



COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS DOSIMÉTRICOS DE ALANINA E DO FILME
RADIOCRÔMICO B3 NA IRRADIAÇÃO INDUSTRIAL POR FEIXE DE ELÉTRONS.

Alessandra Cristina Antunes Bohrer

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Nuclear.

Orientador: Delson Braz

Rio de Janeiro

Março de 2011

COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS DOSIMÉTRICOS DE ALANINA E DO FILME
RADIOCRÔMICO B3 NA IRRADIAÇÃO INDUSTRIAL POR FEIXE DE ELÉTRONS.

Alessandra Cristina Antunes Bohrer

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Examinada por:

Prof. Delson Braz, D.Sc.

Prof. Edgar Francisco Oliveira de Jesus, D.Sc.

Helio de Carvalho Vital, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2011

Bohrer, Alessandra Cristina Antunes

Comparação dos Sistemas Dosimétricos de Alanina e do Filme Radiocrômico B3 na Irradiação Industrial por Feixe de Elétrons / Alessandra Cristina Antunes Bohrer. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011.

XI, 70 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Delson Braz

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2011.

Referencias Bibliográficas: p.68 - 70.

1. Irradiação Industrial. 2. Feixe de Elétrons. 3. Dosímetro de Alanina. I. Braz, Delson. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título

A Deus, por ter iluminado meu caminho nesta jornada.
À minha mãe Lucia minha Irmã Gleice pelo constante apoio e incentivo durante minha vida.
À minha amiga Luciane pela amizade e apoio.
Ao Profº Fernando Nuno, cujo apoio e orientação, possibilitaram o termino deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me proporcionar mais uma conquista.

Aos meus avós, a minha mãe e a meus irmãos pelos exemplos de vida e incentivo por todos esses anos.

Aos meus orientadores Dr. Fernando Nuno e Dr. Delson Braz, pela orientação, enorme paciência, incentivo e confiança.

A Acelétron, por fornecer não apenas o apoio, mas todas as instalações, meios e equipamentos.

Aos meus amigos, Luciane, Allan, Caroline, Ariane, Otávio e Maurício, por entender a minha ausência em momentos importantes.

Aos Professores e às secretárias do Programa de Engenharia Nuclear (PEN) da COPPE/UFRJ.

Resumo da dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

COMPARAÇÃO DOS SISTEMAS DOSIMÉTRICOS DE ALANINA E DO FILME RADIOCRÔMICO B3 NA IRRADIAÇÃO INDUSTRIAL POR FEIXE DE ELÉTRONS

Alessandra Cristina Antunes Bohrer

Março/2011

Orientador: Delson Braz

Programa: Engenharia Nuclear.

A utilização de aceleradores lineares de elétrons (LINAC'S) para a irradiação de produtos em escala industrial, esterilização de produtos médicos, cosméticos, polímeros, alimentos e pedras preciosas, só pode ter êxito se um confiável sistema dosimétrico for adotado. Existem diversas tecnologias disponíveis e duas foram selecionados para este estudo. A primeira usa dosímetros de alanina que podem ser lidos com espectrômetros de ressonância paramagnética eletrônica (ESR), a segunda usa os dosímetros radiocrômicos B3, que são lidos com um espectrofotômetro. Este estudo apresenta uma comparação das duas tecnologias no intervalo de doses de 1 - 80 kGy, tendo em conta custo inicial, precisão, tempo de leitura, calibração, entre outros. É mostrado que cada sistema tem suas próprias vantagens e desvantagens, e que ambos podem ser usados em Irradiação por feixe de elétrons, embora o filme radiocrômico B3 tenha se mostrado mais adequado, para a realidade da industria brasileira, levando em consideração a relação custo x precisão.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

COMPARISON OF ALANINE DOSIMETERS AND B3 RADIOCHROMIC DOSIMETERS
FOR E-BEAM INDUSTRIAL IRRADIATION

Alessandra Cristina Antunes Bohrer

March/2011

Advisor: Delson Braz

Department: Nuclear Engineering

The utilization of electron linear accelerators (LINAC'S) for industrial irradiation of several products like turf, sterilization of medical products, cosmetics, polymers, food and gems, can only be successful if a reliable dosimetric system is chosen. There are several available technologies and two were selected for this study. The first one uses alanine dosimeters which can be read with electron spin resonance spectrometers (ESR); the second uses B3 radiochromic dosimeters which are read with a spectrophotometer. This study presents a comparison of both technologies in the dose range of 1 - 80 kGy, taking into account initial cost, precision, reading time, calibration, among others. It is shown that each system has its own advantages and disadvantages, and that both can be used in e-beam installation, although the B3 radiochromic dosimeters has been more appropriate, for the reality of Brazilian industry, taking into account the cost x precision relation.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO.....	1
-----------------	---

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	3
2.1. INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA.....	3
2.1.1. Poder de Frenagem	6
2.1.2. Alcance dos Elétrons	7
2.2. INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO GAMA COM A MATÉRIA	9
2.3. DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES	14
2.3.1. Grandezas e Unidades	18
2.3.1.1. Dose Absorvida	18
2.3.1.2. Taxa de Dose Absorvida	19
2.3.1.3. Dose Absorvida em outros meios	19
2.3.2. Sistemas Dosimétricos.....	19
2.3.3. Dosimetria em Processos de Irradiação	21
2.3.4. Propriedade dos Dosímetros.....	22
2.3.5. Calibração dos Dosímetros.....	23
2.4. SISTEMAS DOSIMÉTRICOS.....	24
2.4.1. Dosímetro Radiocrômico.....	25

2.4.1.1. Espectrofotometria.....	27
2.4.2. Dosímetro de Alanina.....	30
2.5. SISTEMA DE FEIXE DE ELÉTRONS.....	33
2.5.1. Acelerador Linear.....	34
2.5.2. Fonte de Elétrons.....	35
2.5.3. Estrutura de Aceleração.....	35
2.5.4. Válvula de Vácuo.....	36
2.5.5. Monitores de corrente do feixe.....	36
2.5.6. Bunker.....	36
2.5.7. Sistema de Esteiras.....	37

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA	38
3.1. CALIBRAÇÃO DOS DOSÍMETROS DE ALANINA	38
3.2. CALIBRAÇÃO DOS DOSÍMETROS DE REFERÊNCIA.....	39
3.3. DETERMINAÇÃO DA ENERGIA, UNIFORMIDADE DE DOSE E UNIFORMIDADE DE VARREDURA HORIZONTAL E LONGITUDINAL	40
3.3.1. Uniformidade de varredura Horizontal e Longitudinal (Largura horizontal e longitudinal).....	40
3.3.2. Energia.....	42
3.3.3. Uniformidade de Dose (Profundidade)	44
3.3.4. Critério para aceitação dos resultados	45

CAPÍTULO 4

RESULTADOS.....	46
4.1. RESULTADOS DOS TESTES OPERACIONAIS DA ALANINA.....	46
4.1.1. Teste Operacional da Uniformidade de Varredura Horizontal	46
4.1.2. Teste Operacional da Uniformidade de Varredura Longitudinal	47
4.1.3. Teste Operacional para Obtenção da Energia do Feixe de Elétrons	48
4.1.4. Teste Operacional da Uniformidade de Dose	50
4.2. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO PRIMÁRIA	51
4.2.1. Dados da Calibração Primária	51
4.2.2. Curva de Calibração	55
4.3. RESULTADOS DOS TESTES OPERACIONAIS PARA O FILME RADIOCRÔMICO B3.....	56
4.3.1. Teste Operacional da Uniformidade de Varredura Horizontal	56
4.3.2. Teste Operacional da Uniformidade de Varredura Longitudinal	57
4.3.3. Teste Operacional para Obtenção da Energia do Feixe de Elétrons	59
4.3.4. Teste Operacional da Uniformidade de Dose	60
4.4. ANÁLISE DE RESULTADOS	62
4.4.1. Teste 1 - Uniformidade de Varredura Horizontal	62
4.4.2. Teste 2 - Uniformidade de Varredura Longitudinal	63
4.4.3. Teste 3 - Energia do Feixe de Elétrons	64
4.4.4. Teste 4 - Uniformidade de Dose	64

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO66

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **68**

INTRODUÇÃO

Podemos definir radiação como ondas eletromagnéticas ou partículas que se propagam a altas velocidades portando energia, e que, ao interagir podem produzir variados efeitos sobre a matéria. As radiações são denominadas ionizantes quando produzem íons ou elétrons livres através da interação com a matéria. A ionização se deve ao fato da radiação possuir alta energia, suficiente para quebrar as ligações químicas arrancando elétrons de seus átomos e modificando as moléculas.

Irradiação é a exposição à um campo de radiação ionizante, formado por ondas ou partículas, para que o material exposto absorva uma certa quantidade de energia.

Existem predominantemente duas fontes de energia radiante utilizadas na irradiação Industrial: feixe de elétrons e raios gama. A do primeiro tipo não utiliza energia nuclear, mas sim, eletricidade comum como fonte de energia. A radiação gama, é uma forma de energia ionizante de origem nuclear. Ela utiliza as fontes radioativas, como o cobalto 60 e o cério 137. Nenhuma das formas de energia radiante faz com que o produto se torne radioativo.

A tecnologia do feixe de elétrons permite a utilização de elétrons para irradiar industrialmente os mais variados produtos e materiais, tais como esterilização de material médico hospitalar, cosméticos, fitoterápicos, polímeros, turfa, gemas (pedras preciosas e semipreciosas) e alimentos. Essa tecnologia tem sido utilizada há aproximadamente 45 anos comercialmente e também tem obtido contribuições significativas para pesquisas em ciências básicas, ciências aplicadas, indústrias, medicamentos e agricultura.

Na irradiação industrial podem ser utilizados aceleradores lineares, também conhecido como LINAC (linear acelerador), que proporcionam a partícula sub-atômica

carregada pequenos incrementos de energia, ao passar por uma sequência de campos elétricos alternados. A utilização de aceleradores lineares na indústria tem a vantagem de não representar ameaça para o ambiente quando não estão operando. Conseqüentemente, proporcionam uma maior segurança operacional.

Este trabalho foi desenvolvido na empresa Acelétron, única prestadora do serviço de irradiação industrial utilizando aceleradores lineares de elétrons (LINAC) na América do Sul. Para a obtenção da certificação de funcionamento, a Acelétron adotou o sistema dosimétrico da Alanina, com sistema de leitura Bruker; foi verificada posteriormente a necessidade de se obter outro sistema dosimétrico que substituísse a alanina, devido ao alto custo do dosímetro e da difícil manutenção do equipamento Bruker. Para este fim, foi escolhido o dosímetro de filme radiocrômico B3, que utiliza o sistema de leitura Genesys. Este sistema foi escolhido por oferecer menor custo, tanto do dosímetro, quanto do equipamento de leitura Genesys 20 e pelo fato da representação comercial e assistência técnica serem em São Paulo, enquanto o sistema Bruker os possui apenas nos Estados Unidos.

O principal objetivo deste estudo é apresentar uma comparação entre os sistemas dosimétricos da alanina e do filme radiocrômico B3, tendo em conta o custo inicial, precisão, tempo de leitura, calibração, entre outros, ressaltando as vantagens do filme radiocrômico B3 dentro da realidade brasileira, considerando a aplicabilidade na área industrial.

O assunto aqui apresentado está organizado de maneira que no próximo capítulo serão discutidos os aspectos teóricos pertinentes ao trabalho. No capítulo 3, está a metodologia utilizada. No capítulo 4, serão informados os resultados obtidos no trabalho. No capítulo 5, serão apresentadas as conclusões, após a comparação feita entre os dois sistemas dosimétricos.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. INTERAÇÃO DOS ELÉTRONS COM A MATÉRIA

Partículas não-carregadas, ao interagirem com a matéria, sofrem um número relativamente pequeno de interações, cada uma delas ocasionando uma grande perda de energia, enquanto que as partículas carregadas sofrem um número relativamente elevado de interações, cada uma delas causando uma pequena perda de energia. Com isso, o elétron perde gradativamente sua energia cinética em um processo denominado aproximação de frenagem contínua. O elétron, por estar envolvido por um campo de força Coulombiano, interage com um ou mais elétrons ou com o núcleo de virtualmente todo átomo ou molécula que encontra [1,2,5]..

A maioria das interações de partículas com a carga elétrica transfere individualmente somente uma pequena fração da energia da partícula incidente, sendo conveniente considerar tal mecanismo como perda gradual de energia cinética da partícula em processos do tipo fricção (atrito). As partículas carregadas por outro lado, podem ser aproximadamente caracterizadas por um alcance médio que varia segundo o tipo de partícula e energia, em um meio específico. Os elétrons com energias da ordem de milhões de elétron-volts (MeV) sofrem milhares de colisões quando atravessam um alvo, conseqüentemente, seu comportamento pode ser descrito pela teoria estatística do espalhamento múltiplo, que compreende os principais modos de interação:

(1) espalhamento inelástico com o núcleo atômico ("*bremstrahlung*");

(2) espalhamento inelástico com os elétrons do átomo;

(3) espalhamento elástico com os átomos.

Os modos de interação (2) e (3) são os mecanismos mais importantes de perda de energia do elétron, nos quais ocorrem um grande número de colisões, resultando em excitação e ionização dos átomos do meio atravessado [1,2].

Espalhamento inelástico com o núcleo: Ocorre quando o parâmetro de impacto é menor que o raio atômico, resultando em uma interação radioativa inelástica. Como produto da interação do elétron com o campo Coulombiano do núcleo, resulta a aceleração e a deflexão do elétron, com emissão de radiação eletromagnética ("*bremsstrahlung*"). Neste tipo de interação o elétron pode ceder até 100% de sua energia cinética para o fóton [2,3,4].

Espalhamento elástico de elétrons pelo campo Coulombiano do átomo: Ocorre quando o elétron incidente perde energia através da ação cumulativa do espalhamento múltiplo. Em cada espalhamento o elétron perde uma pequena quantidade de energia, apenas a necessária para mudar sua trajetória, satisfazendo a conservação do momento da colisão [2,3,4].

Espalhamento inelástico: Ocorre quando um elétron interage com um único elétron atômico. Este elétron é então ejetado com energia cinética elevada e é chamado de raio delta (δ), tendo energia suficiente para provocar novas interações Coulombianas. Esta interação ocorre com menor frequência, em relação ao espalhamento elástico, porém, como a fração de energia cedida pelo elétron incidente é elevada, as frações de energia cedidas ao meio, em ambos os tipos de interação, são da mesma ordem de grandeza [2,3,4].

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

Perda de energia por colisão: ocorre por meio de um grande número de colisões com elétrons atômicos, o que resulta na excitação e ionização do material atravessado. A teoria clássica indica que o elétron incidente fornece um impulso ao elétron atômico, o qual é proporcional à força do campo Coulombiano e ao tempo de atuação do elétron. O momento transferido ao elétron atômico é proporcional ao tempo de interação, ou seja, a $1/v$, onde v é a velocidade do elétron. Assim, a energia recebida pelo elétron atômico é proporcional a $1/v^2$ ou $1/E$, onde E é a energia do elétron incidente. A perda de energia dE ao longo de um incremento de percurso dl será também proporcional à densidade eletrônica do meio atravessado. Quando a energia do elétron é relativística, sua velocidade se aproxima de um valor constante e a variação $1/E$ de dE/dl se modifica. Entretanto, a contração do campo elétrico torna as colisões distantes mais prováveis e dE/dl aumenta levemente [2,3,4].

Perda de energia por radiação: segundo a teoria eletromagnética clássica, uma partícula carregada sob uma aceleração f emite radiação a uma taxa proporcional a f^2 . Para uma partícula carregada no campo de um núcleo de número atômico Z , f é proporcional a ZM , onde M é a massa da partícula. A taxa de emissão de radiação é, por isto, proporcional a $(Z/M)^2$. Por causa da dependência com $1/M^2$ a perda de energia por radiação não é importante para qualquer partícula mais pesada que o elétron, aumentando proporcionalmente com a energia do elétron. A taxa de perda de energia por emissão de radiação representa menos de 1% da perda total de energia para elétrons de 1 MeV em tecido biológico, chegando a ser o processo predominante de perda de energia quando a energia do elétron é superior a 100 MeV, na mesma matéria. [2,3].

2.1.1. Poder de frenagem

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

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

Poder de frenagem por radiação: Consiste na energia média cedida por unidade de percurso por causa da emissão de "*bremsstrahlung*" no campo elétrico do núcleo atômico e dos elétrons do átomo [1,2,6].

O poder de frenagem total de massa, S/p , de um material irradiado com partículas carregadas é o quociente de dE por p/dl onde dE é a energia perdida por uma partícula carregada que atravessa uma distância dl num material com densidade p [2,5,6,7].

