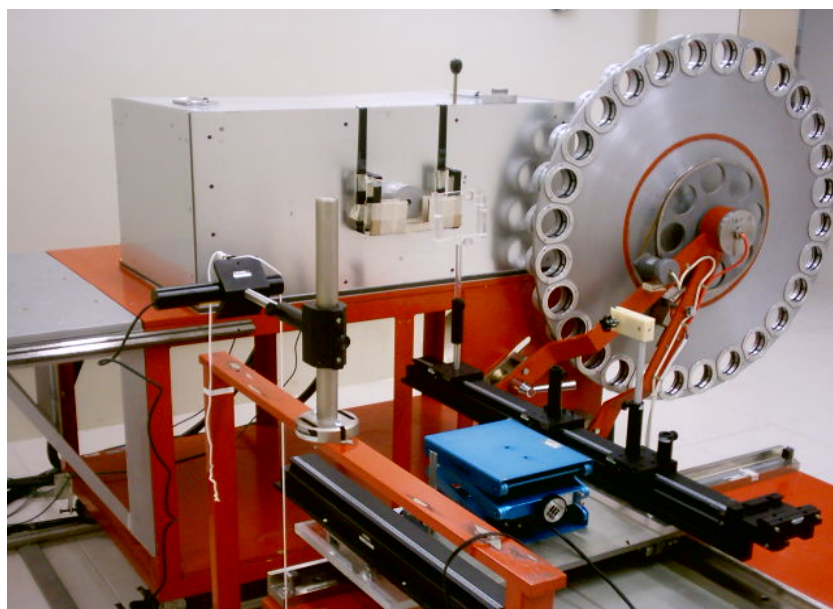


Figura 13 - Arranjo experimental de irradiação no laboratório com raios X

3.2.3 Processamento dos filmes.

Os filmes dosimétricos foram processados na câmara escura com temperatura e umidade controladas em $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $55 \pm 5\%$, respectivamente. Os tempos gastos em cada etapa do processamento foram de 4, 1, 8 e acima de 15 minutos nos banhos de revelação, de parada, de fixação e de lavagem final, respectivamente. Posteriormente os filmes foram colocados em estufa. Após a secagem, utilizando o densitômetro óptico foram realizadas as leituras das densidades ópticas sob cada área de leitura j sob os respectivos filtros e para cada sensibilidade do filme.

3.2.4 Avaliação do equivalente de dose pessoal $H_p(d)$

O método utilizado na avaliação da dose recebida pelos trabalhadores ocupacionalmente expostos às radiações ionizantes X e γ foi o Simplex, através da combinação linear em termos da dose aparente.

Um modelo simples proposto por Borasi et al. (1977) para o comportamento da resposta do filme dosimétrico em função do kerma ar (K_a) foi adaptado para o equivalente de dose pessoal (H_p) e está descrito pela Equação 1.

$$D_{ij} = D_0(1 - e^{-\alpha H_p}) \text{ ou } \ln\left(1 - \frac{D_{ij}}{D_0}\right) = -\alpha H_p \quad (1)$$

Onde: D_{ij} é a densidade ótica líquida dos filmes irradiados com energia “i” sob os filtros “j”, com $i = 1$ até 12 e $j = 1$ até 5;

D_0 é a constante que define a densidade ótica de saturação;

α é a constante que define a taxa de crescimento da função.

Definindo a sensibilidade K como o inverso do equivalente de dose H_p , a qual produz a densidade ótica $D_{ij} = 1$, temos:

$$K = \frac{1}{H_p} \text{ ou } K = -\alpha / \ln\left(1 - \frac{1}{D_0}\right)$$

Definindo U , como sendo: $U = \ln\left(1 - \frac{1}{D_0}\right)$,

a sensibilidade pode ser escrita como: $K = -\frac{\alpha}{U}$

e a equação 1 pode ser expressa como:

$$D_{ij} = D_0(1 - e^{UKH_p}) \text{ ou } \ln\left(1 - \frac{D_{ij}}{D_0}\right)/U = -\alpha H_p / U, \text{ a qual pode ser transformada em uma}$$

equação linearizada definindo DA (Dose Aparente) como sendo: $DA = \ln(1 - D_{ij} / D_0) / U$ obtendo assim a Equação 2:

$$DA = KH_p \quad (2)$$

As relações descritas pelas Equações 1 e 2, foram utilizadas no processo de calibração dos dosímetros.

Inicialmente, foi determinado um conjunto de curvas de calibração que relacionaram a densidade óptica líquida (D_{ij}) do filme em função do equivalente de dose pessoal $H_p(d)$, que variou de 0,2 a 200 mSv, para cada energia E_i . A densidade óptica líquida (D_{ij}) foi obtida através da média de leituras de densidades ópticas em cada região j de três filmes irradiados com a mesma dose, descontada a influência da radiação de fundo para cada leitura.

Os valores da D_{ij} das películas de emulsões mais e menos sensíveis em função do H_p foram ajustados utilizando o modelo proposto por Borasi através da equação 1: $D_{ij} = D_0(1 - e^{-\alpha H_p})$. As curvas para cada energia foram obtidas de forma iterativa com o auxílio de um programa computacional, por se tratar de uma equação transcendental.

A resposta do filme em termos de densidade óptica não apresenta linearidade com respeito à dose e os sistemas usuais de avaliação requerem que a resposta do detector tenha um comportamento linear com a grandeza de calibração (MOTA et al, 1990). Em decorrência disso, as curvas de calibração foram linearizadas e normalizadas em relação a uma curva de referência convenientemente escolhida (filtro e energia), conforme Figuras 35 e 36.

As curvas de calibração foram normalizadas utilizando as densidades ópticas líquidas sob o filtro de chumbo irradiado com o ^{60}Co . Em seguida as densidades ópticas em cada região “j” (com ou sem filtro) e energia “i” foram convertidas em dose aparente e relacionadas com o H_p , como mostra a equação 2, descrita anteriormente: $DA = K \times H_p$; sendo a sensibilidade K igual ao coeficiente angular para leituras de densidade ópticas sob cada região “j”, obtido através de

um ajuste linear para cada valor de energia “i” de calibração, utilizando a resposta do dosímetro sob o filtro de chumbo para ^{60}Co , como curva de referência.

3.2.5 Teste de precisão (curva trombeta)

A curva trombeta da Figura 14 foi utilizada na validação do sistema de avaliação dos equivalentes de dose pessoal, onde foram confrontados os valores dos equivalentes de dose pessoal avaliados com os valores dos equivalentes de dose pessoal reais, com a finalidade de avaliar a exatidão dos equivalentes de dose pessoal avaliados.

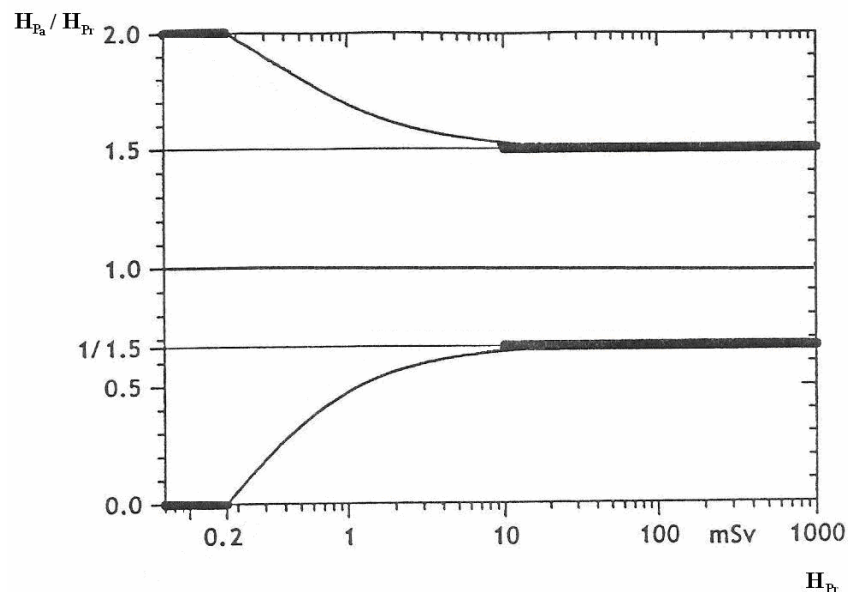


Figura 14 – Limites da curva trombeta para intercomparação entre o equivalente de dose pessoal avaliado e o equivalente de dose pessoal real

Fonte: ICRP, 1997

A curva trombeta mostra a relação $\frac{H_{Pa}}{H_{Pr}}$, onde H_{Pa} é o valor do equivalente de dose pessoal avaliado e H_{Pr} , o valor do equivalente de dose pessoal real, em função de H_{Pr} . Os valores da razão $\frac{H_{Pa}}{H_{Pr}}$ devem estar entre os limites de precisão aceitáveis e são calculados

conforme a relação:
$$\frac{1}{1,5} [1 - 0,4 / (0,2 + H_{Pr})] \leq \frac{H_{Pa}}{H_{Pr}} \leq 1,5 [1 + 0,2 / (0,4 + H_{Pr})]$$

A ICRP 75 (1997) recomenda que 95% de todas as medidas estejam compreendidas entre os limites inferior e superior da curva trombeta.

4 RESULTADOS

No APÊNDICE A estão apresentadas as respostas das películas, ou seja, as leituras das densidades ópticas líquidas (D_{ij}) em função do equivalente de dose pessoal $H_p(10)$ para as diferentes energias estudadas, conforme Tabelas de 7 a 26. Observa-se claramente que para uma mesma dose H_p , por exemplo $H_p(10) = 1 \text{ mSv}$, em altas energias (1250 keV), a densidade óptica D_{ij} sob cada filtro j quase não sofre variações, enquanto que em baixas energias (45 keV) a densidade óptica D_{ij} modifica-se de um filtro para outro. Tal fato ocorre devido à dependência energética do filme para baixas energias. O uso de filtros (com espessuras e materiais diferentes) entre a fonte de radiação e o filme, junto com a otimização das respostas das densidades ópticas, permite avaliar a dose e a energia à qual o filme foi exposto.

Nas Figuras 15 a 34 são apresentadas as curvas das densidades ópticas líquidas (D_{ij}) em função do equivalente de dose pessoal $H_p(10)$ para as energias do ^{60}Co , ^{137}Cs e raios-X, para películas de emulsões mais e menos sensíveis. Observe-se que as curvas foram obtidas das Tabelas de 7 a 26 (APÊNDICE A).

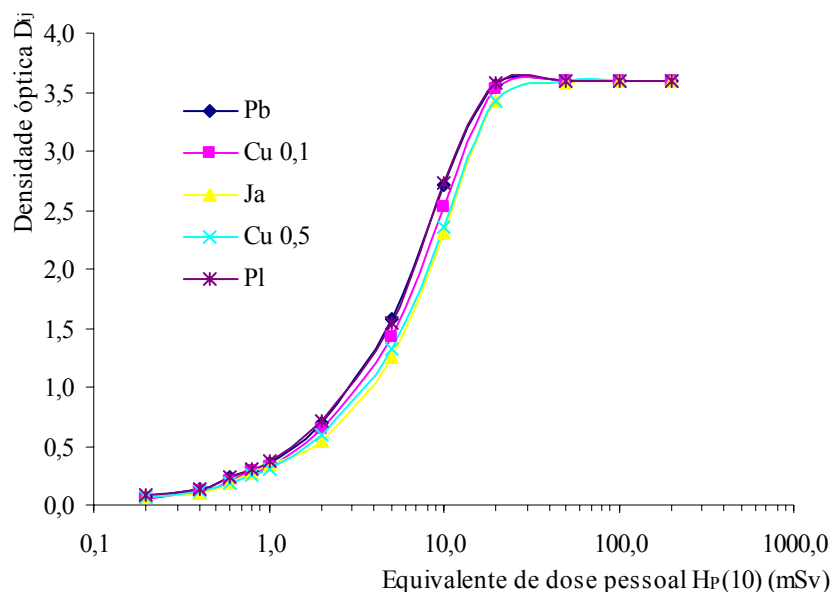


Figura 15 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia do ^{60}Co – emulsão mais sensível

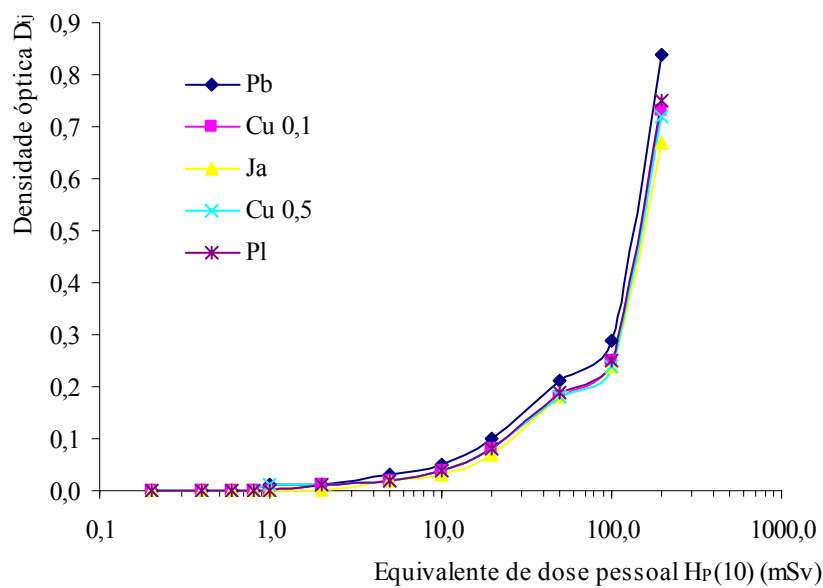


Figura 16 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia do ^{60}Co – emulsão menos sensível

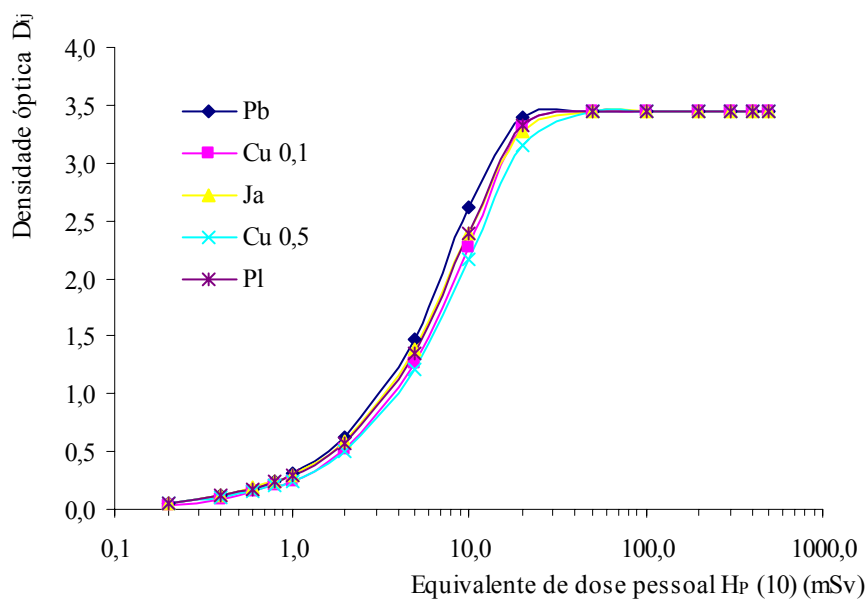


Figura 17 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia do ^{137}Cs – emulsão mais sensível

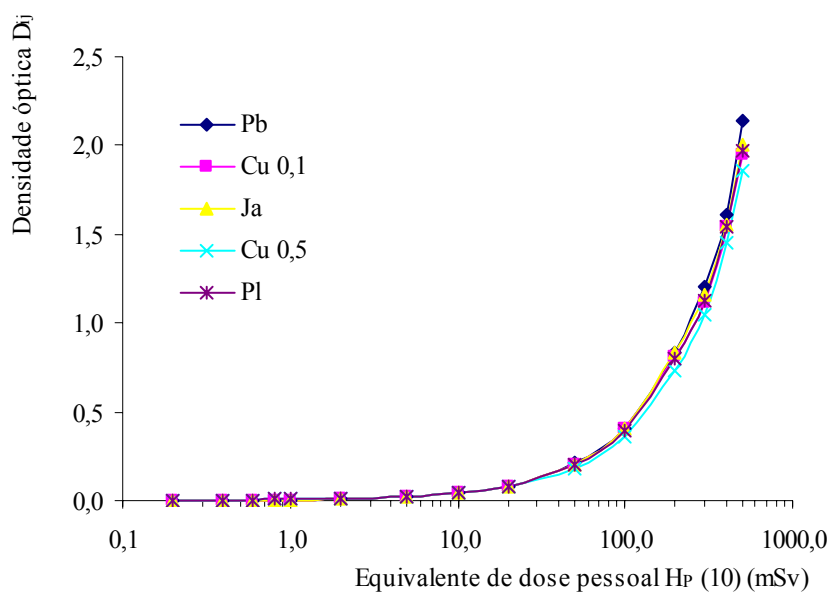


Figura 18 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia do ^{137}Cs – emulsão menos sensível

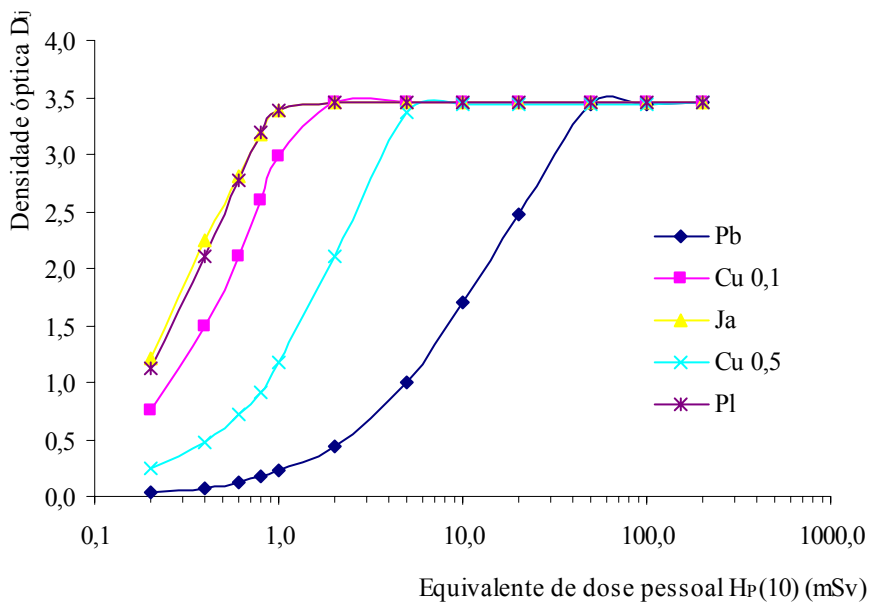


Figura 19 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios-X W60 – 45keV – emulsão mais sensível

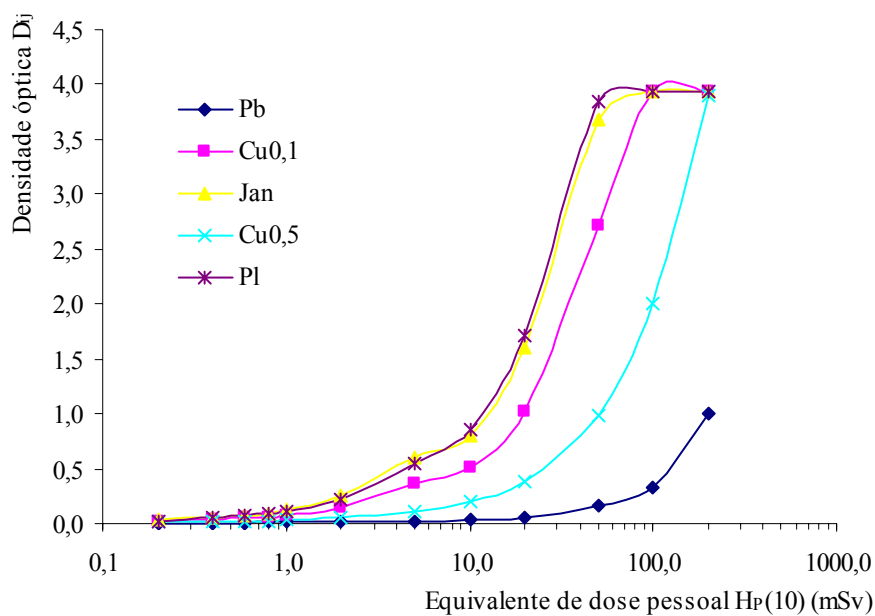


Figura 20 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios-X W60 – 45keV – emulsão menos sensível

