



**COPPE/UFRJ**

SIMULAÇÃO POR MONTE CARLO DE DOSES EM RADIOGRAFIA  
INDUSTRIAL

Pedro Barbosa Teixeira

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

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Fevereiro de 2009

SIMULAÇÃO POR MONTE CARLO DE DOSES EM RADIOGRAFIA  
INDUSTRIAL

Pedro Barbosa Teixeira

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

Aprovada por:

---

Prof. Ademir Xavier da Silva, D.Sc

---

Prof. Delson Braz, D.Sc

---

Dr. Alessandro Facure Neves de Salles Soares, D.Sc

---

Prof. Julio José da Silva Estrada, D.Sc

---

Prof<sup>a</sup>. Maysa Joppert Coelho, Ph.D

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

FEVEREIRO DE 2009

Teixeira, Pedro Barbosa

Simulação por Monte Carlo de Doses em Radiografia Industrial/Pedro Barbosa Teixeira. - Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XIX, 124 p.:il.; 29,7 cm.

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 95-100

1. Radiografia industrial. 2. Zonas urbanas e afins. 3. Monte Carlo. I Silva, Ademir Xavier da. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

Aos meus pais Antonio Carlos e Carolina (em memória), por tudo que fizeram por mim ao longo da minha vida.

À minha mulher Sonia e meus filhos, Marcelo e Marina, pelo amor, compreensão, paciência, incentivo e colaboração na elaboração deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus.

Meu agradecimento especial ao meu orientador: Prof. Ademir Xavier da Silva – D.Sc., pela orientação, pela oportunidade do desenvolvimento deste trabalho e pelas valiosas ponderações as quais determinaram o caminho correto a seguir na elaboração deste trabalho.

Agradecimentos especiais também aos professores, Maysa Joppert Coelho, Ph.D e Julio José da Silva Estrada, D.Sc; que me acompanham desde o início da minha dissertação de Mestrado.

À Alessandro Facure D.Sc., Cristiane de Queiroz Oliveira D.Sc., Gustavo Caldas D.Sc. e Thaiana Cordeiro, pelas efetivas colaborações e participações no desenvolvimento deste trabalho.

À Coordenação e Professores da COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Nuclear.

À Coordenação da CGMI e a todos os meus colegas da CNEN e da COPPE que de maneira direta ou indireta contribuíram com a realização deste trabalho.

Enfim, a meus familiares que com certeza torceram muito por mim, nesta caminhada.

Resumo da Tese apresentada a COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

## SIMULAÇÃO POR MONTE CARLO DE DOSES EM RADIOGRAFIA INDUSTRIAL

Pedro Barbosa Teixeira

Fevereiro/2009

Orientador: Ademir Xavier da Silva

Programa Engenharia Nuclear

A Comissão Nacional de Energia Nuclear criou em 1991, um grupo de trabalho visando à elaboração de um “Plano Específico de Radioproteção Padrão”, onde são estabelecidos procedimentos operacionais, adicionais ao Plano Geral de Radioproteção de cada Empresa. Este plano específico foi denominado de “PARAE”, Plano para Áreas Restritas com Autorização Específica.

A proposta deste trabalho foi obter com uma maior exatidão, aplicando o método de Monte Carlo, as taxas de dose em alguns pontos de cenários pré-estabelecidos em operações de rotina e em situação de acidente.

Foi realizada uma intercomparação entre os resultados dos cálculos teóricos apresentados no PARAE, as taxas de dose encontradas nas simulações com o método de Monte Carlo e medidas práticas (levantamentos radiométricos), realizados em instalações de zonas urbanas e afins. Os resultados encontrados nas medidas experimentais e nas simulações com Monte Carlo estão em bom acordo e os resultados encontrados nos cálculos teóricos, PARAE apresentaram uma grande discrepância em relação aos outros dois resultados.

Neste trabalho também foram realizadas simulações com um fantoma antropomórfico de voxel para estimar, nos cenários de acidente, as doses efetivas que o trabalhador ou o indivíduo do público possa vir a receber. A partir dos resultados obtidos foi determinada uma curva com o “fator de correção” para doses efetivas. Esta curva possibilitará uma melhor avaliação das doses efetivas que trabalhadores venham a receber em casos de acidente.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

## MONTE CARLO SIMULATION OF DOSES IN INDUSTRIAL RADIOGRAPHY

Pedro Barbosa Teixeira

February /2009

Advisor: Ademir Xavier da Silva

Department: Nuclear Engineering

The *Comissão Nacional de Energia Nuclear* created in 1991 a working group aiming the production of a "Standard Specific Plan of Radioprotection", in which are established operational procedures, additional to the General Plan of Radioprotection of each company. This Specific Plan has been called "PARAE," Plan for Restricted Areas with Specific Authorization.

The purpose of this study was to obtain with greater accuracy, applying the Monte Carlo method, the dose rates in a few spots of pre-established scenarios in routine operations and in accident situations.

An intercomparison was made among the results of theoretical calculations presented in PARAE, the dose rates found in simulations with the Monte Carlo method and experimental measurements (radiometric surveys) conducted in urban zones and related facilities. The results found in experimental measurements and with Monte Carlo simulations are in good agreement and the results found in theoretical calculations, PARAE, showed a large discrepancy from the other two results.

In this work were also carried out simulations with an anthropomorphic voxel phantom to estimate, in accident scenarios, a precise value for the effective doses that the worker or public individual is likely to receive. From the results a curve was determined with the "correction factor" to effective doses. This curve will allow a better assessment of effective doses that workers would receive in case of accident.

# Sumário

Capítulo	Página
<b>1 Introdução</b>	1
1.1 Objetivo	8
<b>2 Fundamentos Teóricos</b>	9
2.1 Otimização das doses	9
2.1.1 Otimização	9
2.1.2 Proteção radiológica – documento “PARAE”	10
2.1.2.1 Acidente no transporte rodoviário	10
2.1.2.2 Desengate do cabo flexível do tele-comando do porta-fonte	11
2.1.2.3 Queda no solo, do porta-fonte	11
2.2 PARAE - Plano de áreas restritas com autorização específica	12
2.2.1 Equações utilizadas pelo PARAE	14
2.2.1.1 Equações para as taxas de dose na linha de isolamento transversal	17
2.2.1.2 Equações para as taxas de dose na linha de isolamento longitudinal	19
2.2.1.3 Equação para a dose em uma situação de acidente	20
2.3 Método de Monte Carlo	21
2.3.1 O código de transporte de radiação MCNP	21
2.3.2 Estrutura do código MCNP	23
2.3.2.1 Estrutura dos dados de entrada do MCNP	23
2.3.2.2 Dados de saída, resultados do MCNP	25
2.4 Modelos antropomórficos de exposição	26
2.4.1 Fantoma tomográfico	28
2.4.2 Desenvolvimento do modelo anatômico baseado em imagens	28
<b>3 Metodologia</b>	31
3.1 Cenários selecionados	31
3.1.1 Primeiro levantamento radiométrico	32



3.1.2 Cálculo das incertezas associadas às medidas	36
3.1.3 Cenários selecionados	39
3.1.4 Segundo levantamento radiométrico	42
3.1.5 Cenários selecionados	45
3.2 Cálculos teóricos utilizando as equações do PARAE	47
3.2.1 Coeficientes de atenuação linear para o solo e para o aço	47
3.2.2 Camada do solo que a radiação gama atravessa (X)	47
3.2.3 Fator de transmissão da camada de solo	48
3.2.4 Fator de redução da tubulação	48
3.2.5 Distância da fonte ao ponto de interesse: gônadas	49
3.3 Distância que a radiação percorre no “ar”	49
3.4 Cálculo das taxas de dose para o 1º e 4º Cenário	49
3.5 Cálculos das taxas de dose para o 2º e 5º Cenário	50
3.6 Cálculos da taxa de dose considerando o 3º Cenário	51
3.7 Variando a distância da linha de isolamento transversal	52
3.7.1 Linha de isolamento transversal a 100 cm do eixo central da vala (primeiro levantamento)	52
3.7.2 Determinação das variáveis que entram nos cálculos das taxas de dose, para as linhas de isolamento transversais	53
3.8 Simulações das taxas de dose para todos os cenários com o código MCNP	53
3.8.1 Coeficientes de conversão de fluxo em dose	53
3.8.2 Características da tubulação utilizada nas simulações com o código MCNP	54
3.8.3 Verificação da influência nos resultados das simulações com o MCNP, ao se variar algumas condições estabelecidas	55
3.8.3.1 Variação do espectro de energia dos fótons de uma fonte de $^{192}\text{Ir}$	55
3.8.3.2 Variação do meio – Atenuação do solo	57
3.8.3.3 Variação do tipo de solo	58
3.9 Simulação com fantoma MAX	60
3.9.1 O simulador antropomórfico MAX	61
3.9.2 Cálculo da dose equivalente em um órgão ou tecido do fantoma MAX, para a exposição com fótons	62

<b>4 Resultados</b>	65
4.1 Taxas de dose resultantes em função da energia média e do espectro de energia da fonte de <sup>192</sup> Ir	65
4.2 Contribuição do efeito “ <i>Skyshine</i> ”	66
4.3 Estimativas das taxas de dose resultantes em função do tipo de solo	67
4.4 Taxas de dose determinadas a partir dos cálculos teóricos utilizando as equações do PARAE	68
4.4.1 Primeiro e Quarto Cenários: Cálculo para as linhas de isolamento transversais	68
4.4.1.1 Variação da linha de isolamento transversal para o primeiro levantamento radiométrico	70
4.4.1.2 Linhas de isolamento transversais distantes: 200 cm, 300 cm e 400 cm do eixo central da vala, segundo levantamento radiométrico	70
4.4.2 Segundo e Quinto Cenários: Cálculo para as linhas de isolamento longitudinal	70
4.4.3 Terceiro Cenário: Situação de acidente	71
4.5 Taxas de dose calculadas a partir das equações do PARAE	72
4.6 Simulação com o Código MCNP, da estimativa das taxas de dose para operação de rotina e para a situação do acidente formulado	72
4.6.1 Propagação de Erros	73
4.6.2 Operação de rotina: estimativa das taxas de dose nas linhas de isolamento transversal e longitudinal para o segundo levantamento radiométrico	75
4.6.3 Estimativa da taxa de dose para a situação do acidente simulado	76
4.7 Resultados obtidos nas simulações com fantoma de voxel MAX	77
4.7.1 Representação dos resultados das taxas de doses efetivas	82
4.8 Intercomparação dos Resultados	83
4.9 Taxas de doses efetivas, simulação com o fantoma MAX	88
4.9.1 Determinação do “Fator de Correção”	88

<b>5- Análise dos Resultados e Conclusões</b>	91
<b>Referências Bibliográficas</b>	95
<b>Anexo 1</b>	101
Cálculo dos erros associados às medidas realizadas no levantamento radiométrico	101
<b>Anexo 2</b>	109
1 Determinação dos valores das taxas de dose, para a distância de 200 cm	109
1.1 Primeiro levantamento:	109
1.2 Segundo levantamento:	110
2 Determinação dos valores das taxas de dose, para a distância de 300 cm	112
2.1 Primeiro levantamento:	112
2.2 Segundo levantamento:	113
3 Determinação dos valores das taxas de dose, para a distância de 400 cm	115
3.1 Primeiro levantamento:	115
3.2 Segundo levantamento:	116
<b>Anexo 3</b>	118
1 Cálculo do primeiro cenário para as linhas de isolamento de 100 cm, 200 cm, 300 cm e 400 cm	118
2 Cálculo do quarto cenário para as linhas de isolamento de 200 cm, 300 cm e 400 cm	120
<b>Anexo 4</b>	122
Propagação de Erros	122

## LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1.1 Modelos de Irradiadores	2
1.2 Encapsulamento, em aço inox, de fonte radioativa de Iridio 192	2
1.3 Porta-fonte dos tipos: (a) Flexível; (b) Articulado	3
1.4 Controle Remoto de um Irradiador de Iridio 192	3
1.5 Vista interna de um Irradiador de Iridio 192	4
1.6 Tubo Guia da Fonte	4
1.7 (a) Fonte na posição de armazenamento no irradiador	5
1.7 (b) Fonte na posição radiográfica (na extremidade do tubo guia)	5
1.8 Modelo de fotos que as empresas enviam no “adendo”	7
1.9 Típica situação encontrada em trabalhos de gamagrafia industrial realizados em Zonas Urbanas e Afins (medidas em cm)	8
2.1 Modelo equivalente ao apresentado no PARAE - linha de isolamento transversal	14
2.2 Linha de Isolamento longitudinal, a 817,8 cm da Fonte	19
2.3 Exposição a uma Fonte de $^{192}\text{Ir}$ (Ponto P5), considerando uma situação de acidente (medidas em cm)	20
2.4 Fantomas matemáticos adultos do tipo MIRD5: ADÃO E EVA[37]	27
2.5a Etapas da construção de um modelo dosimétrico para corpo inteiro [49]	29
2.5b Fatia de imagem computadorizada, mostrando uma matriz de pixels [37,53]	29
2.6 Imagem 1: Fatia de uma imagem de tomografia computadorizada [37,51,53] Imagem 2: A mesma imagem após o processo de segmentação [37,51,53]	30
3.1 Croqui do primeiro levantamento radiométrico	34
3.2 1º Cenário: Linha de isolamento, transversal à vala (medidas em cm)	40
3.3 2º Cenário: Linha de isolamento, longitudinal à vala (medidas em cm)	40

3.4	3º Cenário: Situação de acidente. Dose nas gônadas (medidas em cm)	41
3.5	Croqui do segundo levantamento radiométrico	43
3.6	4º Cenário: Linha de isolamento, transversal à vala, (medidas em cm)	45
3.7	5º Cenário: Linha de isolamento, longitudinal à vala, (medidas em cm)	46
3.8	Primeira simulação: solo com importância zero (0)	58
3.9	Fantoma de Voxel (simulador) MAX [53]	62
3.10	(a), (b) e (c) O Fantoma (simulador) MAX [53]	63
4.1	Taxas de dose efetivas encontradas nas simulações com o fantoma MAX	82
4.2	Curva dos fatores de correção para taxas de dose efetivas	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
2.1 Valores dos coeficientes de atenuação linear, $\mu$ , para fótons com energia média igual a do Irídio 192, 380 keV [13]	15
2.2 Camada semirredutora (CSR) e decirredutora (CDR), para radiação $\gamma$ proveniente da fonte de $^{192}\text{Ir}$ , [29]	17
2.3 Tally Card – Opção das grandezas para os resultados do MCNP	25
2.4 Frações das massas dos tecidos (em %) e densidades baseadas no ICRU 44	28
3.1 Dados do primeiro levantamento radiométrico	33
3.2 Resultados das leituras do primeiro levantamento radiométrico	35
3.3 Dados do segundo levantamento radiométrico	43
3.4 Resultados das leituras do segundo levantamento radiométrico	44
3.5 Coeficientes de conversão de fluência em taxa de dose DF(E) recomendados pela ICRP21 para uso em proteção radiológica [48]	54
3.6 Composição da tubulação de aço/carbono	55
3.7 Espectro completo das energias dos fótons emitidos por uma fonte de Irídio 192 [4]	56
3.8 Simulações variando a forma da energia, energia média ou espectro completo	57
3.9 Composição elementar dos solos utilizados nas simulações	59
3.10 Fatores de peso/cálculo dos tecidos conforme ICRP 60	61
3.11 Massas dos órgãos e tecidos do homem de referência da ICRP 89 e do fantoma MAX [53]	64
4.1 Simulações realizadas com a energia média e com o espectro de energia dos fótons de uma fonte de $^{192}\text{Ir}$ (desvios associados menores que 0,01%)	66
4.2 Verificação da contribuição do efeito “ <i>Skyshine</i> ” (desvios associados menores que 0,01%)	67
4.3 Simulações com tipos de solos diferentes (erros associados menores que 0,01%)	68
4.4 Taxas de dose nas linhas de isolamento transversais e longitudinal, equações do PARAE	72
4.5 Taxas de dose nas linhas de isolamento transversais e longitudinal, equações do PARAE	72

4.6	Resultados das simulações com a fonte nos pontos P1, P2 e P3 (desvios associados menores que 0,01%)	73
4.7	Resultados das simulações da exposição com a fonte nos pontos P1, P2 e P3 e suas respectivas incertezas associadas	75
4.8	Resultados das simulações das exposições com a fonte nos pontos P1, P2 e P3, segundo levantamento (desvios associados menores que 0,01%)	76
4.9	Taxas de dose obtidas com o fantoma MAX para uma fonte distante 0,5 m	78
4.10	Taxas de dose obtidas com o fantoma MAX para uma fonte distante 1 m	79
4.11	Taxas de dose obtidas com o fantoma MAX para uma fonte distante 2 m	80
4.12	Taxas de dose obtidas com o fantoma MAX para uma fonte distante 3 m	81
4.13	Taxas de doses efetivas encontradas nas simulações com o fantoma MAX	82
4.14	Intercomparação dos resultados do primeiro cenário, isolamento transversal, primeiro levantamento radiométrico	83
4.15	Intercomparação dos resultados do segundo cenário, isolamento longitudinal, primeiro levantamento radiométrico	84
4.16	Intercomparação dos resultados do terceiro cenário, situação de acidente, ponto P5 distante 141,4 cm das gônadas	85
4.17	Intercomparação dos resultados do quarto cenário, isolamento transversal, segundo levantamento radiométrico	85
4.18	Intercomparação dos resultados do segundo cenário, isolamento longitudinal, segundo levantamento radiométrico	86
4.19	Resultados dos cálculos teóricos, simulações com MCNP e valores dos dois levantamentos radiométricos, linha de isolamento transversal, a 250 cm do eixo central da vala	87
4.20	Resultados dos cálculos teóricos, simulações com MCNP e valores dos dois levantamentos radiométricos, realizados na linha de isolamento longitudinal a 817,8 cm da fonte	88
4.21	“Fatores de correção”, das taxas de dose calculadas para as taxas de dose efetivas	89

# CAPÍTULO 1

## Introdução

A aplicação de radiações ionizantes em processos industriais vem assumindo um papel cada vez mais importante no cenário nacional. A Radiografia Industrial é uma das técnicas mais empregadas na realização de ensaios não-destrutivos assegurando a integridade de vasos de contenção, caldeiras industriais, tubulações, soldas em gasodutos, oleodutos, em dutos em geral que transportem qualquer produto sob pressão [1,2,3].

Na construção de gasodutos e oleodutos (transporte de gás e óleo em todo o território nacional), faz-se necessário a realização de radiografias nas soldas das emendas da tubulação, a fim de verificar a existência de imperfeições, trincas ou rachaduras internas.

Esse tipo de radiografia pode ser realizado com radiação X ou gama ( $\gamma$ ), sendo que em noventa por cento das vezes, utiliza-se uma fonte radioativa de Irídio 192, emissor  $\gamma$ , com energia média de 380 keV [4]. A esta técnica denominamos de Gamagrafia. Existem cerca de 250 irradiadores de Irídio192 em uso, em todo o território nacional [5]. A Figura 1.1, apresenta os quatro modelos de irradiadores mais utilizados.

Uma peculiaridade dos trabalhos de gamagrafia industrial, é que na maioria das vezes, são empresas, prestadoras de serviços, que realizam as radiografias em recintos fechados (bunkers), no campo em áreas urbanas e suburbanas habitadas, ou ainda em áreas remotas e desabitadas do país.



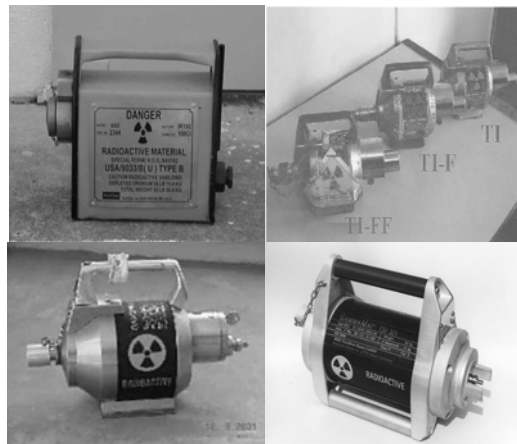


Figura 1.1 – Modelos de Irradiadores.

As fontes radioativas de Irídio são constituídas de pequenos discos com diâmetro aproximado de 1 a 3 mm. Esses discos são acondicionados em cápsulas de aço inoxidáveis hermeticamente seladas. A Figura 1.2 apresenta duas fontes de irídio 192, uma hermeticamente selada e outra desmontada. Cada disco possui em média 10 Ci de atividade.

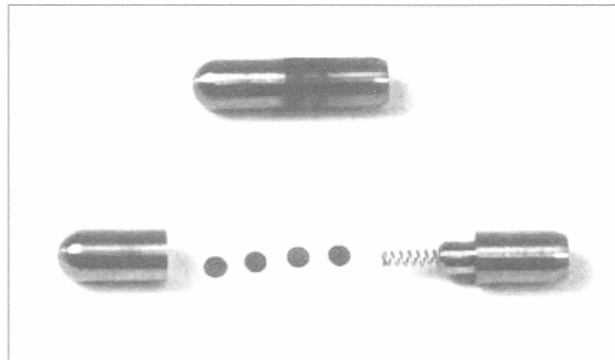
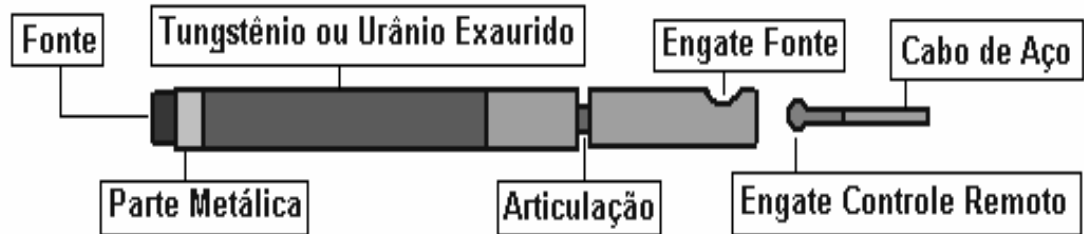


Figura 1.2 – Encapsulamento em aço inox de fonte radioativa de Irídio 192.

Elas são soldado à ponta de um cabo de aço de aproximadamente 20 cm denominado porta-fonte, ou mais comumente conhecido como “rabicho”. O porta-fonte possui em sua outra extremidade um engate para conexão ao cabo de aço flexível do telecomando, conforme mostram as Figuras 1.3 e 1.4. O porta-fonte (rabicho), em posição de repouso fica armazenado dentro do irradiador.



(a)



(b)

Figura 1.3 – Porta-fonte dos tipos: (a) Flexível; (b) Articulado.

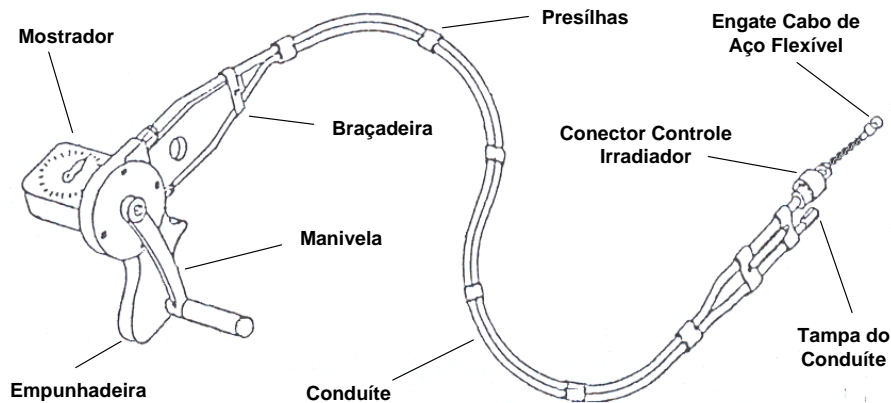


Figura 1.4 – Controle remoto de um irradiador de Irídio 192.

O corpo do irradiador é composto de uma blindagem de urânio exaurido (empobrecido) coberta por uma lâmina de aço inoxidável ou por uma massa epóxi. Todos os Irradiadores devem possuir: alça para transporte; trava para não permitir a saída do rabicho; tampa traseira e dianteira e plaqueta metálica, fixada ao Irradiador identificando: o radioisótopo, sua atividade, data e número de série do Irradiador. A Figura 1.5 apresenta uma representação esquemática de um modelo de irradiador.

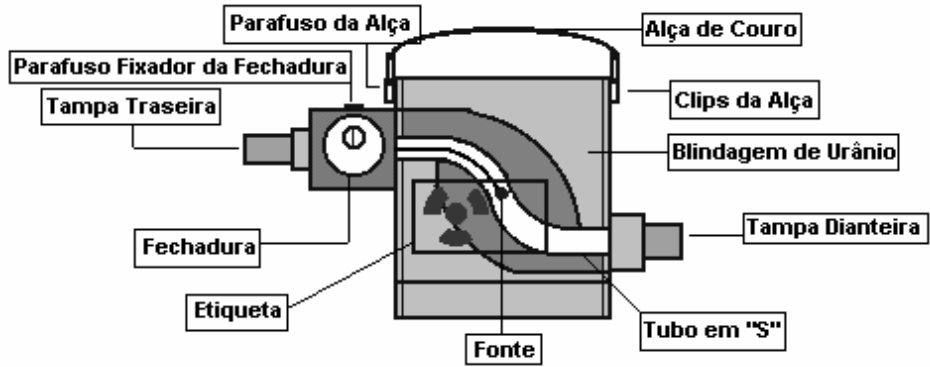


Figura 1.5 – Vista interna de um Irradiador de Irídio 192.

Quando o porta-fonte encontra-se em posição de repouso, seu engate fica posicionado para fora da parte traseira do irradiador.

Para realizar uma gamagrafia engata-se o cabo de aço do telecomando no engate do porta-fonte, destrava-se o irradiador, abre-se a tampa dianteira, coloca-se o tubo-guia (Figura 1.6), que é uma mangueira que direciona a fonte para a posição de interesse e então se gira a manivela do telecomando. O cabo de aço do telecomando empurrará o rabicho da fonte para fora de sua blindagem, ou seja para fora do irradiador.

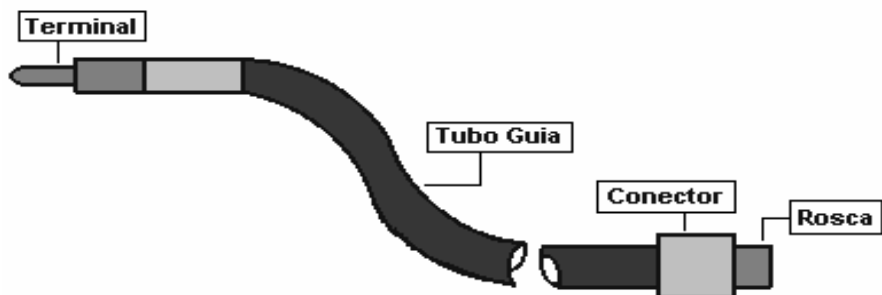


Figura 1.6 – Tubo Guia da Fonte.

A fonte deverá ficar exposta o tempo necessário para a realização de uma boa gamagrafia. Após o tempo pré-estabelecido, deve-se acionar a manivela do telecomando em sentido contrário, recolhendo a fonte para sua posição de repouso, para dentro do Irradiador, como ilustrado nas Figuras 1.7 (a) e 1.7 (b).

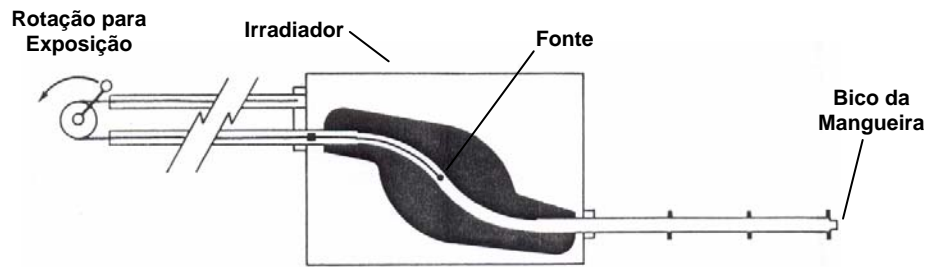


Figura 1.7 (a) - Fonte na posição de armazenamento no irradiador.

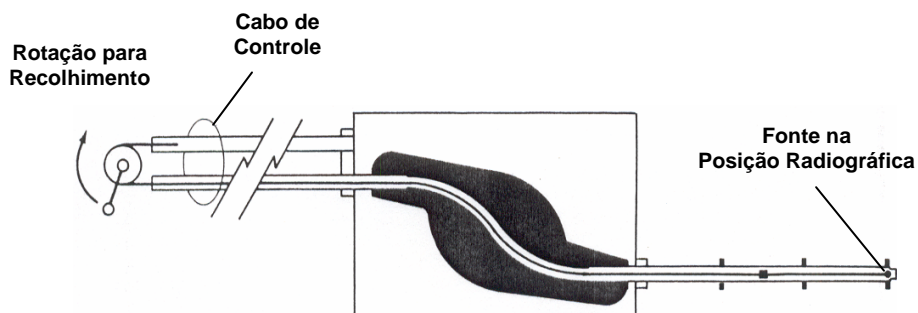


Figura 1.7 (b) - Fonte na posição radiográfica (na extremidade do tubo guia).

Os colimadores são normalmente constituídos de uma blindagem de chumbo ou tungstênio, em uma única peça revestida de aço inox. Podem ser encaixados diretamente no irradiador, ou na ponta do tubo guia. Sempre que possível, é recomendável a utilização de colimadores, visto que os mesmos proporcionam uma grande diminuição na radiação espalhada, evitando a emissão da radiação para todos os ângulos ( $4\pi$ ), só permitindo a saída da radiação pelo menor ângulo necessário para o tipo de gamagrafia que se deseja realizar. Os colimadores oferecem condições muito mais seguras para os operadores envolvidos em um trabalho radiográfico, bem como para os indivíduos do público em geral.

O “United National Scientific Committee on the Effects of Radiation” [6] constatou que cerca de 40% de todos os acidentes nucleares ou radiológicos, em nível mundial, com conseqüências clínicas, tiveram como origem, trabalhos de gamagrafia industrial.

Como em um trabalho de gamagrafia a fonte emite radiação isotropicamente, salvo algumas exceções onde se utiliza um colimador para diminuir o ângulo de

exposição da fonte, estes trabalhos devem ser realizados somente em áreas previamente isoladas e sinalizadas. Este isolamento deverá sempre levar em consideração os limites de dose determinados na Norma CNEN-NE-3.01, Diretrizes Básicas de Radioproteção [7], tanto para indivíduos ocupacionalmente expostos (trabalhadores), como para indivíduos do público.

A Norma CNEN-NN-6.04, Funcionamento de Serviço de Radiografia Industrial [8], classifica os trabalhos de gamagrafia em: Instalações Fechadas e Instalações Abertas.

As Instalações Fechadas são recintos blindados (bunkers) que devem receber por parte da CNEN a “Autorização para Construção” e a “Autorização para Operação”.

As Instalações Abertas compreendem todas as outras instalações que não definidas como Instalações Fechadas e recebem, por parte da CNEN, somente a “Autorização para Operação”. A atividade máxima da fonte normalmente autorizada para a realização de trabalhos de gamagrafia com fontes de Irídio 192 é de  $3,7 \times 10^{12}$  Bq (100 Ci).