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

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

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

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

2.1.2. Alcance dos elétrons

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

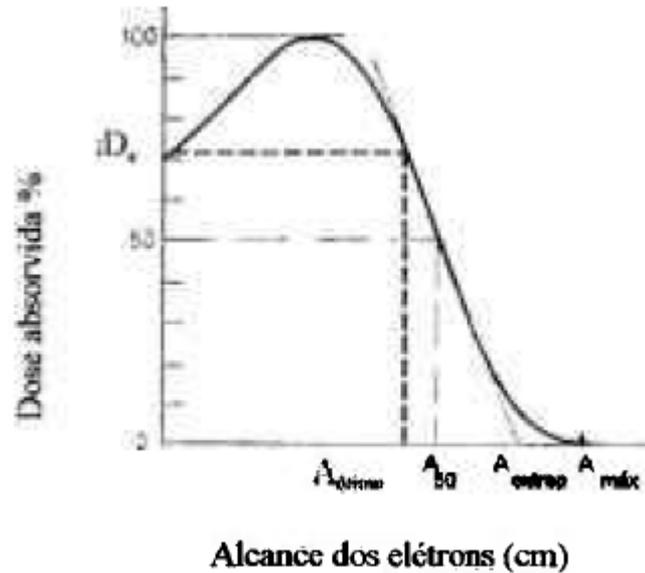


Figura 1 – Alcance dos elétrons na espessura do material

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

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

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

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

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

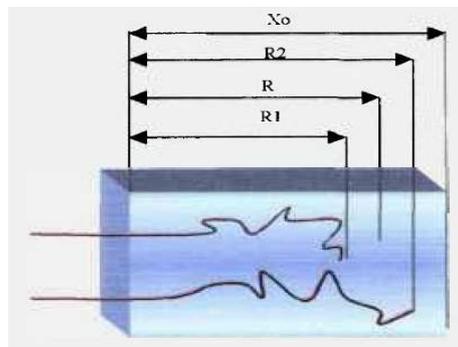


Figura 2 - Diagrama das possíveis trajetórias de dois elétrons com a mesma energia inicial, em um material absorvedor de espessura X_0 . OS alcances, CSDA, R_1 e R_2 (ou caminho total percorrido) seguem uma distribuição estatística e o alcance médio R representa o valor médio da distribuição.

A energia na superfície do material absorvedor é de:

$$E_a^0 \text{ (MeV)} = C_1 \text{ (MeV.cm}^{-1}\text{)} A_{\text{extap}} \text{ (cm)} + C_2 \text{ (MeV.cm}^{-1}\text{)} \quad (4)$$

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

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

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

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

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

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

A energia da radiação incidente dada em função dos alcances A_{50} , A_{Otimo} e A_{Extrap} pode ser calculada por:

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

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

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

2.2. INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO GAMA COM A MATÉRIA

Existe uma diferença significativa entre a interação da radiação gama com a matéria e a interação de partículas alfa e beta, e isto se torna evidente devido ao maior poder de penetração dos raios gama. As radiações eletromagnéticas (X e Y) mostram uma característica exponencial de absorção na matéria e não têm alcance definido como no caso das partículas carregadas. Estas últimas perdem sua energia durante a trajetória por causa

de um grande número de colisões com os elétrons atômicos, essa perda ocorre em numerosas e pequenas frações acarretando uma queda gradual da velocidade até parar e ser absorvida. Entretanto, quando um feixe de fótons incide num absorvedor fino, cada fóton do feixe reage individualmente num único evento, que é um processo de absorção real em que o fóton desaparece, ou ainda pode ser espalhado para fora do feixe [8].

Os principais processos responsáveis pela absorção da radiação eletromagnética são:

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

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

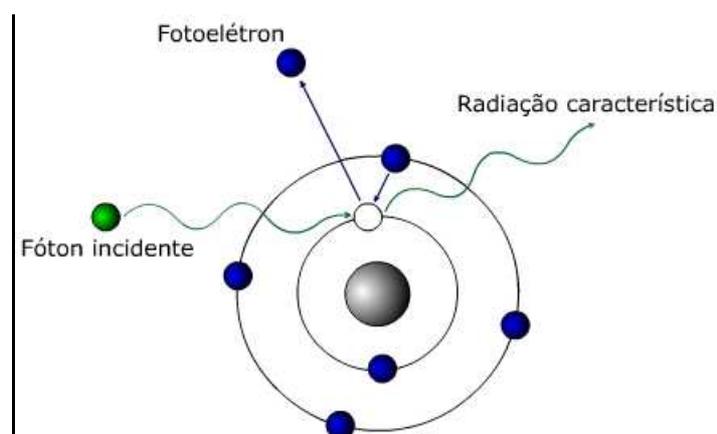


Figura 3 – caracterização do efeito fotoelétrico

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

Os estudos de dependência energética mostram que, para um dado elemento, o efeito é muito maior em energias baixas de fótons do que em altas. Portanto, o efeito fotoelétrico é especialmente importante na absorção de fótons de energias baixas por elementos pesados [2,4,9].

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

O elétron que recua tem uma energia cinética dada por $T = hv_0 - hv$, onde hv_0 é a energia do fóton incidente e hv é a energia do fóton que recua.

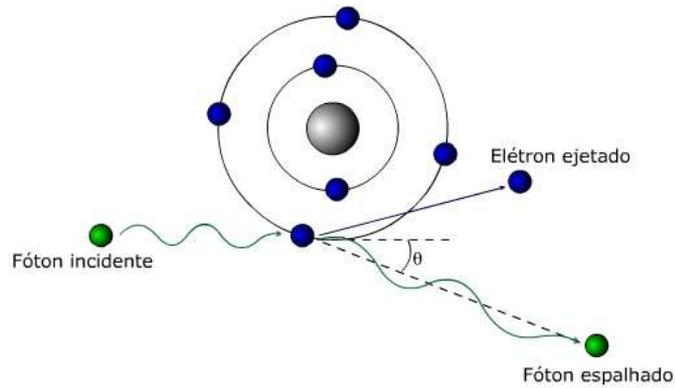


Figura 4 – representação do espalhamento Compton

A probabilidade de ocorrer o espalhamento Compton, por átomo, dependerá da quantidade de elétrons por grama de material, ou densidade eletrônica do meio; desta forma aumenta linearmente com o número atômico do meio absorvedor [2,9].

Em energias suficientemente altas, maiores que 1,02 MeV, tanto a absorção fotoelétrica como o espalhamento Compton perdem sua importância em comparação com a produção de pares. Neste último processo, no campo Coulombiano de um núcleo atômico, um raio gama com energia suficiente desaparece e são criados um elétron e um positron [8,9].

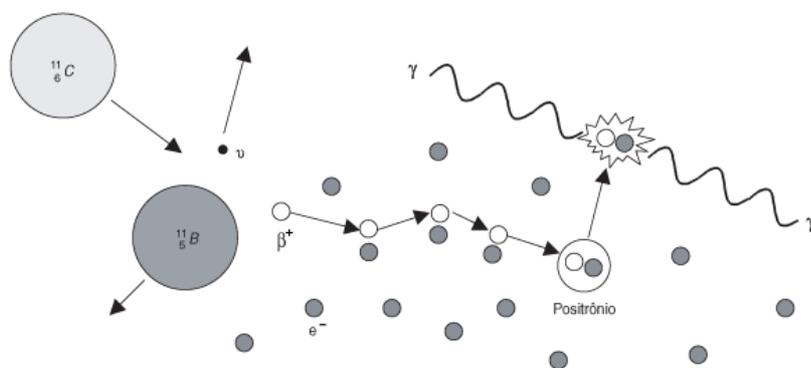


Figura 5 – representação da formação e aniquilação de pares

Para que a produção de pares ocorra, a energia do fóton incidente deve ser equivalente a $2m_0^2$ ou 1,02 MeV, que corresponde à quantidade de energia de repouso das duas partículas. Na interação com fótons de energias maiores que 1,02 MeV, o excesso de energia se transforma em energia cinética do positron e do elétron.

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

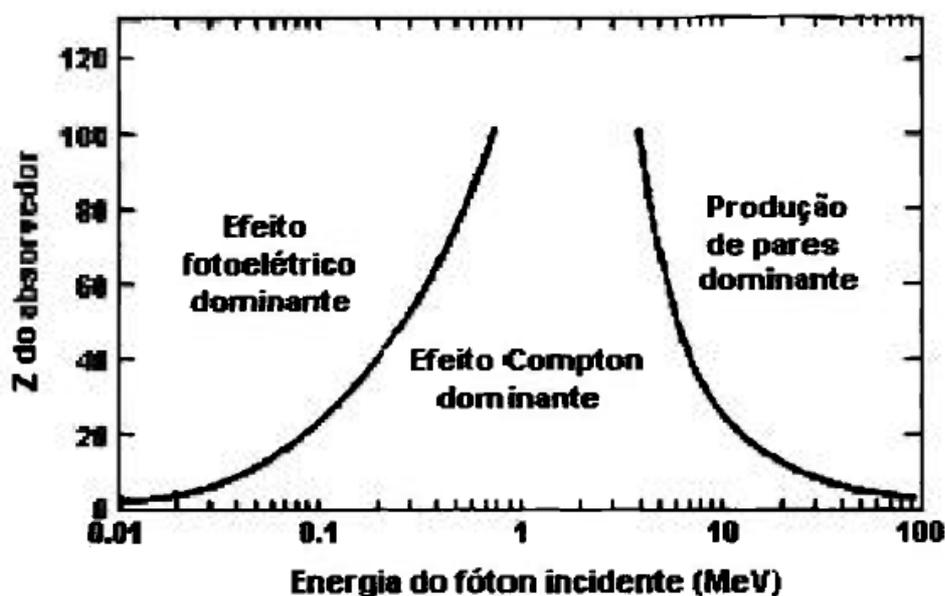


Figura 6 – Probabilidade de ocorrência de efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares em função da energia da radiação eletromagnética incidente e do número atômico Z do absorvedor [2,8,9]

A absorção de raios gama pelo processo de produção de pares é acompanhada pelo processo inverso, o da aniquilação elétron-positron. Um positron, após ser formado, é moderado por colisões com átomos até que esteja praticamente em repouso. Ele, então,

interage com um elétron que também está praticamente em repouso. As duas partículas desaparecem e surgem dois fótons se movendo em sentidos opostos, cada um com a energia de 0,511 MeV, igual à energia de repouso de um elétron [2,8,9].

2.3. DOSIMETRIA DAS RADIAÇÕES

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

O principal objetivo da dosimetria é fornecer uma estimativa precisa das doses máximas e mínimas de radiação ionizante administrada durante um processo específico.

Há várias razões para verificar a dosimetria durante um processo. Existem normas internacionais que estabelecem requisitos legais para esterilização de produtos alimentares e medicamentos e a dosimetria é o parâmetro fundamental para uma boa irradiação.

Vários estudos foram realizados considerando aspectos dosimétricos. *Kaluska et al* [10] apresenta algumas análises para a comparação de distribuição de dose por feixe de elétrons utilizando softwares específicos, e *Lazurik et al* [12] desenvolveu um software para simular a distribuição de dose em diferentes produtos, tanto para feixes de elétrons, quanto para Raios-X e radiação gama, o que veio a facilitar a escolha do sistema dosimétrico adequado.

Na maioria dos processos em que se usa radiação ionizante para fins de processamento industrial, a uniformidade e exatidão da dose absorvida nos produtos são essenciais para introduzir propriedades desejadas no material. A dosimetria tem um papel importante no desenvolvimento do processo, desde a fase experimental até o estágio de produção, pois uma medição precisa da dose absorvida, com sistemas dosimétricos

confiáveis, garante o sucesso no processamento dos produtos. A dosimetria é importante também no controle de qualidade, onde as informações das doses de radiação podem substituir muitos testes finais de aceitabilidade.

Em todos os processos de irradiação, a prática da dosimetria é adotada como um controle necessário e imprescindível para estabelecer os parâmetros do processo, assim como é usada para o acompanhamento de pesquisas e desenvolvimento. Como a dosimetria permite estabelecer valores quantitativos, que são associados às mudanças físicas, químicas ou biológicas, induzidas pela radiação, conseqüentemente é a metodologia aplicada para assegurar que esse processo, além de atender às especificações estabelecidas em normas, também assegure que os resultados obtidos no laboratório possam ser reproduzidos em outros laboratórios semelhantes, ou em uma instalação de irradiação de porte industrial [2,14,15].

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

A determinação de dose absorvida, em um amplo intervalo de taxas de dose para diferentes meios e ambientes, pode apresentar alguns desvios, influenciados por efeitos de saturação, problemas atmosféricos diversos, dependência da resposta com a energia da radiação incidente e com a taxa de dose. A habilidade para corrigir estes desvios e minimizar a imprecisão, consiste na correta aplicação dos procedimentos e na utilização de materiais dosimétricos adequados para cada procedimento [7,16,17].

Mesmo quando o processo envolve parâmetros de irradiação conhecidos e produtos bem homogêneos, a dosimetria não pode ser dispensada. Esta prática faz parte dos itens de auditorias que originam a documentação em processos de irradiação de materiais para a

medicina e biologia, irradiação de alimentos ou em outras tantas aplicações na indústria ou pesquisa.

Para que as práticas de irradiação de materiais sejam confiáveis, é necessário inicialmente estabelecer um cronograma para as práticas da dosimetria. Uma das partes mais importantes de tal cronograma é a determinação da dose. Irradiam-se materiais dosimétricos com densidade semelhante ao produto a ser irradiado trazido pelo requerente. Esses materiais, irradiados junto com o produto, são processados e a dose absorvida é calculada. O valor da dose é, então, associado às modificações físicas, químicas ou biológicas, observadas no produto irradiado [8].

O objetivo da dosimetria é associar quantitativamente a dose com os efeitos causados pela interação da radiação com a matéria, e na maioria das aplicações de doses altas a grandeza de maior importância na análise quantitativa desta interação é a *dose absorvida* [2,13,16].

O efeito da radiação ionizante em materiais processados tem uma melhor caracterização em termos de energia absorvida por unidade de massa do material, ou seja, dose absorvida. Conseqüentemente, técnicas precisas para determinar estas quantidades foram desenvolvidas para cada tipo de radiação utilizada.

Os sistemas dosimétricos estão sempre associados com a certificação das doses recebidas nos processos de irradiação. Assim, a escolha do sistema utilizado irá refletir na confiabilidade do sistema.

O sucesso de um serviço de irradiação industrial depende em grande parte da capacidade da Instalação em:

- Avaliar a dose absorvida pelos produtos;
- Determinar a distribuição de dose no produto;
- Determinar as doses mínima e máxima aplicadas ao produto;

- Controlar com eficácia todas as etapas do processo de irradiação.

A metodologia dosimétrica utilizada neste trabalho leva em consideração alguns procedimentos internos da Acelétron, bem como orientações do *Guidelines for the Calibration of Dosimeters for use in Radiation Processing* [18].

A Tabela 1 apresenta várias aplicações do feixe de elétrons, no intervalo de doses de 1,5 - 100000 kGy, como apresentado por *Somessari et.all* [19].

Tabela 1 – Aplicações do Feixe de Elétrons e doses de referência [19]

Uso	Material	Processo	Doses
Esterilização	Produtos médicos e biológicos, vírus, bactérias.	Esterilização por feixe de elétrons ou ^{60}CO	10 – 30 kGy 25 kGy (padrão)
Polímeros	Polietileno, Nylon, compostos, etc	Ligas de plástico, fio, cabo, espuma, etc.	~ 200kGy
Polímeros	Teflon	PTFE Degradação	~ 500 kGy
Meio Ambiente	Químico ou biológico	Radio esterilização	10 – 30 kGy
Alimentos	ervas, especiarias, carne vermelha, frutas, batatas, etc.	Controle da salmonela na carne, desinfestação de ervas, especiarias, etc.	• 0,15 KGy (desinfestação)
			• 1 – 1,5 KGy (retarda amadurecimento em frutas)
			• 3 - 10 kGy (descontaminação)
			• > 10 KGy (esterilização de especiarias)
Gemas	Topázio, pedras semi-preciosas, etc.	coloração	~100000kGy

A Dosimetria é um dos principais sistemas de uma instalação de irradiação. Segundo Miller [13] sistemas dosimétricos são utilizados na qualificação da instalação, no mapeamento de dose, no processo qualificação e no controle de processos de rotina.

A qualificação de instalação inclui de uma sequência de testes bem definidos para determinar o desempenho do equipamento. Estes testes incluem medições de feixe de energia, de uniformidade (transversal e longitudinal), e uma criteriosa distribuição de dose em um “*phantom*” ou *fantoma (simulador)*.

O mapeamento consiste na determinação da distribuição de dose. Para um determinado produto, ele fornece os pontos de dose mínima e máxima; estes estudos permitem a determinação da melhor configuração do produto no transportador, para uma máxima eficiência de transferência.

2.3.1. Grandezas e Unidades

2.3.1.1. Dose Absorvida

A dose absorvida é definida como a quantidade de energia $d\tilde{e}$ depositada em um elemento infinitésimo de matéria, por unidade de massa da matéria, dm :

$$D = \frac{d\tilde{e}}{dm} \text{ [Gy]} \quad (11)$$

Embora esta definição seja válida para a dose absorvida em um só ponto do meio absorvedor da radiação, geralmente é feita uma média sobre a massa finita do material. A dose absorvida é determinada com um dosímetro calibrado, em termos de energia depositada por unidade de massa em um dado material. No processamento por radiação o material de referência na maioria das calibrações é a água. A unidade de dose absorvida no Sistema Internacional de Unidades é o J.kg^{-1} e a unidade adotada na prática é o Gray [Gy] [2,8,16].