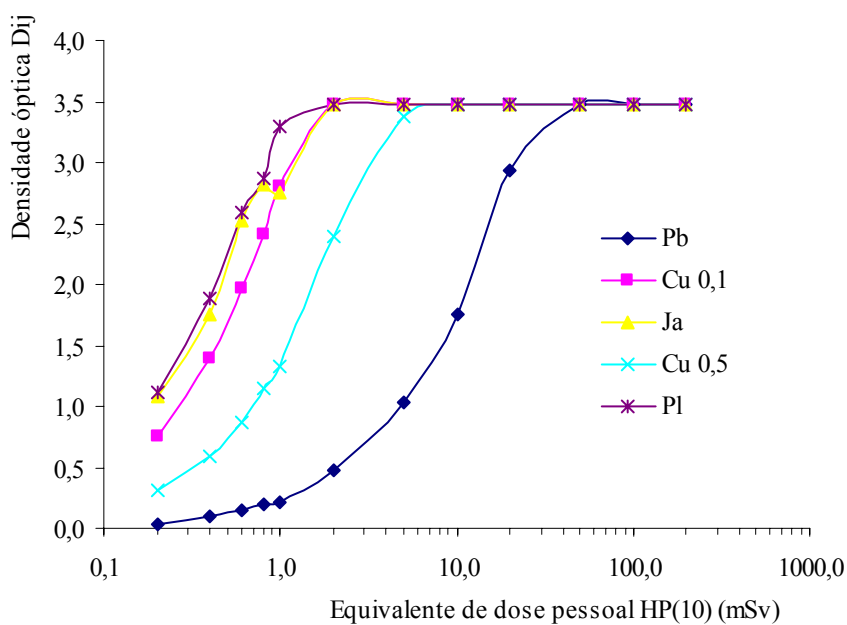


Figura 21 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios-X N60 – 48keV – emulsão mais sensível

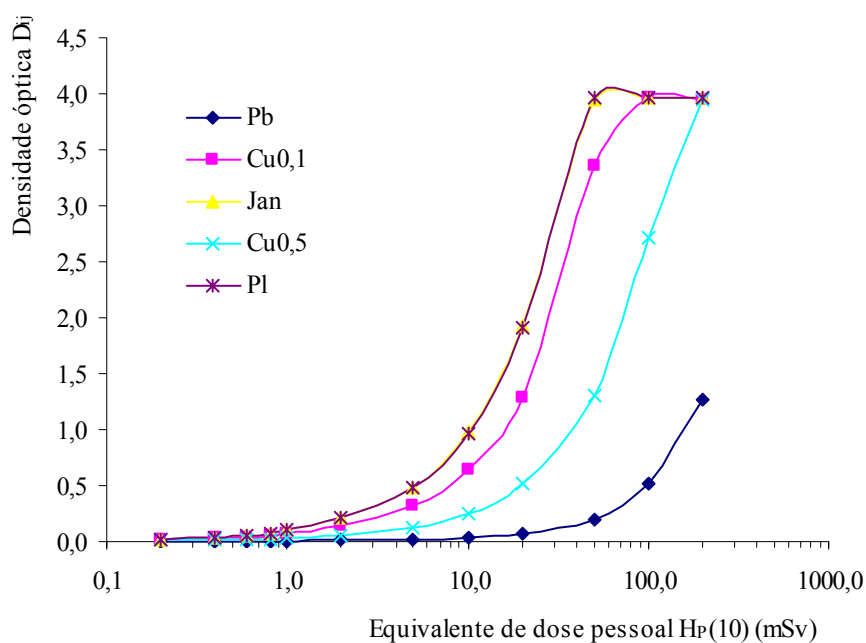


Figura 22 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios-X N60 – 48keV – emulsão menos sensível

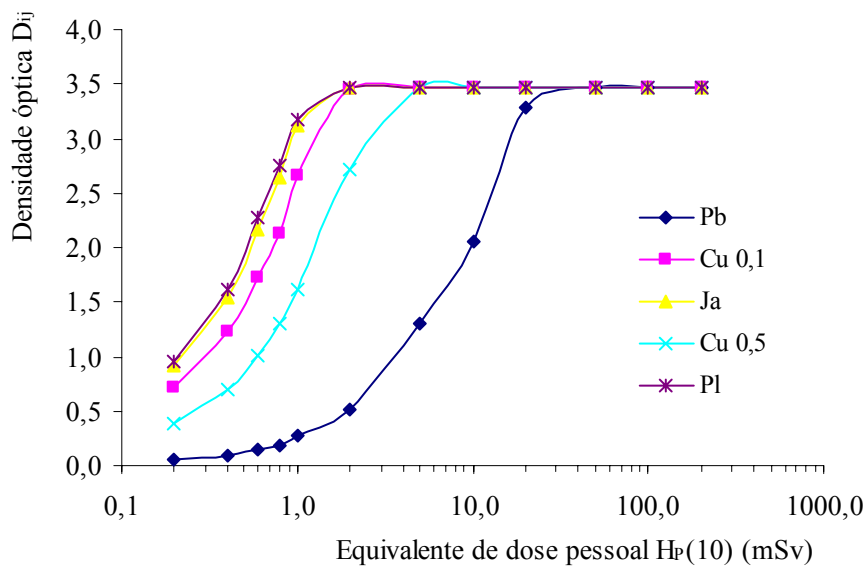


Figura 23 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios-X W80 – 57keV – emulsão mais sensível

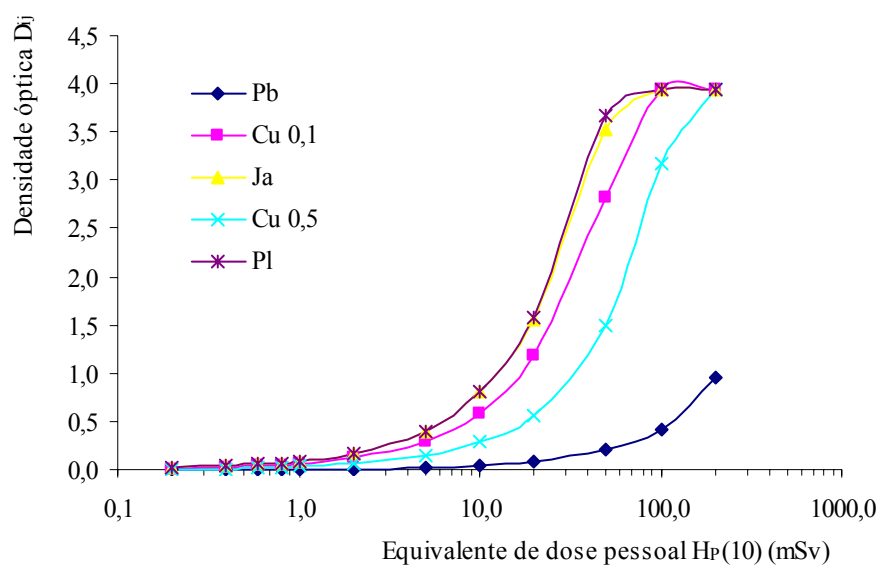


Figura 24 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_P) para a energia dos raios-X W80 - 57keV - emulsão menos sensível

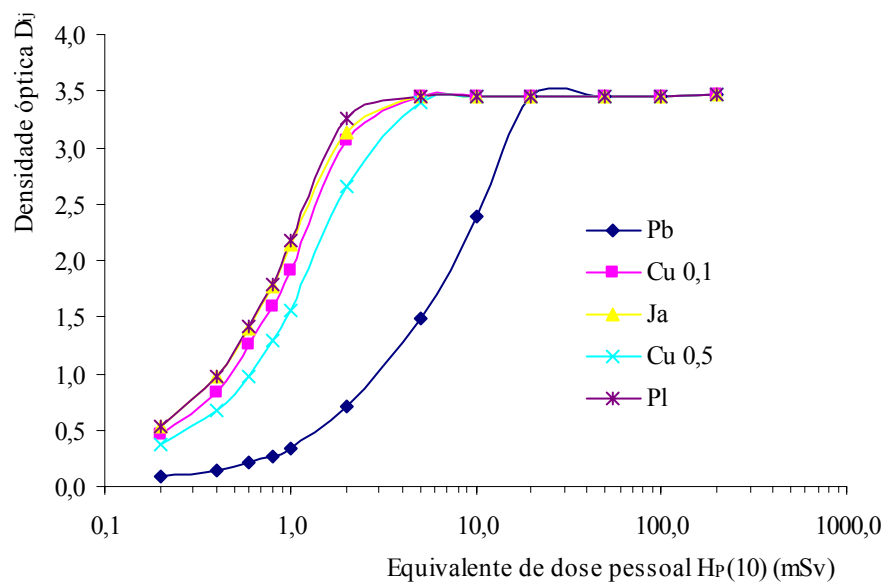


Figura 25 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_P) para a energia dos raios-X N100 - 83keV - emulsão mais sensível

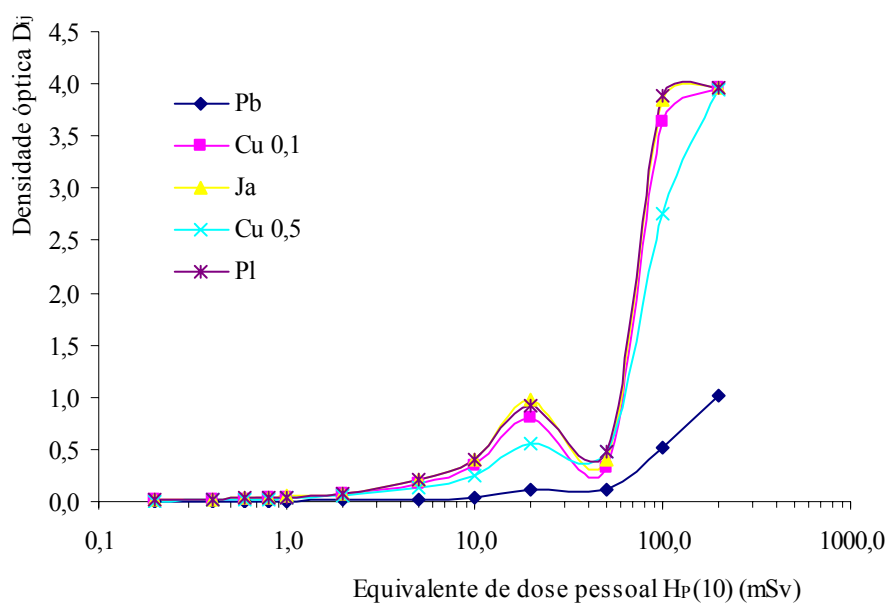


Figura 26 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios-X N100 – 83keV – emulsão menos sensível

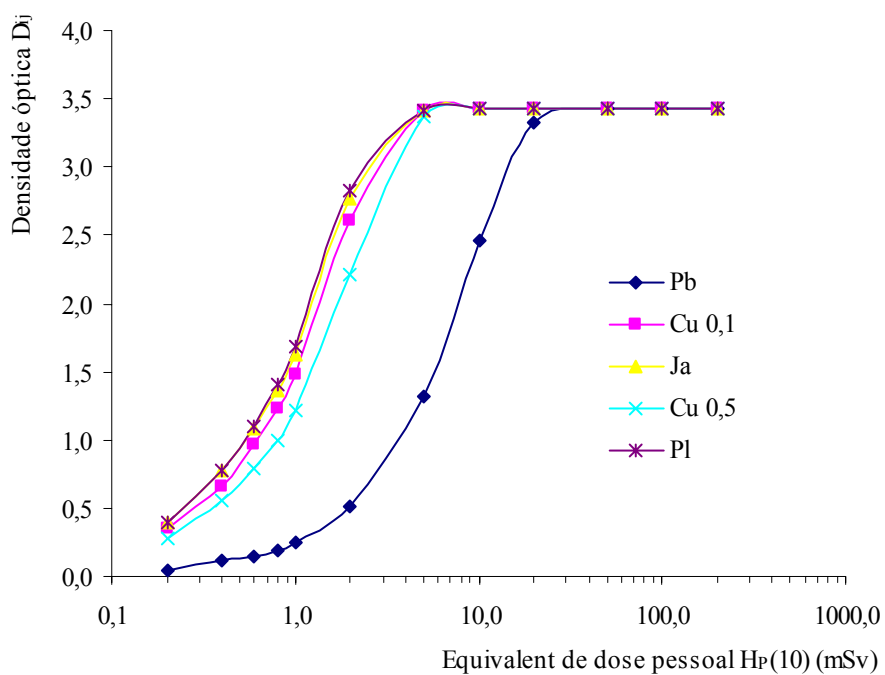


Figura 27 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios-X W150 – 104keV – emulsão mais sensível

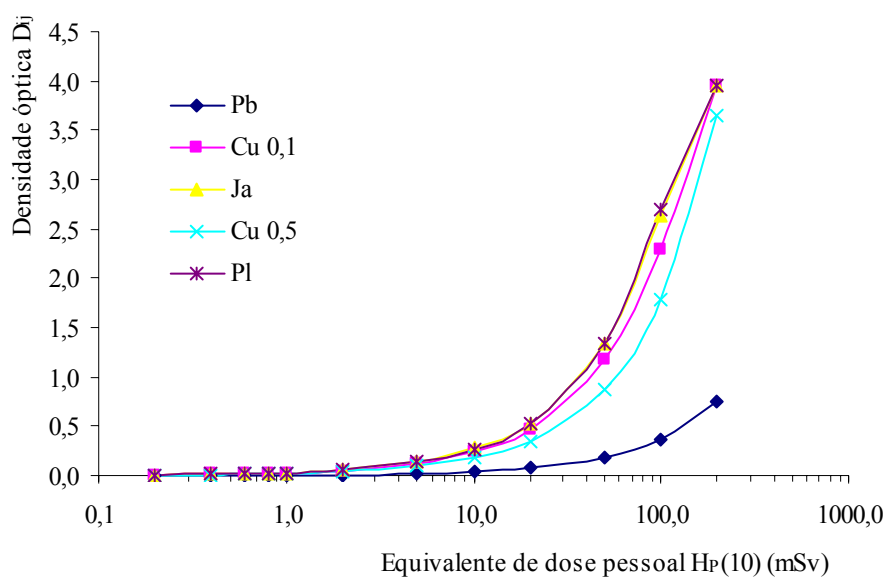


Figura 28 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios-X W150 – 104keV – emulsão menos sensível

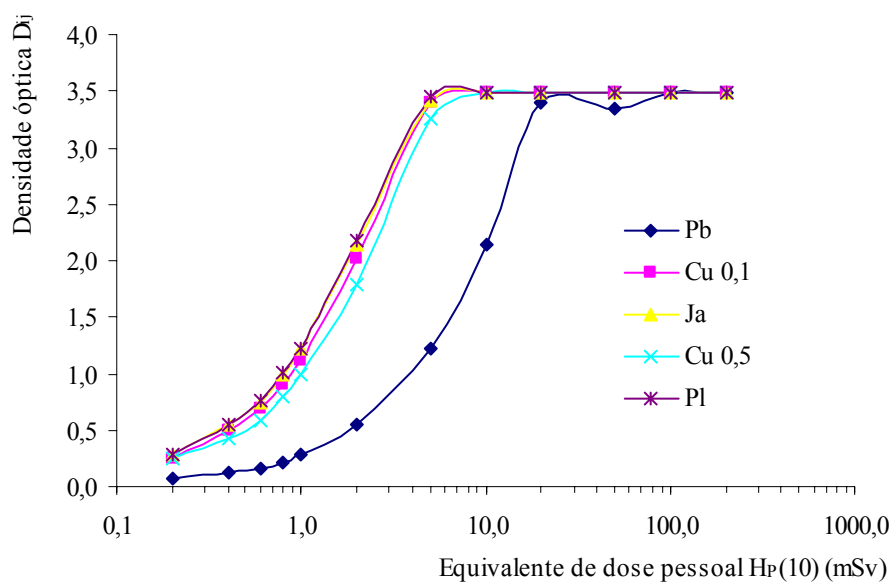


Figura 29 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios-X N150 – 118keV – emulsão mais sensível

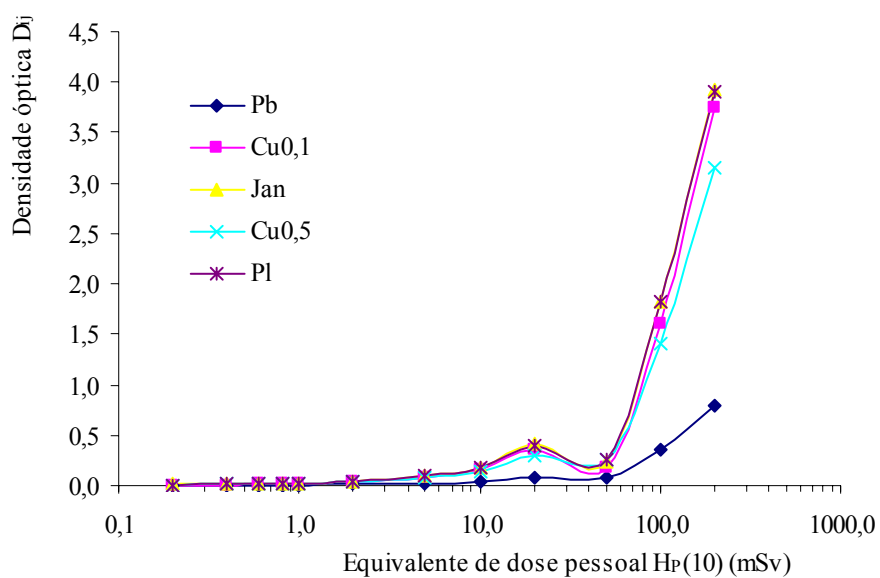


Figura 30 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios-X N150 – 118keV – emulsão menos sensível

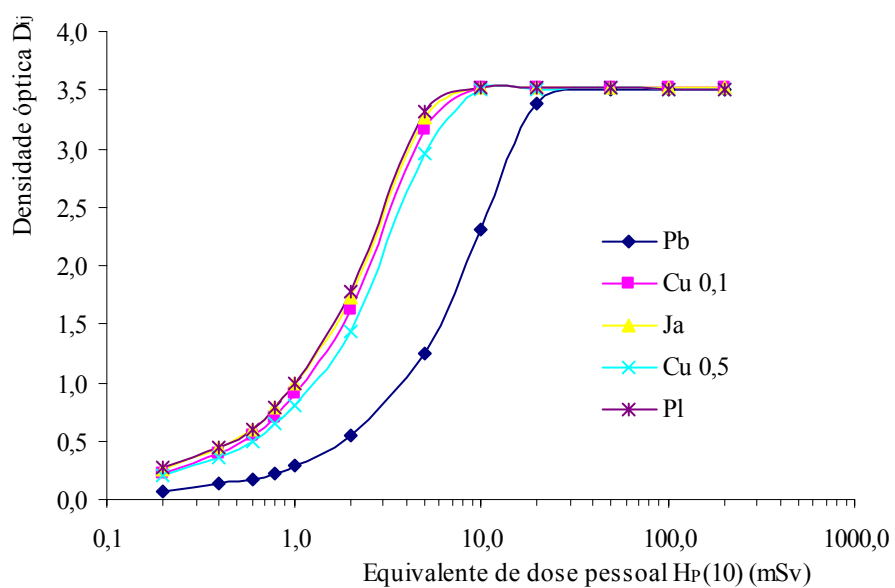


Figura 31 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios-X W200 – 137keV – emulsão mais sensível

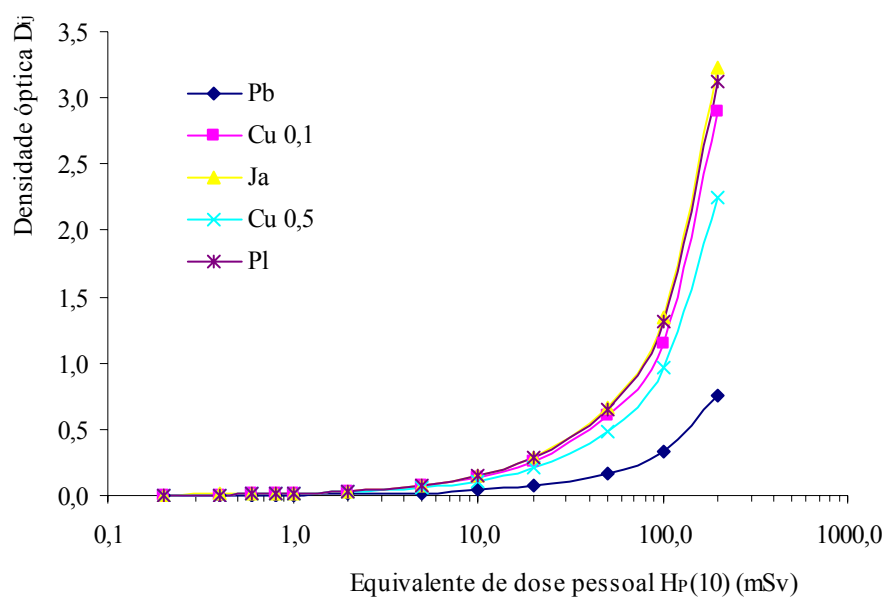


Figura 32 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios-X W200 – 137keV – emulsão menos sensível

