



**CARACTERIZAÇÃO DE UMA CÂMARA DE
EXTRAPOLAÇÃO E FILMES RADIOCRÔMICOS PARA
VERIFICAÇÃO DA COERÊNCIA METROLÓGICA ENTRE
CAMPOS PADRÕES DE RADIAÇÃO BETA**

Jhonny Antonio Benavente Castillo

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais, como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre

2011

Comissão Nacional de Energia Nuclear

CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA
NUCLEAR

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações,
Minerais e Materiais

**CARACTERIZAÇÃO DE UMA CÂMARA DE
EXTRAPOLAÇÃO E FILMES RADIOCRÔMICOS PARA
VERIFICAÇÃO DA COERÊNCIA METROLÓGICA ENTRE
CAMPOS PADRÕES DE RADIAÇÃO BETA**

Jhonny Antonio Benavente Castillo

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência e
Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais, como requisito
parcial à obtenção do Grau de Mestre

Área de concentração: Ciência e Tecnologia das Radiações

Orientador: Dr. Teógenes Augusto da Silva

Co-Orientador: Dr. Luiz Cláudio Meira Belo

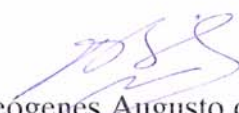
Belo Horizonte

2011




A presente dissertação de mestrado, intitulada **“Caracterização de uma câmara de extrapolação e filmes radiocrômicos para verificação da coerência metrológica entre campos padrões de radiação beta”** de autoria de **JHONNY ANTONIO BENAVENTE CASTILLO**, foi defendida e aprovada em 02 de maio de 2011 pela Banca Examinadora abaixo assinada.


Belo Horizonte, 02 de maio de 2011




Dr. Teógenes Augusto da Silva
CDTN - Orientador



Dr. Luiz Cláudio Meira Belo
CDTN- Coorientador



Dr.ª. Linda Viola Ehlin Caldas
IPEN



Dr. Marco Aurélio de Sousa Lacerda
CDTN

Dedico este trabajo con mucho amor a mis queridos padres y hermanos por siempre haberme apoyado en mis decisiones y por haberme enseñado el significado de tener una verdadera familia.

A Rosemary por todo el amor, apoyo incondicional, comprensión, motivación y sobre todo paciencia en los momentos más difíciles.

A la familia Alves Braga, José y Oralda, por haberme apoyado, motivado y por haberme guiado como a un hijo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, de forma especial, a Deus, por estar sempre comigo, por me guiar em todas as minhas decisões.

Um agradecimento especial ao meu orientador, o Dr. Teógenes Augusto da Silva, pela atenciosa e excelente orientação, apoio constante, pelos sinceros atos de incentivo e confiança nestes dois anos de árduo trabalho.

Ao meu coorientador, o Dr. Luiz Cláudio Meira Belo, pela disponibilidade sempre presente, pelos valiosos ensinamentos e discussões acadêmicas.

Meus agradecimentos se estendem:

À Msc. Sibeles Reis Reynaldo, Dra. Maria do Socorro Nogueira, Msc. Priscila do Carmo Santana, Adriano Ricardo Baessa e Thêssa Cristina Alonso pela ajuda inestimável na realização deste trabalho, pelas inúmeras interrupções, apoio e discussões inestimáveis.

Aos amigos do Laboratório de Calibração de Dosímetros, pelo apoio, solidariedade e excelente talento técnico, em especial ao Carlos Manoel de Assis Soares, Anníbal Teotônio Baptista Neto, Ronaldo Bittar, Flavio Ribeiro, Paulo Gerken, Jorge Machado e Cláudio Roberto Soares.

Ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, CDTN/CNEN, por oferecer uma excelente infra-estrutura, pelo auxílio financeiro e pela rica oportunidade de realizar e concluir este trabalho de mestrado.

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN/CNEN/SP pela oportunidade para a realização da comparação laboratorial. Agradeço de forma especial à Dra. Linda V. E. Caldas, Msc. Patrícia de Lara Antônio e Valdir Souza Carvalho pela atenção, e disposição sempre presente para concretização dos objetivos da comparação.

Um agradecimento muito especial à minha família principalmente ao meu pai, Tony Benavente, pelo seu exemplo, apoio integral, pela confiança, pelos sempre constantes e sinceros atos de incentivo não só durante o tempo de realização deste trabalho, senão durante toda a minha vida.

*O homem é tolo quando não aceita as coisas do espírito de Deus;
e ele não pode chegar a conhecê-las porque são examinadas
espiritualmente.*

1 Coríntios 2: 14

CARACTERIZAÇÃO DE UMA CÂMARA DE EXTRAPOLAÇÃO E FILMES RADIOCRÔMICOS PARA VERIFICAÇÃO DA COERÊNCIA METROLÓGICA ENTRE CAMPOS DE RADIAÇÃO BETA

Jhonny Antonio Benavente Castillo

RESUMO

A coerência metrológica entre os sistemas padrões é uma exigência para a confiabilidade das medidas de grandezas dosimétricas no campo das radiações ionizantes. Avanços científicos e tecnológicos ocorreram na metrologia da radiação beta, com a instalação do novo sistema padrão secundário BSS2 no país e adoção das radiações de referência internacionalmente recomendadas. O Laboratório de Calibração de Dosímetros do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (LCD/CDTN), em Belo Horizonte, implantou o BSS2 e estuda metodologias para caracterizar os campos de radiação beta, determinando a homogeneidade do campo de radiação, a exatidão e as incertezas na medida da dose absorvida no ar.

Neste trabalho, estudou-se uma metodologia usando uma câmara de extrapolação e filmes radiocrômicos para a verificação da coerência metrológica entre campos de radiação beta gerados por sistemas padrões, em termos da grandeza dose absorvida no ar. A confiabilidade metrológica da câmara de extrapolação e dos filmes radiocrômicos foi confirmada e a calibração destes detectores realizada no LCD/CDTN para os campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm . Os coeficientes angulares das curvas de extrapolação para cada campo de radiação foram determinados com a câmara de extrapolação e os filmes radiocrômicos permitiram mapear os campos e determinar a homogeneidade destes a partir dos resultados de perfis de dose e de linhas de isodose.

Um ensaio de comparação laboratorial entre o LCD/CDTN e o Laboratório de Calibração de Instrumentos do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, em São Paulo, (LCI/IPEN) foi realizado. Os resultados mostraram que os valores dos coeficientes de calibração, determinados com a câmara de extrapolação PTW em ambos os Laboratórios, apresentaram diferenças máximas de -1% e 3%, para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr , respectivamente. Os resultados com filmes radiocrômicos EBT, para as doses absorvidas no ar de 0,1; 0,3 e 0,15 Gy, nos mesmos campos de radiação beta, apresentaram diferenças

máximas de 3%, -9% e -53%. O mapeamento dos campos de radiação beta com os filmes radiocrômicos, para ambos os sistemas BSS2, mostrou que alguns campos de radiação não estavam alinhados geometricamente.

A viabilidade da metodologia investigada foi demonstrada por meio da verificação da coerência metrológica entre os sistemas BSS2 do LCD/CDTN e do LCI/IPEN somente para os campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr , já que para o ^{147}Pm grandes diferenças foram observadas, provavelmente associadas às limitações da metodologia para medição de feixes de baixa energia e de baixas taxas de doses.

CHARACTERIZATION OF AN EXTRAPOLATION CHAMBER AND RADIOCHROMIC FILMS FOR VERIFYING THE METROLOGICAL COHERENCE AMONG BETA RADIATION FIELDS

Jhonny Antonio Benavente Castillo

ABSTRACT

The metrological coherence among standard systems is a requirement for assuring the reliability of dosimetric quantities measurements in ionizing radiation field. Scientific and technologic improvements happened in beta radiation metrology with the installment of the new beta secondary standard BSS2 in Brazil and with the adoption of the internationally recommended beta reference radiations. The Dosimeter Calibration Laboratory of the Development Center for Nuclear Technology (LCD/CDTN), in Belo Horizonte, implemented the BSS2 and methodologies are investigated for characterizing the beta radiation fields by determining the field homogeneity, the accuracy and uncertainties in the absorbed dose in air measurements.

In this work, a methodology to be used for verifying the metrological coherence among beta radiation fields in standard systems was investigated; an extrapolation chamber and radiochromic films were used and measurements were done in terms of absorbed dose in air. The reliability of both the extrapolation chamber and the radiochromic film was confirmed and their calibrations were done in the LCD/CDTN in $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm beta radiation fields. The angular coefficients of the extrapolation curves were determined with the chamber; the field mapping and homogeneity were obtained from dose profiles and isodose with the radiochromic films.

A preliminary comparison between the LCD/CDTN and the Instrument Calibration Laboratory of the Nuclear and Energy Research Institute / São Paulo (LCI/IPEN) was carried out. Results with the extrapolation chamber measurements showed in terms of absorbed dose in air rates showed differences between both laboratories up to de -1% e 3%, for $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm beta radiation fields, respectively. Results with the EBT radiochromic films for 0.1, 0.3 and 0.15 Gy absorbed dose in air, for the same beta radiation fields, showed differences up to 3%, -9% and -53%. The beta radiation field mappings with radiochromic films in both BSS2 showed that some of them were not geometrically aligned.

The feasibility of the investigated methodology was demonstrated through the verification of the metrological coherence between both BSS2 from LCD/CDTN and LCI/IPEN for the $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ and ^{85}Kr beta radiation fields only. For ^{147}Pm , large differences were observed due to limitations of the adopted methodology for performing measurements in low energy and low dose rates radiation fields.

LISTAS DE FIGURAS

FIGURA 1. Esquema simplificado do sistema de avaliação internacional para dosimetria das radiações.	28
FIGURA 2. Esquema de calibração para os campos de radiação beta utilizando filtros homogeneizadores.	31
FIGURA 3. (a) Sistema padrão secundário beta 1, BSS1. (b) Contêiner blindado das fontes, manipulador e hastes para distância de calibração.	33
FIGURA 4. Países participantes na comparação internacional de metrologia, EUROMET, em campos de radiação beta.	36
FIGURA 5. Esquema de uma câmara de extrapolação.	43
FIGURA 6. Curva de saturação de uma câmara de extrapolação.	44
FIGURA 7. Profundidade nula real de uma câmara de extrapolação.	45
FIGURA 8. Curva de extrapolação de uma câmara de extrapolação.	46
FIGURA 9. (a) Espectros de absorção do filme MD-55-2, sem irradiar e irradiado com dose de 6 Gy. (b) espectro do filme MD-55-2 não irradiado apresentando maior visibilidade das franjas.	50
FIGURA 10. Sistema padrão secundário beta BSS2.	51
FIGURA 11. (a) Trava da fonte de radiação, (b) fontes padrões e (c) filtros homogeneizadores do BSS2.	53
FIGURA 12. Câmara de extrapolação PTW 23391.	55
FIGURA 13. Esquema da câmara de extrapolação PTW 23391.	56
FIGURA 14. Eletrômetro <i>Keithley</i> modelo 6517A.	56
FIGURA 15. Espectro de absorção do filme radiocrômico EBT na faixa de 300 a 900 nm para valores de dose de 1,0; 3,0 e 5,0 Gy.	57
FIGURA 16. Esquema da composição química do filme radiocrômico <i>Gafchromic</i> modelo EBT.	58
FIGURA 17. <i>Scanner Scanjet</i> HP G4050.	59
FIGURA 18. <i>Scanner Microtek</i> 9800XL.	60
FIGURA 19. Densitômetro de transmissão <i>X-Rite</i> 369.	61
FIGURA 20. Espectrofotômetro <i>Shimadzu UV Mini</i> 1240, no laboratório de dosimetria.	62
FIGURA 21. Arranjo experimental utilizado nos testes de corrente de fuga, repetitividade e reprodutibilidade da resposta da câmara de extrapolação PTW 23391.	65

FIGURA 22. Arranjo experimental utilizado na caracterização da câmara de extrapolação PTW 23391.....	66
FIGURA 23. Arranjo experimental utilizado nas irradiações das amostras de filme radiocrômico com o BSS2.....	69
FIGURA 24. Esquema de uma amostra de filme radiocrômico apresentando as regiões de interesse (ROI).....	70
FIGURA 25. Amostra de filme radiocrômico EBT sob análise no densitômetro X-Rite 369..	71
FIGURA 26. Amostra de filme radiocrômico EBT sob condições de irradiação em campos de ^{147}Pm	72
FIGURA 27. Filme radiocrômico EBT no acrílico posicionador sob condições de irradiação, no sistema BSS2 do LCD/CDTN, em campos de radiação beta ^{85}Kr	74
FIGURA 28. (a) Teste de estabilidade da câmara PTW 23391. (b) Câmara PTW 23391 sob condições de irradiação no sistema BSS2 do LCI/IPEN.....	75
FIGURA 29. Amostra de filme radiocrômico EBT sob condições de irradiação em campos de ^{147}Pm no sistema BSS2 do LCI/IPEN.....	76
FIGURA 30. Filme radiocrômico sob condições de irradiação em campos de ^{85}Kr do sistema BSS2 do LCI/IPEN.....	78
FIGURA 31. Corrente de fuga da câmara de extrapolação PTW 23391, entre janeiro e outubro de 2010.....	79
FIGURA 32. Repetitividade da câmara de extrapolação PTW 23391, polaridade positiva (a) e negativa (b).	80
FIGURA 33. Reprodutibilidade da câmara de extrapolação PTW 23391.	81
FIGURA 34. Profundidade nula real da câmara de extrapolação PTW 23391 em $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	82
FIGURA 35. Curvas de saturação da câmara de extrapolação PTW 23391, obtidas em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , para a profundidade 3,5 mm.....	83
FIGURA 36. Curvas de saturação para diferentes profundidades da câmara de extrapolação PTW 23391, obtidas em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	84
FIGURA 37. Curvas de saturação para diferentes profundidades da câmara de extrapolação PTW 23391, obtidas em campos de radiação beta de ^{85}Kr	84
FIGURA 38. Curvas de saturação para diferentes profundidades da câmara de extrapolação PTW 23391, obtidas em campos de radiação beta de ^{147}Pm	85
FIGURA 39. Curvas de extrapolação da câmara PTW em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm	86

FIGURA 40. Representação dos filmes radiocrômicos irradiados em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	88
FIGURA 41. Representação dos filmes radiocrômicos na componente de cor do canal vermelho.	89
FIGURA 42. Resposta do filme radiocrômico em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, em termos de densidade óptica líquida dos valores médios das componente de cor RGB e da componente de cor vermelha.	89
FIGURA 43. Representação dos filmes radiocrômicos irradiados em campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, digitalizados com o <i>scanner Microtek</i>	90
FIGURA 44. Representação das amostras de filme EBT digitalizadas em diferentes posições do <i>scanner</i> HP e analisados como o programa <i>DoseLab</i> . (a) Amostra irradiada com valor de dose de 4,5 Gy. (b) e 5,0 Gy.	91
FIGURA 45. Espectro de absorvância das amostras de filmes radiocrômicos irradiados em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	92
FIGURA 46. Resposta dos filmes radiocrômicos normalizada, irradiados em $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, analisados com o <i>scanner</i> , densitômetro e o espectrofotômetro.	92
FIGURA 47. Curva de calibração dos filmes radiocrômicos EBT, irradiados em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, digitalizados com o <i>scanner Microtek</i> e analisados com os programas <i>Image J</i> e <i>DoseLab</i>	94
FIGURA 48. Curva de calibração dos filmes radiocrômicos EBT, irradiados em campos de radiação beta de ^{85}Kr , digitalizados com o <i>scanner Microtek</i> e analisados com os programas <i>Image J</i> e <i>DoseLab</i>	95
FIGURA 49. Curva de calibração dos filmes radiocrômicos EBT, irradiados em campos de radiação beta de ^{147}Pm , digitalizados com o <i>scanner Microtek</i> e analisados com os programas <i>Image J</i> e <i>DoseLab</i>	95
FIGURA 50. Curva de estabilidade da amostra de filme EBT irradiada com 0,1 Gy de dose absorvida em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e digitalizada com o <i>scanner Microtek</i>	100
FIGURA 51. Curva de estabilidade da amostra de filme EBT irradiada com 0,1 Gy de dose absorvida em campos de radiação beta de ^{85}Kr e digitalizada com o <i>scanner Microtek</i>	101
FIGURA 52. Curva de estabilidade da amostra de filme EBT irradiada com 0,1 Gy de dose absorvida em campos de radiação beta de ^{147}Pm e digitalizada com o <i>scanner Microtek</i>	101

FIGURA 53. Perfil de dose horizontal do campo de radiação de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, irradiado com dose absorvida no ar de 0,8 Gy.	102
FIGURA 54. Perfil de dose vertical do campo de radiação de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, irradiado com dose absorvida no ar de 0,8 Gy.	103
FIGURA 55. Áreas de isodoses do campo de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, irradiado com dose absorvida de 0,8 Gy.	103
FIGURA 56. Distribuição das áreas de isodoses em 3D do campo de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, determinado para o valor de dose absorvida no ar de 0,8 Gy.	104
FIGURA 57. Perfil de dose horizontal do campo de radiação de ^{85}Kr , irradiado com dose absorvida no ar de 0,8 Gy.	105
FIGURA 58. Perfil de dose vertical do campo de radiação de ^{85}Kr , irradiado com dose absorvida no ar de 0,8 Gy.	105
FIGURA 59. Áreas de isodoses do campo de radiação beta de ^{85}Kr , irradiado com dose absorvida de 0,8 Gy.	106
FIGURA 60. Distribuição das áreas de isodoses em 3D do campo de radiação beta de ^{85}Kr , determinado para o valor de dose absorvida no ar de 0,8 Gy.	106
FIGURA 61. Perfil de dose horizontal do campo de radiação de ^{147}Pm , irradiado com dose absorvida no ar de 0,2 Gy.	107
FIGURA 62. Perfil de dose vertical do campo de radiação de ^{147}Pm , irradiado com dose absorvida no ar de 0,2 Gy.	108
FIGURA 63. Áreas de isodoses do campo de radiação beta de ^{147}Pm , irradiado com dose absorvida de 0,2 Gy.	108
FIGURA 64. Distribuição das áreas de isodoses em 3D do campo de radiação beta de ^{147}Pm , determinado para o valor de dose absorvida no ar de 0,2 Gy.	109
FIGURA 65. Curvas de extrapolação da câmara PTW em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , no LCI/IPEN.	112
FIGURA 66. Razão dos valores de dose absorvida dos filmes radiocrômicos avaliados no LCD/CDTN e no LCI/IPEN pelos valores de dose absorvida nominais dadas pelos sistemas BSS2 irradiados em campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm	116
FIGURA 67. Perfil de dose horizontal do campo de radiação de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, irradiado com dose absorvida no ar de 0,8 Gy.	117
FIGURA 68. Perfil de dose vertical do campo de radiação de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, irradiado com dose absorvida no ar de 0,8 Gy.	118

FIGURA 69. Áreas de isodoses do campo de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, irradiado com dose absorvida de 0,8 Gy.	118
FIGURA 70. Distribuição das áreas de isodoses em 3D do campo de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, determinado para o valor de dose absorvida no ar de 0,8 Gy.	119
FIGURA 71. Perfil de dose horizontal do campo de radiação de ^{85}Kr , irradiado com dose absorvida no ar de 0,8 Gy.	120
FIGURA 72. Perfil de dose vertical do campo de radiação de ^{85}Kr , irradiado com dose absorvida no ar de 0,8 Gy.	120
FIGURA 73. Áreas de isodoses do campo de radiação beta de ^{85}Kr , irradiado com dose absorvida de 0,8 Gy.	121
FIGURA 74. Distribuição das áreas de isodoses em 3D do campo de radiação beta de ^{85}Kr , determinado para o valor de dose absorvida no ar de 0,8 Gy.	121
FIGURA 75. Perfil de dose horizontal do campo de radiação de ^{147}Pm , irradiado com dose absorvida no ar de 0,2 Gy.	122
FIGURA 76. Perfil de dose vertical do campo de radiação de ^{147}Pm , irradiado com dose absorvida no ar de 0,2 Gy.	122
FIGURA 77. Áreas de isodoses do campo de radiação beta de ^{147}Pm , irradiado com dose absorvida de 0,2 Gy.	123
FIGURA 78. Distribuição das áreas de isodoses em 3D do campo de radiação beta de ^{147}Pm , determinado para o valor de dose absorvida no ar de 0,2 Gy.	124

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Distâncias de calibração e filtros para radiação de partículas beta de referência serie 1.....	32
TABELA 2. Atividades e taxa de dose para radiação de partículas beta de referência série 2.	32
TABELA 3. Características das fontes de radiação beta do sistema padrão secundário beta, BSS2, do LCD/CDTN.	53
TABELA 4. Composição química das camadas do filme radiocrômico <i>Gafchromic</i> modelo EBT.....	58
TABELA 5. Coeficientes angulares nos campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , obtidos com a câmara de extrapolação PTW 23391.....	87
TABELA 6. Coeficientes de calibração da câmara de extrapolação PTW 23391 nos campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm	87
TABELA 7. Valores de densidade óptica líquida, obtidos com o <i>scanner Microtek 9800XL</i> , o densitômetro <i>X-Rite 369</i> e o espectrofotômetro <i>Shimadzu UV Mini 1240</i>	93
TABELA 8. Funções de ajuste do filme EBT para com o <i>scanner</i> , densitômetro e espectrofotômetro. (y = dose absorvida e x = densidade óptica líquida).	93
TABELA 9. Valores de densidade óptica líquida obtidos nos campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	96
TABELA 10. Valores de densidade óptica líquida obtidos nos campos de radiação beta de ^{85}Kr	96
TABELA 11. Valores de densidade óptica líquida obtidos nos campos de radiação beta de ^{147}Pm	97
TABELA 12. Graus dos polinômios utilizados no ajuste das curvas de calibração dos filmes EBT obtidos em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , para com o <i>scanner</i> , densitômetro e espectrofotômetro.	98
TABELA 13. Densidade óptica líquida obtidos em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm	99
TABELA 14. Coeficientes de calibração obtidos em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm	99
TABELA 15. Características das fontes de radiação beta do sistema padrão secundário beta, BSS2, do LCI/IPEN.....	110

TABELA 16. Resultados dos coeficientes angulares determinadas com a câmara de extrapolação PTW 23391 no LCI/IPEN.	112
TABELA 17. Coeficientes de calibração da câmara de extrapolação PTW 23391 nos campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm do BSS2 do LCI/IPEN.	113
TABELA 18. Comparação entre os coeficientes de calibração da câmara de extrapolação PTW 23391 nos campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm do BSS2 do LCI/IPEN.	113
TABELA 19. Comparação das doses absorvidas no ar obtidas com filmes radiocrômicos irradiados no BSS2 do LCI/CDTN e do LCI/IPEN em campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm	114
TABELA 20. Diferença entre os valores de dose absorvida avaliados em relação aos valores de dose absorvida nominais, obtidos a partir dos filmes radiocrômicos irradiados no BSS2 do LCI/CDTN e do LCI/IPEN em campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm	115
TABELA 21. Valores dos tamanhos de campo uniformes das fontes $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , obtidos na comparação laboratorial entre o LCD/CDTN e o LCI/IPEN.	124

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAPM	American Association of Physics in Medicine
AEA	Atomic Energy Agency
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
BSS	Beta Secondary Standad
CCD	Charge coupled device (Dispositivo de carga acoplada)
CCRI	Consultative Committee for Ionizing Radiation
CDTN	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
CGCRE	Coordenação Geral de Credenciamento
CIPM	Comité International des Poids et Mesures
CMC	Calibration and Measurement Capabilities
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DOL	Densidade óptica líquida
Dpi	Dots per inch
ENEA	Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development
EUROMET	European Collaboration in Measurement Standards
HP	Hewlett-Packard
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
INMRI	The Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
IRD	Instituto de Radioproteção e Dosimetria
ISO	International Standartization Organization
ISP	International Specialty Products
KCDB	key comparison database
LCD	Laboratório de Calibração de Dosímetros
LCI	Laboratório de Calibração de Instrumentos
LNE	Laboratoire National de métrologie et d'Essais

LNHB	Laboratoire National Henri Becquerel
LNMRI	Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes
MCT	Ministério de Ciência e Tecnologia
MRA	Mutual Recognition Arrangement
NIST	National Institute of Standards and Technology
NMI	National Metrology Institute
NMIJ	National Metrology Institute of Japan
NRC	National Reserch Council of Canada
OMS	Organização Mundial da Saúde
PET	Politereftalato de etileno
Pixel	Picture Element
PMMA	Polimetilmetacrilato
PSDL	Primary Standard Dosimetry Laboratory
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
PTW	Physikalisch-Technische-Werkstätten
RGB	Red-Green-Blue
RMO	Regional Metrology Organisation
ROI	Region of Interest
SSDL	Secondary Standard Dosimetry Laboratory
STUK	Radiation and Nuclear Safety Authority
Tiff	Tagged Image File Format
TL	Termoluminescente
UV	Ultravioleta
VNIIM	All-Russian Institute for Metrology

SUMÁRIO

RESUMO.....	VII
ABSTRACT	IX
LISTAS DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XVI
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	XVIII
1. INTRODUÇÃO	24
FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	28
1.1. METROLOGIA DAS RADIAÇÕES IONIZANTES.....	28
1.1.1. <i>O papel do LNMRI/IRD/CNEN</i>	<i>29</i>
1.1.1. <i>Campos de radiação beta de referência.....</i>	<i>30</i>
1.1.2. <i>Coerência metrológica entre sistemas de campos de radiação beta</i>	<i>35</i>
1.2. GRANDEZAS DOSIMÉTRICAS	36
1.2.1. <i>Grandezas operacionais</i>	<i>36</i>
1.3. CÂMARA DE EXTRAPOLAÇÃO.....	39
1.3.1. <i>Câmaras de ionização</i>	<i>39</i>
1.3.2. <i>Teoria da Cavidade</i>	<i>40</i>
1.3.3. <i>Câmara de extrapolação</i>	<i>42</i>
1.3.4. <i>Medida absoluta da taxa de dose absorvida com uma câmara de extrapolação em campos padrões de radiação beta</i>	<i>46</i>
1.4. FILME RADIOCRÔMICO	48
1.4.1. <i>Características dosimétricas do filme radiocrômico</i>	<i>49</i>
2. MATERIAIS	51
2.1. SISTEMA PADRÃO SECUNDÁRIO BETA BSS2.....	51
2.2. SISTEMAS DE MEDIÇÃO	55
2.2.1. <i>Câmara de extrapolação PTW 23391</i>	<i>55</i>
2.2.2. <i>Eletrômetro Keithley 6517A</i>	<i>56</i>
2.2.3. <i>Filmes radiocrômicos</i>	<i>57</i>
2.3. INSTRUMENTOS DE LEITURA DOS FILMES RADIOCRÔMICOS.....	59
2.3.1. <i>Scanners.....</i>	<i>59</i>
2.3.2. <i>Densitômetro.....</i>	<i>60</i>

2.3.3. Espectrofotômetro.....	61
2.4. EQUIPAMENTOS AUXILIARES.....	62
3. METODOLOGIA.....	63
3.1. CORRENTE DE FUGA E ESTABILIDADE DA CÂMARA DE EXTRAPOLAÇÃO PTW 23391.....	63
3.2. CARACTERIZAÇÃO DA CÂMARA DE EXTRAPOLAÇÃO PTW 23391 EM CAMPOS DE RADIAÇÃO BETA	66
3.2.1. Profundidade nula real da câmara PTW 23391.....	66
3.2.2. Curvas de saturação da câmara PTW 23391 em campos de radiação beta.....	67
3.2.3. Curvas de extrapolação da câmara PTW 23391 em campos de radiação beta.....	67
3.3. CALIBRAÇÃO DA CÂMARA DE EXTRAPOLAÇÃO PTW 23391 EM CAMPOS DE RADIAÇÃO BETA	68
3.4. RESPOSTA DO FILME RADIOCRÔMICO EBT EM CAMPOS DE RADIAÇÃO BETA	68
3.5. CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES RADIOCRÔMICOS EBT EM CAMPOS DE RADIAÇÃO BETA	71
3.6. ESTUDO DA ESTABILIDADE DO FILME RADIOCRÔMICO EBT EM CAMPOS DE RADIAÇÃO BETA	72
3.7. MAPEAMENTO DO CAMPO E DETERMINAÇÃO DA UNIFORMIDADE DOS CAMPOS DE RADIAÇÃO BETA DO BSS2	73
3.8. COERÊNCIA METROLÓGICA ENTRE OS SISTEMAS BSS2 DO LCD/CDTN E DO LCI/IPEN	75
3.8.1. Medidas com a câmara de extrapolação PTW 23391 no LCI/IPEN.....	75
3.8.2. Medidas com os filmes radiocrômicos EBT no LCI/IPEN	76
3.8.3. Mapeamento dos campos de radiação beta no LCI/IPEN	77
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
4.1. CORRENTE DE FUGA E ESTABILIDADE DA CÂMARA DE EXTRAPOLAÇÃO PTW 23391.....	79
4.2. CARACTERIZAÇÃO DA CÂMARA DE EXTRAPOLAÇÃO PTW 23391 EM CAMPOS DE RADIAÇÃO BETA	82
4.2.1. Profundidade nula real da câmara PTW 23391.....	82
4.2.2. Curvas de saturação da câmara PTW 23391 em campos de radiação beta.....	82
4.2.3. Curvas de extrapolação da câmara PTW 23391 em campos de radiação beta.....	86
4.3. CALIBRAÇÃO DA CÂMARA DE EXTRAPOLAÇÃO PTW 23391 EM CAMPOS DE RADIAÇÃO BETA	87

4.4. RESPOSTA DO FILME RADIOCRÔMICO EBT EM CAMPOS DE RADIAÇÃO BETA ...	88
4.5. CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES RADIOCRÔMICOS EBT EM CAMPOS DE RADIAÇÃO BETA	94
4.6. ESTUDO DA ESTABILIDADE DO FILME RADIOCRÔMICO EBT EM CAMPOS DE RADIAÇÃO BETA	100
4.7. MAPEAMENTO DO CAMPO E DETERMINAÇÃO DA UNIFORMIDADE DOS CAMPOS DE RADIAÇÃO BETA DO BSS2	102
4.8. COERÊNCIA METROLÓGICA ENTRE OS SISTEMAS BSS2 DO LCD/CDTN E DO LCI/IPEN	110
4.8.1. <i>Comparação dos coeficientes de calibração com a câmara de extrapolação .</i>	110
4.8.2. <i>Comparação de dose absorvida no ar com filmes radiocrômicos</i>	114
5. CONCLUSÕES.....	126
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129

1. INTRODUÇÃO

As doses decorrentes de radiações ionizantes vêm sendo determinadas há mais de quarenta anos, porém a exatidão e a confiabilidade metrológica da dosimetria da radiação beta são ainda inferiores às aquelas já obtidas para as radiações gama e X.

A estimativa dos riscos da radiação beta representa um problema significativo na proteção radiológica, o que tem sido evidenciado cada vez mais pelos danos biológicos causados e observados na indústria nuclear, nas aplicações médicas, laboratoriais com isótopos radioativos e nas proximidades de aceleradores de elétrons, além dos acidentes nucleares, como o de Chernobyl, onde alguns indivíduos receberam doses fatais de radiação beta enquanto outros sofreram queimaduras na pele induzidas pela radiação.

A Comissão Internacional de Proteção Radiológica, ICRP, recomendou como grandezas limitantes para indicar o risco humano da exposição à radiação ionizante, a dose equivalente em um tecido ou órgão T, H_T , e a dose efetiva, E (ICRP, 1991). A ICRP ao recomendar a adoção destas grandezas, pretende minimizar os efeitos danosos decorrentes da utilização das radiações ionizantes sem limitar o seu benefício. Para a radiação beta, a principal preocupação é a estimativa da dose equivalente na pele e no cristalino do corpo humano.

A Comissão Internacional de Medidas e Unidades de Radiação, ICRU, definiu como grandezas operacionais, o equivalente de dose direcional, $H'(d)$, utilizada para monitoração de área, e o equivalente de dose pessoal, $H_p(d)$, utilizada na monitoração individual, (ICRU, 1980; ICRU, 1985; ICRU, 1988; ICRU, 1992). Estas grandezas são realizáveis experimentalmente em objetos simuladores estabelecidos internacionalmente (ISO, 1996). As grandezas operacionais relevantes na dosimetria da radiação beta e de elétrons, são o equivalente de dose pessoal, $H_p(0,07)$, e o equivalente de dose direcional; $H'(0,07; \alpha)$, para uma profundidade de 7 mg.cm^{-2} (DA SILVA, 1996).

Somente nos últimos anos a dosimetria da radiação beta para fins de proteção radiológica tornou-se alvo de estudos dosimétricos, o que é evidenciado pelo Report 56 da ICRU (1996). Este documento ressalta as aplicações do método de Monte Carlo e a pouca quantidade de medidas experimentais que ratifiquem os resultados dos cálculos teóricos. Os cálculos disponíveis simulam condições ideais bem diferentes da realidade experimental provocando uma diferença considerável entre resultados teóricos e experimentais, o que foi

verificado por medidas experimentais realizadas em campos de radiação beta e de elétrons quase monoenergéticos (DA SILVA, 1995 e 1996).

Em metrologia das radiações, é de fundamental importância assegurar a rastreabilidade das medições ao sistema internacional de metrologia (IAEA, 2002), definida como “a propriedade de um resultado de uma medição por meio da qual ele pode ser relacionado às referências estabelecidas, geralmente padrões nacionais ou internacionais, por intermédio de uma série de comparações, todas tendo incertezas bem estabelecidas” (ISO, 2004).

A Organização Internacional de padronização (ISO) especificou requerimentos para as radiações de referência para campos de radiação de partículas beta, através da norma ISO 6980. Para garantir a reprodutibilidade e a rastreabilidade dos campos beta de referência em laboratórios de calibração, o Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) desenvolveu o Sistema Padrão Secundário Beta (BSS) (AMBROSI, 2007).

Para evidenciar a coerência metrológica internacional entre sistemas padrões, na grandeza dose absorvida na profundidade de 0,07 mm no tecido em feixes de radiação beta, o Comitê Consultivo do Bureau Internacional des Poids et Measures (BIPM) para Radiações Ionizantes, CCRI, decidiu em maio de 2003, que laboratórios padrões primários participassem em medidas de comparação para essa grandeza. Uma comparação internacional foi realizada em 2004 com o PTB/Alemanha, como laboratório piloto e outros sete laboratórios, LNE-LNHB/França, ENEA-INMRI/Itália, STUK/Finlândia, VNIIM/ Rússia, NRC/Canadá, NIST/Estados Unidos e o NMIJ/Japão. Para determinação da grandeza e comparação dos coeficientes de calibração em campos de partículas beta de referência de ^{147}Pm , ^{85}Kr , ^{204}Tl , e $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, foram utilizados como instrumentos viajantes ou de transferência, uma câmara de ionização plana e um sistema de medição (EUROMET, 2007).

Uma câmara de ionização de placas paralelas e de volume variável, denominada câmara de extrapolação foi apresentada por Failla em 1937. Esta câmara, fundamentada pela teoria de Bragg-Gray, determina de forma absoluta e com alta exatidão a dose absorvida por meio da extrapolação da corrente de ionização medida para uma distância entre os eletrodos nula. A câmara de extrapolação é utilizada em laboratórios de padronização secundária para caracterização de campos padrões de radiação beta, com o objetivo de calibração de fontes, dosímetros e instrumentos.

No Brasil, atualmente, não existe um laboratório de padronização primária que realize a padronização de forma absoluta na grandeza de interesse em campos de radiação beta. Estudos nesta área da dosimetria ainda são poucos, seja simulando computacionalmente certas condições de exposição ou realizando medidas experimentais. No Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN, foram realizados estudos para desenvolver uma câmara de extrapolação como instrumento de referência para dosimetria de radiação beta (DIAS, 1996), para desenvolvimento de um sistema de referência e uma metodologia para calibração de aplicadores oftalmológicos utilizados em braquiterapia (OLIVEIRA, 2005), e para comparar métodos de calibração de aplicadores clínicos de radiação beta (ANTÔNIO, 2009).

No Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, CDTN, com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, da Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN, e do Ministério de Ciência e Tecnologia, MCT, foi adquirido um novo sistema padrão secundário de radiação beta, BSS2. Avaliações das características metrológicas do BSS2 foram realizadas com dosímetros termoluminescentes (TL) e câmaras de ionização, que apresentaram algumas limitações e grandes incertezas para os campos da fonte de ^{147}Pm , por causa da baixa energia de radiação (REYNALDO, 2005).

Estas limitações levam à procura de dosímetros de radiação que apresentem alta resolução espacial, sem necessidade de um procedimento especial de desenvolvimento o qual permita estimar valores absolutos de dose absorvida, com exatidão e precisão aceitável, além de apresentar a facilidade de manuseio na análise de dados. Algumas dessas características foram conseguidas com a introdução de dosímetros radiocrômicos (AAPM, 1998). Em anos mais recentes, materiais radiocrômicos na forma de filmes têm sido utilizados como dosímetros para aplicações médicas e industriais. Em dosimetria médica, o filme radiocrômico da marca *Gafchromic*® é um dos produtos mais avaliados. Este tipo de filme pode ser medido com densitômetros, *scanners* e espectrofotômetros dependendo da forma do campo de radiação.

Na atualidade não há estudos de utilização do filme radiocrômico na dosimetria de campos de radiação beta. A utilização de este dosímetro pode ser uma alternativa aos inúmeros problemas relacionados com a determinação de curvas de isodose e distribuições de dose para campos de radiação com regiões de alto gradiente, em relação aos sistemas dosimétricos convencionais de medição, como câmaras de ionização, semicondutores, detectores TL e filmes radiográficos (AAPM, 1998).

O objetivo principal deste trabalho consiste na caracterização da câmara de extrapolação PTW modelo 23391 e de filmes radiocrômicos *Gafchromic*® modelo EBT para serem usados como instrumentos de medida para verificação da coerência metrológica entre campos de radiação beta gerados por sistemas padrões.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

Realizar estudos das características da resposta da câmara de extrapolação e dos filmes radiocrômicos, em função da dose absorvida, em campos do sistema BSS2 do CDTN.

Definir uma metodologia para leitura dos filmes radiocrômicos.

Mapear e determinar a homogeneidade dos campos de radiação beta do sistema BSS2 do CDTN, por meio de perfis de dose e distribuições das linhas de isodose e duas e três dimensões.

Realizar ensaio para verificação da coerência metrológica entre o sistema BSS2 do CDTN e o sistema BSS2 do IPEN, em termos de dose absorvida no ar.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1. Metrologia das radiações ionizantes

Na área de metrologia das radiações ionizantes, o sistema internacional de medidas permite estabelecer, a nível mundial, a estrutura de coerência metrológica, disponibilizando à comunidade a calibração de dosímetros e estabelecendo a rastreabilidade das medidas a padrões primários de medida. Os dosímetros padrões primários são verificados internacionalmente através de comparações com outros padrões do mesmo nível metrológico, mantidos nos laboratórios de metrologia. Uma representação simplificada do sistema de verificação internacional para dosimetria das radiações é mostrado na Figura 1.

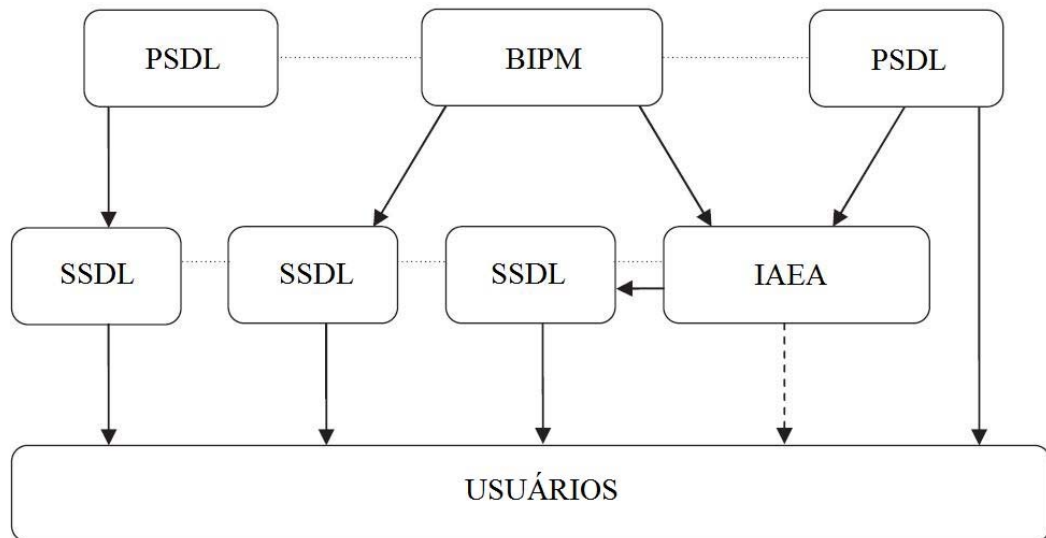


FIGURA 1. Esquema simplificado do sistema de avaliação internacional para dosimetria das radiações.

Fonte. (IAEA, 2009)

O laboratório central neste esquema é o Bureau International des Poids et Mesures (BIMP), criado no âmbito da Convenção do Metro de 1875 para atuar em matéria da metrologia mundial, particularmente sobre padrões de medição, aumentando a exatidão, faixa de medida e a necessidade de demonstrar a coerência e confiabilidade dos padrões primários (IAEA, 2009).

Os laboratórios padrões primários de dosimetria (PSDL) mantêm padrões dosimétricos, participam de comparações bilaterais e calibram os padrões dos laboratórios secundários de dosimetria (SSDL). Os SSDL mantêm os dosímetros padrões buscando assegurar a

confiabilidade metrológica e calibram os dosímetros de referência ou de medidas no campo de usuários.

As comparações bilaterais conduzidas pelo BIPM constituem um elemento essencial das informações contidas no Banco de Dados das Comparações-chaves (KCDB), que são complementadas por comparações multilaterais organizadas pelo Comitê Consultivo para Radiações Ionizantes (CCRI). No entanto, as comparações do BIPM e do CCRI, por sua natureza, são geralmente limitadas a um número relativamente pequeno de laboratórios padrões primários (IAEA, 2009).

1.1.1. O papel do LNMRI/IRD/CNEN

A CNEN, por intermédio do seu instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD), via o seu Laboratório Nacional de Metrologia das Radiações Ionizantes (LNMRI), está encarregada, desde 1989, da responsabilidade pela padronização de referência nacional das radiações ionizantes. Esta responsabilidade tem sido renovada há vários anos, mediante convênios celebrados como o INMETRO.

No dia 03 de julho de 2008, foi assinado e publicado no DOU nº 128, Séc. 3, Pág. 124, do dia 07 de julho de 2008, a renovação do Termo que esclarece e amplia a atribuição do LNMRI/IRD para assumir a responsabilidade pela padronização de referência nacional das radiações ionizantes, pela disseminação das suas respectivas unidades de medida, inclusive em apoio às atividades de mútuo interesse. O Termo de Designação, então assinado, permanecerá válido por 10 (dez) anos.

A atividade metrológica científica e industrial abrangida pelo presente Termo de Designação compreende todas as atividades usualmente atribuídas a um laboratório de referência nacional, em estreita articulação com o INMETRO. Afora estas atividades, o Termo de Designação reitera em diversos parágrafos que o LNMRI/IRD deve:

Estimular, em sua área de atuação, a acreditação de laboratórios pela Coordenação Geral de Credenciamento (CGCRE) do INMETRO e

Disponibilizar pessoal técnico qualificado para integrar as equipes de avaliação de laboratórios, quando da execução de avaliações de laboratórios acreditados ou em fase de acreditação pela CGCRE/INMETRO, no campo das radiações ionizantes.

É natural, considerando os diferentes campos de acreditação, tais como: dimensional, mecânico, termodinâmico, tempo e frequência, radiações ionizantes e outros, que o INMETRO faça uso da competência técnica dos laboratórios de metrologia científica e dos laboratórios designados para auxiliá-lo no processo de acreditação. Sendo assim, é papel do LNMRI/IRD, como laboratório designado para radiações ionizantes, elaborar e desenvolver os requisitos técnicos específicos para sua área, que, uma vez publicados e em associação aos requisitos gerais da norma ISO 17025, poderão ser utilizados como documento normativo do INMETRO (RAMOS, 2009).

1.1.1. Campos de radiação beta de referência

Uma fonte padrão primária é uma fonte calibrada por método de medidas absolutas e com certificado de um laboratório de padronização primária, quanto às grandezas fundamentais. Quando uma fonte é calibrada com referência a uma fonte padrão primária, é chamada de fonte padrão secundária.

As fontes calibradas devem satisfazer a algumas exigências, no caso dos emissores beta, a característica principal é a uniformidade superficial da emissão. Alguns países mantêm normas específicas que os fabricantes são obrigados a seguir. Estas normas prescrevem todas as características das fontes e métodos da sua calibração; unificam, portanto, os procedimentos de calibração de laboratórios diferentes, e proporcionam uma alta precisão e uma reprodutibilidade muito boa de calibração (CALDAS, 1980).

A Organização Internacional de padronização (ISO) especificou requerimentos para as radiações de referência para campos de radiação de partículas beta, através da norma ISO 6980. Esta norma é dividida em três partes: ISO 6980-1: Métodos de produção, ISO 6980-2: Fundamentos de calibração referentes às grandezas básicas de caracterização do campo de radiação e ISO 6980-3: Calibração de dosímetros pessoais e de área e determinação de suas respostas em função da energia e ângulo de incidência da radiação beta.

A primeira parte da norma especifica o padrão de exigências para radiações beta de referência, produzidas por fontes de radionuclídeos usadas para calibração de dosímetros pessoais e medidas de taxa de dose, e de sua resposta em função da energia da partícula beta. Adicionalmente, fornece as características dos radionuclídeos que têm sido usados para produzir radiações beta de referência, provê exemplos de construção de fontes aceitáveis e

descreve métodos para medidas de partículas beta de energia residual máxima e taxa de equivalente de dose no ar a uma profundidade de $7 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ na esfera ICRU (REYNALDO, 2005).

Esta norma propõe duas séries de radiações de referência beta que podem ser escolhidas para determinar as características de um instrumento.

Radiações de referência da série 1 são produzidas por fontes radioativas usadas com filtros homogeneizadores projetados para proporcionar taxas de dose uniformes sobre uma grande área e para uma distância específica (Figura 2). Exemplos de campos de referência da série 1 são apresentadas na Tabela 1.

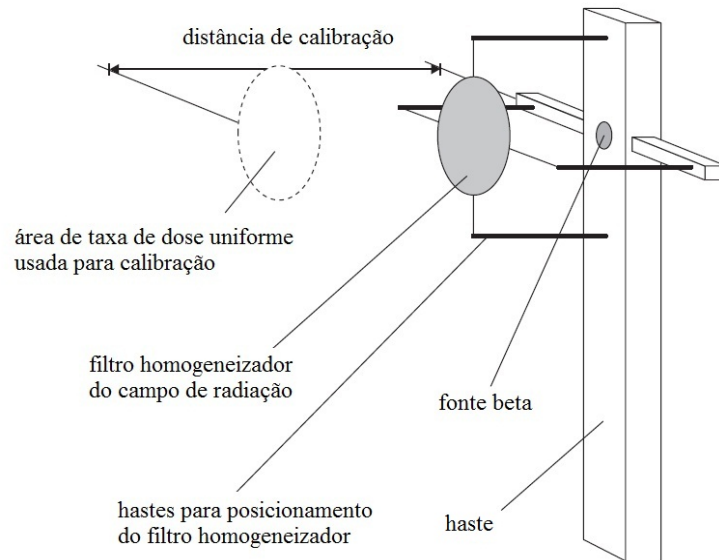


FIGURA 2. Esquema de calibração para os campos de radiação beta utilizando filtros homogeneizadores.

Fonte. (IAEA, 1999)

TABELA 1. Distâncias de calibração e filtros para radiação de partículas beta de referência serie 1.

Radionuclídeos	Distância de calibração (cm)	Distância fonte/filtro (cm)	Material do filtro e dimensões
^{147}Pm	20	10	1 disco de tereftalato de polietileno de 5 cm de raio e 14 mg de massa por unidade de área (cm^{-2}), com um furo de 0,975 cm de raio no centro.
^{85}Kr e ^{204}Tl	30	10	2 discos concêntricos, 1 disco de tereftalato de polietileno, de 4 cm de raio e massa por unidade de área de 7 mg.cm^{-2} , mais um disco de tereftalato de polietileno, de 2,75 cm de raio e massa por unidade de área de 25 mg.cm^{-2} .
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	30	10	3 discos concêntricos de tereftalato de polietileno, cada um com 25 mg.cm^{-2} de massa por unidade de área e de raios 2, 3 e 5 cm.

TABELA 2. Atividades e taxa de dose para radiação de partículas beta de referência série 2.

Radionuclídeo	Características da fonte		Taxa de dose absorvida	
	Atividade nominal (MBq)	Área nominal (cm^2)	Na superfície da fonte (Sv.h^{-1})	Na distância especificada (Sv.h^{-1})
^{14}C	1	9	0,6	0,006 a 5 cm
^{147}Pm	10^2	25	3	0,003 a 20 cm
^{204}Tl	10^2	14	10	0,003 a 50 cm
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	10^3	0,7	700	0,03 a 50 cm
$^{106}\text{Ru}/^{106}\text{Rh}$	10^2	1,5	6	0,001 a 100 cm

Fonte: ISO 6980-1, 2001.

Radiações de referência da série 2 são produzidas sem o uso de filtros homogeneizadores. Pequenas áreas de taxa de dose uniforme são conseguidas somente perto das fontes, mas esta série tem a vantagem de estender a faixa de taxa de dose e energia além das da série 1. Os radionuclídeos usados são aqueles da série 1 com adição do ^{14}C e $^{106}\text{Ru}+^{106}\text{Rh}$; essas fontes produzem taxas de dose acima de $10\text{ Sv}\cdot\text{h}^{-1}$, como demonstrado na Tabela 2.

Definida a padronização dos campos beta de referência e para facilitar a reprodutibilidade destes em laboratórios de calibração, o Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) desenvolveu o Sistema Padrão Secundário Beta (BSS). O primeiro BSS a ser desenvolvido foi o do tipo 1, BSS1, fabricado e distribuído pela Buchler em Braunschweig (Figura 3). O BSS1 é composto por quatro fontes padrões de radiação beta, sendo duas de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e as outras de ^{147}Pm e ^{204}Tl , filtros homogeneizadores, sistema de fixação das fontes e painel de controle. Estas fontes possuem certificado de calibração em termos de taxa de dose absorvida no ar e taxa de dose absorvida no tecido rastreáveis ao padrão primário do PTB (AMBROSI, 2007).

Cada fonte é guardada rosqueada dentro de um contêiner blindado e, para manuseá-la deve-se usar óculos protetores, e pinça com proteção de PMMA, com a finalidade de levar a fonte do recipiente blindado até o obturador, onde será rosqueada. Este procedimento exige cuidado para não irradiar parte do corpo do operador (Figura 3.b).

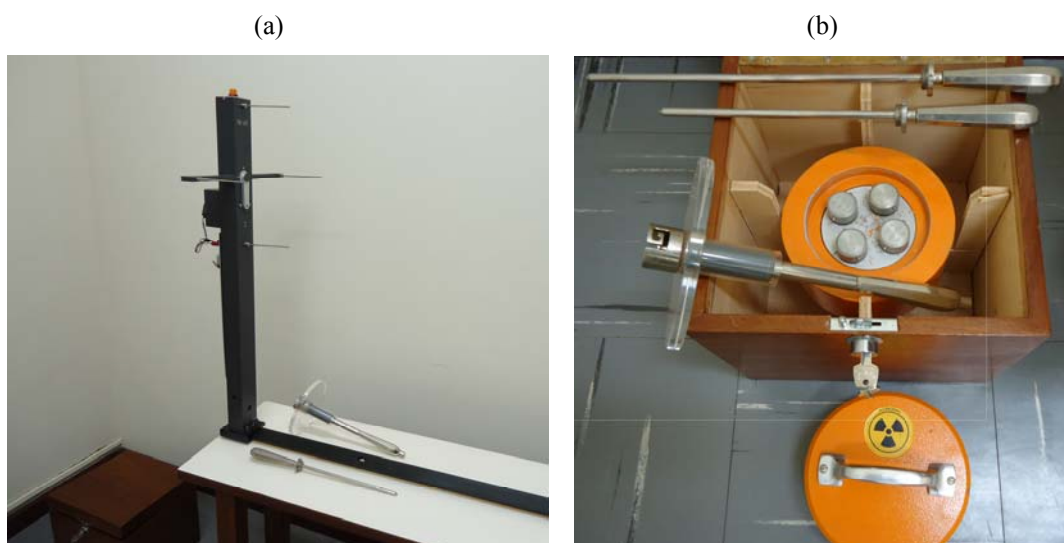


FIGURA 3. (a) Sistema padrão secundário beta 1, BSS1. (b) Contêiner blindado das fontes, manipulador e hastes para distância de calibração.

Cada fonte é provida com filtros como requerido pela ISO 6980-1, que são posicionados perpendicularmente ao eixo central do feixe de radiação. A distância de calibração é estabelecida por duas hastes de 20 cm e 30 cm, rosqueáveis no orifício de acoplamento das fontes. No ponto de calibração são posicionados monitores de calibração ou simuladores de interesse para fixação de dosímetros.

O sistema BSS1 possui uma haste de 76 cm de altura para fixação das fontes, com um orifício onde será rosqueada a fonte (Figura 3.a). Na frente deste orifício um obturador está acoplado, abrindo e fechando eletronicamente através de um painel de controle. Este painel de controle possui um relógio para determinação do tempo de irradiação, fechando o obturador assim que terminar o tempo predeterminado (REYNALDO, 2005).

Em 1994, problemas com o fornecimento das fontes de ^{204}Tl surgiram; as investigações mostraram que o emissor de ^{85}Kr poderia ser um substituto. Além disso, a necessidade de garantia de qualidade tem aumentado bastante, assim que uma reformulação foi feita e resultado foi o novo Sistema Padrão Secundário Beta do tipo 2 (BSS2), que foi produzido desde 1998 pela QSA Global GmbH.

O BSS2 é composto por uma unidade de controle eletrônica que opera em conjunto com um *software* especial para facilidade e controle das irradiações. Neste *software* foram considerados todos os fatores de calibração e correção. Este sistema reconhece o tipo de fonte e o filtro homogeneizador correspondente a cada fonte beta, a distância e o ângulo que forma o instrumento em teste com a direção do feixe, comparando todos estes valores com os valores predefinidos (AMBROSI, 2007).

O sistema de proteção contra as radiações do novo sistema melhorou em relação ao do BSS1, cada fonte possui seu próprio obturador e estas podem ser manipuladas sem risco à exposição.

O BSS2 é composto por três fontes padrões beta, de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , mas cada uma apresentando maior atividade em relação às fontes do BSS1. As fontes foram calibradas em conjunto com seus correspondentes filtros homogeneizadores, nas distâncias de calibração já definidas anteriormente. Além disso, a calibração da fonte de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ foi realizada nas distâncias de 11, 20, 30 e 50 cm, sem filtro homogeneizador.

O sistema de irradiação do BSS2 pode ser girado para obter um feixe vertical. Após 1996, um novo conceito para as normas ISO em campos de radiação de referência foi introduzida para fótons e nêutrons, que também deve ser realizado para a radiação de partículas beta. Portanto, entre 2004 e 2006, as novas versões ISO 6980-1, ISO 6980-2 e ISO 6980-3, foram emitidas, considerando, entre outras coisas, a experiência adquirida com o novo BSS2 (AMBROSI, 2007).

1.1.2. Coerência metrológica entre sistemas de campos de radiação beta

Em outubro de 1999, os laboratórios nacionais de metrologia de todo o mundo, assinaram o Acordo de Reconhecimento Mútuo do Comité International des Poids et Mesures, CIPM-MRA (MRA: "Acordo sobre o reconhecimento mútuo da equivalência dos padrões nacionais e de certificados de calibração emitidos pelos Institutos nacionais de metrologia") com o objectivo de estabelecer uma base para o mútuo reconhecimento de calibração. Neste contexto, o BIPM publicou em suas páginas web uma lista de Capacidades de Calibração de Medidas (CMC) dos institutos que assinaram o MRA/CIPM. No entanto, os serviços de calibração só podem ser inscritos se um sistema de gestão da qualidade foi estabelecido (por exemplo um acordo com a norma ISO 17025). O controle de qualidade e confiabilidade nas capacidades dos outros laboratórios é assegurada se o laboratório participou satisfatoriamente em uma comparação em que o grau de equivalência com outros institutos nacionais de metrologia ou laboratórios de calibração foi determinado.

Para evidenciar a coerência metrológica internacional entre sistemas padrões, na grandeza dose absorvida na profundidade de 0,07 mm no tecido em feixes de radiação beta, o Comitê Consultivo para Radiações Ionizantes do BIPM (CCRI), decidiu em maio de 2003, que laboratórios padrões primários participassem em medidas de comparação para essa grandeza. Uma comparação internacional foi realizada em 2004 com o Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB/Alemanha, como laboratório piloto e outros sete laboratórios, LNE-LNHB/França, ENEA-INMRI/Itália, STUK/Finlândia, VNIIM/ Rússia, NRC/Canadá, NIST/Estados Unidos e o NMIJ/Japão. Para determinação da grandeza e comparação dos coeficientes de calibração em campos de partículas beta de referência de ^{147}Pm , ^{85}Kr , ^{204}Tl , e $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, foram utilizados como instrumentos viajantes ou de transferência, uma câmara de ionização plana e um sistema de medição (EUROMET, 2007).

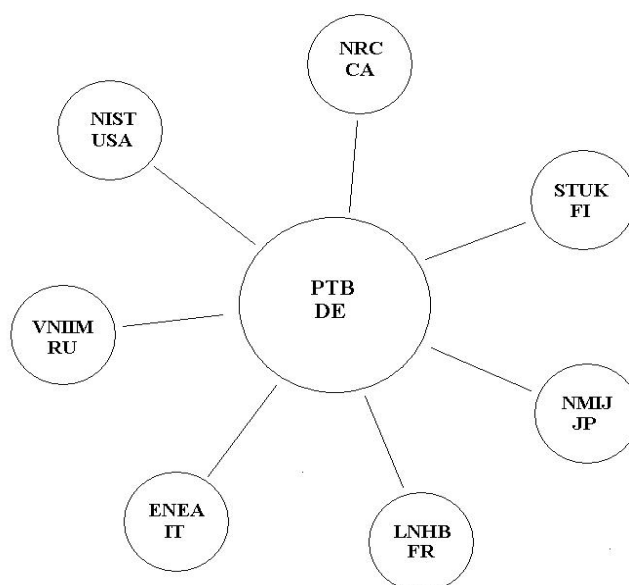


FIGURA 4. Países participantes na comparação internacional de metrologia, EUROMET, em campos de radiação beta.

Fonte. (EUROMET, 2007)

1.2. Grandezas dosimétricas

Desde a descoberta da radiação, o homem percebeu a necessidade de quantificar a radiação ionizante. À medida que as pesquisas foram desenvolvidas, aumentando os conhecimentos sobre as interações da radiação com a matéria, sobre os efeitos biológicos causados por elas e com o surgimento de novos métodos computacionais, foram introduzidos novos conceitos quanto às grandezas mais apropriadas a serem utilizadas (ICRU, 1998; ICRP, 1991).

A quantificação da radiação recebida pelo homem cumpre um importante papel para os propósitos de planejamento e atuação da proteção radiológica e cumprimento de normas regulatórias introduzidas em função dos conhecimentos adquiridos nesta área.

1.2.1. Grandezas operacionais

A ICRU (1993) definiu grandezas operacionais, sendo duas delas pertinentes a dosimetria de radiação beta: o equivalente de dose pessoal, para monitoração individual, e o equivalente de dose direcional, para monitoração de área em campos de radiação.

Para a calibração de dosímetros pessoais de radiação beta, as leituras dos dosímetros podem ser comparadas com o valor verdadeiro convencional de equivalente de dose pessoal, $H_p(0,07)$ em um ponto do corpo humano. O equivalente de dose pessoal, $H_p(0,07)$, é o equivalente de dose em tecido mole na profundidade de 0,07 mm abaixo de um ponto especificado no corpo (INMETRO, 2003).

Para obter essas medidas, a ISO 6980-3 recomenda o uso de objetos simuladores do tronco, do dedo e do braço. O tronco é adequadamente representado, na prática, por um paralelepípedo cheio de água, com paredes de polimetilmetacrilato, PMMA, com dimensões de 30 cm x 30 cm x 15 cm, com parede frontal de 2,5 mm de espessura e as demais de 10 mm de espessura. Para radiação beta somente este simulador pode ser substituído por uma placa de PMMA, com pelo menos 10 cm x 10 cm x 1,0 cm; os dedos são representados por uma vareta cilíndrica de PMMA, com 19 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento; os braços são representados por um cilindro, cheio de água, de PMMA, com 73 mm de diâmetro com paredes de 2,5 mm de espessura e 300 mm de comprimento (ISO, 2004).

A grandeza usada para monitoração de área em campos de radiação beta é o equivalente de dose direcional, $H'(d, \Omega)$, que é definida em um simulador chamado esfera ICRU¹. O equivalente de dose direcional, $H'(0,07; \vec{\Omega})$, é o equivalente de dose que, em um ponto no campo de radiação, pode ser produzido pelo correspondente campo expandido na esfera ICRU a uma profundidade de 0,07 mm em um raio da esfera na direção $\vec{\Omega}$.

Grandezas análogas para equivalente de dose podem ser definidas em termos de dose absorvida. Por exemplo, a dose absorvida pessoal, $D_p(d)$, e dose absorvida direcional, $D'(d, \Omega)$. Dose absorvida (D) é o quociente de $d\bar{\epsilon}$ por dm , onde $d\bar{\epsilon}$ é a energia média

¹ A esfera ICRU possui 30 cm de diâmetro, de tecido equivalente com uma densidade de 1 g.cm⁻³ e a composição de massa de 76,2% de oxigênio, 10,1% de hidrogênio 11,1% de carbono e 2,6% de nitrogênio.

depositada pela radiação ionizante na matéria de massa dm , em um ponto de interesse (ISO, 2004), ou seja:

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dm} \quad (1)$$

A unidade de dose absorvida é J.kg^{-1} com o nome especial de Gray (Gy).

A energia média depositada pela radiação ionizante, $\bar{\varepsilon}$, em um volume de matéria, é dada pela expressão:

$$\bar{\varepsilon} = R_{in} - R_{out} + \sum Q \quad (2)$$

onde

R_{in} é soma de todas as energias das partículas ionizantes, com carga ou sem carga, que entram no volume;

R_{out} é a soma de todas as energias das partículas ionizantes, com carga ou sem carga, que saem do volume;

$\sum Q$ é o somatório de todas as mudanças nas energias de repouso dos núcleos e partículas elementares que ocorrem no volume.

Para elétrons de todas as energias, o fator de qualidade é considerado como um, em concordância com a ICRP 60 (1991). Então, enquanto muitos valores dosimétricos são dados por doses absorvidas em Gy, os mesmos valores numéricos são aplicados para equivalentes de dose em Sv.

O raio da esfera ICRU (15 cm) é muito maior do que o alcance máximo da radiação beta no tecido, a parte pequena da superfície esférica na qual a radiação beta passa atingindo o ponto de interesse pode ser representado adequadamente por um plano. Então, o equivalente de dose direcional, $H'(d,\alpha)$, especifica como o equivalente de dose no material de tecido equivalente varia com o ângulo α entre a radiação beta unidirecional e a radiação normal à superfície. Esta variação ocorre tanto devido à transmissão na camada entre a superfície e a profundidade d , quanto ao retroespalhamento para o material de maiores profundidades, ambos dependendo do ângulo α (ICRU, 1993).

Equivalente de dose (H) é o produto da dose absorvida, D, e do fator de qualidade Q, ou seja:

$$H = D \cdot Q \quad (3)$$

Um monitor de área para radiação beta teria uma resposta angular ideal para medidas de dose na pele se sua leitura variasse proporcionalmente para $H'(d,\alpha)$ quando fosse gerado em um campo unidirecional. Na prática, campos de radiação beta unidirecionais não existem devido ao forte espalhamento da radiação no ar. Uma câmara de extrapolação é um instrumento de referência para determinação da resposta angular e de energia. Entretanto, a variação com α de $H'(d,\alpha)$ para energia média do espectro é sempre usada como uma referência com a qual a resposta angular medida de detector de radiação beta é comparada (ICRU, 1993).

1.3. Câmara de extrapolação

1.3.1. Câmaras de ionização

Os detectores de radiação mais antigos e, ainda assim, os mais utilizados, baseiam-se nos efeitos produzidos quando uma partícula carregada passa através de um gás (KNOLL, 1989). As câmaras de ionização são os detectores deste tipo mais simples, sendo considerados os instrumentos mais práticos e precisos para medidas de exposição e dose absorvida.

As câmaras de ionização consistem em geral de um fio central, chamado eletrodo coletor, circundado por uma parede que delimita a região preenchida pelo gás. Ao atravessarem o gás, as partículas carregadas causam ionizações e excitações em suas moléculas; quando uma molécula neutra é ionizada, dá origem a um elétron livre e a um íon positivo. Aplicando-se uma diferença de potencial entre o eletrodo coletor e a parede da câmara, os elétrons livres migram em direção ao eletrodo central, onde são coletados, enquanto que os íons positivos vão em direção à parede, resultando na formação de um pulso elétrico. Neste caso, como a intensidade do sinal de saída depende da carga coletada, ela dependerá do número de pares de íons produzidos no gás.

As câmaras são utilizadas para detectar radiações alfa, beta, X, gama e fragmentos de fissão. Apresentam os mais variados volumes e formas, podendo ser esféricas, cilíndricas ou

de placas paralelas. A escolha de materiais, dimensões e forma da cavidade depende da finalidade à qual se destina a câmara, assim como ao tipo de radiação a ser medida. No caso de uma câmara destinada a medir exposição, suas paredes devem ser de um material equivalente ao ar, enquanto que, em uma câmara destinada a medir dose absorvida no meio, a parede e o gás devem ser equivalentes ao meio em questão. A desvantagem deste tipo de detector é que produz sinais de saída muito baixos, que podem ser facilmente confundidos com ruído eletrônico.

O uso das câmaras de ionização em dosimetria é baseado no princípio que relaciona a dose absorvida na parede da câmara com a dose absorvida na cavidade, preenchida por um gás. Esta teoria é discutida a seguir.

1.3.2. Teoria da Cavidade

Para medir a dose absorvida em um meio é necessária a introdução de um detector de radiação. Todavia, a presença deste detector, ou cavidade, provoca uma descontinuidade no meio, uma vez que, em geral, diferem em composição e número atômico. Este problema é contornado pela aplicação da teoria da cavidade.

Esta teoria tem o propósito de relacionar a dose absorvida numa cavidade (detector), de tamanho e composição arbitrários, com a dose absorvida no meio. A teoria a ser usada é determinada pelo tamanho da cavidade quando comparado ao alcance dos elétrons no meio em questão.

O primeiro a enunciar uma teoria cavitária foi Gray (1929), embora Bragg tenha, em 1912, discutido qualitativamente este assunto. O modelo estudado por Bragg para fótons propunha que a introdução de uma cavidade num meio uniformemente irradiado não perturbaria o fluxo ou a distribuição de partículas secundárias carregadas (KASE, 1987; SHANI, 1991).

O "Princípio de Equivalência", enunciado por Gray, afirmava que: "a energia perdida pelos elétrons, por unidade de volume, na cavidade é $1/S_{meio}^{cav}$ vezes a energia perdida pelos fótons, por unidade de volume, no meio adjacente", onde $1/S_{meio}^{cav}$ é o inverso da razão dos poderes de freamento dos elétrons na cavidade e no meio. Este princípio é conhecido na forma:

$$D_{meio} = \frac{1}{S_{meio}^{cav}} D_{cav} \quad (4)$$

onde: D_{meio} e D_{cav} são as doses absorvidas no meio e na cavidade, respectivamente. Este princípio só é válido se a cavidade for pequena comparada ao alcance dos elétrons. Supõe-se também que toda a dose absorvida na cavidade é depositada pelas partículas carregadas que a atravessam, isto é, nenhuma partícula carregada é gerada no interior da cavidade (KASE, 1987; SHANI,1991).

Em 1937, Laurence modificou este modelo substituindo a razão entre os poderes de freamento para uma única energia pela média ponderada do espectro de energias iniciais dos elétrons a uma distância da parede igual ao alcance máximo destas partículas. Ainda assim, as teorias de Bragg-Gray e de Laurence falharam, pois não incluíram as perdas de energia relacionadas à produção de fótons, elétrons de alta energia resultantes da colisão entre as partículas carregadas que atravessam a cavidade, e que depositam sua energia fora do volume de interesse.

Esta falha só foi corrigida em 1955 pela teoria de Spencer-Attix. Nesta teoria, foi introduzida uma energia de corte, Δ , definida como a energia cinética necessária para um elétron possuir alcance igual ao tamanho médio da cavidade. Este modelo traz as seguintes implicações: elétrons com energias maiores que Δ podem atravessar a cavidade e assim transportar energia; elétrons com energias menores que Δ dissipam sua energia no local onde foram produzidos, ou seja, têm "alcance nulo", e não penetram na cavidade. Esta teoria se limita, assim como a teoria de Bragg-Gray, a cavidades pequenas, sendo violada para os casos onde o tamanho da cavidade é comparável ao alcance das partículas carregadas secundárias geradas pela interação da radiação indiretamente ionizante com o meio ou parede da cavidade.

Na prática, as cavidades não são infinitesimais. Geralmente, as dimensões das cavidades são comparáveis ao alcance dos elétrons, de modo que o espectro no interior delas consiste de elétrons gerados tanto no meio quanto na cavidade.

Em 1966, Burlin foi primeiro a propor um modelo que levou em conta a atenuação dos elétrons gerados no meio e o aumento de elétrons gerados na cavidade. Este modelo, chamado de "Teoria Cavitária Geral" é dada pela seguinte Equação (ATTIX, 1986; SHANI, 1991):

$$D_{meio} = \left[d_m S_{meio}^{cav} + (1-d) \frac{(\mu_{en}/\rho)_{cav}}{(\mu_{en}/\rho)_{meio}} \right]^{-1} D_{cav} \quad (5)$$

onde: ${}_m S_{meio}^{cav}$ é a razão dos poderes de freamento dos elétrons na cavidade e no meio; $(\mu_{en}/\rho)_{cav}$ e $(\mu_{en}/\rho)_{meio}$ são os coeficientes de absorção de energia de massa para a cavidade e o meio, respectivamente; D_{meio} e D_{cav} são as doses absorvidas no meio e na cavidade, respectivamente; e d é um fator, dependente do tamanho da cavidade, que representa o quanto o fluxo de elétrons gerados no meio é atenuado na cavidade. O valor de d é 1 para cavidades pequenas e zero para cavidades grandes, e é dado pela Equação 6:

$$d = \frac{1 - e^{-\beta g}}{\beta g} \quad (6)$$

onde: β é o quociente de atenuação de massa efetivo para elétrons e g é o livre caminho médio para os elétrons que atravessam a cavidade.

A teoria de Burlin, inicialmente desenvolvida para fótons, foi estendida em 1969 para elétrons, considerando-se que nenhum elétron seria gerado na cavidade por meio da interação direta entre o feixe primário de radiação e o material da cavidade (OGUNLEYE, 1985).

1.3.3. Câmara de extrapolação

Foi em 1937 que Failla desenvolveu a primeira câmara de ionização com o propósito de medir a dose superficial de um material sob irradiação, conforme apresentada na Figura 5. Este instrumento, fundamentado pela teoria de Bragg-Gray, permite determinar de forma absoluta, a dose absorvida ou a taxa de dose absorvida de emissores beta e de outras fontes de radiação de pequeno poder de penetração a várias profundidades, satisfazendo às principais imposições da teoria cavitária, que são: pequena superfície coletora e pequeno volume de ar (CALDAS, 1980). Estas câmaras são utilizadas em laboratórios de padronização secundária para caracterização de campos padrões de radiação beta, com o objetivo de calibração de fontes, dosímetros e instrumentos.