2.3.1.2. Taxa de dose absorvida

A dose absorvida por unidade de tempo é expressa como a taxa de dose absorvida D' :

$$D' = \frac{dD}{dt} \quad [\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}] \quad (12)$$

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

A unidade de taxa de dose absorvida no Sistema Internacional de Unidades é $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, e $\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$ é a unidade restrita [6,8,16].

2.3.1.3. Dose absorvida em outros meios

Quando se deseja calcular a dose absorvida em outros meios, D_m , diferentes da água ou ar, D_a a OU D_{ar} , deve-se levar em conta $(\mu_{en} / \rho)_a$ ou $(\mu_{en} / \rho)_{ar}$ e $(\mu_{en} / \rho)_M$, os coeficientes de absorção de massa da água ou ar e do material, respectivamente [6,8,16].

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

$$D_M = D_A \cdot \frac{(\mu_{en} / \rho)_M}{(\mu_{en} / \rho)_a} \quad [\text{Gy}] \quad (13)$$

2.3.2. Sistemas Dosimétricos

O padrão dosimétrico é um instrumento de medida usado para definir, representar fisicamente, conservar ou reproduzir a unidade de uma grandeza (seus múltiplos ou

submúltiplo), com o objetivo de transferi-la para outros instrumentos ou sistemas de medida. O padrão pode ser classificado como primário, secundário, terciário ou nacional [8].

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

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

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

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

Dosímetro primário ou de referência: Dosímetro de qualidade metrológica alta, capaz de medir diretamente a dose absorvida ou a grandeza física que pode ser associada com ela [8,9,13]. Os Padrões encontram-se em laboratórios de qualidade internacional reconhecida como o CEN (*Centre des Études Nucléaires - Saclay, Giv-sur Yvette, França*) ou, no caso da Aceléton, o (*Riso High Dose Reference Laboratory – Roskilde – Dinamarca*).

Dosímetro de campo ou transferência: Dosímetro suficientemente preciso e estável, que pode ser calibrado com um padrão de referência. Este tipo de dosímetro pode ser transportado para uma instalação de irradiação para a avaliação apropriada da dose, ou para calibrar dosímetros de rotina. A alanina e o etanol-clorobenzeno são exemplos deste tipo de dosímetros [2,8,9,13].

Dosímetro de rotina: É um sistema padrão de trabalho, usado rotineiramente nas instalações de irradiação, mas deve ser frequentemente calibrado com dosímetros de referência. Este dosímetro deve ser fácil de manusear e, preferencialmente, apresentar uma resposta rápida [2,8,9,13].

Os dosímetros de rotina podem ser usados para determinar a dose absorvida nos materiais, detectar variações no campo de irradiação, mapear a dose no local da irradiação e nas embalagens que contém produtos a serem irradiados e garantir a qualidade da irradiação. [14].

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

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

2.3.3. Dosimetria em processos de irradiação

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

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

A determinação da dose absorvida em materiais irradiados, por exemplo, por um feixe de elétrons gerado em um acelerador, baseada nos parâmetros operacionais deste acelerador é freqüentemente utilizada. Se estes parâmetros são estáveis ao longo do tempo, a dose determinada é correta. Mas se ocorrer qualquer desvio daqueles parâmetros,

a dose fica alterada e o operador não pode afirmar seu valor. Neste caso, os produtos devem ser eliminados o que torna o processo de irradiação economicamente caro.

Na realidade, a precisão no cálculo da dose absorvida depende sempre da energia dos elétrons, da intensidade do feixe e da geometria da amostra [13,20]. Por este motivo é imprescindível usar os dosímetros de rotina em todas as irradiações.

2.3.4. Propriedades dos Dosímetros

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

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

2.3.5. Calibração dos Dosímetros

Calibrar um dosímetro é obter a relação entre a dose absorvida e o efeito induzido pela radiação no mesmo. Para fazer a calibração utilizam-se instalações de irradiação, cuja taxa de dose é determinada e certificada por laboratórios padrão (*No caso desse estudo, foi utilizado o Rizo National Laboratory*). Os dosímetros devem ser irradiados com diferentes doses conhecidas e avaliados, para determinar o intervalo de dose útil. Os requisitos a seguir são também necessários:

- a) a dose absorvida deve ser especificada na calibração em função da dose absorvida na água, ou em outro meio material apropriado;
- b) a localização do dosímetro em relação à fonte de radiação de calibração deve ser reprodutível;
- c) quando exposto a fontes de radiação gama, o dosímetro deve ser envolvido com quantidade de material que assegure as condições de equilíbrio eletrônico;
- d) o campo de calibração dentro do volume ocupado pelo dosímetro deve ser mantido o mais uniforme possível e
- e) as condições ambientais devem ser controladas. A calibração deve ser realizada para cada lote produzido e o lote deve ser testado periodicamente para certificar se não ocorreram alterações de suas características [11].

Seria de fundamental importância, termos no Brasil um sistema de calibração compatível com os laboratórios primários internacionais, levando em consideração as reais condições físicas e ambientais da indústria brasileira, gerando, conseqüentemente, uma considerável economia, tanto financeira, quanto de tempo possibilitando assim, a otimização operacional no processo de irradiação industrial.

2.4. SISTEMAS DOSIMÉTRICOS

Neste trabalho, foram utilizados dois dosímetros diferentes: alanina e o filme radiocrômico B3. A alanina é produzida pela *alanina Eastman Kodak Company* e utiliza o *Bruker-scan* (EPR sistema espectrômetro). Os radiocrômicos são filmes produzidos por *B3 GEX Corporation* e são analisados com o Espectrofotômetro GENESYS 20, produzido pela *Thermo Fisher Scientific Inc.*



Figura 06 – Bruker e-scan



Figura 07 – Genesys 20

2.4.1. Dosímetro Radiocrômico

Os materiais radiocrômicos podem ser encontrados sob diversas formas e a mais comum é a de filmes, que são películas compostas por polímeros, com um aditivo sensível à radiação ionizante. Podem ser feitos de nylon, polivinil, poliestireno e outros tipos de compostos poliméricos com uma camada de corante cromóforo, cuja cor é intensificada pela radiação. Esses filmes são produzidos numa infinidade de espessuras, variando desde alguns microns até três milímetros [10, 21]. São amplamente usados em dosimetria, em que as doses estejam acima de 10 Gy, portanto em instalações consideradas pela Agência Internacional de Energia Atômica como de porte industrial [14,16]. Nessa mesma classificação, podem-se incluir também as instalações hospitalares em que existam aceleradores lineares para diagnóstico e terapia.

Os filmes radiocrômicos são usados como dosímetros de rotina e devem ser calibrados no mínimo uma vez por semestre com um padrão primário, ou, na falta deste, por

um dosímetro de transferência. O mesmo filme pode ser usado previamente em procedimentos como a validação do processo de irradiação, mapeamento de doses e licenciamento, se o intervalo de doses ao qual o dosímetro é capaz de responder for suficientemente amplo e se a leitura da dose for suficientemente exata e precisa. A Tabela 2 mostra alguns exemplos de filmes radiocrômicos.

Tabela 2 – Dosímetros radiocrômicos e intervalos de dose [4,7,13].

Dosímetro	Descrição (Métodos de análise)	Intervalo de dose (Gy)
Filme fino	Plástico incolor com várias dimensões, torna-se colorido com a irradiação (espectrofotometria ou densiometria)	$10^2 - 10^6$
Filme revestido com película radiosensível	Torna-se colorido com a irradiação (espectrofotometria ou densiometria)	$10^2 - 10^4$
Papel impregnado ou revestido	Geralmente branco, torna-se colorido com a irradiação (densiometria de reflexão)	$10^2 - 10^6$
Opti-crômicos	Pequenos guias de onda (densiometria)	$10 - 3 \times 10^4$
Soluções	Indicadores que se tornam coloridos com a irradiação (espectrofotometria)	$1 - 3 \times 10^4$

Vários corantes radiocrômicos, que se tornam coloridos em exposição a radiações ionizantes, têm sido desenvolvidos com sucesso como dosímetros. Os mais comuns destes são baseados em corantes que gradualmente mudam de claro para um azul profundo com o aumento da dose absorvida, e tintas a base de cianetos pararosanilina que mudam de cor clara para tons de vermelho e roxo com aumento da dose. Os corantes podem ser utilizados em qualquer forma líquida ou incorporados em filmes de polímeros para formar dosímetros

sólidos. Eles normalmente têm uma vida útil longa, são relativamente independentes da taxa de dose e o procedimento de leitura deles é simples, exigindo apenas um espectrofotômetro. No caso dos filmes, a dependência da temperatura de irradiação é relativamente pequena. No entanto, esses dosímetros devem ser protegidos da luz UV e das variações na umidade, e devem ser hermeticamente fechados. As superfícies ópticas dos filmes não devem ser tocados ou riscados, e devem estar livres de poeira ou fiapos para que as leituras de densidade óptica sejam exatas.

O dosímetro radiocrômico B3 consiste de quadrados de plástico com área de 1 cm², aproximadamente, bem finos (< 20 microns) montados em suporte de papelão para uma fácil manipulação. Eles são acondicionados em bolsas-folha laminadas para proteção contra umidade e luz UV. Recomenda-se pelo fabricante, que estes filmes sejam incubados por 15 minutos a 60 °C após a irradiação antes de fazer a medição da densidade óptica em espectrofotômetro (comprimento de onda recomendado de 554 nm). O intervalo de dose sugerido é de 2-80 kGy, apesar de precisão tender a diminuir abaixo de cerca de 5 kGy.

2.4.1.1. Espectrofotometria

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

Os espectrofotômetros se utilizam de fontes de radiação eletromagnética contínua, os quais emitem luz em um intervalo de comprimento de onda que pode se estender desde a região visível do espectro à região ultravioleta. Para que possam utilizar bandas de comprimento de onda estreito, é necessário um monocromador ou filtros que permitam selecionar o comprimento de onda de interesse.

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

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

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

$$I / I_0 = T \quad (14)$$

Onde: I = intensidade da luz transmitida; I₀ = intensidade da luz incidente; e T = transmitância.

A transmitância costuma ser expressa em valores percentuais:

$$\%T = I / I_0 \times 100 \quad (15)$$

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

Lei de Lambert-Beer: A combinação das duas leis, de Lambert e de Beer, define a relação existente entre transmitância (T) e absorvância (A) e vem dada por [17]:

$$A = \log (I_0/I) = l \text{ o g } 100 / T = \epsilon C_x \quad (16)$$

Onde: A = Absorção óptica após a irradiação (adimensional), ϵ = Absorptividade molar ($\text{dm}^3 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$), C = Concentração molar ($\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$), e X = Caminho óptico percorrido pela luz na amostra (cm).

O valor de ϵ é função do comprimento de onda, portanto a lei (16) só é verdadeira para um comprimento de onda específico. À medida que se aumenta a concentração do elemento cromóforo na solução ou na amostra sólida, a resposta da absorvância A e da transmitância T varia.

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

A diferença entre a absorvância depois da irradiação e aquela determinada antes da irradiação, é representada por $\Delta A = (A - A_0)$. Como nem todos os filmes do mesmo lote apresentam a mesma espessura, é feita uma correção, dividindo a diferença ΔA pela espessura X do filme [3,14,20]. Escreve-se então:

$$\alpha \equiv \Delta A / X \quad \text{ou} \quad \alpha \equiv (A - A_0) / X \quad (17)$$

Onde: A = Absorção óptica após a irradiação (não há unidade); A_o = Absorção óptica antes da irradiação (não há unidade); X = Espessura do filme (mm), e α = Coeficiente de absorção óptica (mm^{-1}).

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

Tabela 3 – características de dosímetros padrão de referência [13].

Característica	Pastilha de Alanina	Filme de Alanina	Radiocromico B3
Instrumento	Espectrômetro ESR	Espectrômetro ESR	Espectrofotometro
Tamanho / Formato	Pastilhas de 50 mg	5,6875” x 0,15625” x 0,014”	1cm x 1 cm, 50 μ
Precisão	< 2%	< 3%	5 – 10%
Vida útil	Excelente	Excelente	Muito bom
Estabilidade	Excelente	Excelente	Muito bom
Dose (KGy)	0,1 - 100	0,5 - 100	2 – 80
Taxa de Dose	Excelente	Muito Boa	Muito Boa
Fatores Ambientais	Muito Bom	Muito Bom	Umidade, UV
Disponibilidade	Boa	Boa	Excelente
Custo	Caro	Caro	Econômico

2.4.2. Dosímetro de Alanina

A interação da radiação ionizante com compostos orgânicos forma radicais livres, que são muito reativos com elétrons desemparelhados. A concentração de tais radicais livres pode ser medida por meio de ressonância paramagnética eletrônica (ESR). Conseqüentemente, a produção de radicais livres pode servir de base para um dosímetro de

alta qualidade, desde que a concentração seja precisamente relacionada com a absorção de dose e não mude sensivelmente com o tempo após a irradiação. Essas circunstâncias foram obtidas com o ácido amino cristalina - alanina.

Um espectro típico do radical livre da alanina predominante é mostrado na Figura 8. É composto de vários picos, devido à divisão hiperfina do elétron não emparelhado com os átomos de N e H. A intensidade do sinal é geralmente representada pela diferença entre o mínimo e o máximo do pico central. Para corrigir as variações de sensibilidade do espectrômetro, uma amostra de referência com um sinal de ESR é lida simultaneamente com uma amostra irradiada de alanina. MgO:Mn²⁺ é comumente usado para esta finalidade.

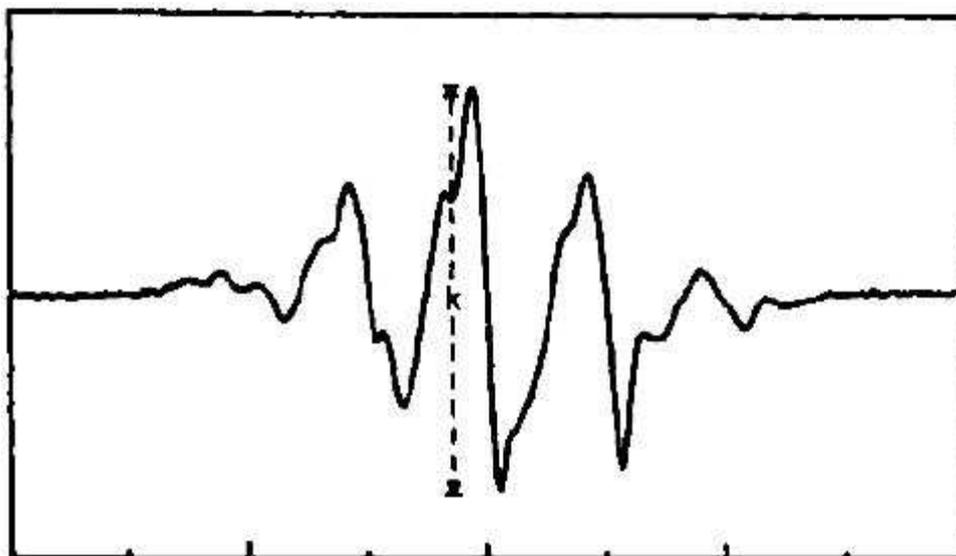


Figura 8 – Um típico espectro ESR para uma amostra irradiada de alanina.

Dosímetros de alanina são geralmente preparadas por compressão da alanina em pó puro com uma adequada encadernação de plástico. Eles estão disponíveis comercialmente em pastilhas ou filmes plásticos. Ambos os tipos de dosímetros podem ser convenientemente lidos usando o *E-Scan* espectrômetro de ESR fabricado pela *Bruker*

Corporation. Os filmes vêm com código de barras e são especialmente fáceis de usar. Problemas com a umidade já foram resolvidos, e a precisão da dose fornecida pelo filmes é quase tão boa quanto à da pastilha, que é excelente. O único problema desta abordagem em relação aos outros sistemas de dosimetria é o custo. Por exemplo, o espectrômetro Bruker é aproximadamente uma ordem de grandeza mais caro do que um bom espectrofotômetro, e ambos os filmes e pelotas custam aproximadamente \$ 1 cada (ainda que para baixa dose, eles possam ser usados mais de uma vez). O sinal depende da quantidade de alanina na amostra.

Tabela 4 – Comparação de abordagens dosimétricas

Dosímetro	Vantagens	Desvantagens
Pastilha de Alanina	<ol style="list-style-type: none"> 1. pode ser lido imediatamente 2. mais Preciso (2,5%) 3. dose estabiliza com o tempo 4. não afetado pela manipulação 5. excelente vida útil 6. boa disponibilidade 7. excelente taxa de dose 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Dispendioso 2. difícil obtenção das medidas de energia 3. tempo de leitura de aproximadamente 40 segundos por pastilha
Filme Radiocrômico B3	<ol style="list-style-type: none"> 1. baixo custo 2. fácil obtenção das medidas de energia 3. excelente disponibilidade 	<ol style="list-style-type: none"> 1. deteriorização da precisão (5 – 10%) 2. significativo tempo de espera antes do uso da incubadora 3. deve ser manuseado com o auxílio de pinças 4. requer cuidado na estocagem 5. não deve ser usado para doses abaixo de 2 kGy

Este estudo apresenta uma comparação das duas tecnologias no intervalo de doses de 1-80 kGy, tendo em conta o custo inicial, a precisão, tempo de leitura, calibração, entre outros.