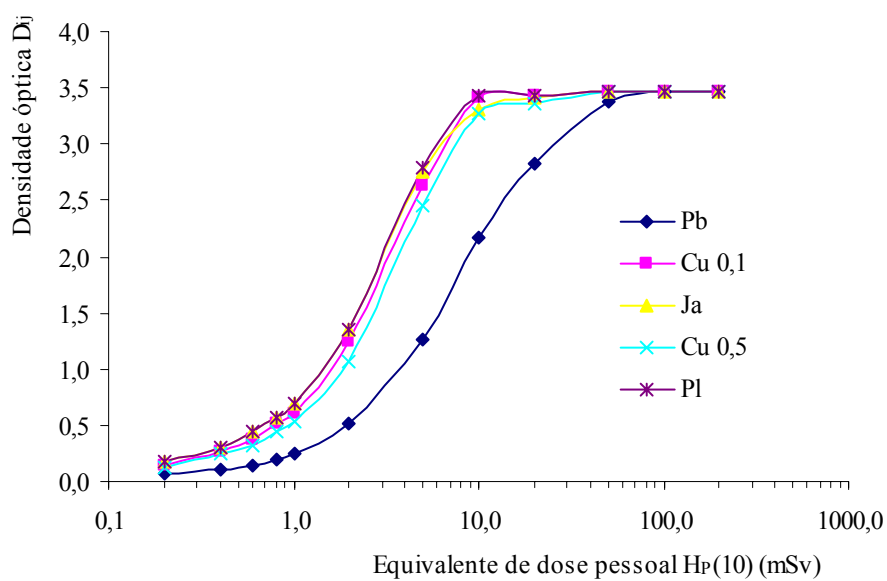


Figura 33 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios-X N200 – 164keV – emulsão mais sensível

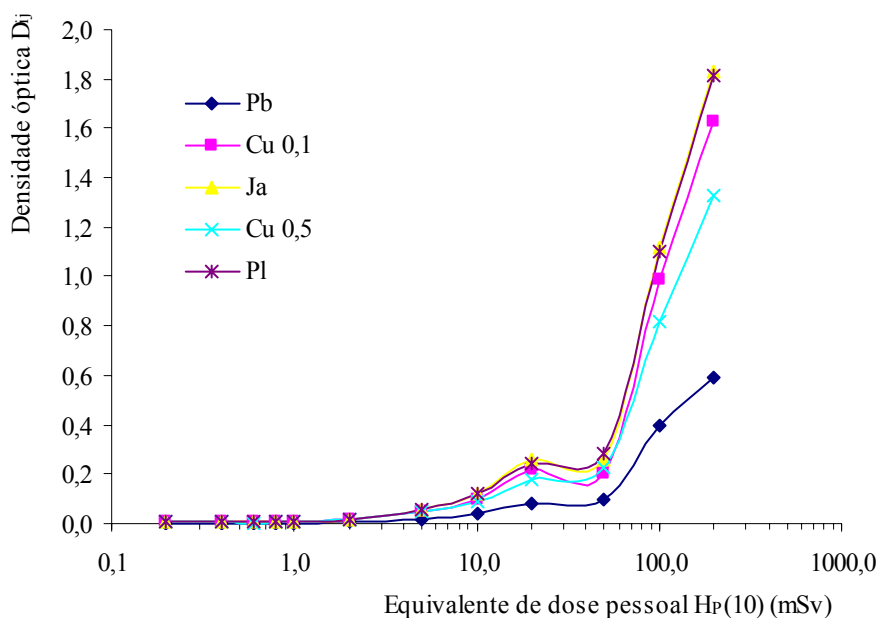


Figura 34 - Densidades ópticas líquidas em função do equivalente de dose pessoal (H_p) para a energia dos raios-X N200 – 164keV – emulsão menos sensível

A partir das curvas acima, foram geradas curvas de Dose Aparente em função de H_p , utilizando o algoritmo KCALC_UFPE de 18/01/2007, conforme ANEXO A, para cada energia média. Tais curvas foram normalizadas pela curva de referência previamente escolhida.

Nas Tabelas 27 e 28 estão apresentadas as respostas dos filmes dosimétricos irradiados com ^{60}Co em função da dose H_p , que também estão apresentadas nas Tabelas 7 e 8 (APÊNDICE A), que foram utilizados como curva de referência e para obtenção das curvas de calibração, em termos de H_p , linearizadas e normalizadas para o filtro de chumbo em 1250 keV, definidas pelas equações 3 e 4. Tais equações também foram obtidas através do algoritmo KCALC_UFPE (ANEXO A).

Tabela 27 – Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com ^{60}Co (emulsão mais sensível).

H_p (mSv)	Média das densidades sobre três películas:				
	Pb	Cu 0,1	Janela	Cu 0,5	Plástico
0,2	0,07	0,06	0,07	0,06	0,08
0,4	0,14	0,12	0,10	0,12	0,14
0,6	0,23	0,21	0,18	0,19	0,24
0,8	0,29	0,28	0,27	0,25	0,30
1,0	0,36	0,32	0,33	0,31	0,38
2,0	0,69	0,64	0,54	0,59	0,72
5,0	1,58	1,42	1,25	1,32	1,55
10,0	2,72	2,52	2,30	2,36	2,73
20,0	3,56	3,53	3,43	3,43	3,58
50,0	3,60	3,60	3,57	3,59	3,60
100,0	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60
200,0	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60

Tabela 28 – Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com ^{60}Co (emulsão menos sensível).

H_p (mSv)	Média das densidades sobre três películas:				
	Pb	Cu 0,1	Janela	Cu 0,5	Plástico
0,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,0	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00
2,0	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
5,0	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
10,0	0,05	0,04	0,03	0,04	0,04
20,0	0,10	0,08	0,07	0,08	0,08
50,0	0,21	0,18	0,18	0,18	0,19
100,0	0,29	0,25	0,24	0,24	0,25
200,0	0,84	0,73	0,67	0,72	0,75

$$D_{ij} = 5,68(1 - e^{-0,07 \times H_p}) \text{ para emulsão mais sensível} \quad (3)$$

$$D_{ij} = 140,69(1 - e^{-0,00003 \times H_p}) \text{ para emulsão menos sensível} \quad (4)$$

Nas Tabelas 29 e 30 são apresentados os valores das densidades ópticas líquidas linearizadas “ D_{ij} ” e ajustadas em função da dose H_p dos filmes irradiados com ^{60}Co para películas de emulsões mais e menos sensíveis. Analisando as Tabelas 27 – 29 e 28 – 30, observa-se que nas películas de emulsão mais sensível, a saturação da densidade óptica ocorre a partir de 10 mSv, enquanto que nas películas de emulsão menos sensível só começa a responder a partir de doses acima de 5 mSv.

Tabela 29 – Densidade óptica em função do equivalente de dose pessoal H_p utilizando o modelo proposto por Borasi a partir da equação: $D_{ij} = 5,68(1 - e^{-0,07 \times H_p})$ para a emulsão mais sensível

H_p	D_{ij} reais	D_{ij} ajustadas
0,2	0,07	0,07
0,4	0,14	0,15
0,6	0,23	0,22
0,8	0,29	0,29
1,0	0,36	0,36
2,0	0,69	0,69
5,0	1,58	1,58
10,0	2,72	2,72
20,0	3,56	4,14
50,0	3,60	5,46
100,0	3,60	5,67
200,0	3,60	5,68

Tabela 30 – Densidade óptica em função do equivalente de dose pessoal H_p utilizando o modelo proposto por Borasi a partir da equação: $D_{ij} = 140,69 (1 - e^{-0,00003 \times H_p})$ para a emulsão menos sensível

H_p	D_{ij} reais	D_{ij} ajustadas
0,2	0,00	0,00
0,4	0,00	0,00
0,6	0,00	0,00
0,8	0,00	0,00
1,0	0,01	0,00
2,0	0,01	0,01
5,0	0,03	0,02
10,0	0,05	0,04
20,0	0,10	0,08
50,0	0,21	0,21
100,0	0,29	0,42
200,0	0,84	0,84

Baseado nos dados das Tabelas 29 e 30 foram obtidas as curvas de referências para D_{ij} ajustadas, conforme indicada nas Figuras 35 e 36.

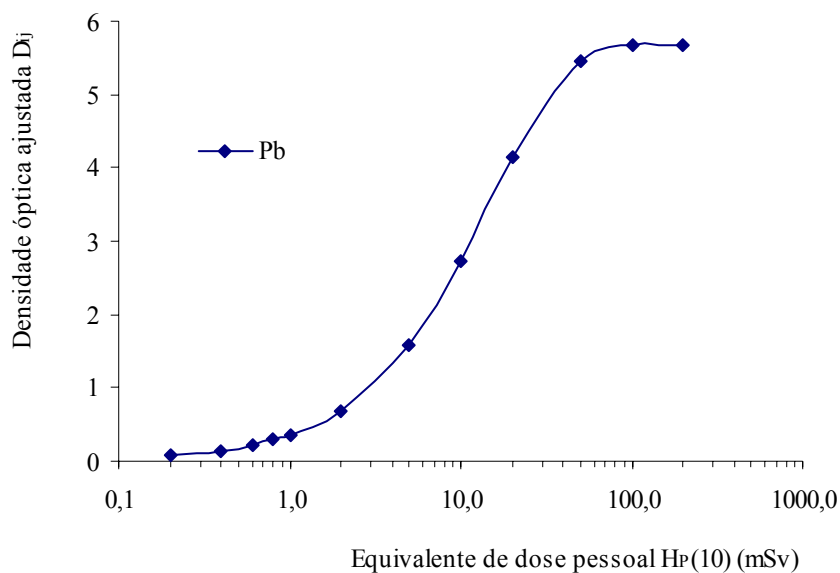


Figura 35 – Densidade óptica sob filtro de Pb em função do equivalente de dose pessoal H_P para a energia do ^{60}Co – emulsão mais sensível

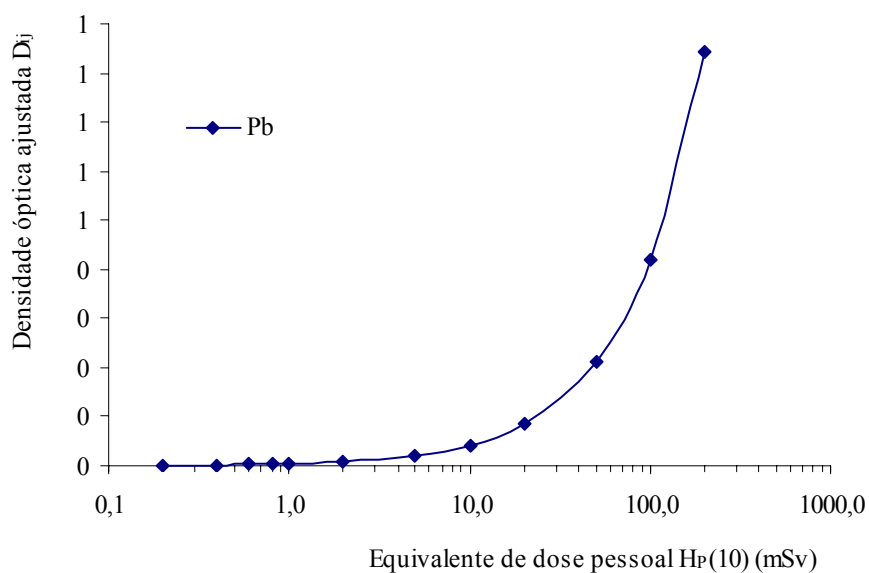


Figura 36 – Densidade óptica sob filtro de Pb em função do equivalente de dose pessoal H_P para a energia do ^{60}Co – emulsão menos sensível

Utilizando o algoritmo de ajuste linear (ANEXO A) calculou-se, por interpolação, a Dose Aparente (DA). Essas Doses Aparentes foram relacionadas às densidades ópticas. Tais

densidades ópticas foram utilizadas como referência para a normalização das demais curvas características para todos os filtros e energias.

Nas Tabelas 31 e 32, e Figuras 37 e 38, para películas de emulsão mais e menos sensível, são apresentados os valores e as curvas de Doses Aparentes (DA) em função das densidades ópticas de referência (D_r), na região linear, para todas as energias e filtros, respectivamente.

Tabela 31 - Dose aparente (DA) em função das densidades ópticas de referência (D_r), na região linear, para todas as energias e filtros (emulsão mais sensível)

D_r	DA sob os filtros de:				
	Ja	Pl	Cu 0,1	Cu 0,5	Pb
0,33	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
0,67	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92
1,00	2,97	2,97	2,97	2,97	2,97

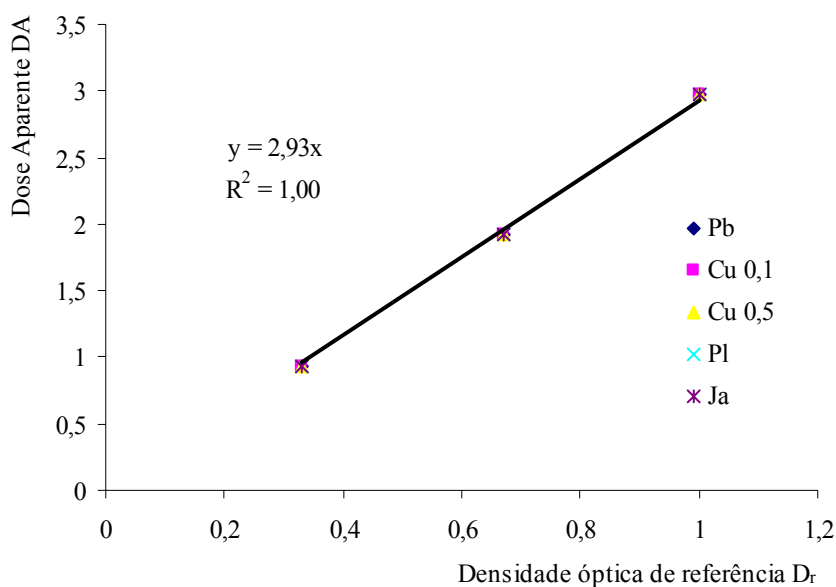


Figura 37 - Dose aparente (DA) sob filtros: Ja; Pl; Cu 0,1; Cu 0,5 e Pb em função da D_r , na região linear, para todas as energias e filtros – emulsão mais sensível

Tabela 32 - Dose aparente (DA) em função das densidades ópticas de referência (D_r), na região linear, para todas as energias e filtros (emulsão menos sensível)

D_{ij}	DA sob os filtros de:				
	Ja	Pl	Cu 0,1	Cu 0,5	Pb
0,33	79,09	79,09	79,09	79,09	79,09
0,67	158,37	158,37	158,37	158,37	158,37
1,00	237,84	237,84	237,84	237,84	237,84
1,33	317,50	317,50	317,50	317,50	317,50
1,67	397,35	397,35	397,35	397,35	397,35
2,00	477,39	477,39	477,39	477,39	477,39
2,33	557,62	557,62	557,62	557,62	557,62
2,67	638,05	638,05	638,05	638,05	638,05
3,00	718,67	718,67	718,67	718,67	718,67
3,33	799,49	799,49	799,49	799,49	799,49
3,67	880,50	880,50	880,50	880,50	880,50
4,00	961,71	961,71	961,71	961,71	961,71

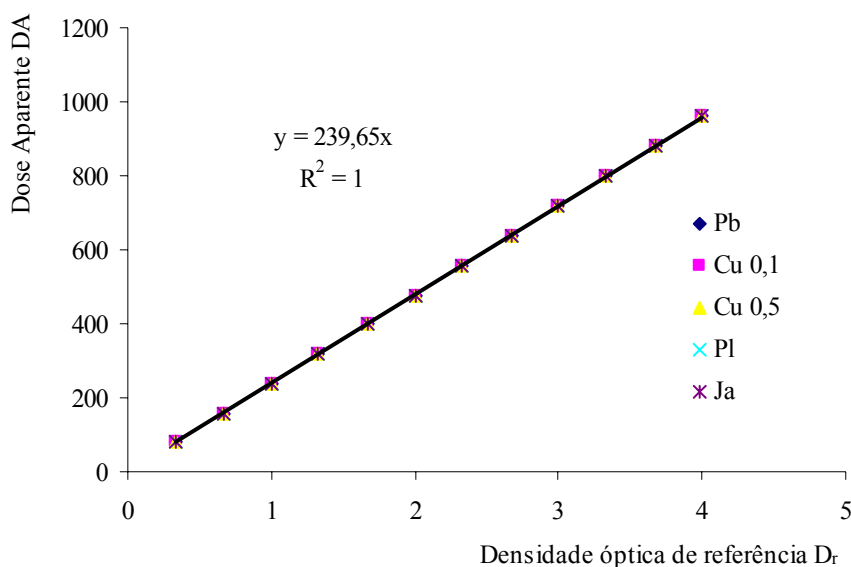


Figura 38 - Dose aparente (DA) sob filtros: Ja; Pl; Cu 0,1; Cu 0,5 e Pb em função da D_r , na região linear, para todas as energias e filtros – emulsão menos sensível

As demais curvas de densidade óptica líquida D_{ij} em função do equivalente de dose pessoal $H_p(10)$ de todos os filtros e energias também foram ajustadas, usando o modelo Borasi, e suas respectivas equações foram calculadas pelo algoritmo (ANEXO A).

A seguir, os valores das densidades ópticas de referências (D_r) foram substituídos nessas equações para todos os filtros e energias, obtendo assim o modelo linearizado para cada filtro e energia. Algumas dessas curvas podem ser observadas nas Figuras de 39 a 48 do APÊNDICE B.

A partir dessa substituição, os H_p 's agora ajustados foram relacionados às respectivas Doses Aparentes e obtidas as curvas de Dose Aparente em função de H_p para cada filtro e energia. O mesmo algoritmo (ANEXO A) calculou os coeficientes angulares (K_{ij}) das curvas DA x H_p , para todas as energias e filtros estudados.

Os coeficientes angulares (K_{ij}) de todas as energias e filtros estudados foram normalizados para o coeficiente angular (K_{ij}) da curva de referencia (onde $j = \text{Pb}$ e $i = {}^{60}\text{Co}$) conforme Tabelas 33 e 34, para emulsões mais e menos sensível, respectivamente.

Tabela 33 - Coeficientes angulares K_{ij} normalizados para o K_{ij} do Pb em 1250 keV (emulsão mais sensível)

Energia (keV)	K_{ij} (Ja)	K_{ij} (Pl)	K_{ij} (Cu 0,1)	K_{ij} (Cu 0,5)	K_{ij} (Pb)
1250	0,64	0,81	0,72	0,66	1,00
662	0,68	0,67	0,62	0,59	0,74
164	1,46	1,46	1,38	1,18	0,53
137	2,13	2,19	1,96	1,60	0,59
118	2,64	2,71	2,45	2,14	0,55
104	4,20	3,92	3,39	2,66	0,60
83	5,28	5,53	4,68	3,44	0,64
57	9,87	10,57	6,77	4,06	0,56
48	10,01	12,47	8,23	2,96	0,43
45	13,34	13,06	9,17	2,46	0,41
33	14,74	13,00	6,34	0,53	0,27
24	10,07	8,95	2,23	0,14	0,09

Tabela 34 - Coeficientes angulares K_{ij} normalizados para o K_{ij} do Pb em 1250 keV (emulsão menos sensível)

Energia (keV)	K_{ij} (Ja)	K_{ij} (Pl)	K_{ij} (Cu 0,1)	K_{ij} (Cu 0,5)	K_{ij} (Pb)
1250	0,41	0,46	0,45	0,44	1,00
662	0,49	0,48	0,48	0,45	0,51
164	1,17	1,15	1,03	0,84	0,37
137	1,80	1,77	1,55	1,33	0,47
118	2,16	2,14	2,02	1,80	0,49
104	2,90	2,93	2,65	2,03	0,47
83	4,82	4,69	4,13	2,99	0,63
57	7,86	8,17	6,16	3,30	0,59
48	10,76	10,89	7,09	2,93	0,76
45	8,38	10,06	5,86	2,44	0,62
33	11,14	10,71	5,27	0,55	0,14

A partir dos coeficientes angulares (K_{ij}) foram obtidas curvas normalizadas e linearizadas em termos da Dose Aparente em função da energia, conforme Figuras 49 e 50, para película de emulsão mais e menos sensível.