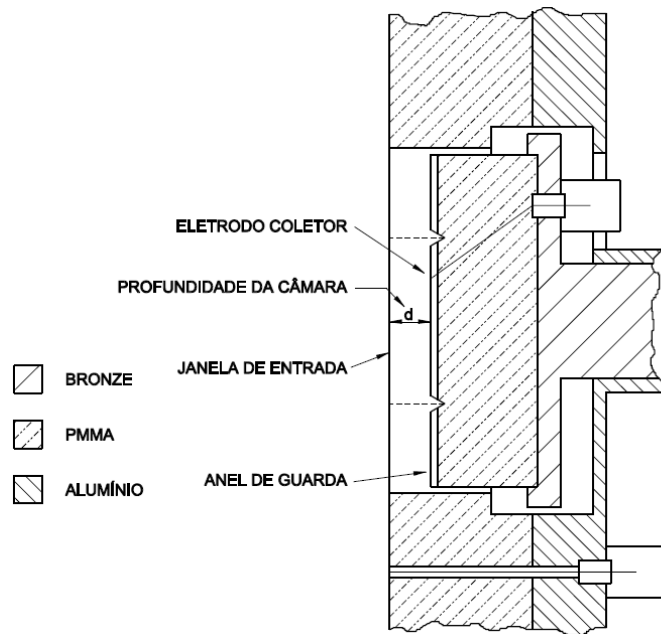


FIGURA 5. Esquema de uma câmara de extrapolação.

Fonte. (PRUIT e col., 1988)

Basicamente a câmara de extrapolação é uma câmara de ionização plana, ou de placas paralelas, equipada com um micrômetro preso ao pistão para variar a distância entre os eletrodos, que será chamada de profundidade da câmara. A janela de entrada é um eletrodo de alta tensão, que consiste em um filme de Politereftalato de etileno (PET), com espessura muito fina (cerca de $0,75 \text{ mg.cm}^{-2}$), o bastante para não atenuar a radiação beta e suficientemente resistente para não se deformar. O outro eletrodo de alta tensão é o eletrodo coletor de material de polimetilmetacrilato, PMMA, com a superfície revestida com grafite; ele é mantido aterrado e define a área da seção transversal do volume de ionização. Além dos eletrodos de alta tensão (janela de entrada) e coletor, as câmaras de extrapolação possuem um anel de guarda que, além de delimitar o volume sensível da câmara, reduz a ocorrência de correntes de fuga. Os materiais que compõem a câmara devem ser equivalentes ao meio de interesse.

1.3.3.1. Parâmetros característicos de uma câmara de extrapolação

1.3.3.1.1. Saturação da corrente de ionização

A saturação da corrente de ionização é um fenômeno que se apresenta em câmaras de ionização quando expostas à radiação, e entre os eletrodos é aplicada uma diferença de

potencial (entre zero e um valor alto). Em estes casos, a corrente coletada aumenta, no início quase linearmente com a tensão, e depois mais lentamente, até que ela aproximadamente atinja a corrente de saturação. É a corrente que seria medida se todos os íons formados na câmara pela ionização fossem capazes de alcançar os eletrodos. A curva da corrente de ionização em função da tensão aplicada é chamada curva de saturação (Figura 6).

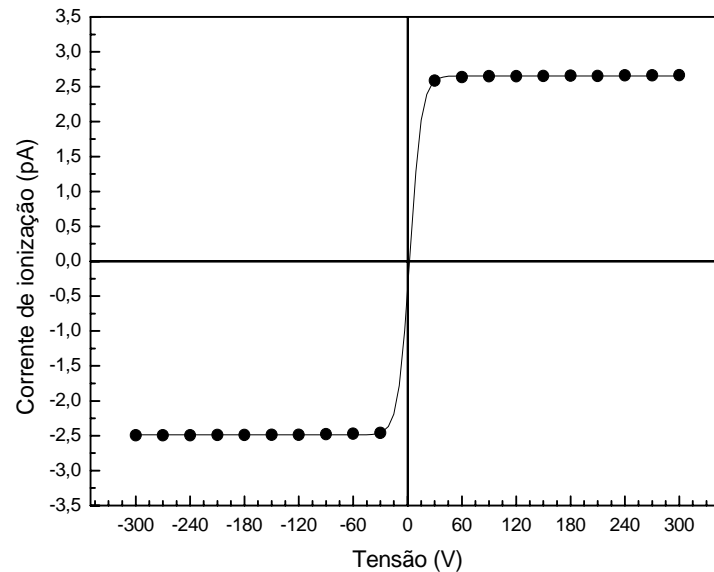


FIGURA 6. Curva de saturação de uma câmara de extrapolação.

A tensões coletoras baixas, os íons produzidos no volume sensível da câmara podem-se neutralizar e se encontrar com outros de sinal oposto, antes que possam atingir o coletor. Esta recombinação pode ser reduzida removendo-se os íons quando se aumenta a intensidade do campo elétrico ou quando se reduz a distância entre os eletrodos, ou ainda, pelos dois métodos.

1.3.3.1.2. Profundidade nula real

A profundidade nula real da câmara é a distância mínima entre os eletrodos para que eles não encostem um no outro, danificando a câmara. As câmaras de extrapolação quando construídas, já possuem por segurança, de tal modo a deixar uma profundidade nula em torno de 0,05 mm.

A profundidade nula real da câmara de extrapolação pode ser determinada a partir da extrapolação e encontro das retas no ponto, d_0 , do gráfico das correntes de ionização em função da profundidade da câmara, para as polaridades positiva e negativa (Figura 7).

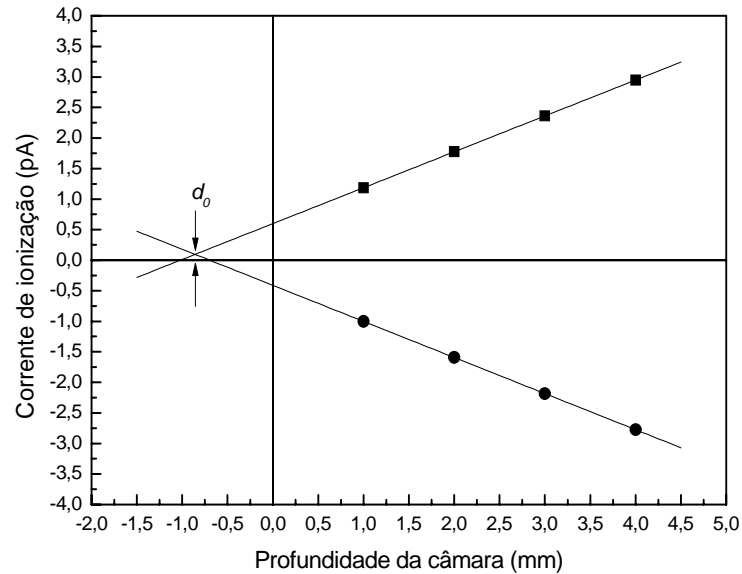


FIGURA 7. Profundidade nula real de uma câmara de extrapolação.

Em experiências, utilizando a câmara de extrapolação, é necessário tomar-se sempre o valor real da profundidade da câmara. Isto significa que, deve-se somar ao valor dado pelo micrômetro da câmara o valor da profundidade nula real aqui determinado.

1.3.3.1.3. Curva de extrapolação

A curva de extrapolação representa o comportamento da corrente de ionização em função da profundidade da câmara e pode ser obtida variando-se o volume da câmara, ou seja, afastando-se o eletrodo coletor conjuntamente com o anel de guarda em intervalos em relação à janela de entrada. A Figura 8 apresenta a curva de extrapolação de uma câmara de extrapolação.

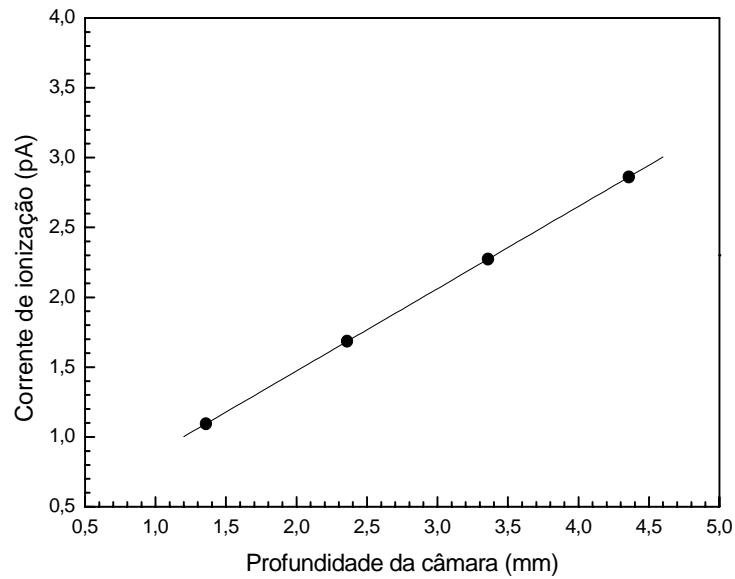


FIGURA 8. Curva de extrapolação de uma câmara de extrapolação.

A medida da curva de extrapolação tem a finalidade de determinar os valores de dose absorvida a partir dos coeficientes angulares obtidos por ajuste linear dos dados de corrente de ionização.

1.3.4. Medida absoluta da taxa de dose absorvida com uma câmara de extrapolação em campos padrões de radiação beta

A dose absorvida é a grandeza mais utilizada em dosimetria beta, e o meio com a qual a radiação ionizante interage deve ser especificado: dose absorvida no ar ou no tecido (água).

Nos certificados de calibração, a especificação das fontes padrões de radiação beta, a grandeza recomendada é a taxa de dose absorvida. A determinação da taxa de dose absorvida pode ser realizada de maneira absoluta, ou seja, utilizando-se uma câmara de extrapolação como instrumento de referência. A taxa de dose absorvida no ar, pela teoria da cavidade de Bragg-Gray esta dada por meio da Equação:

$$\dot{D}_{ar} = \frac{W/e}{\rho_0 \cdot a_{ef}} \cdot \left(\frac{\Delta I_C}{\Delta d} \right)_{d \rightarrow 0} \quad (8)$$

onde:

\dot{D}_{ar} : é a taxa de dose absorvida no tecido em $\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$.

$\frac{W}{e}$: é a energia requerida para produzir um par íon-elétron no ar, em $\text{J}\cdot\text{C}^{-1}$.

ρ_0 : é a densidade do ar sob condições de referência (20 °C e 101,325 kPa), em $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

a_{ef} : é a área do eletrodo coletor, em m^2 .

I_C : é a corrente de ionização corrigida, em A.

d : é o espaçamento entre os eletrodos, em m.

$\left(\frac{\Delta I_C}{\Delta d}\right)_{d \rightarrow 0}$: é a inclinação da curva de extrapolação quando o espaçamento entre os eletrodos da câmara tende a zero, em $\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$.

A unidade de dose absorvida no sistema internacional é o Gray (Gy), definida como a dose de radiação absorvida pelo ar de 1 joule por quilograma, ou seja, $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$. Desta maneira, a unidade para a taxa de dose absorvida é $\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$.

A corrente de ionização corrigida, I_C , é dada por:

$$I_C = I \cdot \prod_i C_i \cdot \prod_j k_j \quad (9)$$

onde: I é a corrente de ionização medida, as grandezas C_i são os fatores de correção relacionados com a utilização de determinado tipo de câmara de ionização e para um espectro particular de partículas beta; e os fatores de correção k_j estão relacionados às condições ambientais e às propriedades da fonte, e são independentes do tipo de câmara de ionização utilizada.

1.4. Filme radiocrômico

A dosimetria das radiações para fins médicos e industriais tem evoluído ao longo das últimas décadas com a introdução de vários tipos de detectores. O dosímetro ideal do ponto de vista físico deve ser capaz de medir a dose absorvida ou a energia absorvida por unidade de massa. Os calorímetros, os quais medem a variação térmica à medida que a energia absorvida aumenta ou diminui, são considerados dosímetros padrões primários.

A dosimetria absoluta é uma técnica que fornece informação, de forma direta, da dose absorvida, em gray (Gy). Este tipo de dosimetria só pode ser realizada com alguns tipos de detectores, como calorímetros, dosímetros ionométricos e dosímetros químicos. Nestas técnicas, o mensurando, como por exemplo a temperatura, aumenta o rendimento da reação química G ou a energia média necessária para a produção de um par de íons, usado para relacionar as quantidades medidas em dose (BUTSON, 2003)

A maioria das outras técnicas, utilizando detectores semicondutores, detectores termoluminescentes (TL) e filmes radiográficos apresentam várias limitações, tornando-os adequados somente para a dosimetria relativa, ou seja, eles exigem medições de referência, ou de calibração em um campo de radiação conhecido, para ser comparado na determinação da dose. Essas limitações levam à procura de um dosímetro de radiação com alta resolução espacial, sem necessidade de um procedimento especial de revelação, o qual possa estimar valores absolutos de dose absorvida, com uma exatidão aceitável, além de apresentar a facilidade de manuseio na análise de dados. Algumas dessas características foram conseguidas com a introdução de dosímetros radiocrômicos.

Efeitos radiocrômicos envolvem a coloração direta de um material pela absorção da radiação, sem necessidade de revelação ou amplificação, ou qualquer tratamento químico, óptico e térmico. O processo radiocrômico, envolve uma polimerização do estado sólido que provoca uma mudança de cor direta de imagens coloridas ficando permanente, devido à exposição à radiação.

Atualmente, dosímetros radiocrômicos na forma de filmes finos ou espessos, géis e soluções líquidas, são utilizados para dosimetria de rotina da radiação ionizante em uma ampla faixa de dose absorvida (10^{-2} a 10^6 Gy) e de taxas de dose absorvida (até $\sim 10^{12}$ Gy.s⁻¹).

Também têm sido usados para aplicações não clínicas, tais como a irradiação de sangue, processamento por radiação e aplicações em padrões de referência.

Neste momento, o dosímetro radiocrômico que está sendo utilizado em aplicações médicas e industriais, é o filme radiocrômico da marca *Gafchromic*. A leitura deste tipo de filme pode ser realizada com *scanners* de transmissão, densitômetros ópticos e espectrofotômetros dependendo da forma do campo de radiação (AAPM, 1998).

1.4.1. Características dosimétricas do filme radiocrômico

A química e a dosimetria dos dosímetros radiocrômicos têm evoluído muito nos últimos anos. Atualmente existem diversos tipos de filmes radiocrômicos, referidos como filmes da *Gafchromic*®, tais como: EBT, EBT2, XR-QA, XR-RV2, XR-CT e XR-CT, dentre outros. A sensibilidade e, possivelmente, a dependência de parâmetros ambientais diferem de tipo a tipo.

Os filmes radiocrômicos são constituídos basicamente por uma fina camada radiosensível, feita de microcristais orgânicos incolores de um monômero sensível à radiação e uniformemente disperso em uma camada gelatinosa.

As propriedades de absorção da radiação dos dosímetros radiocrômicos podem também ser ajustadas pela alteração da composição do filme. Os materiais dosimétricos podem ser feitos para simular o material de interesse que é submetido à irradiação (por exemplo, tecido ósseo e vários materiais isolantes). O número atômico (Z) efetivo desses filmes está no intervalo entre 6,0 e 6,5. A dependência energética da resposta dos filmes para elétrons e fótons, tem sido determinada por meio de cálculos computacionais (AAPM, 1998).

Os microcristais da camada radiosensível sofre uma polimerização parcial quando submetida à radiação ionizante. Assim, a cor azul do polímero se torna progressivamente mais escuro com o aumento da dose. A Figura 9(a) mostra o espectro de absorção óptico do filme MD-55-2 de 600 a 700 nm, antes e depois de irradiado com dose absorvida de 6 Gy, tomado em intervalos de 3,5 nm. Após algumas semanas, pode-se perceber um pequeno deslocamento na posição dos picos, de 675 para 676 nm, e de 617 para 618 nm de comprimento de onda, para o filme irradiado com dose de 6 Gy e para o não irradiado (0 Gy), respectivamente. A

Figura 9(b) apresenta o espectro de um filme não irradiado, na faixa de 700 a 720 nm, tomado em intervalos de 1,0 nm (AAPM, 1998).

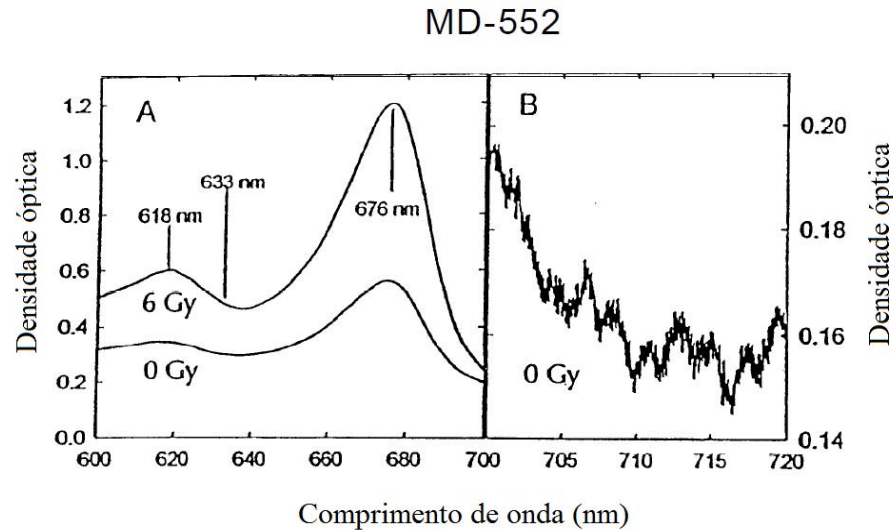


FIGURA 9. (a) Espectros de absorção do filme MD-55-2, sem irradiar e irradiado com dose de 6 Gy. (b) espectro do filme MD-55-2 não irradiado apresentando maior visibilidade das franjas.

Fonte. (AAPM, 1998)

As franjas de interferências mostraram-se iguais quando analisadas em intervalos de 0,25 nm, mas foram 10 vezes menores quando se utilizou o intervalo de 3,5 nm; neste caso a densidade óptica medida em 676 nm (6 Gy) difere de 0,2 % quando comparado picos e vales adjacente das franjas (AAPM, 1998).

As respostas dos dosímetros radiocrômicos são usualmente influenciadas pela temperatura, umidade relativa e em alguns casos pela luz ambiente e gases. Desde que as condições possam ser diferentes entre a calibração e o uso na prática, variações da resposta nas condições ambientais devem ser determinadas e corrigidas. Alguns dos fatores que influenciam a resposta do filme são:

Temperatura e umidade relativa durante a armazenagem e a leitura;

Temperatura durante a irradiação e pós-irradiação;

Sensibilidade à luz ultravioleta.

2. MATERIAIS

2.1. Sistema Padrão Secundário Beta BSS2

O sistema padrão secundário Beta, BSS2, pertencente ao Laboratório de Calibração de Dosímetros, LCD, do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, CDTN/CNEN, é mostrado na Figura 10. Este sistema é composto por fontes padrões de radiação beta de ^{147}Pm , ^{85}Kr e $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, sistema de fixação das fontes, filtros homogeneizadores, sistema de posicionamento de dosímetros, sensores de condições ambientais, unidade de controle do sistema e computador pessoal com programa específico de controle de exposição.

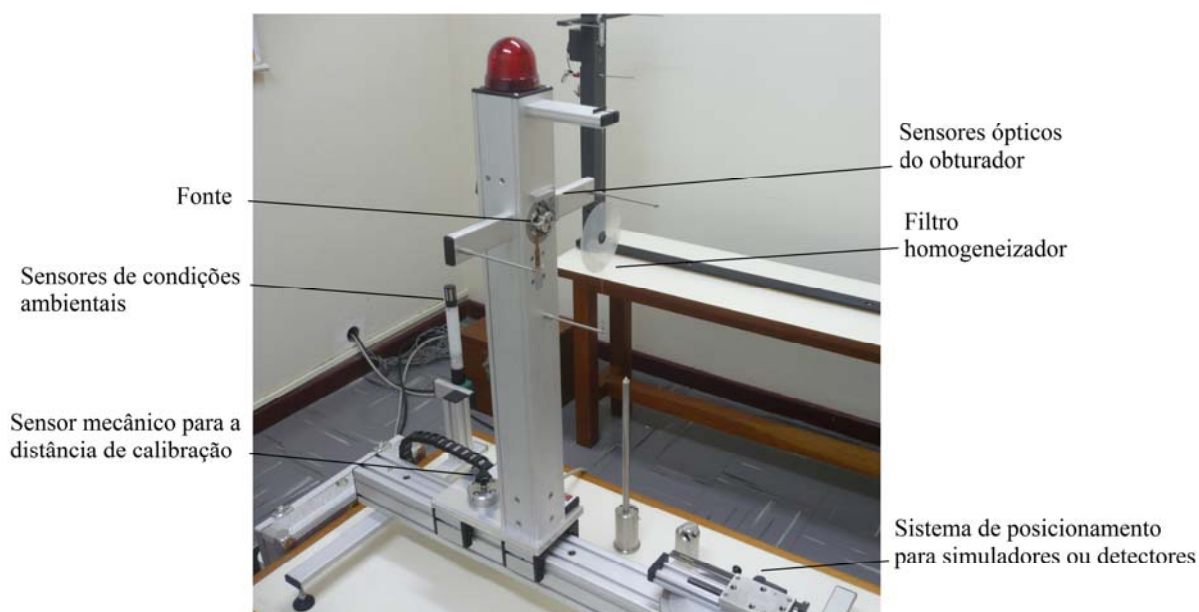


FIGURA 10. Sistema padrão secundário beta BSS2.

Estas fontes padrões possuem certificado de calibração em termos de taxa de dose absorvida no ar e taxa de dose absorvida no tecido na profundidade de 0,07 mm, rastreáveis ao laboratório padrão primário Physikalisch Technische Bundesanstalt, PTB, Braunschweig, Alemanha.

Cada fonte de radiação do BSS2 é envolta por uma blindagem e um obturador, que quando colocada no sistema, é reconhecida por este através de um sensor óptico, diferenciando cada fonte. O sistema de fixação das fontes é em forma de haste de 73 cm de altura, com orifício apropriado, que em sua parte posterior possui um travamento da fonte e dois sensores ópticos para identificar se o obturador está aberto ou fechado. O sistema BSS2

possui luz de emergência no topo da haste para sinalizar quando a fonte está exposta ou quando o obturador não está totalmente fechado, como apresentado na Figura 11(a).

O BSS2 é provido com filtros homogeneizadores do campo de radiação, como requerido pela ISO 6980-1, que são posicionados perpendicularmente ao eixo central do feixe de radiação de cada fonte. O suporte da fonte e o filtro homogeneizador têm identificação única e são reconhecidos pelos sensores do sistema BSS2, para assegurar o uso do filtro adequado para cada fonte (AEA, 2000).

No BSS2, a irradiação dos dosímetros pode ser realizada em quatro distâncias: 11 cm, 20 cm, 30 cm e 50 cm. A haste de fixação das fontes é deslocada por cima de um banco óptico para ser fixada à distância de calibração de interesse (Figura 10). Sensores estão em cada posição do banco óptico indicando qual é a posição da haste de fixação através de uma trava em cada posição. O sistema de posicionamento dos detectores possui um prato giratório, contendo um sensor para verificação do ângulo de rotação que vai de -90° a $+90^\circ$, girando de 5 em 5° . Sobre o prato giratório foi construído um suporte para que o monitor de radiação ou o simulador de interesse possam ser posicionados na altura do campo de radiação (Figura 10).

Na Tabela 3, são mostradas as características das fontes do sistema BSS2, que têm como referências os certificados emitidos pelo PTB.

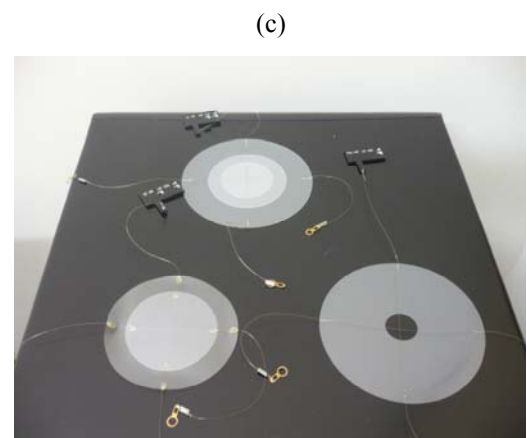
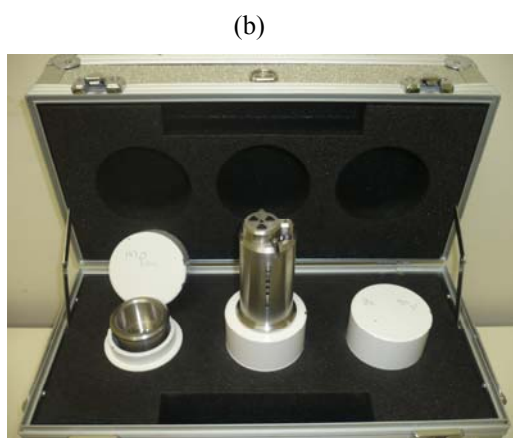
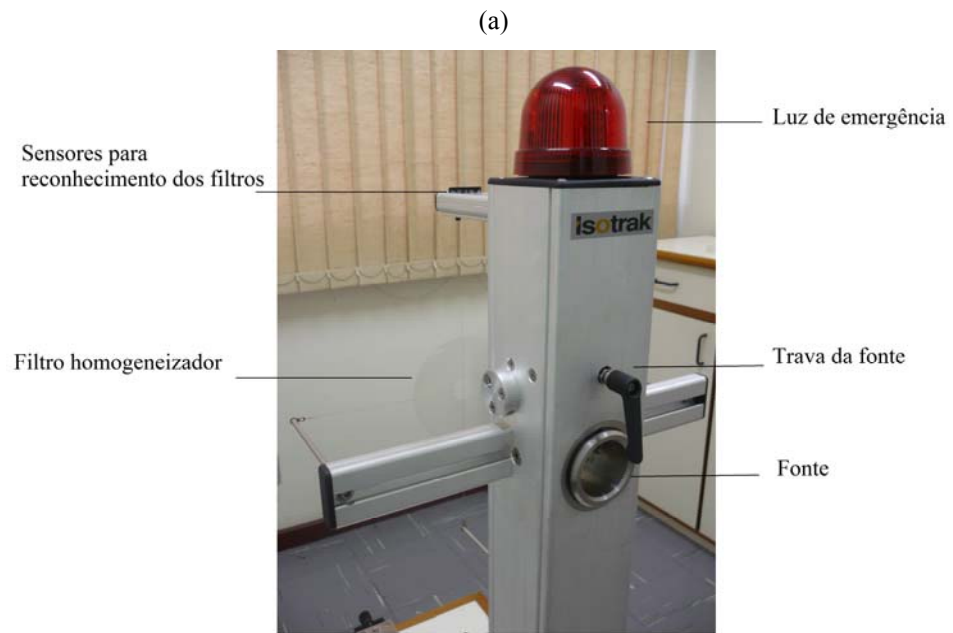


FIGURA 11. (a) Trava da fonte de radiação, (b) fontes padrões e (c) filtros homogeneizadores do BSS2.

TABELA 3. Características das fontes de radiação beta do sistema padrão secundário beta, BSS2, do LCD/CDTN.

Características	Fontes padrões do BSS2						
	¹⁴⁷ Pm	⁸⁵ Kr	⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y				
Energia máxima do espectro (Mev)	0,225	0,687	2,284				
Número de série	LE 494	LB 233	KB 442				
Atividade nominal (MBq)	3700	3700	460				
Distância de calibração (cm)	20	30	50	30	30	20	11
Filtro homogeneizador	sim	sim	não	não	sim	não	não
Data de referência	11/02/2003	06/03/2003	11/03/2003	18/03/2003	03/03/2003	26/03/2003	29/03/2003
Taxa de dose absorvida no tecido a 7 mg.cm ⁻² no ponto de calibração (μGy.s ⁻¹)	2,27 ± 0,04	40,6 ± 0,5	5,63 ± 0,07	15,9 ± 0,2	10,20 ± 0,12	35,8 ± 0,4	115,5 ± 1,3
Taxa de dose absorvida no ar a 7 mg.cm ⁻² no ponto de calibração (μGy.s ⁻¹)	2,55 ± 0,04	45,5 ± 0,6	6,25 ± 0,08	17,6 ± 0,2	11,30 ± 0,14	39,7 ± 0,5	128,2 ± 1,6

Fonte: AEA Technology QSA GmbH.

2.2. Sistemas de Medição

2.2.1. Câmara de extrapolação PTW 23391

A câmara de extrapolação PTW modelo 23391, apresentada na Figura 12, foi utilizada neste trabalho como dosímetro de medição para a determinação da grandeza dose absorvida no ar, e também como dosímetro “viajante” utilizado no ensaio da verificação da coerência metrológica entre os campos de radiação beta dos sistemas BSS2/CDTN e do BSS2/IPEN. A câmara PTW 23391 é de forma cilíndrica, e composta por dois eletrodos principais, planos e paralelos, dos quais um é móvel e cuja posição pode ser ajustada por um parafuso micrométrico externo. A profundidade da câmara pode ser variada entre 0,5 e 25,0 mm por meio de um parafuso micrométrico. A leitura 0,000 no micrômetro corresponde à distância 0,5 mm entre a janela de entrada e o eletrodo coletor.

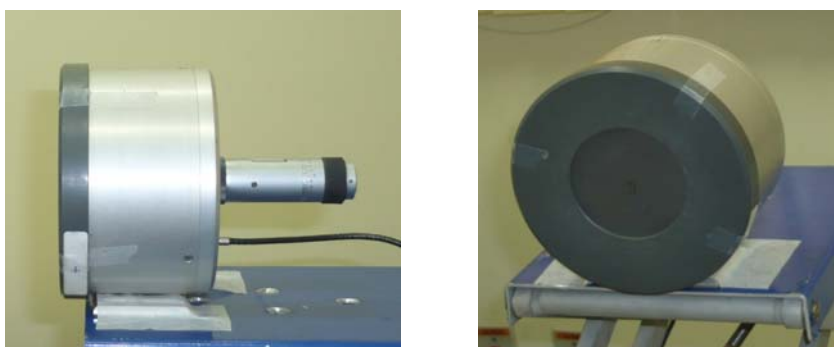


FIGURA 12. Câmara de extrapolação PTW 23391

A janela de entrada é de “Mylar”, com diâmetro de 60 mm, tem a parte interna recoberta de grafite, pois esta placa é conectada à tensão de polarização junto ao eletrodo coletor de grafite. O eletrodo coletor possui um diâmetro de 40 mm, coberto por um anel protetor chamado anel de guarda, ambos os conectados ao mesmo potencial para garantir a não perturbação do campo elétrico entre as placas da câmara. A Figura 13 apresenta o esquema das partes principais da câmara de extrapolação PTW 23391.

As quantidades de carga elétrica originadas em câmaras de ionização são extremamente reduzidas, com valores de corrente na faixa de 10^{-6} A a 10^{-12} A, exigindo assim resoluções melhores do que 10^{-14} A. Para isto torna-se necessário acoplá-las a instrumentos de alta sensibilidade e precisão, denominados eletrômetros.

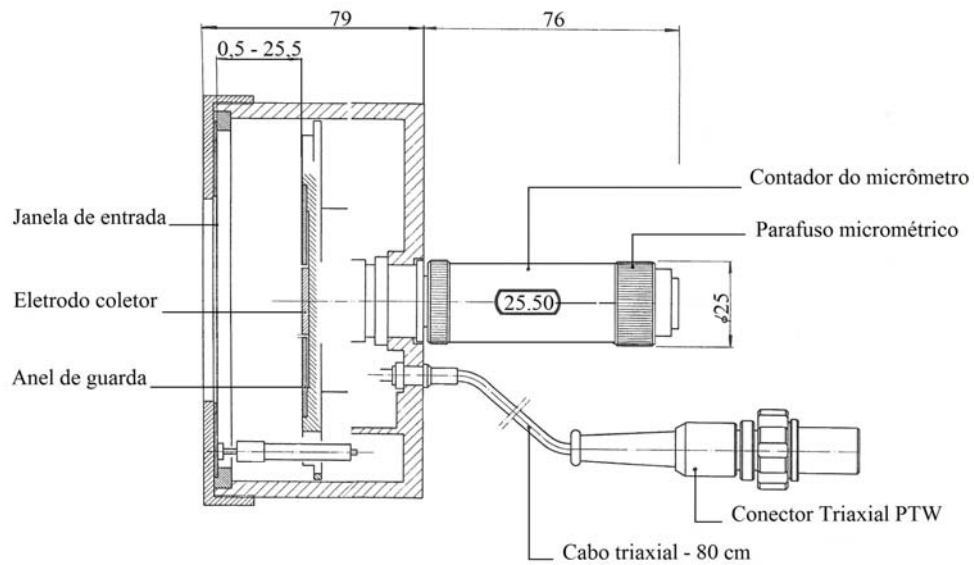


FIGURA 13. Esquema da câmara de extrapolação PTW 23391.

Fonte. (Folheto do fabricante PTW)

2.2.2. Eletrômetro *Keithley 6517A*

O eletrômetro da *Keithley instruments*, modelo 6517A e número de série 1138780, foi acoplado à câmara de extrapolação PTW 23391 para leituras de carga elétrica geradas no interior do volume sensível. Este eletrômetro pode também medir tensão, resistividade, temperatura ambiente, umidade relativa do ar e pode ser programado para executar sequências de testes, podendo, assim, armazenar os resultados das leituras (Figura 14).

As características do eletrômetro *Keithley 6517A* em relação aos limites de medida de tensão DC, corrente elétrica e carga capacitiva estão na faixa de $1\mu\text{V}$ até 210 V; de 10 nA até 21 mA e de de 10 fC até $2,1\mu\text{C}$, respectivamente. A fonte de tensão bipolar do eletrômetro é de 1 W e fornece tensões de até $\pm 1000\text{V}$.



FIGURA 14. Eletrômetro *Keithley* modelo 6517A.

2.2.3. Filmes radiocrômicos

O filme radiocrômico modelo EBT, lote número 37137-21 da *Gafchromic*®, fabricado pela *International Specialty Products (ISP), New Jersey-USA*, foi utilizado neste trabalho como dosímetro de medição dos valores de dose absorvida no ar e para a determinação dos perfis de dose e mapeamento dos campos de radiação beta do BSS2. O filme EBT foi desenvolvido em 2004, apresenta uma emulsão mais sensível em relação às versões anteriores de filmes radiocrômicos existentes. A análise deste filme com *scanners* e espectrofotômetros pode-se realizar na faixa de comprimento de onda de 600 a 700 nm, porque os picos do espectro de absorção apresentam um alto contraste nessa faixa (Figura 15).

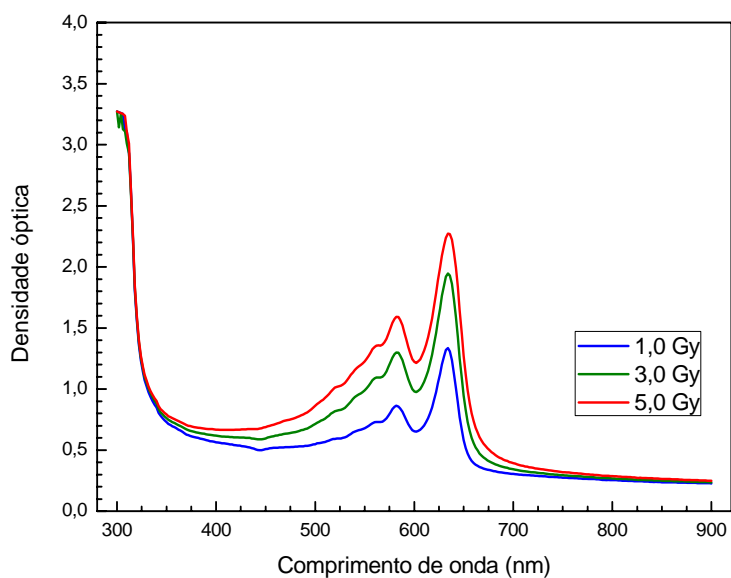


FIGURA 15. Espectro de absorção do filme radiocrômico EBT na faixa de 300 a 900 nm para valores de dose de 1,0; 3,0 e 5,0 Gy.

