

Ana Luiza Collacite

**Levantamento Radiométrico, Cálculo de Blindagem e
Planejamentos Rotineiros Realizados no Instituto de Radioterapia
do Vale do Paraíba e no Hospital Regional de Taubaté no Período
de 2006, 2007 e 2008.**

Monografia apresentada ao curso de Física Médica do Instituto de Biociências da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, para obtenção do título Bacharel em Física Médica.

Supervisão: Profa. Dra. Cláudia Helena Pellizzon.

Botucatu
2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO
DA INFORMAÇÃO
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - CAMPUS DE BOTUCATU - UNESP
BIBLIOTECÁRIA RESPONSÁVEL: SELMA MARIA DE JESUS

Collacite, Ana Luiza.

Levantamento radiométrico, cálculo de blindagem e planejamentos rotineiros realizados no Instituto de Radioterapia do Vale do Paraíba e no Hospital Regional de Taubaté no período de 2006, 2007, e 2008 / Ana Luiza Collacite. - Botucatu [s.n], 2008.

Trabalho de conclusão (bacharelado – Física médica) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências de Botucatu, 2008

Orientador:

Co-Orientador:

1. Física médica 2. Radioterapia

Palavras-chave: Levantamento Radiométrico, Radioterapia, Planejamento Radioterápico, Cálculo de Blindagem, Segurança Radiológica

AGRADECIMENTOS

A Deus por estar sempre ao meu lado e ter possibilitado eu ter chegado até aqui.

A professora Dra. Cláudia Pellizon pela orientação e atenção dispensada para a conclusão deste trabalho.

Ao físico Wagner Gonçalves Maia pela acessibilidade, atenção, ensinamentos e paciência que foram essenciais no desenvolvimento deste estudo.

Ao professor Dr. Paulo Fernando de Arruda Mancera pela ajuda e paciência em todos esses quatro anos e na conclusão deste.

A minha família, pelo apoio, carinho e compreensão em todas as horas da minha vida.

A Juliana Facchini de Souza por ter me agüentado esses quatro anos, me apoiado nos momentos mais difíceis e mostrado que verdadeiras amizades existem.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

Aos físicos, médicos, técnicos e enfermeiros do Hospital Regional de Taubaté e do Instituto de Radioterapia do Vale do Paraíba que me acolheram de braços abertos.

RESUMO

Não só o progresso da radioterapia, mas também a otimização da dose no paciente com planejamentos radioterápicos adequados, cálculo de blindagem, levantamento radiométrico, entre outras, são responsabilidades do físico-médico dentro de um setor de radioterapia.

Esta monografia tem como objetivo mostrar algumas dessas funções do físico-médico citadas acima, começando com um embasamento teórico e num segundo momento apresentar os cálculos e os resultados encontrados durante uma visita no Instituto de Radioterapia do Vale do Paraíba, localizado na cidade de São José dos Campos e no Hospital Regional de Taubaté no período de 2006, 2007 e 2008.

Palavras-chave: Levantamento Radiométrico, Radioterapia, Planejamento Radioterápico, Cálculo de Blindagem, Segurança Radiológica

ABSTRACT

Not only the progress of the radiotherapy, but also the improve of the dose in the patient with adjusted radiotherapy plannings, calculation of shield, radiometric survey, among others, are responsibilities of the medical physic inside of a sector of radiotherapy.

This monograph has as objective to above show some of these cited functions of the medical physicis, starting with a theoretical basement and at as a moment to present the calculations and the results found during a visit in the Institute of Radiotherapy of the Valley of the Paraíba, located in the city of São José dos Campos, and in the Regional Hospital of Taubaté in the period of 2006, 2007 and 2008.

Keys-words: Radiometric Survey, Radiotherapy, Radiotherapy Plannings, Calculation of Shield, Radiology Security.