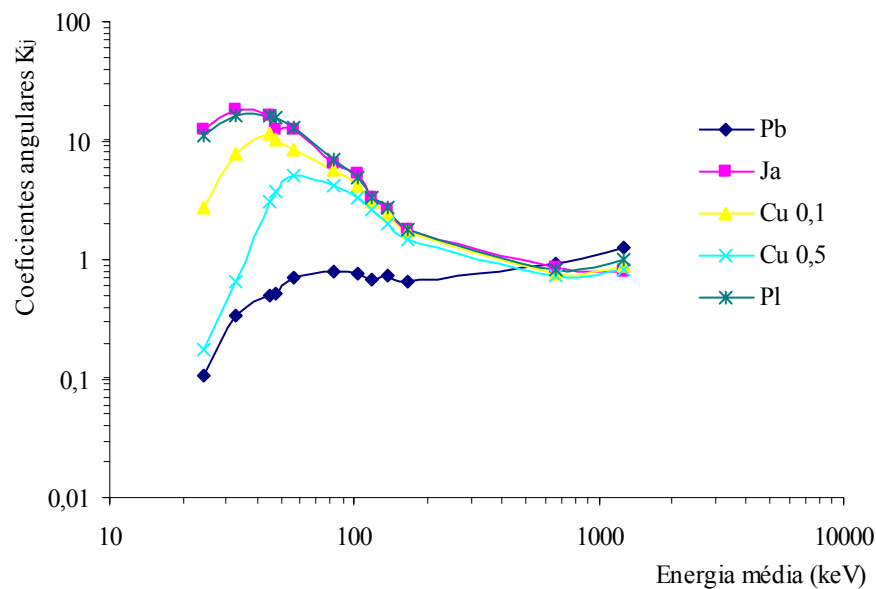


Figura 49 - Curva dos coeficientes angulares de cada filtro em função da energia - emulsão mais sensível

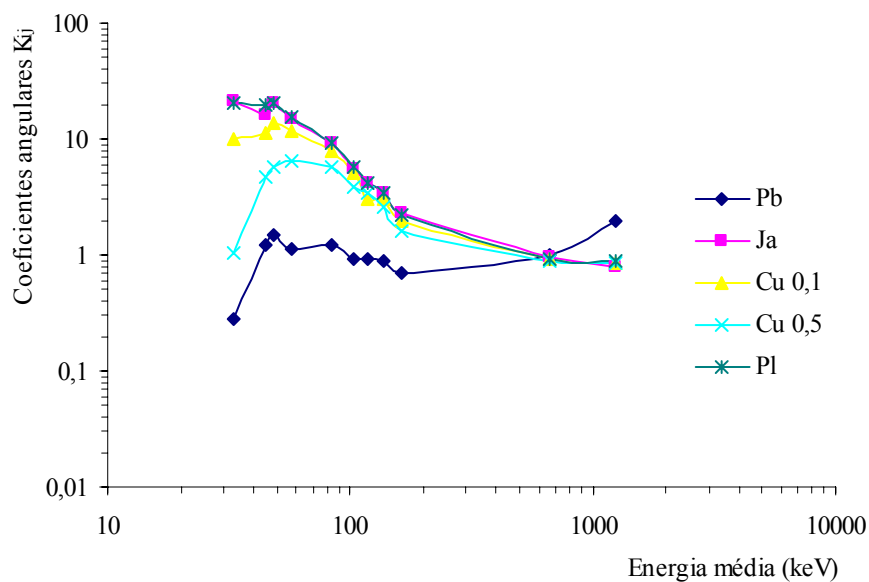


Figura 50 - Curva dos coeficientes angulares de cada filtro em função da energia - emulsão menos sensível

Para avaliação do equivalente de dose pessoal (H_{pa}) foram obtidos os coeficientes angulares: α_1 , α_2 , α_3 , α_4 e α_5 referentes a cada filtro: α_1 para o filtro de plástico; α_2 para o filtro de cobre 0,1 mm; α_3 para o filtro de cobre 0,5 mm; α_4 para o filtro de chumbo; α_5 para a janela; utilizando o método de combinação linear e a partir dos valores dos coeficientes angulares (K_{ij}).

Através da equação 5, as doses (H_{Pa}) foram obtidas para cada energia, pela equação:

$$H_{Pa}(mSv) = (\alpha_1 D_{ij-Pi} + \alpha_2 D_{ij-Cu0,1} + \alpha_3 D_{ij-Cu0,5} + \alpha_4 D_{ij-Pb} + \alpha_5 D_{ij-Ja}) \times K \quad (5)$$

onde K é o coeficiente angular da reta DA em função de D_r .

Para escolha dos melhores coeficientes angulares: α_1 , α_2 , α_3 , α_4 e α_5 foi utilizado o algoritmo COMBINAÇÕES LINEARES de 22/05/2007, ver ANEXO B, que otimizou os resultados através da combinação linear e encontrou a melhor solução para o sistema, cujos melhores valores foram: $\alpha_1 = 0,05$, $\alpha_2 = -0,11$, $\alpha_3 = 0,07$, $\alpha_4 = 0,85$ e $\alpha_5 = 0,05$.

Com a finalidade de testar o método desenvolvido neste trabalho foi realizado o seguinte procedimento: os filmes foram irradiados no Laboratório de Metrologia do CRCN, revelados no Laboratório de Monitoração Individual do DEN e avaliados utilizando os algoritmos descritos nos ANEXOS A e B. Foi feita uma comparação entre os resultados do equivalente de dose pessoal avaliados com os reais, para emulsões mais e menos sensíveis descritas nas Tabelas 35 e 36, que estão no APÊNDICE C.

Na dosimetria fotográfica, para avaliação das doses H_{Pa} , espera-se uma precisão de até $\pm 20\%$ - 50% do valor real (BECKER, 1966). Pode-se perceber que, na prática, observam-se erros bem menores do que os esperados, conforme Tabelas 35 e 36 (APÊNDICE C); verifica-se que nas películas de emulsão mais sensível, independente do valor da energia, o erro médio variou de 1,6% a 10%, exceto para a energia de 662keV que o erro médio foi de 17,1%, estando este porém, dentro dos limites pré-estabelecidos nas recomendações da ICRP 75 (1997); observa-se que para películas de emulsão menos sensível, o erro médio na avaliação das doses foi menor ou igual a 7,4%, independente do valor da energia.

A curva da Figura 51 mostra a variação das medidas avaliadas.

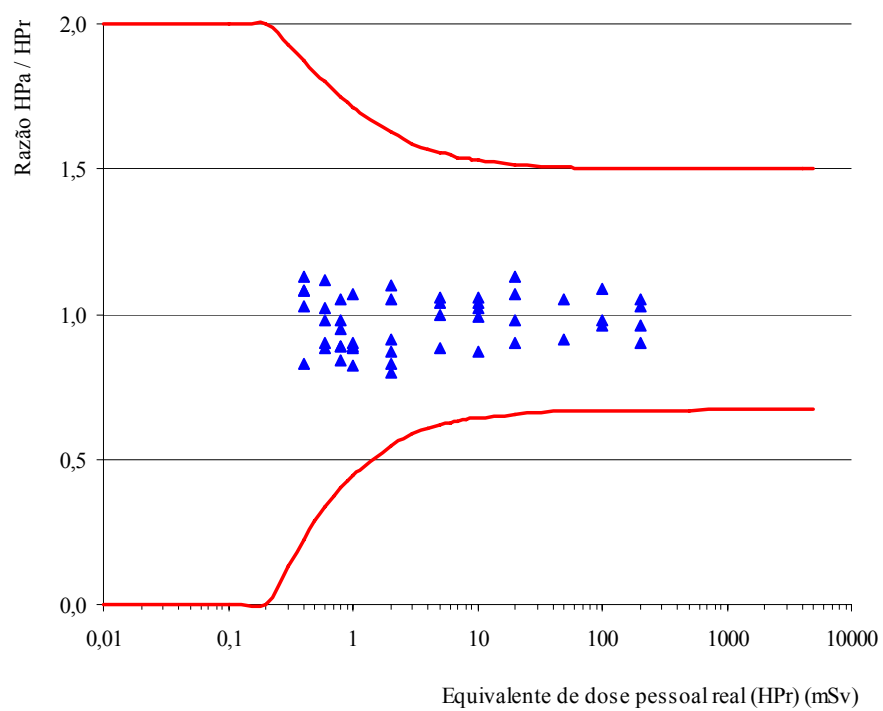


Figura 51 - Razão de H_{Pa} / H_{Pr} em função de H_{Pr}

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nos levam às seguintes conclusões:

Os valores dos equivalentes de dose pessoal avaliados de 0,2 a 200 mSv possuem incertezas significativamente menores do que aqueles recomendados pela ICRP 75, para monitoração individual; portanto, o sistema de avaliação das doses atende as novas recomendações propostas pelas comissões internacionais.

Pelo exposto, consideramos que a metodologia desenvolvida no presente trabalho preenche todos os requisitos para a determinação do equivalente de dose pessoal $H_p(10)$, podendo ser aplicada a um serviço de monitoração individual para radiação externa X e γ que utilize a técnica da dosimetria fotográfica. Desta forma, este trabalho contribui para que uma prioridade na radioproteção seja atingida, servindo como fonte de dados e como uma das alternativas de implementação em legislações, regulamentos e procedimentos no trabalho, das novas grandezas e unidades definidas pelas ICRU/ICRP. Para isso, é necessária a avaliação ainda mais apurada dos coeficientes angulares α_1 , α_2 , α_3 , α_4 e α_5 , de modo a obter-se um sistema de avaliação mais refinado.

REFERÊNCIAS

ALBERTS, W.G., BOEHM, J., KRAMER, H.M., ILES, W.J., MCDONALD, J., SCHWARTZ, R.B.T., HOMPSON, I.M.G., **“International standardization of reference radiations and calibration procedures for radiation protection instruments”**, Strahlenschutz: Physik und Messtechnik, v.1 (KOELZER, W., MAUSHART, R., Eds) (TUV Rheinland GmbH, Köln), 1994, p.181–188.

AMBROSI, P., ALBERTS, W.G., BOEHM, J., DIETZE, G., HOHFELD, K., WILL, W., **New dose quantities in radiation protection**, PTB-Dos-23EN, 1995.

ANTONIO FILHO, J. **Influência da temperatura e umidade relativa em dosímetros utilizados em monitoração pessoal**. 135f. 1982. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia Nuclear) – Departamento de Energia Nuclear – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1982.

ARCHER, B. R. History of the shielding of diagnostic X-ray facilities. **Health Physics Journal**, v.69, n.5, p.750-758, 1995.

BARTLETT, D. T. Personal dose equivalent, H_p , and reference point for calibration. **Radiation Protection Dosimetry**, v.121, n.3, p.209-210, 2006.

BECKER, K. **Photographic film dosimetry**. London, Focal, 1966.

_____. **Solid state dosimetry**. Cleveland: CRC Press, 1973. p.231-241.

BERMANN, F., CHANOURDIE, J.C. **Reconnaissance assistée des rayonnements à partir des données d’un dosimètre photographique**. Radioprotection, v. 8, n. 3, p.189-205, 1973.

BÖHM, J., SUAREZ, R. C. IAEA intercomparisons for individual monitoring of photon radiation 1987-1998. **Radiation Protection Dosimetry**, v.96, n.1-3, p.143-150, 2001.

BONAMINI, D. **Prove sperimentali sulla metodica a filme badge**. Italian, 1997. Disponível em: <<http://www.tecnorad.it/InfoNews/PrvSprMar97/PrvSprMar97ita.htm>>. Acessado em: 23 maio de 2006.

BORASI, G., GIACOMELLI, M., TOSI, G. **Tecniche di ottimizzazione in dosimetria fotografica**. In: Atti del I Incontro Nazionale di Analisi e Confronto dei Metodi di Dosimetria Personale, CNEN (ENEA), Milano, 7-9 november 1977, p.172-188 (in Italian), 1977.

CARDOSO, J., CARVALHO, A. F., OLIVEIRA, C. Simulation studies on a prototype ionisation chamber for measurement of personal dose equivalent, $H_p(10)$. **Radiation Protection Dosimetry**, v.1, p.1-5, 2007.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **CNEN-NN-3.01**, Diretrizes Básicas de Proteção Radiológicas, Brasília, **Diário Oficial da União**, 6 de janeiro de 2005.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **CNEN-NE-3.02**, Serviços de Radioproteção, Brasília, **Diário Oficial da União**, 1 de agosto de 1988.

CROCKER, H. R. A case of dermatitis from Röntgen rays. **British Medical Journal**, v.2, p8-9, 1897.

DALTRO, T. F. L. **Desenvolvimento de uma nova metodologia para o cálculo de dose em dosimetria fotográfica**. 126f. 1994. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

DANIELS, R. D., SCHUBAUER-BERIGAN, M. K. Bias and uncertainty of penetrating photon dose measured by film dosimeters in an epidemiological study of US nuclear workers. **Radiation Protection Dosimetry**, v.113, n.3, p.275-289, 2005.

DANTZIG, G. B. **Maximization of linear function of variables subject to linear inequalities**. In T. C. Koopmans, editor, *Activity Analysis of Production and Allocation*, p.339-347, 1951.

DIETZE, G., MENZEL, H. G. Aspects of ICRP 60 and ICRU 47 relevant to individual monitoring of external exposure. **Radiation Protection Dosimetry**, v.54, n.3/4, p.167-173, 1994.

DONGARRA, SULLIVAN, F. Guest Editor's Introduction: The Top Ten Algorithms. **Computing in Science and Engineering**, v.2, n.1, p.22-23, 2000.

DUDLEY, R. A. **Photographic detection and dosimetry of beta rays**. In: _____. [S.l.]: Nucleonics, p.24, 1954.

_____. **Dosimetry with photographic emulsions in Radiation Dosimetry**. In: ATTIX, F. H.; ROESCH, W. C., eds. *The Dosimetry of Ionizing Radiation*. New York: NY. Academic, v.2, p.325, 1966.

GROSSWENDT, B. The angular dependence and irradiation geometry factor for the dose equivalent for photons in slab phantoms of tissue-equivalent material and PMMA, **Radiation Protection Dosimetry**, v.35, n.4, p.221-235, 1991.

HUNT, J., CUNHA, P., RAMOS, E. **Dosimetria Fotográfica e o Serviço de Dosimetria Fotográfica do IRD/CNEN**. Rio de Janeiro, 1993.

IMATOUKENE, D., CHALAL, M. T., BOUDENA, B., BELLAL, A. **Comparative Study of a Multiple-element Dosimeter by Means of an Empirical Formula and a Linear Programming for a Mixed Field**. Espanha: 11th International Congress of the International Radiation Protection Association. Session 3: Dosimetry and Instrumentation. Madri, 2004.

International Atomic Energy Agency. **IAEA SAFETY REPORT SERIES N° 16**: Calibration of radiation protection monitoring instruments. Vienna, 2000.

International Commission on Radiological Protection. **ICRP REPORT 26**: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford: Pergamon, 1977.

International Commission on Radiological Protection. **ICRP REPORT 60**: Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Oxford: Pergamon, 1990.

International Commission on Radiological Protection. **ICRP REPORT 75**: General Principles for the Radiation Protection of Workers. Oxford: Pergamon, 1997.

International Commission on Radiation Units and Measurements. **ICRU REPORT 39**: Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources. USA, 1985.

International Commission on Radiation Units and Measurements. **ICRU REPORT 43**: Determination of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations. USA, 1988.

International Commission on Radiation Units and Measurements. **ICRU REPORT 47**: Measurements of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations. USA, 1992.

International Commission on Radiation Units and Measurements. **ICRU REPORT 51**: Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry. USA, 1993.

International Electrotechnical Commission. Draft International Standard, thermoluminescence dosimetry system for personal and environmental monitoring. **IEC/FDIS 61066**, Geneva, 2006.

International Organization for Standardization. X and gamma reference radiations for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy. Part 1: Characteristics of the radiations and their methods of production. **ISO 4037-1**, Geneva, 1995.

International Organization for Standardization. X and gamma reference radiations for calibrating dosimeters and doserate meters for determining their response as a function of photon energy. Part 2: Dosimetry for radiation protection over the energy ranges 8 keV to 1,3 MeV and 4 MeV to 9 MeV. **ISO 4037-2**, Geneva, 1997.

International Organization for Standardization. X and gamma reference radiations for calibrating dosimeters and doserate meters for determining their response as a function of photon energy. Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response a function of energy and angle of incidence. **ISO 4037-3**, Vienna, 1996.

LOBEL, L., DUBOIS, M. **Basic Sensitometry**. 2 ed. London and New York: Focal, 1967.

MIKAMI, S., ITIÉ, C., TEXIER, C. Consideration on calibration and correction factors of an $H_p(10)$ chamber for different radiation qualities and angles of incidence. **Radiation Protection Dosimetry**, v.123, n.1, p.122-127, 2006.

MOTA, H. C., CUNHA, P. G., SIGAUD, G. M., HUNT, J. G., SALVI, R. P. C. Um sistema multi-filtro para dosimetria fotográfica. **Revista de Física Aplicada e Instrumentação**, Brasil, v. 5, p. 64-77, 1990.

PONTE, M. A. L., CASTELLANI, C. M., CURRIVAN, L., VAN DIJK, J. W. E., FALK, R., OLKO, P., WERNLI, C. A catalogue of dosimeters and dosimetric services within Europe - an update. **Radiation Protection Dosimetry**, v.112, p.45-68, 2004.

PUCCINI, A. de LIMA. **Introdução à programação linear**. Rio de Janeiro: LTC, 252p, 1985.

WERNLI, C., SCHERRER, P. **External Dosimetry: Operacional Quantities and their Measurement**. In: 11th International Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA), Refresher Course RC-3b, Session 3 – Dosimetry and Instrumentation, Madrid, 2004.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5; e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com ^{60}Co ; ^{137}Cs e fótons de energias 45 keV; 48 keV; 57 keV; 83 keV; 104 keV; 118 keV; 137 keV; 164 keV; para emulsões mais e menos sensíveis - Tabelas de 7 a 26

Tabela 7 – Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com ^{60}Co (emulsão mais sensível)

H_p (mSv)	Média das Densidades ópticas líquidas sobre três películas:				
	Pb	Cu 0,1	Janela	Cu 0,5	Plástico
0,2	0,07	0,06	0,07	0,06	0,08
0,4	0,14	0,12	0,10	0,12	0,14
0,6	0,23	0,21	0,18	0,19	0,24
0,8	0,29	0,28	0,27	0,25	0,30
1,0	0,36	0,32	0,33	0,31	0,38
2,0	0,69	0,64	0,54	0,59	0,72
5,0	1,58	1,42	1,25	1,32	1,55
10,0	2,72	2,52	2,30	2,36	2,73
20,0	3,56	3,53	3,43	3,43	3,58
50,0	3,60	3,60	3,57	3,59	3,60
100,0	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60
200,0	3,60	3,60	3,60	3,60	3,60

Tabela 8 – Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com ^{60}Co (emulsão menos sensível)

H_p (mSv)	Média das Densidades ópticas líquidas sobre três películas:				
	Pb	Cu 0,1	Janela	Cu 0,5	Plástico
0,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,0	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00
2,0	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
5,0	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
10,0	0,05	0,04	0,03	0,04	0,04
20,0	0,10	0,08	0,07	0,08	0,08
50,0	0,21	0,18	0,18	0,18	0,19
100,0	0,29	0,25	0,24	0,24	0,25
200,0	0,84	0,73	0,67	0,72	0,75

Tabela 9 – Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com ^{137}Cs (emulsão mais sensível)

H_p (mSv)	Média das Densidades ópticas líquidas sobre três películas:				
	Pb	Cu 0,1	Janela	Cu 0,5	Plástico
0,2	0,05	0,04	0,06	0,06	0,06
0,4	0,12	0,09	0,12	0,11	0,12
0,6	0,17	0,15	0,19	0,15	0,18
0,8	0,25	0,21	0,25	0,21	0,24
1,0	0,31	0,24	0,30	0,25	0,30
2,0	0,62	0,52	0,59	0,51	0,58
5,0	1,47	1,26	1,38	1,21	1,35
10,0	2,61	2,27	2,39	2,16	2,39
20,0	3,40	3,30	3,28	3,15	3,33
50,0	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44
100,0	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44
200,0	3,44	3,44	3,44	3,44	3,44

Tabela 10– Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com ^{137}Cs (emulsão menos sensível)

H_p (mSv)	Média das Densidades ópticas líquidas sobre três películas:				
	Pb	Cu 0,1	Janela	Cu 0,5	Plástico
0,8	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
1,0	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
2,0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
5,0	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
10,0	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
20,0	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
50,0	0,21	0,20	0,20	0,18	0,20
100,0	0,40	0,40	0,40	0,36	0,39
200,0	0,83	0,81	0,83	0,73	0,80
300,0	1,20	1,12	1,16	1,05	1,13
400,0	1,61	1,54	1,55	1,45	1,54
500,0	2,14	1,95	2,00	1,86	1,97

Tabela 11 – Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 45 keV - W60 (emulsão mais sensível)

H_p (mSv)	Média das Densidades ópticas líquidas sobre três películas:				
	Pb	Cu 0,1	Janela	Cu 0,5	Plástico
0,2	0,04	0,76	1,21	0,24	1,13
0,4	0,07	1,50	2,25	0,48	2,11
0,6	0,12	2,10	2,80	0,72	2,77
0,8	0,17	2,59	3,18	0,92	3,19
1,0	0,22	2,98	3,39	1,17	3,39
2,0	0,43	3,45	3,45	2,11	3,45
5,0	1,00	3,45	3,45	3,36	3,45
10,0	1,71	3,45	3,45	3,44	3,45
20,0	2,47	3,45	3,45	3,43	3,45
50,0	3,43	3,45	3,45	3,44	3,45
100,0	3,44	3,45	3,45	3,44	3,45
200,0	3,45	3,45	3,45	3,45	3,45