2.5. SISTEMA DE FEIXE DE ELÉTRONS

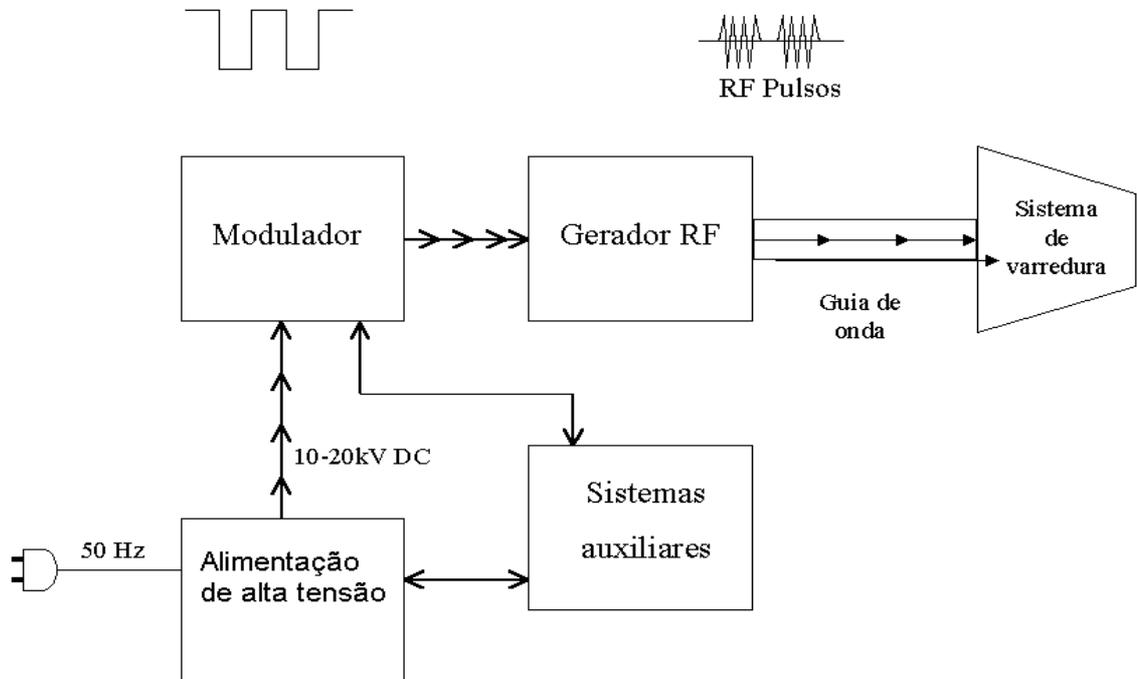


Figura 9 – Esquema geral de um Sistema de Feixe de Elétrons

O feixe de elétrons é gerado em um semicondutor catódico, que usa eletricidade para gerar elétrons numa fonte pontual e focalizá-los em um feixe através de campos magnéticos, acelerando-os até uma velocidade perto da velocidade da luz, utilizando pulsos de radiofrequência. O dispositivo onde o feixe é gerado é chamada acelerador.

Ao penetrarem no meio, os elétrons colidem muitas vezes com os átomos do material irradiado, ionizando-os. Cada elétron no feixe de energia ioniza milhares de átomos dentro do material, antes de vir a perder toda a sua energia ou atravessar o material.

Este sistema é aplicado em forma de varredura sobre os produtos que, dentro de embalagens, são transportados por uma esteira móvel e irradiados ao passarem pelo feixe de elétrons. A taxa de dose de cada acelerador linear permanece constante. A dose

aplicada ao produto pode ser variada com ajuste na velocidade da esteira transportadora, controlando assim o tempo de exposição do produto ao feixe.

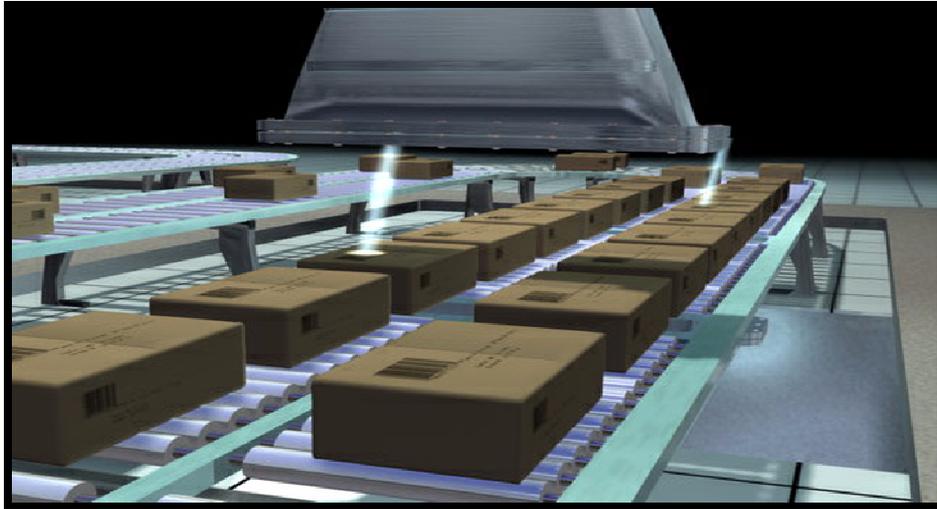


Figura 10 – Sistemas de Varredura e de transporte

2.5.1. Acelerador Linear

O acelerador linear é o principal componente do sistema de feixe de elétrons. É nesta parte do equipamento que os elétrons são gerados e agrupados num feixe. Uma das vantagens deste sistema é que não existem partes móveis no acelerador linear, o que resulta em uma necessidade mínima de manutenção do sistema.

Este estudo foi realizado na Acelétron, onde existe um equipamento (um RF LINAC) cuja função é aumentar a energia cinética dos elétrons injetados na estrutura de aceleração. Os elétrons são injetados com energias da ordem de dezenas de keV e saem com energias de vários MeV, o que corresponde a velocidades próximas da à da luz e com o resultante aumento da massa dos elétrons. Este aumento de energia é obtido através de pulsos de microondas injetados na estrutura de aceleração provenientes de um amplificador de RF (radiofrequência) *klystron*.

O acelerador linear é composto dos seguintes componentes principais: Fonte de Elétrons, Sistema de RF, e Seção de aceleração.

Os elétrons são produzidos por uma superfície aquecida na entrada do acelerador e são injetados no guia de ondas de aceleração. A primeira seção do guia de ondas é uma seção de agrupamento. As cavidades desta seção são projetadas para acoplar a energia de RF com os elétrons, agrupá-los e aumentar sua velocidade a um valor próximo à da luz.

Ao saírem da seção de agrupamento, os elétrons entram numa outra onde a velocidade é constante (relativística) e continuam a aumentar a energia, até alcançarem a energia de projeto de 10 MeV. Os elétrons saem do acelerador através de uma janela de titânio de 0,003" de espessura.

2.5.2. Fonte de Elétrons

A fonte de elétrons consiste de um catodo feito de tungstênio sinterizado, impregnado com bário e com um filamento térmico que eleva a temperatura até 1200°C. As pequenas dimensões físicas do catodo resultam num feixe de dimensões diminutas. Como o catodo é cercado por material isolante e é operado numa tensão relativamente baixa, um tanque de óleo não é necessário para isolamento.

2.5.3. Estrutura de Aceleração

A estrutura de aceleração é do tipo onda estacionária (SWG). Esta estrutura usa cavidades ressonantes para estabelecer os elevados campos elétricos na direção axial que acelera os elétrons até perto da velocidade da luz. Estes campos elétricos são gerados pela energia de RF introduzida na estrutura de aceleração através de guias de onda retangulares proveniente do amplificador klystron que opera com uma potência de pico de 4MW.

A SWG usa cavidades axiais com simetria circular e cavidades de acoplamento laterais que transferem a energia de RF entre as cavidades axiais. As cavidades laterais são projetadas de modo a terem um tamanho mínimo, possibilitando assim que outras partes do sistema possam ser facilmente colocadas em volta da estrutura de aceleração. As cavidades axiais são projetadas para maximizar o campo elétrico ao longo do eixo do feixe. O comprimento da estrutura é de cerca de 1m e é projetado para operar com uma energia dos elétrons de 10 MeV com uma potência média de 18 kW.

2.5.4. Válvula de Vácuo

Uma válvula de alto vácuo está instalada no eixo do feixe, imediatamente após o término da seção de aceleração. No evento de ser necessária manutenção no eixo da estrutura que resulte na eliminação do estado de vácuo, esta válvula pode ser fechada para manter a integridade do vácuo no restante da seção.

2.5.5. Monitores de Corrente do Feixe

Monitores de corrente toroidais redundantes são posicionados no eixo do feixe para medir a amplitude do pico de corrente do feixe, que é um dos parâmetros críticos no controle da dose fornecida.

2.5.6. Bunker

As instalações da Acéletron utilizam um *bunker* de concreto para fornecer a proteção necessária da radiação ionizante produzida pela interação dos elétrons com os materiais. A blindagem protege os trabalhadores e o público da radiação produzida durante a operação do equipamento. Quando o sistema é desligado, não existe emissão de radiação, sendo então possível entrar no *bunker* para inspeção ou manutenção.

2.5.7. Sistema de Esteiras

Os produtos são transportados para dentro da blindagem através de um sistema composto de diversos tipos de esteiras rolantes, que foi especificamente projetado para o irradiador de alimentos da Acelétron. O transporte básico de produtos para dentro e fora do *bunker* é feito através do sistema principal de esteiras rolantes. Uma das funções mais importantes deste mecanismo é o de assegurar que os produtos estejam colocados na posição que mais facilita um processamento uniforme e eficiente.

Para que se possa precisar a dose fornecida aos produtos, um sistema independente de esteira é utilizado para controlar a passagem dos produtos pelo feixe. Este sistema consiste de uma esteira controlada por um servo-motor que assegura um correto posicionamento do produto e o controle da velocidade. Estes fatores são essenciais porque como a energia do feixe é mantida constante, o controle da dose é feito pelo correto posicionamento do produto e pela velocidade da esteira.

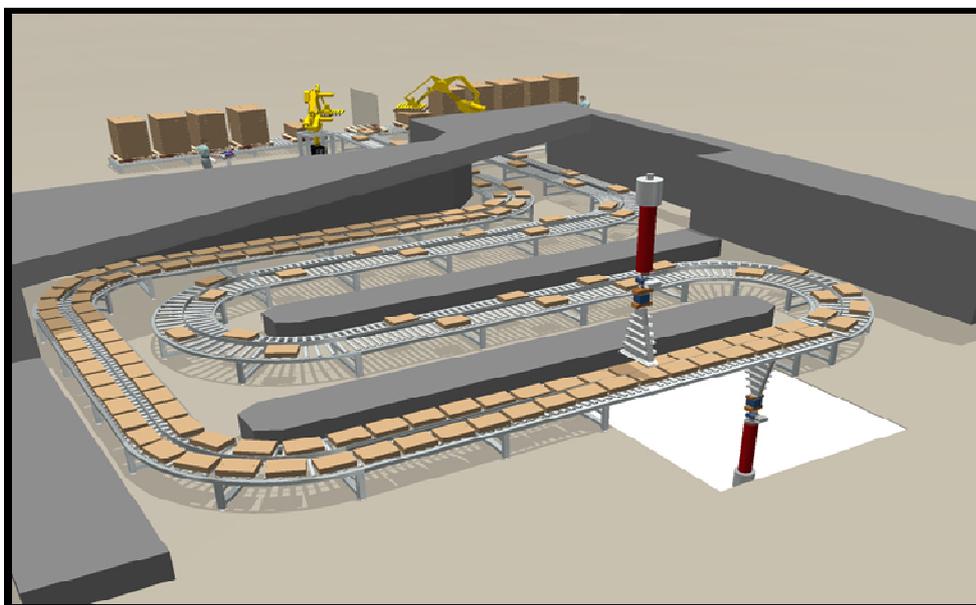


Figura 11 – Esquema geral do Acelerador Linear da Acéletron

METODOLOGIA

Quando do comissionamento da Acelétron, os dosímetros adotados foram os de Alanina. Para a obtenção da autorização, foram realizados todos os testes necessários para à utilização da radiação como agente de esterelização de produtos médico-hospitalares.

Com o surgimento da necessidade da validação de um novo sistema dosimétrico, foi escolhido para esta função o Filme Radiocrômico B3. Primeiramente, foi obtida a calibração dos dosímetros de referência por um laboratório primário, e então foram repetidos todos os testes aos quais a alanina fora submetida. Baseado nesses dados, foi traçado um paralelo de calibração.

3.1. CALIBRAÇÃO DOS DOSÍMETROS DE ALANINA

Para a calibração dos dosímetros de Alanina, foram realizados os testes descritos pelas ISO 13.485:2004 e ISO 11.137:2006, que regulamentam a utilização de radiação como agente de esterilização de produtos médico-hospitalar. Tais testes consistem em determinação da: energia, uniformidade de dose (profundidade) e uniformidade de varredura horizontal e longitudinal.

Estes testes garantem a qualidade necessária para a validação do processo de irradiação dos mais diversos produtos por feixe de elétrons.

Como este processo foi repetido para validação do Filme Radiocrômico B3, o detalhamento do procedimento foi feito na seção 3.3.

3.2. CALIBRAÇÃO DOS DOSÍMETROS DE REFERÊNCIA

Foram desenvolvidos testes de irradiação com os filmes radiocrômicos B3, utilizando dosímetros de referência de alanina, com o objetivo de verificar a veracidade dos dados referenciais fornecidos pelo fabricante, bem como traçar um paralelo de calibração entre este dosímetro e o de alanina (Os dosímetros foram calibrados pelo *Riso National Laboratory*), usando-se o seguinte procedimento:

- O filme radiocrômico foi irradiado, juntamente com o dosímetro de referência de Alanina (enviado pelo RISO), para doses variando de 1,25 a 80 KGy;.
- Registraram-se os valores de absorvância correspondentes a cada medida, bem como suas respectivas temperaturas, logo após cada medida;

Tabela 5 – Tabela de dados iniciais de dose e temperatura

Pastilha de Alanina (ID)	Nº do Dosímetro	Dose (KGy)	Temperatura Inicial (°C)	Temperatura Máxima (°C)	Data de Irradiação
AL576A	578	1.25	21,8 °C	< 27 °C	10/07/10
AL576A	579	2.5	21,8 °C	< 27°C	10/07/10
AL576A	580	5.0	21,8 °C	27,5 °C	10/07/10
AL576A	581	7.5	21,8 °C	30,0 °C	10/07/10
AL576A	582	10.0	21,8 °C	35,0 °C	10/07/10
AL576A	583	15.0	21,8 °C	40,0 °C	10/07/10
AL576A	584	20.0	21,8 °C	37,5 °C	10/07/10
AL576A	585	30.0	21,8 °C	42,5 °C	10/07/10
AL576A	586	50.0	21,8 °C	52,5 °C	10/07/10
AL576A	587	80.0	21,8 °C	62,5 °C	10/07/10
AL576A	598	CONTROL	CONTROL	CONTROL	CONTROL
AL576A	A26-1-2	CONTROL	CONTROL	CONTROL	CONTROL

- Os dados foram então enviados juntamente com os dosímetros de referência, ao *Riso National Laboratory*;
- No Riso, foram analisados os dosímetros de alanina para detrrminação das doses absorvidas, e estes dados foram então enviados ao fabricante do filme radiocrômico B3;

- Este então montou a curva de calibração do dosímetro e enviou à Acelétron;

3.3. DETERMINAÇÃO DA ENERGIA, UNIFORMIDADE DE DOSE E UNIFORMIDADE DE VARREDURA HORIZONTAL E LONGITUDINAL

Os procedimentos descritos abaixo foram desenvolvidos inicialmente para a utilização de dosímetros de alanina e a qualificação da instalação foi realizada com tais dosímetros.

Posteriormente, os mesmos testes foram realizados com o filme radiocrômico B3 para verificar a possibilidade de utilização destes dosímetros na operação de rotina.

3.3.1. Uniformidade de Varredura Horizontal e Longitudinal (Largura Horizontal e Longitudinal)

Para verificar a largura da varredura horizontal do feixe de elétrons dos aceleradores lineares, foram selecionados primeiramente o número de dosímetros calibrados necessários, os quais foram colocados no dispositivo de medição de varredura, de forma a garantir a presença deles a cada meia polegada, partindo do centro do dispositivo de varredura (em ambos os lados do dispositivo), bem como garantindo a presença de dosímetros em até uma polegada e meia, além da largura da varredura selecionada para verificação (em ambos os lados do dispositivo). Considerando-se a largura padrão de varredura horizontal adotada pela Acelétron de quarenta e oito polegadas, obteve-se uma distância de cinquenta e uma polegadas com dosímetros posicionados.

Para dosímetros em forma de filme, não é necessária uma embalagem adicional para proteção dos mesmos (ou seja, podem ficar expostos ao tempo). Contudo, o tempo de permanência do filme fora do laboratório de dosimetria deve ser o menor possível, para

minimizar a perda do pré condicionamento do mesmo, e para minimizar a exposição à radiação ultravioleta emitida pelas lâmpadas de iluminação do galpão.