SUMÁRIO

1	RAIOS-X	9
1.1	INTRODUÇÃO	9
1.2	PRODUÇÃO.....	10
2	RAIOS-X DE MEGAVOLTAGEM	12
3	UNIDADES DE DOSE	14
3.1	DOSE ABSORVIDA.....	14
3.2	DOSE EQUIVALENTE	14
4	PROTEÇÃO RADIOLÓGICA	16
4.1	INTRODUÇÃO	16
4.2	DEFINIÇÕES E NORMAS GERAIS.....	16
4.3	COMO ELABORAR UM PLANO DE RADIOPROTEÇÃO:.....	19
5	PROCEDIMENTOS PARA O LEVANTAMENTO RADIOMÉTRICO EM INSTALAÇÃO DE RADIOTERAPIA	21
5.1	INTRODUÇÃO	21
5.2	TIPOS DE BARREIRAS	22
5.2.1	<i>Barreiras</i>	22
5.3	REALIZAÇÃO DO LEVANTAMENTO RADIOMÉTRICO	23
5.3.1	<i>Instrumento de medida</i>	24
5.3.2	<i>Barreiras</i>	24
6	CÁLCULO DE BLINDAGEM CONVENCIONAL	25
6.1	LIMITES AUTORIZADOS E CLASSIFICAÇÃO DE ÁREAS	25
6.2	MÉTODO DE CÁLCULO CONVENCIONAL.....	27
6.2.1	<i>Transmissões pelas barreiras:</i>	27
6.2.2	<i>Carga de trabalho - W</i>	29
6.2.3	<i>Fator de uso - U</i>	30
6.2.4	<i>Fator ocupacional - T</i>	30
6.2.5	<i>Razão espalhamento-primária (a) e coeficientes de reflexão (α)</i>	31
6.2.6	<i>Materiais de blindagem</i>	32
6.2.7	<i>Espessura da barreira</i>	34
6.2.8	<i>Largura e comprimento da barreira primária</i>	35
6.2.9	<i>Labirinto convencional</i>	36
6.2.10	<i>Método de McGinley (1998)</i>	37
6.2.11	<i>Cálculo da dose na entrada da sala</i>	41
6.2.12	<i>Espessura de blindagem da porta</i>	42
7	OTIMIZAÇÃO DAS BLINDAGENS	43
7.1.1	<i>Princípio da otimização</i>	43
7.1.2	<i>Método iterativo do ICRP-33</i>	44
7.1.3	<i>Método direto de otimização</i>	44
8	MONITORAÇÃO AMBIENTAL E PESSOAL	47
8.1	LEVANTAMENTO RADIOMÉTRICO DE ÁREA	47
8.2	TESTE DE FUGA DO APARELHO DE RAIOS-X SUPERFICIAL:.....	48
9	PLANEJAMENTOS	49
9.1	PLANEJAMENTO DE MAMA, CÁLCULO MANUAL DAS CURVAS DE ISODOSE UTILIZANDO A CURVA DA MAMA	49
9.2	PLANEJAMENTO E CÁLCULO DE PRÓSTATA CONVENCIONAL	50
10	PRÁTICA DE CÁLCULO DE BLINDAGEM PARA O INSTUTO DE RADIOTERAPIA DO VALE DO PARAÍBA	52
10.1	CÁLCULO DE BLINDAGEM INICIAL	52
10.1.1	<i>Parede C – feixe secundário</i>	52