O filme EBT é constituído de duas camadas compostas de componente ativo que são compreendidas entre duas camadas de poliéster. Cada um deles é colado com uma camada adesiva a uma camada de poliéster no centro do filme, como apresentado na Figura 16. A espessura total da camada ativa do filme é aproximadamente 34 μm de espessura, e a espessura total do filme EBT é de 0,3 mm (SOARES, 2006).

superfície de poliéster	97 μm
camada ativa	17 μm
camada superficial	3 μm
camada adesiva	15 μm
superfície de poliéster	97 μm
camada adesiva	15 μm
camada superficial	3 μm
camada ativa	17 μm
superfície de poliéster	97 μm

FIGURA 16. Esquema da composição química do filme radiocrômico *Gafchromic* modelo EBT.

Fonte. (SOARES, 2006)

Em termo de composição química, as camadas do filme estão compostas conforme apresenta a Tabela 4:

TABELA 4. Composição química das camadas do filme radiocrômico *Gafchromic* modelo EBT.

Fonte. (AAPM, 1998)

Camada	Composição (%)			
	C	H	O	N
Poliéster	45	36	19	-
Ativa	31	56	8	5
Superficial e Adesiva	33	50	17	-

2.3. Instrumentos de leitura dos filmes radiocrômicos

2.3.1. Scanners

Os *scanners* são dispositivos utilizados para converter uma imagem ou texto em formato digital para o armazenamento ou exposição. O princípio de funcionamento de um *scanner* baseia-se na varredura linha por linha da amostra a ser digitalizada, situada sob uma janela transparente. A luz de grande intensidade, gerada pela lâmpada do *scanner* e emitida no momento da digitalização, é refletida pela amostra e convergida para uma série de sensores por um sistema de lentes e espelhos. Estes sensores convertem as intensidades luminosas em sinais elétricos, os quais são convertidos em dados numéricos por um conversor analógico-digital.

2.3.1.1. Scanner HP Scanjet G4050

O *scanner* HP modelo *Scanjet* G4050 de fabricação da *Hewlett Packard*, (Figura 17), é um *scanner* tipo *flatbed*, comercial e relativamente de baixo custo em relação aos *scanners* utilizados na digitalização de filmes radiográficos. O *scanner* HP é utilizado neste trabalho para a digitalização dos filmes radiocrômicos EBT.



FIGURA 17. *Scanner Scanjet* HP G4050.

As principais características do *scanner* HP são: este *scanner* possui como sensor um dispositivo de carga acoplada (CCD), principal dispositivo no processamento de uma imagem digital. Este *scanner* permite fazer digitalizações em modo reflexão e transmissão, a cores e em níveis de escala de cinza, 256 bits, em uma janela de 21,6 x 31,1 cm² de área. Apresenta uma resolução de digitalização óptica máxima de 4800 x 4800 dpi (*dots per inch*) e

profundidade de 16 bits. As faixas de operação de temperatura e umidade recomendadas pelo fabricante são de 10 a 35 °C e de 15 a 80%, respectivamente.

2.3.1.2. Scanner ScanMaker 9800XL

O *scanner ScanMaker 9800XL* da *Microtek*, (Figura 18), além de ser muito mais sofisticado do que o *scanner HP G4050*, apresenta um maior número de opções e características na digitalização.



FIGURA 18. *Scanner Microtek 9800XL.*

As principais características do *scanner Microtek* são: este *scanner* possui três sensores lineares CCD revestidos com filtros RGB (*red, green and blue*). Este *scanner* também permite fazer digitalizações em modo reflexão e transmissão, a cores e em níveis de escala de cinza, 256 bits, em uma janela de 30,5 x 43,2 cm² de área. Apresenta uma resolução de digitalização óptica de 3200 x 1600 dpi e profundidades de 48 e de 16 bits, para as digitalizações a cor e na escala de cinza, respectivamente. As faixas de operação de temperatura e umidade recomendadas pelo fabricante são de 10 a 40 °C e de 20 a 85%, respectivamente.

2.3.2. Densitômetro

O densitômetro de transmissão *X-Rite* modelo 369, (Figura 19), é um instrumento que mede a densidade óptica (DO), de um material de espessura fina semitransparente, como filmes radiográficos ou filmes radiocrômicos do tipo EBT, por transmissão da luz que o atravessa.

O densitômetro *X-Rite* pode realizar leituras de densidade óptica em comprimentos de onda na faixa do visível e ultravioleta (UV), sendo assim considerada para as medidas deste trabalho, a faixa do visível.



FIGURA 19. Densitômetro de transmissão *X-Rite* 369.

O densitômetro *X-Rite* apresenta como principais características: um diâmetro de 2 mm de abertura, o qual permite medir até 5,0 de DO. As correções adotadas são de $\pm 0,02$ de DO, quando a faixa de medição é de 0 até 0,38 de DO. O tempo de estabilidade elétrica deste densitômetro é de aproximadamente no mínimo 5 minutos e a faixa de operação de temperatura recomendada pelo fabricante é de 10 a 40 °C.

2.3.3. Espectrofotômetro

O espectrofotômetro *Shimadzu* modelo *UV Mini 1240*, (Figura 20), é um instrumento para medidas ópticas de transmitância (T), absorvância (Abs) e, em certas geometrias, reflectância. Esses parâmetros ópticos são estudados em uma amostra como uma função do comprimento de onda da luz visível, ultravioleta e, de acordo com a construção, infravermelho. Os principais componentes de um espectrofotômetro são a fonte de luz, que gera a banda larga de radiação eletromagnética podendo ir do ultravioleta ao infravermelho, um elemento de dispersão, tal como um prisma ou uma grade holográfica que seleciona o comprimento de onda em uma faixa estreita; a amostra a ser estudada e, por fim, o detector que registra a intensidade de luz transmitida. Em geral, o sistema pode ser calibrado para expressar tanto transmitância quanto absorvância (OWEN, 2000).



FIGURA 20. Espectrofotômetro *Shimadzu UV Mini 1240*, no laboratório de dosimetria.

Este espectrofotômetro apresenta como principais características: faixa de medição de 190,0 até 1100,0 nm, com correções de $\pm 1,0$ nm. Em relação às características fotométricas o espectrofotômetro apresenta uma escala de - 0,3 a 3,0 Abs e de 0,0 a 200% de T. Utiliza como fontes de luz uma lâmpada de halogênio de 20 W e outra de deutério e como detector um fotodiodo de silício. As faixas de operação de temperatura e umidade são de 15 a 35 °C e de 5 a 80%, respectivamente.

2.4. Equipamentos auxiliares

Uma fonte teste de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ de fabricação PTW, emissora de radiação beta, com atividade nominal de 30 MBq na data de referência e com número de série 8921-1349, foi utilizada para testes de repetitividade e reprodutibilidade da câmara de extrapolação.

Medidas de pressão atmosférica foram realizadas com o transdutor de pressão *Setra*, número de série 431461, conectado a um multímetro digital programável *Tektronix DM 2510G*, com certificado de calibração número OS-01-004/09, emitido pelo Laboratório de Pressão – Rede Brasileira de Calibração em 13/01/2009.

As medidas de temperatura ambiente foram realizadas com o termohigrômetro digital *Minipa*, modelo MTH-1380, com certificado de calibração LV 0454/09 emitido pelo Laboratório de Metrologia VISOMES em 21/01/2009.

Para as medidas de tempo, utilizou-se o cronômetro *Technos*, modelo Quartz, número de série 30274, calibrado pela LABELO - PUCRS, certificado número F0020/2009 emitido em 20/01/2009.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os métodos utilizados para os testes de caracterização da câmara de extrapolação PTW 23391 e do filme radiocrômico EBT, e para o estabelecimento da metodologia de verificação da coerência metrológica entre os sistemas padrões de campos de radiação beta.

Os testes de corrente de fuga, de repetitividade e de reprodutibilidade visaram determinar a confiabilidade da câmara. A caracterização foi realizada por meio da determinação dos parâmetros de profundidade nula real, da saturação da corrente de ionização e da variação da corrente de ionização em função da distância entre os eletrodos. A câmara PTW foi calibrada nos campos de radiação beta do sistema BSS2 do CDTN e permitiu a realização do ensaio da coerência metrológica com o sistema BSS2 do IPEN.

A resposta do filme radiocrômico foi determinada inicialmente para o campo de radiação $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, para testes de viabilidade, a metodologia de leitura foi investigada com os *scanners* de transmissão HP G4050 e *Microtek* 9800XL, o densitômetro óptico *X-Rite* modelo 369 e o espectrofotômetro *Shimadzu UV Mini* 1240. Os filmes radiocrômicos foram caracterizados e finalmente calibrados em campos de radiação beta do sistema BSS2 do CDTN.

Um ensaio de verificação da coerência metrológica entre os sistemas BSS2 do LCD/CDTN e do Laboratório de Calibração de Instrumentos do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (LCI/IPEN) foi realizado para os campos de radiação beta do $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm .

3.1. Corrente de fuga e estabilidade da câmara de extrapolação PTW 23391

A corrente de fuga em uma câmara de ionização é definida como a corrente de ionização medida na ausência do campo de radiação, integrada por um intervalo de tempo t , logo após esta ter sido exposta.

Para o teste da corrente de fuga, a câmara de extrapolação PTW 23391 foi conectada ao eletrômetro *Keithley* e mantida ligada em condições de temperatura e umidade controladas por aproximadamente 2 h, a fim de manter a estabilidade eletrônica necessária para a

realização das medidas. Este teste foi realizado a uma profundidade da câmara de 3,5 mm e com tensão de ± 210 V. Para a irradiação da câmara utilizou-se a fonte teste de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ até atingir a carga elétrica inicial próximo de 2,500 nC, e depois de 20 minutos a leitura de exposição final foi realizada. A corrente de fuga i_f foi determinada utilizando a seguinte expressão:

$$i_f = \frac{Q_f - Q_i}{t} \quad (10)$$

onde: Q_i é o valor inicial da carga elétrica gerada pela fonte de radiação, Q_f é o valor final da carga elétrica em ausência a radiação e t é o intervalo de tempo entre as medidas.

Este teste foi realizado frequentemente nas primeiras semanas, para então ser realizado mensalmente e antes de cada experimento com a câmara.

A estabilidade da câmara de extrapolação foi verificada por meio de testes de repetitividade e de reprodutibilidade. O teste de repetitividade da resposta em uma câmara de ionização consiste na determinação do grau de concordância das medições sucessivas de corrente de ionização representado pelo desvio padrão das medidas.

O teste de repetitividade foi realizado para uma profundidade da câmara de 3,5 mm e para valores de tensão de ± 210 V. A exposição à radiação foi realizada posicionando a fonte teste de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ no acrílico acoplado à parte frontal da câmara (Figura 21). Medidas de carga elétrica foram realizadas 10 vezes por intervalos de 60 s, para cada polaridade de tensão. A corrente de ionização i foi determinada a partir da seguinte expressão:

$$i = \frac{\bar{Q}}{t} \cdot \bar{k}_{T,P} \quad (11)$$

onde: \bar{Q} é a média dos valores de carga elétrica gerada pela fonte de radiação, t é o intervalo de tempo entre cada medida e $\bar{k}_{T,P}$ é a média do fator de correção para a densidade do ar para valores de 20 °C de temperatura e 101,325 kPa de pressão como.

O fator de $k_{T,P}$ é determinado a partir da seguinte expressão:

$$k_{T,P} = \left(\frac{T + 273,15}{293,15} \right) \cdot \left(\frac{101,325}{P} \right) \quad (12)$$

onde: T é o valor de temperatura, em °C e P é o valor da pressão em kPa, no momento da medição.



FIGURA 21. Arranjo experimental utilizado nos testes de corrente de fuga, repetitividade e reprodutibilidade da resposta da câmara de extrapolação PTW 23391.

O teste de reprodutibilidade da resposta da câmara de extrapolação consiste na determinação do grau de concordância entre os resultados das medições de corrente, efetuadas sob condições variadas de medição. A reprodutibilidade da câmara PTW consistiu em testes periódicos de repetitividade, para uma profundidade da câmara de 3,5 mm e para valores de tensão de ± 210 V. A exposição à radiação foi realizada posicionando a fonte teste de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ no acrílico acoplado à parte frontal da câmara (Figura 21). Medidas de carga foram realizadas 10 vezes por intervalos de 60 s, para as polaridades positiva e negativa. Para este teste o cálculo da corrente de ionização i foi determinada a partir da seguinte expressão:

$$i = \left(\frac{\bar{Q}}{t} \cdot \bar{k}_{T,P} \right) \cdot e^{+\lambda \cdot t_d} \quad (13)$$

onde: $e^{+\lambda \cdot t_d}$ é o fator de decaimento, λ é o valor da constante de decaimento do $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e t_d é o tempo decorrido entre a data de referência das 19 medidas do teste até a data da medição.

3.2. Caracterização da câmara de extrapolação PTW 23391 em campos de radiação beta

A caracterização da câmara de extrapolação PTW 23391 foi realizada em campos de radiação das fontes $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm nas condições de calibração estabelecidas no BSS2. A Figura 22 apresenta o arranjo experimental utilizado em todo o processo da caracterização da câmara.



FIGURA 22. Arranjo experimental utilizado na caracterização da câmara de extrapolação PTW 23391.

A câmara de extrapolação foi posicionada no sistema BSS2 com ajuda de um suporte de PMMA e um macaco, levando em conta como ponto de referência o centro geométrico da janela de entrada da câmara (Figura 22).

3.2.1. Profundidade nula real da câmara PTW 23391

A profundidade nula real da câmara é a distância mínima entre os eletrodos para que eles não encostem um no outro, danificando a câmara. A câmara quando construída, já possui por segurança, uma profundidade nula em torno de 0,05 mm.

A câmara de extrapolação foi posicionada no campo de radiação da fonte $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, a 30 cm e sem filtro homogeneizador. Medidas de carga elétrica foram realizadas 10 vezes para cada valor de tensão, para isto foi utilizado o eletrômetro *Keithley*, que permite variações na tensão cada 10 V, nas polaridades positivas como negativas. A profundidade da câmara foi

variada entre 1,0 e 4,0 mm, em incrementos de 1,0 mm, e a tensão aplicada entre 60 e 240 V, em incrementos de 60 V, utilizando-se um campo elétrico constante de 60 V/mm.

A profundidade nula real da câmara de extrapolação foi determinada a partir da extrapolação e encontro das retas no ponto, d_0 , do gráfico das correntes de ionização em função da profundidade da câmara, para as polaridades positiva e negativa.

3.2.2. Curvas de saturação da câmara PTW 23391 em campos de radiação beta

Para determinar a curva de saturação da câmara PTW 23391 nas condições de calibração estabelecidas no BSS2, estudou-se a variação da corrente de ionização em função da tensão aplicada. Inicialmente foi realizado um teste de modo a observar o comportamento da corrente de ionização nos campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , para isto, manteve-se fixa a profundidade da câmara em 3,5 mm e variou-se a tensão aplicada no intervalo de -600 a 600 V, em incrementos de 50 V.

A câmara de extrapolação foi posicionada nos campos de radiação das fontes de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ à distância fonte/câmara de 30 cm, sem filtro homogeneizador; de ^{85}Kr à distância fonte/câmara de 30 cm, com filtro homogeneizador e de ^{147}Pm à distância fonte/câmara de 20 cm, com filtro homogeneizador. As medidas experimentais foram obtidas na forma de carga elétrica integradas por 30 s nas polaridades positivas como negativas, para isto foi utilizado o eletrômetro *Keithley*.

Uma vez estudado o comportamento da variação da corrente de ionização para cada um dos campos de radiação já mencionados acima, o experimento foi repetido para as separações entre os eletrodos de 1,0 até 4,0 mm, em incrementos de 1,0 mm, mantendo-se a tensão aplicada no intervalo de -300 a 300 V e em incrementos de 30 V.

3.2.3. Curvas de extrapolação da câmara PTW 23391 em campos de radiação beta

As curvas de extrapolação da câmara PTW foram obtidas para os campos de radiação beta das fontes padrões de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ à distância fonte/câmara de 30 cm, sem filtro homogeneizador; de ^{85}Kr à distância fonte/câmara de 30 cm, com filtro homogeneizador e de ^{147}Pm à distância fonte/câmara de 20 cm, com filtro homogeneizador.

Medidas de carga elétrica integradas por 30 s foram obtidas pelo eletrômetro *Keithley*, nas polaridades positivas como negativas. A profundidade da câmara foi variada entre 1,4 e 4,4 mm, em incrementos de 1,0 mm, e a tensão aplicada entre 60 e 240 V, em incrementos de 60 V. Em todo o experimento o campo elétrico manteve-se constante, 60 V/mm. A curva de extrapolação foi determinada a partir dos valores absolutos das médias das correntes de ionização, para ambas as polaridades em função da profundidade da câmara.

A partir do ajuste linear destes valores de corrente de ionização foram obtidos os coeficientes angulares B das curvas de extrapolação. O coeficiente angular B é o parâmetro que interessa para a determinação da taxa de dose absorvida no ar.

3.3. Calibração da câmara de extrapolação PTW 23391 em campos de radiação beta

A câmara de extrapolação PTW 23391 foi calibrada nos campos padrões de radiação beta nas condições de calibração estabelecidas no BSS2, em termos de taxa de dose absorvida no ar.

O coeficiente de calibração da câmara de extrapolação, F, para os emissores de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , foi determinado a partir da razão entre a taxa de dose absorvida no ar e o coeficiente angular, B, conforme apresentado na equação (14):

$$F = \frac{\dot{D}}{B} \quad (14)$$

Os coeficientes de calibração, F, foram utilizados na comparação laboratorial entre os sistemas BSS2/CDTN e BSS2/IPEN, para a determinação da taxa de dose absorvida no ar.

3.4. Resposta do filme radiocrômico EBT em campos de radiação beta

A resposta do filme radiocrômico foi testada para o campo de radiação beta $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ na condição de calibração do BSS2, à distância fonte/filme de 30 cm e sem filtro homogeneizador. Inicialmente foram irradiadas amostras de filme radiocrômico de tamanho de 3 cm x 4 cm, posicionadas sobre o objeto simulador de PMMA de dimensões 1 cm x 30 cm x 30 cm. Cada amostra de filme foi posicionada individual e perpendicularmente ao

eixo central do campo de radiação, sendo o ponto de referência das irradiações, o centro geométrico da superfície das amostras de filme EBT (Figura 23).



FIGURA 23. Arranjo experimental utilizado nas irradiações das amostras de filme radiocrômico com o BSS2.

A irradiação das amostras foi realizada com valores de dose absorvida de 0,1; 0,3; 0,5; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0 e 3,5 Gy. Logo após a irradiação, as amostras foram digitalizadas junto a uma amostra de controle.

Para este estudo inicial, a digitalização das imagens foi realizada com o *scanner* HP *Scanjet G4050*, com uma resolução de 300 dpi, no modo transmissão. Os arquivos gerados foram salvos na extensão tiff (*tagged image file format*). A análise das imagens foi realizada utilizando-se o programa *Image J*, e apenas os valores da componente de cor vermelha foram analisados, pois o espectro de absorção tem um máximo contraste entre os comprimentos de onda de 600 a 700 nm (SOARES, 2006).

Os valores de intensidade foram obtidos em cinco regiões de interesse (ROI) de tamanho 100 *pixel* x 100 *pixel*, no centro e nos quatro extremos do filme (R1, R2, R3, R4 e R5), como apresentado na Figura 24.

Uma vez determinada a sensibilidade do filme radiocrômico EBT em campos de radiação beta, determinou-se a metodologia de leitura com os *scanners* de transmissão, HP

Scanjet G4050 e *Microtek 9800XL*, o densitômetro óptico *X-Rite* modelo 369 e o espectrofotômetro *Shimadzu UV Mini 1240*.

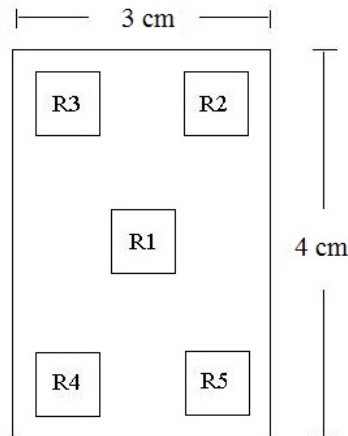


FIGURA 24. Esquema de uma amostra de filme radiocrômico apresentando as regiões de interesse (ROI).

Nesta segunda etapa o filme EBT foi utilizado em tamanho de 5 cm x 5 cm e irradiados nas condições já citadas anteriormente. As amostras foram irradiadas com valores de dose absorvida de 0,1; 0,3; 0,5; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,5 e 5,0 Gy. A exposição à luz foi minimizada armazenando os filmes em envelopes opacos antes e após a irradiação. Adicionalmente, eles foram armazenados em uma sala com temperatura controlada de 20 °C, possibilitando a estabilidade química do dosímetro.

Após a irradiação foram efetuadas individualmente as digitalizações das amostras de filme, da amostra de controle e de uma lâmina de filme EBT virgem, selecionada da caixa de filmes representativa do mesmo lote. Para os dois *scanners* utilizados, as digitalizações foram realizadas no modo transmissão e utilizando toda a janela dos *scanners*. Para as digitalizações realizadas com o *scanner* HP *Scanjet G4050* utilizou-se uma resolução de 72 dpi, na escala 100% e o tipo de saída foi o de milhões de cores. Para as digitalizações realizadas com o *scanner* *Microtek 9800XL* utilizou-se também uma resolução de digitalização de 72 dpi, na escala 100% e com tipo de saída *red, green e blue* (RGB).

A análise das imagens foram realizadas utilizando-se os programas *Image J* e *DoseLab* 4.11 ambos de domínio público. Os valores de intensidade foram obtidos automaticamente pelo programa *DoseLab* na componente do canal vermelho e nas ROI já citadas anteriormente.

Os *scanners* são instrumentos que não realizam medições de DO de forma direta, para poder quantificar o escurecimento do filme utilizou-se a seguinte expressão dada por SLOBODAN:

$$DOL = DO_{irrad} - DO_{BG} = \log_{10} \left(\frac{I_{BG} - I_{nt}}{I_{irrad} - I_{nt}} \right) \quad (13)$$

onde DOL representa os valores de densidade óptica líquida, I_{irrad} os valores de intensidade das amostras de filme irradiados, I_{BG} , os valores de intensidade da amostra de controle e I_{nt} os valores de intensidade de uma amostra de filme irradiada com dose absorvida de 10,0 Gy, valor representativo utilizado nesta análise para obter um baixo valor de transmitância de luz.

O densitômetro de transmissão *X-Rite 369* (Figura 25) e o espectrofotômetro *Shimadzu UV Mini 1240* foram utilizados na análise das medidas dos filmes radiocrômicos. Os valores de DO utilizando o densitômetro, foram obtidos em cinco regiões de interesse (ROI) de tamanho 100 *pixel* x 100 *pixel*, no centro e nos quatro extremos do filme (R1, R2, R3, R4 e R5), como apresentado na Figura 24.

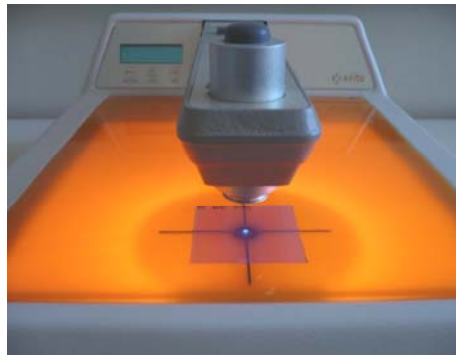


FIGURA 25. Amostra de filme radiocrômico EBT sob análise no densitômetro *X-Rite 369*.

3.5. Caracterização dos filmes radiocrômicos EBT em campos de radiação beta

A caracterização dos filmes radiocrômicos EBT em campos de radiação beta foi realizada em termos de dose absorvida no ar nas condições de calibração estabelecidas no BSS2. Cada amostra de filme *Gafchromic* de tamanho 5 cm x 5 cm foi colocada suspensa no objeto simulador de PMMA (Figura 26) e posicionada perpendicularmente ao eixo central do campo de radiação.

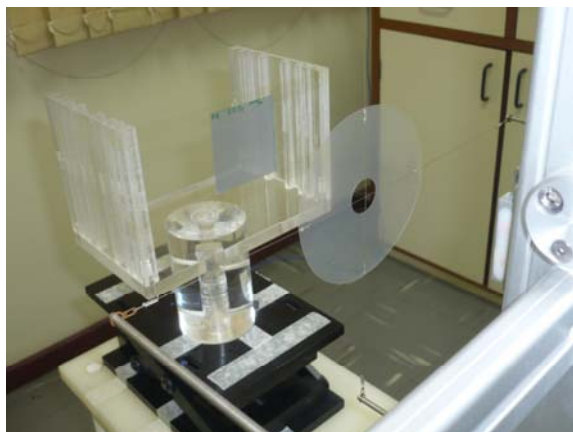


FIGURA 26. Amostra de filme radiocrômico EBT sob condições de irradiação em campos de ^{147}Pm .

As irradiações das amostras de filmes radiocrômicos foram realizadas, livre no ar, com a fonte $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ à distância fonte/filme de 30 cm, sem filtro homogeneizador e com valores de dose absorvida de 0,1; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0 e 5,0 Gy. As irradiações com a fonte ^{85}Kr foram realizadas à distância fonte/filme de 30 cm, com filtro homogeneizador e irradiados com valores de dose absorvida de 0,1; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0 e 4,0 Gy. Para as irradiações realizadas com a fonte ^{147}Pm , os filmes foram posicionados à distância fonte/filme de 20 cm, com filtro homogeneizador e irradiados com valores de dose absorvida de 0,1; 0,2; 0,3; 0,5 e 1,0 Gy.

As digitalizações das amostras de filmes foram realizadas com o *scanner Microtek*, a uma resolução de digitalização de 72 dpi, na escala 100%, com tipo de saída RGB e utilizando toda a janela do *scanner*.

A análise das imagens foi realizada com ajuda do programa *Image J* para a componente de cor vermelha. Os valores de intensidade foram obtidos utilizando uma ROI com tamanho de 100 *pixels* x 100 *pixels* e analisados em cinco regiões de interesse do filme (Figura 24).

Finalmente foram determinadas as curvas de calibração em termos de dose absorvida no ar para os campos de radiação beta das fontes $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm .

3.6. Estudo da estabilidade do filme radiocrômico EBT em campos de radiação beta

A estabilidade do filme radiocrômicos EBT foi estudada em função do tempo, a fim de se verificar experimentalmente o tempo requerido entre a irradiação e a leitura. Segundo dados do fabricante o filme EBT precisa de um tempo de estabilização de aproximadamente 24 horas.

Para este estudo, amostras de filmes radiocrômicos foram irradiadas em campos de radiação beta nas condições de calibração estabelecidas no BSS2. Foram irradiadas três amostras de filme, com valor de dose absorvida no ar de 0,1 Gy, à distância fonte/filme de 30 cm e sem filtro homogeneizador para a fonte $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$; à distância fonte/filme de 30 cm, utilizando filtro homogeneizador para a fonte ^{85}Kr e à distância fonte/filme de 20 cm, com filtro homogeneizador para a fonte ^{147}Pm . Todas as amostras foram posicionadas individualmente e perpendicular ao eixo central do campo de radiação (Figura 22).

As digitalizações das amostras de filmes foram realizadas com o *scanner Microtek*, imediatamente após o término da irradiação e em diferentes intervalos de tempo. A análise das imagens foi realizada utilizando o programa *Image J*. A curva de estabilidade é determinada a partir dos valores de densidade óptica líquida, obtidos com a equação (13), em função do tempo.

3.7. Mapeamento do campo e determinação da uniformidade dos campos de radiação beta do BSS2

A determinação da uniformidade do campo permite estabelecer o tamanho de campo adequado para irradiação uniforme de detectores. A ISO 6980 estabelece que um campo de radiação beta pode ser considerado uniforme se a variação da taxa de dose absorvida no ar à distância de calibração, em um determinado diâmetro do campo, não varia em mais que $\pm 5\%$ para as fontes $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr , e $\pm 10\%$ para ^{147}Pm (ISO 6980-1, 2001).

Para o mapeamento do campo e determinação da uniformidade dos campos de radiação beta foram irradiados filmes radiocrômicos de 20,32 cm x 25,40 cm, nas condições de calibração estabelecidas no BSS2. Cada lâmina de filme EBT foi colocada suspensa livre no ar (Figura 27) e posicionada perpendicularmente ao eixo central do campo de radiação.



FIGURA 27. Filme radiocrômico EBT no acrílico posicionador sob condições de irradiação, no sistema BSS2 do LCD/CDTN, em campos de radiação beta ^{85}Kr .

As irradiações foram realizadas com as três fontes padrões do sistema secundário beta: a de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ à distância fonte/filme de 30 cm, sem filtro homogeneizador e com valor dose absorvida de 0,8 Gy; de ^{85}Kr à distância fonte/filme de 30 cm, com filtro homogeneizador e com valor de dose absorvida de 0,8 Gy; e a fonte ^{147}Pm à distância fonte/filme de 20 cm, com filtro homogeneizador e irradiado com valor de dose absorvida de 0,2 Gy.

Após as irradiações, os filmes foram guardados em envelopes opacos para minimizar a exposição à luz e colocados em uma sala com temperatura controlada de 20 °C. As digitalizações das lâminas foram realizadas em diferentes datas, 6, 9 e 10 dias após a irradiação, para as fontes ^{147}Pm , $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}K , respectivamente. Para todas as digitalizações utilizou-se o *scanner Microtek*, a uma resolução de digitalização de 72 dpi, na escala 100%, com tipo de saída RGB e utilizando toda a janela do *scanner*.

A análise das imagens foi realizada utilizando três programas, o programa *Image J*, para a obtenção dos valores de intensidade em cada uma das amostras de filme EBT, o programa *ImageDig* foi utilizado para a obtenção dos dados numéricos em cada um dos filmes radiocrômicos irradiados e o programa *Origin 8.0*, para o tratamento e a calibração destes, em termos de dose absorvida no ar. Finalmente foram obtidos graficamente os perfis de dose horizontal e vertical, as curvas de isodose e as distribuições das curvas de isodose em três dimensões para os campos de radiação beta das fontes $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm .

3.8. Coerência metrológica entre os sistemas BSS2 do LCD/CDTN e do LCI/IPEN

A metodologia estabelecida neste trabalho utilizando a câmara de extrapolação PTW 23391 e os filmes radiocrômicos EBT foi testada através da verificação da coerência metrológica entre o sistema BSS2 do LCD/CDTN com o BSS2 do Laboratório de Calibração de Instrumentos do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (LCI/IPEN localizado na cidade de São Paulo).

As medidas dos coeficientes angulares, obtidos com a câmara de extrapolação e de dose absorvida no ar obtidas com os filmes radiocrômicos, no LCD/CDTN, foram comparadas como os valores obtidos no LCI/IPEN.

3.8.1. Medidas com a câmara de extrapolação PTW 23391 no LCI/IPEN

A verificação da coerência metrológica foi determinada com a câmara de extrapolação PTW 23391, que foi utilizada como câmara “viajante”, juntamente com o eletrômetro *Keithley 6517A*. Antes de realizar o experimento propriamente dito, no LCI/IPEN foram realizados os testes da corrente de fuga e de estabilidade da câmara a partir do teste de repetitividade, para ambas as polaridades (Figura 28.a).

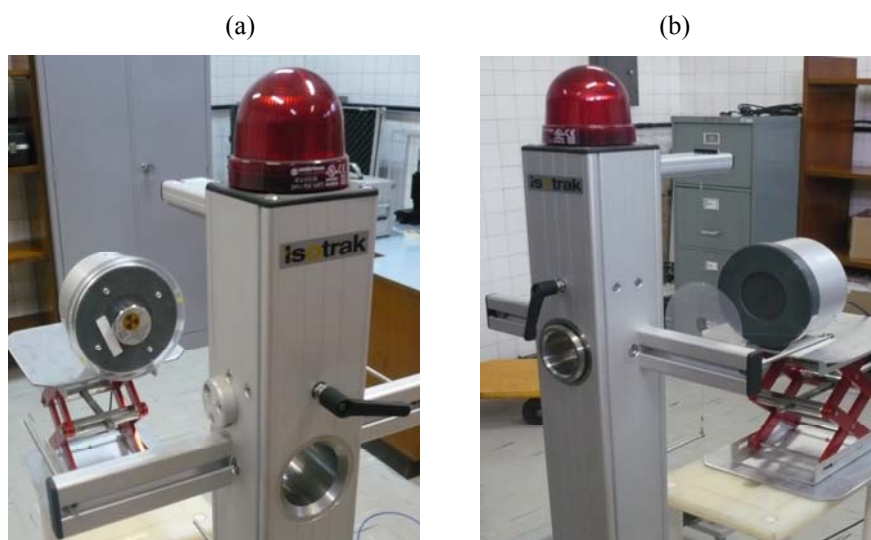


FIGURA 28. (a) Teste de estabilidade da câmara PTW 23391. (b) Câmara PTW 23391 sob condições de irradiação no sistema BSS2 do LCI/IPEN.

Logo após os testes, verificou-se a variação da corrente de ionização em função da profundidade da câmara nas condições de calibração estabelecidas no BSS2. A câmara de extrapolação foi posicionada com o centro da janela de entrada perpendicular ao eixo central do campo de radiação de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ /sem filtro, ^{85}Kr /com filtro e ^{147}Pm /com filtro, nas distâncias de 30, 30 e 20 cm, respectivamente (Figura 28.b).

Medidas de carga elétrica integradas por 30 s foram obtidas pelo eletrômetro *Keithley*, nas polaridades positivas como negativas. A profundidade da câmara foi variada entre 1,4 e 4,4 mm, em incrementos de 1,0 mm, e a tensão aplicada entre 60 e 240 V, em incrementos de 60 V. As curvas de extrapolação foram construídas a partir dos valores absolutos das médias das correntes de ionização em função da profundidade da câmara, e foram determinados os coeficientes angulares B, conseqüentemente as taxas de dose absorvida no ar para os campos de radiação beta das fontes padrões do BSS2/IPEN.

3.8.2. Medidas com os filmes radiocrômicos EBT no LCI/IPEN

Na verificação da coerência metrológica em campos de radiação beta utilizando os filmes radiocrômicos EBT, cada amostra de filme de tamanho 5 cm x 5 cm foi colocada suspensa no objeto simulador de PMMA e posicionada com seu centro geométrico perpendicular ao eixo central do campo de radiação, conforme apresentado na Figura 29.



FIGURA 29. Amostra de filme radiocrômico EBT sob condições de irradiação em campos de ^{147}Pm no sistema BSS2 do LCI/IPEN.

As irradiações das amostras foram realizadas em campos de radiação de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ /sem filtro e de ^{85}Kr /com filtro, na distância de 30 cm, com valores de dose absorvida de 0,1 e 0,3 Gy; e para a fonte de ^{147}Pm /com filtro, na distância de 20 cm, a 0,15 Gy.

As digitalizações das amostras de filmes foram realizadas com o *scanner Microtek*, a uma resolução de digitalização de 72 dpi, na escala 100%, com tipo de saída RGB e utilizando toda a janela do *scanner*. A análise das imagens foi realizada utilizando o programa *Image J* e foi considerada apenas a componente de cor vermelha. Os valores de intensidade foram obtidos em cinco regiões de interesse do filme e utilizando uma ROI de tamanho 100 *pixels* x 100 *pixels*. Os valores da dose absorvida no ar foram determinados a partir da densidade óptica líquida (DO) e conseqüentemente comparados com os valores de dose absorvida no ar determinados no LCD/CDTN.