Dentro da classificação das Instalações Abertas, a CNEN distingue um grupo de instalações onde se fazem necessárias regras especiais. Este grupo é formado de instalações que realizam gamagrafia em áreas urbanas, suburbanas e rurais, ou seja, áreas onde não exista um efetivo controle de acesso, permitindo assim, a presença de indivíduos do público. Para este tipo de instalação é exigido por parte da CNEN, que a empresa elabore um Plano Específico de Radioproteção para cada obra, onde devem constar as características específicas da obra. A CNEN então, após analisar este documento, emitirá uma “Autorização para Operação Específica” para a obra em questão. Como não havia tempo hábil para a elaboração do Plano específico, por parte das empresas nem para a análise do mesmo por parte dos técnicos da CNEN, foi criado, em 1992, um grupo de trabalho com participação de supervisores de radioproteção das empresas e técnicos da CNEN visando à elaboração de um “Plano Específico de Radioproteção Padrão”, onde são estabelecidos procedimentos operacionais, adicionais ao plano geral de radioproteção, que permitem minimizar as doses que trabalhadores e indivíduos do público venham a receber durante a execução de trabalhos radiográficos, segundo recomendações de organismos internacionais de proteção radiológica [9,10,11,12]. Este documento foi denominado de “PARAE”, Plano para Áreas Restritas com Autorização Específica [13]. A revisão zero do PARAE ficou pronta em março de 1993. A partir desta data até os dias de hoje, qualquer empresa para realizar trabalhos de

radiografia em “zonas urbanas e afins” deve submeter-se às regras estipuladas no PARAE. Em setembro do ano de 1996 foi realizada a primeira revisão no PARAE, (rev. A) [14].

Para cada obra a empresa deve enviar à CNEN, um “adendo” com fotos do local onde será realizado a obra, discriminando possíveis situações de risco como, por exemplo: caracterizando locais de maior afluência de indivíduo do público, escolas, pontos de ônibus, saída de fábricas e outros, conforme se pode verificar na Figura 1.8.

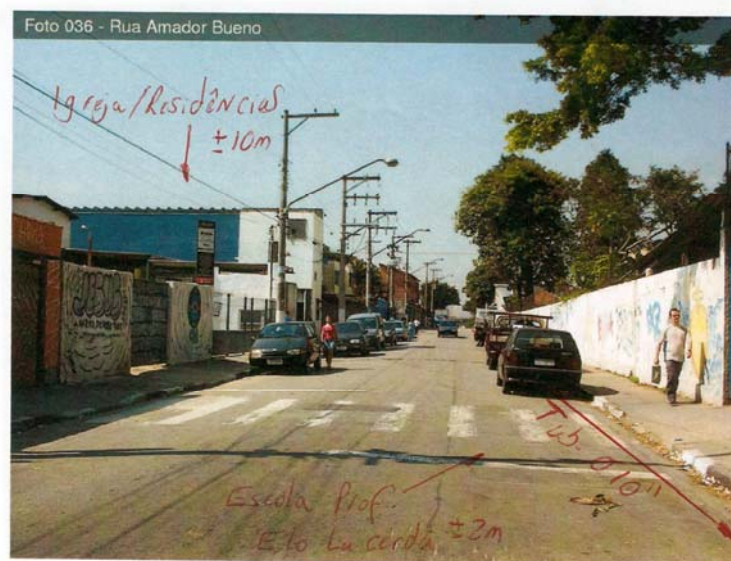


Figura:1.8. Modelo de fotos que as empresas enviam no “adendo”

O trabalhador, operador, ao realizar uma gamagrafia é obrigado a se posicionar a pelo menos 7 metros do irradiador, tanto ao expor a fonte de radiação como na hora de recolhê-la, evitando assim receber uma dose de radiação desnecessária. Não é rara a situação em que, em trabalhos realizados em Zonas Urbanas e Afins, um dos trabalhadores precise ficar na distância de isolamento transversal, de 2 a 2,5 metros da margem da vala, (Figura 1.9), a fim de evitar a aproximação de indivíduos do público, pois no caso de zonas urbanas torna-se impossível um controle de acesso efetivo. A Figura 1.8, representa um esquema típico da situação normalmente encontrada em trabalhos realizados em zonas urbanas e afins.

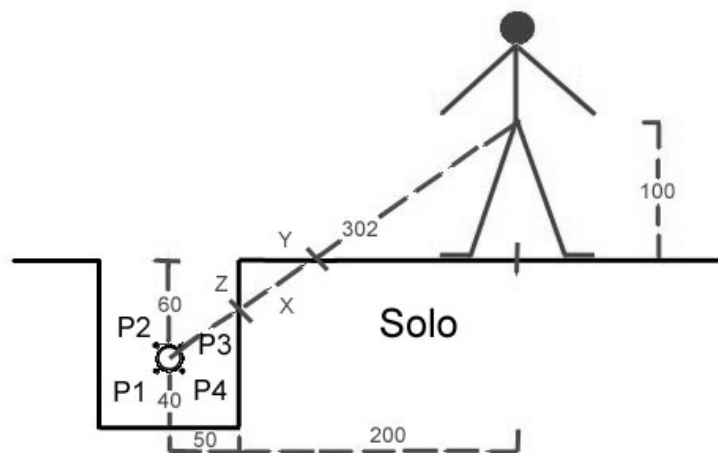


Figura 1.9 – Típica situação encontrada em trabalhos de gamagrafia industrial realizados em Zonas Urbanas e Afins (medidas em cm).

### 1.1- Objetivo

A proposta deste trabalho de tese é obter com uma maior exatidão, aplicando o método de Monte Carlo, as taxas de dose em alguns pontos de cenários pré-estabelecidos em operações de rotina e em situação de acidente, realizando uma intercomparação entre os cálculos teóricos apresentados no PARAE, valores encontrados em levantamentos radiométricos e os valores de taxas de dose das simulações com código de transporte de radiação MCNP versão 5 [15], baseado no método de Monte Carlo [16,17,18].

Este trabalho se propõe também a realizar simulações com o “fantoma de voxel MAX” [53], com a finalidade de definir com uma maior exatidão os valores de dose efetiva que trabalhadores venham a receber em alguns cenários com situações de acidente.

Como normalmente outros países não diferenciam as instalações que realizam gamagrafia em áreas urbanas, suburbanas e rurais, ou seja, áreas onde não exista um bom controle de acesso, permitindo assim, a presença de indivíduos do público, tornou-se muito difícil a busca por ‘Referências Bibliográficas Internacionais’, trabalhos desenvolvidos sobre o tema, em outros países.

## CAPÍTULO 2

### Fundamentos Teóricos

#### 2.1- Otimização das doses

##### 2.1.1- Otimização

Em 1977, a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (*International Commission on Radiological Protection – ICRP*), enunciou os três princípios básicos da Radioproteção: o Princípio da Justificativa; o da Otimização; e o da Limitação de Dose; conforme descritos a seguir [12]:

Princípio da Justificativa:

“São proibidas as doses advindas de irradiações desnecessárias. Qualquer atividade envolvendo radiação ou exposição deve ser justificada em relação às alternativas e produzir um benefício líquido, positivo para a sociedade”.

Princípio da Otimização:

“O projeto, o planejamento do uso e a operação da instalação e de fontes de radiação, devem ser realizados de modo a garantir que as exposições sejam tão reduzidas quanto razoavelmente exequível, levando-se em consideração fatores sociais e econômicos”.

Princípio da Limitação de Dose:

“As doses individuais de trabalhadores e de indivíduos do público, não devem exceder os limites anuais de dose equivalente estabelecidos em norma”.



## 2.1.2- Proteção radiológica – documento “PARAE”

Com o intuito de minimizar as doses recebidas tanto por trabalhadores como por indivíduos do público, em trabalhos de gamagrafia industrial, em zonas urbanas e afins, deve-se realizar uma análise criteriosa das possíveis situações que possam ocasionar exposições indesejadas, pois tais trabalhos não apresentam em suas “áreas restritas” um controle de acesso efetivo [22,23].

No documento “PARAE” [13] são apresentados vários tipos de cenários que ocorrem em trabalhos de zonas urbanas e afins, que podem ocasionar exposições indesejáveis, suas causas; possíveis efeitos e medidas preventivas que se deve tomar a fim de minimizar ao máximo a ocorrência dos mesmos.

A título de ilustração, pode-se apresentar alguns tipos de acidentes que ocorrem com maior frequência em trabalhos de zonas urbanas e afins:

### 2.1.2.1- Acidente no transporte rodoviário

As situações que surgem em um acidente de transporte podem variar muito, dependendo da gravidade do acidente. Entretanto, uma segurança máxima deve ser mantida em torno do veículo de transporte por isolamento e, qualquer reparo no veículo deve ser evitado, até que a situação esteja totalmente resolvida. A prioridade deve ser sempre dada ao cuidado de feridos e ao salvamento de vidas humanas.

Sugestão para atuação:

- a) Atender aos feridos, quando houver;
- b) Verificar visualmente se a caixa que transporta o irradiador permanece trancada e fixada ao veículo;
- c) Se a caixa tiver sido arrancada do veículo, deve-se verificar visualmente sua condição;
- d) Isolar a área e evitar a aproximação de pessoas não autorizadas;
- e) Contatar o supervisor de proteção radiológica e a empresa;
- f) Monitorar a caixa para conferir os índices de transporte estabelecidos em Normas da CNEN e anotar os resultados obtidos;
- g) Se a fonte estiver exposta, devem ser providenciadas blindagens

- adicionais e seguir um procedimento apropriado de resgate;
- h) Se a fonte não estiver exposta, retirar o irradiador da caixa e monitorá-lo verificando sua blindagem e integridade;
  - i) Se o irradiador estiver danificado e após a monitoração for constatado um vazamento com níveis de radiação acima do limite, deve ser providenciado blindagens adicionais e utilizar um procedimento específico para transferir a fonte para outro irradiador ou recipiente de emergência;
  - j) Em todos os casos, o trânsito deve ser desviado do local do acidente e, se isto não for possível, o veículo deve ser removido a uma distância suficiente para liberar o trânsito.

#### 2.1.2.2- Desengate do cabo flexível do tele-comando do porta-fonte

Ao se recolher a fonte para o irradiador, o cabo de aço (telecomando) pode desengatar do porta-fonte, retornando sozinho para o irradiador. A fonte fica solta no tubo-guia, fora de sua blindagem, irradiando para todas as direções. Neste caso, não só o operador receberá uma dose bem superior à que recebe em operação normal, como pode acontecer de que algum indivíduo do público, que se encontre próximo ao isolamento da área de execução da gamagrafia, venha a receber uma dose acima do limite permitido pela Norma CNEN-NN-3.01 – “Diretrizes Básicas de Radioproteção” [24].

#### 2.1.2.3- Queda no solo do porta-fonte

Quando do término da irradiação em uma solda (são realizadas três a quatro radiografias por solda da tubulação), o operador desengata o telecomando e o tubo-guia do irradiador e o transporta para outra “junta”, se esquecendo de travar e de colocar a tampa dianteira do irradiador. Como o rabicho não foi travado, existe um grande risco do mesmo sair do irradiador em seu transporte e cair no chão, acarretando uma situação de emergência, um acidente. A fonte ficará solta no solo, fora de sua blindagem, irradiando para todas as direções, em situação igual ou pior que a do primeiro caso. Quando casos semelhantes a estes acontecem, faz-se necessário a elaboração de um

procedimento de emergência com a finalidade de se recolher à fonte em um container extra de emergência, expondo o mínimo possível os trabalhadores e os indivíduos do público.

## 2.2- PARAE - Plano de áreas restritas com autorização específica

Áreas Restritas com Autorização Específica são aquelas sujeitas a regras especiais de segurança, na qual as condições de exposição podem ocasionar ao indivíduo do público, doses efetivas anuais superiores a 1/50 do limite primário para trabalhadores, situada a uma distância mínima de 230 m (duzentos e trinta metros), de vias públicas, áreas habitadas de zonas urbana, suburbana ou rural, desde que a mesma não se caracterize como instalação aberta.

O PARAE tem como objetivo, estabelecer procedimentos operacionais, adicionais ao plano geral de radioproteção, que permitam minimizar as doses que trabalhadores e indivíduos do público possam vir a receber, durante a execução de exames radiográficos, em áreas restritas localizadas em vias públicas, áreas habitadas de zonas urbanas, suburbanas e rurais [8, 23 - 28]. Este documento estabelece medidas apropriadas para garantir a segurança do público e prevenir danos à propriedade e ao meio ambiente, devendo ser seguido por todas as pessoas envolvidas direta ou indiretamente com os trabalhos realizados em zonas urbanas e afins.

Um documento complementar ao PARAE chamado "Adendo", foi desenvolvido e nele se incluiu informações específicas de uma obra ou serviço com: fotografias, croquis e informações detalhadas do local dos serviços radiográficos, bem como, procedimentos de radioproteção para aquele local, o qual deve ser apresentado para apreciação da CNEN antes do início dos trabalhos de cada obra.

Algumas das características específicas e/ou regras especiais, definidas no documento PARAE, para a realização de trabalhos em "Zonas Urbanas e Afins", são citadas a seguir:

- A atividade da fonte de Irídio não deve ultrapassar a 0,814 TBq (22Ci).
- Neste tipo de trabalho, as radiografias devem ser realizadas dentro de valas ou com anteparos de aduelas de concreto.
- Só podem executar os serviços, operadores e responsáveis por instalações

abertas, que estejam qualificados pela CNEN.

- Os serviços devem ser realizados preferencialmente, entre as 23 e 5 horas da manhã, horário de menor circulação de indivíduos do público.
- A parte superior da tubulação deve ficar no mínimo a 60 cm de distância da superfície da vala.
- Valas com profundidade acima de 1,5 m devem fornecer meios seguros e condições de acesso e operação, como escadas, escoras, etc.
- Para tubulações com diâmetro superior a 45 cm (18") deve-se observar as condições (profundidade e largura) estabelecidas pelo projeto de construção da obra. Deve ser previsto em Adendo.
- Quando a vala não estiver seca deve ser colocada forração no fundo tal como, plásticos, tapumes, sacos de areia, ou outro tipo de forração, de forma a permitir a execução segura dos serviços.
  
- A sinalização de área deve ser realizada com:
  - a) Cordas ou faixas;
  - b) Placas de sinalização com símbolo internacional de presença de radiação;
  - c) Sinais luminosos para serviços noturnos;
  
- Para se fazer face à situação de emergência a instalação deve possuir:
  - a) Recipiente de emergência com capacidade para receber a fonte de radiação;
  - b) Pinça de no mínimo 1 (um) metro de comprimento;
  - c) Blindagens adicionais de chumbo do tipo placa ou calha, que atenuem no mínimo 16 vezes a radiação;
  - d) Funil adaptado para o recipiente de emergência;
  - e) Ferramentas apropriadas, tais como: alicate, arco de serra, chave de fenda, etc.;
  - f) Medidor individual de leitura direta na faixa de 0 a 500 mR, acompanhado do carregador ou preferencialmente BIP integrador;
  - g) No Estado do Brasil, onde estiver sendo realizada a operação de radiografia industrial, deve estar disponível pelo menos um medidor de radiação portátil com escala de 1,0 R/h (250  $\mu$ C/Kg.h) a 10,0 R/h (2,5

- mC/Kg.h) ou em número maior, a critério da CNEN;
- h) Na sede do serviço deve existir um medidor de radiação capaz de medir taxas de exposição até 50 R/h (12,5 mC/Kg.h), ou em número maior, a critério da CNEN.
  - i) Para a realização dos trabalhos objeto deste Plano devem ser destinados os melhores profissionais e equipamentos da empresa.

### 2.2.1- Equações utilizadas pelo PARAE

Para a estimativa das taxas de dose em operações de rotina, nas radiografias realizadas dentro da vala foi utilizado as equações propostas no PARAE. Estas equações foram desenvolvidas com base em algumas considerações, que caracterizam uma típica situação de trabalhos de gamagrafia industrial realizados em Zonas Urbanas e Afins.

A Figura 2.1, apresenta um modelo equivalente ao que foi considerado para a elaboração das equações utilizadas no PARAE. Na Figura 2.1 pode-se visualizar uma vala com 100 cm de largura e a superfície externa superior da tubulação a 60 cm da superfície do solo. A linha de isolamento transversal à vala foi definida a uma distância de 2,5m do eixo vertical do centro da vala. O ponto determinado para a estimativa da taxa de dose na linha de isolamento transversal para uma das equações foi a um metro de altura do solo (taxa de dose para as gônadas, a 1m de altura, na linha de isolamento).

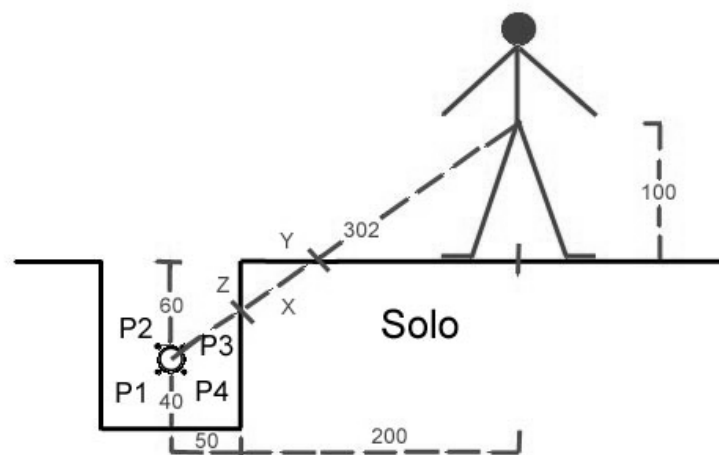


Figura 2.1 – Modelo equivalente ao apresentado no PARAE - linha de isolamento transversal

A Figura 2.1 apresenta uma junta, com quatro exposições P1, P2, P3 e P4, com a mesma camada de solo como atenuadora (**X**), sendo que em três (3) das exposições considerou-se também a atenuação de um colimador (Fator de Transmissão do Colimador (**C**) igual a: 1/17).

Por “Equivalência de Triângulos”, encontra-se o valor da camada do solo que a radiação atravessa (**X**). Com o valor de (**X**), pode-se calcular o Fator de Transmissão (**S**), da camada do solo. O Fator de Transmissão é definido como “o inverso do fator de atenuação”.

Cálculo de (**X**), por equivalência de triângulos tem-se:

$$1^{\text{a}} \text{ equação: } 50/Y = (70 - Z) / Z \quad (2.1)$$

$$2^{\text{a}} \text{ equação: } 100/Z = (200 - Y) / Y \quad (2.2)$$

Determina-se o valor de y e de z e por conseguinte o valor de X

Para a utilização nos cálculos de Fator de Transmissão (**S**), da camada do solo, bem como para os cálculos do Fator de Redução (**F**) da Tubulação, o PARAE fornece alguns coeficientes de atenuação linear ( $\mu$ ) em  $\text{cm}^{-1}$ , para fótons com energia igual a 380 keV (energia média dos raios gama emitidos por uma fonte de Irídio 192), para alguns materiais conforme mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Valores dos coeficientes de atenuação linear,  $\mu$ , para fótons com energia média igual a do Irídio192, 380 keV [13]

Valores de $\mu$ (em $\text{cm}^{-1}$ ) de alguns materiais atenuadores para o (Irídio-192)							
Aço	Água	Alumínio	Chumbo	Concreto	Solo	Tijolo	Urânio
0,650	0,133	0,227	1,640	0,204	0,116	0,135	3,290

O Fator de Transmissão (**S**) da camada do solo estabelecida no PARAE é definido pela equação 2.3

$$S = \frac{1}{2^{\mu \cdot X / \ln 2}} \quad (2.3)$$

Onde:

S - Fator de Transmissão;

$\mu$  - Coeficientes de atenuação linear, em ( $\text{cm}^{-1}$ );

X - Camada do solo que a radiação é atenuada, em (cm);

O fator de redução (F), representa o fator que se deve multiplicar um dado valor da intensidade de uma radiação, para se obter seu novo valor, com uma diminuição efetiva, após a radiação ter atravessado um meio material. É representada pela equação [2.4]:

$$F = 2^{\mu \cdot X / \ln 2} \quad (2.4)$$

Onde:

F - Fator de Redução;

X - Espessura da Tubulação (cm);

Tanto para o cálculo do Fator de Transmissão (S) do solo como para o cálculo do Fator de Redução (F) da Tubulação faz-se necessário a determinação dos coeficientes de atenuação linear  $\mu$  em ( $\text{cm}^{-1}$ ), do solo e do aço, respectivamente.

O documento PARAE, não informa a origem dos valores densidades dos materiais apresentados na Tabela 2.1, tampouco apresenta os valores das densidades dos materiais, e suas composições.

Os valores dos coeficientes de atenuação linear adotados no presente trabalho foram calculados a partir dos valores das camadas semiredutoras do aço e do solo e suas respectivas densidades, com os dados apresentados na publicação do número 33 da ICRP [29], (Tabela 2.2). Obteve-se então os valores de  $0,108 \text{ cm}^{-1}$  e  $0,533 \text{ cm}^{-1}$  para os coeficientes de atenuação lineares do solo e do aço respectivamente.

Tabela 2.2: Camada semirredutora (CSR) e decirredutora (CDR), para radiação  $\gamma$  proveniente da fonte de  $^{192}\text{Ir}$ , [29]

<b>Material de Blindagem (densidade)</b>	<b>CSR (HVL)*</b>	<b>CDR (TVL)**</b>
Chumbo ( $\rho = 11,3 \text{ g.cm}^{-3}$ )	0,6 cm	1,9 cm
<b>Aço</b> ( $\rho = 7,8 \text{ g.cm}^{-3}$ )	<b>1,3 cm</b>	4,3 cm
Concreto ( $\rho = 2,35 \text{ g.cm}^{-3}$ )	4,1 cm	13,5 cm
<b>Solo</b> ( $\rho = 1,5 \text{ g.cm}^{-3}$ )	<b>6,4 cm</b>	21,2 cm

\* *Half Value Layer* (camada semirredutora)

\*\* *Tenth Value Layer* (camada decirredutora)

### 2.2.1.1- Equações para as taxas de dose na linha de isolamento transversal

As equações fornecidas pelo PARAE estimam a taxa de exposição. Para calcular a taxa de dose recebida por uma pessoa utilizando as equações do PARAE, primeiramente, é necessário converter a taxa de exposição em taxa de dose absorvida no ar. Para tal, se utiliza o fator de 0,876, que corresponde à energia média para a formação de um par de íons no ar dividido pela carga de um elétron. Para se calcular a taxa de dose absorvida no corpo de um indivíduo, deve-se transformar a taxa de dose absorvida no ar, para a taxa de dose absorvida na água, visto que o corpo humano é composto de 70% de água. Esta conversão é obtida quando se relaciona os coeficientes de absorção em energia da água e do ar. Para a energia de 400 keV este fator é de 1,1, conforme apresentado em literatura [30]. Logo, o fator de correção da taxa de exposição no ar para a taxa de dose absorvida no corpo humano será o produto entre os fatores: 0,876 e 1,1 que é igual a: 0,96, valor bem próximo a 1 (um).

Para radiações gama, a taxa de dose absorvida no ar é igual à taxa de exposição no ar multiplicado pelo fator 0,876 que corresponde à energia média para a formação de um par de íons no ar dividido pela carga de um elétron.

Como se trata de radiação gama e portanto sabe-se que o fator de correção de exposição para taxa de dose é um fator bem próximo do valor 1 (um) e principalmente por se tratar de cálculos com fins para análises de radioproteção, o documento PARAE assumiu o fator 1 (um) como fator de correção entre a taxa de exposição e a taxa de dose. Este trabalho acompanhará o PARAE, assumindo também como fator de correção



o valor 1 (um).

As equações apresentadas pelo PARAE [13], para o cálculo das taxas de dose resultantes das exposições das quatro radiografias realizadas em uma junta (radiografias realizadas em uma emenda da tubulação, pontos 1, 2, 3 e 4) e da taxa de dose total, na linha de isolamento transversal (Figura 2.7), são apresentadas a seguir:

Equação da taxa de dose quando a fonte encontra-se nos pontos 1 e 4:

$$T_{D1,4} = \frac{\Gamma \times A \times S}{d^2 \times 2F} \quad (\text{pontos 1 e 4}) \quad (2.5)$$

Equação da taxa de dose quando a fonte encontra-se nos pontos 2 e 3:

$$T_{D2,3} = \frac{\Gamma \times A \times S \times C}{d^2 \times F} \quad (\text{pontos 2 e 3}) \quad (2.6)$$

A taxa de dose total transversal será o somatório das taxas de dose dos 4 pontos:

$$T_{DTT} = T_{D1} + T_{D2} + T_{D3} + T_{D4} \quad (2.7)$$

Onde:

$T_{DTT 1, 2, 3 \text{ e } 4}$  - Taxas de dose no ponto de interesse (gônadas) referente ao posicionamento da fonte nos pontos: 1, 2, 3 e 4

$\Gamma$  - Constante específica de transformação da atividade em dose, exposição, para a fonte de Ir 192. (500 mR.m<sup>2</sup>/h.Ci), denominada Gamão

$A$  - Atividade da fonte em (Ci), sendo a máxima de: 22Ci

$C$  - Fator de transmissão do colimador

$F$  - Fator de redução da tubulação

$S$  - fator de transmissão do solo

$d$  - distância do ponto de interesse, gônadas, à fonte, subtraindo-se à distância percorrida pela radiação no solo, em (m)

### 2.2.1.2- Equações para as taxas de dose na linha de isolamento longitudinal

Para a simulação da taxa de dose na linha de isolamento longitudinal, a 8,178 m da fonte (Figura 2.2), considera-se que as exposições referentes à localização da fonte nos pontos 1 e 4 estão sendo atenuadas por duas paredes da tubulação (2F). Para a taxa de dose no ponto de interesse (8,178 m), pode-se considerar os dois pontos (P1 e P4) com a fonte sem colimador, praticamente não existindo a ação do colimador.

Para os pontos 2 e 3, considera-se que as exposições estão sendo atenuadas por uma parede da tubulação (F), existindo ainda a ação do colimador (C), fator de transmissão igual a 1/17.

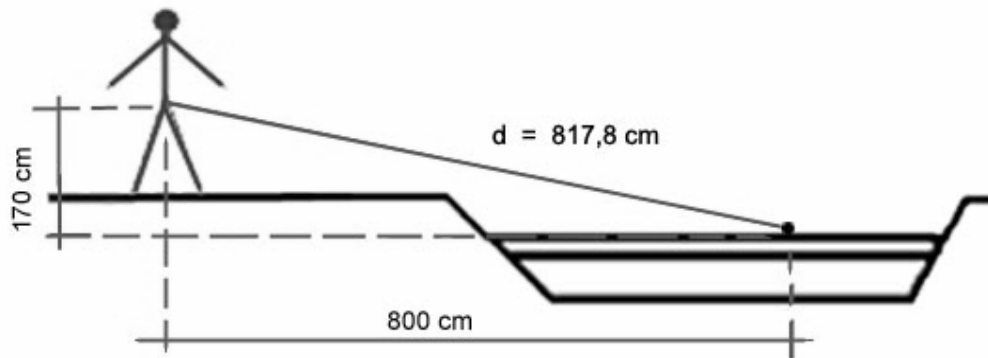


Figura 2.2 - Linha de Isolamento longitudinal, a 817,8 cm da Fonte.

Equações apresentadas pelo PARAE, para o cálculo das taxas de dose resultantes das exposições das quatro radiografias realizadas em uma junta (radiografias realizadas em uma emenda da tubulação, pontos 1, 2, 3 e 4 da Figura 2.1) e da taxa de dose total, na linha de isolamento longitudinal (Figura 2.2) são apresentadas a seguir. Nestas equações, o fator de transmissão do solo (S) não é utilizado, visto que se considera o caminho que a radiação percorre entre a fonte e o ponto de interesse (817,8 cm), um caminho livre em linha reta.

Equação da taxa de dose quando a fonte encontra-se nos pontos 1 e 4:

$$T_{DL1,4} = \frac{\Gamma \times A}{d^2 \times 2F} \quad (\text{pontos 1 e 4}) \quad (2.8)$$

Equação da taxa de dose quando a fonte encontra-se nos pontos 2 e 3:

$$T_{DL2,3} = \frac{\Gamma \times A \times C}{d^2 \times F} \quad (\text{pontos 2 e 3}) \quad (2.9)$$

A taxa de dose longitudinal total será o somatório das taxas de dose dos 4 pontos:

$$T_{DLT} = T_{D1} + T_{D2} + T_{D3} + T_{D4} \quad (2.10)$$

Onde:

$T_{DLT=1,2,3+4}$  Taxa de dose no ponto de interesse (gônadas) referente às exposições da fonte nos pontos: 1, 2, 3 e 4.

d - distância do ponto de interesse, gônadas, à Fonte, em metros.

### 2.2.1.3- Equação para a dose em uma situação de acidente

Supondo um acidente onde um “Indivíduo do Público” ou um “Trabalhador”, ficou exposto a uma Fonte de Ir-192 (Ponto P5, Figura 2.3), durante 2 minutos, tem-se:

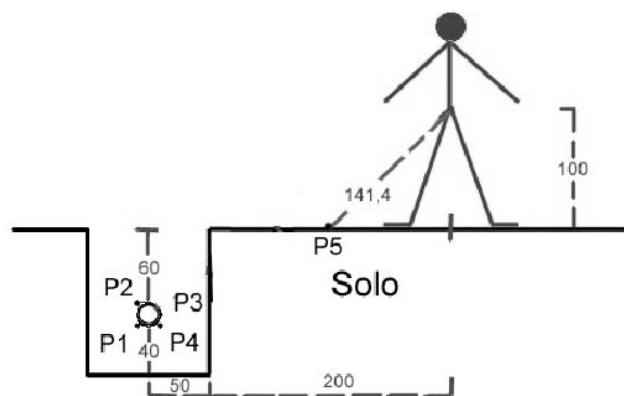


Figura 2.3 - Exposição a uma Fonte de  $^{192}\text{Ir}$  (Ponto P5), considerando uma situação de acidente (medidas em cm).

Cálculo da distância do ponto de interesse (gônadas) à fonte, (d):

$$d^2 = 100^2 + 100^2 \quad \therefore d = 141,42\text{cm} = 1,41\text{m} \quad (2.11)$$

A equação da exposição em uma situação de acidente, (dose nas gônadas) segundo o PARAE é dado por:

$$D_s = \frac{\Gamma \times A \times t}{d^2} \quad (2.12)$$

### 2.3- Método de Monte Carlo

Ao longo dos últimos anos, a solução de problemas na área de ciências radiológicas utilizando-se as técnicas de Monte Carlo tem crescido significativamente [31,32]. Este fenômeno pode ser notado pela crescente quantidade de publicações científicas nas áreas médicas e biológicas desde a década passada, e está relacionado ao rápido desenvolvimento de computadores cada vez mais velozes e acessíveis aos investigadores nestas áreas de pesquisas.

O método de Monte Carlo pode ser usado para representar teoricamente um processo estatístico, tal como a interação da radiação com a matéria, sendo particularmente útil em problemas complexos que não podem ser simulados por métodos determinísticos. Neste método, os eventos probabilísticos individuais que compreendem um processo são simulados seqüencialmente.

As distribuições de probabilidade que governam estes eventos são amostrados estatisticamente para descrever o fenômeno que está sendo simulado. Este processo de amostragem estatística é baseado na seleção de números aleatórios. No transporte dos fótons da radiação, a técnica de Monte Carlo consiste em seguir cada fóton desde a fonte, ao longo de sua vida até a sua morte (escape, absorção etc.).

#### 2.3.1 O código de transporte de radiação MCNP

O código de transporte de radiação Monte Carlo N-Particle, MCNP [15]

representa um dos códigos mais utilizados em todo o mundo, na área do transporte de radiação. A capacidade que possui de realizar o tratamento de geometrias complexas e o grande número de opções de dados de entrada fazem com que este código represente uma excelente ferramenta nos campos da proteção radiológica, cálculos em instalações nucleares, construções de detectores e blindagem das radiações em geral.