10.1.2	<i>Parede A - feixe primário</i>	54
10.1.3	<i>Parede B - feixe secundário</i>	55
10.1.4	<i>Parede I (teto) - feixe primário</i>	57
10.1.5	<i>Parede J (teto) - feixe secundário</i>	59
10.1.6	<i>Parede D - feixe secundário</i>	60
10.1.7	<i>Parede E - feixe primário</i>	62
10.1.8	<i>Parede F - feixe secundário</i>	63
10.1.9	<i>Cálculo do labirinto (parede G - feixe secundário):</i>	70
10.1.10	<i>Cálculo da porta</i>	71
10.1.11	<i>Parede H - feixe secundário</i>	73
10.1.12	<i>Espessuras:</i>	75
10.2	CÁLCULO DE BLINDAGEM	78
10.2.1	<i>Parede C - feixe secundário</i>	79
10.2.2	<i>Parede A - feixe primário</i>	80
10.2.3	<i>Parede B - feixe secundário</i>	82
10.2.4	<i>Parede I (teto) - feixe primário</i>	83
10.2.5	<i>Parede J (teto) - feixe secundário</i>	85
10.2.6	<i>Parede D - feixe secundário</i>	86
10.2.7	<i>Parede E - feixe primário</i>	88
10.2.8	<i>Parede F - feixe secundário</i>	90
10.2.9	<i>Cálculo do Labirinto (Parede G - feixe secundário):</i>	91
10.2.10	<i>Cálculo da porta</i>	93
10.2.11	<i>Parede H - feixe secundário</i>	95
10.2.12	<i>Espessuras:</i>	96
11	PRÁTICA DO LEVANTAMENTO RADIOMÉTRICO DE ÁREA REALIZADO NO INSTUTO DE RADIOTERAPIA DO VALE DO PARAÍBA	101
11.1.1	<i>Acelerador de 4 MV (Varian Clinac);</i>	101
11.1.2	<i>Acelerador de 6 MV (Siemens Internacional Mevatron MXE)</i>	103
11.1.3	<i>Bomba de cobalto (Theratron 80);</i>	104
11.1.4	<i>Raios-X superficial;</i>	105
11.1.5	<i>Sala quente</i>	105
11.2	TESTE DE FUGA DO PARELHO DE RAIOS-X SUPERFICIAL	107
12	REFERÊNCIAS	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema ilustrativo de uma ampola de raios-X . [9].....	10
Figura 2: Esquema de acelerador linear [4].....	13
Figura 3: Diagrama da sala para cálculo do espalhamento nas superfícies (Es). Baseado em Numark & Case (1985).	37
Figura 4: Coeficientes de reflexão para raios-X monoenergéticos em concreto. NCRP - 51.	39
Figura 5: Esquema mostrando o trajeto da radiação de fuga espalhada na parede C até na porta. Baseado em Numark & Case (1985).....	39
Figura 6: Esquema mostrando trajeto de espalhamento da radiação espalhada pelo paciente até a porta. Baseado em Numark & Case (1985).	41
Figura 7: Angulações para um planejamento convencional de próstata (Imagem meramente ilustrativa).	50
Figura 8: (a) Ilustração dos ângulos utilizados . (b) Ilustração da sala do acelerador de 4 MeV e das paredes avaliadas.	101
Figura 9: (a) Ilustração dos ângulos utilizados . (b) Ilustração da sala do acelerador de 6 MeV e das paredes avaliadas.	103
Figura 10: (a) Ilustração dos ângulos utilizados. (b) Ilustração da sala do acelerador de 4 MeV e das paredes avaliadas.	104
Figura 11: Ilustração da sala do aparelho de raios-X superficial e das paredes avaliadas.	105
Figura 12: Ilustração da sala quente e das paredes avaliadas.	105
Figura 13: Ilustração do cofre e das paredes avaliadas.	106
Figura 14: Ilustração de um tubo de raios-X e dos locais avaliados.	107
Figura 15: Ilustração de um tubo de raios-X e dos locais avaliados.	107
Figura 16: Planta baixa do Instituto de Radioterapia do Vale do Paraíba com as dimensões da sala, a ser construída, ainda não muito bem definidas.....	108
Figura 17: Planta baixa do Instituto de Radioterapia do Vale do Paraíba utilizando os resultados do item 10.1 - Cálculo de Blindagem Inicial.	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Fatores de uso geralmente utilizados pelo NCRP-49, pelo INCA/RJ e de Johns & Cunningham (4 ^a Ed) e pela Santa Casa IRGMVMG [10].....	30
Tabela 2: Razão espalhamento primária (a) a 1m de um fantoma de água para um campo de 400 cm ² e DFI=1m. Radiação incidente medida no ar, centro do campo a 1m da fonte [10]..	31
Tabela 3: A tabela abaixo resume algumas propriedades físicas dos materiais mais utilizados em blindagem [10].....	33
Tabela 4: Espessura décimo-redutora (TVL) para diferentes energias e materiais de blindagem – NCRP [10].....	34
Tabela 5: Espessura décimo-redutora (TVL) para radiação primária e para radiação de fuga a 90° - VARIAN [10].....	34
Tabela 6: Valores referentes à parede A.....	75
Tabela 7: Valores referentes à parede B.....	75
Tabela 8: Valores referentes à parede C.....	76
Tabela 9: Valores referentes à parede D.....	76
Tabela 10: Valores referentes à parede E.....	76
Tabela 11: Valores referentes à parede F.....	77
Tabela 12: Valores referentes à parede G.....	77
Tabela 13: Valores referentes à parede H.....	77
Tabela 14: Valores referentes à porta.....	78
Tabela 15: Valores referentes à laje.....	78
Tabela 16: Valores referentes à parede J.....	78
Tabela 17: Valores referentes à parede A.....	97
Tabela 18: Valores referentes à parede B.....	97
Tabela 19: Valores referentes à parede C.....	97
Tabela 20: Valores referentes à parede D.....	98
Tabela 21: Valores referentes à parede E.....	98
Tabela 22: Valores referentes à parede F.....	98
Tabela 23: Valores referentes à parede G.....	99
Tabela 24: Valores referentes à parede H.....	99
Tabela 25: Valores referentes à porta.....	99
Tabela 26: Valores referentes à laje.....	100
Tabela 27: Valores referentes à parede J.....	100
Tabela 28: Dados medidos no levantamento radiométrico do acelerador de 4 MV a 90°.....	101
Tabela 29: Dados medidos no levantamento radiométrico do acelerador de 4 MV a 0°.....	101
Tabela 30: Dados medidos no levantamento radiométrico do acelerador de 4 MV a 270°.....	102
Tabela 31: Dados medidos no levantamento radiométrico do acelerador de 4 MV a 180°.....	102
Tabela 32: Dados medidos no levantamento radiométrico do acelerador de 6 MV a 0°.....	103
Tabela 33: Dados medidos no levantamento radiométrico do acelerador de 6 MV a 90°.....	103
Tabela 34: Dados medidos no levantamento radiométrico do acelerador de 6 MV a 270°.....	103
Tabela 35: Dados medidos no levantamento radiométrico do acelerador de 6 MV a 180°.....	103
Tabela 36: Dados medidos no levantamento radiométrico da bomba de Cobalto a 0°.....	104
Tabela 37: Dados medidos no levantamento radiométrico da bomba de Cobalto a 90°.....	104
Tabela 38: Dados medidos no levantamento radiométrico da bomba de Cobalto a 180°.....	104
Tabela 39: Dados medidos no levantamento radiométrico da bomba de Cobalto a 270°.....	104
Tabela 40: Dados medidos no levantamento radiométrico do raios-X superficial.....	105
Tabela 41: Dados medidos no levantamento radiométrico da sala quente.....	106