Quando o dispositivo de medição ficou pronto e aprovado, o mesmo foi colocado no transporte horizontal, sempre com a face do dispositivo em que os dosímetros foram posicionados, virada para a direção de saída do feixe - face com dosímetros virada para cima para verificação da varredura do acelerador linear localizado na torre e face com dosímetros virada para baixo para verificação da varredura do acelerador linear localizado no poço.

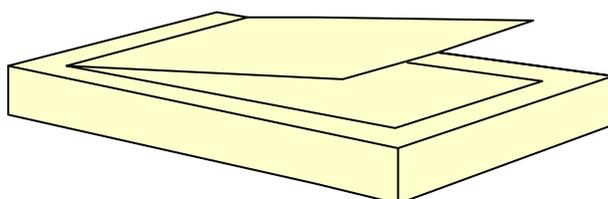


Figura 12 – Dispositivo de medição da uniformidade de varredura horizontal e longitudinal.

Para verificação da uniformidade de varredura longitudinal (largura longitudinal), o procedimento é idêntico ao descrito para varredura horizontal, sendo apenas o eixo de varredura do feixe rotacionado em 90°.

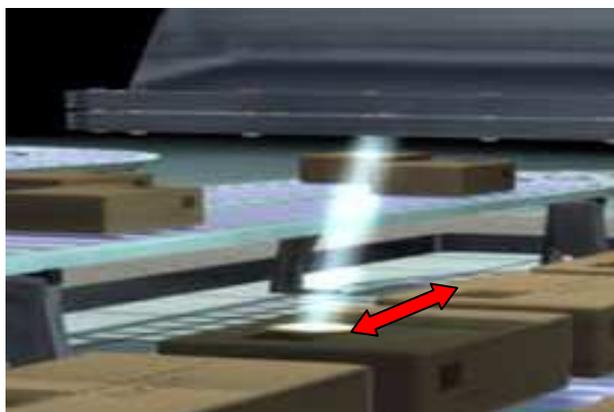


Figura 13 – sentido de varredura do feixe na verificação da uniformidade de varredura horizontal.

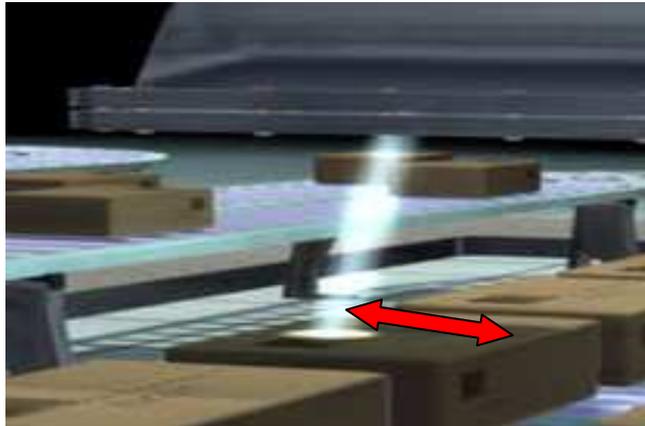


Figura 14 - sentido de varredura do feixe na verificação da uniformidade de varredura longitudinal.

3.3.2. Energia

Para determinação da energia do feixe de elétrons, abre-se a embalagem e retira-se o cartão de dosímetros. O cartão é então posicionado de tal forma que o dosímetro de menor numeração esteja na parte mais grossa do bloco inferior. Os furos do cartão são alinhados com os pinos do bloco. Este bloco foi previamente calibrado pelo *Riso National Laboratory*.

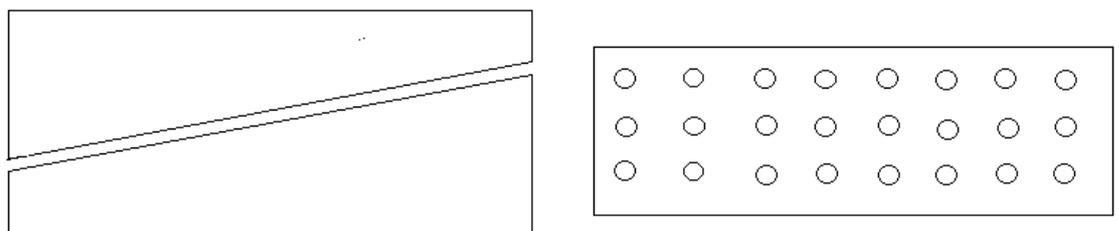


Figura 15 – Bloco de alumínio utilizado para obtenção da energia do feixe de elétrons.



Figura 16 – Cartão de dosímetros.

Coloca-se, então, a parte superior do bloco e prende-se o conjunto com uma fita (para mantê-lo fixo durante a irradiação). Com o bloco na sua posição de irradiação correta, de tal forma que o feixe de elétrons irradie primeiro a parte frontal do conjunto, irradia-se o bloco com o feixe de um dos aceleradores (Torre ou Poço).

Retira-se o bloco o mais rapidamente possível após a irradiação, transportando-o ao laboratório de dosimetria (com o cuidado de remover a parte frontal dele para remover o cartão). Determina-se a dose absorvida por cada dosímetro presente no cartão utilizando o programa *WINDose*.

O Windose é o programa utilizado pela GEX Corporation. O sistema dosimétrico Windose integra o gênese 20 a um computador pré-formatado, produzindo relatórios de forma simples e rápida através da entrada automática dos dados coletados diretamente dos dosímetros.

De posse dos valores de dose absorvida por cada dosímetro, é confeccionada uma planilha de calibração para completar as informações de processamento.

Os dosímetros em cada cartão foram posicionados em ordem seqüencial, dessa forma, digita-se o primeiro número de série do dosímetro na primeira célula da planilha.

Os valores de absorbância dos dosímetros são então medidos e armazenados. Como a energia determina a penetração dos elétrons, quanto menor for a energia, menos dosímetros irão registrar uma dose significativa. Dessa forma interrompe-se a leitura quando são obtidas dois ou três valores de absorbância correspondentes aproximadamente ao background do dosímetro.

A energia é automaticamente estimada (usando os procedimentos das normas internacionais) pelo programa *WINdose*.

Com os dados obtidos, traçamos uma curva de penetração em função da dose e calculamos a energia.

Repetimos o procedimento para o feixe do outro acelerador.

3.3.3. Uniformidade de dose (Profundidade)

PROCEDIMENTO:

- Para distribuição comercial, todos os produtos irradiados devem ter uma verificação da profundidade de dose.
- A verificação da uniformidade de dose é requerida para a validação dos aceleradores lineares e a consequente qualificação das instalações.

A verificação da uniformidade de dose é fator determinante para:

- Estabelecer qual modalidade de feixes deve ser utilizada (somente o feixe da torre, somente o feixe do poço ou ambos os feixes).
- Estabelecer a velocidade da esteira de processamento.

Prepara-se o dispositivo padrão de irradiação, posicionando-se os dosímetros ao longo do plano central do dispositivo. A distância entre os dosímetros não foi maior que 2,5 cm de forma que, no total, cobriu-se uma extensão de 60 centímetros.

Colocou-se o dispositivo no centro da esteira e irradiou-se o dispositivo utilizando os dois feixes. Determinou-se então, a leitura de cada dosímetro e sua posição.

A uniformidade de dose deve ser tal que todas as leituras estejam dentro de 5% da média de todas as doses registradas.

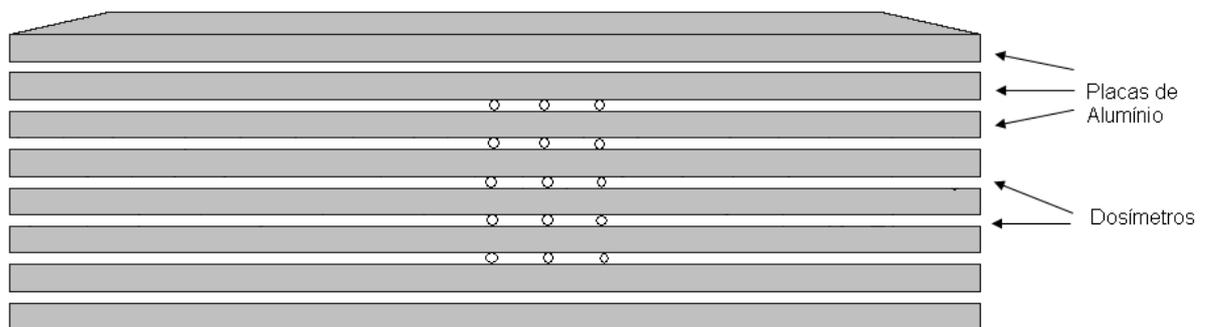


Figura 17 – Dispositivo para obtenção da uniformidade de dose.

3.3.4. Critério para aceitação dos Resultados

A maior dose entre os dosímetros posicionados no dispositivo de medição de varredura não deve exceder a dose média entre os mesmos dosímetros em mais de 7,5% (sete e meio por cento). A menor dose entre os dosímetros posicionados no dispositivo de medição de varredura não deve ser menor que a dose média entre os mesmos dosímetros em mais de 7,5% (sete e meio por cento). Esses valores estão conforme as normas ISO 13.485:2004 e ISO 11.137:2006.

RESULTADOS

4.1. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA ALANINA

Para a calibração sistema dosimétrico da alanina, foram realizados os testes de uniformidade de dose, energia e uniformidade de varredura horizontal e longitudinal.

4.1.1. Teste Operacional da Uniformidade de Varredura Horizontal

O Primeiro teste realizado foi o de Uniformidade de Varredura Horizontal. A tabela 6 foi elaborada com os dados obtidos neste procedimento e, a partir desta, foi traçado o gráfico 1 correspondente.

Tabela 6 – Uniformidade de Varredura Horizontal da Alanina

Distância (cm)	Dose (kGy)	Distância (cm)	Dose (kGy)
0	0,736	35,0	0,728
2,5	0,751	37,5	0,721
5,0	0,741	40,0	0,731
7,5	0,736	42,5	0,723
10,0	0,743	45,0	0,718
12,5	0,721	47,5	0,733
15,0	0,735	50,0	0,731
17,5	0,729	52,5	0,724
20,0	0,706	55,0	0,702
22,5	0,735	56,3	0,694
25,0	0,716	57,5	0,702
27,5	0,736	58,8	0,673
30,0	0,718	60,0	0,636
32,5	0,730		

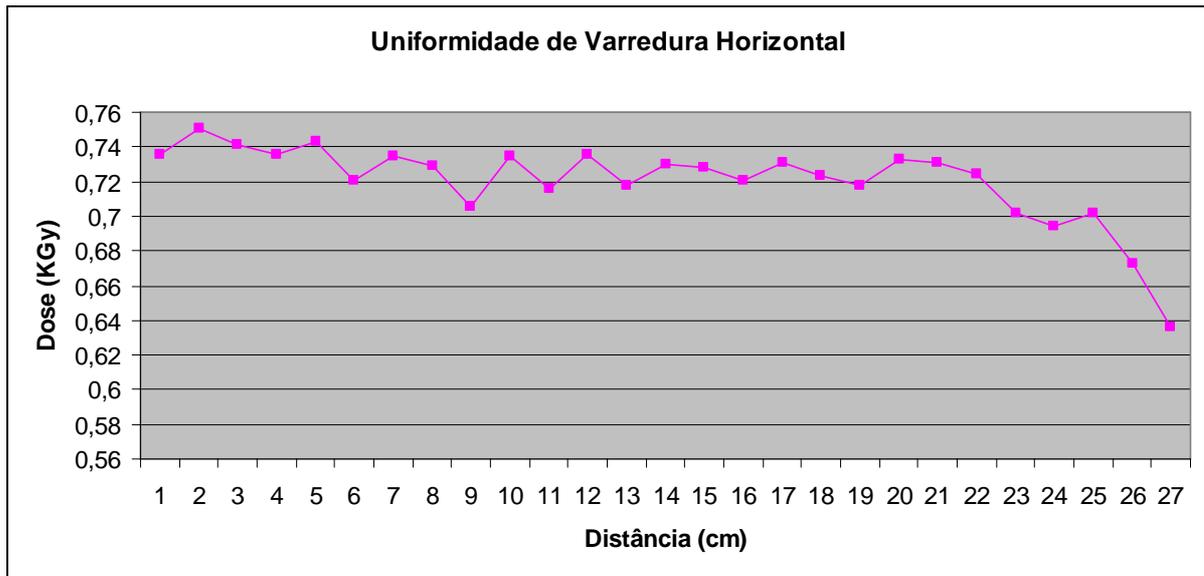


Gráfico 1 – Uniformidade da Varredura Horizontal da Alanina

4.1.2. Teste Operacional da Uniformidade de Varredura Longitudinal

O teste realizado foi o de Uniformidade de Varredura Longitudinal. Os dados deste geraram a Tabela 7 e o gráfico 2 correspondente.

Tabela 7 – Uniformidade de Varredura Longitudinal da Alanina

Distância (cm)	Dose (kGy)	Distância (cm)	Dose (kGy)
0	0,180	35,0	0,183
2,5	0,185	37,5	0,186
5,0	0,180	40,0	0,183
7,5	0,183	42,5	0,182
10,0	0,186	45,0	0,183
12,5	0,184	47,5	0,183
15,0	0,183	50,0	0,185
17,5	0,186	52,5	0,185
20,0	0,185	55,0	0,186
22,5	0,184	57,5	0,185
25,0	0,187	58,8	0,182
27,5	0,188	60,0	0,182
30,0	0,187		
32,5	0,183		

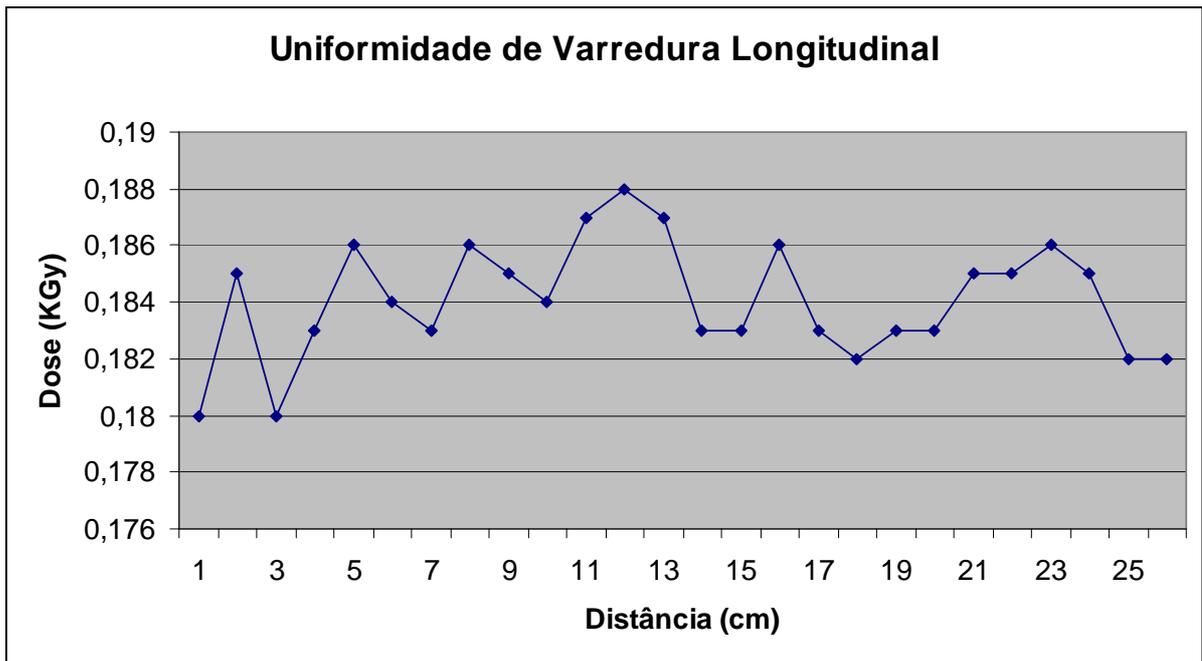


Gráfico 2 – Uniformidade de Varredura Longitudinal da alanina

4.1.3. Teste Operacional para obtenção da Energia do Feixe de Elétrons

O teste para a obtenção da energia do feixe, inclui a medida através da profundidade alcançada pelo elétron ao atravessar um bloco de alumínio. Com base em tais dados, foi gerada a tabela 8 e o gráfico correspondente.

O valor da energia é calculado através da tangente do ângulo de menor inclinação da curva.