O código MCNP foi originalmente desenvolvido no *Los Alamos National Laboratory* (LANL), situado nos Estados Unidos, durante o Projeto Manhattan, nos anos 40. Ele executa o transporte por meio de ensaios aleatórios repetitivos através de técnicas estatísticas, em modelos previamente determinados, permitindo a obtenção de soluções de vários problemas que requerem uma grande quantidade de eventos probabilísticos. Este código permite modelar qualquer sistema geométrico tridimensional utilizando bibliotecas de seções de choque na forma pontual (energia contínua) sendo discreta ou em multigrupos.

A versão MCNP5 simula nêutrons, fótons e elétrons no intervalo de energia entre  $10^{-11}$  MeV a 100 MeV para nêutrons, 1 keV a 100 GeV para fótons e 1 keV a 1 GeV para elétrons. O MCNP5 pode ser utilizado para diferentes modos de transporte: nêutrons somente, fótons somente, elétrons somente, transporte combinado de nêutrons e fótons, onde os fótons são produzidos pelas interações dos nêutrons, nêutron/fóton/elétron, fóton/elétron ou elétron/fóton. Para nêutrons, todas as reações dadas em uma seção de choque particular são quantificadas. Nêutrons térmicos são descritos por ambos os modelos do gás livre e modelo  $S(\alpha,\beta)$ . O modelo de tratamento de nêutrons térmicos  $S(\alpha,\beta)$  é uma representação completa do espalhamento de nêutrons térmicos por moléculas e sólidos cristalinos. Para fótons, o código considera espalhamento coerente e incoerente, a possibilidade de ocorrer fluorescência após absorção fotoelétrica, absorção em produção de pares com emissão local de radiação de aniquilação e *bremstrahlung* (radiação de frenagem). O transporte de elétrons inclui pósitrons, raios-X de captura K e *bremstrahlung*, mas não inclui campos externos ou auto-induzidos. Outras características importantes que faz o MCNP5 muito versátil e fácil para uso incluem poderosos comandos para geração do termo fonte, fontes para cálculo de criticalidade, fontes superficiais e fontes inseridas em células volumétricas, recursos para visualização da geometria de irradiação e arquivos de saída, uma rica coleção de técnicas de redução de variância, uma extensiva coleção de bibliotecas de seções de choque e uma estrutura flexível para cálculo das grandezas de interesse.

O arquivo de entrada do MCNP (INP), permite ao usuário especificar: tipo de

fonte, de detector, configuração geométrica e condições gerais do sistema desejado, como tamanho, forma, espectro de energia, composição da fonte de radiação bem como do meio que a radiação irá interagir e definição da geometria do detector desejado.

## 2.3.2- Estrutura do código MCNP

### 2.3.2.1- Estrutura dos dados de entrada do MCNP

A estrutura geral de um arquivo de entrada com os dados de entrada é dividido em:

Título do Problema:

Primeira linha dos dados de entrada, limitada a 80 colunas (como as demais linhas).

Bloco de Células - “*CELL Cards*”

Dados de entrada onde é definida a geometria do problema. Utilizam-se combinações de formas geométricas pré-determinadas, como esferas, elipsóides, planos, cubos e outras formas selecionadas e descritas no item subsequente (*Surface Cards*). A combinação das regiões é realizada, através de operadores booleanos (intercessões, uniões etc.). Os materiais que compõem a geometria do problema, também são definidos nestas células.

Linha em Branco (finalização da seção)

Bloco de Superfície – “*SURFACE Cards*”

Para a definição das superfícies geométricas do problema são utilizados caracteres mnemônicos indicando o tipo de superfície e os coeficientes da equação da superfície selecionada.

Linha em Branco (finalização da seção)

Blocos de Dados - “*DATA Cards*”

Dados de entrada onde se define os parâmetros da física do problema. Esta seção é dividida em vários subitens, a saber:

### *“MODE Cards”*

Definição do tipo de radiação que será utilizado no problema:

- (N)- Transporte de nêutrons
- (N P)- Transporte de nêutrons e fótons
- (P)- Transporte de fótons
- (E)- Transporte de elétrons
- (P E)- Transporte de fótons e elétrons
- (N P E)- Transporte de nêutrons, fótons e elétrons

### *“IMP Cards”*

Célula de importância.

IMP: N ou P ou E é o mnemônico que determina a importância da célula, para finalizar a história da partícula ou separar as regiões de maior importância. Regiões de menor importância são representadas por (0) e maior importância por (1).

### *“SOURCE Cards”*

Célula que defini parâmetros da fonte de radiação.

Local onde são definidos: posição da fonte, tipo de partícula, energia e outros dados que possam caracterizar uma fonte de radiação.

### *“TALLY Cards”*

Opção da grandeza de interesse a ser utilizada nos resultados.

Define o tipo de resposta que se deseja na saída. Através do uso de seu mnemônico correspondente tem-se uma variação de possibilidades apresentada na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Tally Card – Opção das grandezas para os resultados do MCNP

<b>Tipo<sup>a</sup></b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
<b>F1:</b> (N,P,E)	<b>Corrente integrada sobre uma superfície</b>	Número de partículas que atravessam uma superfície
<b>F2:</b> (N,P,E)	<b>Fluência média sobre uma superfície</b>	partículas/cm <sup>2</sup>
<b>F4:</b> (N,P,E)	<b>Fluência média sobre uma célula</b>	partículas/cm <sup>2</sup>
<b>F5:</b> (N,P)	<b>Fluência média em um detector pontual</b>	partículas/cm <sup>2</sup>
<b>F6:</b> (N,P,E)	<b>Energia média depositada em uma célula</b>	MeV/g
<b>F8:</b> (P,E)	<b>Distribuição de pulsos de energia criados em um detector</b>	Pulsos

(<sup>a</sup>) (N=Nêutrons; P=Fótons; E=Elétrons)

Neste trabalho foi utilizado o comando **Tally F5**, que registra a fluência de partículas e/ou fótons, em um ponto ou região do espaço e **Tally \*F8**, que calcula a energia depositada em um órgão ou tecido do corpo.

Linha em Branco (finalização dos dados de entrada)

Neste trabalho, não estão sendo apresentadas todas as opções, ferramentas, existentes para os dados de entrada de um problema que utilize o código MCNP. Procurou-se descrever as principais ferramentas, no intuito de fornecer uma idéia, das possibilidades e necessidades existentes na construção de um arquivo de entrada do código MCNP.

### 2.3.2.2- Dados de saída, resultados do MCNP

Os resultados da simulação de um problema no código MCNP corresponde à média de um grande número de variáveis, ordem de  $10^6$  “histórias” ou mais, dependendo somente da precisão que se deseja obter na resposta do problema. O número de “histórias” que será utilizado no problema deve ser definido no arquivo de dados de entrada.

Todas as grandezas, resultados calculados no MCNP são representados nos arquivos dos dados de saída seguidos pelo valor do “erro relativo” (R), que representa o desvio padrão de valores médios sobre a média verdadeira de todas as “histórias”, dado pela equação 2.13.



$$R \cong S_{\bar{X}} / \bar{X} \quad (2.13)$$

Onde,

R = Erro Relativo

$S_{\bar{X}}$  = Desvio Padrão das Médias

$\bar{X}$  = Média do Total das “Histórias”

#### 2.4- Modelos antropomórficos de exposição

Os modelos antropomórficos são incorporados a códigos computacionais para simular e calcular a energia depositada em órgãos e tecidos do corpo humano em consequência à exposição deste à radiação ionizante. Estes, podem representar a anatomia do corpo humano, com informações sobre a densidade, composição química, forma, tamanho e localização dos órgãos.

Após a publicação 23 do ICRP [33], onde foi apresentado a compilação do “Homem Referência,” Snyder e colaboradores [34, 35] desenvolveram um fantoma que ficou conhecido como ‘fantoma MIRD5’ [Medical Internal Radiation Dose Committee (MIRD) pamphlet no 5]. O fantoma MIRD5 tem sido a base de várias derivações representando recém-nascidos e crianças de várias idades [36], fantasmas adultos de gênero específico [37] e um fantoma adulto de mulher grávida [38]. A estatura e o peso do corpo, assim como a massa dos órgãos desses fantasmas do tipo MIRD estão de acordo com os dados do Homem de Referência (ICPR 1975). A Figura 2.4 mostra duas versões dos fantasmas derivados do modelo (MIRD5), conhecidos sob os nomes de ADÃO e EVA [37,53].

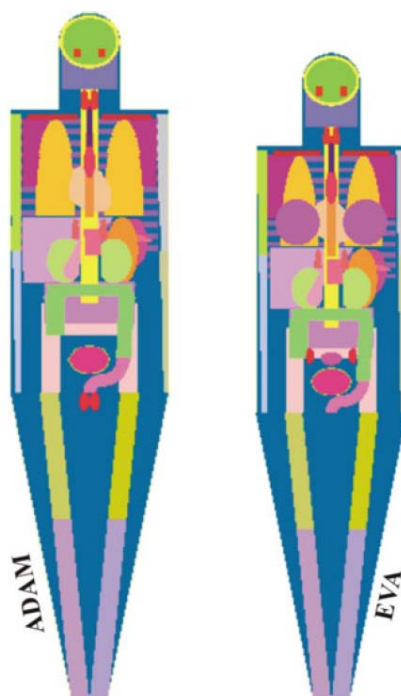


Figura 2.4 - Fantomas matemáticos adultos do tipo MIRD5: ADÃO e EVA.[37]

A maior parte dos dados dosimétricos para humanos adultos publicados pela ICRP – 1996, e pela ICRU em 1998 foram compilados a partir de fantomas do tipo MIRD5. Atualmente, fantomas tomográficos ou de voxel representam o passo mais recente na melhoria dos modelos de fantomas apresentados.

Fantomas tomográficos se baseiam em imagens digitais e são elaborados a partir de resultados de varredura de pessoas reais, por meio de tomografia computadorizada (TC) ou por ressonância magnética (RM), que mostram áreas de seção, vistas de topo, ao longo do corpo do indivíduo a ser analisado. Estes modelos constituem o último aperfeiçoamento dos modelos computacionais para exposição. Comparados aos fantomas matemáticos, os fantomas de voxel são mais fiéis às representações reais do corpo humano.

Fantomas tomográficos ou de voxel foram introduzidos por Gibbs e colaboradores [39] e de forma independente também por Williams e colaboradores [40]. Esforços foram realizados por Veit e colaboradores [41], para o desenvolvimento de fantomas de voxel de bebês e crianças bem como uma versão ‘voxelizada’ do fantoma Alderson-Rando [42]. Posteriormente, Zankl e Wittmann e também Petoussi-Henss e seus colaboradores produziram uma família inteira de fantomas [43, 44].

Doses equivalentes em órgãos e tecidos de fantomas humanos são geralmente

calculadas pelo método de Monte Carlo e os resultados são normalizados para serem compatíveis com quantidades mensuráveis. A razão entre a grandeza de interesse e uma grandeza mensurável é chamada de coeficiente de conversão (CC) que, geralmente, é dependente da energia e da distribuição direcional do campo de radiação.

#### 2.4.1- Fantoma tomográfico

Um fantoma tomográfico é uma matriz tridimensional de pequenos voxels (pixels de volume) aos quais, dependendo de sua localização, números de identificação (ID) de volume do órgão, são designados por segmentação. O número médio de ID, a composição elementar e a densidade que definem o material para preencher um voxel, têm ainda que ser definidos pelo usuário. As composições do tecido e as densidades dos materiais usados para a construção do fantoma MAX se basearam no Relatório ICRU 44 [45] e são mostradas na Tabela 2.4. A composição e densidade do tecido mole foram calculadas pela média dos dados do encéfalo, cólon, coração, rins, fígado, pâncreas, baço, testículos e tireóide.

Tabela 2.4: Frações das massas dos tecidos (em %) e densidades baseadas no ICRU 44

Nº Atômico	1	6	7	8	11	12	15	16	17	19	20	26	53	Densid.
Símbolo	H	C	N	O	Na	Mg	P	S	Cl	K	Ca	Fé	I	(g.cm <sup>-3</sup> )
Tecido mole	10.5	12.5	2.6	73.5	0.2		0.2	0.18	0.22	0.21	0.01	0.01	0.01	1.05
Adiposo	11.4	59.8	0.7	27.8	0.1			0.1	0.1					0.95
Pulmão	10.3	10.5	3.1	74.9	0.2		0.2	0.3	0.3	0.2				0.26
Músculo	10.2	14.3	3.4	71.0	0.1		0.2	0.3	0.1	0.4				1.05
Pele	10.2	0.4	4.2	64.5	0.2		0.1	0.2	0.3	0.1				1.09
Cartilagem	9.6	9.9	2.2	74.4	0.5		2.2	0.9	0.3					1.1
Osso	3.4	15.5	4.2	43.5	0.1	0.2	10.3	0.3			22.5			1.92
Medula O.Verm.	10.5	41.4	3.4	43.9			0.1	0.2	0.2	0.2		0.1		1.03
Medula O.Amar.	11.5	64.4	0.7	23.1	0.1			0.1	0.1					0.98

#### 2.4.2– Desenvolvimento do modelo anatômico baseado em imagens

Na construção de um modelo anatômico através de imagens por tomografia, a qualidade original dos dados é crucial para a fiel representação das estruturas corporais

internas. As imagens fornecem informações detalhadas da anatomia do corpo humano. Uma fatia de imagem, quando computadorizada, representa uma matriz de pixels em uma geometria de duas dimensões. Por multiplicação do tamanho do pixel pela fatia da espessura de uma imagem, obtém-se o elemento tridimensional, o voxel. A Figura 2.5a, mostra os passos envolvidos no desenvolvimento de um modelo anatômico de corpo humano através de imagens para cálculos de dosimetria. A dimensão de pixels de cada imagem bidimensional depende da resolução escolhida durante a opção de varredura para a obtenção do conjunto original de imagens CT.

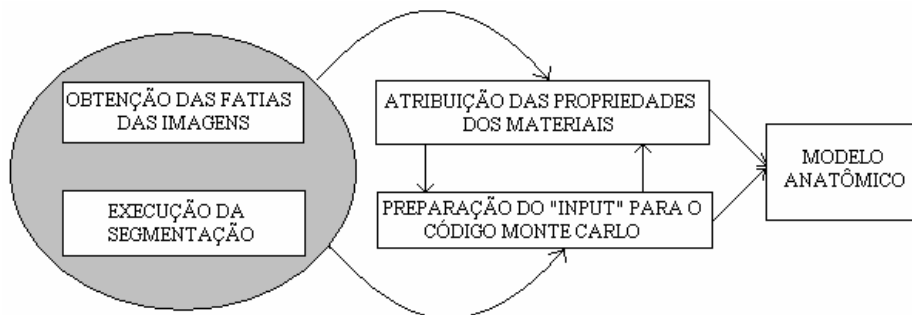


Figura 2.5a - Etapas da construção de um modelo dosimétrico para corpo inteiro [49].

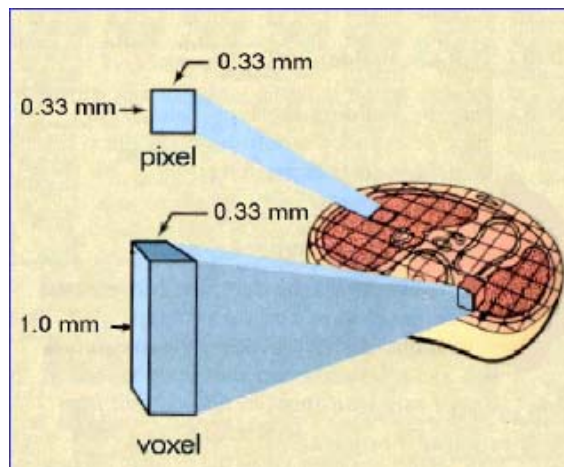


Figura 2.5 b- Fatia de imagem computadorizada, mostrando uma matriz de pixels.[37, 53]

Em geral as imagens são quadradas, contendo 512 x 512 pixels, (Figura 2.5 b). Para que se chegue a um conjunto consecutivo de imagens transversais ideais para uso em dosimetria numérica, o conjunto original sofre alguns processos de transformação como segmentação, classificação e reamostragem. O procedimento chamado segmentação, aplica-se ao processamento de rotinas para interpretar os dados das cores de uma varredura dentro de um tipo de tecido existente dentro do corpo. A partir das imagens tomográficas originais, novas imagens de todos os cortes podem ser

construídas, onde vários contornos de órgãos podem ser reconhecidos, através das diferenças nos tons de cinza.

A Figura 2.6, mostra a diferença entre as imagens antes e depois da segmentação [49]. Os novos valores de cinza, usados na construção de imagens segmentadas, não fornecem mais informação a respeito das densidades de cada voxel; ou seja, o órgão passa a ser visto de forma homogênea.

A maioria dos órgãos não possui uma grande variação de densidade de um voxel para o outro, não ocasionando perda significativa de informação. Com base nisso, são utilizados seis diferentes tecidos para a construção dos modelos, que são:

Tecido pulmonar; Tecido mole; Pele; Músculo; Ossos compactos (ossos); Medula óssea e Ar.



Imagem 1



Imagem 2

Figura 2.6- Imagem 1: Fatia de uma imagem de tomografia computadorizada.[37, 51, 53]

Imagem 2: A mesma imagem após o processo de segmentação.[37, 51, 53]

Uma vez que o órgão ou tecido é segmentado, são associados voxels então rotulados com o número ID (classificação) específico daquele órgão. Estes IDs estão relacionados com uma tabela de cores do sistema operacional ou do usuário. Neste caso as regiões segmentadas são órgãos e tecidos de maneira que todos os voxels que pertençam a um mesmo órgão ou tecido possuam o mesmo ID [50,51]. Estes voxels quando totalmente reunidos constituem um modelo para a representação de corpo inteiro, que pode ser lido e importado para o código Monte Carlo para a simulação do transporte de radiação.

## CAPÍTULO 3

### Metodologia

#### 3.1- Cenários selecionados

Para a intercomparação entre os valores encontrados nos cálculos com as equações do (PARAE), as simulações com Monte Carlo e os resultados experimentais foram selecionados cenários e situações apresentadas no levantamento radiométrico realizado.

Na época da última revisão do PARAE [14], nos trabalhos realizados em zonas urbanas e afins, para cada junta (solda em toda a circunferência de uma emenda da tubulação) eram realizadas quatro radiografias. Com a evolução das técnicas radiográficas e também dos filmes radiográficos, com novos tipos e modelos, as empresas, hoje em dia, podem realizar somente três radiografias por junta, obtendo a mesma qualidade na inspeção do que quando realizavam quatro radiografias. Para as intercomparações entre os cálculos teóricos, MCNP e resultados experimentais foram adotados o sistema de inspeção, que considera somente três radiografias por junta.

Para a realização da intercomparação faz-se necessário a definição de quais os parâmetros deverão ser mantidos iguais entre os processos utilizados (PARAE, MCNP e resultados experimentais). Este foi o principal motivo para se tomar como orientação, na determinação dos cenários, os parâmetros utilizados nos levantamentos radiométricos realizados.

Parâmetros que devem ser mantidos constantes entre os três processos:

- Atividade da fonte
- Dimensões da vala e da tubulação
- Distância da linha de isolamento, ao eixo central da vala, posicionamento do medidor de radiação (levantamento radiométrico), do detector pontual (simulação MCNP) e do ponto de interesse (cálculos PARAE)

- Posicionamento da fonte nas três radiografias realizadas para cada junta (pontos P1, P2 e P3)
- Posicionamento da fonte em relação às gônadas, para o cenário do acidente proposto (PARAE e MCNP)

### 3.1.1- Primeiro levantamento radiométrico

Foram realizadas medidas nas linhas de isolamento transversais e longitudinais, com o medidor de radiação, do tipo “Geiger-Müller”, fabricante Dosimeter, modelo 3100, devidamente calibrado e aferido pelo usuário antes do início das medidas. O medidor foi posicionado próximo ao corpo do operador, a um metro (1m) de altura do solo. Para cada ponto do levantamento foram realizadas cinco leituras e anotado os valores médios entre as mesmas. Não tendo havido maiores discrepâncias entre nenhuma das leituras e os valores médios anotados. As medidas foram realizadas para as três exposições da solda de uma tubulação de aço, P1, P2 e P3.

As medidas realizadas na linha de isolamento longitudinal, talvez não representem com fidelidade a taxa de dose a 8,18 m de uma exposição no ar, visto que as margens da vala onde foi realizado o levantamento radiométrico não se apresentavam como linhas totalmente retas. Conseqüentemente, em uma extensão de aproximadamente 8 m de vala, parte da radiação deve ter sido atenuada por irregularidades das paredes da vala; irregularidades essas impossíveis de se quantificar, impedindo assim que se realize as devidas correções nos cálculos teóricos e nas simulações do código MCNP.

Os dados e informações do levantamento radiométrico, que não interessam para este trabalho, estão devidamente modificados, evitando assim qualquer possibilidade de identificação da instalação aberta, obra em questão, local, equipamentos utilizados, mantendo a total impossibilidade da identificação da empresa que executava o trabalho onde foram realizados os levantamentos radiométricos.

Dados do primeiro levantamento radiométrico de interesse para este trabalho:

- Data: 01/02/2006;
- Fonte: Ir 192; atividade: 20,72 Ci;
- Material radiografado: Tubulação; diâmetro: 8”; espessura: 5 mm;

- Colimador FR: 17;
- N.º de filmes/junta: 03.

Os dados do primeiro levantamento radiométrico realizado estão apresentados na Tabela 3.1, na Figura 3.1 e na Tabela 3.2 representando a forma usual que as empresas utilizam para registrar seus levantamentos radiométrico realizados em zonas urbanas e afins.

Tabela 3.1 - Dados do primeiro levantamento radiométrico

Obra: Interligação Av. xxxxxxxxxx		Data: 01/02/2006
Adendo: 009/2005		Frente: 4 (ERP)
Endereço: Av. xxxxxxxxxxxxxx		Bairro: Casa Verde
Município: São Paulo		UF: SP
Irradiador: xxxxx	Fonte: IrS xxxx	Atividade: 20,72 Ci
Geiger: Dosimeter	Modelo: 3100	Patrimônio: xxxxx
Material Radiografado: Tubulação		Material: aço carbono
Técnica Radiográfica: PDVS		N.º de juntas: 02
Diâmetro: 8" $\cong$ 20 cm		Espessura: 5 mm
N.º de filmes/junta: 03	Tempo de exposição/filme: -----	
Colimador FR: 17	Placas de Pb: - - -	



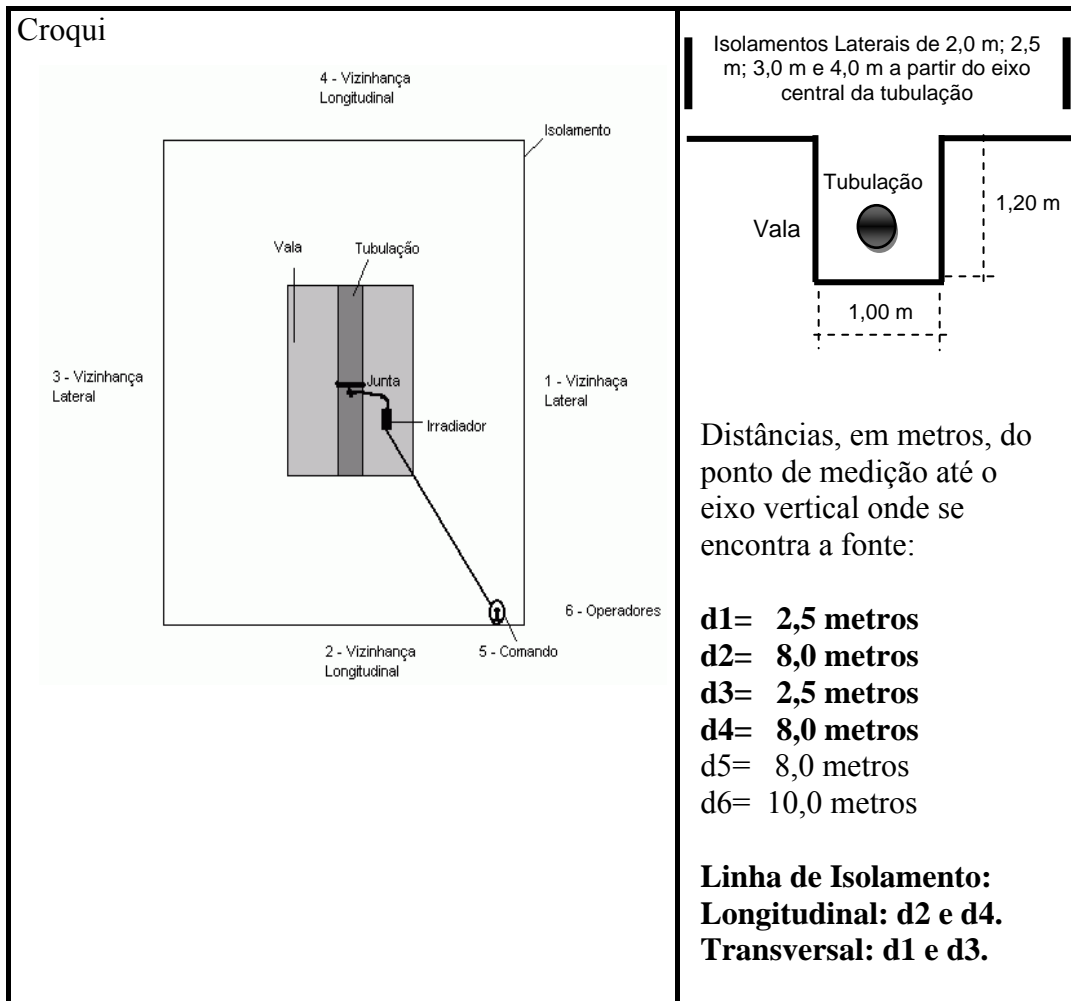
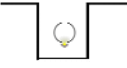
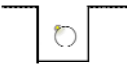
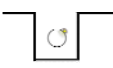


Figura 3.1 – Croqui do primeiro levantamento radiométrico.

Tabela 3.2: Resultados das leituras do primeiro levantamento radiométrico

Posição da Fonte	Local de medição ao redor da área isolada			
	Taxas de Exposição ( x 10 <sup>-2</sup> ) em mSv/h.			
P1	d1	d2	d3	d4
	3,10	0,32	0,38	0,30
	3,20	0,31	0,38	0,31
	3,00	0,33	0,37	0,30
	3,20	0,32	0,39	0,30
	3,00	0,32	0,38	0,29
<b>Valor Médio</b>	<b>3,10</b>	<b>0,32</b>	<b>0,38</b>	<b>0,30</b>
P2	d1	d2	d3	d4
	0,62	0,34	0,60	0,32
	0,60	0,33	0,60	0,31
	0,64	0,32	0,60	0,31
	0,62	0,36	0,59	0,34
	0,62	0,35	0,61	0,32
<b>Valor Médio</b>	<b>0,62</b>	<b>0,34</b>	<b>0,60</b>	<b>0,32</b>
P3	d1	d2	d3	d4
	0,58	0,32	3,58	0,28
	0,58	0,32	3,58	0,28
	0,58	0,31	3,59	0,28
	0,59	0,32	3,57	0,27
	0,57	0,33	3,58	0,29
<b>Valor Médio</b>	<b>0,58</b>	<b>0,32</b>	<b>3,58</b>	<b>0,28</b>
<b>VALOR TOTAL</b>	<b>4,30</b>	<b>0,98</b>	<b>4,56</b>	<b>0,90</b>

### 3.1.2- Cálculo das incertezas associadas às medidas

Os cálculos das incertezas associadas às medidas de taxa de dose realizadas no primeiro levantamento radiométrico foram baseados na publicação ZAR, (1974) [46]. Sendo assim, tem-se:

Para a fonte na posição 1 e com a medida sendo realizada em (d1):

A média aritmética,  $\bar{X}_1$  :

$$\bar{X}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = 0,0310 \text{ mSv/h} \quad (3.1)$$

A variância,  $S_1^2$  :

$$S_1^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1} = 0,0001 \text{ (mSv/h)}^2 \quad (3.2)$$

O desvio padrão,  $S_{1x}$  :

$$S_{1x} = \pm \sqrt{S^2} = \pm 0,001 \text{ mSv/h} \quad (3.3)$$

O desvio Padrão da Média,  $S_{1\bar{x}}$  :

$$S_{1\bar{x}} = \pm \frac{S_{1x}}{\sqrt{n}} = \pm 0,00044 \text{ mSv/h} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{d1_1 = 0,0310 \pm 0,0004 \text{ mSv/h}}$$

Para a fonte na posição 2 e com a medida sendo realizada em (d1):

A média aritmética,  $\overline{X}_2$  :

$$\overline{X}_2 = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = 0,0062 \text{ mSv/h} \quad (3.5)$$

A variância,  $S_2^2$  :

$$S_2^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \overline{X})^2}{n-1} = 0,000002 \text{ (mSv/h)}^2 \quad (3.6)$$

O desvio padrão,  $S_{2x}$  :

$$S_{2x} = \pm\sqrt{S^2} = \pm 0,00014 \text{ mSv/h} \quad (3.7)$$

O desvio Padrão da Média,  $S_{2\bar{x}}$  :

$$S_{2\bar{x}} = \pm \frac{S_{2x}}{\sqrt{n}} = \pm 0,0001 \text{ mSv/h} \quad (3.8)$$

$$\mathbf{d1_2 = 0,00620 \pm 0,0001 \text{ mSv/h}}$$

Para a fonte na posição 3 e com a medida sendo realizada em (d1):

A média aritmética,  $\overline{X}_3$  :

$$\bar{X}_3 = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} = 0,0058 \text{ mSv/h} \quad (3.9)$$

A variância,  $S_3^2$  :

$$S_3^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1} = 0,0000005 \text{ (mSv/h)}^2 \quad (3.10)$$

O desvio padrão,  $S_{3x}$  :

$$S_{3x} = \pm \sqrt{S^2} = \pm 0,0000707 \text{ mSv/h} \quad (3.11)$$

O desvio Padrão da Média,  $S_{3\bar{x}}$  :

$$S_{3\bar{x}} = \frac{S_{3x}}{\sqrt{n}} = \pm 0,0000316 \text{ mSv/h} \quad (3.12)$$

$$\mathbf{d1_3 = 0,00580 \pm 0,00003 \text{ mSv/h}}$$

Com o cálculo dos desvios padrões das médias pode-se calcular a propagação de incertezas dos erros associados, e realizar o somatório das taxas de dose das três posições da fonte.

Propagação de Incertezas:

Para se calcular a propagação de incertezas, acha-se a variância total, somando-se os desvios padrões das médias, elevados ao quadrado e extrai-se a raiz quadrada, obtendo-se assim o desvio padrão total.

$$\sigma_{d1total}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 \quad (3.13)$$

$$\sigma_{d1total} = \sqrt{\sigma_{1\bar{x}}^2 + \sigma_{2\bar{x}}^2 + \sigma_{3\bar{x}}^2} = \sqrt{(0,0004422)^2 + (0,0000632)^2 + (0,0000316)^2} \quad (3.14)$$

$$\sigma_{d1total} = \pm 0,00045 \text{ mSv/h}$$

$$\mathbf{d1_T = (0,0310 + 0,0062 + 0,0058) \pm 0,00045 \cong 0,043 \pm 0,00045 \text{ mSv/h}} \quad (3.15)$$

Os mesmos procedimentos de cálculos foram realizados para as medidas nos locais d2, d3 e d4, (Tab. 3.1), conforme apresentado no Anexo 1.