1 RAIOS-X

1.1 Introdução

Em novembro de 1895, quando o físico alemão Wilhelm Conrad Roentgen realizava experimentos com os raios catódicos, produzindo-os em tubos de vidro no qual fazia vácuo, com dois eletrodos no tubo. Era mantida uma diferença de potencial de milhares de volts e os chamados raios catódicos passavam do eletrodo positivo (cátodo) para negativo (ânodo), ou colidiam com a parede do tubo [1].

No dia 8 de novembro deste mesmo ano, Roentgen notou um brilho em uma peça de vidro que se encontrava a pouca distância do tubo. Notou ainda, além da dependência brilho-ampola, que o brilho persistia mesmo quando a ampola (tubo) era recoberta com papel preto [1].

Roentgen atribuiu ao aparecimento do “brilho”, uma radiação que saía da ampola, ainda desconhecida, mas de existência comprovada, o nome de raios-X, posteriormente conhecidos também por raios Roentgen [1].

O uso de uma placa fotográfica em lugar da peça de vidro foi o segundo passo de Roentgen, cujo resultado foi a visualização dos ossos da mão de sua mulher, que serviu de cobaia [1].

Roentgen fez uma série de observações acerca dos raios-X e concluiu:

- Causavam fluorescência em certas substâncias;
- Enegrecem placas fotográficas;
- É a radiação do tipo eletromagnética, pois não sofre desvio em campos elétricos ou magnéticos;
- São diferentes dos raios catódicos;
- Tornam-se “duros” (mais penetrantes) após passar por absorvedores [1].

1.2 Produção

Raios-X são produzidos toda vez que uma substância é bombardeada com elétrons de grande velocidade [2].

O dispositivo que gera Raios-X é chamado de tubo de Coolidge, este componente é um tubo oco e evacuado, ainda possui um cátodo incandescente que gera um fluxo de elétrons de alta energia. Estes são acelerados por uma grande diferença de potencial e atingem ao ânodo, como mostrado na figura 1. [2].

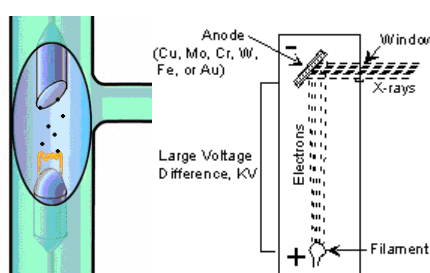


Figura 1: Esquema ilustrativo de uma ampola de raios-X . [9]

O ânodo é de tungstênio, porque o tungstênio tem um ponto de fusão alto (aproximadamente 3400°C) e deste forma suporta o calor extremo ao qual está sujeito, tem um número atômico alto (74) e é um produtor de raios-X mais eficiente do que materiais com números atômicos menores. A pequena área do adjetivo na quais os elétrons se choca é chamado de ponto focal ou fonte e é a origem dos raios-X [2].

Em aplicações especializadas usam-se outros tipos de materiais para o ânodo, tais como o molibidênio. Há dois tipos de ânodo, o fixo e o giratório [2].

Ao serem acelerados, os elétrons ganham energia e são direcionados contra um alvo; ao atingi-lo, são bruscamente freados, perdendo uma parte da energia adquirida durante a aceleração. O resultado das colisões e da frenagem é a energia transferida dos elétrons para os átomos do elemento alvo. Este se aquece bruscamente, pois em torno de 99% da energia do feixe eletrônico é dissipada nele [2].