3.8.3. Mapeamento dos campos de radiação beta no LCI/IPEN

Para a obtenção do mapeamento do campo e determinar a uniformidade dos campos de radiação beta das fontes padrões do BSS2/IPEN, filmes radiocrômicos de tamanho de 20,32 cm x 25,40 cm foram irradiadas nas condições de calibração estabelecidas no BSS2. Cada lâmina de filme EBT foi colocada suspensa no objeto simulador de PMMA (Figura 30) e posicionada perpendicularmente ao eixo central do campo de radiação.

As irradiações foram realizadas com as fontes: de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ à distância fonte/filme de 30 cm, sem filtro homogeneizador e com valor dose absorvida de 0,8 Gy; de ^{85}Kr à distância fonte/filme de 30 cm, com filtro homogeneizador e com valor de dose absorvida de 0,8 Gy; e a fonte ^{147}Pm à distância fonte/filme de 20 cm, com filtro homogeneizador e irradiado com valor de dose absorvida de 0,2 Gy.

Após as irradiações os filmes foram digitalizados no CDTN, 6, 9 e 10 dias depois da irradiação no IPEN, para as fontes ^{147}Pm , $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}K , respectivamente. Para todas as digitalizações utilizou-se o *scanner Microtek*, a uma resolução de digitalização de 72 dpi, na escala 100%, com tipo de saída RGB e utilizando toda a janela do *scanner*.

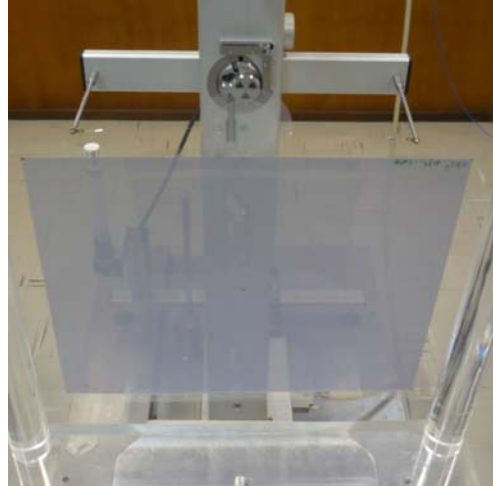


FIGURA 30. Filme radiocrômico sob condições de irradiação em campos de ^{85}Kr do sistema BSS2 do LCI/IPEN.

A análise das imagens foi realizada com ajuda dos programas *Image J* e *ImageDig*. Como mencionado anteriormente, o programa *ImageDig* foi utilizado para a obtenção dos dados numéricos dos filmes EBT irradiados, na extensão .dat, logo, estes dados foram tratados e calibrados em termos de dose absorvida no ar utilizando o programa *Origin 8.0*. Finalmente foram obtidos graficamente os perfis de dose horizontal e vertical, as curvas de isodose e as distribuições das curvas de isodose em três dimensões para os campos de radiação beta das fontes $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm .

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Corrente de fuga e estabilidade da câmara de extrapolação PTW 23391

Os resultados dos valores da corrente de fuga realizados entre janeiro e outubro de 2010 são apresentados conforme a Figura 31. Os dados permitiram estabelecer, para fins de controle, os limites superior e inferior, dados pelos valores $\pm 2,6 \times 10^{-14}$ A. Os valores de corrente de fuga encontrados fora desta faixa indicariam a existência de algum problema, umidade na câmara por exemplo, e acarretando a impossibilidade de usá-la.

Em todos os experimentos com a câmara de extrapolação, buscou-se que a corrente de fuga fosse desprezível em relação à corrente de ionização medida (inferior a 2,0%).

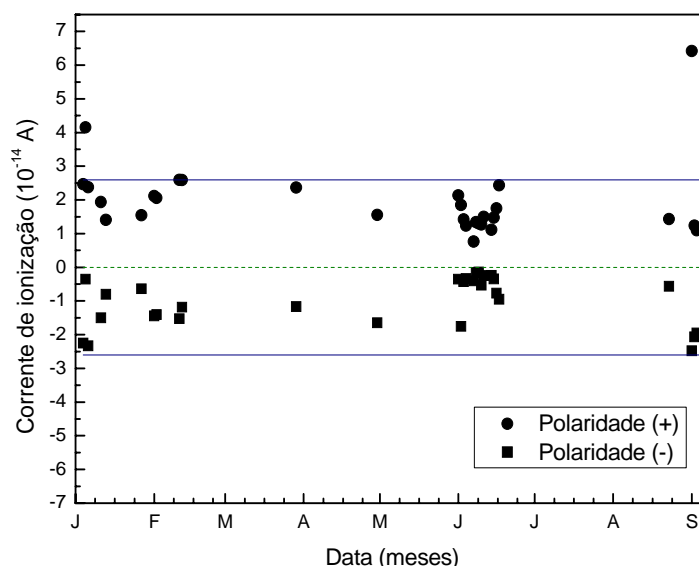


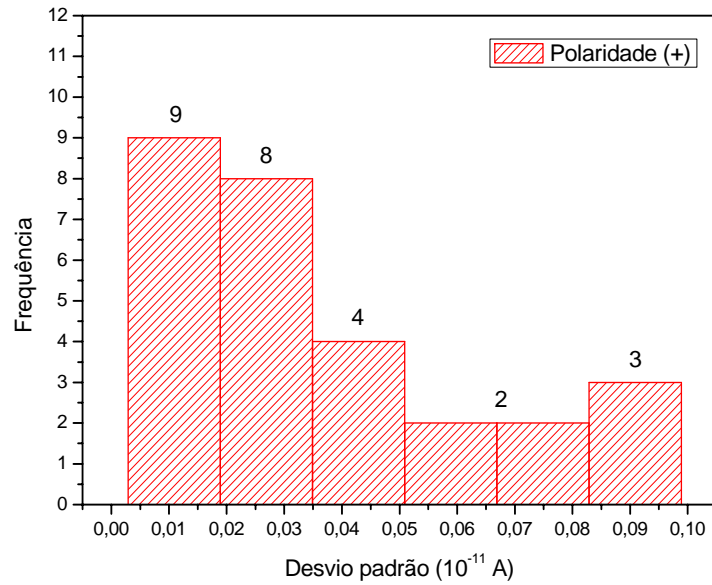
FIGURA 31. Corrente de fuga da câmara de extrapolação PTW 23391, entre janeiro e outubro de 2010.

A repetitividade da câmara foi determinada para as 28 medidas realizadas nas datas já citadas anteriormente. A Figura 32 mostra o histograma de frequências dos desvios padrões das medidas de corrente de ionização da câmara para as polaridades positiva e negativa, Figura 32 (a) e (b), respectivamente.

Os valores de repetitividade permitiram estabelecer limites, para uso confiável da câmara, $0,051 \times 10^{-11}$ A e de $0,025 \times 10^{-11}$ A, para as polaridades positiva e negativa,

respectivamente. Os valores do desvio padrão acima destes limites indicariam que o teste apresenta uma alta dispersão das medidas.

(a)



(b)

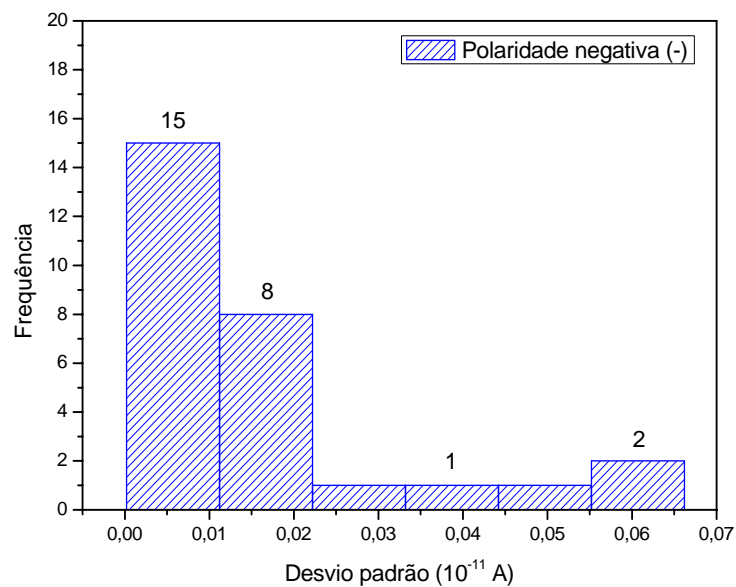


FIGURA 32. Repetitividade da câmara de extrapolação PTW 23391, polaridade positiva (a) e negativa (b).

Os resultados dos valores de corrente de ionização determinados no teste de reprodutibilidade da câmara PTW permitiram estabelecer, para fins de controle de qualidade, os limites superior e inferior, dados pelos valores $5,166 \times 10^{-11}$ A e $-4,848 \times 10^{-11}$ A, para as polaridades positiva e negativa, respectivamente (Figura 33). Os valores de reprodutibilidade das medidas, para tensão de polarização positiva e negativa foram de 4,6 % e 2,1 %, respectivamente.

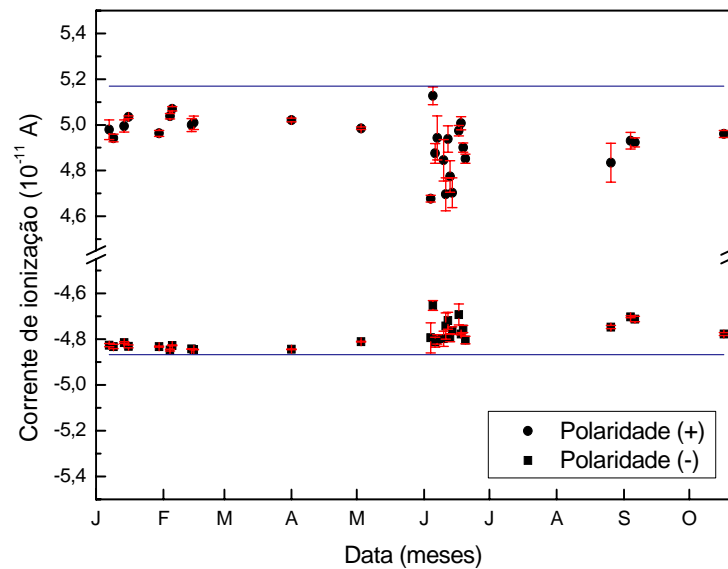


FIGURA 33. Reprodutibilidade da câmara de extrapolação PTW 23391.

Os valores de incerteza associados em cada ponto, representados no gráfico da reprodutibilidade da câmara, foram determinados levando em conta as incertezas do tipo A, ou seja, as relacionadas com a série de medições no teste de repetitividade.

4.2. Caracterização da câmara de extrapolação PTW 23391 em campos de radiação beta

4.2.1. Profundidade nula real da câmara PTW 23391

O gráfico da corrente de ionização em função da profundidade da câmara de extrapolação é representado na Figura 34. Nesta figura, pode-se observar duas retas que se cruzam num ponto diferente da origem do sistema de coordenadas. O valor absoluto do ponto d_0 , 0,858 mm, representa a profundidade nula real da câmara.

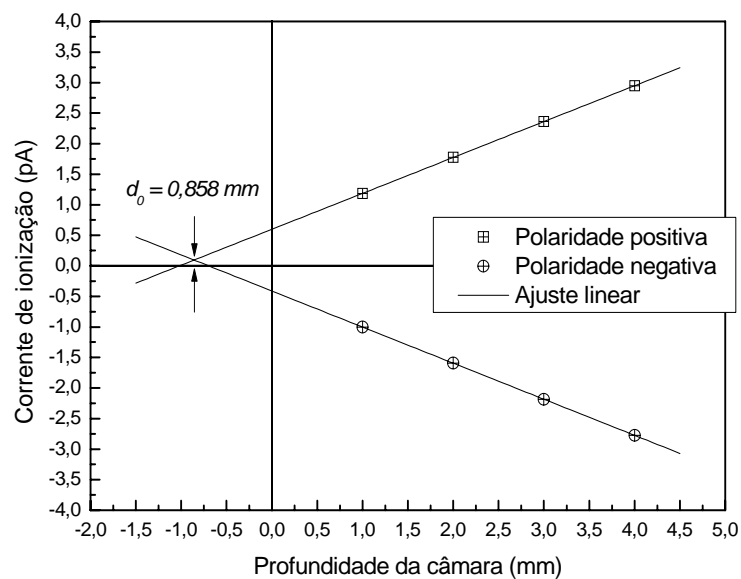


FIGURA 34. Profundidade nula real da câmara de extrapolação PTW 23391 em $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$.

Nas experiências, utilizando a câmara de extrapolação, é necessário tomar-se sempre o valor real da profundidade da câmara. Isto significa que, deve-se somar ao valor dado pelo micrômetro da câmara o valor da profundidade nula real aqui determinado.

4.2.2. Curvas de saturação da câmara PTW 23391 em campos de radiação beta

O resultado do teste inicial das variações da corrente de ionização em função da tensão aplicada é mostrado na Figura 35. Os resultados nesta figura apresentam as curvas de saturação obtidas com as fontes padrões $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , para uma distância entre os eletrodos de 3,5 mm, tensão aplicada no intervalo de -600 a 600 V.

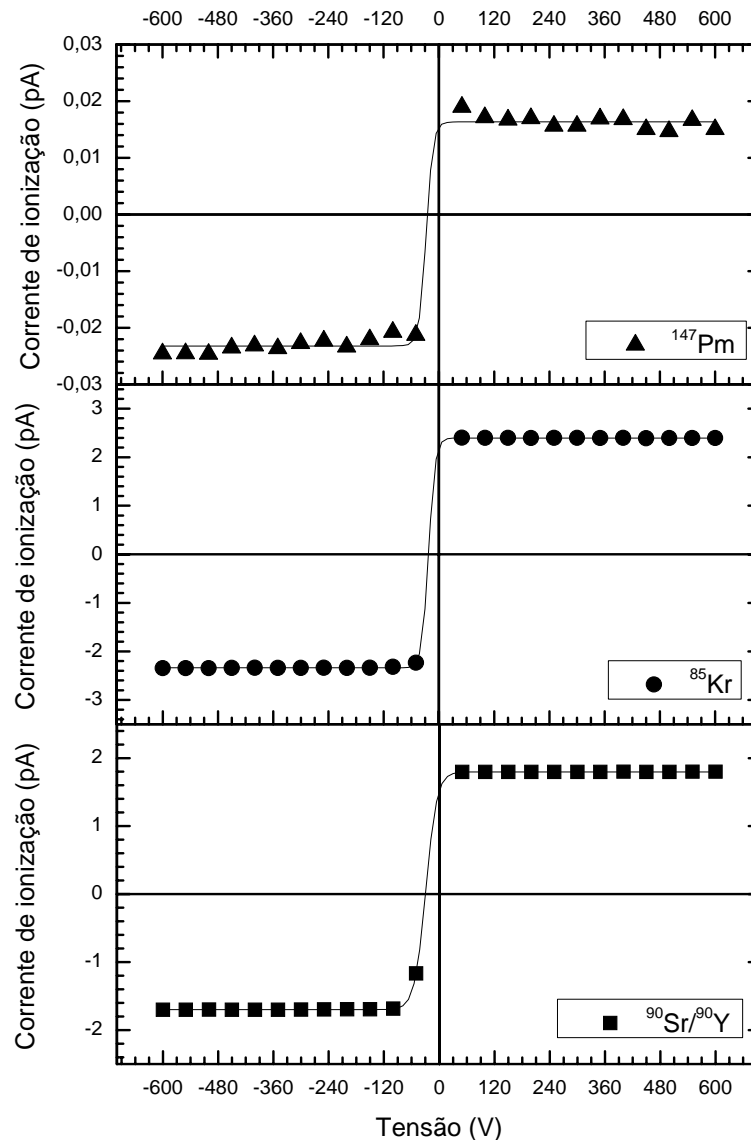


FIGURA 35. Curvas de saturação da câmara de extrapolação PTW 23391, obtidas em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , para a profundidade 3,5 mm.

Os resultados dos valores de corrente de ionização diferem significativamente para cada campo devido à diferença da energia e da atividade das fontes. Apesar de que a energia do $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ é maior que a do ^{85}Kr , este apresenta valores maiores devido a sua elevada atividade.

As Figuras 36, 37 e 38 apresentam os resultados das curvas de saturação obtidos nos campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , respectivamente, para as profundidades da câmara de 1,4 a 4,4 mm em incrementos de 1,0 mm.

Para o campo de radiação beta $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ (Figura 36) pode-se observar que a corrente de ionização aumenta com a tensão aplicada, atingindo seu valor máximo em aproximadamente 60 V, a partir do qual permanece constante. Os valores de corrente de ionização para as profundidades de 1,4 a 4,4 mm, encontram-se nas faixas de 1,074 a 2,655 pA e de -0,917 a -2,486 pA, para as polaridades positiva e negativa, respectivamente.

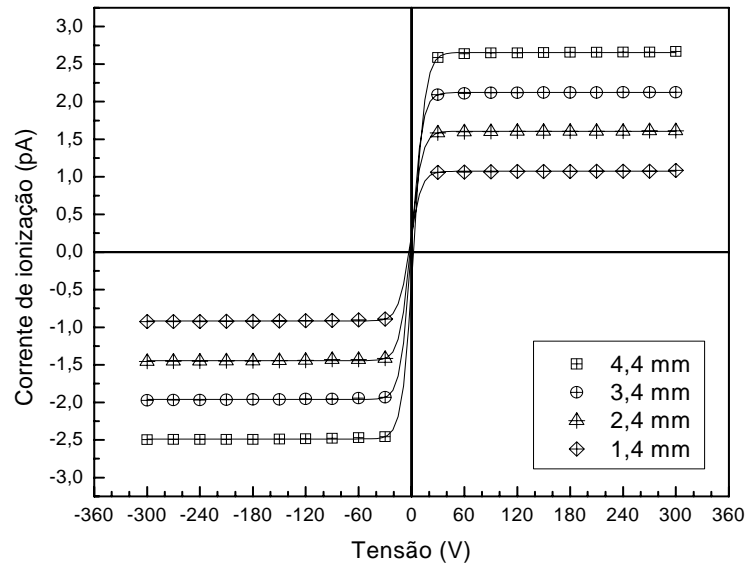


FIGURA 36. Curvas de saturação para diferentes profundidades da câmara de extrapolação PTW 23391, obtidas em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$.

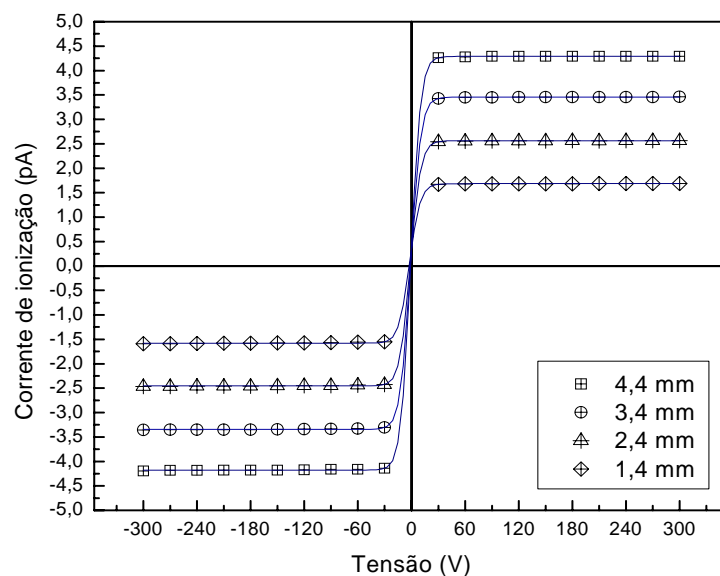


FIGURA 37. Curvas de saturação para diferentes profundidades da câmara de extrapolação PTW 23391, obtidas em campos de radiação beta de ^{85}Kr .

Para a exposição com a fonte de ^{85}Kr (Figura 37), também pode-se observar o aumento da corrente de ionização com a tensão aplicada. Para este caso, a saturação acontece em aproximadamente 50 V, quando a corrente de ionização atinge seu valor máximo e permanece constante igual. Os valores de corrente de ionização obtidos, para as profundidades de 1,4 a 4,4 mm, encontram-se nas faixas de 1,684 a 4,288 pA e de -1,578 a -4,176 pA, para as polaridades positiva e negativa, respectivamente.

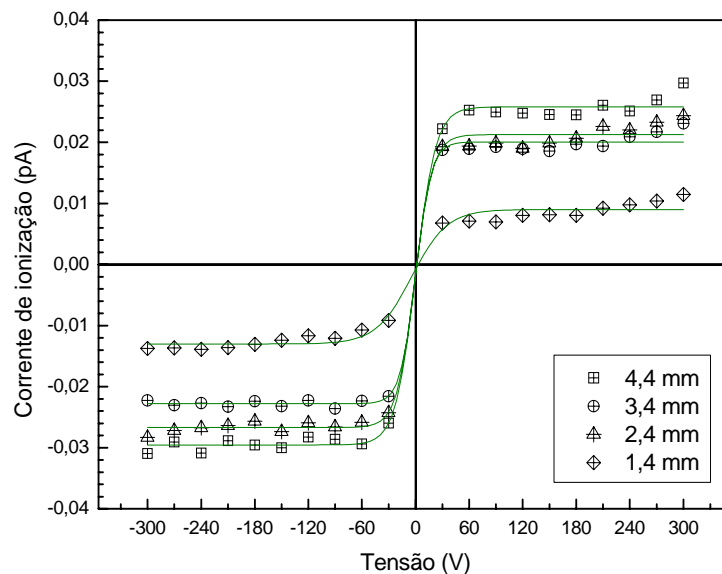


FIGURA 38. Curvas de saturação para diferentes profundidades da câmara de extrapolação PTW 23391, obtidas em campos de radiação beta de ^{147}Pm .

Para as curvas de saturação obtidas com a fonte de ^{147}Pm (Figura 38), o valor da corrente de ionização também aumenta com a tensão aplicada. Estes valores não formam um patamar, isto se deve provavelmente a dois fatores: à baixa energia característica do espectro da fonte de ^{147}Pm e como consequência à baixa corrente gerada, da ordem de 10^{-14} A, próximo à corrente de fuga. O valor da tensão quando a corrente de ionização atinge seu valor máximo é de aproximadamente 60 V. Os valores representativos de corrente de ionização obtidos, para as profundidades de 1,4 a 4,4 mm, encontram-se nas faixas de 0,0089 a 0,258 pA e de -0,0129 a -0,0296 pA, para as polaridades positiva e negativa, respectivamente.

Os resultados mostram que, além da ocorrência de saturação, as curvas não são simétricas em relação à origem do sistema de coordenadas. Provavelmente uma das causas desta diferença de simetria se deve principalmente à mobilidade dos íons quando estes são

coletados. Os íons negativos movem-se com maior rapidez que os íons positivos devido a seu menor tamanho, isto faz que os valores de corrente de ionização na polaridade negativa apresentem valores maiores, em modulo, em relação aos valores de corrente da polaridade positiva.

4.2.3. Curvas de extrapolação da câmara PTW 23391 em campos de radiação beta

Os resultados das curvas de extrapolação da câmara PTW 23391 obtidas nos campos de radiação do $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm são apresentados na Figura 39, para profundidades de 1,4 a 4,4 mm em incrementos de 1,0 mm.

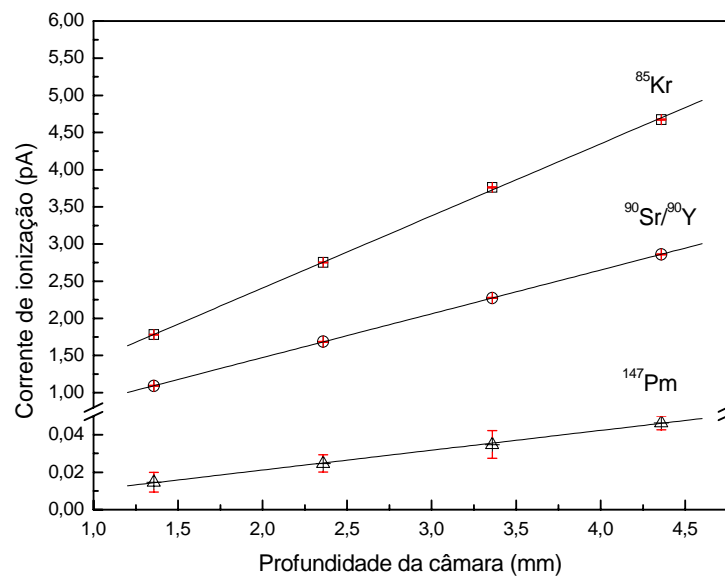


FIGURA 39. Curvas de extrapolação da câmara PTW em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm .

As curvas de extrapolação apresentaram comportamento linear, com coeficientes de correlação de 0,999 para as fontes de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr , e de 0,998 para a de ^{147}Pm .

Na Tabela 5 são apresentados os coeficientes angulares, obtidos em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm .

TABELA 5. Coeficientes angulares nos campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , obtidos com a câmara de extrapolação PTW 23391.

Fonte	Distância de calibração (cm)	Filtro homogeneizador	Coefficiente angular ($10^{-13} \text{ A.mm}^{-1}$)
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	30	Não	$5,891 \pm 0,041$
^{85}Kr	30	Sim	$9,692 \pm 0,042$
^{147}Pm	20	Sim	$0,105 \pm 0,030$

Na Tabela 5, as incertezas dos coeficientes angulares foram determinadas a partir da dispersão das medidas realizadas experimentalmente, incertezas do tipo A, com fator de abrangência $k = 2$, para um nível de confiança de aproximadamente 95%. Os valores das incertezas apresentaram valores de 0,7%, 0,4% e 28,6 para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , respectivamente.

4.3. Calibração da câmara de extrapolação PTW 23391 em campos de radiação beta

A câmara de extrapolação PTW 23391 foi calibrada nos campos padrões de radiação beta nas condições de calibração estabelecidas no BSS2, em termos de taxa de dose absorvida no ar. A Tabela 6 apresenta os valores dos coeficientes de calibração da câmara de extrapolação obtidos a partir das taxas de doses absorvidas no ar certificadas no BSS2 do LCD/CDTN em função do coeficiente angular das curvas de extrapolação.

TABELA 6. Coeficientes de calibração da câmara de extrapolação PTW 23391 nos campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm .

Fonte	Distância de calibração (cm)	Taxa de dose absorvida no ar ($\mu\text{Gy.s}^{-1}$)	Coefficiente de calibração ($\mu\text{Gy.s}^{-1} \cdot \text{mm.A}^{-1}$)
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	30	$13,63 \pm 0,04$	$(23,14 \pm 0,15) \times 10^{+12}$
^{85}Kr	30	$30,10 \pm 0,04$	$(31,06 \pm 0,13) \times 10^{+12}$
^{147}Pm	20	$2,73 \pm 0,05$	$(26,02 \pm 6,61) \times 10^{+13}$

Na Tabela 6, a diferença dos valores das taxas de dose absorvida no ar em relação às taxas de dose absorvida no ar dadas pelo certificado (Tabela 3) foram de -22,5%, -33,8% e 7,1% para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , respectivamente. As incertezas dos coeficientes de calibração foram determinadas pelo desvio padrão das medidas, incertezas tipo A, com fator de abrangência $k = 2$, para um nível de confiança de aproximadamente 95%. Os valores das incertezas foram de 0,6%, 0,4% e 25,4 para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , respectivamente.

4.4. Resposta do filme radiocrômico EBT em campos de radiação beta

Os resultados obtidos nesta primeira etapa deste estudo indicaram que o filme radiocrômico EBT apresenta boa resposta quando irradiado em feixes de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$. As imagens dos filmes digitalizados com o *scanner* HP 4050 foram analisadas com ajuda do programa *image J*. Na Figura 40 pode-se observar a resposta radiocrômica a qual apresenta uma alteração na coloração, tornando-se progressivamente mais escura com o aumento da dose de 0,1 a 3,5 Gy.

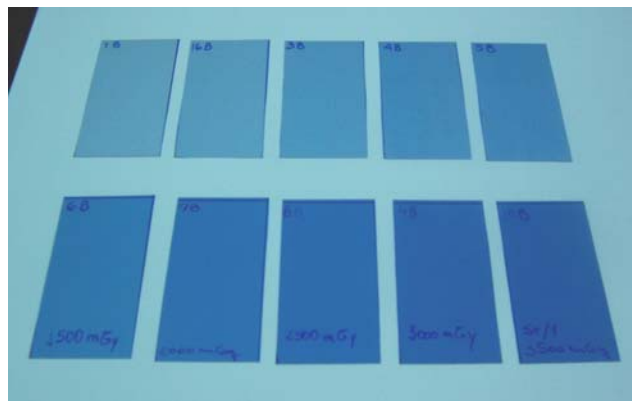


FIGURA 40. Representação dos filmes radiocrômicos irradiados em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$.

Quando a imagem é digitalizada no modo transmissão, um dos modos está apresentado em três componentes de cor: azul, verde e vermelha. O programa *Image J* permite fazer a análise das imagens no modo RGB, considerando-se apenas os valores da componente de cor vermelha (Figura 41).

A resposta do filme EBT em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, é apresentado na Figura 42. Na representação dos valores médios das componentes de cor RGB e da

componente de cor vermelha em função dos valores da dose absorvida, pode-se verificar que os valores de densidade óptica líquida para a componente de cor vermelha são maiores em relação aos valores médios de cor RGB.

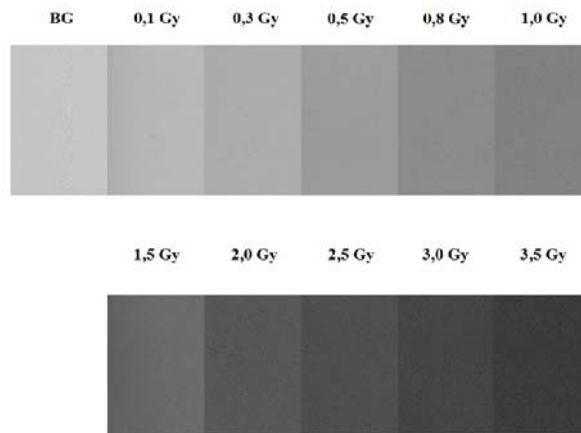


FIGURA 41. Representação dos filmes radiocrômicos na componente de cor do canal vermelho.

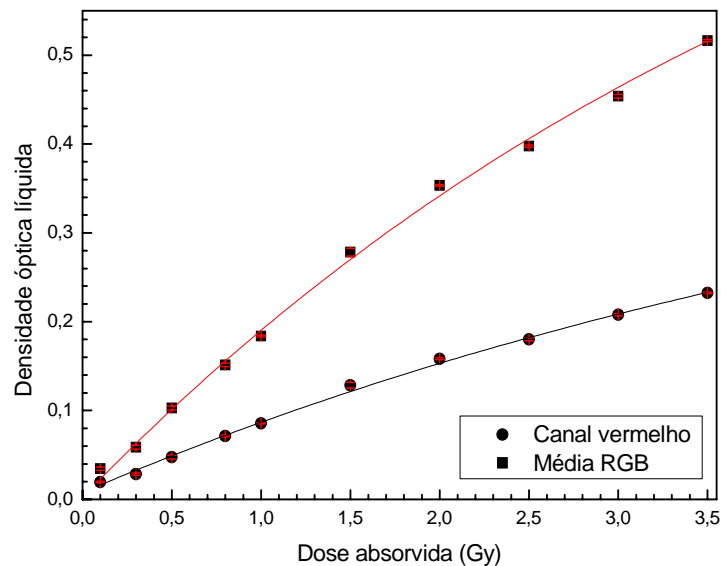


FIGURA 42. Resposta do filme radiocrômico em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, em termos de densidade óptica líquida dos valores médios das componente de cor RGB e da componente de cor vermelha.

Uma vez determinada a sensibilidade do filme radiocrômico em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, continuou-se com o estudo, esta vez, com foco à instrumentação utilizada. A Figura 43 apresenta a resposta radiocrômica das amostras dos filmes radiocrômicos EBT,

irradiados nos campos da fonte $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, com valores de dose absorvida de 0,1; 0,3; 0,5; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,5 e 5,0 Gy, digitalizados com o *scanner Microtek 9800XL*.

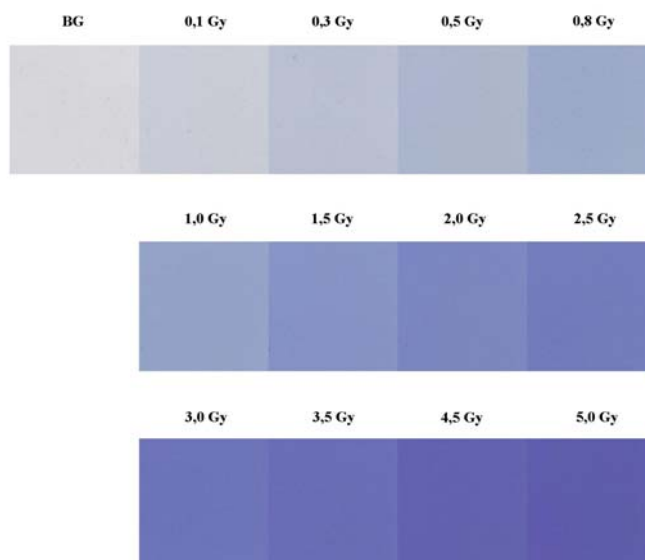


FIGURA 43. Representação dos filmes radiocrômicos irradiados em campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, digitalizados com o *scanner Microtek*.

A análise das imagens das amostras digitalizadas com os *scanners HP e Microtek* foi realizada utilizando os programas *Image J* e *DoseLab 4.11*. Os resultados obtidos das imagens digitalizadas com o *scanner HP* apresentaram valores de DOL não coerentes só para as amostras irradiadas com 4,5 e 5,0 Gy. A partir destes resultados, realizaram-se testes de digitalização em diferentes posições da janela do *scanner*, esta vez, para resoluções de 72, 100 e 300 dpi, na escala 100% e utilizando o programa *DoseLab*. Na Figura 44 são apresentados os resultados do teste de digitalização para a resolução de 72 dpi, das amostras irradiadas com 4,5 e 5,0 Gy. A não uniformidade apresentada na Figura 44 (a) e (b), também foi encontrada para as outras resoluções de digitalização. Os resultados deste teste permitiram concluir que esta irregularidade é independente da resolução de digitalização e que este problema foi devido, principalmente, ao próprio *scanner HP*.

Os resultados obtidos na análise das imagens das amostras digitalizadas com o *scanner Microtek*, não apresentaram nenhuma irregularidade, continuando-se assim o estudo com este *scanner*. A partir da análise realizada com os programas *Image J* e *DoseLab* das imagens

digitalizadas com o *scanner Microtek* e utilizando a equação (13), construía-se a respectiva curva de calibração, em termos de densidade óptica líquida.

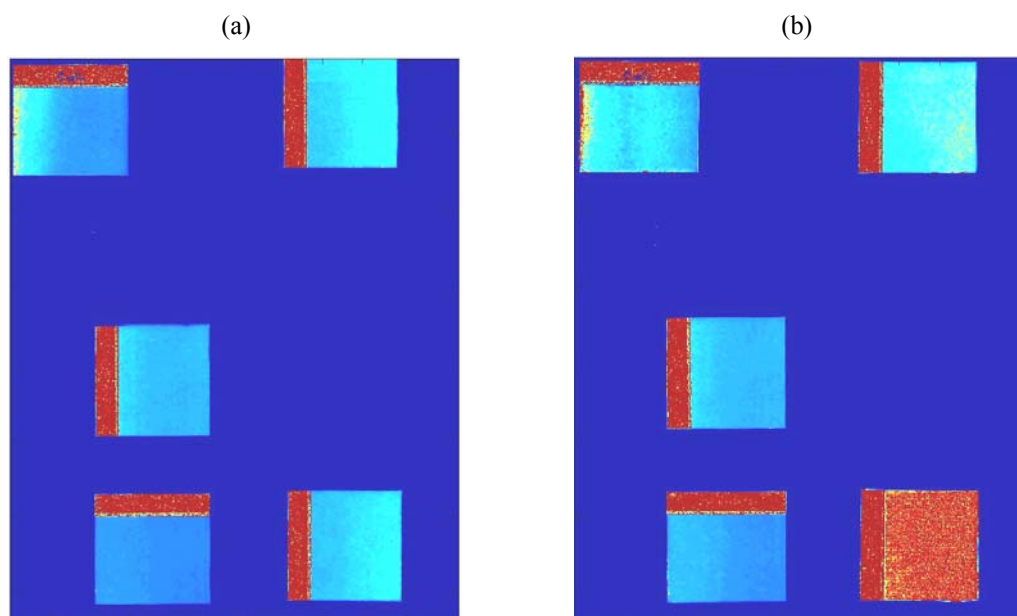


FIGURA 44. Representação das amostras de filme EBT digitalizadas em diferentes posições do *scanner* HP e analisados como o programa *DoseLab*. (a) Amostra irradiada com valor de dose de 4,5 Gy. (b) e 5,0 Gy.