Tabela 8 – Dados referentes à varredura de Energia para a Alanina

Profundidade no Alumínio (cm)	Dose (Kgy)
0,4224	11,51
0,5280	11,82
0,6336	12,11
0,7392	12,24
0,8448	12,92
0,9504	12,79
1,0560	12,13
1,1616	11,34
1,2672	10,40
1,3728	9,54
1,4784	8,29
1,5840	6,69
1,6896	5,00
1,7952	3,45
1,9008	2,14
2,0064	1,22
2,1120	0,71

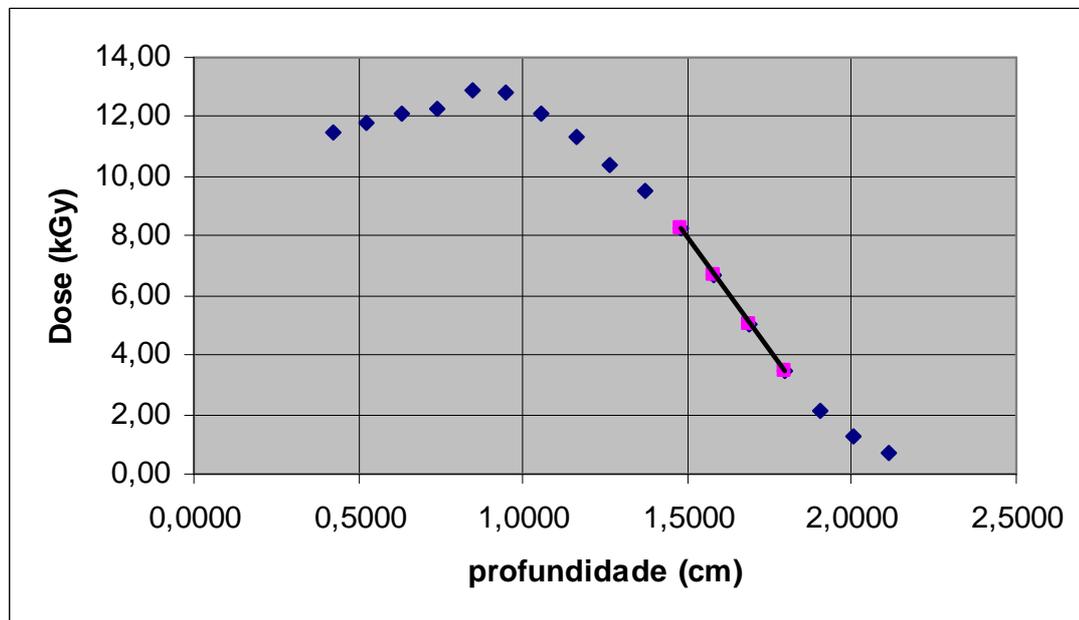


Gráfico 3 - Gráfico correspondente à varredura de Energia do Feixe de elétrons para a alanina.

4.1.4. Teste Operacional da Uniformidade de dose

O último teste realizado foi o de Uniformidade de dose. Os resultados deste teste estão expressos nas Tabelas 9.a e 9.b e no Gráfico 4.

Neste teste foram utilizados os dois feixes (torre e poço), sendo os dados do primeiro feixe representados no gráfico, da esquerda para a direita, enquanto os dados do segundo feixe estão representados no sentido inverso.

Para este teste, devemos sempre comparar pontos localizados a mesma distância da superfície irradiada. Esta comparação foi feita na tabela 9.b.

Tabelas 9.a e 9.b – Uniformidade de dose da alanina

Distância (cm)	Dose (kGy)
0,00	7,94
1,25	8,77
2,50	9,52
3,75	7,83
5,00	2,01
6,25	2,15
7,50	8,45
8,75	10,05
10,00	9,26
11,25	8,11

Distância (polegadas)	Dose Média	+10%	-10%
0,00 & 11,25	8,03	8,83	7,23
1,25 & 10,00	9,02	9,92	8,12
2,50 & 8,75	9,79	10,76	8,81
3,75 & 7,50	8,14	8,96	7,33
5,00 & 6,25	2,08	2,29	1,87

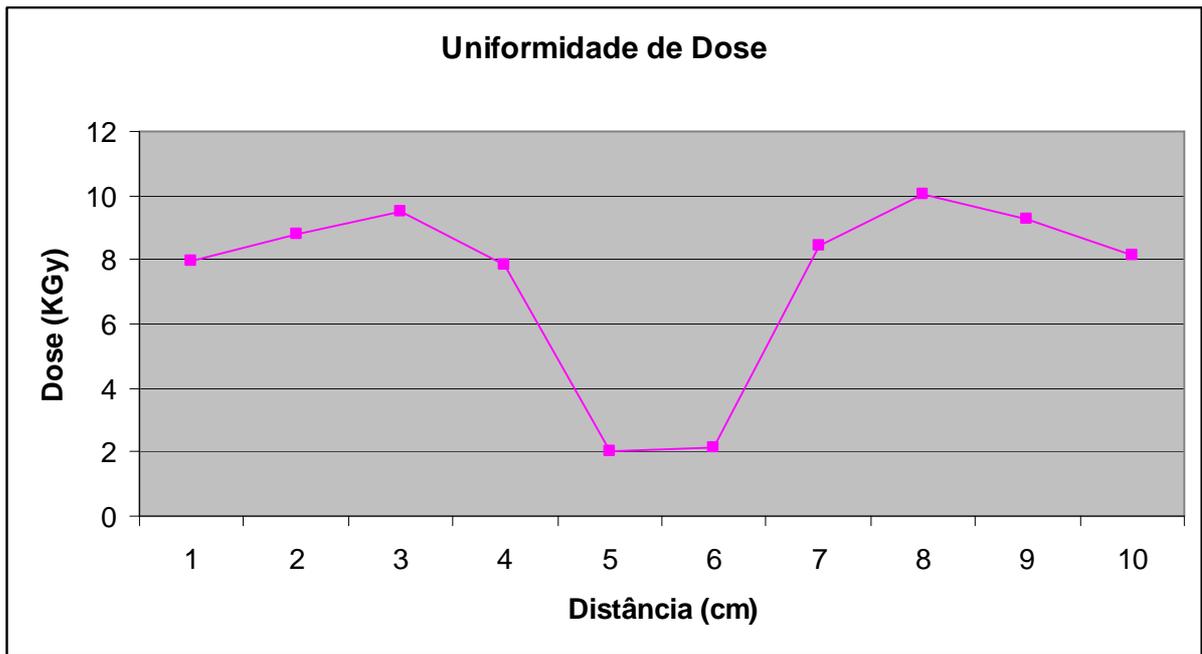


Gráfico 4 – Uniformidade de dose da alanina

4.2. RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO PRIMÁRIA

A calibração dos dosímetros B3 foi realizada pela GEX (fabricante dos dosímetros) a partir dos dados fornecidos pelo *Riso National Laboratory*.

4.2.1. Dados da Calibração Primária

Os dados de calibração primária recebidos pela GEX são apresentados nas Tabelas de 10 a 13.

Tabela 10 – Resumo de Calibração dos dosímetros B3

GEX Calibration Reference	2934		
Customer Information			
Calibration Facility:	Acelétrica Comércio e Representações Ltda		
Address:	Av. Brasil, 19.001 - Pavilhão 200		
City, State, Postal Code:	Irajá - 21530-900, Rio De Janeiro - RJ - BRAZIL		
Contact Person(s):	Fernando Nuno		
Telephone, Fax:	55 21 3512-4000	55 21 3512-4005	
E-Mail:	fernando.nuno@aceletron.com.br		
Customer Billing Address:	Same as above		
Billing Contact, telephone:	Same as above		
Completion Date Requested:	ASAP		
Type of Calibration (full, verification, data analysis):	Full in-situ		
Irradiation Facility Type and Description:	Electron Beam		
Material Handling System:	conveyor		
Energy (electron beam or X ray only):	Dual e-beam 15kW each		
Irradiation Geometry:	ISO 51261 compliant phantom		
Type of Dosimeter(s) Being Calibrated:	GEX B3 (B3000)		
New Dosimeter Batch(s) ID# :	BB		
Existing Dosimeter Batch(s) ID# :	BB		
Wavelength(s) used, (nm):	554nm		
Optical Instrument(s) ID, Model, Make:	Genesys 20 - ID#3SGD291006		
Thickness Gauge ID, Model, Make:	n/a		
Type of Transfer Standard Dosimeter:	Alanine		
Transfer Standard Laboratory:	Risø High Dose Reference Laboratory		
Calibration Requirements:			
	Yes	No	If Yes, list value to Use
Use Average Thickness:	x		0.0162mm
Use Average background (Ao):		x	n/a
GEX Create Complete Dose Table:	x		
GEX Prepare Calibration Specific Workbook:	x		
Post Irradiation Management:	Heat 15 minutes at 60 C just after irradiation, and read.		
In-situ Calibration Procedure Reference:	n/a		
Required Dose Range:	1.25 to 80.0 kGy		
Merge response curves (i.e. multiple instruments):	n/a		
Special Instructions:	n/a		
GEX Prepare Uncertainty Statement:	Yes		
Type B Uncertainties To Be Used:			
seasonal environmental variance (Type B - uniform)	2.6%		
dosimeter shelf-life time/aging variance (Type B - uniform)	0.6%		
calibration versus production differences – routine dosimeters (Type B - normal)	0.7%		
calibration laboratory systematic or non-random error (Type B - uniform)	1.4%		
post irradiation dosimeter response variance (Type B - normal)	0.1%		
routine dosimeter placement variability (Type B - uniform)	1.3%		
Total Type B Uncertainty at a coverage factor k=2 (~95% confidence)	3.4%		

Podemos observar que a taxa de incerteza para um nível de confiabilidade de 95%, ficou em 3,4%, valor este que se encontra dentro dos parâmetros exigidos pelas normas internacionais, ISO 13.485:2004 e ISO 11.137:2006, que são de 7,5 %.

Tabela 11 – Caracterização da Absorbância Inicial através dos dosímetros de Controle.

Absorbância Inicial (Background)			
Nº Dosímetro	Instrumento*	Nº Dosímetro	Instrumento*
1	0,038	17	0,037
2	0,038	18	0,036
3	0,037	19	0,037
4	0,040	20	0,038
5	0,036	21	0,038
6	0,041	22	0,042
7	0,036	23	0,041
8	0,038	24	0,037
9	0,038	25	0,039
10	0,036	26	0,038
11	0,038	27	0,038
12	0,038	28	0,038
13	0,037	29	0,039
14	0,040	30	0,040
15	0,041	31	0,037
16	0,039	32	0,037
Média	0,038	Varição	0,01
C.V (%)	5.26		

* Instrumento 3SGD2910006

Tabela 12 – Dados Experimentais para correlação Absorbância x Dose

Dose (KGy)	Nº Dosímetro Individual	Absorbância Final (Ai)	Dosímetro de Transferência	Dose Real (KGy)	Resposta (Ai-Ao)/t
1,25	1198106	0,054	578	1,30	3,333
1,25	1198106	0,055	578	1,30	3,395
1,25	1198038	0,056	578	1,30	3,457
1,25	1198038	0,056	578	1,30	3,457
1,25	1198048	0,056	578	1,30	3,457
2,5	1198105	0,072	579	2,59	4,444
2,5	1198105	0,073	579	2,59	4,506
2,5	1198104	0,069	579	2,59	4,259
2,5	1198104	0,071	579	2,59	4,383
2,5	1198109	0,073	579	2,59	4,506
5,0	1198107	0,106	580	5,18	6,543
5,0	1198107	0,106	580	5,18	6,543
5,0	1198108	0,106	580	5,18	6,543
5,0	1198108	0,106	580	5,18	6,543
5,0	1198111	0,108	580	5,18	6,667
7,5	1198095	0,138	581	7,79	8,519
7,5	1198095	0,140	581	7,79	8,642
7,5	1198110	0,140	581	7,79	8,642
7,5	1198110	0,140	581	7,79	8,642
7,5	1198114	0,142	581	7,79	8,765
10,0	1198113	0,173	582	10,3	10,679
10,0	1198113	0,174	582	10,3	10,741
10,0	1198112	0,175	582	10,3	10,802
10,0	1198112	0,177	582	10,3	10,926
10,0	1198117	0,175	582	10,3	10,802
15,0	1198116	0,237	583	15,6	14,630
15,0	1198116	0,235	583	15,6	14,506
15,0	1198115	0,234	583	15,6	14,444
15,0	1198115	0,238	583	15,6	14,691
15,0	1198134	0,230	583	15,6	14,198
20,0	1198133	0,291	584	20,7	17,963
20,0	1198133	0,292	584	20,7	18,025
20,0	1198132	0,295	584	20,7	18,210
20,0	1198132	0,294	584	20,7	18,333
20,0	1198097	0,295	584	20,7	23,951
30,0	1198096	0,388	585	31,7	24,444
30,0	1198096	0,398	585	31,7	24,259
30,0	1198094	0,396	585	31,7	24,568
30,0	1198094	0,393	585	31,7	24,630
30,0	1198100	0,399	585	31,7	36,111
50,0	1198099	0,581	586	52,8	36,358
50,0	1198098	0,589	586	52,8	36,358
50,0	1198103	0,577	586	52,8	35,617
50,0	1198103	0,581	586	52,8	35,864
80,0	1198669	0,787	587	88,5	48,580
80,0	1198669	0,797	587	88,5	49,198
80,0	1197598	0,773	587	88,5	47,716
80,0	1197598	0,766	587	88,5	47,284

4.2.2. Curva de Calibração

A Curva de Calibração foi calculada a partir das equações descritas abaixo:

- Equação de Calibração Logarítmica:

$$\text{Resposta} = 8.920\text{E-}01 + (6.596\text{E-}01 * \text{Log Padrão}) \quad (18)$$

- Equação de Calibração Linear

$$\text{Resposta} = 5.073\text{E+}00 + (5.263\text{E-}01 * \text{padrão}) \quad (19)$$

- Equação de Calibração Cúbica

$$\text{Resposta} = 2.400\text{E+}00 + (8.335\text{E-}01 * \text{padrão}) + (-4.137\text{E-}03 * \text{padrão}^2) + (6.527\text{E-}06 * \text{padrão}^3) \quad (20)$$

- Equação de Calibração à quarta potência

$$\text{Resposta} = 2.087\text{E+}00 + (9.401\text{E-}01 * \text{padrão}) + (-1.137\text{E-}03 * \text{padrão}^2) + (1.578\text{E-}04 * \text{padrão}^3) + (-9.3050\text{E-}07 * \text{padrão}^4) \quad (21)$$

Tabela 13 – Curva de Calibração do Filme Radiocrômico B3

Equação de Calibração	r Square	Regression F Statistic	Lack of Fit F Statistic	Lack of Fit Significance	Mean Square Error	Estimated MDL at 95% confidence
Logarítmica	0.994542	10569. 37972	109. 90025		1. 10634399	2,43E-02
linear	0.976261	2385. 268599	498. 9637		4. 81221658	16. 8865322
Quadrática	0.999482	55039. 49329	5. 4451186	0.000109555	0.10675473	1. 66953241
Cúbica	0.999517	38645. 81586	5. 3663853	0.000224299	0.10136381	1. 60110352
Quarta Pot.	0.999640	38204. 06954	2. 2511009	0.063504588	0.076911436	1. 27385577

Por mão da análise da tabela da curva de calibração, observa-se que a equação inserida na planilha de calibração foi a Logarítmica.

4.3. RESULTADOS DOS TESTES OPERACIONAIS DO FILME RADIOCRÔMICO B3

As Tabelas de 14 a 17 apresentam os valores medidos para energia, uniformidade de dose e uniformidade de varredura horizontal e longitudinal do Filme Radiocrômico B3.

4.3.1. Teste Operacional da Uniformidade de Varredura Horizontal

Novamente, o primeiro teste realizado foi o de uniformidade de varredura horizontal. Com os dados obtidos, a tabela 14 foi elaborada, e a partir desta, traçamos o gráfico correspondente.