Tabela 12 – Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 45 keV - W60 (emulsão menos sensível)

H_p (mSv)	Média das Densidades ópticas líquidas sobre três películas:				
	Pb	Cu 0,1	Janela	Cu 0,5	Plástico
0,2	0,00	0,02	0,03	0,01	0,02
0,4	0,00	0,03	0,05	0,01	0,05
0,6	0,00	0,05	0,07	0,01	0,07
0,8	0,01	0,06	0,10	0,02	0,09
1,0	0,01	0,08	0,12	0,03	0,11
2,0	0,01	0,15	0,25	0,05	0,22
5,0	0,02	0,37	0,61	0,11	0,55
10,0	0,04	0,51	0,81	0,20	0,86
20,0	0,06	1,02	1,61	0,38	1,72
50,0	0,16	2,71	3,68	0,98	3,84
100,0	0,33	3,94	3,94	2,01	3,94
200,0	1,01	3,94	3,94	3,90	3,94

Tabela 13 – Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 48 keV – N60 (emulsão mais sensível)

H_p (mSv)	Média das Densidades ópticas líquidas sobre três películas:				
	Pb	Cu 0,1	Janela	Cu 0,5	Plástico
0,2	0,03	0,76	1,09	0,31	1,11
0,4	0,10	1,40	1,75	0,59	1,88
0,6	0,15	1,96	2,52	0,87	2,59
0,8	0,19	2,41	2,82	1,14	2,87
1,0	0,22	2,81	2,76	1,33	3,30
2,0	0,48	3,47	3,47	2,40	3,48
5,0	1,04	3,48	3,48	3,37	3,48
10,0	1,76	3,48	3,48	3,47	3,48
20,0	2,94	3,48	3,48	3,47	3,48
50,0	3,47	3,48	3,48	3,48	3,48
100,0	3,48	3,48	3,48	3,48	3,48
200,0	3,47	3,48	3,48	3,48	3,48

Tabela 14 – Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 48 keV – N60 (emulsão menos sensível)

H_p (mSv)	Média das Densidades ópticas líquidas sobre três películas:				
	Pb	Cu 0,1	Janela	Cu 0,5	Plástico
0,2	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02
0,4	0,00	0,03	0,04	0,01	0,04
0,6	0,00	0,04	0,06	0,01	0,06
0,8	0,00	0,05	0,08	0,02	0,08
1,0	0,00	0,07	0,11	0,03	0,11
2,0	0,01	0,14	0,21	0,06	0,21
5,0	0,02	0,33	0,48	0,13	0,48
10,0	0,03	0,65	0,99	0,25	0,96
20,0	0,08	1,29	1,92	0,51	1,91
50,0	0,19	3,35	3,95	1,30	3,96
100,0	0,52	3,96	3,96	2,72	3,97
200,0	1,26	3,95	3,96	3,95	3,96

Tabela 15 – Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 57 keV – W80 (emulsão mais sensível)

H_p (mSv)	Média das Densidades ópticas líquidas sobre três películas:				
	Pb	Cu 0,1	Janela	Cu 0,5	Plástico
0,2	0,05	0,72	0,92	0,38	0,96
0,4	0,10	1,23	1,54	0,69	1,61
0,6	0,15	1,73	2,16	1,01	2,27
0,8	0,19	2,13	2,64	1,30	2,75
1,0	0,27	2,66	3,12	1,61	3,17
2,0	0,52	3,45	3,47	2,72	3,47
5,0	1,31	3,47	3,47	3,46	3,47
10,0	2,05	3,47	3,47	3,47	3,47
20,0	3,28	3,47	3,47	3,47	3,47
50,0	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47
100,0	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47
200,0	3,46	3,47	3,47	3,46	3,47

Tabela 16 – Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 57 keV – W80 (emulsão menos sensível)

H_p (mSv)	Média das Densidades ópticas líquidas sobre três películas:				
	Pb	Cu 0,1	Janela	Cu 0,5	Plástico
0,2	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02
0,4	0,00	0,03	0,04	0,01	0,04
0,6	0,00	0,04	0,06	0,02	0,06
0,8	0,00	0,05	0,07	0,03	0,07
1,0	0,01	0,07	0,09	0,04	0,09
2,0	0,01	0,12	0,16	0,07	0,16
5,0	0,02	0,30	0,40	0,15	0,40
10,0	0,04	0,59	0,80	0,30	0,80
20,0	0,09	1,18	1,56	0,57	1,58
50,0	0,20	2,83	3,52	1,49	3,67
100,0	0,42	3,95	3,95	3,17	3,94
200,0	0,96	3,94	3,94	3,94	3,94

Tabela 17 – Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 83 keV – N100 (emulsão mais sensível)

H_p (mSv)	Média das Densidades ópticas líquidas sobre três películas:				
	Pb	Cu 0,1	Janela	Cu 0,5	Plástico
0,2	0,09	0,46	0,53	0,37	0,53
0,4	0,14	0,84	0,97	0,68	0,98
0,6	0,22	1,25	1,39	0,97	1,42
0,8	0,27	1,59	1,77	1,29	1,79
1,0	0,33	1,91	2,15	1,55	2,17
2,0	0,70	3,07	3,14	2,65	3,25
5,0	1,49	3,46	3,46	3,39	3,46
10,0	2,39	3,46	3,46	3,45	3,46
20,0	3,45	3,46	3,46	3,46	3,46
50,0	3,46	3,46	3,45	3,46	3,46
100,0	3,45	3,46	3,46	3,45	3,46
200,0	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47

Tabela 18 – Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 83 keV – N100 (emulsão menos sensível)

H_p (mSv)	Média das Densidades ópticas líquidas sobre três películas:				
	Pb	Cu 0,1	Janela	Cu 0,5	Plástico
0,2	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01
0,4	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02
0,6	0,00	0,02	0,03	0,02	0,03
0,8	0,00	0,03	0,03	0,02	0,03
1,0	0,00	0,03	0,05	0,03	0,04
2,0	0,01	0,07	0,08	0,05	0,08
5,0	0,02	0,18	0,21	0,13	0,21
10,0	0,04	0,34	0,40	0,25	0,40
20,0	0,11	0,81	0,97	0,55	0,91
50,0	0,11	0,32	0,41	0,48	0,48
100,0	0,52	3,63	3,84	2,76	3,89
200,0	1,02	3,96	3,96	3,95	3,96

Tabela 19 – Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 104 keV – W150 (emulsão mais sensível)

H_p (mSv)	Média das Densidades ópticas líquidas sobre três películas:				
	Pb	Cu 0,1	Janela	Cu 0,5	Plástico
0,2	0,04	0,35	0,40	0,28	0,40
0,4	0,12	0,66	0,78	0,55	0,77
0,6	0,15	0,97	1,08	0,79	1,10
0,8	0,19	1,23	1,36	1,00	1,40
1,0	0,25	1,48	1,62	1,22	1,68
2,0	0,52	2,61	2,77	2,21	2,83
5,0	1,32	3,42	3,42	3,37	3,42
10,0	2,46	3,43	3,43	3,43	3,43
20,0	3,32	3,43	3,43	3,43	3,43
50,0	3,43	3,43	3,43	3,43	3,43
100,0	3,43	3,43	3,43	3,43	3,43
200,0	3,43	3,43	3,43	3,43	3,43

Tabela 20 – Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 104 keV – W150 (emulsão menos sensível)

H_p (mSv)	Média das Densidades ópticas líquidas sobre três películas:				
	Pb	Cu 0,1	Janela	Cu 0,5	Plástico
0,2	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
0,4	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02
0,6	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02
0,8	0,00	0,02	0,03	0,02	0,03
1,0	0,00	0,03	0,03	0,02	0,03
2,0	0,01	0,05	0,06	0,04	0,06
5,0	0,02	0,12	0,14	0,10	0,14
10,0	0,04	0,24	0,28	0,19	0,27
20,0	0,08	0,46	0,52	0,35	0,52
50,0	0,18	1,17	1,33	0,87	1,34
100,0	0,37	2,29	2,64	1,79	2,70
200,0	0,76	3,95	3,95	3,64	3,95

Tabela 21 – Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 118 keV – N150 (emulsão mais sensível)

H_p (mSv)	Média das Densidades ópticas líquidas sobre três películas:				
	Pb	Cu 0,1	Janela	Cu 0,5	Plástico
0,2	0,07	0,25	0,28	0,24	0,29
0,4	0,13	0,50	0,55	0,43	0,55
0,6	0,16	0,69	0,74	0,59	0,76
0,8	0,22	0,91	1,00	0,79	1,01
1,0	0,28	1,11	1,22	0,99	1,22
2,0	0,54	2,01	2,14	1,79	2,18
5,0	1,23	3,39	3,41	3,25	3,45
10,0	2,15	3,49	3,49	3,48	3,49
20,0	3,40	3,49	3,49	3,49	3,49
50,0	3,35	3,49	3,49	3,49	3,49
100,0	3,49	3,49	3,49	3,49	3,49
200,0	3,49	3,49	3,49	3,49	3,49

Tabela 22 – Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 118 keV – N150 (emulsão menos sensível)

H_p (mSv)	Média das Densidades ópticas líquidas sobre três películas:				
	Pb	Cu 0,1	Janela	Cu 0,5	Plástico
0,2	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
0,4	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
0,6	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01
0,8	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02
1,0	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02
2,0	0,01	0,03	0,04	0,03	0,04
5,0	0,02	0,08	0,09	0,07	0,09
10,0	0,04	0,16	0,18	0,13	0,18
20,0	0,08	0,36	0,42	0,29	0,39
50,0	0,08	0,18	0,23	0,25	0,25
100,0	0,36	1,60	1,83	1,40	1,82
200,0	0,79	3,74	3,92	3,15	3,91

Tabela 23 – Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 137 keV – W200 (emulsão mais sensível)

H_p (mSv)	Média das Densidades ópticas líquidas sobre três películas:				
	Pb	Cu 0,1	Janela	Cu 0,5	Plástico
0,2	0,07	0,22	0,26	0,21	0,27
0,4	0,14	0,39	0,44	0,36	0,44
0,6	0,17	0,54	0,60	0,50	0,60
0,8	0,23	0,70	0,79	0,65	0,79
1,0	0,29	0,90	0,99	0,80	1,00
2,0	0,54	1,62	1,73	1,44	1,78
5,0	1,25	3,17	3,27	2,96	3,31
10,0	2,31	3,52	3,52	3,50	3,52
20,0	3,38	3,52	3,52	3,51	3,52
50,0	3,51	3,52	3,52	3,52	3,52
100,0	3,51	3,52	3,52	3,51	3,51
200,0	3,51	3,52	3,52	3,51	3,51

Tabela 24 – Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 137 keV – W200 (emulsão menos sensível)

H_p (mSv)	Média das Densidades ópticas líquidas sobre três películas:				
	Pb	Cu 0,1	Janela	Cu 0,5	Plástico
0,2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,4	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
0,6	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
0,8	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
1,0	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02
2,0	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03
5,0	0,02	0,07	0,08	0,06	0,08
10,0	0,04	0,13	0,15	0,11	0,15
20,0	0,07	0,25	0,28	0,21	0,28
50,0	0,16	0,60	0,66	0,48	0,65
100,0	0,33	1,15	1,34	0,97	1,32
200,0	0,76	2,89	3,23	2,25	3,12

Tabela 25 – Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 164 keV – N200 (emulsão mais sensível)

H_p (mSv)	Média das Densidades ópticas líquidas sobre três películas:				
	Pb	Cu 0,1	Janela	Cu 0,5	Plástico
0,2	0,07	0,15	0,17	0,13	0,17
0,4	0,11	0,26	0,31	0,25	0,30
0,6	0,15	0,38	0,44	0,32	0,44
0,8	0,20	0,51	0,57	0,44	0,57
1,0	0,25	0,61	0,69	0,53	0,70
2,0	0,51	1,24	1,36	1,06	1,36
5,0	1,26	2,64	2,75	2,45	2,79
10,0	2,17	3,41	3,31	3,27	3,44
20,0	2,82	3,43	3,41	3,36	3,44
50,0	3,37	3,46	3,46	3,46	3,46
100,0	3,46	3,46	3,46	3,46	3,46
200,0	3,46	3,46	3,46	3,46	3,46

Tabela 26 – Densidades ópticas líquidas sob os filtros: Pb; Cu 0,1; Ja; Cu 0,5 e Pl em função do equivalente de dose pessoal H_p para os filmes irradiados com fótons de energia 164 keV – N200 (emulsão menos sensível)

H_p (mSv)	Média das Densidades ópticas líquidas sobre três películas:				
	Pb	Cu 0,1	Janela	Cu 0,5	Plástico
0,2	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
0,4	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
0,6	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01
0,8	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
1,0	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
2,0	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
5,0	0,02	0,05	0,06	0,05	0,06
10,0	0,04	0,10	0,12	0,09	0,12
20,0	0,08	0,22	0,26	0,18	0,24
50,0	0,10	0,20	0,26	0,23	0,28
100,0	0,40	0,99	1,12	0,82	1,10
200,0	0,59	1,63	1,83	1,33	1,81

APÊNDICE B – Densidades ópticas de referência sob os filtros: Pl; Cu 0,1; Pb; Cu 0,5 e Ja em função do equivalente de dose pessoal H_p ajustado, para os filmes irradiados com ^{60}Co e fótons de energia 104 keV

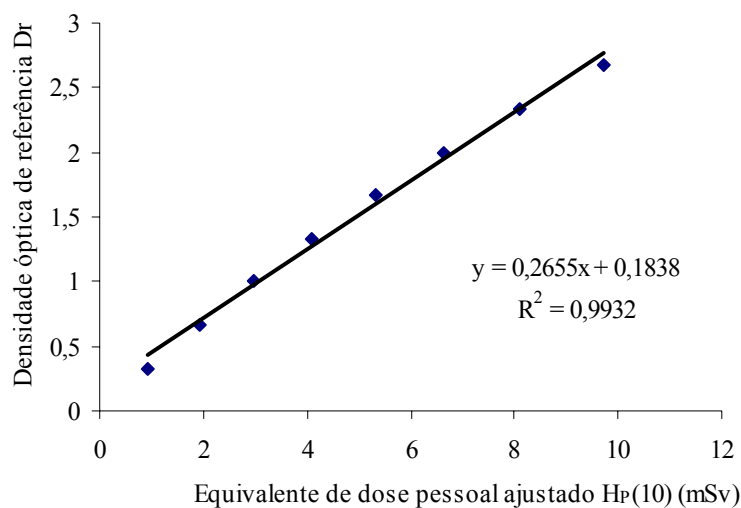


Figura 39 – Densidades ópticas de referência sob filtro de plástico em função do equivalente de dose pessoal H_p ajustado – na energia do ^{60}Co

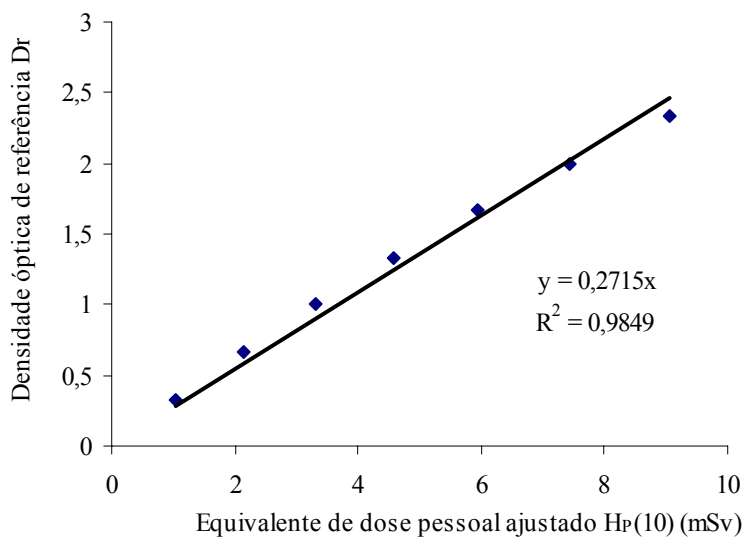


Figura 40 – Densidades ópticas de referência sob filtro de cobre 0,1 mm em função do equivalente de dose pessoal H_p ajustado – na energia do ^{60}Co

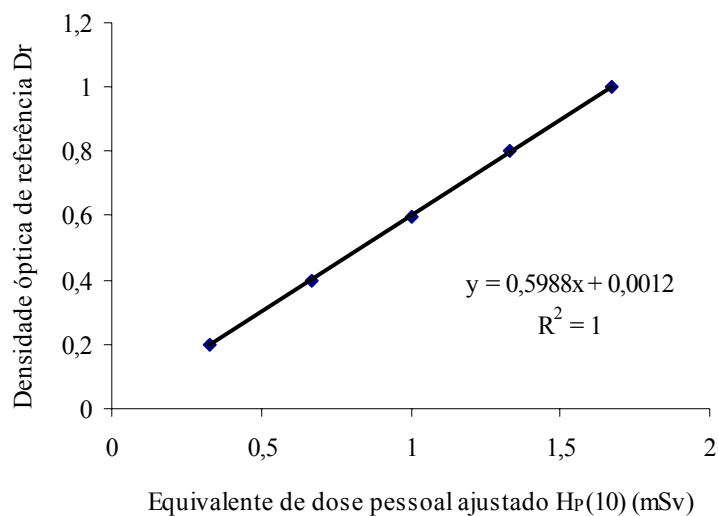


Figura 41 – Densidades ópticas de referência sob filtro de chumbo em função do equivalente de dose pessoal H_p ajustado – na energia do ^{60}Co

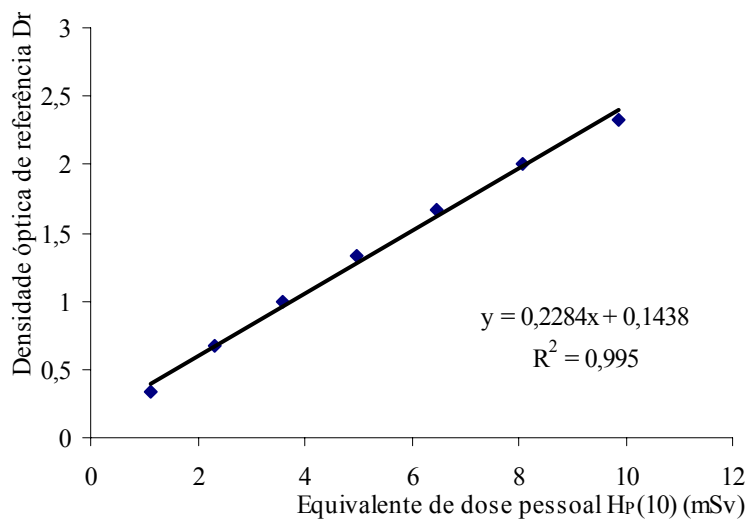


Figura 42 – Densidades ópticas de referência sob filtro de cobre 0,5 mm em função do equivalente de dose pessoal H_p ajustado – na energia do ^{60}Co

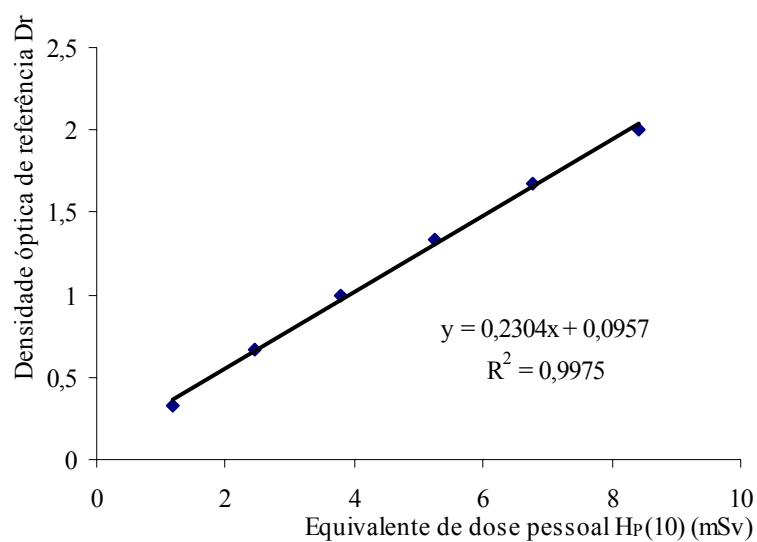


Figura 43 – Densidades ópticas de referência sob a janela em função do equivalente de dose pessoal H_p ajustado – na energia do ^{60}Co