### 3.1.3- Cenários selecionados

Tomando-se como base os dados e parâmetros utilizados no levantamento radiométrico foram elaborados três cenários, a saber:

#### 1º Cenário:

Simulação da taxa de dose na linha de isolamento transversal, distância d1 e d3 no primeiro levantamento radiométrico: a 2,5m do eixo vertical do centro da vala; a 2m da borda da vala e a 1m de altura do solo (Fig. 3.2).

Vala típica, com 100 cm de largura e com a parte superior da tubulação, a 60 cm da superfície do solo.

Para esse cenário considerou-se o somatório das taxas de dose das três radiografias, pontos P1, P2 e P3, da Figura 3.2, com uma fonte de Irídio 192, com atividade igual a 20,72 Ci. Utilizou-se nas radiografias um colimador com valor de atenuação de 17 vezes.

Para a radiografia do ponto P1, considerou-se uma dupla atenuação da parede da tubulação de aço/carbono com 5 mm de espessura. A tubulação possui 20 cm (8") de diâmetro.

Para a comparação entre os cálculos teóricos (Equações do PARAE) e as simulações do código MCNP, foram realizados cálculos e simulações das taxas de dose nas linhas de isolamento transversal: de 100 cm, 200 cm, 300 cm e 400 cm de distância

do eixo vertical do centro da vala, a 100 cm de altura do solo.

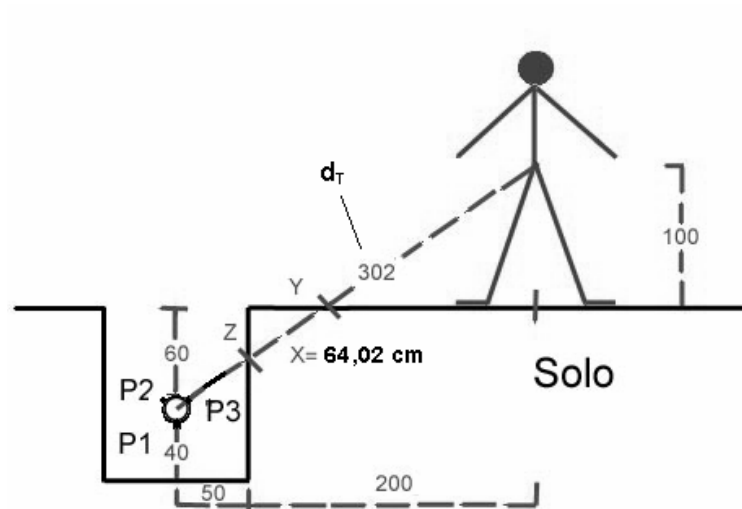


Figura 3.2 – 1º Cenário: Linha de isolamento, transversal à vala (medidas em cm).

2º Cenário:

Simulação da taxa de dose na linha de isolamento longitudinal, distância  $d_2$  e  $d_4$  do primeiro levantamento radiométrico, a 800 cm da fonte e à 1m de altura do solo, conforme ilustrado na Figura 3.3. Para esse cenário considerou-se a taxa de dose de uma junta com três radiografias, nos pontos P1, P2 e P3 e fonte de Iridio 192, com atividade igual a 20,72 Ci, sendo utilizado nas radiografias dos pontos P2 e P3, um colimador com valor de atenuação igual a 17 vezes.

Para a radiografia do ponto P1, considerou-se uma dupla atenuação da parede da tubulação de aço/carbono com 5 mm de espessura. A tubulação possui 20 cm (8") de diâmetro.

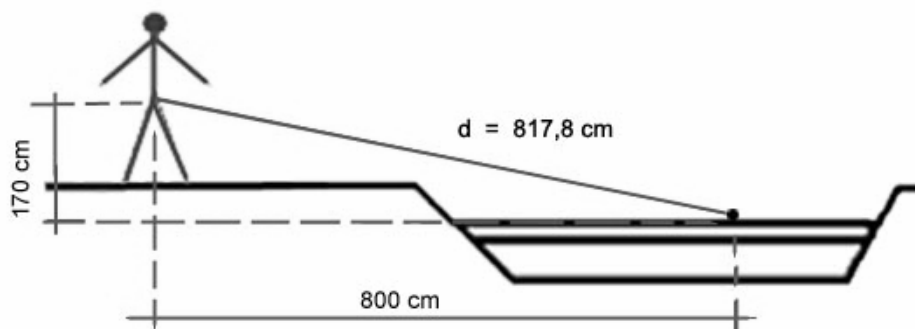


Figura 3.3 – 2º Cenário: Linha de isolamento, longitudinal à vala (medidas em cm).

### 3º Cenário:

O cenário da estimativa de dose em uma situação de acidente, onde um “Indivíduo do Público” ou um “Trabalhador” ficou exposto a uma fonte de  $^{192}\text{Ir}$ , com atividade igual a 22 Ci, a 1,414 m de distância, (ponto P5), do ponto de interesse, (gônadas) durante dois minutos é ilustrado na Figura 3.4. Considerou-se o ponto de interesse a 1 m de altura do solo.

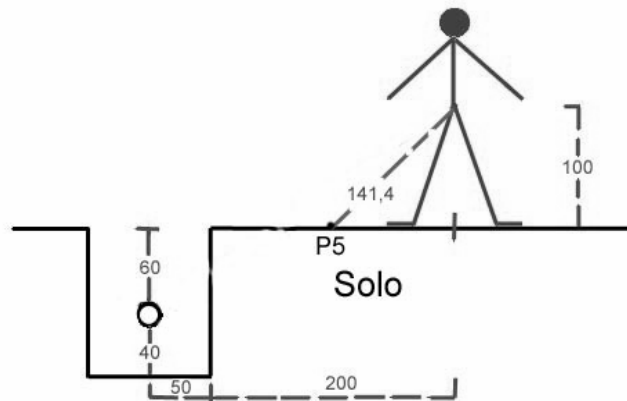


Figura 3.4 – 3º Cenário: Situação de acidente. Dose nas gônadas (medidas em cm).

Foram considerados os seguintes parâmetros tanto para os cálculos teóricos como para as simulações no código MCNP, nos dois primeiros cenários, “linha de isolamento transversal” e “linha de isolamento longitudinal”:

- Gamagrafia de uma “junta”, três radiografias, com a fonte nos pontos P1, P2 e P3 (formulação mais utilizada atualmente nos trabalhos realizados em zonas urbanas e afins);
- Para o primeiro cenário foi considerado, uma mesma camada de solo atenuadora (**X**), para os três pontos (P1, P2 e P3) e considerou-se também a atenuação de um colimador (**C**), com seu fator de transmissão igual a 1/17. Para a exposição referente ao ponto P1 considerou-se também a atenuação de duas paredes (2F) da tubulação (aço carbono, 5 mm de espessura);
- Para o segundo cenário, considerou-se a atenuação de um colimador (**C**), com seu fator de transmissão igual a 1/17, para todas as exposições, pontos P1, P2 e P3. Para a exposição referente ao ponto P1 considerou-se também a



atenuação de duas paredes (2F) da tubulação (aço carbono, 5 mm de espessura).

#### 3.1.4- Segundo levantamento radiométrico

Foram realizadas medidas nas linhas de isolamento transversais e longitudinais, com o medidor de radiação, do tipo “Geiger-Müller”, fabricante Dosimeter, modelo 3100, devidamente calibrado e aferido pelo usuário antes do início das medidas. O medidor foi posicionado próximo ao corpo do operador, a um metro (1m) de altura do solo. Para cada ponto do levantamento foram realizadas cinco leituras e anotado os valores médios entre as mesmas. Não tendo havido maiores discrepâncias entre nenhuma das leituras e os valores médios anotados. As medidas foram realizadas para as três exposições de uma junta, P1, P2 e P3.

Os dados e informações do segundo levantamento radiométrico, que não interessam para este trabalho, estão devidamente modificados, evitando assim qualquer possibilidade de identificação da instalação aberta, obra em questão, local, equipamentos utilizados, mantendo a total impossibilidade da identificação da empresa que executou o trabalho onde foi realizado este levantamento radiométrico.

Dados do segundo levantamento radiométrico de interesse para este trabalho:

- Data: 02/06/2007;
- Fonte: Ir 192; atividade: 11,07 Ci;
- Equipamento radiografado: Tubulação; diâmetro: 8”; espessura: 5,6 mm;
- Colimador FR: 32;
- N.º de filmes/junta: 03.

Os dados do segundo levantamento radiométrico estão apresentados na Tabela 3.3, na Figura 3.5 e na Tabela 3.4.

Tabela 3.3: Dados do segundo levantamento radiométrico

Obra: Interligação Av. xxxxxxxxxxxx		Data: 02/06/2007
Adendo: 033/2007		Frente: 4 (ERP)
Endereço: Av. xxxxxxxxxxxxxx		Bairro: Casa Verde
Município: São Paulo		UF: SP
Irradiador: xxxxx	Fonte: IrS xxxxx	Atividade: 11,07 Ci
Geiger: Dosimeter	Modelo: 3100	Patrimônio: xxxxxx
Equipamento Radiografado: Tubulação		Material: aço carbono
Técnica Radiográfica: PD/VS		N.º de juntas: 02
Diâmetro: 8" $\cong$ 20 cm		Espessura: 5,6 mm
N.º de filmes/junta: 03	Tempo de exposição/filme: -----	
Colimador FR: 32	Placas de Pb: - - -	

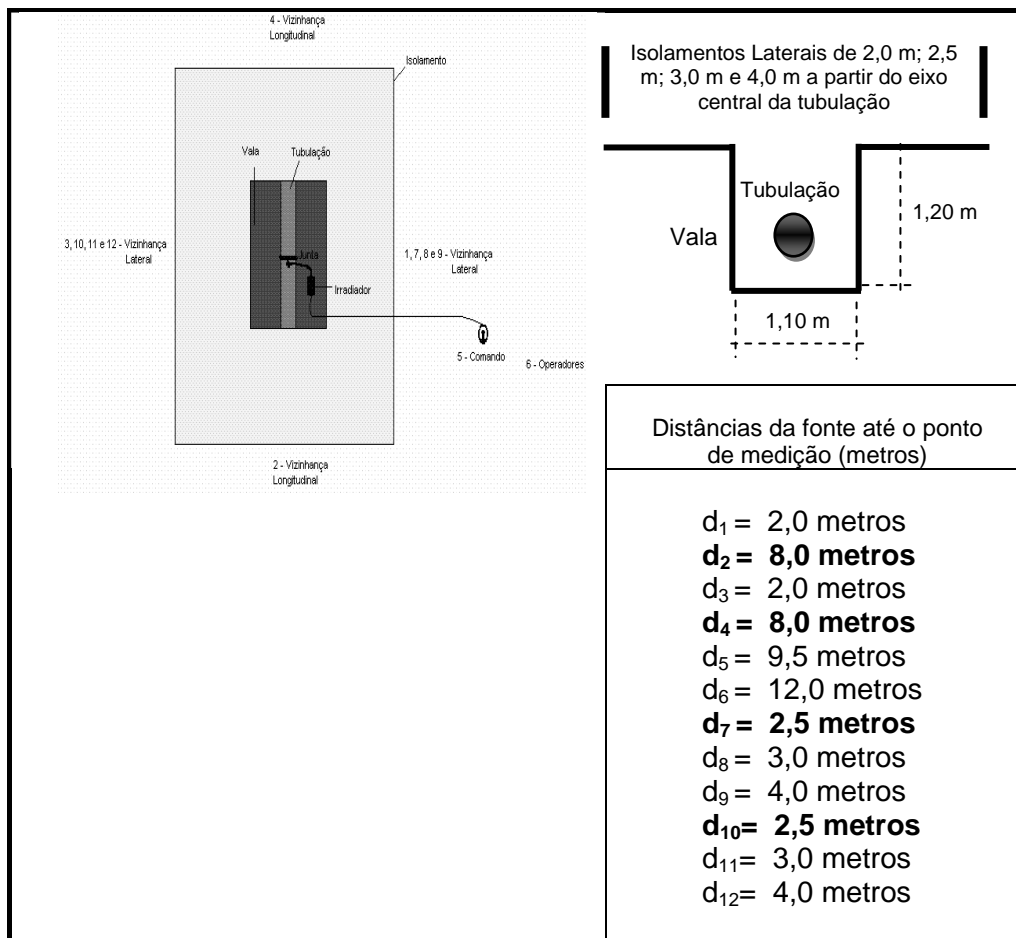
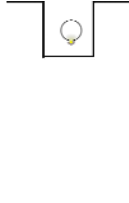
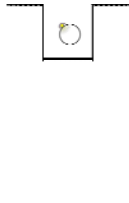
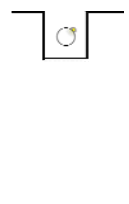


Figura 3.5 – Croqui do segundo levantamento radiométrico.

Tabela 3.4: Resultados das leituras do segundo levantamento radiométrico

Posição da Fonte	Local de medição ao redor da área isolada											
	Taxas de Exposição ( x 10 <sup>-2</sup> ) em mSv/h.											
P1	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	d10	d11	d12
	8,72	2,23	5,44	2,43	BG	BG	2,92	2,56	0,92	1,96	1,42	0,86
	8,23	2,20	5,23	2,44	BG	BG	3,02	2,60	0,83	2,34	1,40	0,89
	7,12	2,29	5,56	2,54	BG	BG	4,20	2,58	0,81	2,21	1,33	0,76
	7,88	2,16	5,34	2,22	BG	BG	3,34	2,44	0,90	2,45	1,38	0,71
	7,92	2,13	5,71	2,31	BG	BG	3,54	2,61	0,89	2,43	1,45	0,70
Valor Médio	<b>7,974</b>	<b>2,202</b>	<b>5,456</b>	<b>2,3</b>	<b>&lt; 0,15</b>	<b>&lt; 0,15</b>	<b>3,404</b>	<b>2,558</b>	<b>0,87</b>	<b>2,278</b>	<b>1,396</b>	<b>0,784</b>
P2	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	d10	d11	d12
	5,06	2,00	5,10	2,56	BG	BG	1,40	0,92	0,42	1,57	1,01	0,51
	5,12	2,02	5,65	2,10	BG	BG	1,45	1,00	0,40	1,76	1,02	0,56
	5,10	2,10	5,40	2,02	BG	BG	1,49	0,99	0,40	1,45	0,99	0,55
	5,15	2,24	5,23	2,30	BG	BG	1,46	1,02	0,38	1,69	1,10	0,48
	5,09	2,18	5,01	2,10	BG	BG	1,46	1,05	0,41	1,70	1,08	0,56
Valor Médio	<b>5,104</b>	<b>2,108</b>	<b>5,278</b>	<b>2,216</b>	<b>&lt; 0,15</b>	<b>&lt; 0,15</b>	<b>1,452</b>	<b>0,996</b>	<b>0,402</b>	<b>1,634</b>	<b>1,04</b>	<b>0,532</b>
P3	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	d10	d11	d12
	4,86	2,12	6,10	2,19	BG	BG	2,96	1,28	0,71	2,18	1,98	0,99
	5,02	1,97	5,98	2,20	BG	BG	3,13	1,31	0,68	2,54	1,95	0,90
	4,95	2,02	5,87	2,11	BG	BG	3,10	1,34	0,74	2,34	1,70	1,04
	4,99	2,18	5,94	2,39	BG	BG	3,07	1,28	0,69	2,56	1,78	1,00
	5,01	2,07	6,12	2,21	BG	BG	3,10	1,40	0,70	2,46	2,01	1,02
Valor Médio	<b>4,966</b>	<b>2,072</b>	<b>6,002</b>	<b>2,22</b>	<b>&lt; 0,15</b>	<b>&lt; 0,15</b>	<b>3,072</b>	<b>1,322</b>	<b>0,704</b>	<b>2,416</b>	<b>1,884</b>	<b>0,99</b>

### 3.1.5- Cenários selecionados

Tomando-se como base o primeiro e o segundo cenários já selecionados no primeiro levantamento radiométrico foram adotados, por semelhança, os dois cenários que se segue:

#### 4º Cenário:

Simulação da taxa de dose na linha de isolamento transversal, distância  $d_7$  e  $d_{10}$  no segundo levantamento radiométrico: a 2,5 m do eixo vertical do centro da vala; a 2 m da borda da vala e a 1 m de altura do solo (Fig. 3.6).

Vala com 110 cm de largura e com a parte superior da tubulação, a 75 cm da superfície, altura do solo.

Para esse cenário considerou-se o somatório das taxas de dose das três radiografias, pontos P1, P2 e P3, da Figura 3.6, com uma fonte de Iridio 192, com atividade igual a 11,07 Ci. Utilizou-se nas radiografias um colimador com valor de atenuação de 32 vezes. Para a radiografia do ponto P1, considerou-se uma dupla atenuação da parede da tubulação de aço/carbono com 5,6 mm de espessura. A tubulação possui 20 cm (8") de diâmetro.

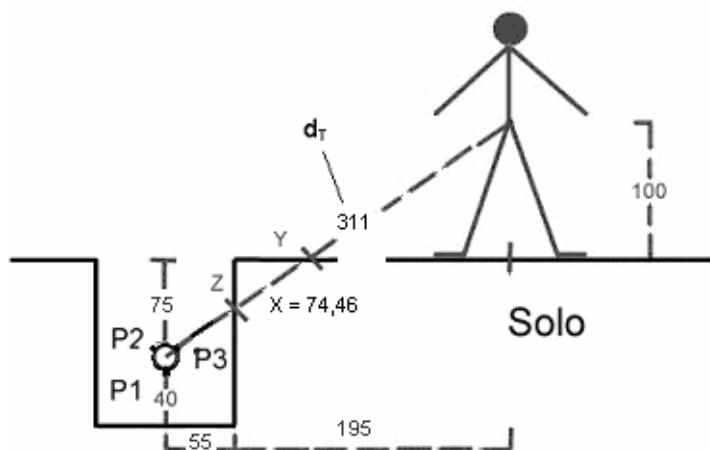


Figura 3.6 – 4º Cenário: Linha de isolamento, transversal à vala, (medidas em cm).

#### 5º Cenário:

Simulação da taxa de dose na linha de isolamento longitudinal, distância  $d_2$  e  $d_4$  do segundo levantamento radiométrico a 817,8 cm da fonte e à 1 m de altura do solo,

conforme ilustrado na Figura 3.7. Para esse cenário considerou-se a taxa de dose de uma junta com três radiografias, nos pontos P1, P2 e P3 e fonte de Irídio 192, com atividade igual a 11,07 Ci, sendo utilizado nas radiografias dos pontos P2 e P3, um colimador com valor de atenuação igual a 32 vezes.

Para a radiografia do ponto P1, considerou-se uma dupla atenuação da parede da tubulação de aço/carbono com 5,6 mm de espessura. A tubulação possui 20 cm (8") de diâmetro.

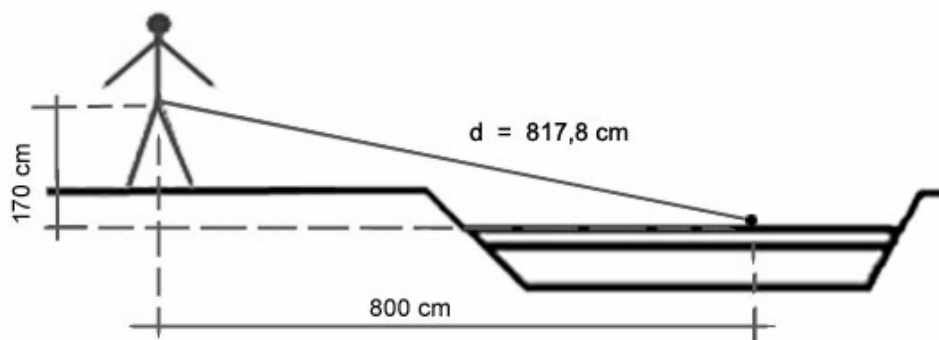


Figura 3.7 – 5º Cenário: Linha de isolamento, longitudinal à vala, (medidas em cm).

Foram considerados os seguintes parâmetros tanto para os cálculos teóricos como para as simulações no código MCNP, nos dois cenários, “linha de isolamento transversal” e “linha de isolamento longitudinal”:

- Realização de uma “junta”, três radiografias, com a fonte nos pontos P1, P2 e P3 (formulação mais utilizada atualmente na maior parte dos trabalhos em zonas urbanas e afins);
- Para o quarto cenário foi considerado, uma mesma camada de solo como atenuadora (**X**), para os três pontos (P1, P2 e P3) e considerou-se também a atenuação de um colimador (**C**), com seu fator de transmissão igual a 1/32. Para a exposição referente ao ponto P1 considerou-se também a atenuação de duas paredes (2F) da tubulação (aço carbono, 5,6 mm de espessura);
- Para o quinto cenário, considerou-se a atenuação de um colimador (**C**), com seu fator de transmissão igual a 1/32, para todas as exposições, pontos P1, P2 e P3. Para a exposição referente ao ponto P1 considerou-se também a

atenuação de duas paredes (2F) da tubulação (aço carbono, 5,6 mm de espessura).

### 3.2- Cálculos teóricos utilizando as equações do PARAE

Nos cálculos teóricos para a determinação das taxas de dose de todos os cenários tanto do primeiro como do segundo levantamento radiométrico, considerou-se a energia média de 380 keV para os raios gama provenientes de uma fonte de Iridio 192.

#### 3.2.1- Coeficientes de atenuação linear para o solo e para o aço

Para a determinação dos valores dos coeficientes de atenuação linear,  $\mu$ , para o solo e para o aço, foram utilizados os valores das espessuras das camadas semi-redutoras (CSR ou HVL) apresentadas na Tabela 2.2 aplicados à equação (3.15), [28],

$$I = I_0 \times e^{-\mu X} \quad (3.15)$$

Onde  $I_0$  é a intensidade do feixe incidente,  $I$  é a intensidade do feixe transmitido e  $X$  a espessura do material (solo ou aço).

Obteve-se os valores de  $0,108 \text{ cm}^{-1}$  e  $0,533 \text{ cm}^{-1}$  para os coeficientes de atenuação lineares do solo e do aço respectivamente.

#### 3.2.2– Camada do solo que a radiação gama atravessa (X)

O cálculo do valor da camada de solo que a radiação gama atravessa (X), pode ser realizado conforme a seção (2.2.1), por equivalência de triângulos, a partir das equações (2.1); (2.2) e (2.3), obtendo-se:

Para o primeiro levantamento radiométrico,

$$Y = 52,94 \text{ cm} ; \quad Z = 36 \text{ cm} \quad \text{e} \quad X = 64,02 \text{ cm} \quad (3.16)$$

Para o segundo levantamento radiométrico,

$$Y = 59,86 \text{ cm} ; \quad Z = 44,29 \text{ cm} \quad e \quad X = 74,46 \text{ cm} \quad (3.17)$$

### 3.2.3- Fator de transmissão da camada de solo

Substituindo os valores do coeficiente de atenuação linear ( $\mu$ ) do solo, para fótons com energia igual a 380 keV, e o valor da espessura (X) do solo que a radiação atravessa, na equação (2.3), obtém-se o fator de transmissão (S), da camada de solo:

Para o primeiro levantamento radiométrico,

$$S = 9,94 \cdot 10^{-4} = 0,000994 \quad (3.18)$$

Para o segundo levantamento radiométrico,

$$S = 3,2 \cdot 10^{-4} = 0,000321 \quad (3.19)$$

### 3.2.4 Fator de redução da tubulação

Substituindo os valores do coeficiente de atenuação linear ( $\mu$ ) do aço, para fótons com energia igual a 380 keV, e o valor da espessura (X) da tubulação utilizada, na equação (2.6), obtém-se o valor do fator de atenuação (F) da tubulação:

Para o primeiro levantamento radiométrico:  $x = 0,50 \text{ cm}$ ,

$$F = 2^{0,533 \cdot 2 \cdot 0,5 / 0,693} \quad F = 2^{0,533 / 0,693} \quad (3.20)$$

$$F = 1,704$$

Para o segundo levantamento radiométrico:  $x = 0,56 \text{ cm}$ ,

$$F = 2^{0,533 \cdot 2 \cdot 0,56 / 0,693} \quad F = 2^{0,597 / 0,693} \quad (3.21)$$

$$F = 1,817$$

### 3.2.5– Distância da fonte ao ponto de interesse: gônadas

Para se encontrar o valor da distância ( $d_T$ ), da fonte até o ponto de interesse, gônadas, utiliza-se “Pitágoras”, relação de triângulos retângulos:

Para o primeiro levantamento radiométrico,

$$\begin{aligned}d_T^2 &= 250^2 + 170^2 & (3.22) \\d_T &= 302 \text{ cm}\end{aligned}$$

Para o segundo levantamento radiométrico,

$$\begin{aligned}d_T^2 &= 250^2 + 185^2 & (3.23) \\d_T &= 311 \text{ cm}\end{aligned}$$

### 3.3– Distância que a radiação percorre no “ar”

Para se calcular a distância que a radiação percorre no ar, deve-se subtrair da distância da fonte até as gônadas ( $d_T$ ), a distância que a radiação percorrer no solo ( $x$ ):

Para o primeiro levantamento radiométrico,

$$d = 302 - 64,02 = 237,98 \text{ cm} \quad (3.24)$$

Para o segundo levantamento radiométrico,

$$d = 311 - 74,46 = 236,54 \text{ cm} \quad (3.25)$$

### 3.4– Cálculo das taxas de dose para o 1º e 4º Cenário

Equações utilizadas nos cálculos das taxas de dose quando a fonte encontra-se nos pontos  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  das Figuras 3.2 e 3.6.

As taxas de dose na linha de isolamento, transversal à vala, situada a 250 cm de distância do eixo central da vala, a um metro de altura do solo, podem ser calculadas pelas equações (3.26); (3.27) e (3.28).



$$T_{D1} = \frac{\Gamma \times A \times S \times C}{d^2 \times 2F} \quad (\text{ponto P1}) \quad (3.26)$$

$$T_{D2,3} = \frac{\Gamma \times A \times S \times C}{d^2} \quad (\text{pontos P2 e P3}) \quad (3.27)$$

A taxa de dose total será o somatório das taxas de dose dos 3 pontos;

$$T_{DT} = T_{D1} + T_{D2} + T_{D3} \quad (3.28)$$

Onde:

$T_{D1, 2 \text{ e } 3}$  - Taxas de dose no ponto de interesse (gônadas) referente ao posicionamento das fontes nos pontos: 1, 2 e 3;

$\Gamma$  - Constante específica gama de transformação da atividade em exposição, para a fonte de Ir 192. (500 mR.m<sup>2</sup>/h.Ci), denominada Gamão;

A - Atividade da fonte em (Ci), sendo de: 20,72 Ci e 11,07 Ci.

C - Fator de transmissão dos colimadores: 1/17 e 1/32.

F - Fator de redução da tubulação: 1,704 e 1,817.

S - Fator de transmissão das camadas dos solos: 0,000994 e 0,000321.

d - Distância do ponto de interesse, gônadas, à fonte ( $d_T$ ) menos à distância percorrida no solo ( $x$ ), em (m).

### 3.5– Cálculo das taxas de dose para o 2º e 5º Cenário

Equações utilizadas nos cálculos das taxas de dose quando as fontes encontram-se nos pontos P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> e P<sub>3</sub> nas Figuras 3.3 e 3.7.

As taxas de dose nas linhas de isolamento, longitudinais, situadas a 817,8 cm de distância das fontes, a um metro de altura do solo, podem ser calculadas pelas equações (3.29); (3.30) e (3.31):

$$T_{D1} = \frac{\Gamma \times A \times C}{d^2 \times 2F} \quad (\text{ponto P1}) \quad (3.29)$$

$$T_{D2,3} = \frac{\Gamma \times A \times C}{d^2} \quad (\text{pontos P2 e P3}) \quad (3.30)$$

A taxa de dose total será o somatório das taxas de dose dos 3 pontos;

$$T_{DT} = T_{D1} + T_{D2} + T_{D3} \quad (3.31)$$

Onde:

d- Distância dos pontos de interesse, gônadas, às fontes, distantes 817,8 cm.

Os demais parâmetros das equações são os mesmos utilizados no 1º e no 4º Cenário.

### 3.6- Cálculo da taxa de dose considerando o 3º Cenário

Equação utilizada no cálculo da taxa de dose quando a fonte encontra-se no ponto P<sub>5</sub>, da Figura 3.4 (situação de acidente), terceiro cenário.

Taxa de dose no ponto de interesse (gônadas), a um metro de altura do solo, situada a 141,4 cm de distância da fonte, pode ser calculada pela equação (3.32):

$$T_{DA} = \frac{\Gamma \times A}{d^2} \quad (3.32)$$

Onde:

T<sub>DA</sub> - Taxa de dose no ponto de interesse (gônadas) referente à exposição da fonte no ponto P<sub>5</sub>;

Γ - Constante específica de transformação da atividade em dose, exposição, para a fonte de Ir 192. (500 mR.m<sup>2</sup>/h.Ci), denominada Gamão;

A - Atividade da fonte em (Ci), de 22 Ci;

d - Distância do ponto de interesse, gônadas, à fonte, em (m): 141,4 cm;

### 3.7– Variando a distância da linha de isolamento transversal

Foram determinados os valores das taxas de dose resultantes das exposições com a fonte nos pontos P1, P2 e P3 da Figura 3.2, ao se variar a distância da linha de isolamento transversal de 250 cm, para: 100 cm, 200 cm, 300 cm e 400 cm em relação ao eixo central da vala e da Figura 3.6, ao se variar a distância da linha de isolamento transversal de 250 cm, para: 200 cm, 300 cm e 400 cm em relação ao eixo central da vala.

Para a determinação das taxas de dose faz-se necessário se obter, para cada posição diferente das linhas de isolamento de 250 cm, os novos valores das camadas de solo correspondentes, que a radiação gama atravessa (x), os fatores de transmissão do solo (S) e os valores das distâncias: totais ( $d_T$ ) e das distâncias percorridas no “ar” (d), pela radiação, da fonte até o ponto de interesse (gônadas).

#### 3.7.1- Linha de isolamento transversal a 100 cm do eixo central da vala, (primeiro levantamento)

O valor da camada de solo que a radiação gama atravessa X, (Figura 3.2), pode ser obtido por equivalência de triângulos, conforme a seção (2.2.1), a partir das equações (2.1), (2.2) e (2.3), obtendo-se:

$$y = 8,82 \text{ cm} \quad ; \quad z = 21,42 \text{ cm} \quad \text{e} \quad x = 23,16 \text{ cm}$$

Com o valor determinado da camada de solo que a radiação gama atravessa, ( $x=23,16\text{cm}$ ), pode-se encontrar o fator de transmissão (S), da camada do solo conforme a equação 2.3.

$$S = \frac{1}{2^{\mu \cdot X / \ln 2}} = 0,0819 \quad (3.33)$$

Os valores da distância total ( $d_T$ ) e da distância percorrida no “ar” (d), pela radiação gama da fonte até o ponto de interesse (gônadas), podem ser obtidos utilizando-se as equações:

$$d_T^2 = 100^2 + 170^2 \quad (3.34)$$

Logo:

$$d_T = 197,23\text{cm}$$

Utilizando,

$$d = d_T - x \quad (3.35)$$

Obtém-se:

$$d = 175,81 \text{ cm}$$

### 3.7.2- Determinação das variáveis que entram nos cálculos das taxas de dose, para as linhas de isolamento transversais

As variáveis que entram nos cálculos das taxas de dose, para as linhas de isolamento distantes: 200 cm, 300 cm e 400 cm, do eixo central da vala, tanto para o primeiro como para o segundo levantamento radiométrico possuem cálculos semelhantes aos do item 3.4 e estão apresentados no Anexo 2.