Tabela 14 – Dados referentes a Uniformidade de Varredura Horizontal do Filme Radiocrômico B3:

Dosimetro (ID)	Distância (cm)	Absorbância (Ai)	Resposta (Ai - Ao) / t	Dose (kGy)	Ajuste de Dose (kGy)	Dose Relativa (Adj. Dose / Dose Média)	
0000001	2,5	0,180	9,677	8,8	8,8		0,63
0000002	5,0	0,234	12,581	12,5	12,5		0,89
0000003	7,5	0,254	13,656	13,8	13,8		0,98
0000004	10,0	0,252	13,548	13,7	13,7		0,97
0000005	12,5	0,251	13,495	13,6	13,6		0,97
0000006	15,0	0,254	13,656	13,8	13,8		0,98
0000007	17,5	0,258	13,871	14,1	14,1		1,00
0000008	20,0	0,256	13,763	14,0	14,0		1,00
0000009	22,5	0,256	13,763	14,0	14,0		1,00
0000010	25,0	0,263	14,140	14,5	14,5		1,03
0000001	27,5	0,262	14,086	14,4	14,4		1,02
0000002	30,0	0,266	14,301	14,7	14,7		1,05
0000003	32,5	0,262	14,086	14,4	14,4		1,02
0000004	35,0	0,262	14,086	14,4	14,4		1,02
0000005	37,5	0,260	13,978	14,2	14,2		1,01
0000006	40,0	0,266	14,301	14,7	14,7		1,05
0000007	42,5	0,261	14,032	14,3	14,3		1,02
0000008	45,0	0,262	14,086	14,4	14,4		1,02
0000009	47,5	0,267	14,355	14,7	14,7		1,05
0000010	50,0	0,262	14,086	14,4	14,4		1,02
0000001	52,5	0,270	14,516	14,9	14,9		1,06
0000002	55,0	0,268	14,409	14,8	14,8		1,05
0000003	57,5	0,267	14,355	14,7	14,7		1,05
0000004	60,0	0,262	14,086	14,4	14,4		1,02
0000005	62,5	0,267	14,355	14,7	14,7		1,05
0000006	65,0	0,264	14,194	14,5	14,5		1,03
0000007	67,5	0,000	0,000	na			0,00
0000008	70,0	0,000	0,000	na			0,00
0000009	72,5	0,000	0,000	na			0,00

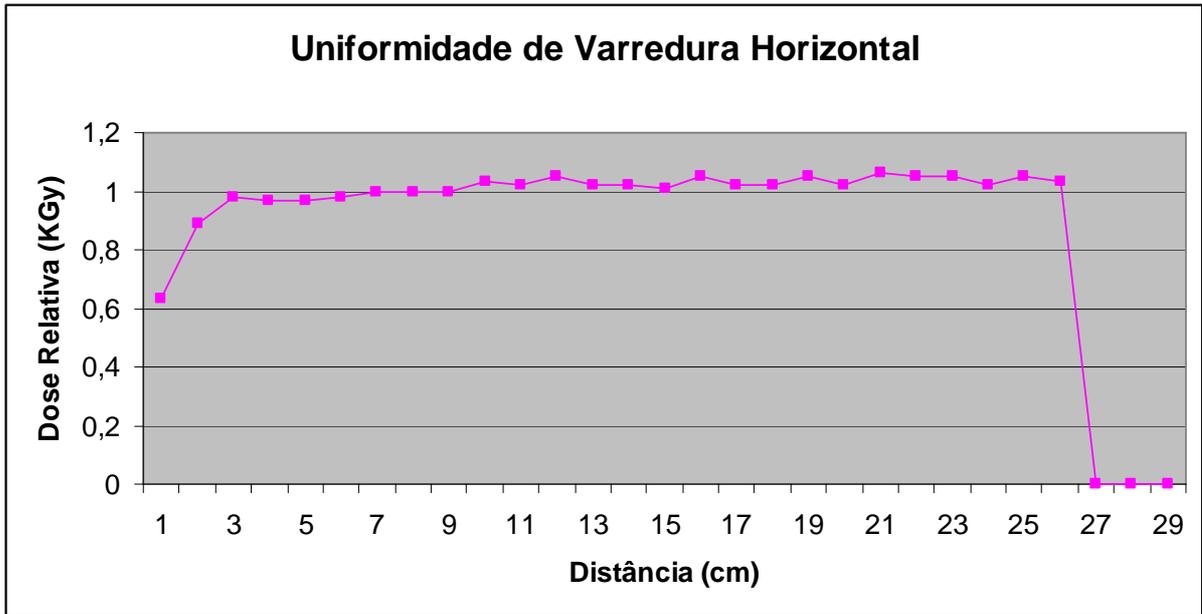


Gráfico 5 - gráfico referentes à Uniformidade de Varredura Horizontal do Filme Radiocrômico B3.

4.3.2. Teste Operacional da Uniformidade de Varredura Longitudinal

O Próximo teste realizado foi o de Uniformidade de Varredura Longitudinal. Os dados deste geraram a Tabela 15 e o gráfico 6 correspondente.

Tabela 15 - Dados referentes à Uniformidade de Varredura Longitudinal do Filme Radiocrômico B3:

Dosímetro (ID)	Distância (cm)	Absorbância (Ai)	Resposta (Ai - Ao) / t	Dose (kGy)	Ajuste de Dose (kGy)	Dose Relativa (Adj. Dose / Dose Média)
0000001	2,5	0,194	10,430	9,7	9,7	1,00
0000002	5,0	0,190	10,215	9,5	9,5	0,98
0000003	7,5	0,193	10,376	9,7	9,7	1,00
0000004	10,0	0,195	10,484	9,8	9,8	1,01
0000005	12,5	0,192	10,323	9,6	9,6	0,99
0000006	15,0	0,203	10,914	10,3	10,3	1,06
0000007	17,5	0,191	10,269	9,5	9,5	0,98
0000008	20,0	0,203	10,914	10,3	10,3	1,06
0000009	22,5	0,203	10,914	10,3	10,3	1,06
0000010	25,0	0,196	10,538	9,9	9,9	1,02
0000001	27,5	0,191	10,269	9,5	9,5	0,98
0000002	30,0	0,192	10,323	9,6	9,6	0,99
0000003	32,5	0,191	10,269	9,5	9,5	0,98
0000004	35,0	0,190	10,215	9,5	9,5	0,98
0000005	37,5	0,195	10,484	9,8	9,8	1,01
0000006	40,0	0,195	10,484	9,8	9,8	1,01
0000007	42,5	0,191	10,269	9,5	9,5	0,98
0000008	45,0	0,189	10,161	9,4	9,4	0,97
0000009	47,5	0,195	10,484	9,8	9,8	1,01
0000010	50,0	0,194	10,430	9,7	9,7	1,00
0000001	52,5	0,194	10,430	9,7	9,7	1,00
0000002	55,0	0,000	0,000	na		0,00
0000003	57,5	0,000	0,000	na		0,00
0000004	60,0	0,000	0,000	na		0,00
0000005	62,5	0,000	0,000	na		0,00
0000006	65,0	0,000	0,000	na		0,00
0000007	67,5	0,000	0,000	na		0,00
0000008	70,0	0,000	0,000	na		0,00
0000009	72,5	0,000	0,000	na		0,00

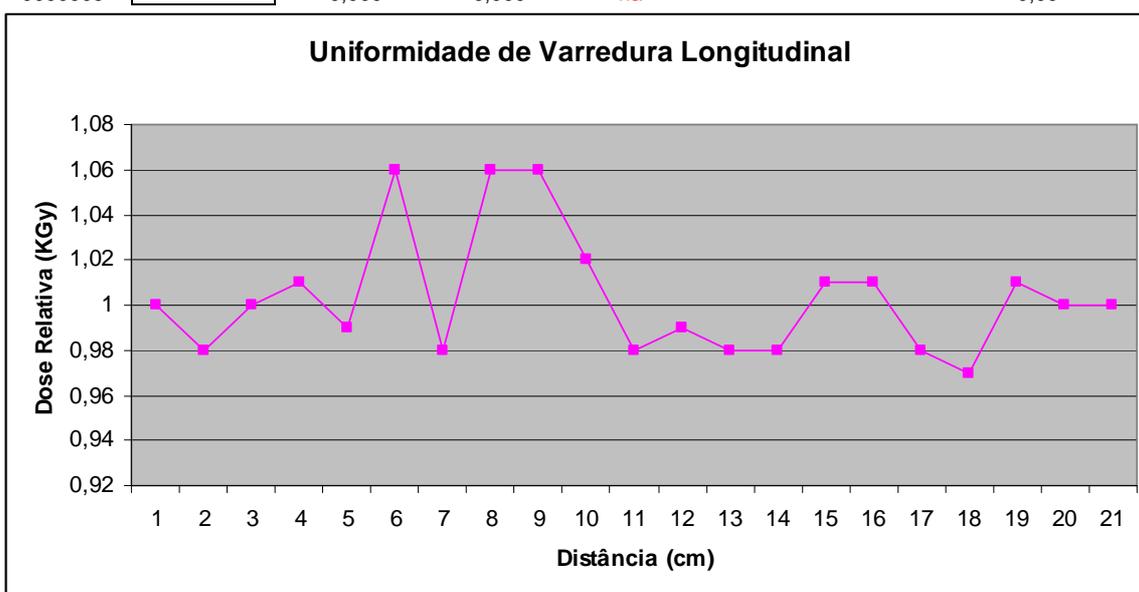


Gráfico 6 – Gráfico referente à Uniformidade de Varredura Longitudinal do Filme Radiocrômico B3

4.3.3. Teste Operacional para obtenção da Energia do Feixe de Elétrons

O próximo teste realizado foi para a obtenção da energia do feixe, medida através da profundidade alcançada pelo elétron ao atravessar um bloco de alumínio. Com estes dados, foi gerada a tabela 16 e o gráfico correspondente.

Tabela 16 - Dados referentes à varredura de Energia do Filme Radiocrômico B3:

Dosimetro (ID)	Profundidade no Alumínio(cm)	Absorbância (Ai)	Resposta (Ai - Ao) / t	Dose (kGy)	Ajuste de Dose (kGy)
0000001	0,181	0,265	14,247	14,6	14,6
0000002	0,270	0,279	15,000	15,6	15,6
0000003	0,364	0,285	15,323	16,0	16,0
0000004	0,450	0,298	16,022	16,9	16,9
0000005	0,538	0,312	16,774	17,9	17,9
0000006	0,627	0,322	17,312	18,6	18,6
0000007	0,713	0,331	17,796	19,3	19,3
0000008	0,799	0,336	18,065	19,6	19,6
0000009	0,891	0,335	18,011	19,6	19,6
0000010	0,979	0,338	18,172	19,8	19,8
0000011	1,070	0,332	17,849	19,3	19,3
0000012	1,151	0,327	17,581	19,0	19,0
0000013	1,238	0,305	16,398	17,4	17,4
0000014	1,327	0,276	14,839	15,4	15,4
0000015	1,415	0,254	13,656	13,8	13,8
0000016	1,499	0,220	11,828	11,5	11,5
0000017	1,586	0,195	10,484	9,8	9,8
0000018	1,677	0,170	9,140	8,1	8,1
0000019	1,757	0,154	8,280	7,0	7,0
0000020	1,858	0,130	6,989	5,4	5,4
0000021	1,942	0,099	5,323	3,4	3,4
0000022	2,023	0,080	4,301	2,2	2,2
0000023	2,116	0,061	3,280	1,0	1,0
0000024	2,205	0,056	3,011	0,6	0,6
0000025	2,288	0,048	2,581	Under Range	
0000026	2,373	0,048	2,581	Under Range	
0000027	2,466	0,000	0,000	na	
0000028	2,550	0,000	0,000	na	
0000029	2,638	0,000	0,000	na	

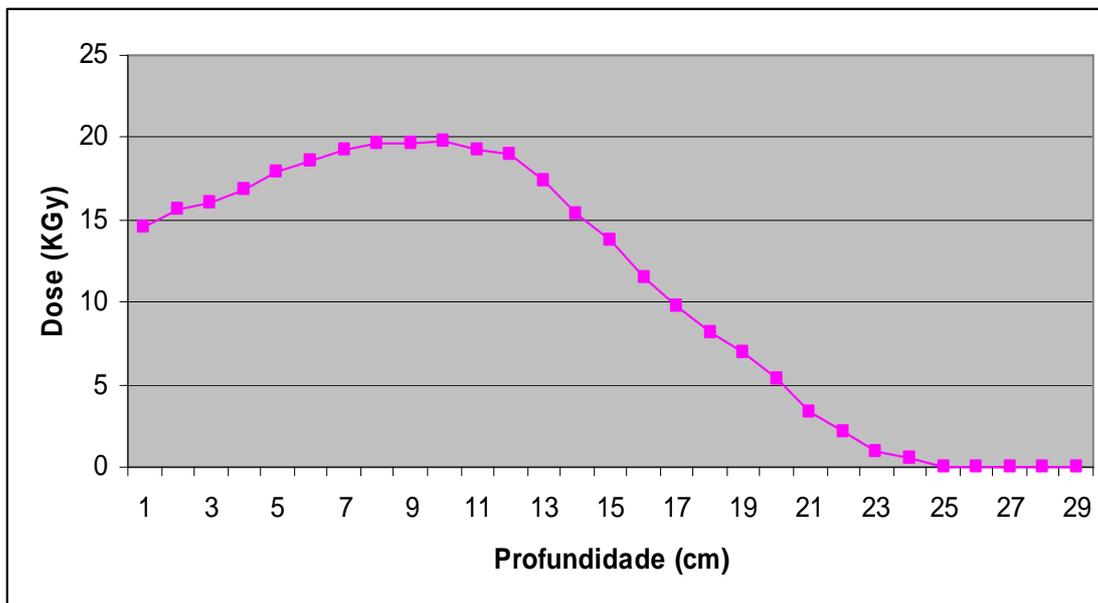


Gráfico 7 – Gráfico correspondente à varredura de Energia do Feixe de elétrons para o Filme Radiocrômico B3.

4.3.4. Teste Operacional da Uniformidade de dose

O último teste realizado, exigido pela regulamentação da utilização do sistema dosimétrico do filme radiocrômico B3, foi o de Uniformidade de dose. Os resultados deste teste estão expressos na Tabela 17 e no Gráfico 8.

Tabela 17 – Dados referentes à varredura da Uniformidade de dose para o Filme radiocrômico B3:

Dosímetro (ID)	Distância (cm)	Absorbância (Ai)	Resposta (Ai - Ao) / t	Dose (kGy)	Ajuste de Dose (kGy)	Dose Relativa (Adj. Dose / Ave. Dose)
0000001	2,5	0,232	12,473	12,3	12,3	0,72
0000002	5,0	0,231	12,419	12,2	12,2	0,71
0000003	7,5	0,243	13,065	13,1	13,1	0,76
0000004	10,0	0,262	14,086	14,4	14,4	0,84
0000005	12,5	0,287	15,430	16,1	16,1	0,94
0000006	15,0	0,310	16,667	17,8	17,8	1,04
0000007	17,5	0,335	18,011	19,6	19,6	1,14
0000008	20,0	0,353	18,978	20,9	20,9	1,22
0000009	22,5	0,372	20,000	22,2	22,2	1,30
0000010	25,0	0,377	20,269	22,6	22,6	1,32
0000001	27,5	0,378	20,323	22,7	22,7	1,33
0000002	30,0	0,376	20,215	22,5	22,5	1,31
0000003	32,5	0,358	19,247	21,2	21,2	1,24
0000004	35,0	0,340	18,280	19,9	19,9	1,16
0000005	37,5	0,308	16,559	17,6	17,6	1,03
0000006	40,0	0,284	15,269	15,9	15,9	0,93
0000007	42,5	0,261	14,032	14,3	14,3	0,83
0000008	45,0	0,244	13,118	13,1	13,1	0,76
0000009	47,5	0,233	12,527	12,4	12,4	0,72
0000010	50,0	0,225	12,097	11,8	11,8	0,69
0000001	52,5	0,000	0,000	na		0,00
0000002	55,0	0,000	0,000	na		0,00
0000003	57,5	0,000	0,000	na		0,00
0000004	60,0	0,000	0,000	na		0,00
0000005	62,5	0,000	0,000	na		0,00
0000006	65,0	0,000	0,000	na		0,00
0000007	67,5	0,000	0,000	na		0,00
0000008	70,0	0,000	0,000	na		0,00
0000009	72,5	0,000	0,000	na		0,00
0000010	75,0	0,000	0,000	na		0,00

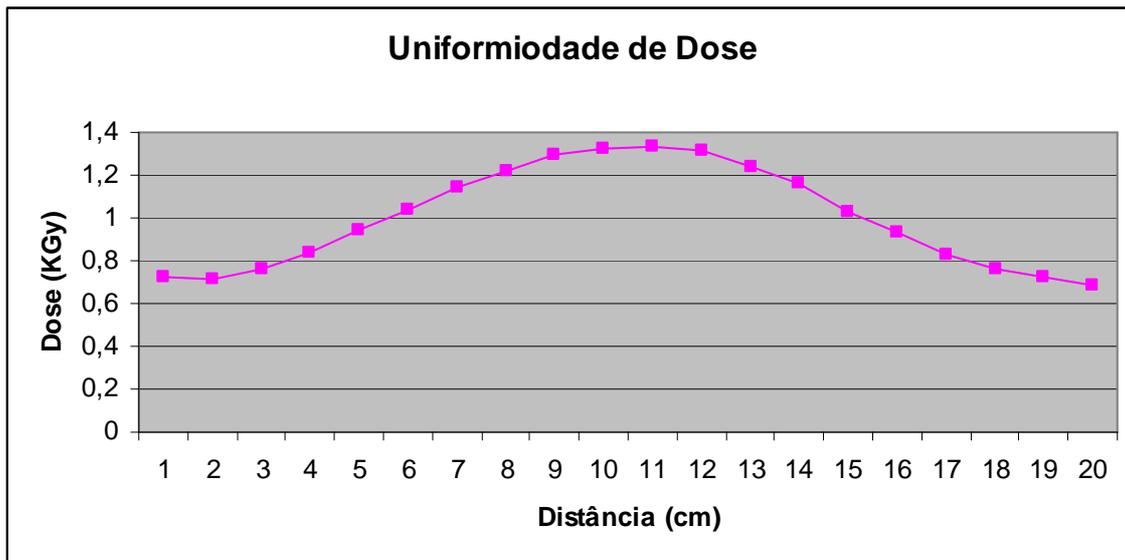


Gráfico 8 – Gráfico correspondente à varredura de Uniformidade de Dose para o Filme Radiocrômico B3.

4.4. Análise dos Resultados - Comparativo entre a Alanina e o Filme Radiocrômico B3

Em posse dos resultados, começamos a análise dos resultados e o comparativo entre os dois Sistemas Dosimétricos.