As amostras EBT também foram analisadas com o densitômetro de transmissão *X-Rite* 369. Os valores de DO foram determinados em cinco regiões de interesse, como mencionados anteriormente na metodologia. A curva de calibração foi determinada a partir da média dos valores de densidade óptica líquida em função dos valores de dose absorvida. Os valores da média da densidade óptica líquida (DOL) para cada amostra de filme foi determinada subtraindo o valor da média de DO da amostra de controle.

O espectrofotômetro *Shimadzu UV Mini* 1240 foi utilizado para medições da resposta radiocrômica em termos de absorbância (Figura 45). A curva de calibração foi construída a partir dos valores de absorbância em função dos valores de dose absorvida. Os valores de absorbância foram determinados a partir do pico localizado entre 633 e 634 nm de comprimento de onda. Assim, o valor de absorbância líquido foi calculado subtraindo o valor de absorbância das amostras irradiadas, o valor de absorbância da amostra de controle.

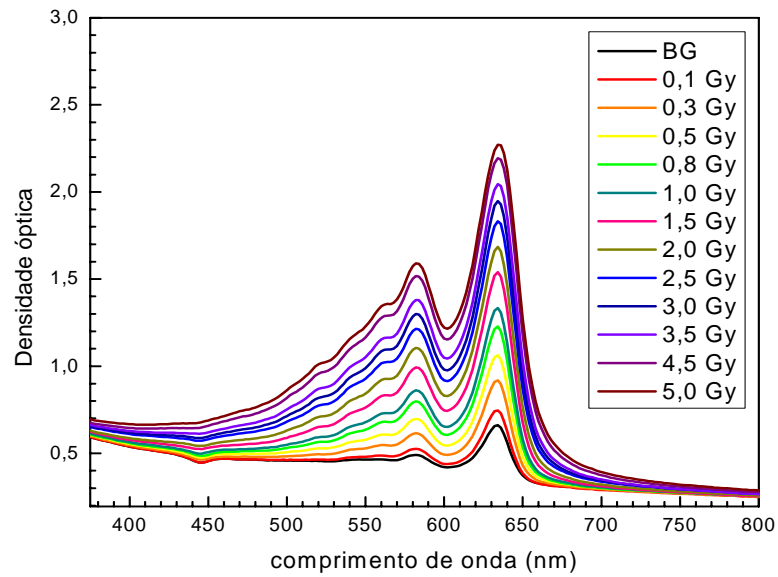


FIGURA 45. Espectro de absorvância das amostras de filmes radiocrômicos irradiados em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$.

A resposta radiocrômica do filme EBT em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, de acordo com os instrumentos utilizados, o *scanner Microtek XL 9800*, o densitômetro *X-Rite 369* e o espectrofotômetro *Shimadzu UV Mini 1240*, é demonstrada na Figura 46.

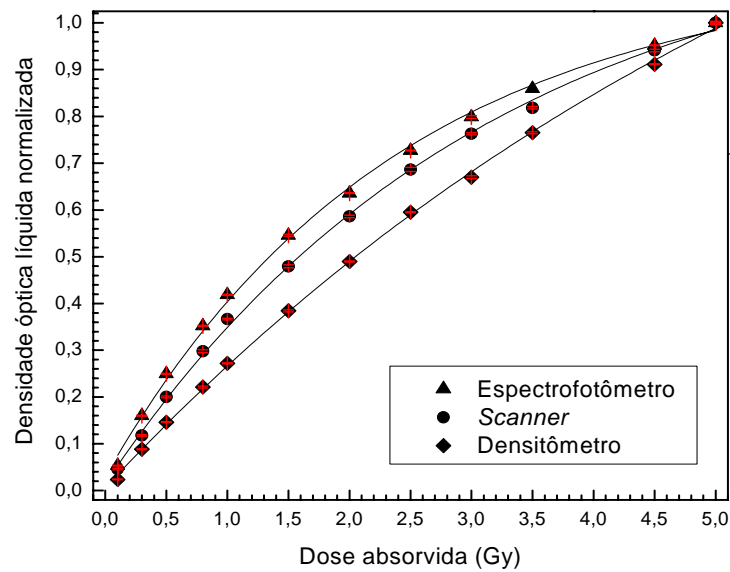


FIGURA 46. Resposta dos filmes radiocrômicos normalizada, irradiados em $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, analisados com o *scanner*, densitômetro e o espectrofotômetro.

A Tabela 7 apresenta os valores de densidade óptica líquida obtidos com o *scanner*, analisados com o programa *DoseLab*, com o densitômetro e com espectrofotômetro.

TABELA 7. Valores de densidade óptica líquida, obtidos com o *scanner Microtek 9800XL*, o densitômetro *X-Rite 369* e o espectrofotômetro *Shimadzu UV Mini 1240*.

Dose absorvida (Gy)	<i>Scanner</i>	Densitômetro	Espectrofotômetro
	DOL	DOL	DOL
0,1	0,014 ± 0,005	0,007 ± 0,001	0,086 ± 0,001
0,3	0,035 ± 0,005	0,026 ± 0,001	0,258 ± 0,001
0,5	0,060 ± 0,005	0,043 ± 0,002	0,402 ± 0,001
0,8	0,089 ± 0,005	0,065 ± 0,001	0,567 ± 0,001
1,0	0,109 ± 0,005	0,080 ± 0,001	0,674 ± 0,001
1,5	0,143 ± 0,005	0,113 ± 0,001	0,879 ± 0,002
2,0	0,175 ± 0,005	0,144 ± 0,001	1,024 ± 0,001
2,5	0,205 ± 0,004	0,175 ± 0,001	1,171 ± 0,001
3,0	0,227 ± 0,004	0,197 ± 0,001	1,286 ± 0,001
3,5	0,244 ± 0,004	0,225 ± 0,001	1,384 ± 0,0
4,5	0,281 ± 0,004	0,268 ± 0,001	1,533 ± 0,001
5,0	0,298 ± 0,004	0,294 ± 0,001	1,610 ± 0,001

As incertezas das DOL apresentadas na Tabela 7 foram determinadas a partir da dispersão das medições realizadas nas cinco regiões de interesse (ROI), desvio padrão das áreas ROI, incerteza tipo A.

Para o ajuste das curvas de calibração dos valores de densidade óptica líquida, em termos de dose absorvida, utilizou-se o ajuste do tipo polinomial. O grau do polinômio foi determinado, para cada instrumento utilizado, a partir do método de variância (SHAPE e MILLER, 2009). A Tabela 8 apresenta as funções de ajuste e o tipo de polinômio utilizado na determinação das curvas de calibração para o *scanner*, densitômetro e espectrofotômetro.

TABELA 8. Funções de ajuste do filme EBT para com o *scanner*, densitômetro e espectrofotômetro. (y = dose absorvida e x = densidade óptica líquida).

Instrumento	Funções de ajuste
	Filme EBT
<i>Scanner</i>	$y = A_1 x^3 + B_1 x^2 + C_1 x + D_1$
Densitômetro	$y = A_2 x^2 + B_2 x + C_2$
Espectrofotômetro	$y = A_3 x^3 + B_3 x^2 + C_3 x + D_3$

4.5. Caracterização dos filmes radiocrômicos EBT em campos de radiação beta

A caracterização dos filmes radiocrômicos EBT em campos de radiação beta foi realizada em termos de dose absorvida no ar nas condições de calibração estabelecidas no BSS2. As Figuras 47, 48 e 49 apresentam os resultados das curvas de calibração obtidas nos campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , respectivamente, das amostras de filmes EBT digitalizadas com o *scanner Microtek* e analisadas utilizando os programas *Image J* e *DoseLab* 4.11.

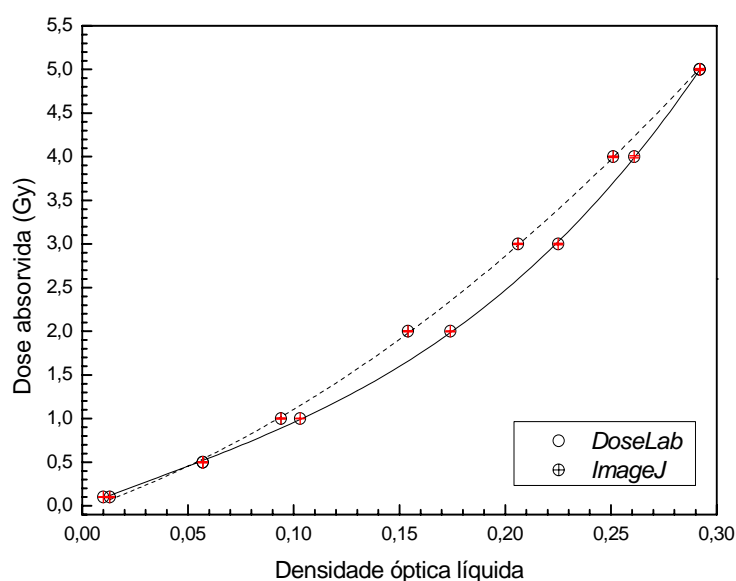


FIGURA 47. Curva de calibração dos filmes radiocrômicos EBT, irradiados em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, digitalizados com o *scanner Microtek* e analisados com os programas *Image J* e *DoseLab*.

Os valores de densidade óptica líquida (DOL) obtidos em campo de radiação beta $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ foram ajustados utilizando a funções do tipo polinomial (Figura 47). Como mencionado anteriormente na metodologia, o grau do polinômio foi determinado a partir do método de variância, sendo, os graus do polinômio de 2 e 3 para o ajuste realizado com os programas *Image J* e *DoseLab*, respectivamente.

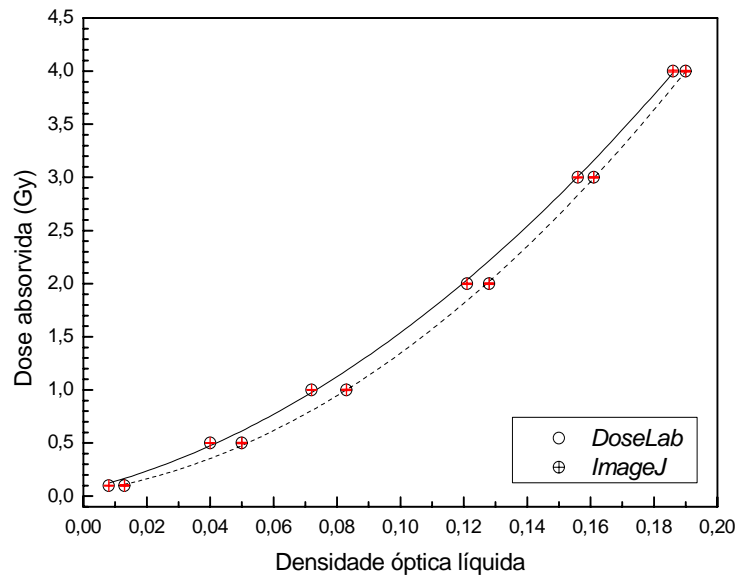


FIGURA 48. Curva de calibração dos filmes radiocrômicos EBT, irradiados em campos de radiação beta de ^{85}Kr , digitalizados com o *scanner Microtek* e analisados com os programas *Image J* e *DoseLab*.

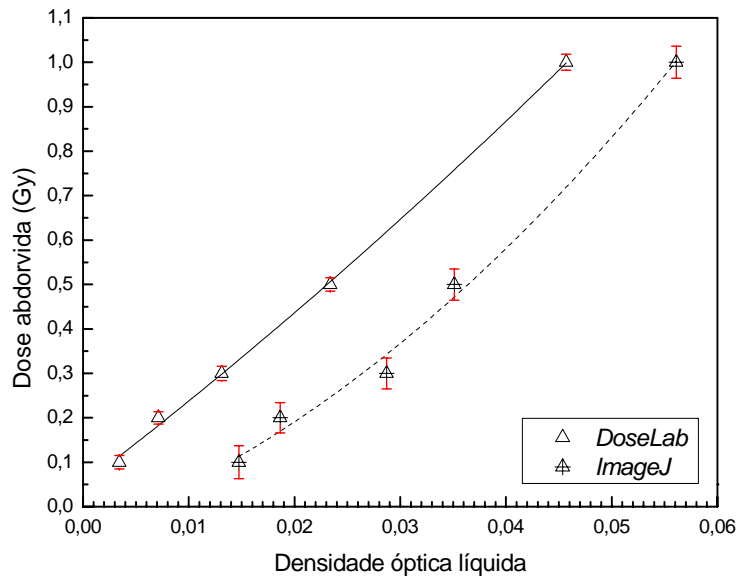


FIGURA 49. Curva de calibração dos filmes radiocrômicos EBT, irradiados em campos de radiação beta de ^{147}Pm , digitalizados com o *scanner Microtek* e analisados com os programas *Image J* e *DoseLab*.

A partir dos resultados se realizou uma comparação entre os três instrumentos estudados, as Tabelas 9, 10 e 11, apresentam os resultados da resposta radiocrômica em termos de densidade óptica líquida das amostras de filme EBT irradiadas em campos de

radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , respectivamente. As incertezas das DOL foram determinadas a partir da dispersão das medições nas cinco regiões de interesse (ROI), desvio padrão das áreas ROI, incerteza tipo A.

TABELA 9. Valores de densidade óptica líquida obtidos nos campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$.

Dose absorvida (Gy)	<i>Scanner</i>		Densitômetro	Espectrofotômetro
	<i>DoseLab</i>	<i>ImageJ</i>		
	DOL	DOL		
0,1	0,010 ± 0,003	0,013 ± 0,006	0,006 ± 0,001	0,094 ± 0,0
0,5	0,057 ± 0,003	0,057 ± 0,006	0,039 ± 0,001	0,387 ± 0,001
1,0	0,103 ± 0,004	0,094 ± 0,006	0,074 ± 0,001	0,650 ± 0,0
2,0	0,174 ± 0,005	0,154 ± 0,006	0,136 ± 0,001	1,004 ± 0,001
3,0	0,225 ± 0,009	0,206 ± 0,007	0,189 ± 0,001	1,266 ± 0,002
4,0	0,261 ± 0,011	0,251 ± 0,007	0,234 ± 0,001	1,446 ± 0,001
5,0	0,292 ± 0,012	0,292 ± 0,007	0,276 ± 0,001	1,592 ± 0,0

Na Tabela 9, os valores de DOL encontrados com os três instrumentos apresentaram variações significativas, isto é devido aos diferentes mecanismos e princípios de funcionamento. Os resultados obtidos a partir das imagens digitalizadas com o *scanner* apresentaram uma variação na faixa de 4,0 a -23,1%, para os valores de DOL obtidos com o programa *DoseLab* em relação aos obtidos com o programa *Image J*, obtendo-se a variação mais alta para a amostra irradiada com 0,1 Gy de dose absorvida.

TABELA 10. Valores de densidade óptica líquida obtidos nos campos de radiação beta de ^{85}Kr .

Dose absorvida (Gy)	<i>Scanner</i>		Densitômetro	Espectrofotômetro
	<i>DoseLab</i>	<i>ImageJ</i>		
	DOL	DOL		
0,1	0,008 ± 0,003	0,013 ± 0,007	0,004 ± 0,001	0,076 ± 0,0
0,5	0,040 ± 0,003	0,050 ± 0,006	0,031 ± 0,0	0,323 ± 0,001
1,0	0,072 ± 0,003	0,083 ± 0,006	0,062 ± 0,001	0,546 ± 0,001
2,0	0,121 ± 0,005	0,128 ± 0,007	0,111 ± 0,001	0,873 ± 0,0
3,0	0,156 ± 0,005	0,161 ± 0,007	0,153 ± 0,002	1,113 ± 0,001
4,0	0,186 ± 0,008	0,190 ± 0,007	0,194 ± 0,002	1,298 ± 0,001

Para a exposição com a fonte de ^{85}Kr , os valores de DOL também foram ajustados utilizando o modelo de função polinomial (Figura 48). Para este caso, as curvas de calibração apresentam um deslocamento uma em relação à outra, isto é devido à diferença de resposta

apresentada quando a imagem das amostras de filmes EBT é analisada pelos próprios programas. Para o ajuste dos valores de DOL utilizaram-se as funções polinomiais com grau 2, para ambos os programas *Image J* e *DoseLab*, respectivamente.

Na Tabela 10, observe-se que os valores de DOL encontrados com os três instrumentos também apresentaram variações significativas, embora só para as amostras digitalizadas com o *scanner*, esta diferença é mínima. Os resultados obtidos a partir das imagens digitalizadas com o *scanner Microtek*, apresentaram uma variação na faixa de -2,1% a -38,5%, para os valores de DOL obtidos com o programa *DoseLab* em relação aos obtidos com o programa *Image J*. A variação mais alta, como mencionado para o caso da exposição realizada com a fonte de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, foi obtida para a amostra irradiada com 0,1 Gy de dose absorvida.

Os valores de DOL das curvas de calibração obtidas em campos de ^{147}Pm , também foram ajustados utilizando o modelo de função tipo polinomial, com grau de polinômio de 2, para ambos os programas *Image J* e *DoseLab*, respectivamente (Figura 49).

TABELA 11. Valores de densidade óptica líquida obtidos nos campos de radiação beta de ^{147}Pm .

Dose absorvida (Gy)	<i>Scanner</i>		Densitômetro	Espectrofotômetro
	<i>DoseLab</i>	<i>ImageJ</i>		
	DOL	DOL		
0,1	0,003 ± 0,004	0,015 ± 0,016	0,003 ± 0,001	0,017 ± 0,001
0,2	0,007 ± 0,006	0,019 ± 0,017	0,006 ± 0,001	0,019 ± 0,001
0,3	0,013 ± 0,008	0,029 ± 0,018	0,007 ± 0,001	0,035 ± 0,001
0,5	0,023 ± 0,009	0,035 ± 0,019	0,011 ± 0,001	0,039 ± 0,0
1,0	0,046 ± 0,011	0,056 ± 0,021	0,014 ± 0,001	0,072 ± 0,001

Na Tabela 11, observe-se que os valores de DOL encontrados com os três instrumentos testados também apresentaram variações significativas. Os resultados obtidos a partir das imagens digitalizadas com o *scanner Microtek*, apresentaram uma variação na faixa de -18,4% a -77,3%, para os valores de DOL obtidos com o programa *DoseLab* em relação aos obtidos com o programa *Image J*. A maior variação encontrada, foi obtida para a amostra irradiada com 0,1 Gy de dose absorvida.

Como mencionado anteriormente em cada análise do gráfico, a determinação do ajuste das curvas de calibração foi realizada utilizando-se o modelo polinomial. A Tabela 12 apresenta os graus dos polinômios utilizados no ajuste das curvas de calibração obtidos nos

campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm para o *scanner*, densitômetro e espectrofotômetro.

Após a caracterização do filme radiocrômico *Gafchromic* nos campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , se realizou a calibração deste, determinando-se os coeficientes de calibração. Os valores de DOL considerados para a calibração foram os das amostras digitalizadas com o *scanner Microtek* e analisados utilizando o programa *ImageJ*.

TABELA 12. Graus dos polinômios utilizados no ajuste das curvas de calibração dos filmes EBT obtidos em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , para com o scanner, densitômetro e espectrofotômetro.

Tipo de fonte	<i>Scanner</i>		Densitômetro	Espectrofotômetro
	<i>DoseLab</i>	<i>ImageJ</i>		
Grau do polinômio				
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	3	2	2	3
^{85}Kr	2	2	2	2
^{147}Pm	2	2	2	2

Os coeficientes de calibração foram determinados a partir da Equação (14):

$$F_D = \frac{D_{ar}}{DOL} \quad (14)$$

onde, F_D representa o coeficiente de calibração que converte a grandeza densidade óptica líquida (DOL) para dose absorvida no ar (D_{ar}).

As Tabelas 13 e 14 apresentam os resultados obtidos dos valores de DOL e dos coeficientes de calibração em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm .

TABELA 13. Densidade óptica líquida obtidos em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm .

Dose absorvida (Gy)	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	^{85}Kr	^{147}Pm
	DOL	DOL	DOL
0,1	0,013 ± 0,006	0,013 ± 0,007	0,015 ± 0,016
0,2	-	-	0,019 ± 0,017
0,3	-	-	0,029 ± 0,018
0,5	0,057 ± 0,006	0,050 ± 0,006	0,035 ± 0,019
1,0	0,094 ± 0,006	0,083 ± 0,006	0,056 ± 0,021
2,0	0,154 ± 0,006	0,128 ± 0,007	-
3,0	0,206 ± 0,007	0,161 ± 0,007	-
4,0	0,251 ± 0,007	0,190 ± 0,007	-
5,0	0,292 ± 0,007	-	-

TABELA 14. Coeficientes de calibração obtidos em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm .

Dose absorvida (Gy)	$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	^{85}Kr	^{147}Pm
	F_D (Gy/u.adm.)	F_D (Gy/u.adm.)	F_D (Gy/u.adm.)
0,1	7,692 ± 4,733	7,692 ± 5,269	6,667 ± 6,193
0,2	-	-	10,526 ± 6,897
0,3	-	-	10,345 ± 4,459
0,5	8,772 ± 1,106	10,000 ± 1,492	14,286 ± 4,892
1,0	10,638 ± 0,764	12,048 ± 1,055	17,857 ± 3,774
2,0	12,987 ± 0,549	15,625 ± 0,876	-
3,0	14,563 ± 0,506	18,634 ± 0,843	-
4,0	15,936 ± 0,463	21,053 ± 0,826	-
5,0	17,123 ± 0,433	-	-

A tabela mostra os valores de DOL e dos coeficientes de calibração F_D . As incertezas das DOL foram determinadas a partir da dispersão das medições nas cinco regiões de interesse (ROI), desvio padrão das áreas ROI, incerteza tipo A. As incertezas expandidas apresentam fator de abrangência $k = 2$, para os três campos de radiação beta, para um nível de confiança de aproximadamente 95%. Os coeficientes de calibração foram utilizados para a determinação da dose absorvida no ar das amostras de filme EBT utilizadas no ensaio laboratorial entre o LCD/CDTN e o LCI/IPEN.

4.6. Estudo da estabilidade do filme radiocrômico EBT em campos de radiação beta

Os resultados do estudo da estabilidade do filme radiocrômico EBT em termos de dose absorvida no ar nas condições de calibração estabelecidas no BSS2 são apresentados nas Figuras 50, 51 e 52. Cada amostra de filme EBT foi irradiada em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm a um valor de dose absorvida de 0,1 Gy, de modo a determinar o comportamento da densidade óptica líquida (DOL) em função dos campos de radiação.

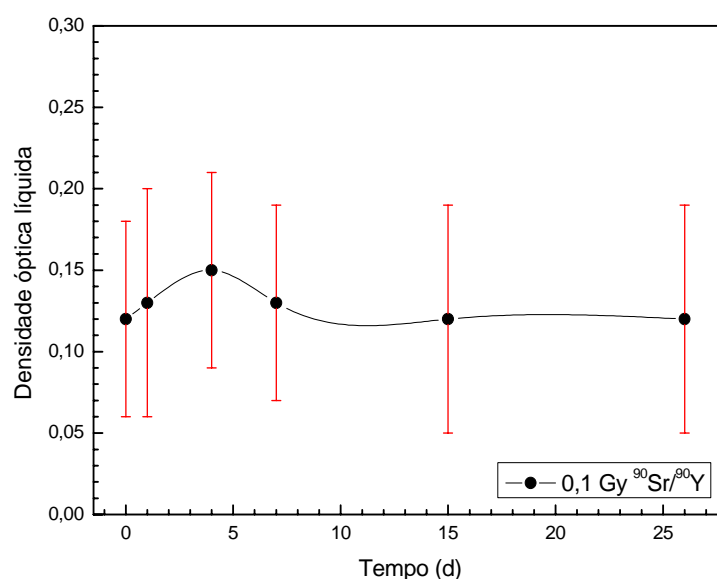


FIGURA 50. Curva de estabilidade da amostra de filme EBT irradiada com 0,1 Gy de dose absorvida em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e digitalizada com o *scanner Microtek*.

O valor da DOL da curva de estabilidade obtida em campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ (Figura 50), imediatamente após a irradiação foi de 0,012; 4 dias após a irradiação o valor da DOL foi aumentando até atingir o valor máximo de 0,015. Uma vez atingido o valor máximo, a DOL começou diminuir novamente, na figura nota-se que aproximadamente 15 dias após a irradiação, o valor da DOL atinge novamente o valor de 0,012 permanecendo constante durante os próximos dias.

Pode-se observar o mesmo comportamento nas outras duas curvas de estabilidade das amostras irradiadas nos campos de radiação beta de ^{85}Kr e ^{147}Pm (Figuras 51 e 52).

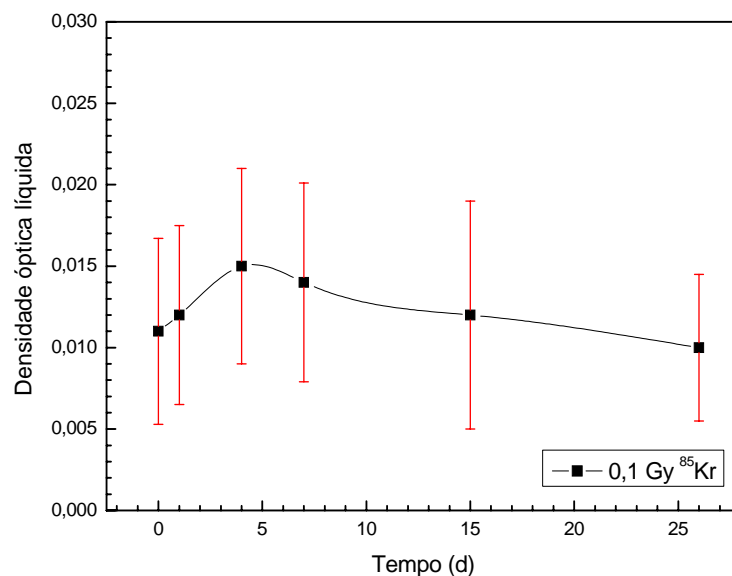


FIGURA 51. Curva de estabilidade da amostra de filme EBT irradiada com 0,1 Gy de dose absorvida em campos de radiação beta de ^{85}Kr e digitalizada com o *scanner Microtek*.

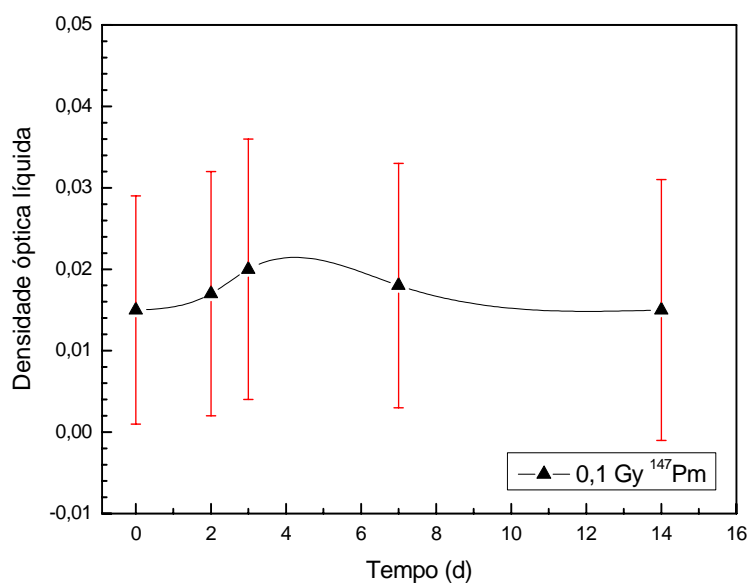


FIGURA 52. Curva de estabilidade da amostra de filme EBT irradiada com 0,1 Gy de dose absorvida em campos de radiação beta de ^{147}Pm e digitalizada com o *scanner Microtek*.

Para a curva de estabilidade obtida em campos de ^{85}Kr , apresentado na Figura 51, o valor de DOL obtida imediatamente após a irradiação foi de 0,011, aumentando até atingir o valor máximo de 0,015, 5 dias após a irradiação. Uma vez atingido o valor de 0,015, a DOL começou diminuir novamente, na figura nota-se que aproximadamente 20 dias após da

irradiação, o valor da DOL é 0,011, e continuou diminuindo pelos próximos 5 dias até atingir o valor de 0,010.

Na Figura 52, o valor da DOL da amostra de filme EBT em campos de ^{147}Pm , aumentou de 0,015 até o valor máximo de 0,020, quando o filme foi analisado três dias após a irradiação. Uma vez atingido esse valor máximo a DOL começou diminuir novamente até atingir o valor de 0,015.

As variações de DOL em função do tempo determinados neste estudo foram de 0,003; 0,004 e 0,005 para as amostras irradiadas nos campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , respectivamente.

4.7. Mapeamento do campo e determinação da uniformidade dos campos de radiação beta do BSS2

O mapeamento do campo foi realizado para os campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm nas condições de calibração estabelecidas no BSS2. As Figuras 53 e 54 apresentam os resultados dos perfis de dose horizontal e vertical do campo de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$.

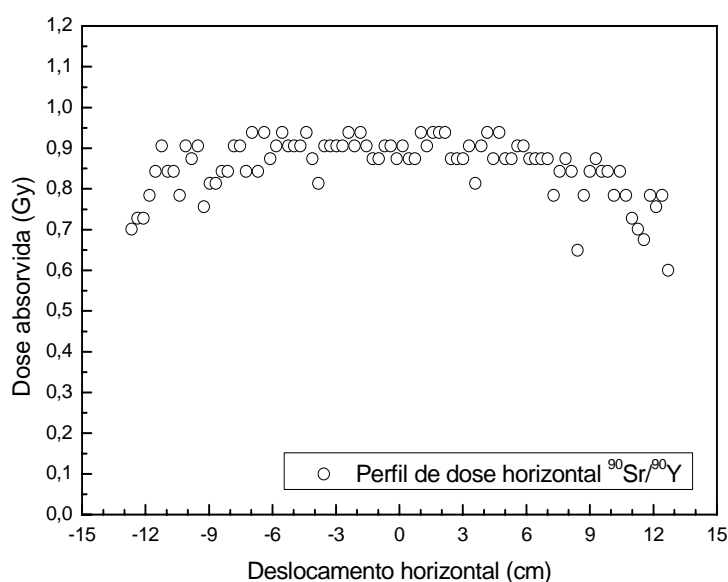


FIGURA 53. Perfil de dose horizontal do campo de radiação de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, irradiado com dose absorvida no ar de 0,8 Gy.

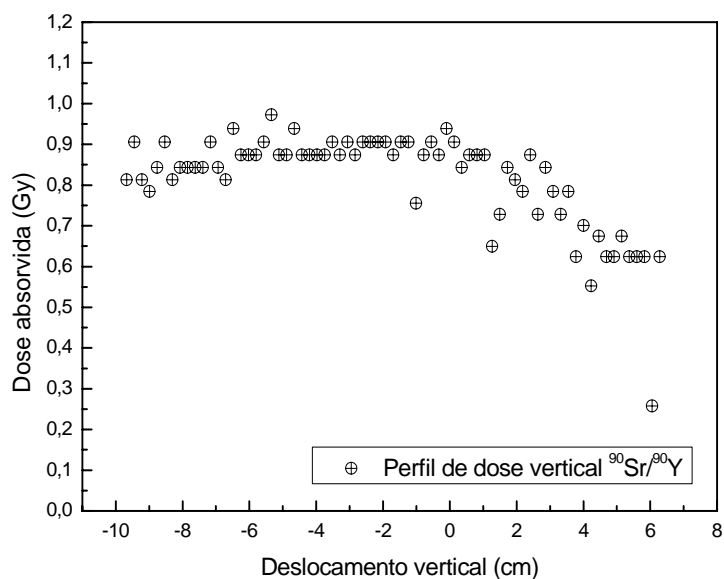


FIGURA 54. Perfil de dose vertical do campo de radiação de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, irradiado com dose absorvida no ar de 0,8 Gy.

A partir dos resultados obtidos dos perfis de dose horizontal e vertical e com ajuda do programa *Origin*, determinaram-se os tamanhos de campo de aproximadamente $(24,2 \pm 0,1)$ cm e $(15,8 \pm 0,1)$ cm, respectivamente. As distribuições das áreas de isodoses, em termos de dose absorvida no ar, também foram determinadas (Figura 55).

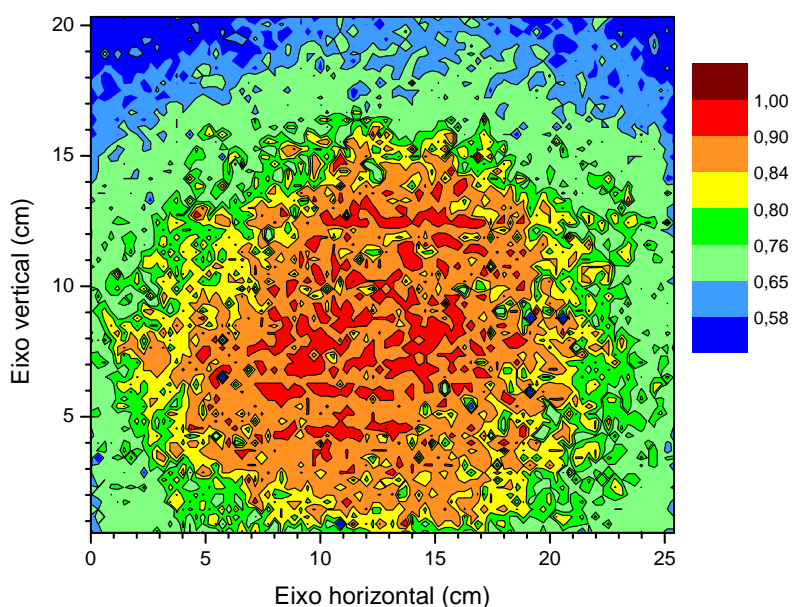


FIGURA 55. Áreas de isodoses do campo de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, irradiado com dose absorvida de 0,8 Gy.

Na Figura 55 pode-se observar que o centro do campo de radiação está deslocado em relação ao centro geométrico do filme radiocrômico. Este deslocamento foi determinado a partir da análise realizada da distribuição das áreas de isodoses, obtendo-se os valores de $(2,4 \pm 0,1)$ cm e de $(0,3 \pm 0,1)$ cm para baixo e para esquerda, respectivamente. A distribuição das áreas de isodoses em três dimensões (3D) também foi determinada em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, para o valor de dose absorvida de 0,8 Gy (Figura 56).