### 3.8- Simulações das taxas de dose para todos os cenários com o código MCNP

#### 3.8.1- Coeficientes de conversão de fluxo em dose

O código MCNP simula o transporte de fótons através da matéria, fornecendo a fluência ou fluxo médio de partículas e/ou fótons em um ponto, área ou volume. Assim, para estimar a dose ou taxa de dose absorvida num ponto do espaço onde supostamente estaria um trabalhador, faz-se necessário o uso de coeficientes de conversão de fluência ou fluxo em dose, conforme apresentado na Tabela 3.5. No presente trabalho, foram utilizados os coeficientes de conversão recomendados pela publicação nº 21 da ICRP [48] para converter fluência em taxa de dose equivalente (Sv/h). Estes coeficientes de conversão para fótons de 10 keV a 10 MeV são apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Coeficientes de conversão de fluência em taxa de dose DF(E) recomendados pela ICRP21 para uso em proteção radiológica [48]

Energia do Fóton, (E) - (MeV)	DF(E) – (Sv/h) / (n/cm <sup>2</sup> .s) *
0,01	2,78 x 10 <sup>-8</sup>
0,015	1,11 x 10 <sup>-8</sup>
0,02	5,88 x 10 <sup>-9</sup>
0,03	2,56 x 10 <sup>-9</sup>
0,04	1,56 x 10 <sup>-9</sup>
0,05	1,20 x 10 <sup>-9</sup>
0,06	1,11 x 10 <sup>-9</sup>
0,08	1,20 x 10 <sup>-9</sup>
0,1	1,47 x 10 <sup>-9</sup>
0,15	2,38 x 10 <sup>-9</sup>
0,2	3,45 x 10 <sup>-9</sup>
0,3	5,56 x 10 <sup>-9</sup>
0,4	7,69 x 10 <sup>-9</sup>
0,5	9,09 x 10 <sup>-9</sup>
0,6	1,14 x 10 <sup>-8</sup>
0,8	1,47 x 10 <sup>-8</sup>
1	1,79 x 10 <sup>-8</sup>
1,5	2,44 x 10 <sup>-8</sup>
2	3,03 x 10 <sup>-8</sup>
3	4,00 x 10 <sup>-8</sup>
4	4,76 x 10 <sup>-8</sup>
5	5,56 x 10 <sup>-8</sup>
6	6,25 x 10 <sup>-8</sup>
8	7,69 x 10 <sup>-8</sup>
10	9,09 x 10 <sup>-8</sup>

\* Fonte: Apêndice H, Tabela H.2 do Manual do Código MCNP [15]

### 3.8.2- Características da tubulação utilizada nas simulações com o código MCNP

Em todas as simulações realizadas com o código MCNP foi utilizado uma tubulação com aproximadamente 20 cm de diâmetro (8"); de aço/carbono, com a composição de acordo com a Tabela 3.6 [47].

Tabela 3.6: Composição da tubulação de aço/carbono

<b>Elemento</b>	<b>Percentual da composição elementar</b>	<b>Código MCNP (ID)</b>
Carbono	0,01 %	6000
Cromo	16,96 %	24000
Manganês	1,59%	25055
Níquel	13,61 %	28000
Fósforo	0,01 %	15031
Molibdênio	2,29 %	42000
Enxofre	0,01 %	16032
Silício	0,37 %	14000
Ferro	65,16%	26000

### 3.8.3- Verificação da influência nos resultados das simulações com o MCNP, ao se variar algumas condições estabelecidas

Antes de definir quais os “arquivos de entrada” (inputs), do código MCNP que serão utilizados para realizar as simulações das estimativas das taxas de dose em operações de rotina e situações de acidente, nas gamagrafias em Zonas Urbanas e Afins, faz-se necessário verificar a influência nas taxas de dose resultantes do código MCNP, ao se variar algumas condições estabelecidas.

#### 3.8.3.1- Variação do espectro de energia dos fótons de uma fonte de $^{192}\text{Ir}$

1- Foi considerado na primeira simulação, fótons provenientes de uma fonte de Iridio 192, com energia média de 380 KeV.

2- Na segunda simulação, considerou-se o espectro de energia de uma fonte de Iridio 192, conforme Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Espectro completo das energias dos fótons emitidos por uma fonte de Iridio 192 [4]

<b>Energia dos fótons (keV)</b>	<b>Intensidade Relativa</b>
61,487	0,012
63,000	0,021
65,122	0,027
66,832	0,046
75,700	0,020
205,794	0,033
295,956	0,287
308,455	0,297
316,506	0,827
468,068	0,478
484,575	0,0319
588,581	0,0452
604,411	0,082
612,462	0,053

Como se pode verificar na Tabela 3.8 existe uma diferença considerável entre os valores encontrados nas simulações com o valor médio da energia e com o espectro completo de uma fonte de irídio-192, principalmente nas distâncias de 200 cm, 300 cm e 400 cm nas simulações transversais e também 800 cm na simulação longitudinal.

Considerou-se como cem por cento (100%), o resultado das taxas de dose da simulação realizada com a energia média e calculou-se o valor da diferença percentual, entre os resultados das duas simulações.

Em todas as outras simulações com o código MCNP utilizou-se o espectro completo de energias dos fótons emitidos por uma fonte de Iridio 192.

Tabela 3.8: Simulações variando a forma da energia, energia média ou espectro completo

<b>Distância Detector/Fonte</b>	<b>Energia Média Taxas de Dose (mSv/h)</b>	<b>Espectro das Energias Taxas de Dose (mSv/h)</b>	<b>Diferença Percentual</b>
<b>50cm Transversal</b>	<b>14</b>	<b>13</b>	<b>7,14 %</b>
<b>100cm Transversal</b>	<b>12</b>	<b>11</b>	<b>8,33 %</b>
<b>150cm Transversal</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>11,11 %</b>
<b>200cm Transversal</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>16,67 %</b>
<b>300cm Transversal</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>25,00 %</b>
<b>400cm Transversal</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>50,00 %</b>
<b>800cm longitudinal</b>	<b>1</b>	<b>0,5</b>	<b>50,00 %</b>

### 3.8.3.2- Variação do meio - Atenuação do solo

Visando verificar a contribuição do efeito da radiação espalhada na camada de ar, efeito “*skyshine*”, foram realizadas duas simulações, sendo que a primeira considerou a importância do solo igual a “zero (0)”. Atribuindo-se “importância zero (0)” ao solo em uma simulação, (Figura 3.8), tem-se como resultante a anulação deste solo, ou seja, as taxas de dose referentes aos fótons que atravessarem ou interagirem com este solo, não serão consideradas pelos detectores, que só contarão as taxas de doses provenientes dos fótons que atravessaram ou interagiram com a massa de “ar”.



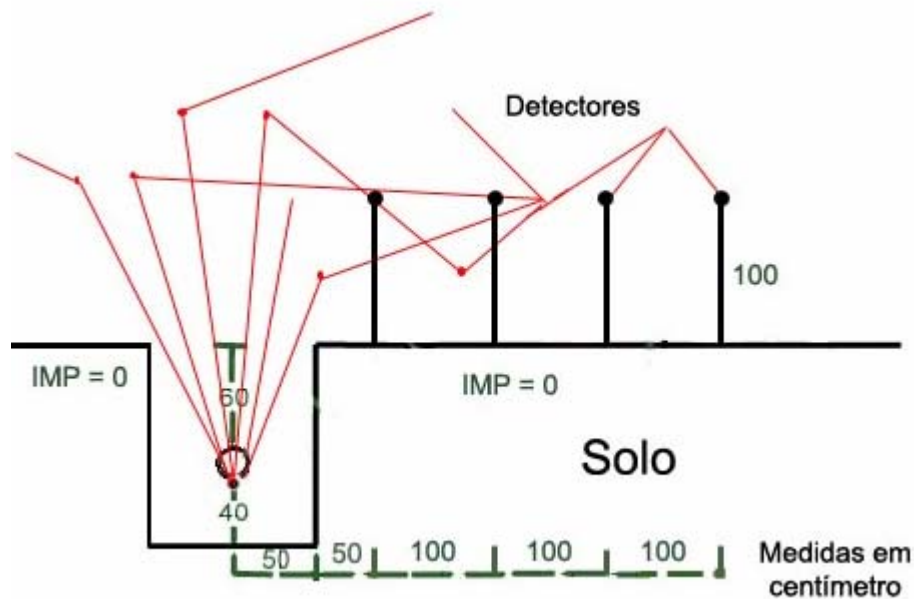


Figura 3.8 – Primeira simulação: solo com importância zero (0).

Segunda simulação: Foi utilizado o solo com “importância um (1)”, isto é, os fótons que atravessarem ou interagirem com o solo e conseguirem chegar aos detectores, serão considerados pelos mesmos.

### 3.8.3.3- Variação do tipo de solo

Foram realizadas simulações com três composições de solos diferentes [47], conforme apresentado na Tabela 3.9.

Segundo a fonte citada, a composição do “solo 2” é a que se aproxima mais das composições de solos encontradas na natureza, por isto é denominado de “solo padrão”. O “solo 1” possui poucos elementos em sua composição, enquanto o “solo 3” é composto de um número muito grande de elementos. Ambos possuem composições difíceis de serem encontradas na natureza.

Tabela 3.9: Composição elementar dos solos utilizados nas simulações

Elemento	Percentual da massa total do elemento no solo		
	SOLO 1	SOLO 2	SOLO 3
Oxigênio	0,56	0,47	0,47
Silício	0,36	0,28	0,43
Alumínio	0,07	0,08	0,06
Hidrogênio	0,01	–	–
Ferro	–	0,05	0,03
Manganês	–	–	0,0005
Titânio	–	–	0,003
Cálcio	–	0,03	0,002
Magnésio	–	0,02	0,001
Potássio	–	0,02	0,0006
Sódio	–	0,02	0,0005
Fósforo	–	–	0,0004
Enxofre	–	–	0,001
Carbono	–	0,03	0,001

Como pode-se verificar na Tabela 3.9, o solo que apresentou a menor atenuação foi o solo utilizado na segunda simulação. Foi este solo o escolhido para as simulações que participaram da intercomparação.

Os resultados da segunda simulação são bem próximos aos da terceira simulação, apresentando uma menor atenuação, maior taxa de dose, no intervalo de 150 cm a 400 cm.

Como se trata de cálculos e simulações das taxas de dose visando uma melhor radioproteção utilizando-se coeficientes de menor valor obtém-se maiores taxas de dose, significando que este trabalho apresenta uma linha mais conservativa, o que é recomendado para cálculos em radioproteção.

É importante salientar que os coeficientes de atenuação linear utilizados neste trabalho, tanto para o cálculo do fator de transmissão (S), da camada do solo, como o coeficiente de atenuação linear utilizado no fator de redução da tubulação (F) possuem valores menores que os apresentados e utilizados no PARAE.

### 3.9- Simulação com fantoma MAX

Foram realizadas simulações com o fantoma MAX, com a finalidade de estimar as taxas de dose efetivas recebidas por um operador em algumas situações de acidente.

Para se estimar as taxas de dose equivalentes em órgãos e tecidos de um corpo e também sua dose efetiva (dose de corpo inteiro), recebidas pelo operador (IOE), em algumas situações de acidentes, como por exemplo, o 3º cenário, utilizou-se o simulador antropomórfico de voxel “MAX” [53], baseado em elemento de volume (VOXEL), podendo assim auxiliar na avaliação médica, quando necessário, possibilitando aos profissionais da área da saúde uma prescrição mais adequada dos procedimentos a serem adotados no tratamento das pessoas que porventura vierem a se envolver em alguma situação de acidente, recebendo, inadequadamente, doses de radiação ionizante.

As simulações realizadas com o fantoma MAX foram para determinar a estimativa de doses, referentes à exposição de um operador (IOE), por uma fonte de Iridio 192, livre no solo irradiando para todas as direções, posicionada à: 50 cm; 100 cm; 200 cm e 300 cm, do eixo central de seu corpo.

Para a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP), a dose efetiva representa a probabilidade de ocorrência de efeitos estocásticos da radiação. A dose efetiva representa a soma das doses equivalentes calculadas em todos os tecidos e órgãos do corpo e é determinada pela expressão:

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad (4.26)$$

Onde:

$H_T$  - é a dose equivalente no tecido ou órgão T e

$w_T$  - é o fator de peso para o tecido T' (ICRP 1991)\*

(\*) - A comissão recomenda fatores de cálculo para 13 tecidos e órgãos (gônadas testículos + ovários) e ainda os 11 órgãos e tecidos restantes, (Tabela 3.10).

Tabela 3.10: Fatores de peso/cálculo dos tecidos conforme ICRP 60

Tecido/Órgão	Peso do tecido (Fator WT)
Gônadas	0,20
Medula Óssea Vermelha (RBM)	0,12
Cólon	0,12
Pulmão	0,12
Estômago	0,12
Bexiga	0,05
Seio / mama	0,05
Fígado	0,05
Esôfago	0,05
Tireóide	0,05
Pele	0,01
Superfície óssea	0,01
Órgãos restantes	0,05

Onde: RBM é a Medula Óssea Vermelha e os órgãos restantes são: Glândulas supra-renais, cérebro, traquéia, intestino delgado, rins, músculo, pâncreas, baço, timo e útero.

Para o ICRP60 (ICPR 1991) é de fundamental importância a determinação da dose equivalente nos 23 órgãos e tecidos, a fim de se poder calcular a dose efetiva, grandeza que representa não só o valor para a realização de um efetivo controle das exposições à radiação, como também a própria filosofia da radioproteção.

### 3.9.1- O simulador antropomórfico MAX

Em 2003, a ICRP publicou em seu relatório 89 intitulado, “Dados Anatômicos e Fisiológicos Básicos para o Uso em Proteção Radiológica: Valores de Referência”. Uma nova série de dados que foi à motivação para o desenvolvimento do simulador MAX.

O fantoma MAX foi desenvolvido na Universidade Federal de Pernambuco por Kramer e colaboradores [53], a partir de um modelo humano de voxel pré-existente com a intenção de se obter uma representação mais precisa possível, do adulto masculino de referência da ICRP 89.

O fantoma MAX pode simular um corpo humano exposto a radiações ionizantes externas, com o propósito de calcular a dose equivalente em órgãos e tecidos para fins ocupacionais ou ambientais da proteção radiológica. A Figura 3.9, mostra vistas frontais laterais do fantoma, simulador MAX.

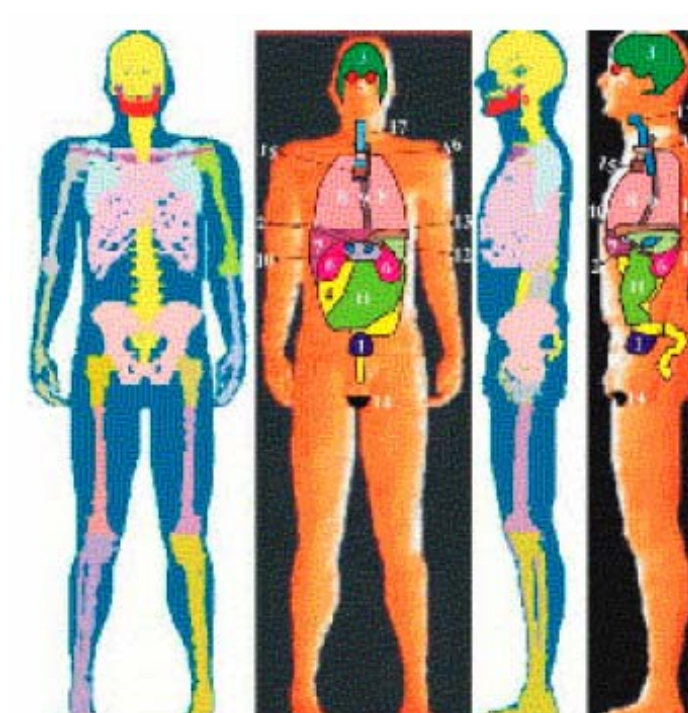


Figura 3.9 – Fantoma de Voxel (simulador) MAX [53].

### 3.9.2- Cálculo da dose equivalente em um órgão ou tecido do fantoma MAX, para a exposição com fótons

Para fins de cálculos de transporte da radiação, o fantoma MAX foi conectado ao código MCNP. A energia perdida por uma partícula num voxel específico é depositada no órgão ou no compartimento do número de identidade ID do tecido. Como o fator de qualidade para fótons e elétrons é unitário, todas as doses equivalentes a órgão e tecido são calculadas pela soma das energias depositadas por todas as partículas em todos os voxels que pertencem ao órgão específico ou tecido, divididas pela massa do órgão ou tecido.

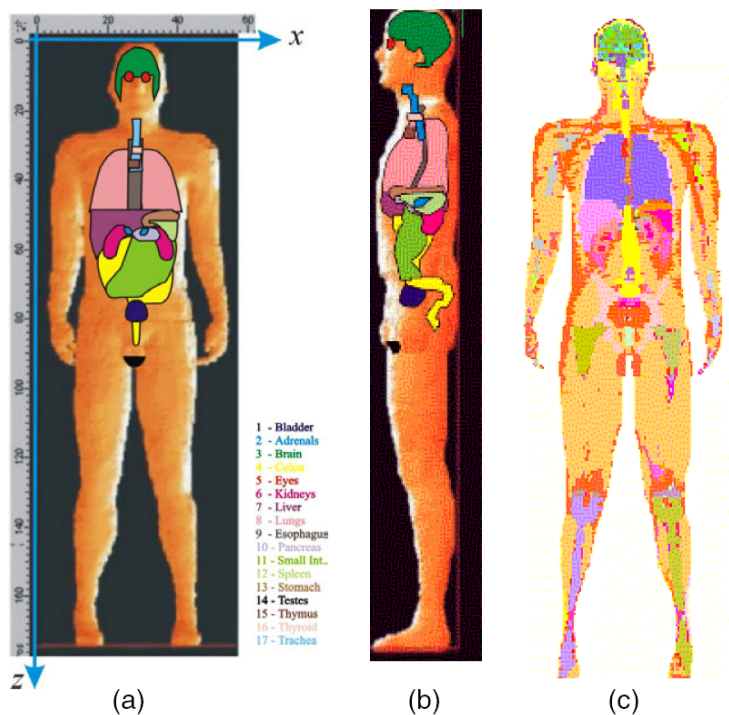


Figura 3.10 (a), (b) e (c) - O Fantoma (simulador) MAX [53]

As Figuras 3.10 (a) e (b) apresentam, em visualizações de 3D, a superfície da fantoma MAX, que inclui a representação de alguns dos 23 órgãos e tecidos mencionados na Tabela 3.11. A Figura 3.10 (c) apresenta um corte vertical através do centro do corpo, alcançando todos os órgãos e tecidos naquele plano.

O peso e a altura foram adaptados para corresponder aos dados recomendados pela ICRP 89, [52]. Depois da segmentação os volumes dos órgãos e tecidos foram ajustados para concordar com as massas recomendadas pela ICRP 89, Tabela 3.11.

Essa adaptação das massas dos órgãos e tecidos foi feita aplicando a ICRU 44, assim o volume dos órgãos pode ser determinado. A Tabela 3.11 apresenta a massa dos principais órgãos do fantoma MAX e do Homem Referência ICRP 89.

Tabela 3.11: Massas dos órgãos e tecidos do homem de referência da ICRP 89 e do fantoma MAX [53]

ÓRGÃO / TECIDO	ICRP 89 (g)	MAX (g)	ER (%)
Gordura	14600,0	14591,7	- 0,1
Glândulas Adrenais	14,0	14,7	5,0
Bexiga	50,0	50,0	0,0
Esqueleto	10500,0	11371,6	8,3
Cérebro	1450,0	1450,0	0,0
Cólon (parede e conteúdo)	670,0	670,0	0,0
Olhos	15,0	15,8	5,3
Rins	310,0	310,0	0,0
Fígado	1800,0	1800,0	0,0
Pulmões	1200,0	1061,5	- 11,5
Músculo	29000,0	31003,8	6,9
Esôfago	40,0	40,0	0,0
Pâncreas	140,0	140,0	0,0
RBM	1170,0	1200,0	2,6
Intestino Delgado (parede e conteúdo)	1000,0	1000,0	0,0
Pele	3300,0	3254,8	- 1,4
Baço	150,0	150,0	0,0
Estômago (parede e conteúdo)	400,0	400,0	0,0
Testículos	35,0	34,7	- 0,9
Timo	25,0	25,0	0,0
Tireóide	20,0	19,8	- 1,0
Traquéia	10,0	14,3	43,0
Massa Total (g)	73000,0	74651,6	2,3
Altura (cm)	176,0	175,3	- 0,4

## CAPÍTULO 4

### Resultados

#### 4.1- Taxas de dose resultantes em função da energia média e do espectro de energia da fonte de $^{192}\text{Ir}$

Nos cálculos teóricos do PARAE, são desprezados vários parâmetros que na simulação com o código MCNP são considerados. Por exemplo, nos cálculos teóricos se utiliza à energia média (380keV), ao passo que na simulação com o MCNP pode-se utilizar o espectro completo de energias da fonte, com todas as linhas de energias e suas respectivas frequências. Nos cálculos teóricos também não são considerados, os efeitos da radiação espalhada tampouco as constituições específicas dos materiais pelos quais todo ou parte do feixe de radiação poderá interagir atravessando-os e sendo atenuados pelos mesmos.

O objetivo principal das simulações com o código MCNP é realizar uma quantificação e qualificação dos processos de interação dos fótons com a matéria, não considerados nos cálculos teóricos das taxas de dose do PARAE.

Considerou-se como verdadeiro, cem por cento (100%), o resultado das taxas de dose da simulação realizada com a energia média e calculou-se o valor da diferença percentual, entre os resultados das duas simulações, conforme exemplificado na equação (4.1) e apresentado na Tabela 4.1.

$$\text{Diferença percentual} = [ (D_{\text{méd}} - D_{\text{espect}}) / (D_{\text{méd}}) ] \times 100 \quad (4.1)$$



Tabela 4.1: Simulações realizadas com a energia média e com o espectro de energia dos fótons de uma fonte de  $^{192}\text{Ir}$ . (desvios associados menores que 0,01%)

Distância detector/fonte	Energia média Taxa de dose (mSv/h)	Espectro de energia Taxa de dose (mSv/h)	Diferença percentual
50 cm Transversal	14,5	13,5	6,89 %
100 cm Transversal	11,6	10,9	6,03 %
150 cm Transversal	8,7	8,2	5,75 %
200 cm Transversal	6,5	6,1	6,15 %
300 cm Transversal	3,7	3,5	5,40 %
400 cm Transversal	2,4	2,2	8,33 %
800 cm longitudinal	0,7	0,6	14,29 %

Pode-se verificar que os resultados das taxas de dose na simulação com a energia média (380 keV), apresentaram valores próximos aos das taxas de dose da simulação que utilizou o espectro total das energias dos fótons emitidos por uma fonte de Iridio 192. A diferença em percentagem entre os resultados ficou entre 5,40% e 14,29%.

#### 4.2- Contribuição do efeito “*Skyshine*”

No caso do efeito da radiação, “efeito skyshine”, trata-se de um número grande de fótons com energias de valores próximos, que estão se direcionando em sentido contrário ao do solo e que exatamente por estes motivos, ao interagirem com o ar percorrem, mais ou menos a mesma distância no ar até que são desviados para baixo formando uma chuva de fótons.

Na primeira simulação, foi atribuído ao solo “importância igual a zero”, o que faz com que os detectores não registrem as radiações transmitidas e espalhadas que interagem com o solo. Os detectores registram somente os fótons que interagem com o ar. Na segunda simulação, foi atribuído ao ar e ao solo, “importância igual a um”, o que faz com que os detectores, registrem todos os fótons que interagem com o ar e também os que interagem com o solo. Os resultados dessas simulações são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Verificação da contribuição do efeito “*Skyshine*” (desvios associados menores que 0,01%)

Distância Detector/fonte	Efeito “ <i>Skyshine</i> ” (Sem a contribuição do solo) Taxa de Dose (mSv/h)	Taxa de Dose total (Com a contribuição do solo) Taxa de Dose (mSv/h)	Contribuição relativa do <i>Skyshine</i>
50 cm Transversal	$131 \times 10^{-1}$	$156 \times 10^{-1}$	83,97%
100 cm Transversal	$106 \times 10^{-1}$	$122 \times 10^{-1}$	86,88%
150 cm Transversal	$5,50 \times 10^{-2}$	$125 \times 10^{-2}$	4,40%
200 cm Transversal	$2,92 \times 10^{-2}$	$48 \times 10^{-2}$	6,07%
250 cm Transversal	$1,93 \times 10^{-2}$	$25 \times 10^{-2}$	7,57%
300 cm Transversal	$1,41 \times 10^{-2}$	$15 \times 10^{-2}$	9,34%
400 cm Transversal	$8,91 \times 10^{-3}$	$7 \times 10^{-2}$	13,46%

Com estas duas simulações pode-se verificar a contribuição relativa do espalhamento dos fótons no ar, (*efeito skyshine*) na taxa de dose resultante. A contribuição do efeito *Skyshine* é a razão entre os valores apresentados nas colunas “sem a contribuição do solo” e “com a contribuição do solo”, multiplicada por cem (100). Pode-se verificar que nas distâncias de 150 cm até 400 cm, a contribuição relativa nas taxas de dose, do efeito de espalhamento no ar da radiação (*efeito skyshine*) vão de 4,40% na distância de 150 cm e aumentam gradativamente até o valor de 13,46% na distância de 400 cm. Nas distâncias de 50 cm e 100 cm pode-se verificar que a contribuição relativa nas taxas de dose, do efeito de espalhamento no ar da radiação (*efeito skyshine*) assumem valores de percentuais muito alto, isto se deve pelo fato de um grande percentual dos fótons chegarem aos detectores sem passar pelo solo, o que acarreta em um alto valor no percentual de contribuição do efeito *skyshine*.

#### 4.3- Estimativas das taxas de dose resultantes em função do tipo de solo

Foram realizadas simulações com três tipos de solos diferentes: solo de maior atenuação; solo padrão (mais utilizado) e solo composto com maior número de elementos. O solo que apresentou a menor atenuação dos fótons foi aquele utilizado na segunda simulação. Foi este tipo de solo o escolhido para as simulações da intercomparação. Os resultados obtidos nas simulações descritas na seção (3.8.3.3), encontram-se na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Simulações com tipos de solos diferentes (erros associados menores que 0,01%)

Distância detector/fonte	SOLO 1 Taxas de Dose (mSv/h)	SOLO 2 Taxas de Dose (mSv/h)	SOLO 3 Taxas de Dose (mSv/h)
50 cm Transversal	15,60	15,60	15,60
100 cm Transversal	12,20	12,40	12,40
150 cm Transversal	1,25	2,57	2,21
200 cm Transversal	0,48	0,70	0,63
250 cm Transversal	0,25	0,33	0,31
300 cm Transversal	0,15	0,19	0,18
400 cm Transversal	0,07	0,08	0,08

Pode-se verificar que a atenuação do solo da segunda simulação é bem próxima da atenuação do solo da terceira simulação, apresentando uma menor atenuação, no intervalo de 150 a 400 cm.

#### 4.4– Taxas de dose determinadas a partir dos cálculos teóricos utilizando as equações do PARAE

##### 4.4.1- Primeiro e Quarto Cenários: Cálculo para as linhas de isolamento transversais

###### 1º Cenário:

O cálculo das taxas de dose referentes às exposições nos pontos  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ , com a linha de isolamento transversal, situada a 250 cm de distância do eixo central da vala, para o primeiro levantamento radiométrico foram baseados nas equações: (3.26); (3.27) e (3.28).

$$TD_1 = \frac{500 \times 20,72 \times 0,000994 \times 1/17}{2,38^2 \times 2 \times 1,704} = 0,0003 \text{ mSv/h} \quad (4.2)$$

$$TD_2 = \frac{500 \times 20,72 \times 0,000994 \times 1/17}{2,38^2} = 0,0010 \text{ mSv/h} \quad (4.3)$$

$$TD_3 = \frac{500 \times 20,72 \times 0,000994 \times 1/17}{2,38^2} = 0,0010 \text{ mSv/h} \quad (4.4)$$

Taxa de Dose Total:

$$TD_t = 0,0003 + 0,0010 + 0,0010 = 0,0023 \text{ mSv/h} = 2,3 \mu\text{Sv/h} \quad (4.5)$$

4º Cenário:

O cálculo das taxas de dose referentes às exposições nos pontos P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> e P<sub>3</sub>, com a linha de isolamento transversal, situada a 250 cm de distância do eixo central da vala, para o segundo levantamento radiométrico foram baseados nas equações: (3.26); (3.27) e (3.28).

$$TD_1 = \frac{500 \times 11,07 \times 0,000321 \times 1/32}{2,36^2 \times 2 \times 1,817} = 0,00003 \text{ mSv/h} \quad (4.6)$$

$$TD_2 = \frac{500 \times 11,07 \times 0,000321 \times 1/32}{2,36^2} = 0,000099 \text{ mSv/h} \quad (4.7)$$

$$TD_2 = \frac{500 \times 11,07 \times 0,000321 \times 1/32}{2,36^2} = 0,000099 \text{ mSv/h} \quad (4.8)$$

Taxa de Dose Total:

$$TD_t = 0,00003 + 0,000099 + 0,000099 = 0,00023 \text{ mSv/h} = 0,23 \mu\text{Sv/h} \quad (4.9)$$

#### 4.4.1.1- Variação da linha de isolamento transversal para o primeiro levantamento radiométrico

Os cálculos das taxas de dose referentes às exposições nos pontos P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> e P<sub>3</sub>, com a linha de isolamento transversal, situada a 100 cm, 200 cm, 300 cm e 400 cm de distância do eixo central da vala, conforme as equações: (3.26); (3.27) e (3.28), são semelhantes aos supracitados na seção 4.4.1 e estão apresentados no Anexo 3.

#### 4.4.1.2- Linhas de isolamento transversais distantes: 200 cm, 300 cm e 400 cm do eixo central da vala, segundo levantamento radiométrico

Os cálculos das taxas de dose referentes às exposições nos pontos P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> e P<sub>3</sub>, com a linha de isolamento transversal, situada a 200 cm e 300 cm de distância do eixo central da vala, conforme as equações: (3.26); (3.27) e (3.28), são semelhantes aos supracitados na seção 4.4.1 e estão apresentados no Anexo 3.