As formas de colisão do feixe eletrônico no alvo dão-se em diferentes níveis energéticos devido às variações das colisões ocorridas. Como existem várias formas possíveis de colisão devido à angulação de trajetória, o elétron não chega a perder a totalidade da energia adquirida num único choque, ocorrendo então a geração de um amplo espectro de radiação cuja gama de frequências é bastante larga, ou com diversos comprimentos de onda.

Estes dependem da energia inicial do feixe eletrônico incidente, e é por isso que existe a necessidade de milhares de volts de potencial de aceleração para a produção dos raios-X [2].

O choque do feixe de elétrons (que saem do cátodo com energia de dezenas de KeV) com o anodo (alvo) produz dois tipos de raios-X. Um deles constitui o espectro contínuo, e resulta da desaceleração do elétron durante a penetração no anodo; o outro tipo é o característico do material do anodo. Assim, cada espectro de raios-X é a superposição de um espectro contínuo e de uma série de linhas espectrais características do anodo [2].

2 RAIOS-X DE MEGAVOLTAGEM

Embora desde 1920, os raios-X produzidos por aparelhos de raios-X convencionais viessem sendo utilizados em radioterapia profunda, uma série de problemas não estavam resolvidos. Sabia-se que os raios-X “duros” de elevada energia eram mais penetrantes e por isso mais úteis para terapia profunda, enquanto que os raios “moles” de baixa energia eram necessariamente absorvidos ao nível da pele ou dos tecidos superficiais onde eles produziam graves lesões. Filtros de metais eram utilizados para absorver os raios “moles” indesejáveis na radioterapia profunda, e dessa maneira “endurecendo” os feixes de raios-X. Mesmo assim, ocorriam queimaduras provocadas pelas radiações e lesões nos tecidos eram provocadas pela radiação dispersa. Estes efeitos colaterais tornavam muitas vezes o tratamento radioterápico inviável [3].

Sabia-se que esses efeitos eram menores quando se utilizavam aparelhos de raios-X com voltagem elevada, mas por razões técnicas, não era possível utilizar voltagens superiores a 250 kV para produzir raios-X [3].

A utilização de “bombas” de material radioativo que emitiam raios gama de elevada energia resolviam parcialmente os problemas existentes. Estas “bombas” eram aparelhos de “Telecurieterapia” e utilizava o radium como material radioativo. Megavoltagem significa, ao pé da letra, voltagem acima de um milhão [3].

Na década de 1930, nasceram os aparelhos de ortovoltagens que eram tubos de raios-X de um milhão de volts, obtidos através de artifícios vários [3].

Após a Segunda Grande Guerra, nasceram os aparelhos de megavoltagem que, juntamente com a “bomba” de Cobalto, substituíram os outros aparelhos para radioterapia profunda [3].

O principal aparelho atualmente utilizado para produzir raios-X de megavoltagem é o Acelerador Linear [1].

Para obtermos raios-X de energias maiores, teremos de usar uma técnica diferente de aceleração de elétrons, sem a necessidade de altas diferenças de potencial entre dois eletrodos [1].

O princípio básico de funcionamento dos aceleradores lineares baseia-se na utilização de um tubo cilíndrico, cujo interior possui discos metálicos com um orifício no meio. Esses discos estão de tal maneira que fique uma fileira ordenada alternadamente com pólos negativo, positivo, negativo, positivo. No momento em que os elétrons são guiados por microondas geradas em pequenos pulsos (ou ondas de radiofrequência), o feixe de elétrons passa pelos orifícios dos discos e aumenta de velocidade. Dessa maneira, e com campos elétricos variáveis, os elétrons são acelerados até a energia desejada. Como é mostrado na figura 2. [2].

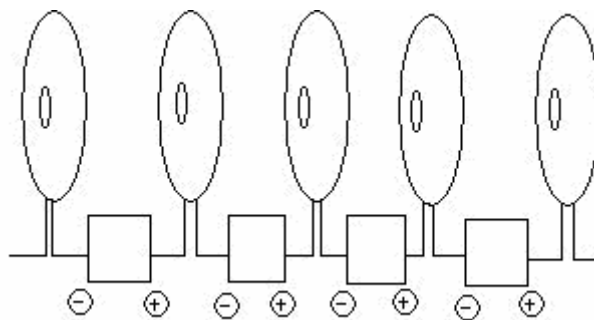


Figura 2: Esquema de acelerador linear [4].