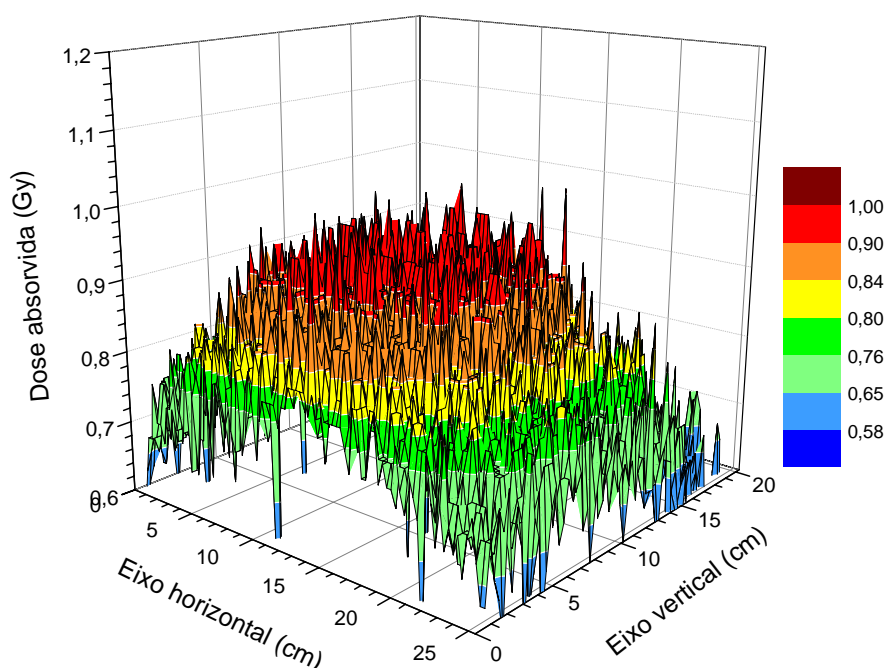


FIGURA 56. Distribuição das áreas de isodoses em 3D do campo de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, determinado para o valor de dose absorvida no ar de 0,8 Gy.

Nas Figuras 55 e 56, a uniformidade do campo de radiação da fonte $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ é determinada a partir dos valores de dose absorvida no ar de 0,76 até 0,84 Gy; conforme a definição dada pela ISO 6980, a variação da dose absorvida no ar para campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ não pode ser maior que $\pm 5\%$.

Os resultados dos perfis de dose horizontal e vertical para o campo de radiação beta de ^{85}Kr são apresentados nas Figuras 57 e 58, respectivamente. Analogamente à análise realizada para com a fonte de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, os perfis de dose horizontal e vertical para o campo de radiação de ^{85}Kr também foram analisados e determinaram-se as dimensões dos tamanhos de campo de radiação, de aproximadamente $(20,2 \pm 0,1)$ cm e $(20,3 \pm 0,1)$ cm, respectivamente.

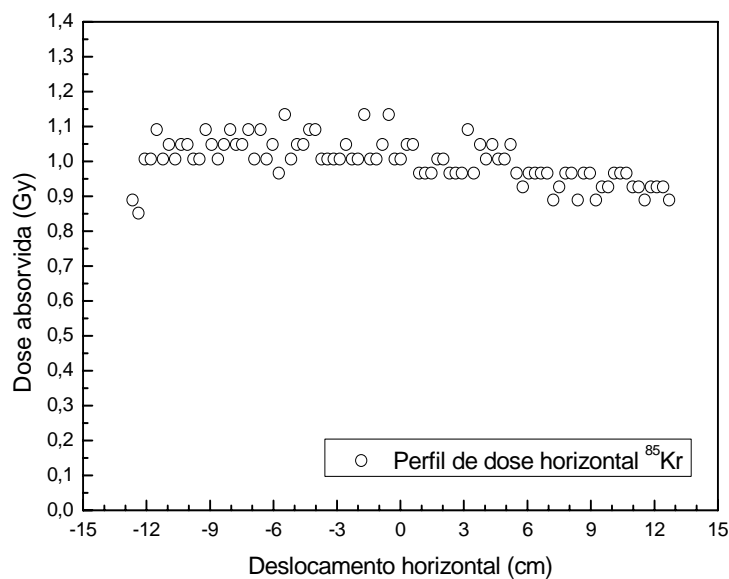


FIGURA 57. Perfil de dose horizontal do campo de radiação de ^{85}Kr , irradiado com dose absorvida no ar de 0,8 Gy.

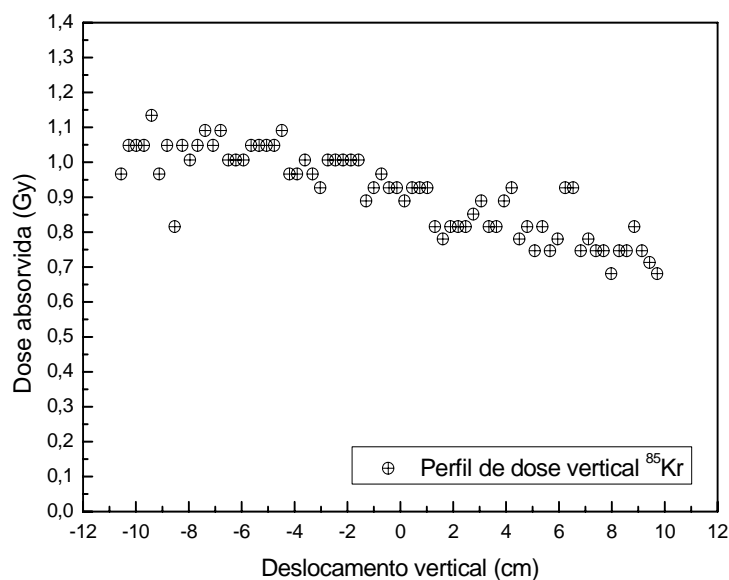


FIGURA 58. Perfil de dose vertical do campo de radiação de ^{85}Kr , irradiado com dose absorvida no ar de 0,8 Gy.

As Figuras 59 e 60 apresentam as distribuições das áreas de isodoses em duas dimensões (2D) e em 3D, respectivamente, em termos de dose absorvida no ar, da lâmina de filme EBT irradiada com 0,8 Gy em campos de radiação de ^{85}Kr .

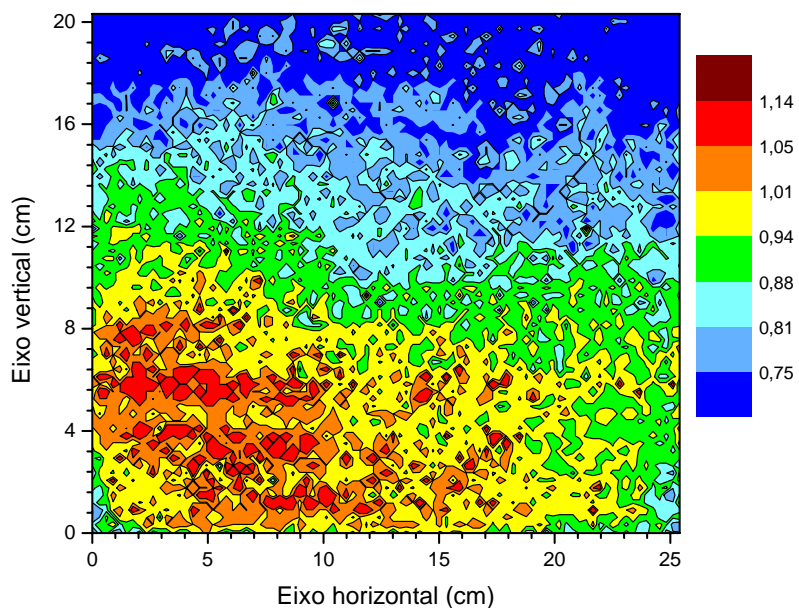


FIGURA 59. Áreas de isodoses do campo de radiação beta de ^{85}Kr , irradiado com dose absorvida de 0,8 Gy.

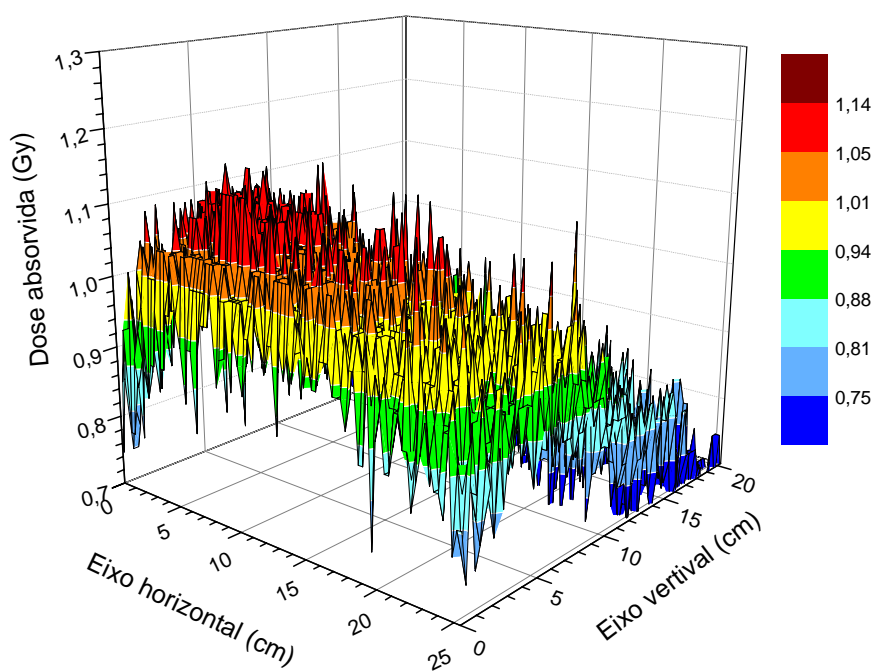


FIGURA 60. Distribuição das áreas de isodoses em 3D do campo de radiação beta de ^{85}Kr , determinado para o valor de dose absorvida no ar de 0,8 Gy.

Na Figura 59, o centro do campo de radiação está deslocado em relação ao centro geométrico do filme radiocrômico. A partir da análise da distribuição das áreas de isodoses realizada com ajuda do programa *Origin*, determinaram-se os deslocamentos de

($7,2 \pm 0,1$) cm para baixo e de ($4,9 \pm 0,1$) cm para esquerda. Nas Figuras 59 e 60, a uniformidade do campo de radiação da fonte ^{85}Kr é determinada a partir dos valores de dose absorvida no ar de 0,76 até 0,84 Gy; conforme a definição dada pela ISO 6980, a variação da dose absorvida no ar para campos de radiação beta de ^{85}Kr não pode ser maior que $\pm 5\%$.

As Figuras 61 e 62, apresentam os resultados dos perfis de dose horizontal e vertical, respectivamente, obtidos em campos de radiação beta de ^{147}Pm . A partir da análise dos perfis de dose horizontal e vertical realizada com ajuda do programa *Origin*, determinaram-se as dimensões dos tamanhos de campo de radiação de aproximadamente, ($23,9 \pm 0,1$) cm e ($19,7 \pm 0,1$) cm, respectivamente.

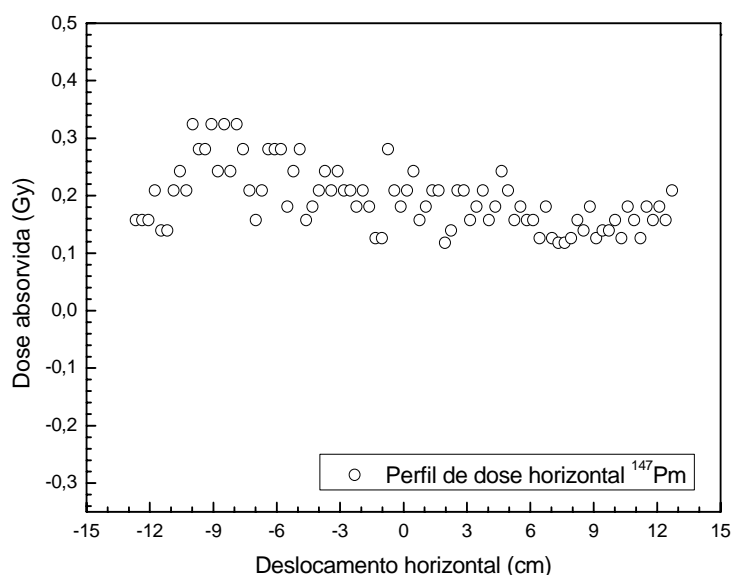


FIGURA 61. Perfil de dose horizontal do campo de radiação de ^{147}Pm , irradiado com dose absorvida no ar de 0,2 Gy.

Nas Figuras 61 e 62, pode-se observar que os valores de dose absorvida apresentam uma variação para cima e para baixo em relação ao valor de dose absorvida com que foi irradiado, 0,2 Gy. Esta dispersão dos valores de dose se deve provavelmente a dois fatores: ao elevado grau de incerteza dado pelos valores de densidade óptica líquida quando os filmes radiocrômicos foram caracterizados, isto é, na determinação da curva de calibração, e a subtração realizada considerando a radiação de fundo.

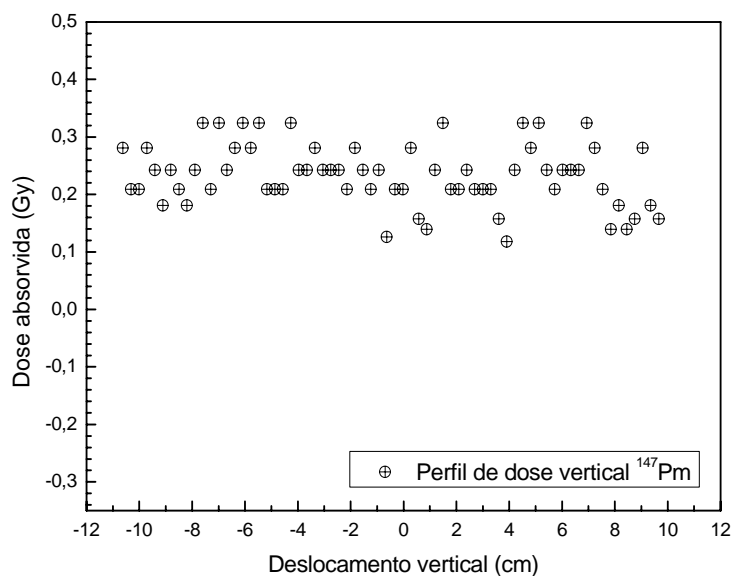


FIGURA 62. Perfil de dose vertical do campo de radiação de ^{147}Pm , irradiado com dose absorvida no ar de 0,2 Gy.

As Figuras 63 e 64 apresentam o resultado das distribuições das áreas de isodoses em 2D e em 3D para o campo de radiação beta da fonte ^{147}Pm . Observa-se que a distribuição das áreas de isodoses não apresenta uma forma definida, isto é devido provavelmente aos fatores mencionados no parágrafo anterior.

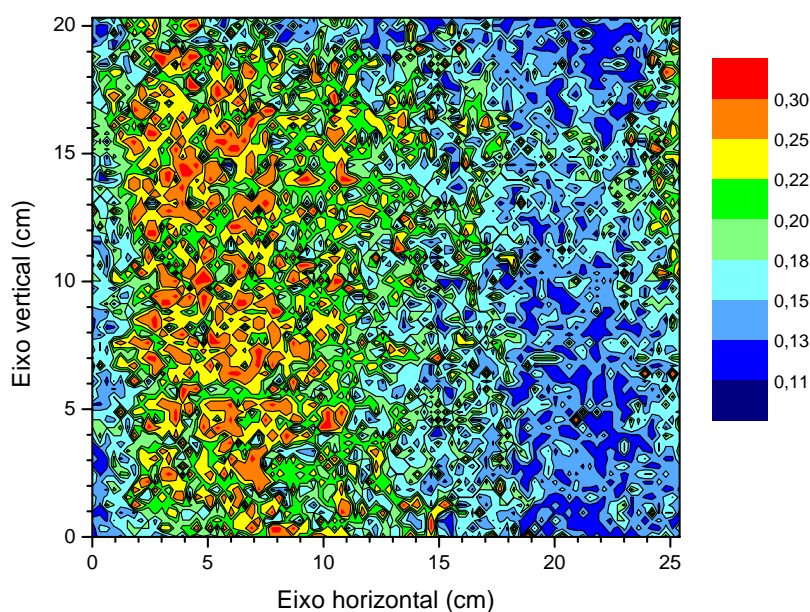


FIGURA 63. Áreas de isodoses do campo de radiação beta de ^{147}Pm , irradiado com dose absorvida de 0,2 Gy.

Na Figura 63, também se observa que o centro do campo de radiação está deslocado em relação ao centro geométrico do filme radiocrômico. A partir da análise da distribuição das áreas de isodoses realizada com ajuda do programa *Origin*, foram determinados os deslocamentos de $(0,8 \pm 0,1)$ cm para baixo e $(6,7 \pm 0,1)$ cm para esquerda.

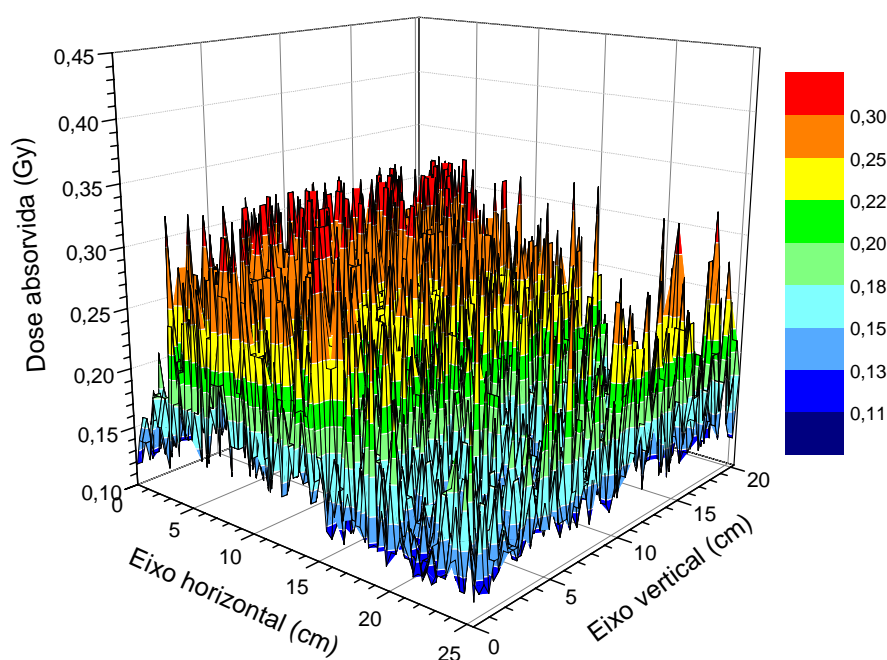


FIGURA 64. Distribuição das áreas de isodoses em 3D do campo de radiação beta de ^{147}Pm , determinado para o valor de dose absorvida no ar de 0,2 Gy.

A uniformidade do campo de radiação dada nas Figuras 63 e 64 são determinadas pelas faixas de cor verde, para os valores de dose absorvida no ar de 0,18 até 0,22 Gy; conforme a definição dada pela ISO 6980, a variação da dose absorvida no ar para campos de radiação beta de ^{147}Pm não pode ser maior que $\pm 10\%$.

4.8. Coerência metrológica entre os sistemas BSS2 do LCD/CDTN e do LCI/IPEN

A coerência metrológica entre os sistemas BSS2 do LCD/CDTN e do LCI/IPEN foi verificada por meio da comparação entre os coeficientes de calibração, em termos razão da taxa de dose absorvida no ar pelo coeficiente angular da câmara PTW 23391, em campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm .

A coerência metrológica entre os sistemas BSS2 do LCD/CDTN e do LCI/IPEN também foi verificada com filmes radiocrômicos por meio da determinação da grandeza dose absorvida e da uniformidade dos campos de cada uma das fontes padrões de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm .

Os resultados dos valores da corrente de fuga da câmara de extrapolação PTW 23391, realizados no LCI/IPEN, apresentaram valores de $6,9 \times 10^{-14}$ A e $-4,2 \times 10^{-14}$ A, para as polaridades positiva e negativa, respectivamente, que estavam fora dos limites estabelecidos (item 4.1). A estabilidade da câmara PTW 23391 foi testada a partir do teste de repetitividade, os valores da corrente de ionização para ambas as polaridades foram de $0,095 \times 10^{-11}$ A e de $-0,012 \times 10^{-11}$ A (desvio padrão), respectivamente.

4.8.1. Comparação dos coeficientes de calibração com a câmara de extrapolação

Os resultados das curvas de extrapolação da câmara PTW 23391 obtidas nos campos de radiação do $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm do BSS2/IPEN são apresentados na Figura 65, para profundidades de 1,4; 2,4; 3,4 e 4,4 mm. As curvas de extrapolação apresentaram comportamento linear, onde, os coeficientes de correlação obtidos foram de 0,9996 para as fontes de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr , e de 0,9267 para a de ^{147}Pm .

A Tabela 15 apresenta as características das fontes do sistema BSS2 do LCI/IPEN, que têm como referências os certificados emitidos pelo PTB.

Na Tabela 16 são apresentados os resultados dos coeficientes angulares, obtidos na comparação laboratorial entre os sistemas BSS2 do LCD/CDTN e do LCI/IPEN para os campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm .

TABELA 15. Características das fontes de radiação beta do sistema padrão secundário beta, BSS2, do LCI/IPEN.

Características	Fontes padrões do BSS2						
	¹⁴⁷ Pm	⁸⁵ Kr	⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y				
Energia máxima do espectro (Mev)	0,225	0,687	2,284				
Número de série	MR 427	MH 987	MR 432				
Atividade nominal (MBq)	3700	3700	460				
Distância de calibração (cm)	20	30	50	30	30	20	11
Filtro homogeneizador	sim	sim	não	não	sim	não	não
Data de referência	19/11/2004	30/11/2004	21/12/2004	12/01/2005	08/12/2004	21/01/2005	10/02/2005
Taxa de dose absorvida no tecido a 7 mg.cm ⁻² no ponto de calibração (μGy.s ⁻¹)	2,35 ± 0,05	37,9 ± 0,5	5,82 ± 0,08	16,46 ± 0,22	10,56 ± 0,14	37,1 ± 0,5	119,5 ± 1,5
Taxa de dose absorvida no ar a 7 mg.cm ⁻² no ponto de calibração (μGy.s ⁻¹)	2,64 ± 0,06	44,5 ± 0,6	6,46 ± 0,09	18,27 ± 0,24	11,73 ± 0,16	41,2 ± 0,5	132,6 ± 1,7

Fonte: AEA Technology QSA GmbH.

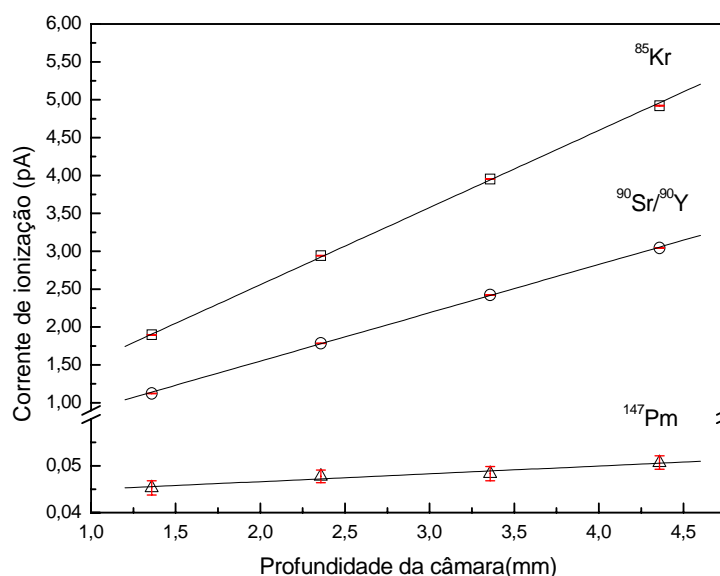


FIGURA 65. Curvas de extrapolação da câmara PTW em campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , no LCI/IPEN.

Na Figura 65, os valores de corrente de ionização para o campo de ^{147}Pm variaram na faixa de 0,045 a 0,051 pA, aproximadamente da ordem do valor médio encontrado da corrente de fuga, $5,593 \times 10^{-14}$ A, o que impossibilitou a realização de qualquer tipo de comparação das grandezas envolvidas neste tipo de campo de radiação.

TABELA 16. Resultados dos coeficientes angulares determinadas com a câmara de extrapolação PTW 23391 no LCI/IPEN.

Fonte	Distância de calibração (cm)	Filtro homogeneizador	Coefficiente angular ($10^{-13} \text{ A.mm}^{-1}$)
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	30	Não	$6,399 \pm 0,022$
^{85}Kr	30	Sim	$10,082 \pm 0,025$

Na Tabela 16, as incertezas dos coeficientes angulares foram determinadas pelo desvio padrão das medidas, incertezas tipo A, com fator de abrangência $k = 2$, para um nível de confiança de aproximadamente 95%. Os valores das incertezas (Tabela 16) apresentaram valores de 0,3% e 0,2% para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr , respectivamente.

A Tabela 17 apresenta os valores das taxas de dose absorvida no ar dadas pelo sistema BSS2 do LCI/IPEN e dos resultados dos coeficientes de calibração para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr , determinados na comparação laboratorial.

TABELA 17. Coeficientes de calibração da câmara de extrapolação PTW 23391 nos campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm do BSS2 do LCI/IPEN.

Fonte	Distância de calibração (cm)	Taxa de dose absorvida no ar	Coeficiente de calibração
		($\mu\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}$)	($\mu\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}^{-1}$)
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	30	$14,61 \pm 0,04$	$(22,84 \pm 0,09) \times 10^{+12}$
^{85}Kr	30	$32,34 \pm 0,04$	$(32,08 \pm 0,09) \times 10^{+12}$

A diferença dos valores das taxas de dose absorvida no ar em relação às taxas de dose absorvida no ar dadas pelo certificado (Tabela 15) foram de -20,0% e -27,4% para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr , respectivamente.

A comparação entre os coeficientes de calibração da câmara de extrapolação PTW 23391 dos campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm do BSS2 do LCI/IPEN em relação aos campos do LCD/CDTN é apresentada na Tabela 18.

TABELA 18. Comparação entre os coeficientes de calibração da câmara de extrapolação PTW 23391 nos campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm do BSS2 do LCI/IPEN.

Fonte	Distância de calibração (cm)	Coeficiente de calibração ($\mu\text{Gy}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{mm}\cdot\text{A}^{-1}$)		Diferença (%)
		IPEN	CDTN	
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	30	$(22,84 \pm 0,09) \times 10^{+12}$	$(23,14 \pm 0,15) \times 10^{+12}$	-1,3
^{85}Kr	30	$(32,08 \pm 0,09) \times 10^{+12}$	$(31,06 \pm 0,13) \times 10^{+12}$	3,3

A comparação entre as medidas realizadas mostrou que os valores dos coeficientes de calibração apresentaram diferenças de -1,3% e 3,3% para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr , respectivamente. As incertezas expandidas determinadas para cada um dos valores dos coeficientes de calibração, em termos da razão da taxa de dose absorvida no ar pelo coeficiente angular da câmara PTW 23391, apresentados na Tabela 18, possuem fatores de

abrangência $k = 2,07$ e $2,18$, respectivamente, para um nível de confiança de aproximadamente 95%.

4.8.2. Comparação de dose absorvida no ar com filmes radiocrômicos

A Tabela 19 apresenta os resultados da dose absorvida no ar obtidos a partir das irradiações de amostras de filmes radiocrômicos em campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , no BSS2 do LCD/CDTN e do LCI/IPEN. As incertezas expandidas dos valores de dose absorvida no ar possuem fator de abrangência $k = 2$, para um nível de confiança de aproximadamente 95%. Os coeficientes de calibração dos filmes radiocrômicos para os valores de dose absorvida de 0,3 Gy para as fontes de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr e de 0,15 Gy para a de ^{147}Pm , foram determinados utilizando o método de interpolação a partir do ajuste dos valores de densidade óptica líquida em função da dose absorvida. O modelo utilizado para este ajuste foi do tipo exponencial apresentando coeficientes de correlação de 0,999 para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr e de 0,978 para o de ^{147}Pm .

TABELA 19. Comparação das doses absorvidas no ar obtidas com filmes radiocrômicos irradiados no BSS2 do LCI/CDTN e do LCI/IPEN em campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm .

Fonte	Distância de calibração (cm)	Dose absorvida no ar (Gy)	Dose absorvida (Gy)		Diferença (%)
			IPEN	CDTN	
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	30	$0,10 \pm 0,04$	$0,100 \pm 0,019$	$0,100 \pm 0,019$	0,0
		$0,30 \pm 0,04$	$0,353 \pm 0,024$	$0,344 \pm 0,023$	2,6
^{85}Kr	30	$0,10 \pm 0,04$	$0,077 \pm 0,018$	$0,085 \pm 0,019$	-9,1
		$0,30 \pm 0,04$	$0,372 \pm 0,031$	$0,372 \pm 0,031$	0,0
^{147}Pm	20	$0,15 \pm 0,06$	$0,117 \pm 0,024$	$0,250 \pm 0,046$	-53,3

Os resultados mostram que as incertezas dos valores das doses absorvidas, para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr , foram no máximo de 23% para a dose de 0,1 Gy e de 7% para 0,3 Gy. As diferenças dos valores de dose absorvida determinados no LCI/IPEN em relação aos valores obtidos no LCD/CDTN foram, no máximo, de 3% e de -9% para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr , respectivamente. As pequenas diferenças encontradas sugerem que os valores

das incertezas podem estar superestimados; adicionalmente, tais diferenças podem ter sido causadas pelo não alinhamento geométrico dos campos de radiação.

Para o campo da fonte de ^{147}Pm , pode-se observar que o valor da incerteza esteve em torno de 20% e que a diferença entre os valores de dose absorvida foi de -53%. A alta diferença foi causada pelos pequenos valores de densidade óptica do filme radiocrômico, que aumentaram as incertezas no procedimento de medida.

Na Tabela 20 são apresentadas as diferenças entre os valores de dose absorvida obtidos experimentalmente a partir das amostras de filmes EBT, irradiadas em campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , dos sistemas BSS2 do LCD/CDTN e do LCI/IPEN.

TABELA 20. Diferença entre os valores de dose absorvida avaliados em relação aos valores de dose absorvida nominais, obtidos a partir dos filmes radiocrômicos irradiados no BSS2 do LCI/CDTN e do LCI/IPEN em campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm .

Fonte	Distância de calibração (cm)	Dose absorvida no ar (Gy)	Dose absorvida (Gy)	Diferença	Dose absorvida (Gy)	Diferença
			IPEN	(%)	CDTN	(%)
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	30	$0,10 \pm 0,04$	$0,100 \pm 0,019$	0,0	$0,100 \pm 0,019$	0,0
		$0,30 \pm 0,04$	$0,353 \pm 0,024$	17,7	$0,344 \pm 0,023$	14,7
^{85}Kr	30	$0,10 \pm 0,04$	$0,077 \pm 0,018$	-23,0	$0,085 \pm 0,019$	-15,0
		$0,30 \pm 0,04$	$0,372 \pm 0,031$	24,0	$0,372 \pm 0,031$	24,0
^{147}Pm	20	$0,15 \pm 0,06$	$0,117 \pm 0,024$	-22,0	$0,250 \pm 0,046$	66,7

A razão dos valores de dose absorvida dos filmes radiocrômicos avaliados no LCD/CDTN e no LCI/IPEN pelos valores nominais de dose absorvida dados pelos sistemas BSS2 estão apresentados na Figura 66.

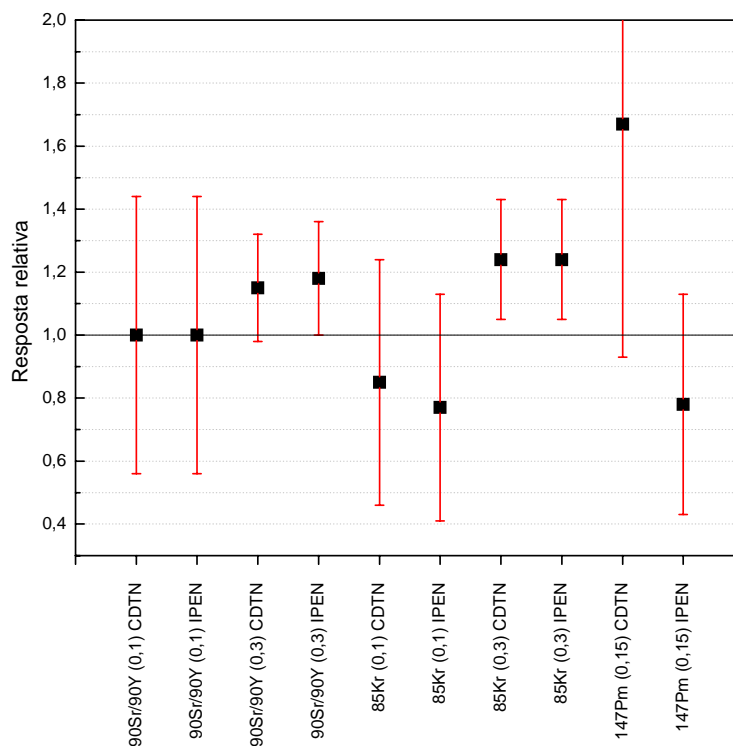


FIGURA 66. Razão dos valores de dose absorvida dos filmes radiocrômicos avaliados no LCD/CDTN e no LCI/IPEN pelos valores de dose absorvida nominais dadas pelos sistemas BSS2 irradiados em campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm .

No caso dos filmes irradiados com dose absorvida de 0,1 e 0,3 Gy para o campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr , os sistemas apresentaram diferenças de até 24%. Para o caso do campo de ^{147}Pm , os altos valores das incertezas impossibilitaram a comparação.

4.8.3. Mapeamento do campo e determinação da uniformidade do campo de radiação

O mapeamento do campo foi realizado para os campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm nas condições de calibração estabelecidas no BSS2. As Figuras 67 e 68 apresentam os resultados dos perfis de dose horizontal e vertical, respectivamente, para o campo de radiação de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$.

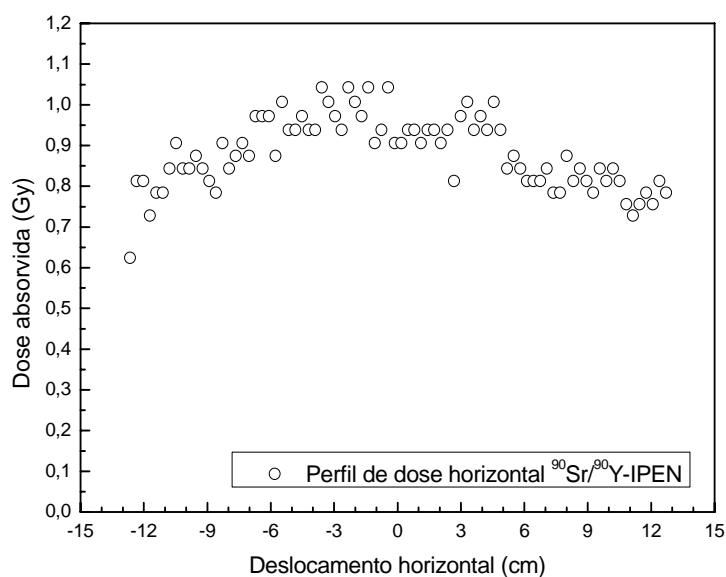


FIGURA 67. Perfil de dose horizontal do campo de radiação de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, irradiado com dose absorvida no ar de 0,8 Gy.

Os resultados obtidos dos perfis de dose horizontal e vertical permitiram determinar, a partir da análise realizada com o programa *Origin*, as dimensões do campo de radiação de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, sendo de aproximadamente $(21,9 \pm 0,1)$ cm e $(17,5 \pm 0,1)$ cm. As distribuições das áreas de isodoses em 2D e em 3D para o campo de radiação de ^{85}Kr , em termos de dose absorvida no ar, também foram determinadas (Figuras 69 e 70).