#### 4.4.2– Segundo e Quinto Cenários: Cálculo para as linhas de isolamento longitudinal

##### 2º Cenário:

O cálculo das taxas de dose referentes às exposições quando a fonte encontra-se nos pontos P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> e P<sub>3</sub>, para a linha de isolamento longitudinal, situada a 817,8 cm de distância da fonte, para o primeiro levantamento radiométrico, foi baseado nas equações: (3.29); (3.30) e (3.31).

$$TD_1 = \frac{500 \times 20,72 \times 1/17}{8,178^2 \times 1,704 \times 2} = 0,0267 \text{ mSv/h} \quad (4.10)$$

$$TD_2 = TD_3 = \frac{500 \times 20,72 \times 1/17}{8,178^2} = 0,0911 \text{ mSv/h} \quad (4.11)$$

Taxa de dose Total:

$$TD_t = 0,0267 + 0,0911 + 0,0911 = 0,2089 \text{ mSv/h} = 208,9 \mu\text{Sv/h} \quad (4.12)$$

5º Cenário:

O cálculo das taxas de dose referentes às exposições quando a fonte encontra-se nos pontos P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> e P<sub>3</sub>, para a linha de isolamento longitudinal, situada a 817,8 cm de distância da fonte, para o segundo levantamento radiométrico, foi baseado nas equações: (3.29); (3.30) e (3.31).

$$TD_1 = \frac{500 \times 11,07 \times 1/32}{8,178^2 \times 2 \times 1,817} = 0,0072 \text{ mSv/h} \quad (4.13)$$

$$TD_2 = TD_3 = \frac{500 \times 11,07 \times 1/32}{8,178^2} = 0,0258 \text{ mSv/h} \quad (4.14)$$

Taxa de Dose Total:

$$TD_t = 0,0072 + 0,0258 + 0,0258 = 0,0589 \text{ mSv/h} = 58,9 \mu\text{Sv/h} \quad (4.15)$$

#### 4.4.3- Terceiro Cenário: Situação de acidente

Neste cenário simulou-se a fonte “caída no chão” posicionada a 141,4 cm de distância do ponto de interesse (gônadas), durante 2 minutos, na posição da fonte, ponto P5. Baseado na equação (3.32) obtém-se:

$$TD_A = \frac{500 \times 22}{(\sqrt{2})^2} = 0,055 \text{ Sv/h} \quad (4.16)$$

$$D_A = \frac{500 \times 22 \times 2/60}{(\sqrt{2})^2} = 0,00183 \text{ Sv} \quad (4.17)$$

#### 4.5– Taxas de dose calculadas a partir das equações do PARAE

As taxas de dose resultantes dos cálculos teóricos utilizando as equações do PARAE, para o primeiro levantamento radiométrico, 1º e 2º cenários são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Taxas de dose nas linhas de isolamento transversais e longitudinal, equações do PARAE

Distância do detector ao eixo central da vala	Linha de isolamento	Taxa de dose ( $\mu\text{Sv/h}$ )
100 cm	Transversal	364,7
200 cm	Transversal	39,1
250 cm	Transversal	2,3
300 cm	Transversal	0,2
400 cm	Transversal	0,001
800 cm	Longitudinal	208,9

As taxas de dose resultantes dos cálculos teóricos utilizando as equações do PARAE, para o segundo levantamento radiométrico, 4º e 5º cenários, são apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Taxas de dose nas linhas de isolamento transversais e longitudinal, equações do PARAE

Distância do detector ao eixo central da vala	Linha de isolamento	Taxa de dose ( $\mu\text{Sv/h}$ )
200 cm	Transversal	3,51
250 cm	Transversal	0,23
300 cm	Transversal	0,0165
400 cm	Transversal	0,0009544
800 cm	Longitudinal	58,879

4.6- Simulação com o código MCNP, da estimativa das taxas de dose para operação de rotina e para a situação do acidente formulado.

Operação de rotina: estimativa das taxas de dose nas linhas de isolamento

transversal e longitudinal para o primeiro levantamento radiométrico.

As taxas de dose resultantes das simulações da exposição dos pontos P1, P2 e P3 nas linhas de isolamento transversal e longitudinal estão apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Resultados das simulações com a fonte nos pontos P1, P2 e P3 (desvios associados menores que 0,01%)

Distância do detector ao eixo central da vala	Exposição do ponto P1 Taxa de dose ( $\mu\text{Sv/h}$ ) ***	Exposição dos pontos P2 e P3, Taxa de dose ( $\mu\text{Sv/h}$ ) ***
(T)* 100 cm	497,7	0,7
(T)* 200 cm	25,8	41,3
(T)* 250 cm	12,0	19,5
(T)* 300 cm	6,8	10,9
(T)* 400 cm	3,0	4,6
(L)** 800 cm	5,3	4,3

(\*) Linha de isolamento transversal

(\*\*) Linha de isolamento longitudinal

(\*\*\*) Os resultados apresentados nestas simulações foram divididos por 17, valor do fator de atenuação do colimador.

Pode-se verificar que os valores das taxas de dose referentes ao ponto P1 diminuem à medida que o posicionamento dos detectores encontra-se mais distante do centro da vala. Os valores das taxas de doses não estão correspondendo a “equação do inverso do quadrado da distância”. Como exemplo pode-se verificar que a taxa de dose no detector que se encontra a 200 cm do centro da vala, não corresponde a um quarto (1/4) da taxa de dose do detector que se encontra a 100 cm do centro da vala. Este fato se explica pois parte da radiação não atravessa somente o “ar”, sendo também atenuada por parte do solo.

Pode-se verificar que os valores das taxas de dose referentes aos pontos P2 e P3; diminuem à medida que o posicionamento do detector encontra-se mais distantes do centro da vala.

#### 4.6.1- Propagação de Erros

Para se obter os desvios padrões das médias multiplicou-se as médias resultantes pelo erro relativo dividido por 100. [46]



O cálculo dos desvios padrões das médias utilizadas neste trabalho é representado pela equação:

$$S_{\bar{X}} = \bar{X}(\pm R/100) \quad (4.20)$$

e a propagação das incertezas por:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{P1}^2 + \sigma_{P2}^2 + \sigma_{P3}^2 \quad (4.21)$$

$$\sigma_{total} = \sqrt{S_{\bar{X}P1}^2 + S_{\bar{X}P2}^2 + S_{\bar{X}P3}^2} \quad (4.22)$$

Aplicando as equações na linha de isolamento transversal de 100 cm teremos:

$$S_{\bar{X}P1} = 0,049775(\pm 0,0013/100) = \pm 0,647 \times 10^{-8} \quad (4.23)$$

$$S_{\bar{X}P1}^2 = \pm 0,418 \times 10^{-16}$$

$$S_{\bar{X}P2,3} = 0,072831(\pm 0,0006/100) = \pm 0,4369 \times 10^{-8} \quad (4.24)$$

$$S_{\bar{X}P2,3}^2 = \pm 0,19088 \times 10^{-16}$$

$$\sigma_{total} = \sqrt{(0,418 \times 10^{-16}) + (0,1909 \times 10^{-16}) + (0,1909 \times 10^{-16})} = \pm 0,7998 \times 10^{-8} \quad (4.25)$$

$$\mathbf{TD_{P1+P2+P3} = 1,954 \pm 7,998 \times 10^{-6} \text{ mSv/h}}$$

Os cálculos das taxas de dose para as linhas de isolamento transversal a 200 cm, 250 cm, 300 cm e 400 cm e a linha de isolamento longitudinal de 800 cm são semelhantes aos apresentados nesta seção e encontram-se no Anexo 4.

As taxas de dose resultantes das simulações das exposições dos pontos P1, P2 e P3, com os erros associados, nas linhas de isolamento transversal e longitudinal estão apresentadas na Tabela 4.7

Tabela 4.7: Resultados das simulações da exposição com a fonte nos pontos P1, P2 e P3 e suas respectivas incertezas associadas

Distância do detector ao eixo central da vala	Exposição do ponto P1 Taxas de dose (mSv/h) (***)	Exposição dos pontos P2 e P3 Taxas de dose (mSv/h) (***)	Taxas de dose totais (mSv/h)
(T)* 100 cm	$0,50 \pm 0,647 \times 10^3$	$0,7 \pm 0,437 \times 10^{-3}$	$1,95 \pm 0,799 \times 10^{-3}$
(T)* 200 cm	$0,03 \pm 0,672 \times 10^4$	$0,04 \pm 0,907 \times 10^{-4}$	$0,11 \pm 0,1450 \times 10^{-3}$
(T)* 250 cm	$0,01 \pm 0,384 \times 10^4$	$0,01 \pm 0,5837 \times 10^{-4}$	$0,05 \pm 0,9110 \times 10^{-3}$
(T)* 300 cm	$0,007 \pm 0,2503 \times 10^{-4}$	$0,01 \pm 0,2621 \times 10^{-4}$	$0,03 \pm 1,1760 \times 10^{-3}$
(T)* 400 cm	$0,003 \pm 0,8121 \times 10^{-4}$	$0,005 \pm 0,1979 \times 10^{-4}$	$0,01 \pm 0,0074 \times 10^{-3}$
(L)** 800 cm	$0,005 \pm 0,1489 \times 10^4$	$0,04 \pm 0,789 \times 10^{-4}$	$0,09 \pm 0,0125 \times 10^{-3}$

(\*) Linha de isolamento transversal

(\*\*) Linha de isolamento longitudinal

(\*\*\*) Os resultados apresentados nestas simulações foram divididos por 17, fator de atenuação do colimador.

As taxas de dose totais representam o somatório das taxas de dose das exposições dos pontos P1, P2 e P3. Como as taxas de doses das exposições dos pontos P2 e P3 são iguais pode-se multiplicar o valor da taxa de dose da exposição do ponto P2, por dois (2) e somar ao valor da taxa de dose da exposição no ponto P1.

#### 4.6.2- Operação de rotina: estimativa das taxas de dose nas linhas de isolamento transversal e longitudinal para o segundo levantamento radiométrico

As taxas de dose resultantes das simulações da exposição dos pontos P1, P2 e P3 nas linhas de isolamento transversal e longitudinal estão apresentadas na Tabela 4.8.

Tabela 4.8: Resultados das simulações das exposições com a fonte nos pontos P1, P2 e P3, segundo levantamento (desvios associados menores que 0,01%)

Distância do detector ao eixo central da vala	Exposição do ponto P1 Taxa de dose ( $\mu\text{Sv/h}$ ) ***	Exposição dos pontos P2 e P3, Taxa de dose ( $\mu\text{Sv/h}$ ) ***	Exposição dos pontos P1, P2 e P3, Taxa de dose total ( $\mu\text{Sv/h}$ ) ***
(T)* 100 cm	113,5	182,3	478,1
(T)* 200 cm	5,3	9,4	24,1
(T)* 250 cm	2,6	4,6	11,8
(T)* 300 cm	1,4	2,6	6,6
(T)* 400 cm	0,6	1,1	2,8
(L)** 800 cm	1,4	12,5	26,4

(\*) Linha de isolamento transversal

(\*\*) Linha de isolamento longitudinal

(\*\*\*) Os resultados apresentados nestas simulações foram divididos por 32, valor do fator de atenuação do colimador.

#### 4.6.3- Estimativa da taxa de dose para a situação do acidente simulado

Simulação da taxa de dose referente à exposição, quando da localização da fonte, no ponto P5 (3º cenário), fonte livre no solo irradiando para todas as direções, posicionada a 141 cm das gônadas.

O valor da taxa de dose obtido foi:

$$TD_{P5} = 0,05398 \pm 0,000007 \text{ Sv/h} = 53,98 \text{ mSv/h}$$

Considerando o tempo de dois minutos, proposto como tempo de exposição à fonte durante a ocorrência do acidente obtém-se uma taxa de dose de

$$D_{P5} = 1,799 \text{ mSv}$$

#### 4.7- Resultados obtidos nas simulações com o fantoma de voxel MAX

Foram realizadas com o fantoma MAX, quatro simulações. Foi simulado um acidente com uma fonte de  $^{192}\text{Ir}$ , onde a mesma foi posicionada em quatro diferentes distâncias do Operador.

Simulações: “Uma fonte de irídio-192, de 22Ci, caída no chão, irradiando para todas as direções estando um Operador de Radiografia (IOE), distante: 0,5; 1,0; 2,0 e 3,0 metros, da fonte.

Na segunda simulação, onde o Operador encontra-se distante 1,0 metro da fonte, está sendo representado, exatamente o 3º Cenário proposto no subitem (3.1.3), posição da fonte no ponto P5.

Estes resultados encontram-se nas Tabelas: 4.09, 4.10, 4.11 e 4.12.

Os resultados obtidos com o MCNP são dados em: “partículas emitidas pela fonte”, Portanto deve-se multiplicar o resultado por  $(22 \times 3,7 \times 10^{10})$ , para se obter a taxa de dose efetiva recebida pelo Operador, IOE, quando exposto a uma radiação proveniente de uma fonte de Ir 192 com atividade de 22 Ci.

Tabela 4.9: Taxas de dose obtidas com o fantoma MAX para uma fonte distante 0,5 m

<b>Volume Voxel</b>	<b>Fator Mult.</b>			
<b>0,046656 cm<sup>3</sup></b>	<b>1,602E-13</b>			
<b>Órgão</b>	<b>Massa (Kg)</b>	<b>Energia Depositada (MeV)</b>	<b>Dose absorvida (Gy)</b>	<b>Erro</b>
Bexiga	5,00E-02	2,28E-06	7,29E-18	1,71%
Cólon	6,06E-01	2,52E-05	6,67E-18	0,56%
Fígado	1,80E+00	4,71E-05	4,19E-18	0,45%
Pulmões	1,06E+00	1,65E-05	2,49E-18	0,68%
Pele	3,26E+00	2,27E-04	1,12E-17	1,90%
Esôfago	4,00E-02	4,07E-07	1,63E-18	3,91%
Estômago	4,00E-01	1,06E-05	4,24E-18	0,89%
Testículo	3,47E-02	3,70E-06	1,71E-17	1,50%
Tireóide	1,98E-02	2,17E-07	1,75E-18	6,11%
Méd.Esqueleto	1,13E+01	6,12E-04	8,67E-18	0,12%
Oss.Ante.	8,27E-01	2,36E-05	4,58E-18	0,62%
Co/Cl/Es/Esc	2,03E+00	4,38E-05	3,46E-18	0,43%
Espinha	1,66E+00	2,24E-05	2,16E-18	0,58%
Crânio	7,41E-01	6,43E-06	1,39E-18	1,14%
Mandíbula	1,80E-02	5,02E-06	4,45E-17	1,33%
Pélvis	1,63E+00	5,92E-05	5,83E-18	0,38%
Osso Pern. Sup.	8,14E-01	2,45E-05	4,82E-18	0,57%
Restante	4,87E+01	2,64E-03	8,68E-18	0,07%
Lentes dos Olhos	1,58E-02	2,55E-08	2,58E-19	18,08%
Cérebro	1,45E+00	1,09E-05	1,21E-18	0,95%
Med. Ossea Ver.	1,17E+00	2,44E-05	3,34E-18	

<b>w<sub>r</sub> = 1</b>		
<b>Órgão</b>	<b>w<sub>t</sub></b>	<b>Dose (Sv)</b>
Bexiga	0,05	3,65E-19
Cólon	0,12	8,00E-19
Fígado	0,05	2,10E-19
Pulmões	0,12	2,99E-19
Pele	0,01	1,12E-19
Esôfago	0,05	8,14E-20
Estômago	0,12	5,09E-19
Testículo	0,20	3,41E-18
Tireóide	0,05	8,75E-20
Méd.Esqueleto	0,01	8,67E-20
Restante	0,05	4,82E-20
Med. Ossea Ver.	0,12	4,01E-19

<b>Taxa de Dose Efetiva (mSv/s)</b>
<b>5,22E-03</b>

<b>Taxa de Dose Efetiva (mSv/min)</b>	<b>Taxa de Dose Efetiva (mSv/h)</b>
<b>0,31</b>	<b>18,80</b>

Tabela 4.10: Taxas de dose obtidas com o fantoma MAX para uma fonte distante 1 m

<b>Volume Voxel</b>	<b>Fator Mult.</b>			
<b>0,046656 cm<sup>3</sup></b>	<b>1,602E-13</b>			
<b>Órgão</b>	<b>Massa (Kg)</b>	<b>Energia Depositada (MeV)</b>	<b>Dose absorvida (Gy)</b>	<b>Erro</b>
Bexiga	5,00E-02	1,76E-06	5,65E-18	1,50%
Cólon	6,06E-01	2,06E-05	5,45E-18	0,49%
Fígado	1,80E+00	4,31E-05	3,84E-18	0,37%
Pulmões	1,06E+00	1,92E-05	2,90E-18	0,50%
Pele	3,26E+00	1,21E-04	5,95E-18	0,20%
Esôfago	4,00E-02	4,80E-07	1,92E-18	2,84%
Estômago	4,00E-01	9,76E-06	3,91E-18	0,73%
Testículo	3,47E-02	2,06E-06	9,52E-18	1,58%
Tireóide	1,98E-02	2,89E-07	2,33E-18	3,90%
Méd.Esqueleto	1,13E+01	3,46E-04	4,90E-18	0,13%
Oss.Ante.	8,27E-01	2,12E-05	4,10E-18	0,51%
Co/Cl/Es/Esc	2,03E+00	4,63E-05	3,66E-18	0,33%
Espinha	1,66E+00	2,38E-05	2,29E-18	0,45%
Crânio	7,41E-01	8,58E-06	1,86E-18	0,79%
Mandíbula	1,80E-02	4,19E-06	3,72E-17	1,13%
Pélvis	1,63E+00	4,67E-05	4,59E-18	0,34%
Oss. Pern. Sup.	8,14E-01	4,20E-05	8,26E-18	0,36%
Restante	4,87E+01	1,55E-03	5,11E-18	0,07%
Lentes dos Olhos	1,58E-02	2,71E-08	2,75E-19	12,73%
Cérebro	1,45E+00	1,04E-05	1,15E-18	0,66%
Med. Óssea Ver.	1,17E+00	2,54E-05	3,48E-18	

<b>w<sub>r</sub> = 1</b>		
<b>Órgão</b>	<b>w<sub>t</sub></b>	<b>Dose (Sv)</b>
Bexiga	0,05	2,82E-19
Cólon	0,12	6,54E-19
Fígado	0,05	1,92E-19
Pulmões	0,12	3,48E-19
Pele	0,01	5,95E-20
Esôfago	0,05	9,60E-20
Estômago	0,12	4,69E-19
Testículo	0,20	1,90E-18
Tireóide	0,05	1,17E-19
Méd.Esqueleto	0,01	4,90E-20
Restante	0,05	2,84E-20
Med. Óssea Ver.	0,12	4,17E-19

<b>Taxa de Dose Efetiva (mSv/s)</b>
<b>3,76E-03</b>

<b>Taxa de Dose Efetiva (mSv/min)</b>	<b>Taxa de Dose Efetiva (mSv/h)</b>
<b>0,22</b>	<b>13,53</b>

Tabela 4.11: Taxas de dose obtidas com o fantoma MAX para uma fonte distante 2 m

<b>Volume Voxel</b>	<b>Fator Mult.</b>			
<b>0,046656 cm<sup>3</sup></b>	<b>1,602E-13</b>			
<b>Órgão</b>	<b>Massa (Kg)</b>	<b>Energia Depositada (MeV)</b>	<b>Dose absorvida (Gy)</b>	<b>Erro</b>
Bexiga	5,00E-02	8,24E-07	2,64E-18	1,89%
Cólon	6,06E-01	9,84E-06	2,60E-18	0,59%
Fígado	1,80E+00	2,28E-05	2,03E-18	0,43%
Pulmões	1,06E+00	1,24E-05	1,87E-18	0,53%
Pele	3,26E+00	4,81E-05	2,36E-18	0,26%
Esôfago	4,00E-02	3,77E-07	1,51E-18	2,78%
Estômago	4,00E-01	5,08E-06	2,03E-18	0,84%
Testículo	3,47E-02	7,56E-07	3,49E-18	2,16%
Tireóide	1,98E-02	2,55E-07	2,06E-18	3,55%
Méd.Esqueleto	1,13E+01	1,50E-04	2,12E-18	0,16%
Oss.Ante.	8,27E-01	1,19E-05	2,31E-18	0,56%
Co/Cl/Es/Esc	2,03E+00	2,85E-05	2,25E-18	0,36%
Espinha	1,66E+00	1,38E-05	1,33E-18	0,50%
Crânio	7,41E-01	5,48E-06	1,18E-18	0,82%
Mandíbula	1,80E-02	2,23E-06	1,98E-17	1,29%
Pélvis	1,63E+00	2,17E-05	2,13E-18	0,41%
Oss. Pern. Sup.	8,14E-01	1,44E-05	2,83E-18	0,51%
Restante	4,87E+01	6,49E-04	2,13E-18	0,09%
Lentes dos Olhos	1,58E-02	1,35E-08	1,37E-19	14,34%
Cérebro	1,45E+00	9,83E-06	1,09E-18	0,66%
Med. Óssea Ver.	1,17E+00	1,34E-05	1,83E-18	

<b>w<sub>r</sub> = 1</b>		
<b>Órgão</b>	<b>w<sub>t</sub></b>	<b>Dose (Sv)</b>
Bexiga	0,05	1,32E-19
Cólon	0,12	3,12E-19
Fígado	0,05	1,01E-19
Pulmões	0,12	2,25E-19
Pele	0,01	2,36E-20
Esôfago	0,05	7,54E-20
Estômago	0,12	2,44E-19
Testículo	0,20	6,97E-19
Tireóide	0,05	1,03E-19
Méd.Esqueleto	0,01	2,12E-20
Restante	0,05	1,19E-20
Med. Óssea Ver.	0,12	2,20E-19

<b>Taxa de Dose Efetiva (mSv/s)</b>
<b>1,76E-03</b>

<b>Taxa de Dose Efetiva (mSv/min)</b>	<b>Taxa de Dose Efetiva (mSv/h)</b>
<b>0,11</b>	<b>6,35</b>

Tabela 4.12: Taxas de dose obtidas com o fantoma MAX para uma fonte distante 3 m

<b>Volume Voxel</b>	<b>Fator Mult.</b>			
<b>0,046656 cm<sup>3</sup></b>	<b>1,602E-13</b>			
<b>Órgão</b>	<b>Massa (Kg)</b>	<b>Energia Depositada (MeV)</b>	<b>Dose absorvida (Gy)</b>	<b>Erro</b>
Bexiga	5,00E-02	4,13E-07	1,32E-18	2,60%
Cólon	6,06E-01	5,22E-06	1,38E-18	0,83%
Fígado	1,80E+00	1,25E-05	1,11E-18	0,58%
Pulmões	1,06E+00	7,31E-06	1,10E-18	0,69%
Pele	3,26E+00	2,46E-05	1,21E-18	0,37%
Esôfago	4,00E-02	2,20E-07	8,80E-19	3,64%
Estômago	4,00E-01	2,84E-06	1,14E-18	1,14%
Testículo	3,47E-02	3,58E-07	1,65E-18	3,20%
Tireóide	1,98E-02	1,54E-07	1,25E-18	4,71%
Méd.Esqueleto	1,13E+01	7,95E-05	1,13E-18	0,23%
Oss.Ante.	8,27E-01	6,82E-06	1,32E-18	0,76%
Co/Ci/Es/Esc	2,03E+00	1,67E-05	1,32E-18	0,47%
Espinha	1,66E+00	8,02E-06	7,73E-19	0,67%
Crânio	7,41E-01	3,44E-06	7,45E-19	1,05%
Mandíbula	1,80E-02	1,27E-06	1,12E-17	1,72%
Pélvis	1,63E+00	1,14E-05	1,12E-18	0,58%
Oss. Pern. Sup.	8,14E-01	6,99E-06	1,37E-18	0,74%
Restante	4,87E+01	3,38E-04	1,11E-18	0,12%
Lentes dos Olhos	1,58E-02	7,52E-09	7,62E-20	22,84%
Cérebro	1,45E+00	6,19E-06	6,84E-19	0,85%
Med. Óssea Ver.	1,17E+00	7,54E-06	1,03E-18	

<b>w<sub>r</sub> = 1</b>		
<b>Órgão</b>	<b>w<sub>t</sub></b>	<b>Dose (Sv)</b>
Bexiga	0,05	6,62E-20
Cólon	0,12	1,66E-19
Fígado	0,05	5,56E-20
Pulmões	0,12	1,32E-19
Pele	0,01	1,21E-20
Esôfago	0,05	4,40E-20
Estômago	0,12	1,37E-19
Testículo	0,20	3,30E-19
Tireóide	0,05	6,23E-20
Méd.Esqueleto	0,01	1,13E-20
Restante	0,05	6,17E-21
Med. Óssea Ver.	0,12	1,24E-19

<b>Taxa de Dose Efetiva (mSv/s)</b>
<b>0,93E-03</b>

<b>Taxa de Dose Efetiva (mSv/min)</b>	<b>Taxa de Dose Efetiva (mSv/h)</b>
<b>0,06</b>	<b>3,36</b>



#### 4.7.1- Representação dos resultados das taxas de dose efetivas

A Figura 4.1 e a Tabela 4.13 apresentam os resultados das taxas de dose efetivas encontradas nas simulações realizadas com o fantoma MAX.

Os acidentes que ocorrem com os Operadores de Radiografia (IOE), via de regra, são semelhantes ao apresentado neste trabalho. Quando ocorrer um acidente similar, em qualquer trabalho de radiografia industrial, se a fonte estiver no intervalo de 0,5 a 3,5 metros do Operador (IOE), pelo gráfico, pode-se obter uma estimativa da Taxa de Dose Efetiva recebida pelo Operador (IOE).

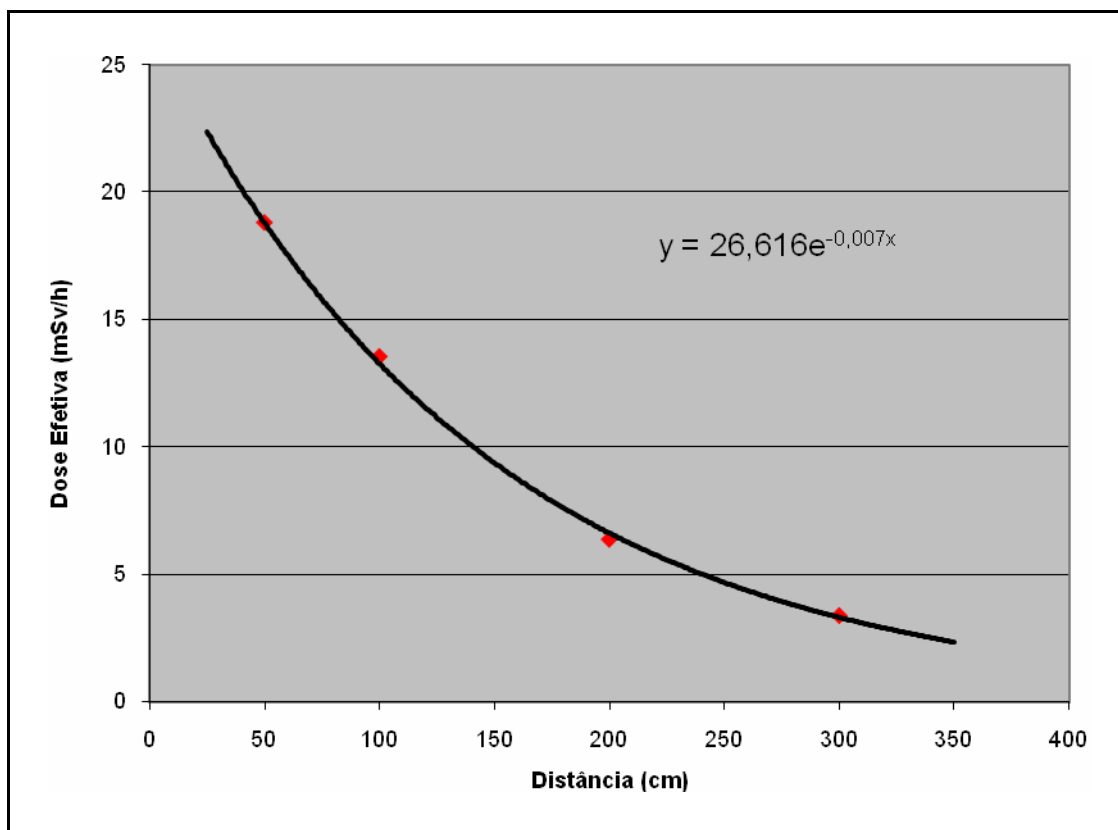


Figura 4.1 – Taxas de dose efetivas encontradas nas simulações com o fantoma MAX.

Tabela 4.13: Taxas de dose efetivas encontradas nas simulações com o fantoma MAX

Distância (m)	Taxa de Dose Efetiva ( $10^{-3}$ mSv/s)	Taxa de Dose Efetiva (mSv/min)	Taxa de Dose Efetiva (mSv/h)
0,5	0,0522	0,31	18,80
1,0	0,0376	0,22	13,53
2,0	0,0176	0,11	6,35
3,0	0,0093	0,06	3,36

#### 4.8- Intercomparação dos Resultados

Na Tabela 4.14 são apresentados os resultados dos cálculos teóricos, da simulação com o código MCNP e as medidas realizadas no primeiro levantamento radiométrico, obtidos na linha de isolamento transversal à vala situada a 250 cm de distância do eixo central da vala.

Tabela 4.14: Intercomparação dos resultados do primeiro cenário, isolamento transversal, primeiro levantamento radiométrico

Exposição com a fonte no ponto:	Cálculo teórico	Simulação com o código MCNP	Levantamento radiométrico ( $\mu\text{Sv/h}$ )
	Taxa de dose em operação de rotina ( $\mu\text{Sv/h}$ )	Taxa de dose em operação de rotina ( $\mu\text{Sv/h}$ ) (desvio menor que 0,01%)	
P1	0,3	12,0	$d_{1,3} = (43,0 + 4,56) / 2$  $D_{1,3} = 44,3$
P2	1,0	19,5	
P3	1,0	19,5	
Total	2,3	51,0	(44,3)*

(\*) O valor apresentado representa a média entre os valores médios das leituras realizadas nas laterais da vala, pontos: d1 e d3 (linha de isolamento transversal), (3.26), (3.27) e (3.28) do levantamento radiométrico.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4.14 pode-se verificar que a taxa de dose total encontrada na simulação com o código MCNP (0,0510 mSv/h) apresenta um valor próximo à taxa de dose total determinada experimentalmente a partir dos dados do levantamento radiométrico (0,0443 mSv/h), enquanto que a taxa de dose total encontrada nos cálculos teóricos foi de 0,0023 mSv/h, valor muito inferior a 0,01 mSv/h, diferenciando em muito aos outros dois resultados obtidos.

Na Tabela 4.15 são apresentados os resultados dos cálculos teóricos, a simulação com o código MCNP e as medidas realizadas no primeiro levantamento radiométrico, para a linha de isolamento longitudinal à vala, situada a 817,8 cm de distância da fonte.

Tabela 4.15: Intercomparação dos resultados do segundo cenário, isolamento longitudinal, primeiro levantamento radiométrico

Exposição com a fonte no ponto:	Cálculo teórico	Simulação com o código MCNP	Levantamento radiométrico ( $\mu\text{Sv/h}$ )
	Taxa de dose em operação de rotina ( $\mu\text{Sv/h}$ )	Taxa de dose em operação de rotina ( $\mu\text{Sv/h}$ ) (desvio menor que 0,01%)	
P1	26,7	5,3	$d_{2,4} = (9,8 + 9,0) / 2$  $d_{2,4} = 0,94$
P2	91,1	43,4	
P3	91,1	43,4	
Total	20,89	92,00	(9,4)*

(\*) O valor apresentado representa a média entre os valores médios das leituras realizadas nos pontos: d2 e d4 (linha de isolamento longitudinal), do primeiro levantamento radiométrico.

Na Tabela 4.15 pode-se verificar que a taxa de dose encontrada no levantamento radiométrico apresenta um valor bem inferior tanto ao valor da taxa de dose resultante dos cálculos teóricos como também da taxa de dose resultante da simulação no código MCNP. Neste caso (operação de rotina), isolamento longitudinal, como já previsto anteriormente neste trabalho (seção 3.1.1), as medidas realizadas na linha de isolamento longitudinal, não representaram com fidelidade a taxa de dose a 817,8 cm de uma exposição no ar, visto que as margens da vala onde foi realizado o levantamento radiométrico não se apresentavam como linhas totalmente retas. Conseqüentemente, em uma grande extensão de aproximadamente 8 m de vala, parte da radiação deve ter sido atenuada por irregularidades das paredes da vala. Irregularidades essas impossíveis de se quantificar, impedindo assim que se realizem as devidas correções nos cálculos teóricos e nas simulações do código MCNP.

Na Tabela 4.16 são apresentados os cálculos teóricos e a simulação com o código MCNP, para o terceiro cenário, situação de acidente, onde a fonte de  $^{192}\text{Ir}$  encontra-se a 141,4 cm das gônadas.