A profundidade que os elétrons alcançam chega à cerca de 10 a 20 cm. O tratamento mais adequado com essa técnica é quando o órgão alvo é superficial [4].

Os aceleradores lineares apresentam muitas vantagens em relação aos outros aparelhos. Apesar de gerarem muito mais energia, o mecanismo de precisão dos aceleradores é mais seguro e a taxa de dose de radiação é fixa ao longo do tempo. Eles também não fazem uso de elementos atômicos que precisam ser guardados após sua vida útil. Isso não acontece com os aparelhos de cobalto, nos quais as fontes de radiação precisam ser devolvidas em contêineres especiais para a fábrica, onde serão mantidos em observação rigorosa por anos. Por outro lado, os aceleradores precisam de maior manutenção e pessoal mais habilitado para o seu funcionamento [4].

3 UNIDADES DE DOSE

3.1 Dose Absorvida

Do ponto de vista de proteção dos efeitos da radiação, usa-se o termo Dose absorvida, ou simplesmente dose [5]. A Dose (D), é dada pela relação

$$D = i \cdot t, \quad (1)$$

em que D é a dose, i é a intensidade da radiação e t é o tempo de exposição.

A unidade antiga de dose é o “rad” (radiation absorbed dose). Um rad equivale à quantidade de radiação que provoca a absorção de 10^{-5} J de energia por grama de matéria, isto é, $1\text{rad} = 10^{-5}\text{J/g}$ de matéria que absorveu a radiação [5].

A unidade SI de dose absorvida é o Gray (Gy). Um Gray equivale à quantidade de radiação que provoca a absorção de 1 J por kg de matéria exposta à radiação, isto é, $1\text{Gy} = 1\text{J/kg} = 100\text{rad}$ [5].

3.2 Dose Equivalente

Para levar em conta as diferentes capacidades de interações biológicas das diferentes radiações, foi criado o termo Dose equivalente. A unidade SI de dose equivalente é o Sievert (Sv). A dose equivalente (H), é dada pela relação

$$H = D \cdot Q \cdot N, \quad (2)$$

em que H é a dose equivalente em Sv, D é a dose de radiação em Gy, Q é um fator de absorção efetiva da radiação em questão, N é outro fator modificante da absorção, como por exemplo, o tipo de tecido que está absorvendo a radiação [5].

A unidade antiga de dose equivalente é o “rem” (roentgen equivalent men). Equivale a dose de radiação cujo efeito é semelhante ao efeito de 1 Roentgen no ser humano [5].

A dose equivalente é de 1 Sv corresponde a aproximadamente 100 rem [5].

“Sieverts” ou “rem” são aditivos, mas “Gray” ou “rad” não são. Por exemplo, uma dose de 100 rad de radiação- γ no tórax e uma dose de 50 rad de exposição a um feixe de neutrons na cabeça da mesma pessoa, não significa que o corpo todo recebeu uma dose de 150 rad. Depois que os “rad” absorvidos forem convertidos em “rem”, ou Sv, as quantidades encontradas podem ser somadas para fornecer a dose total do corpo em rem (ou Sv) [5].

4 PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

4.1 Introdução

A comissão internacional de proteção radiológica tem-se preocupado há muitos anos com o problema da interação da radiação ionizante no corpo humano e com os danos por ela causados. Vem estudando os riscos da radiação e estabelecendo valores de doses máximas permissíveis, tanto para o trabalhador com radiações ionizantes como para o público em geral.

No Brasil, todo e qualquer uso de radiação ionizante está controlado pelas normas e diretrizes de radioproteção da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

Os efeitos biológicos causados pelas radiações ionizantes são classificados em somáticos e hereditários (ou genéticos). Os somáticos são efeitos que se manifestam no indivíduo que sofre a irradiação. Os hereditários são efeitos transmissíveis aos descendentes do indivíduo irradiado.

De acordo com a resposta, os efeitos podem ser classificados em estocástico e não estocásticos. Os efeitos estocásticos são aqueles em que a probabilidade de ocorrência é função da dose, não existindo limiar. Por exemplo: efeitos hereditários, câncer. Os efeitos não-estocásticos são aqueles para os quais há uma ocorrência limiar. Por exemplo: depressão medular, catarata, esterilidade, etc.

Desde que o efeito biológico causado pela radiação ionizante depende não somente da dose, mas também do tipo de radiação, a quantidade dosimétrica usada em proteção radiológica é a dose equivalente (H).

4.2 Definições e Normas Gerais

Para estudo mais amplo das normas, é indicado a leitura das recomendações internacionais e de todas as normas e especificações publicadas pela CNEN.