4.4.1. Teste1 – Uniformidade de Varredura Horizontal

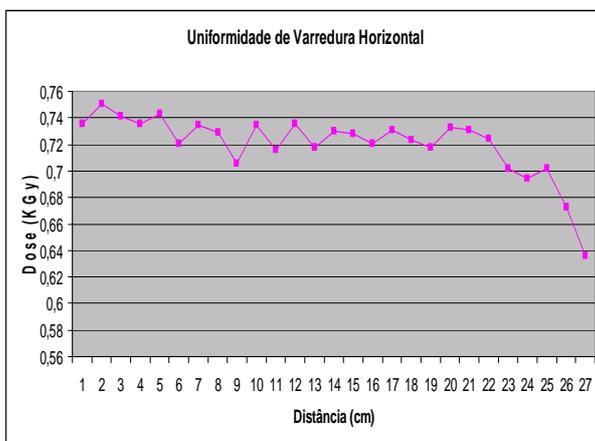


Gráfico 1

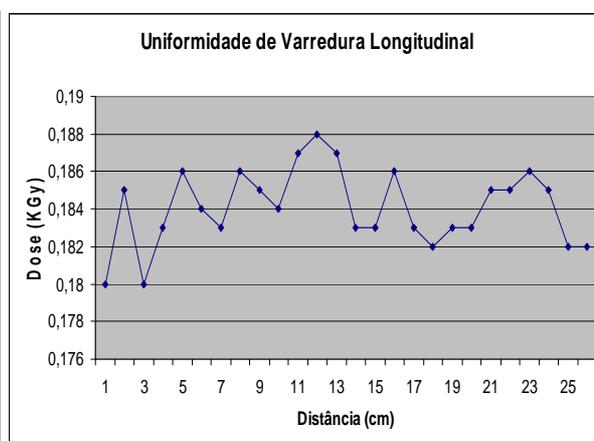


Gráfico 5

O Gráfico 1 é referente a Alanina e o Gráfico 5 é referente ao Filme Radiocrômico B3. O Dosímetro de Alanina apresentou um desvio em relação a medida das doses obtidas de 2,8% enquanto, com o Filme Radiocrômico B3, o desvio foi de 6,0%. Portanto, ambos estão dentro do critério descrito na seção 3.3.4, que especifica este limite em 7,5%.

4.4.2. Teste2 – Uniformidade de Varredura Longitudinal

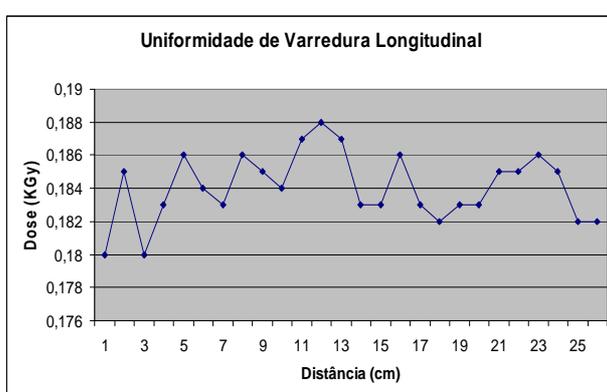


Gráfico 2

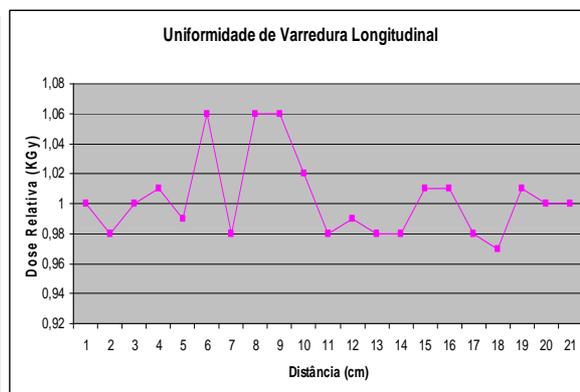


Gráfico 6

O Gráfico 2 é referente a Alanina e o Gráfico 6 é referente ao Filme Radiocrômico B3. O Dosímetro de Alanina apresentou nesse caso um desvio em relação à medida das doses obtidas de 3,0% enquanto, com o Filme Radiocrômico B3, o desvio foi de 5,0%. Portanto, novamente, ambos estão dentro do critério descrito na seção 3.3.4, que especifica este limite em 7,5%.

4.4.3. Teste3 – Energia do Feixe de Elétrons

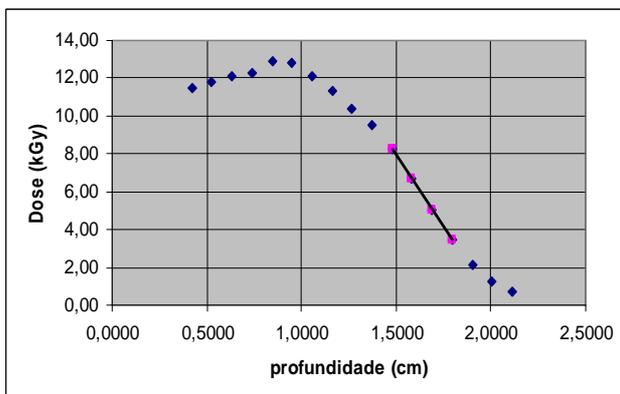


Gráfico 3

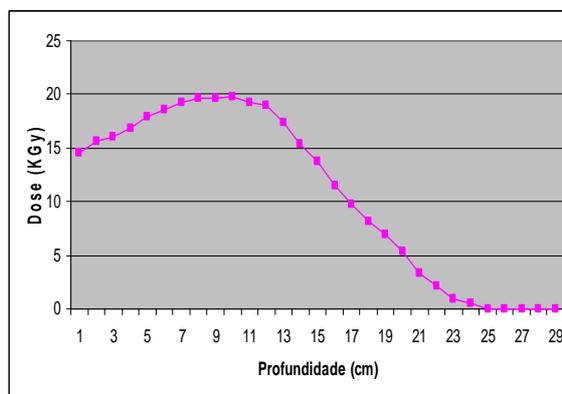


Gráfico 7

O Teste 3 diz respeito a Energia do Feixe de Elétrons. No Gráfico 3 estão os dados da Alanina, cuja energia obtida foi de 9,98 Mev, enquanto no Gráfico 7, referente ao Filme Radiocrômico B3, a energia obtida alcançou 9,8 Mev. Os resultados obtidos estão dentro do esperado e do previsto pelas normas vigentes, que estipula esta medida em $10 \pm 0,2$ Mev. Podemos observar, que o filme radiocrômico B3, ficou no limite mínimo exigido, mais ainda dentro dos parâmetros.

4.4.4. Teste 4 – Uniformidade de Dose

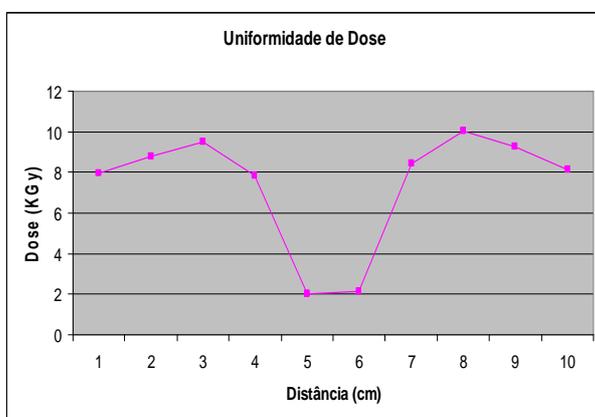


Gráfico 4

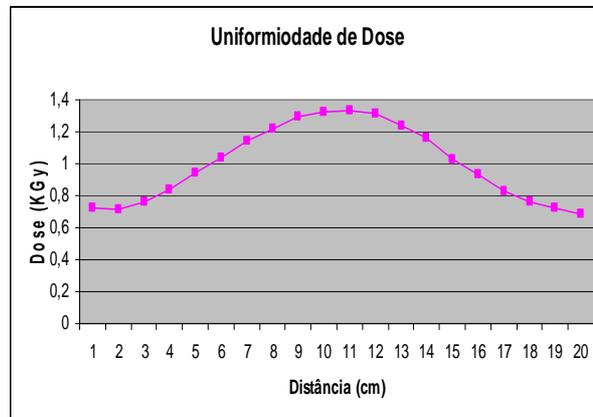


Gráfico 8

Para analisarmos a Uniformidade de Dose, devemos comparar pontos localizados à mesma distância da superfície irradiada.

Para a alanina utilizou-se uma maior quantidade de placas de alumínio, tornando o conjunto espesso. Por este motivo, a contribuição de cada feixe no centro é pequena. Para o filme radiocrômico, adotou-se uma menor quantidade de placas, tornando o conjunto mais fino e a contribuição de cada feixe no ponto central maior. O efeito observado na parte central do gráfico 8 é devido ao efeito acumulativo dos dois feixes (torre e poço) na região central do conjunto irradiado.

O Gráfico 4 é referente à alanina e o Gráfico 8 ao Filme Radiocrômico B3. A Uniformidade de Dose referente à mesma distância da alanina ficou em torno de 5%, enquanto para o Filme Radiocrômico B3 ficou em torno de 7%. Este resultado também se enquadra dentro do limite aceito, que exige que esta variação não ultrapasse 10%.

Observa-se que, apesar dos resultados obtidos com a alanina serem bem mais precisos, em nenhum dos testes o Filme Radiocrômico B3 apresentou respostas fora dos parâmetros exigidos.

Portanto, em todos os testes, conseguiu-se satisfazer a condição de aceitação de resultados descrita na seção 3.3.4, validando assim, o uso do filme radiocrômico B3 como dosímetro padrão nas operações de rotina, uma vez que todas as exigências que regulamentam a utilização de radiação como agente de esterilização de produtos médico-hospitalar foram atendidas e todos os testes apresentaram resultados dentro dos parâmetros estabelecidos pelas normas vigentes.

CONCLUSÃO

Cada um dos Sistemas Dosimétricos escolhidos para este estudo apresentam vantagens e desvantagens comprovadas experimentalmente. A Alanina tem como principais pontos positivos: a ótima precisão apresentada nas medidas experimentais, aproximadamente 2,5 vezes melhor que a do filme radiocrômico B3, e a rapidez na leitura dos dados, já que com o filme radiocrômico há a necessidade de um tempo de espera de pelo menos 15 minutos para sua leitura.

O filme radiocrômico B3 (*produzido pela B3 Gex Corporation*), embora apresente as desvantagens ora mencionadas, no que se refere ao custo, tanto o dosímetro quanto o equipamento utilizado para sua leitura, ficam bem mais em conta quando comparados com a Alanina. Quando é considerado o dosímetro em si, o custo da Alanina (*produzida pela Alanina Eastman Kodak Company*) é cerca de 4 (quatro) vezes maior. O mesmo ocorre com os equipamentos de leitura, o Espectrofotômetro GENESYS 20 produzido pela *Thermo Fisher Scientific Inc* (utilizado com o filme radiocrômico) possui um custo, hoje, de R\$ 5.000,00 (cinco mil reais), enquanto o *Bruker-scan* (EPR sistema espectrômetro), utilizado na leitura da alanina, tem custo aproximado de \$ 60.000,00 (sessenta mil dólares).

Outro ponto importante a ser considerado é a facilidade na manutenção e reparo do sistema. Tanto o dosímetro de alanina, quanto o Sistema Bruker são importados dos Estados Unidos e não possuem, nem representante comercial, nem assistência técnica no Brasil, o que resulta num longo período de interrupção nas operações de rotina da empresa em caso de falha do equipamento. Já o sistema Genesys é adquirido no Brasil e possui

assistência em São Paulo, o que possibilita agilidade no reparo e solução dos eventuais problemas técnicos ocorridos, gerando uma economia, não somente de tempo, mas principalmente financeira.

Portanto, para a realidade da Indústria Brasileira, a pequena perda de precisão apresentada pelo Filme Radiocrômico B3 é compensada pelo menor custo. Todos os testes realizados, descritos pelas ISOs que regulamentam a utilização de radiação como agente de esterilização de produtos médico-hospitalar (este parâmetro foi escolhido por ser o de maior grau de exigência), obtiveram respostas favoráveis à validação do uso do Filme radiocrômico, pois apresentaram resultados satisfatórios em face das exigências de mercado.

Os resultados de calibração dos Filmes Radiocrômicos B3 também alcançaram respostas semelhantes às atingidas com a alanina, cuja calibração foi realizada pelo laboratório primário *Riso National Laboratory*.

A partir dos dados obtidos neste trabalho, a empresa Acelétron optou pela substituição dos dosímetros de rotina, passando a utilizar somente o Filme Radiocrômico B3 em todas as suas operações, não importando o produto a ser irradiado ou a dose requerida no processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GREENING, J R . , FUNDAMENTALS OF RADIATION, In: KASEK R. ; BJARNGARD, BE; ATTIX, F H.eds, The dosimetry of ionization radiation dosimetry. New York, Academic, V.2, p.245-319, 1987.

- [2] PEREZ , H.E.B Desenvolvimento de um Sistema Calorimétrico para Dosimetria de Feixes de Elétrons em Processos por Radiação. Tese de Doutorado, IPEN, 1994

- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY High dose dosimetry STI/PUB- 671, Vienna, 1985

- [4] NAPOLITANO et al. Dosimetria em Processos de Irradiação. 2005. International Nuclear Atlantic Conference, Santos, SP, Brasil.

- [5] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS Electron beams with energies between 1 and 50MeV. Radiation dosimetry. Sept. 1984 (ICRU-35).

- [6] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. Radiation dosimetry stopping powers for electrons and positrons. Oct. 1984 (ICRU-37).

- [7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams. Technical Reports Series - TRS - 277, Vienna,1987.

- [8] QUEZADA, V A C Estabelecimento de um sistema dosimétrico para altas doses utilizando vidros. Dissertação de Mestrado, EPEN/SP - 1997.

- [9] ATTIX, F H Introduction to radiological physics and radiation dosimetry. London : John Wiley & Sons, 1986.

- [10] I. Kaluska, V.T. Lazurik, V.M. Lazurik, G.F. Popov, Y.V. Rogov, Z.Zimek, "Comparison of Dose Distribution Prediction in Targets Irradiated by Electron Beams with Dosimetry", *Proceeding of European Particle Accelerator Conference - EPAC 2004*, July 5 to 9, pp.2403-2405, (2004).

- [11] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION Dosimetry in an electron beam facility for radiation processing at energies between 300 keV and 25 MeV. ISO/DIS 15569, 1997

- [12] V.T. Lazurik, V.M. Lazurik, G.F. Popov, Y.V. Rogov, "RT-Office for Electron Beam, XRay, and Gamma-Ray Dosimetry", *Proceeding of European Particle Accelerator Conference - EPAC 2004*, July 5 to 9, pp.2406-2408, (2004).
- [13] R.B.Miller, *Electronic Irradiation of Foods – An Introduction to the Technology*, Springer Science, New York, USA (2005).
- [14] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY Manual of Food Irradiation Dosimetry. Technical Reports Series - TRS - 178, Vienna, 1977.
- [15] MILLER A. Status of electron and gamma-ray dosimetry. *Radiât. Phys.Chem.*, 25 (4-6) : 777-8, 1985.
- [16] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY Measurement Assurance in Dosimetry. STI/PUB - 846, Vienna, 1987.
- [17] TANAKA, R.; MITOMO, S.; SUNAGA, H.; MATSUDA, K. ; TAMURA, N Manual on CTA fdm dosimeter JAERI-M82-033, 1982
- [18] P. Sharpe, A. Miller, "Guidelines for the Calibration of Dosimeters for use in Radiation Processing – Report CIRM 29", Centre for Ionising Radiation Metrology – CIRM, August, (1999).
- [19] S.L. Somessari, C.G. Silveira, H. Paes, E.S.R. Somessari, "Electron Beam Accelerator Facilities at IPEN-CNEN/SP," *Proceeding of 2007 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2007*, September 30 to October 5, (2007).
- [20] M c L a u g h l i n , W. L . Films, dyes and fotografic systems. Manual on radiaton dosimetry. M A R C E L L D E K K E R , Inc. , New York, 1970.
- [21] SOCIEDADE BRASILEIRA DE CONTROLE DE CONTAMINAÇÃO (SBCC). Esterilização por radiação ionizante. Revista SBCC setembro/outubro 2001. Disponível em: http://www.sbcc.com.br/revistas_pdfs/ed%2004/04atualidades.pdf. Acesso em: 24 jan 2011.
- [25] RELA. Utilização da Radiação Ionizante na esterilização de produtos médicos e farmacêuticos. Revista SBCC setembro/outubro 2001. Disponível em: http://www.sbcc.com.br/revistas_pdfs/ed%2004/4artigo%20tecnico2.pdf. Acesso em: 28 jan 2010.
- [22] M c L a u g h l i n , W. L. , D E S R O S I E R S , M. F . Dosimetry systems for radiation processing *Rad. Phys.Chem*, , 46_(4-6):l 163-1174, Elsevier Science Ltd., Great Britain, 1995.

- [23] ISO/ASTM Standard, *Dosimetry for Radiation Processing*, (2002).
- [24] ISO/ASTM Standard E 1649, *Practice for Dosimetry in an Electron Beam Facility for Radiation Processing at Energies between 300 keV and 25 MeV*, (2002).
- [25] AMERICAN STANDARD AND TESTING MATERIALS Standard practice for use of a radiocirromic film dosimetry system. ASTM Designation E: 1275-88, Subcommittee E10.01, 1992.
- [26] MIYAGUSKY et al. Avaliação Microbiológica e Sensorial da Vida-Útil de Cortes de Peito de Frango Irrradiados. *Ciênc. Tecnol. Alim.*, v. 23, p.7-16, 2003.