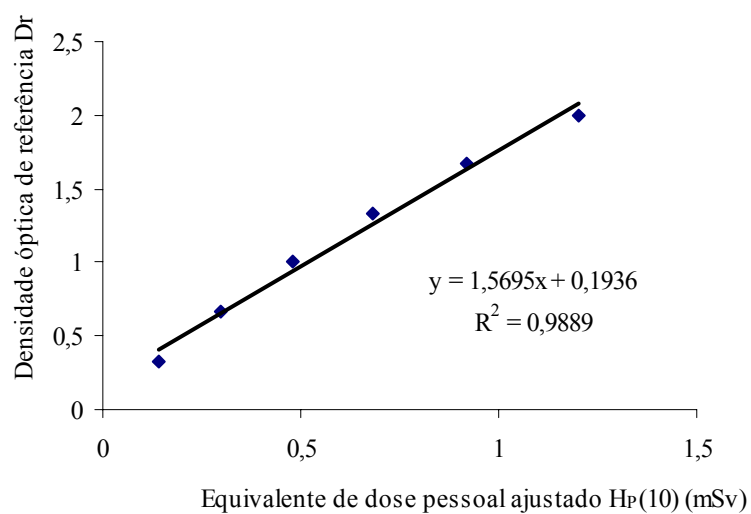


Figura 44 – Densidades ópticas de referência sob filtro de plástico em função do equivalente de dose pessoal H_p ajustado – fótons de energia 104 keV

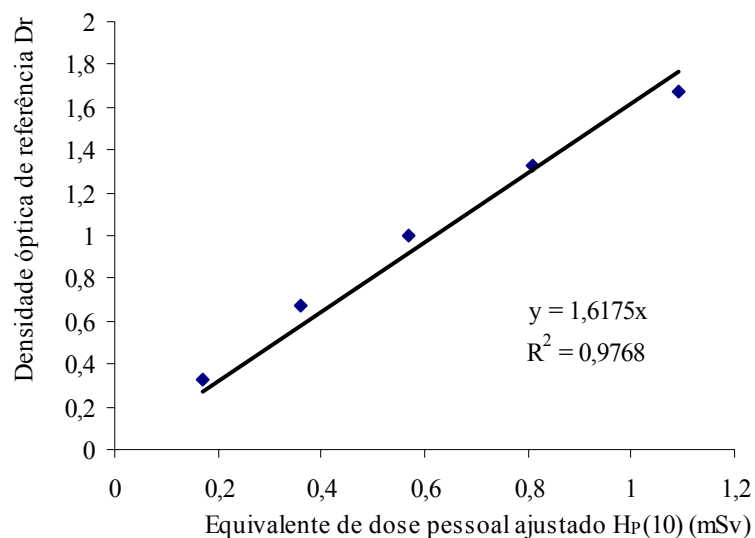


Figura 45 – Densidades ópticas de referência sob filtro de cobre 0,1 mm em função do equivalente de dose pessoal H_p ajustado – fótons de energia 104 keV

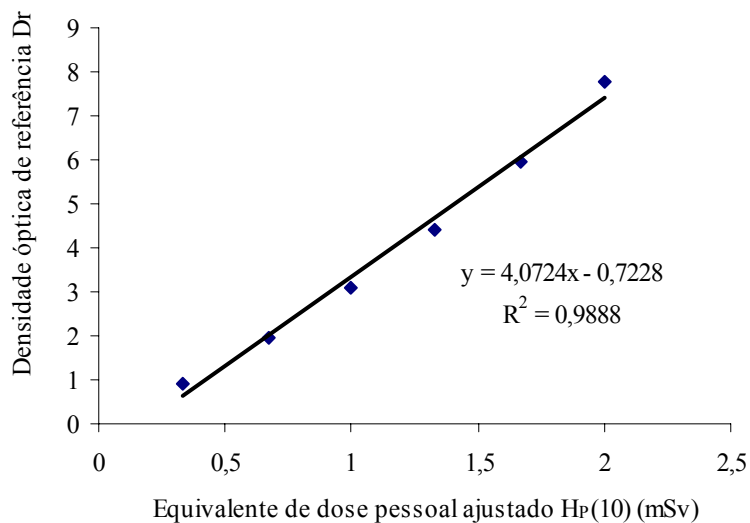


Figura 46 – Densidades ópticas de referência sob filtro de chumbo em função do equivalente de dose pessoal H_p ajustado – fótons de energia 104 keV

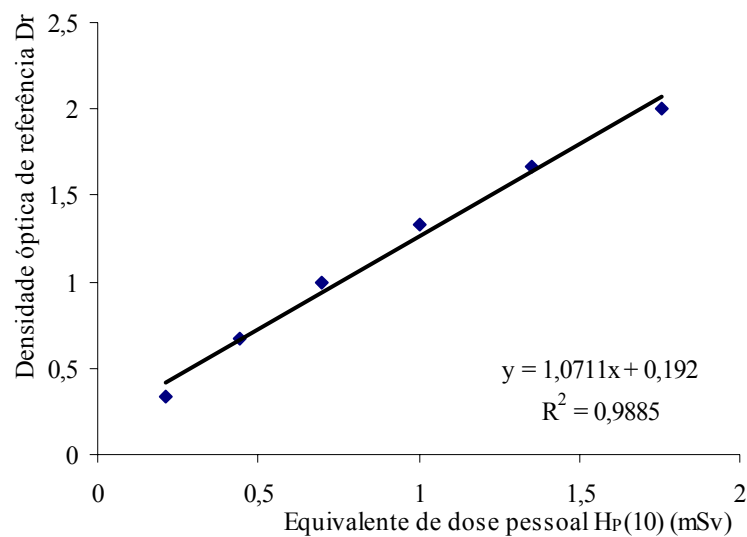


Figura 47 – Densidades ópticas de referência sob filtro de cobre 0,5 mm em função do equivalente de dose pessoal H_p ajustado – fótons de energia 104 keV

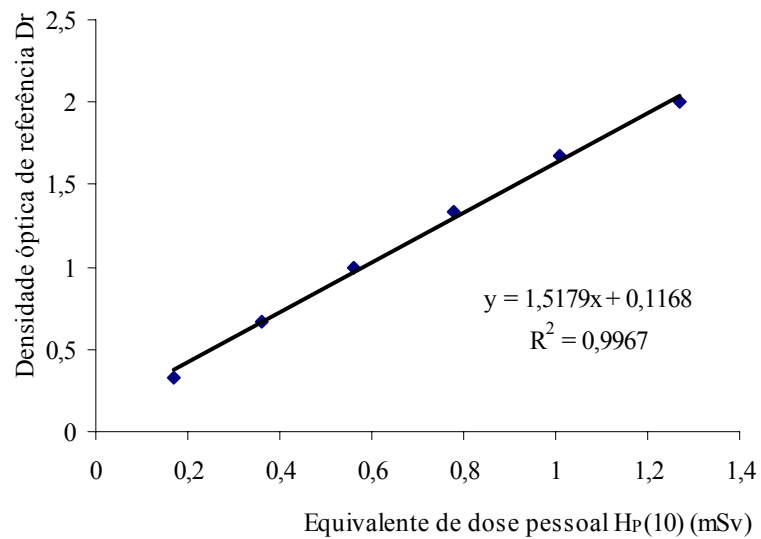


Figura 48 – Densidades ópticas de referência sob a janela em função do equivalente de dose pessoal H_p ajustado – fótons de energia 104 keV

APÊNDICE C – Comparação entre H_{Pa} e o H_{Pr} – Avaliação (emulsões mais e menos sensíveis) - Tabelas de 35 e 36

Tabela 35 – Comparação entre o H_{Pa} e o H_{Pr} - Avaliação (emulsão mais sensível)

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	K (coef.angular)		
0,05	-0,11	0,07	0,85	0,05	2,93		
D _{ij} (densidade óptica líquida) para 1250 keV							
PLÁSTICO	COBRE-0,1	COBRE- 0,5	CHUMBO	JANELA	H _{pa}	H _{pr}	Erro (%)
0,24	0,21	0,19	0,23	0,18	0,61	0,6	1,6%
0,30	0,28	0,25	0,29	0,27	0,78	0,8	2,5%
0,72	0,64	0,59	0,69	0,54	1,82	2	9,0%
D _{ij} (densidade óptica líquida) para 662keV							
PLÁSTICO	COBRE-0,1	COBRE- 0,5	CHUMBO	JANELA	H _{pa}	H _{pr}	Erro (%)
0,12	0,09	0,11	0,12	0,12	0,33	0,4	17,5%
0,24	0,21	0,21	0,25	0,25	0,67	0,8	16,3%
0,58	0,52	0,51	0,62	0,59	1,65	2	17,5%
D _{ij} (densidade óptica líquida) para 137keV							
PLÁSTICO	COBRE-0,1	COBRE- 0,5	CHUMBO	JANELA	H _{pa}	H _{pr}	Erro (%)
0,44	0,39	0,36	0,14	0,44	0,43	0,4	7,5%
0,60	0,54	0,50	0,17	0,60	0,53	0,6	11,6%
1,00	0,90	0,80	0,29	0,99	0,89	1	11,0%
D _{ij} (densidade óptica líquida) para 118keV							
PLÁSTICO	COBRE-0,1	COBRE- 0,5	CHUMBO	JANELA	H _{pa}	H _{pr}	Erro (%)
0,55	0,50	0,43	0,13	0,55	0,41	0,4	2,5%
1,01	0,91	0,79	0,22	1,00	0,71	0,8	11,3%
1,22	1,11	0,99	0,28	1,22	0,90	1	10,0%
D _{ij} (densidade óptica líquida) para 104keV							
PLÁSTICO	COBRE-0,1	COBRE- 0,5	CHUMBO	JANELA	H _{pa}	H _{pr}	Erro (%)
0,77	0,66	0,55	0,12	0,78	0,43	0,4	7,5%
1,10	0,97	0,79	0,15	1,08	0,54	0,6	10,0%
1,68	1,48	1,22	0,25	1,62	0,88	1	12,0%
2,83	2,61	2,21	0,52	2,77	1,73	2	-
D _{ij} (densidade óptica líquida) para 57keV							
PLÁSTICO	COBRE-0,1	COBRE- 0,5	CHUMBO	JANELA	H _{pa}	H _{pr}	Erro (%)
2,27	1,73	1,01	0,15	2,16	0,67	0,6	11,7%
2,75	2,13	1,30	0,19	2,64	0,84	0,8	5,0%
3,17	2,66	1,61	0,27	3,12	1,07	1	-
D _{ij} (densidade óptica líquida) para 48keV							
PLÁSTICO	COBRE-0,1	COBRE- 0,5	CHUMBO	JANELA	H _{pa}	H _{pr}	Erro (%)
1,88	1,40	0,59	0,10	1,75	0,45	0,4	12,5%
2,87	2,41	1,14	0,19	2,82	0,76	0,8	5,0%
3,48	3,47	2,40	0,48	3,47	1,59	2	-
D _{ij} (densidade óptica líquida) para 45keV							
PLÁSTICO	COBRE-0,1	COBRE- 0,5	CHUMBO	JANELA	H _{pa}	H _{pr}	Erro (%)
2,77	2,10	0,72	0,12	2,80	0,59	0,6	1,6%
3,19	2,59	0,92	0,17	3,18	0,71	0,8	-
3,39	2,98	1,17	0,22	3,39	0,82	1	-

Tabela 36 – Comparação entre o H_{pa} e o H_{pr} - Avaliação (emulsão menos sensível)

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	K (coef.angular)		
0,05	-0,11	0,07	0,85	0,05	239,65		
D _{ij} (densidade óptica líquida) para 1250keV							
PLÁSTICO	COBRE-0,1	COBRE- 0,5	CHUMBO	JANELA	H _{pa}	H _{pr}	Erro (%)
0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	2,1	2,0	5,0%
0,04	0,04	0,04	0,05	0,03	10,6	10,0	6,0%
0,08	0,08	0,08	0,10	0,07	21,4	20,0	7,0%
D _{ij} (densidade óptica líquida) para 164keV							
PLÁSTICO	COBRE-0,1	COBRE- 0,5	CHUMBO	JANELA	H _{pa}	H _{pr}	Erro (%)
0,06	0,05	0,05	0,02	0,06	5,0	5,0	0,0%
0,12	0,10	0,09	0,04	0,12	9,9	10,0	1,0%
0,24	0,22	0,18	0,08	0,26	19,5	20,0	2,5%
1,10	0,99	0,82	0,40	1,12	95,7	100,0	4,3%
D _{ij} (densidade óptica líquida) para 137keV							
PLÁSTICO	COBRE-0,1	COBRE- 0,5	CHUMBO	JANELA	H _{pa}	H _{pr}	Erro (%)
0,08	0,07	0,06	0,02	0,08	5,2	5,0	4,0%
0,15	0,13	0,11	0,04	0,15	10,2	10,0	2,0%
0,28	0,25	0,21	0,07	0,28	17,9	20,0	10,5%
3,12	2,89	2,25	0,76	3,23	192,5	200,0	3,8%
D _{ij} (densidade óptica líquida) para 118keV							
PLÁSTICO	COBRE-0,1	COBRE- 0,5	CHUMBO	JANELA	H _{pa}	H _{pr}	Erro (%)
0,09	0,08	0,07	0,02	0,09	5,3	5,0	6,0%
0,18	0,16	0,13	0,04	0,18	10,4	10,0	4,0%
1,82	1,60	1,40	0,36	1,83	98,4	100,0	1,6%
3,91	3,74	3,15	0,79	3,92	209,0	200,0	4,5%
D _{ij} (densidade óptica líquida) para 104keV							
PLÁSTICO	COBRE-0,1	COBRE- 0,5	CHUMBO	JANELA	H _{pa}	H _{pr}	Erro (%)
0,52	0,46	0,35	0,08	0,52	22,5	20,0	12,5%
1,34	1,17	0,87	0,18	1,33	52,4	50,0	5,0%
2,70	2,29	1,79	0,37	2,64	109,0	100,0	9,0%
3,95	3,95	3,64	0,76	3,95	206,4	200,0	3,2%

ANEXOS

ANEXO A – Algoritmo KCALC_UFPE de 18/01/2007

```

'          **** KCALC_UFPE ****
'          18/01/2007
' Definições
' -----
OPTION BASE 1
DEFINT I,J,K,L,M,N
DEFDBL A,D,F,Q,S,V,X,Y
NPTS=25 : NPARAM=4 : N2PARAM=2*NPARAM-1
DIM X(NPTS), Y(NPTS), SX(NPTS), SY(NPTS), XADJ(NPTS), YADJ(NPTS), YSAV(NPTS)
DIM KIPIT(NPTS), A(NPARAM), AA(NPARAM), AINC(NPARAM), G(NPARAM), Q(NPARAM,NPARAM+1)
DIM Q1(NPARAM,NPARAM+1), VARS(5), SUMX(N2PARAM1), SUMY(N2PARAM1)
DIM DAPARA(NPTS), Y48(NPTS), Y1250(NPTS)
CONV=.0001 : FRAC=.001 : FILE$="" : TERMX$="@ " : INITIME=0 : ESC$=CHR$(27)
FF$=CHR$(12) : NSYS = 1 : LP=0 : PLT=1 : IDGRID=0

'Parte gráfica
' -----
VX1=53 : VY1=1 : VX2=630 : VY2=360 : COLDIV=8

' Informação
' -----
CLS
LOCATE 5,10: PRINT " Este programa calcula os coeficientes angulares"
LOCATE 6,10: PRINT " de dose aparente usando o calculo descrito no procedimento"
LOCATE 7,10: PRINT " UFPE. "
LOCATE 9,10: PRINT " A curva de energia padrão e 1250 keV cobalto 60,
LOCATE 10,10:PRINT " no filtro de chumbo."
LOCATE 17,18:PRINT " DIGITE QUALQUER COISA PARA CONTINUAR"
DO
  keyStr$=INKEY$
LOOP UNTIL keyStr$<>""

' Entrar a data e informação
' -----
cls
5 LOCATE 10,10:INPUT"Entrar a data de hoje --/--/--";day$
  LOCATE 12,10:INPUT"Entrar a informação : ";info$
  IF day$ = "" THEN 5

'Estabelecer a sensibilidade do filme
' -----
sens$ = "+"

GOSUB 15240 'Primeira pagina
' -----
30 energia$ = "1250" : filtro = 5 : curva$ = ""
CLS
LOCATE 5,15:PRINT "CURVA DE 1250 keV - FILTRO DE CHUMBO"
LOCATE 10,10:PRINT "Digite 1. para entrar valores de densidade óptica líquida"
LOCATE 11,10:PRINT "Digite 2. para entrar valores de A1 e A2 diretamente
DO

```

```

choice$=INKEY$
LOOP UNTIL choice$="1" OR choice$="2"
IF choice$= "1" then 31
IF choice$= "2" then 32
31 GOSUB 100 ' entrada de dados
   ROUND = 1 : NFUNC = 10 : M = 2
   FOR I = 1 TO NP
   SX(I)=1:SY(I)=1:KIPIT(I)=1
   NEXT
GOSUB 1740 ' ajuste
GOSUB 7620 'Interpolate
GOSUB 4670 ' gráfico
GOSUB 17000 ' Dose aparente
   NDAP1250 = NDAP
   LPRINT "NDAP1250 = "NDAP1250
GOTO 40
'-----
32 CLS
   LOCATE 2,10 : PRINT " Entrar valores da curva de 1250 keV"
   A(1) = 6.48822 : A(2) = 5.55272E-002 : DOLMAX = 5 ' calibração data ???????
   GOTO 33
   LOCATE 10,10:INPUT"A1250(1) = "; A(1)
   LOCATE 12,10:INPUT"A1250(2) = "; A(2)
33 FOR I = 1 TO 4 :GOSUB 15460 :NEXT
   GOSUB 15680
   LPRINT "ENERGIA = 1250 keV"
   LPRINT:LPRINT
   GOSUB 15680
   LPRINT "FILTRO DE CHUMBO"
   FOR I = 1 TO 2 :GOSUB 15460 :NEXT
   LPRINT "A1250(1) = "A(1),"A1250(2) = "A(2)
   lprint
   GOSUB 17000
   NDAP1250 = NDAP
   LPRINT "NDAP1250="NDAP1250

'Calcular curva demais energias
'-----
40 energia$ = "" : curva$ = "*"
   GOSUB 100 ' entrada de dados
   ROUND = 1 : NFUNC = 10 : M = 2
   GOSUB 1740 ' ajuste
   GOSUB 7620 'Interpolate
   GOSUB 4670 ' gráfico
   GOSUB 17000 ' Dose aparente

'-----
45 NDAP2 = NDAP
   IF NDAP2 > NDAP1250 THEN NDAP2 = NDAP1250
   LPRINT
   LPRINT"LISTAGEM DOS VALORES DE AJUSTE LINEAR (DOL, D AP. e Exposição)"
   LPRINT "=====
   LPRINT :LPRINT
   LPRINT" DOL           Exposição       Dose apar.(mSv)"
   LPRINT" -----          -----          -----"
   LPRINT

```

```

FOR I= 1 TO NDAP2
Y(I) = Y1250(I) : dol = I/3
LPRINT TAB(2)USING "#.##";DOL;: LPRINT TAB(25)using"#####.##";x(I);
lprint TAB(50) using "#####.##";y(I)
  SX(I) = 1 : SY(I) = 1 : KIPIT(I) = 1
NEXT
50  N = NDAP2
  ROUND = 2 : NFUNC = 1 : M = 1
GOSUB 1740 ' ajuste
GOSUB 7620 'Interpolate
GOSUB 4670 ' gráfico
GOTO 40

'Data Entry & Disk Routines
'-----
100 CLS: N=1 : KIP=1 :mudar = 0
  IF ENERGIA$ = "1250" AND FILTRO = 5 THEN 131
120 LOCATE 10,20:INPUT"Entrar a energia da radiação";energia$
  CLS
  LOCATE 6,10:PRINT "Especificar o filtro"
  LOCATE 8,10:PRINT "1. Janela "
  LOCATE 9,10:PRINT "2. Filtro de plástico"
  LOCATE 10,10:PRINT "3. Filtro de cobre 0,1"
  LOCATE 11,10:PRINT "4. Filtro de cobre 0,5"
  LOCATE 12,10:PRINT "5. Filtro de Pb"
130 LOCATE 15,10:INPUT "Qual filtro ";filtro
131 IF filtro=1 THEN filtro$="Janela "
  IF filtro=2 THEN filtro$="Plástico"
  IF filtro=3 THEN filtro$="Cobre 0,1 "
  IF filtro=4 THEN filtro$="Cobre 0,5 "
  IF filtro=5 THEN filtro$="Chumbo "
  IF filtro <1 OR filtro >5 THEN 130
132 CLS
  LOCATE 1,1: PRINT"Entrar valores da energia "energia$" keV para o filtro de "filtro$
  LOCATE 3,4:PRINT "Numero   Exposição           Densidade óptica liquida"
  LOCATE 23,1:PRINT "Digite exposição = '*' para começar de novo"
140 LOCATE 5+N,5:PRINT N"."
  LOCATE 5+N,20:INPUT;Expo$
  IF Expo$ = "" THEN 150
  IF EXPOS$ = "*" THEN 100
141 LOCATE 5+N,55:INPUT;Dens
  IF Dens > 5 THEN 141
  X(N)= VAL(Expo$) : Y(N)=Dens
  SX(N)=1 : SY(N)=1
  KIPIT(N)=1
  N=N+1: goto 140
150 LOCATE 22,53:PRINT"
  LOCATE 22,1:INPUT"
  CONFIRMA (S/N) ";confirm$
  IF confirm$= "s" OR confirm$="S" THEN 180
  IF confirm$= "n" OR confirm$="N" THEN 160
  GOTO 150
160 mudar=1
  LOCATE 22,1:INPUT "
  Qual numero esta errado ";NP
161 LOCATE 5+NP,20:INPUT;Expo$
  IF Expo$ = "" THEN 161
  IF EXPOS$ = "*" THEN 150