A seguir, descrevemos algumas definições e normas gerais que serão necessárias para proteção radiológica:

Acidente – desvio inesperado e significativo das condições normal de operação de uma instalação (radioativa ou nuclear), que possa resultar em danos à propriedade e ao meio

ambiente ou em exposições de trabalhadores e indivíduos do público acima dos limites primários de dose equivalente.

Contaminação – presença indesejável de materiais radioativos em pessoas, materiais, meios ou locais.

Monitoração radiológica – medição de grandezas relativas à radioproteção, para fins de avaliação e controle das condições radiológicas das áreas de uma instalação ou meio ambiente.

Área livre – área isenta de regras especiais de segurança na qual as doses equivalentes anuais não ultrapassem o limite para indivíduos do público. Nesta área não é necessário o uso de dosímetros.

Área restrita – área sujeita as regras especiais de segurança na qual as doses equivalentes anuais podem ser superiores a 1/20 do limite para trabalhadores.

Área controlada – área restrita na qual as doses equivalentes anuais podem ser iguais ou superiores a 3/4 do limite para trabalhadores.

Área supervisionada – área restrita na quais as doses equivalentes anuais são mantidas inferiores a 3/4 do limite para trabalhadores.

Nível de registro – nível de dose que, quando é alcançado ou previsto de ser excedido, faz com que os resultados do programa de monitoração da grandeza envolvida devam ser registrados. O nível de registro (Nr) é dado pela relação

$$Nr = \frac{1}{10} LA \xrightarrow{\text{mensal}} N = \frac{1 \cdot LA}{10 \cdot 12} = \frac{1 \cdot 20}{10 \cdot 12} = 0,16 mSv / mês, \quad (3)$$

em que Nr é o nível de registro e LA é o limite de dose anual para o trabalhador.

Nível de investigação – nível de dose que, quando é alcançado ou previsto de ser excedido, faz com que os resultados do programa de monitoração da grandeza envolvida justifique investigações de causas e conseqüências. O nível de investigação (Ni) é dado pela relação

$$Ni = \frac{3}{10} \cdot LA \xrightarrow{\text{mensal}} \frac{3 \cdot 20}{10 \cdot 12} = 0,5mSv/mês, \quad (4)$$

em que Ni é o nível de investigação e LA é o limite de dose anual para o trabalhador.

Plano de radioproteção – documento exigido para fins de licenciamento da instalação, que estabelece o sistema de radioproteção a ser implementado pelo serviço de radioproteção.

Radioproteção – conjunto de medidas que visa proteger o homem e o meio ambiente de possíveis efeitos causados pela radiação ionizante.

Serviço de radioproteção – entidade constituída especificamente com vistas à execução e à manutenção do plano de radioproteção de uma instalação.

Supervisor de radioproteção – indivíduo com certificado de qualificação pela Comissão Nacional de Energia Nuclear para supervisionar a aplicação das medidas de radioproteção por meio do Serviço de Radioproteção.

Nenhum trabalhador deve ser exposto às radiações sem que:

- a) Seja necessário.
- b) Tenha conhecimento dos riscos radiobiológicos associados ao seu trabalho.
- c) Esteja adequadamente treinado para o desempenho seguro das suas funções.

Menores que 18 anos – não devem ser trabalhadores com radiação.

Gestantes – não devem trabalhar em área controlada. De acordo com a CNEN, a dose acumulada no feto durante o período de gestação não deve exceder a 1mSv.

Dosímetro individual – todo trabalhador com radiações ionizantes deve portar um dosímetro individual.

Limites derivados do trabalho – na rotina com radiações ionizantes, apenas para orientação do nível de dose, derivamos valores do limite da dose equivalente anual para trabalhadores para períodos de 1 mês, 1 semana ou 1 hora. Não são doses máximas, apenas os

chamados “limites derivados do trabalho” e são: 1,6 mSv/mês; 0,4 mSv/semana; 0,01 mSv/hora.

4.3 Como elaborar um plano de radioproteção:

O Plano de Radioproteção deverá ser apresentado anualmente à autoridade sanitária competente, por ocasião do pedido de revalidação de alvará de funcionamento, ou todas as vezes que houver alteração de instalações ou procedimentos técnicos [6].