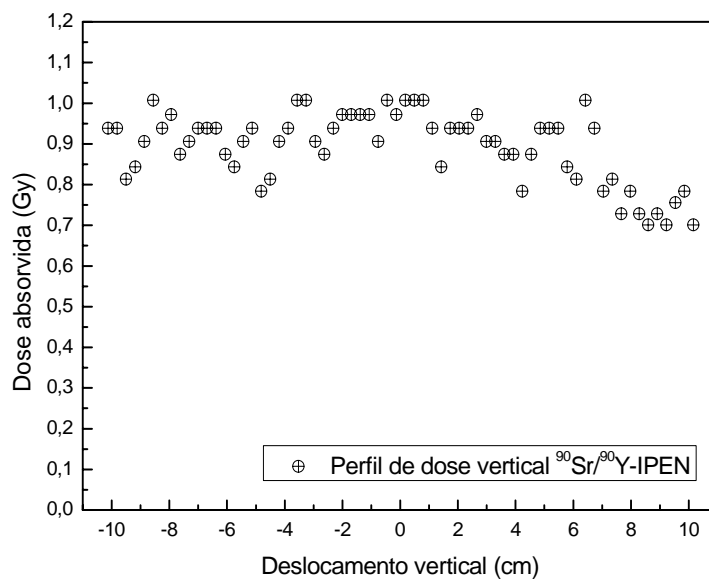


FIGURA 68. Perfil de dose vertical do campo de radiação de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, irradiado com dose absorvida no ar de 0,8 Gy.

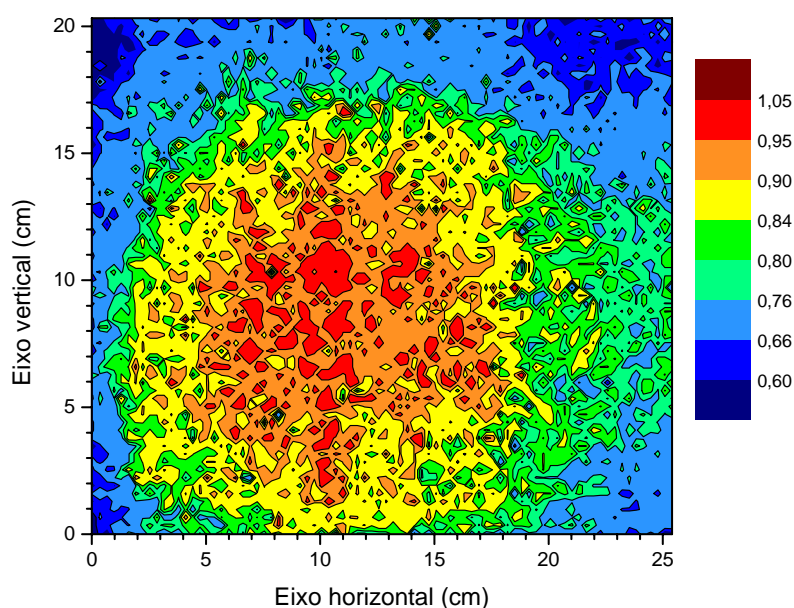


FIGURA 69. Áreas de isodoses do campo de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, irradiado com dose absorvida de 0,8 Gy.

Na figura 69, pode-se observar que o centro do campo de radiação está deslocado em relação ao centro geométrico do filme radiocrômico. Este deslocamento foi determinado a partir da análise da distribuição das áreas de isodoses realizada com o programa *Origin*, obtendo-se os valores de $(2,0 \pm 0,1)$ cm para baixo e $(1,8 \pm 0,1)$ cm para esquerda.

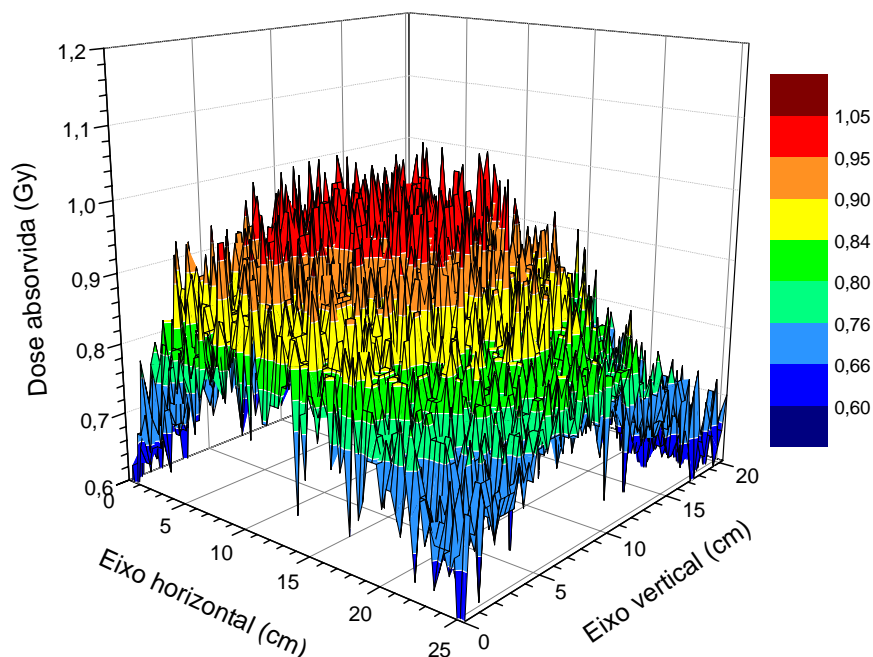


FIGURA 70. Distribuição das áreas de isodose em 3D do campo de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, determinado para o valor de dose absorvida no ar de 0,8 Gy.

Nas Figuras 69 e 70, a uniformidade do campo de radiação é determinada a partir dos valores de dose absorvida no ar de 0,76 até 0,84 Gy; conforme a definição dada pela ISO 6980, a variação da dose absorvida no ar para campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ não pode ser maior que $\pm 5\%$.

Os resultados dos perfis de dose horizontal e vertical para o campo de radiação beta de ^{85}Kr são apresentados nas Figuras 71 e 72, respectivamente. As dimensões do tamanho de campo de radiação foram determinadas a partir da análise realizada dos perfis de dose, sendo de aproximadamente, $(24,7 \pm 0,1)$ cm e $(20,32 \pm 0,1)$ cm.

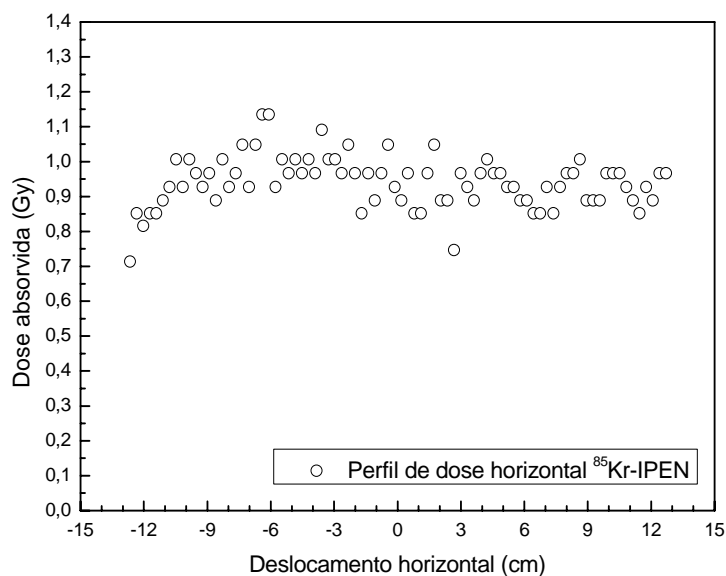


FIGURA 71. Perfil de dose horizontal do campo de radiação de ^{85}Kr , irradiado com dose absorvida no ar de 0,8 Gy.

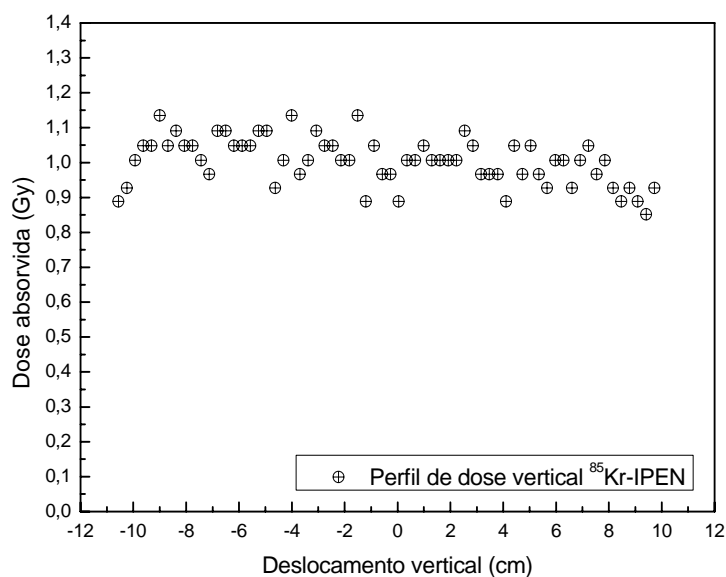


FIGURA 72. Perfil de dose vertical do campo de radiação de ^{85}Kr , irradiado com dose absorvida no ar de 0,8 Gy.

As Figuras 73 e 74 apresentam as distribuições das áreas de isodoses em 2D e em 3D para a fonte ^{85}Kr obtidas em termos de dose absorvida no ar. Na figura, o centro do campo de radiação está deslocado $(2,1 \pm 0,1)$ cm para baixo e $(6,6 \pm 0,1)$ cm para esquerda, em relação ao centro geométrico do filme radiocrômico.

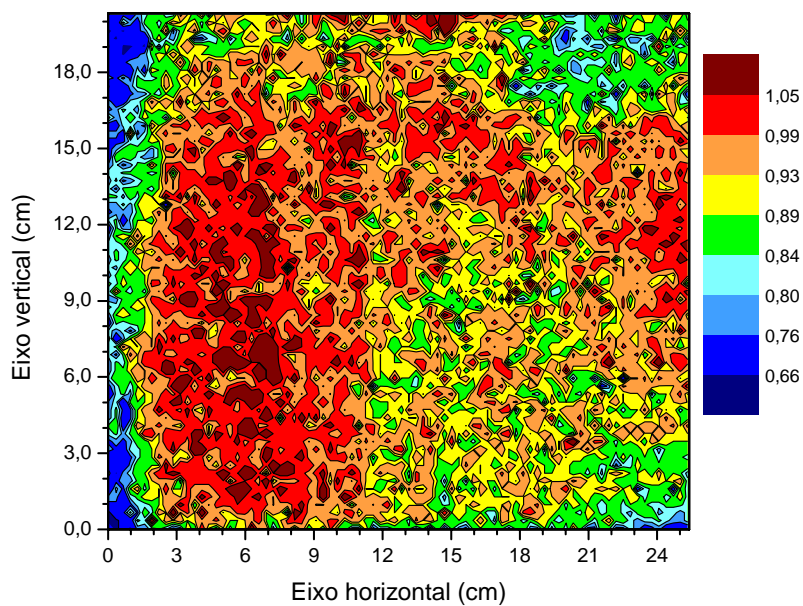


FIGURA 73. Áreas de isodoses do campo de radiação beta de ^{85}Kr , irradiado com dose absorvida de 0,8 Gy.

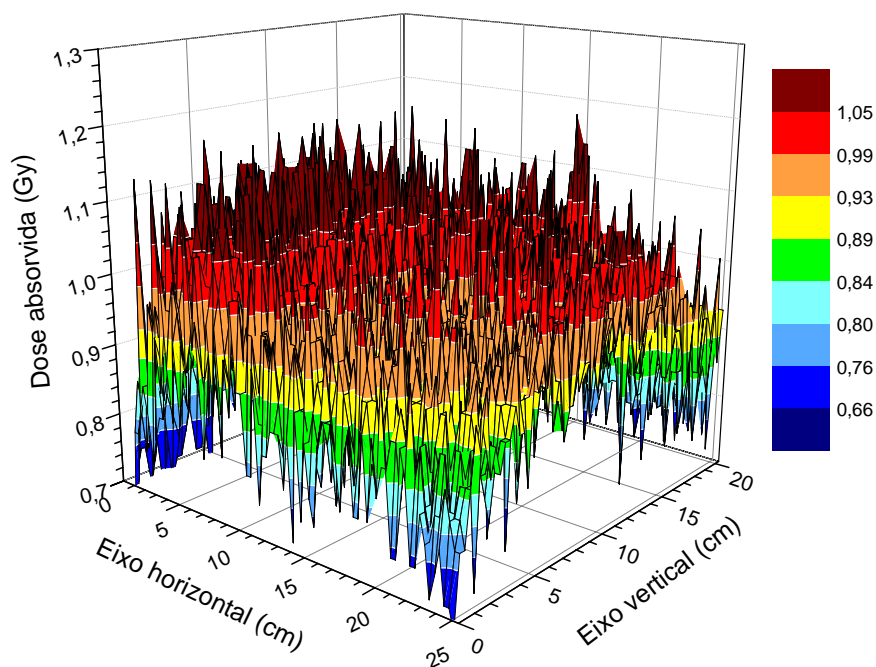


FIGURA 74. Distribuição das áreas de isodoses em 3D do campo de radiação beta de ^{85}Kr , determinado para o valor de dose absorvida no ar de 0,8 Gy.

Nas Figuras 73 e 74, podem-se observar, também, que a uniformidade do campo de radiação da fonte ^{85}Kr é determinada a partir dos valores de dose absorvida no ar de 0,76 até

0,84 Gy, conforme a definição dada pela ISO 6980, a variação da dose absorvida no ar para campos de radiação beta de ^{85}Kr não pode ser maior que $\pm 5\%$.

Os resultados dos perfis de dose horizontal e vertical para o campo de radiação beta de ^{147}Pm são apresentados nas Figuras 75 e 76, respectivamente.

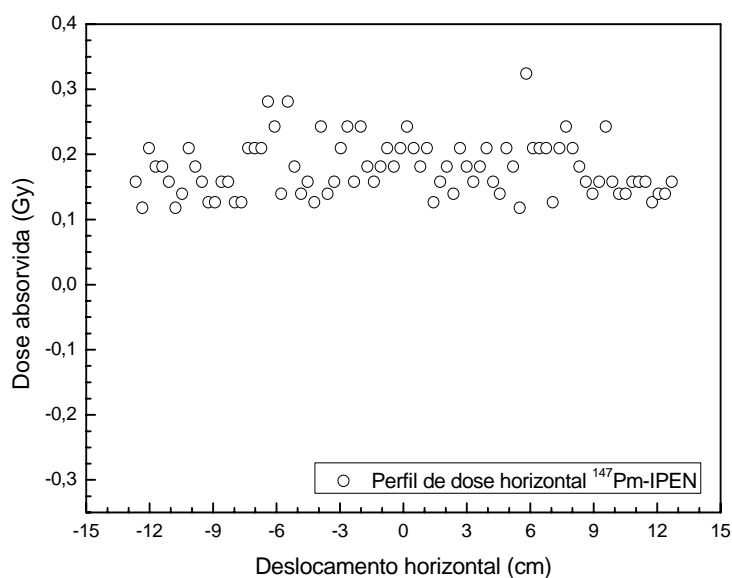


FIGURA 75. Perfil de dose horizontal do campo de radiação de ^{147}Pm , irradiado com dose absorvida no ar de 0,2 Gy.

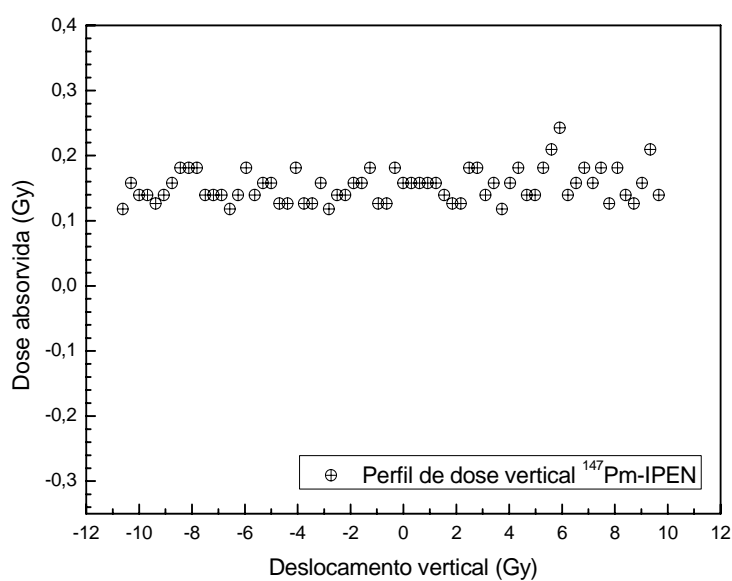


FIGURA 76. Perfil de dose vertical do campo de radiação de ^{147}Pm , irradiado com dose absorvida no ar de 0,2 Gy.

A partir da análise dos perfis de dose realizada com ajuda do programa *Origin*, determinaram-se as dimensões do campo de radiação, obtendo-se valores de aproximadamente $(20,35 \pm 0,1)$ cm e $(8,76 \pm 0,1)$ cm. Nas Figuras 75 e 76, pode-se observar que os valores de dose absorvida apresentam uma flutuação maior em relação ao valor de dose absorvida da irradiação, 0,2 Gy. Esta flutuação dos valores de dose absorvida, deve-se provavelmente a dois fatores: ao elevado grau de incerteza dado pelos valores de DOL quando os filmes radiocrômicos foram caracterizados, à determinação da curva de calibração, e à subtração realizada considerando a radiação de fundo.

As Figuras 77 e 78 apresentam os resultados das distribuições das áreas de isodoses em 2D e em 3D, para o campo de radiação beta da fonte ^{147}Pm .

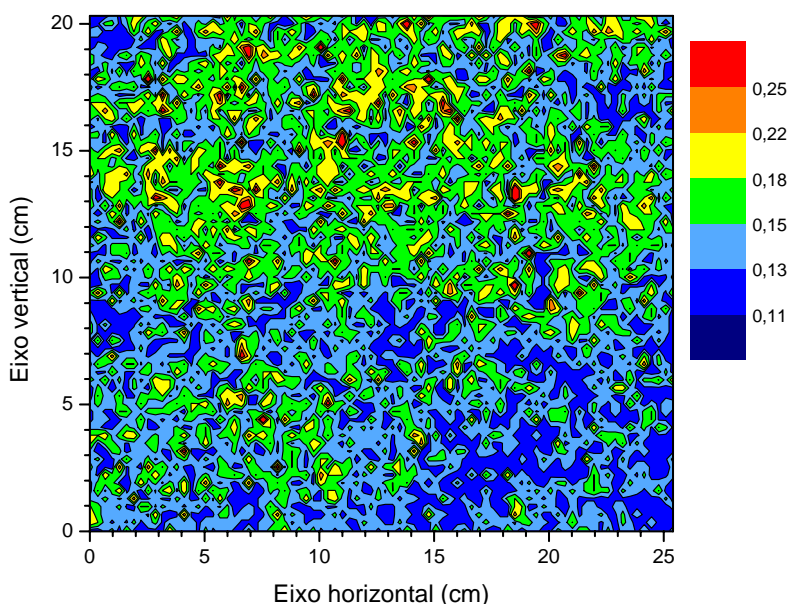


FIGURA 77. Áreas de isodoses do campo de radiação beta de ^{147}Pm , irradiado com dose absorvida de 0,2 Gy.

Na Figura 77, note-se que é difícil identificar o centro do campo de radiação da fonte de ^{147}Pm , devido a não apresentar uma forma bem definida, em relação aos casos dos campos de radiação das fontes de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr . Assim, devido a que o campo de radiação da fonte de ^{147}Pm apresentou esta anisotropia, não se pôde determinar nenhum valor de deslocamento.

Nas Figuras 77 e 78, a uniformidade do campo de radiação é determinada para os valores de dose absorvida no ar de 0,18 até 0,22 Gy, faixa de cor amarela; conforme a

definição dada pela ISO 6980, a variação da dose absorvida no ar para campos de radiação beta de ^{147}Pm não pode ser maior que $\pm 10\%$.

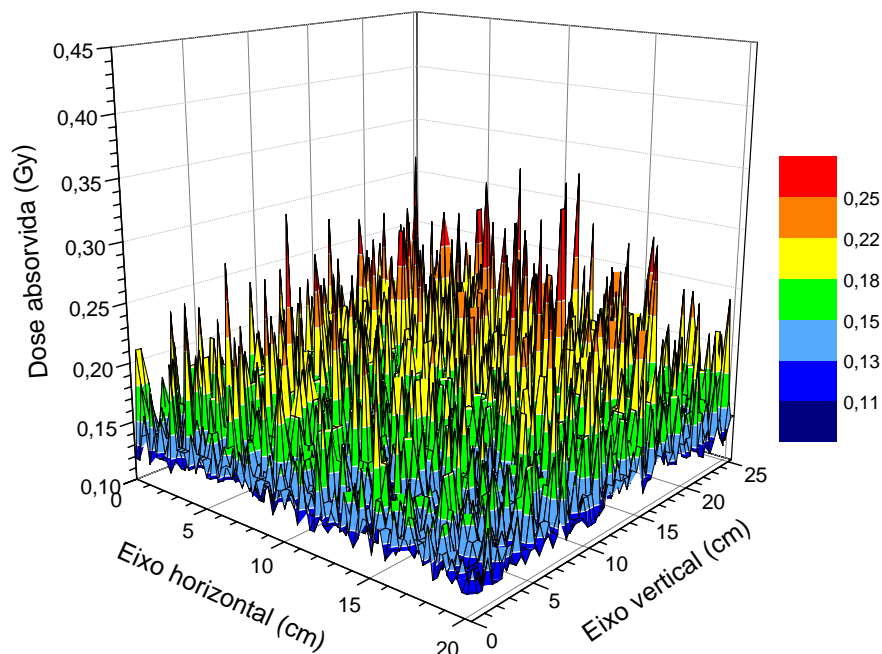


FIGURA 78. Distribuição das áreas de isodose em 3D do campo de radiação beta de ^{147}Pm , determinado para o valor de dose absorvida no ar de 0,2 Gy.

A Tabela 21 apresenta os resultados dos tamanhos de campo uniformes das fontes de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm obtidos na comparação laboratorial entre o LCDCDTN e o LCI IPEN.

TABELA 21. Valores dos tamanhos de campo uniformes das fontes $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , obtidos na comparação laboratorial entre o LCD/CDTN e o LCI/IPEN.

Fonte	Distância de calibração (cm)	Dose absorvida no ar (Gy)	CDTN	IPEN
			Tamanho de campo (cm)	Tamanho de campo (cm)
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	30	$0,80 \pm 0,04$	$15,8 \pm 0,1$	$17,5 \pm 0,1$
^{85}Kr	30	$0,80 \pm 0,04$	$20,2 \pm 0,1$	$20,3 \pm 0,1$
^{147}Pm	20	$0,20 \pm 0,06$	$19,7 \pm 0,1$	$8,8 \pm 0,1$

Na Tabela 21, se observa que os valores dos tamanhos de campo uniformes para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr , apresentaram valores bem próximos, obtendo-se diferenças de

10,8% e 0,5%, respectivamente, embora, para o caso do campo da fonte de ^{147}Pm , esta diferença foi maior, -55,3%.

A metodologia utilizada neste trabalho para o mapeamento e determinação da uniformidade de campos padrões de radiação beta utilizando filmes radiocrômicos do tipo EBT, alcançaram os resultados esperados.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi estudada a viabilidade de uma metodologia utilizando a câmara de extrapolação PTW 23391 e os filmes radiocrômicos EBT *Gafchromic* para determinar e comparar as características dosimétricas de campos de radiação beta gerados por sistemas padrões.

A confiabilidade da câmara de extrapolação PTW foi avaliada a partir de testes de controle de qualidade, corrente de fuga, repetitividade e reprodutibilidade. O valor da corrente de fuga em todos os experimentos foi desprezível em relação à corrente de ionização medida (inferior a 2,0%). Os valores de repetitividade da câmara permitiram estabelecer limites, para o seu uso confiável, de $0,05 \times 10^{-11}$ A e de $0,025 \times 10^{-11}$ A, para as polaridades positiva e negativa, respectivamente. Os resultados determinados no teste de reprodutibilidade da câmara permitiram estabelecer, para fins de controle de qualidade, os limites superior e inferior dados pelos valores $5,166 \times 10^{-11}$ A e $-4,848 \times 10^{-11}$ A, para ambas as polaridades. A reprodutibilidade determinada para cada tensão de polarização foi de 4,6% e de 2,1%, respectivamente.

As curvas de extrapolação da câmara PTW foram obtidas para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm apresentando comportamento linear, com coeficientes de correlação de 0,9999, 0,9994 e 0,9982, respectivamente. Os coeficientes de calibração da câmara de extrapolação foram obtidos a partir das taxas de doses absorvidas no ar certificadas no BSS2 do LCD/CDTN em função do coeficiente angular das curvas de extrapolação.

A comparação entre as medidas das taxas de dose absorvida no ar obtidas pela câmara de extrapolação PTW 23391 no BSS2 do LCD/CDTN em relação às taxas de dose absorvida no ar dadas pelo certificado de calibração, apresentaram diferenças de -23%, -34% e 7% para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , respectivamente.

A viabilidade da metodologia de utilização da câmara de extrapolação foi demonstrada a partir da comparação entre os laboratórios do LCD/CDTN e o LCI/IPEN. A comparação entre os valores das taxas de dose absorvida no ar determinadas pela câmara de extrapolação em relação às taxas de dose absorvida no ar dadas pelo certificado de calibração do BSS2 do LCI/IPEN, apresentaram diferenças de -20% e -27% para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr ,

respectivamente. Para o campo da fonte de ^{147}Pm , os valores da corrente de ionização medida foram da mesma ordem da corrente de fuga, o que impossibilitou a comparação.

A comparação entre o LCI/IPEN em relação ao LCD/CDTN mostrou que os valores dos coeficientes de calibração determinados com a câmara de extrapolação, apresentaram diferenças máximas de -1% e 3% para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr , respectivamente.

O filme radiocrômico EBT apresentou uma resposta adequada quando irradiado com valores de dose absorvida na faixa de 0,1 até 3,5 Gy em campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$. O estudo para a leitura dos filmes radiocrômicos foi realizada utilizando dois tipos de *scanner*, HP G4050 e *Microtek 9800XL*, concluindo-se que a utilização do *scanner* HP G4050 não é recomendável para ser utilizado na digitalização de filmes inteiros para mapeamento de campos e na digitalização de amostras de filmes quando irradiados com valor de dose absorvida acima de 4,0 Gy.

A caracterização do filme EBT foi realizada, em termos de dose absorvida no ar, nos campos de radiação beta de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , utilizando-se para leitura o *scanner Microtek 9800XL*, o densitômetro de transmissão *X-Rite* e o espectrofotômetro *Shimadzu*. Os resultados mostram que a utilização com os três sistemas é possível na dosimetria beta, porém uma comparação no intervalo de dose absorvida de 0,1 até 5,0 Gy mostrou com o densitômetro e com o espectrofotômetro uma coerência melhor, em relação às obtidas com o *scanner Microtek*.

Os filmes radiocrômicos EBT calibrados em termos de dose absorvida no ar certificada pelo BSS2 do LCD/CDTN e com o *scanner Microtek* mostraram-se úteis para mapeamento dos campos e determinação das curvas de isodose nos campos de radiação beta. O mapeamento do campo realizado com os filmes radiocrômicos demonstrou que alguns campos de radiação não estavam alinhados geometricamente em relação ao centro geométrico do filme. O campo da fonte ^{85}Kr do LCD/CDTN permitiu, a partir das curvas de isodose, verificar um deslocamento na parte central do campo de radiação, o que é observado também no campo da fonte de ^{85}Kr do LCI/IPEN, isto é provavelmente devido a uma falha de fabricação para este tipo de fonte.

A viabilidade da metodologia de utilização dos filmes radiocrômicos foi demonstrada a partir da comparação entre os laboratórios do LCD/CDTN e o LCI/IPEN. Os valores de dose

absorvida no ar de 0,1; 0,3 e 0,15 Gy determinados com os filmes radiocrômicos EBT, apresentaram diferenças máximas de 3%, -9% e -53% para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr e ^{147}Pm , respectivamente. A alta diferença apresentada para o campo da fonte de ^{147}Pm foi devida principalmente à baixa taxa de dose absorvida e à baixa atividade do espectro de ^{147}Pm .

Os resultados dos valores de dose absorvida dos filmes radiocrômicos avaliados permitiram concluir que este tipo de filme apresenta uma alta dependência da dose absorvida, o que evidencia que qualquer variação do valor de dose absorvida irá variar diretamente nos coeficientes de calibração e por consequência nas incertezas.

A partir dos resultados pode-se concluir que a viabilidade da metodologia utilizando a câmara de extrapolação PTW 23391 e filmes radiocrômicos EBT foi demonstrada para os campos de $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ e ^{85}Kr . Para o caso do campo de radiação de ^{147}Pm , conclui-se que esta metodologia não pode ser implantada, devido a apresentar uma diferença bem maior.

Neste trabalho demonstrou-se que o uso de filmes radiocrômicos para a dosimetria da radiação beta é uma boa alternativa, devido à facilidade de aquisição e de uso, concluindo-se que a determinação dos valores de doses absorvidas obtidas com o densitômetro e com o espectrofotômetro são técnicas adequadas para irradiações em campos relativamente homogêneos. No caso de campos não homogêneos ou do mapeamento de campos de radiação, a possibilidade de identificar anisotropias em duas dimensões torna a técnica baseada no uso de *scanner* a mais indicada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEA TECHNOLOGY. **Operation manual Beta Secondary Standard 2, BSS2.** Braunschweig, Germany, 2000.
- AMBROSI, P., BUCHHOLZ, G., HELMSTÄDTER, K. The PTB Beta Secondary Standard BSS 2 for radiation protection. **Journal of Instrumentation**, v. 2, 2007.
- AMERICAN ASSOCIATION OF PHYSICISTS IN MEDICINE. **Radiochromic film dosimetry.** College Park, (AAPM Report, 63), 1998.
- ANTÔNIO, P.L. **Estudo comparativo entre métodos de calibração de aplicadores clínicos de radiação beta.** Dissertação de mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN/CNEN-SP, São Paulo, 2009.
- ATTIX, F.H. **Introduction on radiological physics and radiological dosimetry.** 2ed., New York, N.Y.: John Wiley & Sons, 1986.
- BUTSON, M.J., YU, P.K.N., CHEUNG, T., METCALFE, P. Radiochromic film for medical radiation dosimetry. **Materials Science and Engineering: R: Reports.** v. 41, p. 61-120, 2003.
- CALDAS, L.V.E. **Alguns métodos de calibração e de dosimetria da radiação beta.** Tese de Doutorado em Física Nuclear, Instituto de Física da Universidade de São Paulo/IFUSP, 1980.
- DA SILVA, T.A.; SOARES, C.G. Experimental measurements of radiation protection quantities for beta radiations and nearly monoenergetic electron beams incident at various angles. **Health Physics**, v.68, n.6, p. 542-542, 1995.
- DA SILVA, T.A. **Variação angular dos equivalentes de dose em campos externos de elétrons.** Tese de Doutorado em Engenharia Nuclear, Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 1996.
- DIAS, S.K. **Desenvolvimento de um sistema de referência para a dosimetria da radiação beta.** Tese de doutorado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN/CNEN-SP, São Paulo, 1996.

EUROPEAN COLLABORATION IN MEASUREMENT STANDARDS. **International comparison of extrapolation chamber measurements of the absorbed dose rate in tissue for beta radiation.** (EUROMET project 739), 2007.

IAEA, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Calibration of radiation protection monitoring instruments.** Vienna, 1999 (IAEA-SRS 16).

IAEA, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Calibration of photon and beta ray sources used in brachytherapy.** Vienna, 2002 (TECDOC-1274).

IAEA, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Measurement uncertainty: A practical guide for secondary standards dosimetry laboratories.** Vienna, 2008 (TECDOC-1585).

IAEA, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Calibration of reference dosimeters for external beam radiotherapy.** Vienna, 2009 (IAEA-TRS 469).

ICRU, INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. **Radiation quantities and units.** Bethesda: ICRU, 1980. 1 v p. (ICRU REPORT 33).

ICRU, INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. **Determination of dose equivalents resulting from external radiation sources.** Bethesda: ICRU, 1985. 10 p. (ICRU REPORT 39).

ICRU, INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. **Determination of dose equivalents from external radiation sources- Part 2.** Bethesda: ICRU, 1988. 48 p. (ICRU REPORT 43).

ICRU, INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. **Measurements of dose equivalents from external photon and electron radiations.** Bethesda: ICRU, 1992. 40 p. (ICRU REPORT 47).

ICRU, INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. **Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry**. Bethesda: ICRU, 1993. (ICRU REPORT 51).

ICRU, INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. **Secondary Electron Spectra from Charged Particle Interactions**. Bethesda: ICRU, 1996. (ICRU REPORT 55).

ICRU, INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. **Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation**. Bethesda: ICRU, 1998. (ICRU REPORT 60).

ICRP, INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. **Annals of the ICRP**, v. 21, n.1/3, 201p, 1991.

INMETRO, INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Vocabulário Internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia - VIM**. Portaria n. 029, de 10 de março de 1995. 3. ed. Rio de Janeiro, (2003).

ISO, INTERNATIONAL STANDARTIZATION ORGANIZATION. **Reference beta particle radiations: methods of production**. (ISO 6980-1), Geneva, 2001.

ISO, INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTIZATION. **Reference beta particle radiations: calibration fundamentals related to basic quantities characterizing the radiation field**. (ISO 6980-2), Geneva, 2004.

ISO, INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTIZATION. **Reference beta particle radiations: calibration of area and personal dosimeters and the determination of their response as a function of beta-radiation energy and angle of incidence**. (ISO 6980-3), Geneva, 2004.

ISO, INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARTIZATION. **Standard practice for use of a radiochromic film dosimetry system**. (ISO 51275), 2004.

KASE, K.R.; BJAERNGARD, B.E.; ATTIX, F.H. **Dosimetry of ionizing radiation**. New York: Academic Press, v. 2, 1987.

KNOLL, G.F. **Radiation detection and measurement**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1989.

OGUNLEYE, O.T.; PALIWAL, B.R. A proposed modification of the cavity theory for electrons. **Health Phys.**, v. 49, n. 5, p. 937-944, 1985.

OLIVEIRA M.L. **Desenvolvimento de um sistema de referência e de uma metodologia para calibração de aplicadores oftálmicos utilizados em braquiterapia**. Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN/CNEN-SP, São Paulo 2005.

OWEN, T. **Fundamentals UV-Visible spectroscopy**. Agilent Technologies. Germany, 2000.

PRUIT J.S., SOARES C.G., EHRLICH M. **National Bureau of Standards Measurement Services: Calibration of beta-particle radiation instrumentation and sources**. NBS (USA), Spec. Publ. 250-21, 75 pag. (abril 1988).

RAMOS, M.M.O. **Padronização da grandeza kerma no ar para radiodiagnóstico e proposta de requisitos para laboratórios de calibração**. Tese de doutorado, Universidade Federal de Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE, Programa de Engenharia Nuclear, 2009.

REYNALDO, S.R. **Avaliação das características metrológicas do sistema padrão secundário BSS2 para calibração de dosímetros em campos de radiação beta**. 2005. Dissertação de mestrado (Ciências e Técnicas Nucleares), Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

REYNALDO, S. R.; FLORESTA, D. L.; DA SILVA, T. A.. **Implantação do Novo Sistema Padrão Secundário de Radiação Beta no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear**. INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE; ENCONTRO NACIONAL DE FISICA E REATORES THERMAL HIDRAULICA, ago. 28 - set. 2, 2005, Santos, SP

SHANI, G. **Radiation dosimetry instrumentation and methods**. New York: CRC Press, 1991.

SHAPE, P; MILLER, A. **Guidelines for the calibration of routine dosimetry systems for use in radiation processing.** NPL Report CIRM 29, 2009.

SLOBODAN, D. ET AL. Dosimetric properties of improved GafChromic films for seven different digitizers. **Med. Phy.** v. 31, n. 9, p. 2392–2401, 2004.

SOARES, C.G. New developments in radiochromic film dosimetry. **Radiation Protection Dosimetry.** v. 120, n. 1-4, p. 100–106, 2006.

TAVARES, E.J. **Metodologia para caracterização dosimétrica e curvas de isodoses de fontes de braquiterapia emissoras gama, tipo semente.** Dissertação de mestrado. Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, CDTN/CNEN-BH, Belo Horizonte, 2009.