```

```

162 LOCATE 5+NP,55:INPUT,,Dens
  IF Dens > 5 THEN 162
  X(NP)= VAL(Expo$) : Y(NP)=Dens
  SX(NP)=1 : SY(NP)=1
  KIPIT(NP)=1
  GOTO 150
180 GOSUB 15780
  FOR I = 1 TO 4 :GOSUB 15460 :NEXT
  GOSUB 15680
  LPRINT "ENERGIA = "energia$ " keV"
  LPRINT:LPRINT
  GOSUB 15680
  LPRINT "FILTRO DE "filtro$
  LPRINT : LPRINT
  LPRINT"LISTAGEM DOS VALORES DE ENTRADA (Exposição e densidade óptica líquida)"
  LPRINT "=====
  LPRINT :LPRINT
  LPRINT"Numero          Exposição      Densidade óptica líquida"
  LPRINT"-----          -----          -----"
  LPRINT
  FOR I= 1 TO N - 1
  LPRINT TAB(2);USING "##";I; TAB(25)USING "#####.##";X(I);
  LPRINT TAB(50) USING "#.##";Y(I)
  DOLMAX = Y(I)
  NEXT
  N = N - 1
  NP = N
return

' Ajustar os pontos/ estabelecer a função
'-----
200 IF ROUND = 1 THEN 210
  M = 1
  FUNC = YY-AA(1)*XX
  RETURN
210 M = 2
  FUNC=YY-AA(1)*(1-EXP(-AA(2)*XX))
  RETURN

' Ajustar a curva
'-----
1740 CLS :ITER = 0
  FOR I = 1 TO 4 :GOSUB 15460 :NEXT
  LPRINT "AJUSTANDO A CURVA:"
  LPRINT "=====":LPRINT
  IF ROUND = 2 THEN 1741
  LPRINT "Densidade óptica liq. = AA(1)( 1 - exp ( -AA(2)* exposição))
  GOTO 1745
1741 LPRINT "Dose aparente (mSv) = k * exposição
  FOR I = 1 TO 2 :GOSUB 15460 :NEXT
1745 GOSUB 3860
1750 ITER=ITER+1
  LOCATE 10,10 : PRINT "ITERACAO"
  LOCATE 12,10 : PRINT ITER
1840 FOR K2=1 TO M+1
1850 FOR K1=1 TO M

```

```

1860 Q(K1,K2)=0
1870 FOR I=1 TO N
1880 IF KIPIT(I)<>1 THEN 2070
1890 JA=K1
1900 ITYP=2 : GOSUB 3620
1910 DFDA1=DFDV
1920 XX=X(I) : YY=Y(I)
1930 FOR J=1 TO M
1940 AA(J)=A(J)
1950 NEXT J
1960 GOSUB 200 : F0=FUNC
1970 ITYP=1
1980 GOSUB 3620
1990 DFDX=DFDV
2000 AL2=SY(I)^2+(DFDX*SX(I))^2
2010 IF K2<M+1 THEN 2040
2020 Q(K1,M+1)=Q(K1,M+1)+F0*DFDA1/AL2
2030 GOTO 2070
2040 ITYP=2 : JA=K2 : GOSUB 3620
2050 DFDA2=DFDV
2060 Q(K1,K2)=Q(K1,K2)+DFDA1*DFDA2/AL2
2070 NEXT I
2080 IF K2<=M THEN Q(K2,K1)=Q(K1,K2)
2090 IF K2<=M THEN Q1(K2,K1)=Q(K2,K1)
2100 Q1(K1,K2)=Q(K1,K2)
2110 NEXT K1
2120 NEXT K2
2130 REM
2140 GOSUB 12240
2150 FOR J=1 TO M
2160 AINC(J)=G(J)
2170 A(J)=A(J)-AINC(J)
2180 NEXT J
2190 FOR J=1 TO M
2200 IF ABS(A(J)+AINC(J)) < 1E-12 THEN 2220
2210 IF ABS(AINC(J)/(A(J)+AINC(J))) > CONV THEN 1750
2220 NEXT J
2230 locate 14,10:PRINT "<<< Convergência ! >>>"
2250 S=0
2260 FOR J=1 TO M
2270 AA(J)=A(J)
2280 NEXT J
2290 FOR I=1 TO N
2300 ITYP=1 : GOSUB 3620 : DFDX=DFDV
2310 AL2=DFDX*DFDX*SX(I)*SX(I)+SY(I)*SY(I)
2320 XX=X(I) : YY=Y(I) : GOSUB 200 : FTEMP=FUNC
2330 ITYP=2
2340 B9=FTEMP
2350 FOR JA=1 TO M
2360 GOSUB 3620
2370 B9=B9-DFDV*AINC(JA)
2380 NEXT JA
2390 B9=B9/AL2
2400 RX=B9*DFDX*SX(I)*SX(I)
2410 RY=B9*SY(I)*SY(I)
2420 XADJ(I)=X(I)-RX : YADJ(I)=Y(I)-RY

```

[illegible]

```

LPRINT : LPRINT "Existe uma probabilidade de 5% que S > ";
LPRINT USING "###.###^";C2
IF S<=C2 THEN 3190
locate 16,10:PRINT "S e grande:"
locate 18,10:PRINT " Os erros foram subestimados?"
locate 19,10:PRINT " Existe(m) ponto(s) localizado(s) bem fora da curva?"
RETURN : 'GOTO 3220 *****
3190 IF S>C2*(NP-M)/100 THEN 3210
    LPRINT "S e pequeno, os erros nos dados foram superestimados?"
3210 RETURN
3220 GOSUB 13760
3250 T1=T : IF MSIG=3 THEN T1=3.92
3260 IF MSIG=1 THEN T1=1
3330 ITYP=2
3340 SUMPC=0 : SUMAPC=0 : SUMD=0 : SUMD2=0 : SUMAD=0
3350 FOR I=1 TO N
3360 IF MSIG=2 THEN T1=1.96
3370 XX=X(I) : YY=Y(I)
3380 GOSUB 14340
3400 'YN$=" " : IF KIPIT(I)<>1 THEN YN$="*"
3410 LPRINT USING "###";I; : LPRINT SPC(2);
    LPRINT USING "###.###^";XADJ(I); : LPRINT SPC(3);
    LPRINT USING "-.###.###^";X(I)-XADJ(I);
    LPRINT SPC(3); : LPRINT USING "###.###^";YADJ(I); : LPRINT SPC(3);
    LPRINT USING "-.###.###^";Y(I)-YADJ(I); : LPRINT SPC(2);
    LPRINT USING "###.###^";ERRW
3450 DIFF=Y(I)-YADJ(I)
3460 IF Y(I)<>0 THEN DIFFPC=DIFF/Y(I)
3470 IF Y(I)=0 THEN DIFFPC=0
3480 GOSUB 13480
3490 NEXT I
    RETURN
3580 REM
3590 REM Numerical Derivatives: ITYP = 1 for df/dx, = 2 for df/da;
3600 REM ----- VAR = value of x or a;
3610 REM JA = index of a (i.e., which A parameter);
3620 XX=X(I) : YY=Y(I)
3630 FOR J=1 TO M : AA(J)=A(J) : NEXT J
3640 VAR=XX
3650 IF ITYP=1 THEN 3670
3660 VAR=A(JA)
3670 DIFF=FRAC*VAR
3680 IF DIFF=0 THEN DIFF=FRAC
3690 VAR=VAR*(1+FRAC/2)
3700 IF VAR=0 THEN VAR=FRAC/2
3710 IF ITYP=1 THEN XX=VAR
3720 IF ITYP=2 THEN AA(JA)=VAR
3730 GOSUB 200
3740 FTEMP=FUNC
3750 VAR=VAR*(1-FRAC/2)/(1+FRAC/2)
3760 IF VAR=0 THEN VAR=-FRAC/2
3770 IF ITYP=1 THEN XX=VAR
3780 IF ITYP=2 THEN AA(JA)=VAR
3790 GOSUB 200
3800 DFDV=(FTEMP-FUNC)/DIFF
3810 RETURN

```

'Determine Initial Parameter Values

'-----y

N2PARM1=2*M-1

3860 NP=N

FOR K=1 TO N2PARM1

3870 SUMX(K)=0

3880 NEXT K

3890 FOR J=1 TO M

3900 SUMY(J)=0

3910 NEXT J

3920 AY=0

3930 FOR I=1 TO N

IF NFUNC = 1 THEN 3960

IF NFUNC = 10 THEN 4040

3960 XTEMP=X(I) : YTEMP=Y(I) : WT=1 : IF SY(I)<>0 THEN WT=1/SY(I)^2

GOTO 4130

4040 IF AY<>0 THEN 4100

GOSUB 13630

4080 AY=1.1

4100 XTEMP=X(I)

4120 YTEMP=LOG(AY*YMAX-Y(I)) : WT=1 : GOTO 4130

4130 XTERM=WT

4140 IF NFUNC=10 THEN 4160

4150 XTERM=XTERM*XTEMP*XTEMP

4160 FOR J=1 TO N2PARM1

4170 SUMX(J)=SUMX(J)+XTERM

4180 XTERM=XTERM*XTEMP

4190 NEXT J

4200 YTERM=WT*YTEMP

4210 IF NFUNC=1 THEN YTERM=YTERM*XTEMP

4220 FOR J=1 TO M

4230 SUMY(J)=SUMY(J)+YTERM

4240 YTERM=YTERM*XTEMP

4250 NEXT J

4260 NEXT I

4270 FOR J1=1 TO M

4280 FOR J2=1 TO M

4290 J3=J1+J2-1

4300 Q(J1,J2)=SUMX(J3)

4310 NEXT J2

4320 NEXT J1

4330 GOSUB 13200

4340 DEL=DET

4350 IF DEL<>0 THEN 4400

4360 FOR J=1 TO M

4370 AA(J)=0

4380 NEXT J

4390 RETURN

4400 FOR J1=1 TO M

4410 FOR J2=1 TO M

4420 FOR J3=1 TO M

4430 J4=J2+J3-1

4440 Q(J2,J3)=SUMX(J4)

4450 NEXT J3

4460 Q(J2,J1)=SUMY(J2)

```

4470 NEXT J2
4480 GOSUB 13200
4490 AA(J1)=DET/DEL
4500 NEXT J1
4510 DF=NP-M
      IF NFUNC = 1 THEN 4530
      IF NFUNC = 10 THEN 4600
4530 FOR J=1 TO M
      A(J)=AA(M-J+1)
    NEXT J
    RETURN
4600 A(1)=.5*(EXP(AA(1))+AY*YMAX) : A(2)=-AA(2)
    RETURN

```

'Plot Data and Curve

```

=====
4670 CLS : LOCATE 10,10 :PRINT "Quer ver o gráfico (s/n) ?"
4675 YN$=INKEY$ : IF YN$="" THEN 4675
      IF YN$="S" OR YN$="s" THEN 4680
    RETURN
4680 KEY OFF : CLS
      XMIN=XMINF : XSTEP=XSTEPF : XMAX=XMAXF
4690 YMIN=YMINF : YSTEP=YSTEPF : YMAX=YMAXF
      MSIG=5 : FITED = 1 : JUST=1
4950 GOSUB 6300
4960 DX=2*DELX/(VX2-VX1) : DY=3.5*DELY/(VY2-VY1)
4970 FOR I=1 TO N
4980  CIRCLE (X(I),Y(I)),0.03
5000  FOR BX=-.5*DX TO .5*DX STEP DX
5010    PAINT (X(I)+BX,Y(I))
5020  NEXT BX
5030  BX=(XMAX-XMIN)/200 : BY=(YMAX-YMIN)/100
5130  IF JUST=0 THEN 5170
5140  LINE (XADJ(I)-1.5*DX,YADJ(I))-(XADJ(I)+1.5*DX,YADJ(I))
5150  LINE (XADJ(I),YADJ(I)-DY)-(XADJ(I),YADJ(I)+DY)
5170 NEXT I
5190 DELXX=.01*DELX : BX=0 : EX=XMAX
5200 INDX=0
5210 FOR J=1 TO M :
      AA(J)=A(J) : NEXT J
5220 FOR TX=BX TO EX STEP DELXX
5230  YY=0 : XX=TX
5240  IF XX=0 THEN XX=.0001/((XMAX-XMIN)*1000)
5250  GOSUB 200
5260  YY=-FUNC
5270  IF YY<YMIN THEN 5320
5280  IF YY>YMAX THEN 5320
5290  INDX=INDX+1
5300  IF INDX=1 THEN 5320
5310  LINE (XS,YS)-(XX,YY)
5320  XS=XX : YS=YY
    NEXT
5710 GO$=INKEY$ :IF GO$ = "" THEN 5710
5780 VIEW : SCREEN 0 : WIDTH 80 : CLS
5790 XMINF=XMIN : XSTEPF=XSTEP : XMAXF=XMAX
5800 YMINF=YMIN : YSTEPF=YSTEP : YMAXF=YMAX

```

```
5820 KEY ON
      RETURN
```

```
'Define Axes of Plots
```

```
'-----
```

```
6300 GOSUB 13630
      DELX=XMAX : DELY=YMAX
      XSTEP=XMAX/3 : YSTEP=YMAX/2
```

```
'the x-axis label
```

```
'-----
```

```
      XLAB$="Exposição"+energia$+" keV "+" + sensível"
```

```
'the axis information
```

```
'-----
```

```
      YMIN=0 : xmin=0 : xmax = INT(xmax * 1.2)
      IF ROUND = 1 THEN YMAX = INT(YMAX + 1) : GOTO 6700
      IF ROUND = 2 THEN YMAX = INT(YMAX + 10)
```

```
'the y-axis label
```

```
'-----
```

```
6700 IF ROUND = 1 THEN YLAB$="Densidade óptica liq."
      IF ROUND = 2 THEN YLAB$="Dose Aparente mR"
6750 XM1=XMIN-DELX/75 : YM1=YMIN-DELY/120 : XM2=XMAX+DELX/75 : YM2=YMAX+DELY/120
6760 CLS : SCREEN 12
      VIEW (VX1,VY1)-(VX2,VY2),,1
      WINDOW (XM1,YM1)-(XM2,YM2)
6800 XWID=.004*DELX : YWID=.015*DELY
```

```
'Draw X axis
```

```
'-----
```

```
6850 XMAXT=XMAX
6920 NSTEP=INT(DELX/XSTEP)
6940 FOR K=0 TO NSTEP
6950   XPOS=XMIN+K*XSTEP
6960   LINE (XPOS,YM1)-(XPOS,YM1+YWID)
6970   COL=INT((VX1+(XPOS-XM1)*(VX2-VX1)/(XM2-XM1))/COLDIV)
6980   IF K=NSTEP THEN COL=COL-1
6990   LOCATE 24,COL
7000   VALUE=xpos
7010   PRINT USING "#####";VALUE;
7030 NEXT K
LOCATE 25,30: PRINT XLAB$;
```

```
'Draw Y axis
```

```
'-----
```

```
7130 YMAXT=YMAX
7200 NSTEP=INT((YMAX)/YSTEP)
7230 FOR K=0 TO NSTEP
7240   YPOS=YMIN+K*YSTEP
7250   LINE (XM1,YPOS)-(XM1+XWID,YPOS)
7260   ROW=22*(YMAX-YPOS)/(YMAX-YMIN)+1
7270   LOCATE ROW,3
7280   VALUE=(YMAXT/10000)*INT(10000*YPOS/YMAXT)/(10^MP)
      if round = 2 then 7300
      PRINT USING "###";VALUE : goto 7310
```

```

7300 PRINT USING "#####";VALUE
7310 NEXT K
7350 L=LEN(YLAB$)
7360 ROW=12-INT(L/2)
7370 FOR I=1 TO L
7380 LOCATE ROW,1
7390 PRINT MID$(YLAB$,I,1);
7400 ROW=ROW+1
7410 NEXT I
7420 RETURN

```

```

'Interpolation
'=====

```

```

7620 LPRINT
      LPRINT "INTERPOLACAO"
      LPRINT "===== "
      MSIG=4
      T1=T
      LPRINT "Calcular x através do y: limite de confiança 95% "
7810 GOTO 9120
8210 NTRY=0 : NOX=0
8220 UPLW=0 : XX=XEST
8230 GOSUB 200
8240 FUNC1=FUNC
8250 ITYP=1 : GOSUB 3630
      if DFDV = 0 then lprint"Divisão por zero, tente outra curva" : RETURN
8260 XEST1=XEST-FUNC1/DFDV
8270 IF ABS((XEST1-XEST)/XEST)<CONV THEN 8300
8280 XEST=XEST1 : NTRY=NTRY+1 : IF NTRY=50 THEN NOX=1 : RETURN
8290 GOTO 8220
8300 FOR J=1 TO M : AA(J)=A(J) : NEXT J
8310 XINTP=XEST1
8320 RETURN

```

```

'Get errors in x
8340 IF NP<>M THEN 8360
8350 RE1=0 : RETURN
8360 XEST=XINTP
8370 XX=XEST
8380 FOR J=1 TO M : AA(J)=A(J) : NEXT J
8390 GOSUB 200
8400 FUNC1=FUNC
8410 GOSUB 14340
8420 FUNC1=FUNC1+ERRW
8430 UPLW=1
8440 GOSUB 8690
8450 DFDX=DFDV
8460 XEST1=XEST-FUNC1/DFDX
8470 IF ABS((XEST1-XEST)/XEST)<CONV THEN 8490
8480 XEST=XEST1 : GOTO 8370
8490 RE1=XEST1-XINTP
8500 REM
8510 XEST=XINTP
8520 XX=XEST
8530 FOR J=1 TO M : AA(J)=A(J) : NEXT J
8540 GOSUB 200

```

```

8550 FUNC1=FUNC
8560 GOSUB 14340
8570 FUNC1=FUNC1-ERRW
8580 UPLW=-1
8590 GOSUB 8690
8600 DFDX=DFDV
8610 XEST1=XEST-FUNC1/DFDX
8620 IF ABS((XEST1-XEST)/XEST)<CONV THEN 8640
8630 XEST=XEST1 : GOTO 8520
8640 RETURN

```

'dF/dx with error limits

'-----

```

8690 FOR J=1 TO M : AA(J)=A(J) : NEXT J
8700 VAR1=XEST
8710 DIFF1=FRAC*VAR1 : IF DIFF1=0 THEN DIFF1=FRAC
8720 VAR1=VAR1*(1+FRAC/2) : IF VAR1=0 THEN VAR1=FRAC/2
8730 XX=VAR1
8740 GOSUB 200
8750 GOSUB 14340
8760 FTEMP1=FUNC+UPLW*ERRW
8770 VAR1=VAR1*(1-FRAC/2)/(1+FRAC/2)
8780 IF VAR1=0 THEN VAR1=-FRAC/2
8790 XX=VAR1
8800 GOSUB 200
8810 GOSUB 14340
8820 DFDV=(FTEMP1-FUNC-UPLW*ERRW)/DIFF1
8830 RETURN

```

'Calculate x at all y

'-----

```

9120 SUMPC=0 : SUMAPC=0 : SUMD=0 : SUMD2=0 : SUMAD=0
      GOSUB 14810
9140 FOR I=1 TO N
9170  YY=Y(I) : XEST=X(I) : GOSUB 8210 : GOSUB 8340
9180  DIFF=X(I)-XINTP
      IF round = 2 then 9190
      LPRINT USING "###";I; : LPRINT SPC(6); : LPRINT USING "#.##";Y(I);
      LPRINT SPC(6); : LPRINT USING "#####";XINTP; : LPRINT SPC(5);
      LPRINT USING "###.###^";RE1; : LPRINT SPC(2);
      LPRINT USING "+###.###^";XEST1-XINTP;
      LPRINT SPC(2); : LPRINT USING "+###.###^";DIFF; : LPRINT SPC(3);
      LPRINT USING "+###.#";INT(10000*DIFF/X(I))/100
      goto 9260
9190  LPRINT USING "###";I; : LPRINT SPC(6); : LPRINT USING "#####";Y(I);
      LPRINT SPC(5); : LPRINT USING "#####";XINTP; : LPRINT SPC(5);
      LPRINT USING "###.###^";RE1; : LPRINT SPC(2);
      LPRINT USING "+###.###^";XEST1-XINTP;
      LPRINT SPC(2); : LPRINT USING "+###.###^";DIFF; : LPRINT SPC(3);
      LPRINT USING "+###.#";INT(10000*DIFF/X(I))/100
9260  DIFFPC=DIFF/X(I) : GOSUB 13480
9270 NEXT I
9300 RETURN
12200 REM
12210 REM Cholesky's solution of n linear equations
12220 REM =====