Tabela 4.16: Intercomparação dos resultados do terceiro cenário, situação de acidente, ponto P5 distante 141,4 cm das gônadas

Exposição fonte no ponto P5	PARAE	MCNP
	Tempo de exposição: 2min 1,833 mSv	Tempo de exposição: 2min 1,799 mSv
	Taxa de dose 55 mSv/h	Taxa de dose 54 mSv/h

As taxas de dose resultantes do cálculo teórico e da simulação com o código MCNP, referente à exposição do ponto P5, (situação de acidente) apresentam valores bem próximos, por se tratar de um “meio pré-estabelecido” bem mais simplificado. Por este motivo, possui um número bem menor de parâmetros a se considerar.

Na Tabela 4.17 são apresentados os resultados dos cálculos teóricos, da simulação com o código MCNP e as medidas realizadas no segundo levantamento radiométrico, obtidos na linha de isolamento transversal à vala situada a 250 cm de distância do eixo central da vala.

Tabela 4.17: Intercomparação dos resultados do quarto cenário, isolamento transversal, segundo levantamento radiométrico

Exposição com a fonte no ponto:	Cálculo teórico	Simulação com o código MCNP	Levantamento radiométrico ( $\mu\text{Sv/h}$ )
	Taxa de dose em operação de rotina ( $\mu\text{Sv/h}$ )	Taxa de dose em operação de rotina ( $\mu\text{Sv/h}$ ) (desvio menor que 0,01%)	
P1	0,03	2,6	$d_{7,10} = (79,5+63,3) / 2$  $d_{7,10} = 71,4$
P2	0,10	4,6	
P3	0,10	4,6	
Total	0,23	11,8	71,4*

(\*) O valor apresentado representa a média entre os valores médios das leituras realizadas nas laterais da vala, pontos: d7 e d10 (linha de isolamento transversal), do segundo levantamento radiométrico.

A Tabela 4.17 vem confirmar os resultados encontrados na Tabela 4.14, podendo-se verificar que a taxa de dose total encontrada na simulação com o código MCNP apresenta um valor próximo à taxa de dose total determinada experimentalmente a partir dos dados do levantamento radiométrico, uma diferença de aproximadamente 17%. A taxa de dose total encontrada nos cálculos teóricos apresentou uma diferença de mais de 60% em relação ao valor encontrado no levantamento radiométrico.

Na Tabela 4.18 são apresentados os resultados dos cálculos teóricos, da simulação com o código MCNP e das medidas realizadas no segundo levantamento radiométrico, para a linha de isolamento longitudinal à vala, situada a 817,8 cm de distância da fonte.

Tabela 4.18: Intercomparação dos resultados do segundo cenário, isolamento longitudinal, segundo levantamento radiométrico

Exposição com a fonte no ponto:	Cálculo teórico	Simulação com o código MCNP	Levantamento radiométrico ( $\mu\text{Sv/h}$ )
	Taxa de dose em operação de rotina ( $\mu\text{Sv/h}$ )	Taxa de dose em operação de rotina ( $\mu\text{Sv/h}$ ) (desvio menor que 0,01%)	
P1	7,165	1,4	$d_{2,4} = (67,4+63,8) / 2$  $d_{2,4} = 65,6$
P2	25,857	12,5	
P3	25,857	12,5	
Total	58,88	26,40	65,6*

(\*) O valor apresentado representa a média entre os valores médios das leituras realizadas nos pontos: d2 e d4 (linha de isolamento longitudinal), do segundo levantamento radiométrico.

Na Tabela 4.18 pode-se verificar que a taxa de dose encontrada no levantamento radiométrico apresenta um valor bem da taxa de dose resultante da simulação no código MCNP. Isto se deve porque no segundo levantamento foi construída uma vala de 10 metros, especificamente para a realização das medidas deste trabalho. Esta vala não

possuía irregularidades em sua paredes laterais, diferentemente da vala do primeiro levantamento radiométrico.

Na Tabela 4.19 são apresentados os resultados dos cálculos teóricos, das simulações com o código MCNP e das medidas realizadas nos dois levantamentos radiométricos, obtidos na linha de isolamento transversal à vala situada a 250 cm de distância do eixo central da vala.

Tabela 4.19: Resultados dos cálculos teóricos, simulações com MCNP e valores dos dois levantamentos radiométricos, linha de isolamento transversal, a 250 cm do eixo central da vala

Exposição com a fonte no ponto:	Cálculos teóricos Taxas de dose ( $\mu\text{Sv/h}$ )		Simulações com Código MCNP Taxas de dose ( $\mu\text{Sv/h}$ ) (desvios menores que 0,01%)		Levantamentos radiométricos ( $\mu\text{Sv/h}$ )	
	1º levantamento Radiométrico	2º levantamento Radiométrico	1º levantamento Radiométrico	2º levantamento Radiométrico	1º levantamento Radiométrico	2º levantamento Radiométrico
P1	0,3	0,03	12,0	2,6	$d_{1,3} =$	$d_{7,10} =$
P2	1,0	0,10	19,5	4,6	$(43,0+45,6) / 2$	$(79,52+63,3)/2$
P3	1,0	0,10	19,5	4,6	$d_{1,3} = 44,3$	$d_{7,10} = 71,4$
Total	2,3	0,23	51,0	11,8	44,3	71,4

Na Tabela 4.20 são apresentados os resultados dos cálculos teóricos, das simulações com o código MCNP e das medidas realizadas nos dois levantamentos radiométricos, obtidos na linha de isolamento longitudinal a 817,8 cm da fonte.

Tabela 4.20: Resultados dos cálculos teóricos, simulações com MCNP e valores dos dois levantamentos radiométricos, realizados na linha de isolamento longitudinal a 817,8 cm da fonte

Exposição com a fonte no ponto:	Cálculos teóricos Taxas de dose ( $\mu\text{Sv/h}$ )		Simulações com Código MCNP Taxas de dose ( $\mu\text{Sv/h}$ ) (desvios menores que 0,01%)		Levantamentos radiométricos ( $\mu\text{Sv/h}$ )	
	1º levantamento Radiométrico	2º levantamento Radiométrico	1º levantamento Radiométrico	2º levantamento Radiométrico	1º levantamento Radiométrico	2º levantamento Radiométrico
P1	26,7	7,165	5,3	1,4	$d_{2,4} =$	$d_{2,4} =$
P2	91,1	25,857	43,4	12,5	$(9,8 + 9,0) / 2$ $d_{2,4} = 9,4$	$(67,4 + 63,8) / 2$ $d_{2,4} = 65,6$
P3	91,1	25,857	43,4	12,5		
Total	208,9	58,88	92,0	26,4	9,4	65,6

#### 4.9- Taxas de dose efetivas, simulação com o fantoma MAX

As taxas de dose efetivas determinadas pela simulação com o fantoma MAX, não devem entrar na intercomparação dos resultados das taxas de dose encontradas nos cálculos teóricos, simulações com MCNP e valores dos dois levantamentos radiométricos por representarem conceitos diferentes.

Com as taxas de dose efetivas encontradas na simulação com o fantoma MAX, pode-se determinar um “fator de correção” representado pela razão entre: as taxas de dose efetivas encontradas na simulação com o fantoma MAX e as taxas de doses definidas em cálculos teóricos, considerando-se as mesmas distâncias, fonte/operado (IOE).

##### 4.9.1- Determinação do “Fator de Correção”

Pode-se determinar a curva que representa o “fator de correção” da taxa de dose, calculada teoricamente, a um metro do solo, nas gônadas de um operador distante de 25

a 400 cm de uma fonte, livre no solo, de Irídio-192, para transformá-la em um valor próximo ao valor da “taxa de dose efetiva recebida”.

Na Tabela 4.21 são apresentados os “Fatores de correção”, das taxas de dose calculadas para as taxas de dose efetivas.

Tabela 4.21: “Fatores de correção”, das taxas de dose calculadas para as taxas de dose efetivas

Distância (m)	Taxa de dose (mSv/h) Cálculo teórico	Taxa de dose efetiva (mSv/h) Fantoma MAX	Fator de Correção
0,5	73	18,7883	0,2574
1,0	55	13,5289	0,2460
2,0	37	6,3485	0,1716
3,0	28	3,3590	0,1200

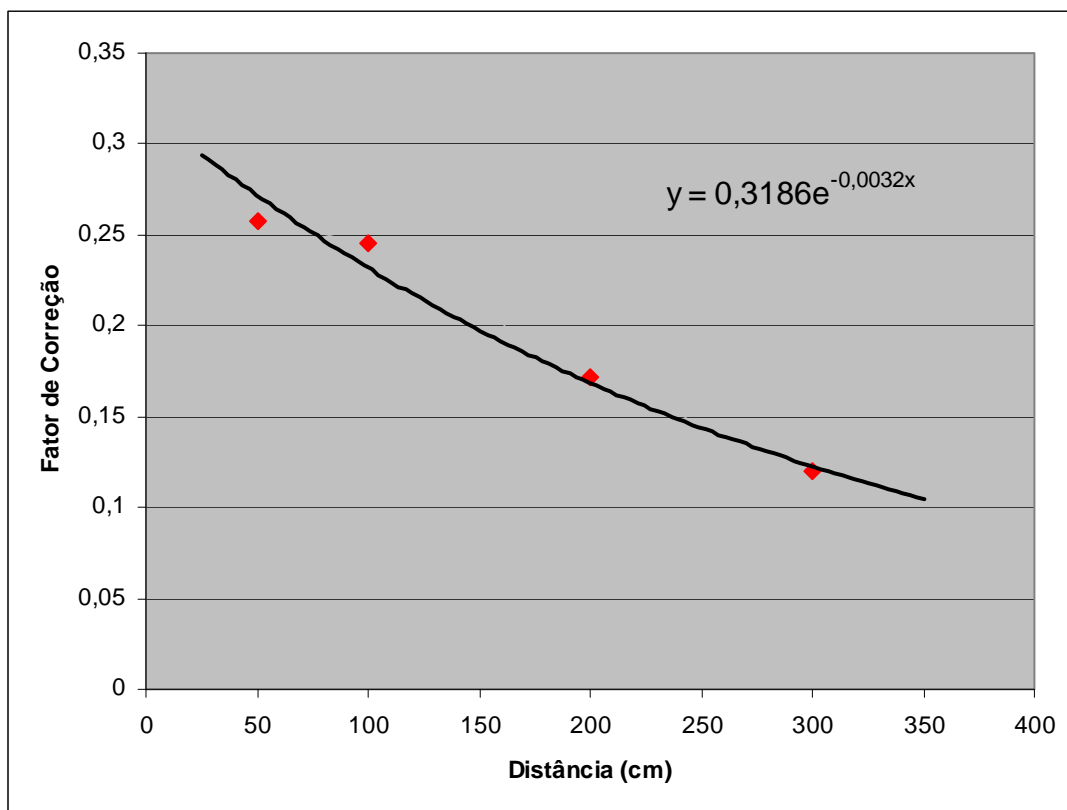


Figura 4.2: Curva dos fatores de correção para taxas de dose efetivas.

Esta curva do fator de correção, só poderá ser utilizada quando se tratar de cálculo de taxas de dose “no ar” proveniente de uma fonte de irídio-192.



É importante salientar que os valores encontrados ao se utilizar esta curva, não representarão valores exatos, mas sim, uma informação da ordem de grandeza da taxa de dose efetiva que o operador, deverá ter recebido.

Em sua grande maioria, os acidentes que ocorrem em trabalhos de radiografia industrial tratam-se da exposição de um Operador, que se encontra, distante de uma fonte de irídio 192, via de regra, dentro da faixa apresentada na Figura 4.2.

## CAPÍTULO 5

### **Análise dos Resultados e Conclusões**

Pode-se verificar que na intercomparação dos resultados referentes às exposições dos pontos: P1, P2 e P3 (operação de rotina) isolamento transversal, os cálculos teóricos do PARAE apresentaram valores dez vezes menores aos valores obtidos na simulação com o código MCNP. Esta discrepância aconteceu devido aos cálculos teóricos serem bastante simplificados, não levando em consideração inúmeros parâmetros que envolvem a interação dos fótons com um meio material pré-estabelecido.

Na intercomparação dos resultados referentes às exposições dos pontos: P1, P2 e P3 (operação de rotina) isolamento longitudinal, a taxa de dose encontrada no levantamento radiométrico apresenta um valor bem inferior tanto ao valor da taxa de dose resultante dos cálculos teóricos como também da taxa de dose resultante da simulação no código MCNP. Como já previsto anteriormente neste trabalho (seção 3.1.1), as medidas realizadas na linha de isolamento longitudinal, não representaram com fidelidade a taxa de dose a 817,8 cm de uma exposição no ar, visto que as margens da vala onde foi realizado o levantamento radiométrico não se apresentavam como linhas totalmente retas. Conseqüentemente, em uma grande extensão de aproximadamente 8m de vala, parte da radiação deve ter sido atenuada por irregularidades das paredes da vala. Essas irregularidades são impossíveis de se quantificar, impedindo assim que se realize as devidas correções nos cálculos teóricos e nas simulações do código MCNP.

As taxas de dose resultantes do cálculo teórico, referente a exposição do ponto P5, (situação de acidente) e a simulação com o código MCNP, apresentam valores próximos, por se tratar de um “meio pré-estabelecido” bem mais simplificado.

A intercomparação dos resultados referentes às exposições dos pontos: P1, P2 e P3 (operação de rotina), do segundo levantamento, isolamento transversal, confirma os resultados encontrados na intercomparação realizada com o primeiro levantamento radiométrico.

Na intercomparação dos resultados referentes às exposições dos pontos: P1, P2 e P3 (operação de rotina), segundo levantamento radiométrico, isolamento longitudinal,

como a vala foi construída especificamente para a realização das medidas, pode-se verificar valores bem mais próximos, inclusive no resultado dos cálculos teóricos.

Aplicando-se os valores de taxas de dose encontrados neste trabalho, aos limites anuais de dose equivalente efetiva e limites derivados dos mesmos, para trabalhadores (indivíduos ocupacionalmente expostos) e para indivíduos do público, definidos pela Norma CNEN-NN-3.01 [18], pode-se verificar a discrepância existente entre os resultados obtidos. Uma Empresa que se utilizar somente dos cálculos teóricos das taxas de dose apresentados pelo PARAE, para realizar os isolamentos de área nos trabalhos de gamagrafia, poderá sobre-expor seus trabalhadores, como também, indivíduos do público, que se encontrem nas cercanias destes trabalhos quando os mesmos estiverem sendo executados.

O limite anual de dose efetiva para trabalhadores, (IOE) é igual a 100 mSv para cinco anos ou 20 mSv médio por ano podendo no máximo receber em um ano, 50 mSv. O limite anual de dose efetiva para indivíduo do público, (IP) é igual a 1 mSv/ano.

Para indivíduos ocupacionalmente expostos, baseado nos cálculos teóricos do PARAE, na linha de isolamento de 250 cm, um trabalhador teria que ser exposto aproximadamente 20800 horas para atingir o limite anual, enquanto que pela simulação com MCNP poderia ficar até 980 horas e pelo levantamento radiométrico até 1128 horas.

Considerando-se a carga de trabalho de 8 horas por dia, nos cálculos teóricos do PARAE, na linha de isolamento de 250 cm, um trabalhador poderia ficar em torno de 2600 dias para atingir o limite anual, enquanto que pela simulação com MCNP, poderia ficar até 122 dias e pelo levantamento radiométrico, um trabalhador poderia até 141 dias.

Para indivíduos do público, pelos cálculos teóricos do PARAE, na linha de isolamento de 250 cm, um indivíduo do público poderia ficar em torno de 416 horas para atingir o limite anual, enquanto que pela simulação com MCNP poderia ficar até 20 horas e pelo levantamento radiométrico até 22 horas.

Considerando-se que os trabalhos realizados em um local, possuem carga de trabalho igual a 8 horas por dia, nos cálculos teóricos do PARAE, na linha de isolamento de 250 cm, um indivíduo do público poderia ficar até 52 dias para atingir o limite anual, enquanto que pela simulação com MCNP poderia ficar até 2 dias e pelo levantamento radiométrico também poderia ficar até 2 dias.

Faz-se necessário esclarecer que os valores das taxas de dose, para trabalhadores

e indivíduos do público, não representam uma realidade em trabalhos de radiografia industrial, visto que foram utilizados valores máximos de taxa de dose anuais permitidos pela norma CNEN-NN-3.01, sendo que em geral os trabalhos de radiografia possuem carga horária entre quatro e oito horas, com periodicidade de duas a três vezes por semana, sendo que esta carga de trabalho é distribuída entre vários trabalhadores da empresa. Além do que já foi exposto, quando se tratar de “Radioproteção” deve-se sempre utilizar o conceito do princípio "ALARA" aplicando-se sempre a máxima: “*QMTDM*”, “*Quanto Menor a Taxa de Dose Melhor*”. As comparações realizadas com os limites anuais da norma CNEN-NN-301 servem para confirmar a grande discrepância encontrada entre os valores dos cálculos teóricos do PARAE e os valores encontrados tanto no levantamento radiométrico como na simulação com o MCNP.

Na Tabela 4.17, onde são apresentados os resultados do segundo levantamento radiométrico, na linha de isolamento transversal, a 250 cm do eixo central da vala pode-se verificar que mais uma vez, o resultado dos cálculos teóricos realizados com as equações do PARAE apresenta um valor bem inferior aos valores encontrados tanto no levantamento radiométrico como na simulação com o código MCNP. Neste segundo levantamento, o valor dos cálculos teóricos assume um valor quase 100 vezes menor ( $0,23 \mu\text{Sv/h}$ ).

Os resultados das taxas de dose obtidos por simulação com o código MCNP e pelo segundo levantamento radiométrico apresentaram valores próximos, na mesma ordem de grandeza ( $11,8 \mu\text{Sv/h}$  e  $71,2 \mu\text{Sv/h}$ ).

Na Tabela 4.18, onde são apresentados os resultados do segundo levantamento radiométrico, na linha de isolamento longitudinal, a 817,8 cm da fonte pode-se verificar que os valores da taxa de dose da simulação com o código MCNP, e da taxa de dose obtida no levantamento radiométrico estão muito próximos  $0,0264 \text{ mSv/h}$  e  $0,0220 \text{ mSv/h}$ . Esta proximidade deve-se ao fato de que neste segundo levantamento radiométrico utilizou-se uma “vala construída especificamente” para este trabalho, portanto houve a preocupação de que suas paredes fossem totalmente retas, o que eliminou por completo qualquer possibilidade da radiação ser atenuada por irregularidades presentes nas paredes da vala. Tanto no primeiro levantamento radiométrico como também no segundo levantamento, pode-se verificar que os valores das taxas de dose referentes aos cálculos teóricos realizados com as equações do PARAE apresentam-se bem próximos aos valores das taxas de dose obtidas tanto nos levantamentos como nas simulações com o código MCNP.

A curva da Figura 4.2 foi construída a partir das simulações com o fantoma MAX. Foram quatro simulações realizadas com a fonte colocada a 50, 100, 200 e 300 cm de distância do fantoma MAX. A grande maioria dos acidentes que ocorrem em trabalhos de radiografia industrial, utilizando-se fontes de Irídio-192, trata-se da exposição de um Operador (IOE), que se encontra, distante da fonte, via de regra, dentro da faixa apresentada na Figura 4.2. Por este motivo acredita-se que esta curva será uma valiosa contribuição para a área da Indústria, especificamente para a *Radioproteção na Radiografia Industrial*.

Com os resultados apresentados neste trabalho pode-se concluir a inadequação da utilização das equações do PARAE, quando o meio que a radiação tiver que atravessar for diferente do meio “AR”. Nos resultados apresentados, observa-se uma grande discrepância entre os valores das taxas de dose obtidas a partir dos cálculos teóricos, baseado nas equações do PARAE, e valores encontrados tanto nas simulações com o código MCNP, como com os valores determinados experimentalmente, quando a radiação tem que atravessar o solo como também à parede da tubulação.

Este trabalho serve como um alerta deixando evidente a necessidade da realização de uma nova revisão no documento PARAE.

Como já citado, acredita-se que a “Curva com Fatores de Correção para Taxas de Dose Efetivas” (Figura 4.2), poderá ser uma excelente contribuição para qualquer serviço de radiografia industrial que utilize fonte de Irídio-192, onde existe um grande número de acidentes e que, em sua maioria, deverão se encontrar nos limites desta curva.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] RICHARDSON, H. D., *Industrial Radiography Manual*, Louisiana, Short Courses and Conferences, Louisiana State University, 1964.
- [2] HALMSHAW, R., *Industrial Radiology: Theory and Practice*. 2 ed. London, Springer, 1995.
- [3] VASCONCELOS, G. A. M., CALDAS, G. H. F., TEIXEIRA, P. B., *Energia Nuclear nas Aplicações Industriais, Radioproteção e Controle, Radiografia Industrial*, Apostila do Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2005.
- [4] FIRESTONE, R. B., *Table of Isotopes Vol II*, 8 Ed, Canada, Wiley-Interscience, 1999.
- [5] AQUINO, J. O., *Avaliação das Condições de Segurança Radiológica de Irradiadores Portáteis Panorâmicos de Gamagrafia Industrial Utilizados no Brasil*. Dissertação de M.Sc., IRD/CNEN, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [6] UNSCEAR - UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION, *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes: Effects, New York, 2000.
- [7] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, *Diretrizes Básicas de Radioproteção*, NE-3.01, Rio de Janeiro, 1988.
- [8] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, *Funcionamento de Serviço de Radiografia Industrial*, NN-6.04, Rio de Janeiro, 1988.

- [9] IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources*, Safety Series 115, Vienna, 1996.
- [10] ICRP - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, *Recommendations of the International Commission of Radiological Protection*, Publication 60, 1990.
- [11] ICRP - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, *General Principles for the Radiation Protection of Workers*, Publication 75, 1997.
- [12] ICRP - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, *Recommendations of the ICRP*, publication 26, 1977.
- [13] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, *Plano para áreas restritas com autorização específica – PARAE*, Rio de Janeiro, 1993.
- [14] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, *Plano para áreas restritas com autorização específica – PARAE*, revisão A, Rio de Janeiro, 1996.
- [15] X-5 MONTE CARLO TEAM, *MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume I: Overview and Theory*, LA-UR-03-1987, Los Alamos National Laboratory, California, 2003.
- [16] MORGAN, B.T., *Elements of Simulation*, New York, Chapman & Hall, 1984.
- [17] BRIESMEISTER, J. F., *MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4B*. Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory; 1997.
- [18] DEMIDOVICH, B.P., MARON, I. A., *Computational Mathematics*, Moscow, Mir Publishers, 1987.

- [19] IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Categorization of Radioactive Sources*, Safety Standards RS – G – 1.9, Vienna, 2005.
- [20] IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Regulatory Control of Radiation Sources*, Safety Standards GS-G -1.5, Vienna, 2004.
- [21] TEIXEIRA, P. B., *Determinação do Valor da Constante Alfa para a Realidade Brasileira, Visando à Otimização da Radioproteção*. Dissertação de M.Sc., Instituto Militar de Engenharia - IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003.
- [22] IAEA - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Fundamental Safety Principles*, Safety Standards SF 1, Vienna, 2006.
- [23] ICRP - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, *Data for Use in Protection Against External Radiation*, Publication 51, 1987.
- [24] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, *Diretrizes Básicas de Radioproteção*, NN-3.01, Rio de Janeiro, 2005.
- [25] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR, *Transporte de Materiais Radioativos*, NE-5.01, Rio de Janeiro, 1988.
- [26] BITELLI, T., *Dosimetria e Higiene das Radiações*, São Paulo, Grêmio Politécnico, 1982.
- [27] SHAPIRO, J., *Radiation Protection: A Guide for Scientists and Physicians*, 2 ed., Cambridge, Harvard University Press, 1981.
- [28] HENRY, H. F., *Fundamentals of Radiation Protection*, New York, Wiley-Interscience, 1969.



- [29] ICRP - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, *Protection Against Ionizing Radiation from External Sources Used in Medicine*, Publication 33, 1981.
- [30] ATTIX, F. H., *Introduction to Radiological Physics and Radiation*. New York, John Wiley, 1986.
- [31] BIELAJEW, A.F., *Fundamentals of the Monte Carlo methods for neutral and charged particle transport*, Michigan, University of Michigan, Department of Nuclear Engineering and Radiological Sciences, 2001.
- [32] MAUCEC, M., MEIJER, R. J., "Monte Carlo simulations as a feasibility tool for non-metallic land-mine detection by thermal-neutron backscattering", *Applied Radiation and Isotopes*, n. 56, pp. 837-846, 2002.
- [33] ICRP - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, *Report of the Task Group on Reference Man*, Publication 23, 1975.
- [34] SNYDER, W. S., FORD, M. R., WARNER, G. G., et al., *Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom*, ORNL-4979, Oak Ridge, 1974.
- [35] SNYDER, W. S., FORD, M. R., WARNER, G. G., *Estimates of absorbed fractions for monoenergetic photon sources uniformly distributed in various organs of a heterogeneous phantom*, New York, Society of Nuclear Medicine, 1978.
- [36] CRISTY, M., *Mathematical phantoms representing children at various ages for use in estimates of internal dose*, ORNL/NUREG/TM-367, Oak Ridge, 1980.
- [37] KRAMER, R., ZANKL, M., WILLIAMS, G., et al., *The calculation of dose from external photon exposures using reference human phantoms and Monte Carlo methods: Part 1. The male (ADAM) and female (EVA) adult mathematical phantoms*, S-885, Neuherberg-Muenchen: Institut fuer trahlenschutz, GSFForschungszentrum fuer Umwelt und Gesundheit, 1982.

- [38] STABIN, M., WATSON, E., CRISTY, M., et al., *Mathematical models and specific absorbed fractions of photon energy in the nonpregnant adult female and at the end of each trimester of pregnancy*, ORNL/TM-12907, Oak Ridge, 1995.
- [39] GIBBS, S. J., PUJOL, A., CHEN, T. S., et al., “Patient risk from interproximal radiography”, *Oral Surg. Oral Med. Oral Pathol.*, v. 58, 1984.
- [40] WILLIAMS, G., ZANKL, M., ABMAYR, W., et al., “The calculation of dose from external photon exposures using reference and realistic human phantoms and Monte Carlo methods”, *Phys. Med. Biol.*, v. 31, 1986.
- [41] VEIT, R., ZANKL, M., PETOUSSI, N., et al., *Tomographic anthropomorphic models, Part I: Construction technique and description of models of an 8-week-old baby and a 7-year-old child*, 3/89, GSF, Neuherberg, 1989.
- [42] VEIT, R., PANZER, W., ZANKL, M., et al., “Vergleich berechneter und gemessener Dosen an einem anthropomorphen Phantom”, *Med. Phys.*, v. 2, 1992.
- [43] ZANKL, M., WITTMANN, A., “The adult male voxel model ‘Golem’ segmented from whole-body CT patient data”, *Radiat. Environ. Biophys.*, v. 40, 2001.
- [44] Petoussi-Hens, N., Zankl, M., Fill, U., et al., “The GSF family of voxel phantoms”, *Phys. Med. Biol.*, v. 47, 2002.
- [45] ICRU - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS, *Tissue substitutes in radiation dosimetry and measurement*, 44, 1989.
- [46] ZAR, J.H., *Biostatistical Analysis*, 3 ed., Prentice Hall, Upper Saddle River – New Jersey 07458, 1974.

- [47] JAEGER, R. G., BLIZARD, E. P., CHILTON, A. B., et al., *Engineering Compendium on Radiation Shielding Vol. II*. New York, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1975.
- [48] ICRP - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, *ICRP Committee 3 Task Group, P. Grande and M. C. O'Riordan, chairmen, Data for Protection Against Ionizing Radiation from External Sources: Supplement to ICRP Publication 15*, Publication 21, 1971.
- [49] BOZKURT, A., *Assessment of Organ Doses from Exposure to Neutrons Using the Monte Carlo Technique and an Image-Based Anatomical Model*. Tese de D.Sc., Rensselaer Polytechnic Institute Troy, New York, 2000.
- [50] NIKOLAIDIS, N., PITAS, I., *3-D Image Processing Algorithms*. New York, John Wiley, 2001.
- [51] LOUREIRO, E. C. M., LIMA, F. R. A., STABIN, M. G., “A voxel-based head-and-neck phantom built from tomographic colored images”, *Cellular and Molecular Biology*, v. 48(5), 2002.
- [52] ICRP - INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, *Basic Anatomical And Physiological Data For Use In Radiological Protection: Reference Values*, Publication 89, 2003.
- [53] KRAMER, R., VIEIRA, J. W., KHOURY, H. J., et al., “All about MaX: a Male Adult Voxel Phantom for Monte Carlo Calculation in Radiation Protection Dosimetry”, *Phys. Med. Biol.*, n. 56, pp. 1239-1262, 2003.