```

```

12230 REM
12240 IF M>1 THEN 12280
12250 INTYPE=1
      IF q(1,1) = 0 then cls : lprint "Divisão por zero : tente outra curva": goto 40
12260 G(1)=Q(1,2)/Q(1,1)
12270 RETURN
12280 FOR K=2 TO M+1
12290   Q(1,K)=Q(1,K)/Q(1,1)
12300 NEXT K
12310 FOR I=2 TO M
12320   K=I
12330   FOR I1=K TO M
12340     TEMP=0 : K1=K-1
12350     FOR J=1 TO K1
12360       TEMP=TEMP+Q(I1,J)*Q(J,K)
12370     NEXT J
12380     Q(I1,K)=Q(I1,K)-TEMP
12390   NEXT I1
12400   I1=I+1
12410   FOR J1=I1 TO M+1
12420     TEMP=0 : I2=I-1
12430     FOR J=1 TO I2
12440       TEMP=TEMP+Q(I,J)*Q(J,J1)
12450     NEXT J
      IF Q(I,I) = 0 then return
12460     Q(I,J1)=(Q(I,J1)-TEMP)/Q(I,I)
12470   NEXT J1
12480 NEXT I
12490 G(M)=Q(M,M+1)
12500 FOR N1=1 TO M-1
12510   TEMP=0 : I=M-N1 : I1=I+1
12520   FOR K=I1 TO M
12530     TEMP=TEMP+Q(I,K)*G(K)
12540   NEXT K
12550   G(I)=Q(I,M+1)-TEMP
12560 NEXT N1
12570 RETURN
12580 REM
12590 REM Matrix Inversion
12600 REM =====
12610 REM
12620 D1=1
12630 FOR K=1 TO M
12640   CX=0
12650   FOR I=K TO M
12660     FOR J=K TO M
12670       C=ABS(CX)-ABS(Q(I,J))
12680       IF C>0 THEN 12700
12690       CX=Q(I,J) : ITEMP(K)=I : JTEMP(K)=J
12700     NEXT J
12710   NEXT I
12720 IF CX<>0 THEN 12740
12730 D1=0 : RETURN
12740 I=ITEMP(K)
12750 IF I<K THEN 12650
12760 IF I=K THEN 12800

```

```

12770  FOR J=1 TO M
12780    T=Q(K,J) : Q(K,J)=Q(I,J) : Q(I,J)=-T
12790  NEXT J
12800  J=JTEMP(K)
12810  IF J<K THEN 12650
12820  IF J=K THEN 12860
12830  FOR I=1 TO M
12840    T=Q(I,K) : Q(I,K)=Q(I,J) : Q(I,J)=-T
12850  NEXT I
12860  FOR I=1 TO M
12870    IF I=K THEN 12890
12880    Q(I,K)=-Q(I,K)/CX
12890  NEXT I
12900  FOR I=1 TO M
12910    IF I=K THEN 12960
12920    FOR J=1 TO M
12930      IF J=K THEN 12950
12940      Q(I,J)=Q(I,J)+Q(I,K)*Q(K,J)
12950    NEXT J
12960  NEXT I
12970  FOR J=1 TO M
12980    IF J=K THEN 13000
12990    Q(K,J)=Q(K,J)/CX
13000  NEXT J
13010  Q(K,K)=1/CX : D1=D1*CX
13020 NEXT K
13030 FOR LTEMP=1 TO M
13040  K=M-LTEMP+1 : J=JTEMP(K)
13050  IF J<=K THEN 13090
13060  FOR I=1 TO M
13070    T=Q(I,K) : Q(I,K)=-Q(I,J) : Q(I,J)=T
13080  NEXT I
13090  I=JTEMP(K) : IF I<=K THEN 13140
13100  FOR J=1 TO M
13110    T=Q(K,J) : Q(K,J)=-Q(I,J) : Q(I,J)=T
13120  NEXT J
13130  Q(I,J)=T
13140 NEXT LTEMP
13150 RETURN
13160 REM
13170 REM Calculate Determinate
13180 REM =====
13190 REM
13200 DET=1
13210 FOR K=1 TO M
13220  IF Q(K,K)<>0 THEN 13340
13230  FOR J=K TO M
13240    IF Q(K,J)<>0 THEN 13280
13250  NEXT J
13260  DET=0
13270  GOTO 13430
13280  FOR I=K TO M
13290    TEMP=Q(I,J)
13300    Q(I,J)=Q(I,K)
13310    Q(I,K)=TEMP
13320  NEXT I

```

```

13330 DET=-DET
13340 DET=DET*Q(K,K)
13350 IF (K-M)=>0 THEN 13420
13360 K1=K+1
13370 FOR I=K1 TO M
13380 FOR J=K1 TO M
13390 Q(I,J)=Q(I,J)-Q(I,K)*Q(K,J)/Q(K,K)
13400 NEXT J
13410 NEXT I
13420 NEXT K
13430 RETURN

```

'Mean and Standard Deviation

'=====

```

13480 SUMD=SUMD+DIFF : SUMD2=SUMD2+DIFF*DIFF : SUMAD=SUMAD+ABS(DIFF) :
SUMPC=SUMPC+DIFFPC : SUMAPC=SUMAPC+ABS(DIFFPC)
IF I<>N THEN RETURN
SUMD2=SUMD2/N : SUMD=SUMD/N : SUMPC=SUMPC/N : SUMAPC=SUMAPC/N

```

LPRINT

```

LPRINT "Media dos resíduos ="; : LPRINT USING "+###.###^";SUMD; : LPRINT " or "; : LPRINT USING
"###.###";INT(1000000!*SUMPC)/10000; : LPRINT "%"

```

```

LPRINT "Media Absoluto dos Resíduos ="; : LPRINT USING "###.###^";SUMAD/N; : LPRINT " or "; :
LPRINT USING "+###.###";INT(1000000!*SUMAPC)/10000; : LPRINT "%"

```

```

LPRINT "Desvio Padrão dos Resíduos ="; : LPRINT USING "###.###^";SQR(SUMD2-SUMD*SUMD)
RETURN

```

'Minimum & Maximum

'-----

```

13630 XMIN=1.7E+38 : XMAX=0 : YMIN=1.7E+38 : YMAX=0
FOR II=1 TO N
IF X(II)<XMIN THEN XMIN=X(II)
IF X(II)>XMAX THEN XMAX=X(II)
IF Y(II)<YMIN THEN YMIN=Y(II)
IF Y(II)<=YMAX THEN 13700
YMAX=Y(II) : XYMAX=X(II)
13700 NEXT II
RETURN

```

13720 '

13730 ' Student's t table, 95 confidence level

13740 ' =====

13760 DATA 12.706,4.303,3.182,2.776,2.571,2.447,2.365

13770 DATA 2.306,2.262,2.228,2.201,2.179,2.16,2.145,2.131,2.12,2.11

13780 DATA 2.101,2.093,2.086,2.08,2.074,2.069,2.064,2.06,2.056,2.052

13790 DATA 2.048,2.045,2.042,1.96

13800 T=1.96 : RESTORE 13760

13810 IF NP-M>30 THEN 13850

13820 FOR I=1 TO NP-M

13830 READ T

13840 NEXT I

13850 RETURN

13860 REM

13870 REM Chi-square table at 95% level

13880 REM =====

13890 REM

```

13900 DATA 3.841,2.996,2.605,2.372,2.214,2.099,2.01,1.938,1.88,1.831
13910 DATA 1.789,1.752,1.72,1.69,1.666,1.644,1.623,1.604,1.586,1.571
13920 DATA 1.557,1.542,1.53,1.517,1.507,1.496,1.486,1.476,1.468,1.459
13930 IF NP<>M THEN 13950
13940 C2=1.7014E+38 : GOTO 14030
13950 IF NP-M>30 THEN 14010
13960 RESTORE 13900
13970 FOR I=1 TO NP-M
13980 READ C2
13990 NEXT I
14000 GOTO 14020
14010 C2=1.4256-.00186*(NP-M) : IF NP-M>110 THEN C2=1.2956-.000635*(NP-M)
14020 C2=C2*(NP-M)
14030 RETURN

```

```

14310 ' Error Width
14320 ' =====
14340 ERRW=0
14350 IF NP=M THEN RETURN
14360 FOR J1=1 TO M
14370 ITYP=2 : JA=J1 : GOSUB 3630
14380 DFDA1=DFDV
14390 ERRW=ERRW+Q(J1,J1)*DFDA1*DFDA1
14400 IF M=1 THEN 14450
14410 FOR J2=J1+1 TO M
14420 JA=J2 : GOSUB 3630
14430 ERRW=ERRW+2*Q(J1,J2)*DFDA1*DFDV
14440 NEXT J2
14450 NEXT J1
14460 ERRW=T1*SQR(SR*ERRW)
14470 RETURN

```

'Headings, Separators and Systems

```

'=====
14810 LPRINT : LPRINT SPC(17)"calculado "SPC(31)"x"SPC(8)"% x"
      LPRINT SPC(1)"n"SPC(7)"y"SPC(11)"x"SPC(15)"x erro "SPC(11)"resíduo "SPC(2)"resíduo"
      LPRINT "----"SPC(2)"-----"SPC(2)"-----"SPC(1)"-----" SPC(2)"-----"SPC(2)"-----"
      RETURN

```

```

15240 ' Primeira pagina
      '-----
      FOR I= 1 TO 15
        GOSUB 15460
      NEXT
      GOSUB 15500
      GOSUB 15680
      GOSUB 15780
      LPRINT"      UFPE"
      LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:GOSUB 15680
      LPRINT"SERVICO DE DOSIMETRIA FOTOGRAFICA"
      LPRINT:GOSUB 15680
      LPRINT"Calculo de coeficientes angulares"
      lprint
      LPRINT:GOSUB 15680
      LPRINT Day$
      LPRINT

```

```

GOSUB 15680
LPRINT"KCALC_UFPE"
LPRINT:GOSUB 15680
LPRINT:LPRINT:LPRINT:LPRINT:GOSUB 15680
LPRINT "Emulsão "sens$" sensível"
GOSUB 15500 : GOSUB 15780
FOR I= 1 TO 30
  GOSUB 15460
NEXT
RETURN

```

```

'Printer Form Feed
'-----
15440 LPRINT CHR$(12)
RETURN

```

```

'Printer Line Feed
'-----
15460 LPRINT
RETURN

```

```

'Printer Reset
'-----
15500 LPRINT ESC$+"@";
RETURN

```

```

'Perforation Skip
'-----
15590 LPRINT ESC$+"N"+CHR$(6);
RETURN

```

```

'Expanded Print
'-----
15680 LPRINT CHR$(14);
RETURN

```

```

'Bold Print On
'-----
15780
LPRINT ESC$+"E";
RETURN

```

```

'Bold Print Off
'-----
15870 LPRINT ESC$+"F";
RETURN

```

```

'calculate apparent dose
'-----
17000 NDAP = 0
  LPRINT
  'if curva$ = "*" then 17005
  LPRINT "Densidade óptica", "Exposição"
  LPRINT "-----", "-----"
  lprint
17005 FOR I= 1 TO 15

```

```

Z=I/3
IF Z>(A(1)-0.5) or Z> (DOLMAX) THEN 17010
DAPARA(I)=(-LOG(A(1)-Z)+LOG(A(1)))/A(2)
NDAP = NDAP + 1
if curva$ = "*" then 17006
  lprint tab(4) USING "#.##";Z;: LPRINT TAB(28) USING "#####.##";DAPARA(I)
17006 NEXT I
  LPRINT NDAP
17010 IF ENERGIA$ = "1250" AND filtro = 5 THEN 17018
  GOTO 17020
17018 FOR I = 1 TO NDAP
  Y1250(I) = DAPARA(I)
NEXT
RETURN
17020 FOR I = 1 TO NDAP
  X(I) = DAPARA(I)
NEXT
RETURN

```

ANEXO B - Algoritmo COMBINAÇÕES LINEARES de 22/05/2007

```
'          **** COMBINAÇÕES LINEARES ****
'                      22/05/2007
```

```
OPTION BASE 1
```

```
DIM ENG(38), ENGPOS(38), KMA(5,38), TRY(38)
```

```
'entrar valores ENG(I)
```

```
'-----
```

```
FOR I = 1 TO 38
```

```
  READ ENG(I)
```

```
  DATA
```

```
24,26,28,30,33,37,41,45,48,50,52,54,57,63,69,75,79,83,89,93,98,104,108,112,118,124,130,133,137,140,143,149,155,164,224,264,662,1250
```

```
  ENGPOS(I)=(LOG10(ENG(I)) * 350) - 250
```

```
NEXT
```

```
'entrar valores KMA(1,J)-PLASTICO
```

```
'-----
```

```
FOR J=1 TO 38
```

```
  READ KMA(1,J)
```

```
  DATA
```

```
8.95,9.85,10.75,11.65,13.00,13.02,13.03,13.05,12.45,12.03,11.62,11.20,10.58,9.42,8.25,7.09,6.31,5.54,5.07,4.76,4.38,3.92,3.57,3.22,2.71,2.55,2.38,2.30,2.19,2.10,2.02,1.85,1.69,1.45,1.36,1.29,.67,.81
```

```
NEXT
```

```
'entrar valores KMA(2,J)-COBRE .1
```

```
'-----
```

```
FOR J=1 TO 38
```

```
  READ KMA(2,J)
```

```
  DATA
```

```
2.23,3.15,4.06,4.97,6.34,7.29,8.24,9.18,8.22,7.90,7.58,7.26,6.78,6.29,5.81,5.32,5.00,4.68,4.31,4.07,3.76,3.39,3.12,2.86,2.46,2.30,2.14,2.06,1.96,1.89,1.83,1.70,1.57,1.38,1.29,1.23,.62,.72
```

```
NEXT
```

```
'entrar valores KMA(3,J)-COBRE 0.5
```

```
'-----
```

```
FOR J=1 TO 38
```

```
  READ KMA(3,J)
```

```
  DATA
```

```
.14,.23,.32,.40,.53,1.18,1.82,2.46,2.95,3.20,3.44,3.69,4.05,3.91,3.77,3.63,3.53,3.44,3.22,3.07,2.88,2.66,2.51,2.36,2.14,1.96,1.79,1.71,1.60,1.55,1.51,1.41,1.32,1.18,1.10,1.06,.59,.66
```

```
NEXT
```

```
'entrar valores KMA(4,J)-CHUMBO
```

```
'-----
```

```
FOR J=1 TO 38
```

```
  READ KMA(4,J)
```

```

DATA
.09,.13,.17,.21,.27,.32,.36,.41,.43,.46,.49,.52,.56,.58,.60,.62,.63,.64,.63,.62,.61,.60,.59,.58,.55,.56,.57,.58,.59,.59,.58,.
56,.55,.53,.54,.56,.74,1
NEXT

'entra valores KMA(5,J)-JANELA
'-----

FOR J=1 TO 38
  READ KMA(5,J)
  DATA
10.07,11.11,12.15,13.19,14.74,14.27,13.79,13.32,10.00,9.97,9.94,9.92,9.88,8.82,7.76,6.69,5.98,5.27,4.96,4.76,4.50,4
.19,3.75,3.31,2.64,2.48,2.32,2.24,2.13,2.05,1.98,1.83,1.68,1.46,1.37,1.31,.68,.63
NEXT

'Otimizar

'Primeira entrada DE A B C D E
'-----

CLS
LOCATE 10,20: INPUT "Plastico = ";A
LOCATE 11,20: INPUT "Cu 0,1 = ";B
LOCATE 12,20: INPUT "Cu 0,5 = ";C
LOCATE 13,20: INPUT "Chumbo = ";D
LOCATE 14,20: INPUT "Janela = ";E

' Fine tuning
'-----
' scaling factor

df = 0.01

10 Char$ = INKEY$
IF Char$ = "" then 10
sum$ = RIGHT$(Char$,1)

IF sum$ = Chr$(97) THEN move = 1 '+' A
IF sum$ = Chr$(65) THEN move = 2 '-' A
IF sum$ = Chr$(98) THEN move = 3 '+' B
IF sum$ = Chr$(66) THEN move = 4 '-' B
IF sum$ = Chr$(99) THEN move = 5 '+' C
IF sum$ = Chr$(67) THEN move = 6 '-' C
IF sum$ = Chr$(100) THEN move = 7 '+' D
IF sum$ = Chr$(68) THEN move = 8 '-' D
IF sum$ = Chr$(101) THEN move = 9 '+' E
IF sum$ = Chr$(69) THEN move = 10 '-' E
IF sum$ = Chr$(102) THEN end
IF sum$ = Chr$(70) THEN end
IF sum$ = Chr$(105) THEN goto 1000
IF sum$ = Chr$(75) THEN goto 1000

SELECT CASE move
CASE = 1
A = A + df : goto 20

```

```
CASE = 2
A = A - df : goto 20
```

```
CASE = 3
B = B + df : goto 20
```

```
CASE = 4
B = B - df : goto 20
```

```
CASE = 5
C = C + df : goto 20
```

```
CASE = 6
C = C - df : goto 20
```

```
CASE = 7
D = D + df : goto 20
```

```
CASE = 8
D = D - df : goto 20
```

```
CASE = 9
E = E + df : goto 20
```

```
CASE = 10
E = E - df : goto 20
```

```
End select
```

```
20 'CALCULO DAS COMBINACOES
   '-----
```

```
   CLS
   FOR J=1 TO 38
   TRY (J)= A * KMA(1,J) + B * KMA(2,J) + C * KMA(3,J) + D * KMA(4,J) + E * KMA(5,J)
   NEXT
```

```
100
```

```
'determinar a parte grafica
'-----
```

```
SCREEN 12
WINDOW (-50, -300) - (1000, 300)
line (-10,0) - (1000,0),2
line (0,-300) - (0,300),2
line (0,150) - (1000,150),3
line (0,-150)- (1000,-150),3
```

```
line (0,50) - (1000,50),6
line (0,-50) - (1000,-50),6
line (0,25) - (1000,25),7
line (0,-25) - (1000,-25),7
```

```
x = 1
for I = 1 to 3
```

```

x = x * 10
logx = (LOG10(x) * 350) - 250
line (logx,0) - (logx,-20),4
LOCATE 17,(I-1) * 26 + 11:PRINT x
next

```

```

LOCATE 17,70:PRINT "keV"
LOCATE 15,1:PRINT "1,0":LOCATE 8,1:PRINT "1,3":LOCATE 23,1:PRINT "0,7"
LOCATE 14,1:PRINT "1,05":LOCATE 16,1:PRINT "0,95"
LOCATE 13,1:PRINT "1,10":LOCATE 17,1:PRINT "0,90"

```

```

FOR I=1 TO 38
TRY(I)=(TRY(I) - 1) * 500
CIRCLE (ENGPOS(I),TRY(I)),3,4
NEXT

```

```

101
locate 1,46 : print "Combinacao :      * plastico"
locate 1,60 : print using "+#.##"; A
locate 2,65 : print "* cobre 0,1"
locate 2,59 : print using "+#.##"; B
locate 3,65 : print "* cobre 0,5"
locate 3,59 : print using "+#.##"; C
locate 4,65 : print "* chumbo"
locate 4,60 : print using "#.##"; D
locate 5,65 : print "* janela"
locate 5,59 : print using "+#.##"; E
locate 6,59 : print "<f> para sair"
locate 7,59 : print "<i> para imprimir"

```

```
goto 10
```

```

1000
cls
FOR Q=8 TO 10
LOCATE Q,5:PRINT "|"
NEXT
LOCATE 7,30:PRINT "CURVA PARA O Co +S"
LOCATE 17,75:PRINT "keV"
LOCATE 15,2:PRINT " 0%"

```

```

|....."
LOCATE 9,1:PRINT "1,3 |....."
LOCATE 22,1:PRINT "0,7 |....."
LOCATE 14,2:PRINT "+1% |....."
LOCATE 13,2:PRINT "+2% |....."
LOCATE 12,2:PRINT "+3% |....."
LOCATE 11,2:PRINT "+4% |....."
LOCATE 10,2:PRINT "+5% |....."
LOCATE 16,2:PRINT "-1% |....."
LOCATE 17,2:PRINT "-2% |....."
LOCATE 18,2:PRINT "-3% |....."
LOCATE 19,2:PRINT "-4% |....."
LOCATE 20,2:PRINT "-5% |....."

```

```
FOR I=1 TO 38
```

```
TRY(I)=(TRY(I) - 1) * 500
S=ENGPOS(I)
W=A*KMA(1,I)+B*KMA(2,I)+C*KMA(3,I)+D*KMA(4,I)+E*KMA(5,I)
W=-W*105+121
IF W>38 THEN W=38
IF W<8 THEN W=8
LOCATE W,I*3+5:PRINT "*"
'CIRCLE (ENGPOS(I),TRY(I)),4,12
NEXT
goto 101
```