## ANEXO 1

Cálculo dos erros associados às medidas realizadas no levantamento radiométrico

Fonte: posição 1 - Local da medida: (d2):

$$\bar{X}_1 = 0,32 ; \quad n = 5 \quad (\text{A1.1})$$

$$\bar{X}_1 = \frac{0,32 + 0,31 + 0,33 + 0,32 + 0,32}{5} = 0,32 \quad (\text{A1.2})$$

Variância:

$$S_1^2 = \frac{[(0,32-0,32)^2 + (0,31-0,32)^2 + (0,33-0,32)^2 + (0,32-0,32)^2 + (0,32-0,32)^2]}{5-1} \quad (\text{A1.3})$$

$$S_1^2 = 0,00005 \quad (\text{A1.4})$$

Desvio Padrão:

$$S_{1x} = \pm 0,00707 \quad (\text{A1.5})$$

Desvio Padrão da Média:

$$S_{1\bar{x}} = \pm 0,00316 \quad (\text{A1.6})$$

$$\mathbf{d2_1 = 0,32 \pm 0,003}$$

Fonte: posição 2 - Local da medida: (d2):

$$\bar{X}_2 = 0,34 ; \quad n = 5 \quad (\text{A1.7})$$

$$\bar{X}_2 = \frac{0,34 + 0,33 + 0,32 + 0,36 + 0,35}{5} = 0,34 \quad (\text{A1.8})$$

Variância:

$$S_2^2 = \frac{[(0,34-0,34)^2 + (0,33-0,34)^2 + (0,32-0,34)^2 + (0,36-0,34)^2 + (0,35-0,34)^2]}{5-1} \quad (\text{A1.9})$$

$$S_2^2 = 0,00025 \quad (\text{A1.10})$$

Desvio Padrão:

$$S_{2x} = \pm 0,01581 \quad (\text{A1.11})$$

Desvio Padrão da Média:

$$S_{2\bar{x}} = \pm 0,00707 \quad (\text{A1.12})$$

$$\mathbf{d2_2 = 0,34 \pm 0,007}$$

Fonte: posição 3 - Local da medida: (d2):

$$\bar{X}_3 = 0,32 ; \quad n = 5 \quad (\text{A1.13})$$

$$\bar{X}_3 = \frac{0,32 + 0,32 + 0,31 + 0,32 + 0,33}{5} = 0,32 \quad (\text{A1.14})$$

Variância:

$$S_3^2 = \frac{[(0,32-0,32)^2 + (0,32-0,32)^2 + (0,31-0,32)^2 + (0,32-0,32)^2 + (0,33-0,32)^2]}{5-1} \quad (\text{A1.15})$$

$$S_3^2 = 0,00005 \quad (\text{A1.16})$$

Desvio Padrão:

$$S_{3x} = \pm 0,00707 \quad (\text{A1.17})$$

Desvio Padrão da Média:

$$S_{3\bar{x}} = \pm 0,00316 \quad (\text{A1.18})$$

$$\mathbf{d2_3 = 0,32 \pm 0,003}$$

Propagação de Incertezas:

Variância total:

$$\sigma_{d2total}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 \quad (\text{A1.19})$$

$$\sigma_{d2total} = \sqrt{S_{1\bar{x}}^2 + S_{2\bar{x}}^2 + S_{3\bar{x}}^2} = \sqrt{0,00316^2 + 0,00707^2 + 0,00316^2} \quad (\text{A1.20})$$

$$\sigma_{d2total} = \pm 0,00836 \quad (\text{A1.21})$$

$$\mathbf{d2_t = 0,32 + 0,34 + 0,32 = 0,98 \pm 0,008}$$

Fonte: posição 1 - Local da medida: (d3):

$$\bar{X}_1 = 0,38 ; \quad n = 5 \quad (\text{A1.22})$$

$$\bar{X}_1 = \frac{0,38 + 0,38 + 0,37 + 0,39 + 0,38}{5} = 0,38 \quad (\text{A1.23})$$

Variância:

$$S_1^2 = \frac{[(0,38-0,38)^2 + (0,38-0,38)^2 + (0,37-0,38)^2 + (0,39-0,38)^2 + (0,38-0,38)^2]}{5-1} \quad (\text{A1.24})$$

$$S_1^2 = 0,00005 \quad (\text{A1.25})$$

Desvio Padrão:

$$S_{1x} = \pm 0,00707 \quad (\text{A1.26})$$

Desvio Padrão da Média:

$$S_{1\bar{x}} = \pm 0,00316 \quad (\text{A1.27})$$

$$\mathbf{d3_1 = 0,38 \pm 0,003}$$

Fonte: posição 2 - Local da medida: (d3):

$$\bar{X}_2 = 0,60 ; \quad n = 5 \quad (\text{A1.28})$$

$$\bar{X}_2 = \frac{0,60 + 0,60 + 0,60 + 0,59 + 0,61}{5} = 0,60 \quad (\text{A1.29})$$

Variância:

$$S_2^2 = \frac{[(0,60-0,60)^2 + (0,60-0,60)^2 + (0,60-0,60)^2 + (0,59-0,60)^2 + (0,61-0,60)^2]}{5-1} \quad (\text{A1.30})$$

$$S_2^2 = 0,00005 \quad (\text{A1.31})$$

Desvio Padrão:

$$S_2 = \pm 0,00707 \quad (\text{A1.32})$$

Desvio Padrão da Média:

$$S_{2\bar{x}} = \pm 0,00316 \quad (\text{A1.33})$$

$$\mathbf{d3_2 = 0,60 \pm 0,003}$$

Fonte: posição 3 - Local da medida: (d3):

$$\bar{X}_3 = 3,58 ; \quad n = 5 \quad (\text{A1.34})$$

$$\bar{X}_3 = \frac{3,58 + 3,58 + 3,59 + 3,57 + 3,58}{5} = 3,58 \quad (\text{A1.35})$$

Variância:

$$S_3^2 = \frac{[(3,58-3,58)^2 + (3,58-3,58)^2 + (3,59-3,58)^2 + (3,57-3,58)^2 + (3,58-3,58)^2]}{5-1} \quad (\text{A1.36})$$

$$S_3^2 = 0,00005 \quad (\text{A1.37})$$

Desvio Padrão:

$$S_{3x} = \pm 0,00707 \quad (\text{A1.38})$$

Desvio Padrão da Média:

$$S_{3\bar{x}} = \pm 0,00316 \quad (\text{A1.39})$$

$$\mathbf{d3_3 = 3,58 \pm 0,003}$$

Propagação de Incertezas:

Variância total:

$$\sigma_{d3total}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 \quad (\text{A1.40})$$

$$\sigma_{d3total} = \sqrt{S_{1\bar{x}}^2 + S_{2\bar{x}}^2 + S_{3\bar{x}}^2} = \sqrt{0,00316^2 + 0,00316^2 + 0,00316^2} \quad (\text{A1.41})$$

$$\sigma_{d3total} = \pm 0,005473 \quad (\text{A1.42})$$

$$\mathbf{d3_t = 0,38 + 0,60 + 3,58 = 4,56 \pm 0,005}$$

Fonte: posição 1 - Local da medida: (d4):

$$\bar{X}_1 = 0,30 ; \quad n = 5 \quad (\text{A1.43})$$

$$\bar{X}_1 = \frac{0,30 + 0,31 + 0,30 + 0,30 + 0,29}{5} = 0,30 \quad (\text{A1.44})$$

Variância:

$$S_1^2 = \frac{[(0,30-0,30)^2 + (0,31-0,30)^2 + (0,30-0,30)^2 + (0,30-0,30)^2 + (0,29-0,30)^2]}{5-1} \quad (\text{A1.45})$$



$$S_1^2 = 0,00005 \quad (\text{A1.46})$$

Desvio Padrão:

$$S_{1x} = \pm 0,00707 \quad (\text{A1.47})$$

Desvio Padrão da Média:

$$S_{1\bar{x}} = \pm 0,00316 \quad (\text{A1.48})$$

$$\mathbf{d4_1 = 0,30 \pm 0,003}$$

Fonte: posição 2 - Local da medida: (d4):

$$\bar{X}_2 = 0,32 ; \quad n = 5 \quad (\text{A1.49})$$

$$\bar{X}_2 = \frac{0,32 + 0,31 + 0,31 + 0,34 + 0,32}{5} = 0,32 \quad (\text{A1.50})$$

Variância:

$$S_2^2 = \frac{[(0,32-0,32)^2 + (0,31-0,32)^2 + (0,31-0,32)^2 + (0,34-0,32)^2 + (0,32-0,32)^2]}{5-1} \quad (\text{A1.51})$$

$$S_2^2 = 0,00015 \quad (\text{A1.52})$$

Desvio Padrão:

$$S_2 = \pm 0,012247 \quad (\text{A1.53})$$

Desvio Padrão da Média:

$$S_{2x} = \pm 0,005477 \quad (\text{A1.54})$$

$$\mathbf{d4_2 = 0,38 \pm 0,005}$$

Fonte: posição 3 - Local da medida: (d4):

$$\bar{X}_3 = 0,28 ; \quad n = 5 \quad (\text{A1.55})$$

$$\bar{X}_3 = \frac{0,28 + 0,28 + 0,28 + 0,27 + 0,29}{5} = 0,28 \quad (\text{A1.56})$$

Variância:

$$S_3^2 = \frac{[(0,28-0,28)^2 + (0,28-0,28)^2 + (0,28-0,28)^2 + (0,27-0,28)^2 + (0,29-0,28)^2]}{5-1} \quad (\text{A1.57})$$

$$S_3^2 = 0,00005 \quad (\text{A1.58})$$

Desvio Padrão:

$$S_{3x} = \pm 0,00707 \quad (\text{A1.59})$$

Desvio Padrão da Média:

$$S_{3\bar{x}} = \pm 0,00316 \quad (\text{A1.60})$$

$$\mathbf{d4_3 = 0,28 \pm 0,003}$$

Propagação de Incertezas:

Variância total:

$$\sigma_{d4total}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 \quad (\text{A1.61})$$

$$\sigma_{d4total} = \sqrt{S_{1\bar{x}}^2 + S_{2\bar{x}}^2 + S_{3\bar{x}}^2} = \sqrt{0,00316^2 + 0,00548^2 + 0,00316^2} \quad (\text{A1.62})$$

$$\sigma_{d4total} = \pm 0,007072 \quad (\text{A1.63})$$

$$\mathbf{d4_t = 0,30 + 0,32 + 0,28 = 0,90 \pm 0,007}$$

Propagação de Incertezas do valor médio entre os pontos d1 e d3 (distantes 250cm do eixo central da vala, onde se encontra a fonte de radiação):

Variância total:

$$\sigma_{d_1d_3}^2 = \sigma_{d_1}^2 + \sigma_{d_3}^2 \quad (\text{A1.64})$$

$$\sigma_{d_1d_3} = \frac{\sqrt{S_{d_1}^2 + S_{d_3}^2}}{2} = \frac{\sqrt{0,0095^2 + 0,0055^2}}{2} \quad (\text{A1.65})$$

$$\sigma_{d_1d_3} = \frac{\sqrt{0,00009025 + 0,00003025}}{2} = \pm 0,010977 \quad (\text{A1.66})$$

$$\mathbf{d_{1,3} = 4,30 + 4,56 / 2 = 4,43 \pm 0,0109}$$

Propagação de Incertezas do valor médio entre os pontos d2 e d4 (distantes 800 cm do eixo central da vala, onde se encontra a fonte de radiação):

Variância total:

$$\sigma_{d_2d_4}^2 = \sigma_{d_2}^2 + \sigma_{d_4}^2 \quad (\text{A1.67})$$

$$\sigma_{d_2d_4} = \frac{\sqrt{S_{d_2}^2 + S_{d_4}^2}}{2} = \frac{\sqrt{0,008^2 + 0,007^2}}{2} \quad (\text{A1.68})$$

$$\sigma_{d_2d_4} = \frac{\sqrt{0,000064 + 0,000049}}{2} = \pm 0,005315 \quad (\text{A1.69})$$

$$\mathbf{d_{2,4} = 0,98 + 0,90 / 2 = 0,94 \pm 0,005}$$

## ANEXO 2

1- Determinação dos valores das taxas de dose, para a distância de 200 cm

1.1- Primeiro levantamento:

Determinação de (x):

O valor da camada de solo (x), que a radiação gama atravessa pode ser obtido, por equivalência de triângulos,

$$100/Z = (150 - Y) / Y \quad (\text{A2.1})$$

Tirando o valor de **Z** na equação, tem-se:

$Z = 100Y / (150 - Y)$ ; substituindo o valor de Z na equação (A2.1), tem-se:

$$50 = y \left[ \frac{70(150 - y)}{100y} - 1 \right] \quad (\text{A2.2})$$

Logo:

$$\mathbf{y = 30,29 \text{ cm}}$$

$$z = \frac{100 \times 30,29}{150 - 30,29} \quad (\text{A2.3})$$

Logo:

$$\mathbf{z = 25,30 \text{ cm}}$$

Por Pitágoras:

$$x^2 = 917,48 + 640,09 = 1557,57 \quad (\text{A2.4})$$

Logo:

$$\mathbf{x = 39,46 \text{ cm}}$$

1.2- Segundo levantamento:

Determinação de (x):

O valor da camada de solo (x), que a radiação gama atravessa pode ser obtido, por equivalência de triângulos,

$$100/Z = (145 - Y) / Y \quad (A2.5)$$

Tirando o valor de **Z**, tem-se:

$Z = 100Y / (145 - Y)$ ; substituindo o valor de Z, tem-se:

$$55 = y \left[ \frac{85(145 - y)}{100y} - 1 \right] \quad (A2.6)$$

Logo:

$$y = \mathbf{36,89 \text{ cm}}$$

$$z = \frac{100 \times 36,89}{145 - 36,89} \quad (A2.7)$$

Logo:

$$z = \mathbf{34,12 \text{ cm}}$$

Por Pitágoras:

$$x^2 = 1360,87 + 1164,17 = 2525,05 \quad (A2.8)$$

Logo:

$$x = \mathbf{50,25 \text{ cm}}$$

Determinação de (S):

Determinado o valor de (x), camada de solo que a radiação gama atravessa, pode-se encontrar o fator de transmissão (S), da camada do solo conforme a equação (A2.9).

$$S = \frac{1}{2^{\mu \cdot X / \ln 2}} \quad (\text{A2.9})$$

Para o primeiro levantamento radiométrico,

$$S = \mathbf{0,0141}$$

Para o segundo levantamento radiométrico,

$$S = \mathbf{0,0044}$$

Determinação de (dT) e (d):

Os valores da distância total ( $d_T$ ) e da distância percorrida no “ar” (d), pela radiação gama da fonte até o ponto de interesse, gônadas, podem ser obtidos utilizando-se as equações:

$$d_T^2 = 200^2 + 170^2 \quad (\text{A2.10})$$

Para o primeiro levantamento radiométrico,

$$d_T^2 = 200^2 + 170^2 \quad (\text{A2.11})$$

$$d_T = 262,48 \text{ cm}$$

Para o segundo levantamento radiométrico,

$$d_T^2 = 200^2 + 185^2 \quad (\text{A2.12})$$

$$d_T = 272,44 \text{ cm}$$

$$d = d_T - x \quad (\text{A2.13})$$

Logo:

Para o primeiro levantamento radiométrico,

$$d = 262,48 - 39,46 = 223,02 \text{ cm}$$

Para o segundo levantamento radiométrico,

$$d = 272,44 - 50,25 = 222,19 \text{ cm}$$

2- Determinação dos valores das taxas de dose, para a distância de 300 cm

2.1- Primeiro levantamento:

Determinação de (x):

O valor da camada de solo (x), que a radiação gama atravessa pode ser obtido, por equivalência de triângulos,

$$100/Z = (250 - Y) / Y \quad (\text{A2.14})$$

Tirando o valor de **Z** na equação tem-se:

$Z = 100Y / (250 - Y)$ ; substituindo o valor de Z na equação tem-se:

$$50 = y \left[ \frac{70(250 - y)}{100y} - 1 \right] \quad (\text{A2.15})$$

Logo:

$$\mathbf{y = 73,53 \text{ cm}}$$

$$z = \frac{100 \times 73,53}{250 - 73,53} \quad (\text{A2.16})$$

Logo:

$$\mathbf{z = 41,67 \text{ cm}}$$

Por Pitágoras:

$$x^2 = 5406,66 + 1736,38 = 7143,04 \quad (\text{A2.17})$$

Logo:

$$\mathbf{x = 84,52 \text{ cm}}$$

2.2- Segundo levantamento:

Determinação de (x):

O valor da camada de solo (x), que a radiação gama atravessa pode ser obtido, por equivalência de triângulos,

$$100/Z = (245 - Y) / Y \quad (\text{A2.18})$$

Tirando o valor de **Z**, tem-se:

$$Z = 100Y / (245 - Y);$$

Substituindo o valor de **Z**, tem-se:

$$55 = y \left[ \frac{85(245 - y)}{100y} - 1 \right] \quad (\text{A2.19})$$

Logo:

$$y = \mathbf{82,84 \text{ cm}}$$

$$z = \frac{100 \times 82,84}{245 - 82,84} \quad (\text{A2.20})$$

Logo:

$$z = \mathbf{51,08 \text{ cm}}$$

Por Pitágoras:

$$x^2 = 6862,46 + 2609,17 = 9471,63 \quad (\text{A2.21})$$

Logo:

$$x = \mathbf{97,32 \text{ cm}}$$

Determinação de (S):

Determinado o valor de (x), camada de solo que a radiação gama atravessa, pode-se



encontrar o fator de transmissão (S), da camada do solo conforme a equação (A2.22).

$$S = \frac{1}{2^{\mu \cdot X / \ln 2}} \quad (\text{A2.22})$$

Logo:

Para o primeiro levantamento radiométrico,

$$S = \mathbf{0,000108}$$

Para o segundo levantamento radiométrico,

$$S = \mathbf{0,0000272}$$

Determinação de (dT) e (d):

Os valores da distância total ( $d_T$ ) e da distância percorrida no “ar” (d), pela radiação gama da fonte até o ponto de interesse, gônadas, podem ser obtidos utilizando-se as equações:

Para o primeiro levantamento radiométrico,

$$\begin{aligned} d_T^2 &= 300^2 + 170^2 \\ d_T &= 344,82 \text{ cm} \end{aligned} \quad (\text{A2.23})$$

Para o segundo levantamento radiométrico,

$$\begin{aligned} d_T^2 &= 300^2 + 185^2 \\ d_T &= 352,45 \text{ cm} \end{aligned} \quad (\text{A2.24})$$

$$d = d_T - x \quad (\text{A2.25})$$

Logo:

Para o primeiro levantamento radiométrico,

$$d = 344,82 - 84,52 = 260,30 \text{ cm}$$

Para o segundo levantamento radiométrico,

$$d = 352,45 - 97,32 = 255,13 \text{ cm}$$

3- Determinação dos valores das taxas de dose, para a distância de 400 cm

3.1- Primeiro levantamento:

Determinação de (x):

O valor da camada de solo (x), que a radiação gama atravessa pode ser obtido, por equivalência de triângulos,

$$100/Z = (350 - Y) / Y \quad (\text{A2.26})$$

Tirando o valor de **Z** na equação tem-se:

$Z = 100Y / (350 - Y)$ ; substituindo o valor de Z na equação tem-se:

$$50 = y \left[ \frac{70(350 - y)}{100y} - 1 \right] \quad (\text{A2.27})$$

Logo:

$$\mathbf{y = 114,70 \text{ cm}}$$

$$z = \frac{100 \times 114,70}{350 - 114,70} \quad (\text{A2.28})$$

Logo:

$$\mathbf{z = 48,75 \text{ cm}}$$

Por Pitágoras:

$$x^2 = 13156,09 + 2376,56 = 15532,65 \quad (\text{A2.29})$$

Logo:

$$\mathbf{x = 124,63 \text{ cm}}$$

### 3.2- Segundo levantamento:

Determinação de (x):

O valor da camada de solo (x), que a radiação gama atravessa pode ser obtido, por equivalência de triângulos,

$$100/Z = (345 - Y) / Y \quad (\text{A2.30})$$

Tirando o valor de **Z**, tem-se:

$$Z = 100Y / (345 - Y);$$

Substituindo o valor de **Z**, tem-se:

$$55 = y \left[ \frac{85(345 - y)}{100y} - 1 \right] \quad (\text{A2.31})$$

Logo:

$$y = \mathbf{128,78 \text{ cm}}$$

$$z = \frac{100 \times 128,78}{345 - 128,78} \quad (\text{A2.32})$$

Logo:

$$z = \mathbf{59,56 \text{ cm}}$$

Por Pitágoras:

$$x^2 = 16584,29 + 50724,05 = 67308,34 \quad (\text{A2.33})$$

Logo:

$$x = \mathbf{135,44 \text{ cm}}$$

Determinação de (S):

Determinado o valor de (x), camada de solo que a radiação gama atravessa, pode-se encontrar o fator de transmissão (S), da camada do solo conforme a equação (A2.34).

$$S = \frac{1}{2^{\mu \cdot X / \ln 2}} \quad (\text{A2.34})$$

Logo:

Para o primeiro levantamento radiométrico,

$$S = 0,0000014$$

Para o segundo levantamento radiométrico,

$$S = 0,000000442$$

Determinação de (dT) e (d):

Os valores da distância total ( $d_T$ ) e da distância percorrida no “ar” (d), pela radiação gama da fonte até o ponto de interesse, gônadas, podem ser obtidos utilizando-se as equações:

Para o primeiro levantamento radiométrico,

$$\begin{aligned} d_T^2 &= 400^2 + 170^2 \\ d_T &= 434,63 \text{ cm} \end{aligned} \quad (\text{A2.35})$$

Para o segundo levantamento radiométrico,

$$\begin{aligned} d_T^2 &= 400^2 + 185^2 \\ d_T &= 440,71 \text{ cm} \end{aligned} \quad (\text{A2.36})$$

$$d = d_T - x \quad (\text{A2.37})$$

Logo:

Para o primeiro levantamento radiométrico,

$$d = 434,63 - 124,63 = 310,00 \text{ cm}$$

Para o segundo levantamento radiométrico,

$$d = 440,71 - 135,44 = 305,27 \text{ cm}$$

### ANEXO 3

1- Cálculo do primeiro cenário para as linhas de isolamento de 100 cm, 200 cm, 300 cm e 400 cm.

Cálculo das taxas de dose referentes às exposições nos pontos P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> e P<sub>3</sub>, com a linha de isolamento transversal, situada a 1 m, 2m, 3 m e 4 m de distância do eixo central da vala, conforme as equações: (3.8); (3.9) e (3.10).

Linha de Isolamento distante 100 cm do eixo central da vala:

$$TD_1 = \frac{500 \times 20,72 \times 0,0819 \times 1/17}{1,76^2 \times 2 \times 1,896} = 0,042491 \text{ mSv/h} \quad (\text{A3.1})$$

$$TD_2 = \frac{500 \times 20,72 \times 0,0819 \times 1/17}{1,76^2} = 0,161127 \text{ mSv/h} \quad (\text{A3.2})$$

$$TD_3 = \frac{500 \times 20,72 \times 0,0819 \times 1/17}{1,76^2} = 0,161127 \text{ mS/h} \quad (\text{A3.3})$$

Taxa de dose Total:

$$\mathbf{TD_t = 0,0425 + 0,1611 + 0,1611 = 0,3647 \text{ mSv/h}} \quad (\text{A3.4})$$

Linha de Isolamento distante 200 cm do eixo central da vala:

$$TD_1 = \frac{500 \times 20,72 \times 0,0141 \times 1/17}{2,23^2 \times 2 \times 1,896} = 0,0045 \text{ mSv/h} \quad (\text{A3.5})$$

$$TD_2 = \frac{500 \times 20,72 \times 0,0141 \times 1/17}{2,23^2} = 0,0173 \text{ mSv/h} \quad (\text{A3.6})$$

$$TD_3 = \frac{500 \times 20,72 \times 0,0141 \times 1/17}{2,23^2} = 0,0173 \text{ mSv/h} \quad (\text{A3.7})$$

Taxa de dose Total:

$$\mathbf{TD_t = 0,0045 + 0,0173 + 0,0173 = 0,0391 \text{ mSv/h}} \quad (\text{A3.8})$$

Linha de Isolamento distante 300 cm do eixo central da vala:

$$TD_1 = \frac{500 \times 20,72 \times 0,000108 \times 1/17}{2,62^2 \times 2 \times 1,896} = 0,000002 \text{ mSv/h} \quad (\text{A3.9})$$

$$TD_2 = \frac{500 \times 20,72 \times 0,000108 \times 1/17}{2,62^2} = 0,00096 \text{ mSv/h} \quad (\text{A3.10})$$

$$TD_3 = \frac{500 \times 20,72 \times 0,000108 \times 1/17}{2,62^2} = 0,000096 \text{ mSv/h} \quad (\text{A3.11})$$

Taxa de dose Total:

$$\mathbf{TD_t = 0,000002 + 0,000096 + 0,000096 = 0,00019 \text{ mSv/h}} \quad (\text{A3.12})$$

Linha de Isolamento distante 400 cm do centro da vala:

$$TD_1 = \frac{500 \times 20,72 \times 0,0000014 \times 1/17}{3,10^2 \times 2 \times 1,896} = 0,0000002 \text{ mSv/h} \quad (\text{A3.13})$$

$$TD_2 = \frac{500 \times 20,72 \times 0,0000014 \times 1/17}{3,10^2} = 0,00000063 \text{ mSv/h} \quad (\text{A3.14})$$

$$TD_3 = \frac{500 \times 20,72 \times 0,0000014 \times 1/17}{3,10^2} = 0,00000063 \text{ mSv/h} \quad (\text{A3.15})$$

Taxa de dose Total:

$$\mathbf{TD_t = 0,0000002 + 0,00000063 + 0,00000063 = 0,0000014 \text{ mSv/h}} \quad (\text{A3.16})$$

2- Cálculo do quarto cenário para as linhas de isolamento de 200 cm, 300 cm e 400 cm.

Cálculo das taxas de dose referentes às exposições nos pontos P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> e P<sub>3</sub>, com a linha de isolamento transversal, situada a 200 cm, 300 cm e 400 cm de distância do eixo central da vala, conforme as equações: (3.26); (3.27) e (3.28).

Linha de Isolamento distante 200 cm do centro da vala:

$$TD_1 = \frac{500 \times 11,07 \times 0,0044 \times 1/32}{2,22^2 \times 2 \times 1,817} = 0,00042 \text{ mSv/h} \quad (\text{A3.17})$$

$$TD_2 = \frac{500 \times 11,07 \times 0,0044 \times 1/32}{2,22^2} = 0,0015 \text{ mSv/h} \quad (\text{A3.18})$$

$$TD_2 = \frac{500 \times 11,07 \times 0,0044 \times 1/32}{2,22^2} = 0,0015 \text{ mSv/h} \quad (\text{A3.19})$$

Taxa de Dose Total:

$$\mathbf{TD_t = 0,00042 + 0,0015 + 0,0015 = 0,0035 \text{ mSv/h}} \quad (\text{A3.20})$$

Linha de Isolamento distante 300 cm do centro da vala:

$$TD_1 = \frac{500 \times 11,07 \times 0,0000272 \times 1/32}{2,55^2 \times 2 \times 1,817} = 0,000002 \text{ mSv/h} \quad (\text{A3.21})$$

$$TD_1 = \frac{500 \times 11,07 \times 0,0000272 \times 1/32}{2,55^2} = 0,0000072 \text{ mSv/h} \quad (\text{A3.22})$$

$$TD_1 = \frac{500 \times 11,07 \times 0,0000272 \times 1/32}{2,55^2} = 0,0000072 \text{ mSv/h} \quad (\text{A3.23})$$

Taxa de Dose Total:

$$\mathbf{TD_t = 0,000002 + 0,0000072 + 0,0000072 = 0,000016 \text{ mSv/h}} \quad (\text{A3.24})$$

Linha de Isolamento distante 400 cm do centro da vala:

$$TD_1 = \frac{500 \times 11,07 \times 0,000000442 \times 1/32}{1,35^2 \times 2 \times 1,817} = 0,00000012 \text{ mSv/h} \quad (\text{A3.25})$$

$$TD_2 = \frac{500 \times 11,07 \times 0,000000442 \times 1/32}{1,35^2} = 0,00000042 \text{ mSv/h} \quad (\text{A3.26})$$

$$TD_3 = \frac{500 \times 11,07 \times 0,000000442 \times 1/32}{1,35^2} = 0,00000042 \text{ mSv/h} \quad (\text{A3.27})$$

Taxa de Dose Total:

$$\mathbf{TD_t = 0,00000012 + 0,00000042 + 0,00000042 = 0,00000095 \text{ mSv/h}} \quad (\text{A3.28})$$



## ANEXO 4

Propagação de Erros:

Linha de isolamento transversal, 200cm:

$$S_{\bar{X}_{P1}} = 0,0025842(\pm 0,0026/100) = \pm 0,672 \times 10^{-7} \quad (\text{A4.1})$$

$$S_{\bar{X}_{P1}}^2 = \pm 0,4515 \times 10^{-14} \quad (\text{A4.2})$$

$$S_{\bar{X}_{P2,3}} = 0,0041227(\pm 0,0022/100) = \pm 0,9069 \times 10^{-7} \quad (\text{A4.3})$$

$$S_{\bar{X}_{P2,3}}^2 = \pm 0,82255 \times 10^{-14} \quad (\text{A4.4})$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{total}} &= \sqrt{(0,004515 \times 10^{-12}) + (0,0082255 \times 10^{-12}) + (0,0082255 \times 10^{-12})} \\ &= \pm 0,144796 \times 10^{-6} \end{aligned} \quad (\text{A4.5})$$

$$\begin{aligned} \text{TAXA DE DOSE}_{P1+P2+P3} &= 0,0001083 \pm (0,001448 \times 10^{-6}) \text{ Sv/h} = \\ &= 0,1083 \pm (0,0014 \times 10^{-3}) \text{ mSv/h} \end{aligned}$$

Linha de isolamento transversal, 250cm:

$$S_{\bar{X}_{P1}} = 0,0012017(\pm 0,0032/100) = \pm 0,3845 \times 10^{-7} \quad (\text{A4.6})$$

$$S_{\bar{X}_{P1}}^2 = \pm 0,14786 \times 10^{-14} \quad (\text{A4.7})$$

$$S_{\bar{X}_{P2,3}} = 0,00194568(\pm 0,0030/100) = \pm 0,58370 \times 10^{-7} \quad (\text{A4.8})$$

$$S_{\bar{X}P2,3}^2 = \pm 0,34070 \times 10^{-14} \quad (\text{A4.9})$$

$$\begin{aligned} \sigma_{total} &= \sqrt{(0,0014786 \times 10^{-12}) + (0,0034070 \times 10^{-12}) + (0,0034070 \times 10^{-12})} \\ &= \pm 0,91064 \times 10^{-6} \end{aligned} \quad (\text{A4.10})$$

**TAXA DE DOSE**  $P_1 + P_2 + P_3 = 0,000051 \pm (0,00911 \times 10^{-6}) \text{ Sv/h} =$   
 $= 0,0510 \pm (0,00911 \times 10^{-3}) \text{ mSv/h}$

Linha de isolamento transversal, 300cm:

$$S_{\bar{X}P1} = 0,0006765(\pm 0,0037 / 100) = \pm 0,2503 \times 10^{-7} \quad (\text{A4.11})$$

$$S_{\bar{X}P1}^2 = \pm 0,0626513 \times 10^{-14} \quad (\text{A4.12})$$

$$S_{\bar{X}P2,3} = 0,00109208(\pm 0,0024 / 100) = \pm 0,26209 \times 10^{-7} \quad (\text{A4.13})$$

$$S_{\bar{X}P2,3}^2 = \pm 0,068693 \times 10^{-14} \quad (\text{A4.14})$$

$$\begin{aligned} \sigma_{total} &= \sqrt{(0,000626518 \times 10^{-12}) + (0,00068698 \times 10^{-12}) + (0,00068698 \times 10^{-12})} \\ &= \pm 1,175643 \times 10^{-6} \end{aligned} \quad (\text{A4.15})$$

**TAXA DE DOSE**  $P_1 + P_2 + P_3 = 0,000029 \pm (0,01176 \times 10^{-6}) \text{ Sv/h} =$   
 $= 0,0290 \pm (0,01176 \times 10^{-3}) \text{ mSv/h}$

Linha de isolamento transversal, 400cm:

$$S_{\bar{X}P1} = 0,00029748(\pm 0,0273 / 100) = \pm 0,81212 \times 10^{-7} \quad (\text{A4.16})$$

$$S_{\bar{X}P1}^2 = \pm 0,65954 \times 10^{-14} \quad (\text{A4.17})$$

$$S_{\bar{X}_{P2,3}} = 0,000460334(\pm 0,0043/100) = \pm 0,197944 \times 10^{-7} \quad (\text{A4.18})$$

$$S_{\bar{X}_{P2,3}}^2 = \pm 0,039182 \times 10^{-14} \quad (\text{A4.19})$$

$$\begin{aligned} \sigma_{total} &= \sqrt{(0,0065954 \times 10^{-12}) + (0,00039182 \times 10^{-12}) + (0,00039182 \times 10^{-12})} \\ &= \pm 0,00737 \times 10 \end{aligned} \quad (\text{A4.20})$$

$$\begin{aligned} \text{TAXA DE DOSE}_{P1+P2+P3} &= 0,0000076 \pm (0,00007 \times 10^{-6}) \text{ Sv/h} = \\ &= 0,0076 \pm (0,000074 \times 10^{-3}) \text{ mSv/h} \end{aligned}$$

Linha de isolamento longitudinal, 800cm:

$$S_{\bar{X}_{P1}} = 0,00053177(\pm 0,0028/100) = \pm 0,148896 \times 10^{-7} \quad (\text{A4.21})$$

$$S_{\bar{X}_{P1}}^2 = \pm 0,0221699 \times 10^{-14} \quad (\text{A4.22})$$

$$S_{\bar{X}_{P2,3}} = 0,00433614(\pm 0,0018/100) = \pm 0,7895 \times 10^{-7} \quad (\text{A4.23})$$

$$S_{\bar{X}_{P2,3}}^2 = \pm 0,6162088 \times 10^{-14} \quad (\text{A4.24})$$

$$\begin{aligned} \sigma_{total} &= \sqrt{(0,000221699 \times 10^{-12}) + (0,006162088 \times 10^{-12}) + (0,006162088 \times 10^{-12})} \\ &= \pm 0,012552 \times 10^{-6} \end{aligned} \quad (\text{A4.25})$$

$$\begin{aligned} \text{TAXA DE DOSE}_{P1+P2+P3} &= 0,000092 \pm (0,00012 \times 10^{-6}) \text{ Sv/h} = \\ &= 0,092 \pm (0,00012 \times 10^{-3}) \text{ mSv/h} \end{aligned}$$