O Plano de Radioproteção de um serviço de radioterapia deverá conter:

a) descrição das instalações por meio de projeto, previamente aprovado pela CNEN, especificando as barreiras de radioproteção das salas de terapia;

b) descrição técnica dos equipamentos e/ou das fontes de radiação ionizante existentes e de suas localizações no serviço;

c) descrição de todas as vizinhanças laterais, inferiores e superiores de cada sala de tratamento, evidenciando as áreas a serem ocupadas por trabalhadores e público, demonstrando os locais em que as doses equivalentes anuais deverão ser inferiores a 1mSv e onde poderão estar entre 1mSv e 15mSv;

d) previsão da carga de trabalho dos equipamentos de radioterapia;

e) descrição dos dispositivos de segurança para interrupção do feixe de radiação;

f) lista dos trabalhadores ocupacionalmente expostos, com suas funções, qualificações e treinamentos especificados;

g) cópia das instruções gerais a serem fornecidas por escrito aos trabalhadores, visando à execução dos respectivos trabalhos em segurança;

h) descrição dos procedimentos de rotina executados no serviço que envolve o uso das fontes de radiação ionizante;

i) programa de treinamento periódico dos trabalhadores;

j) citação dos procedimentos realizados, visando manter equipamentos em boas condições de funcionamento, minimizar as doses a pacientes e trabalhadores e melhorar a qualidade do serviço executado;

l) descrição dos cuidados no manuseio das fontes de braquiterapia de baixa taxa de dose;

m) plano com procedimentos de emergências em caso de acidente;

n) plano de monitoração de área;

o) plano de monitoração individual;

p) número e data do certificado de calibração de todos medidores de radiação (monitores, dosímetros clínicos e outros);

q) descrição das instalações onde deverão ser internados os pacientes com fontes de braquiterapia de baixa taxa de dose, incluindo descrição técnica da blindagem;

r) descrição dos cuidados para transportes de fontes e de pacientes portadores de fontes dentro do serviço;

s) resultados do levantamento radiométrico e dos testes de radiação de fuga, apresentados sob forma de laudo, como descrito nesta Norma Técnica [6]

5 PROCEDIMENTOS PARA O LEVANTAMENTO RADIOMÉTRICO EM INSTALAÇÃO DE RADIOTERAPIA

5.1 Introdução

Antes do início de operação de qualquer Instituição de Radioterapia e após a ocorrência de qualquer modificação em equipamentos, carga de trabalho, condições de operações e de blindagem que possa alterar significativamente os níveis da radiação, deve ser realizada o Levantamento Radiométrico da instalação.

Os requisitos básicos de construção para Proteção Radiológica das instalações são estabelecidos em função dos requisitos de Limitação de Dose de trabalhadores e indivíduos do público.

Parâmetros arquitetônicos e de blindagem devem ser estabelecidos de maneira que assegurem obediência ao sistema de Limitação de Dose estabelecidos na Norma CNEN – NE – 3.01, possibilitando proteção radiológica adequada para profissionais e indivíduos do público, expostos em instalações nucleares e radiológicas.

No planejamento de uma instalação de Radioterapia devem ser feitas considerações sobre o tipo do equipamento (Cobalto, Acelerador, HDR, Raios-X, etc.), carga de trabalho, fator de uso, fator de ocupação, número de pacientes tratados, localização física da sala no serviço, etc.

Na ausência de informações exatas é prudente se fazer um superdimensionamento. Os requisitos prévios de blindagem dependem da natureza da ocupação das áreas circunvizinhas que são acessíveis a trabalhadores e a indivíduos do público, incluindo pacientes.

Em todas as instalações radioativas, o controle de áreas compreende a avaliação, classificação, controle de acesso, balizamento, sinalização e monitoração. Periodicamente, devem ser confirmadas as classificações das áreas, considerando eventuais modificações do uso da instalação.

O programa de monitoração de área abrange eventuais modificações do uso da instalação.

O programa de monitoração de área abrange a seleção e demarcação de pontos de referência para realização de medições, escolhidos de forma que sejam:

-representativos com relação à permanência e trânsito de pessoas, para fins de estimativa de doses,

-significativos para fins de detecção prévia de irregularidades na condição operacional.

No caso de fontes com material radioativo, as áreas restritas (inclusive locais de armazenamento de fontes e rejeitos) devem possuir mecanismos que permitam o seu isolamento em situações de emergência, incluindo sistema de alarmes sonoros e visuais.

5.2 Tipos de Barreiras

A utilização da radiação exige que as áreas de trabalho sejam limitadas por barreiras de proteção contra as radiações. As especificações das paredes protetoras contra radiações e outros meios de proteção deverão fazer parte do projeto de proteção Radiológica da instalação.

5.2.1 Barreiras

Na determinação das barreiras torna-se necessário conhecer a terminologia aplicada a esses cálculos, feixe útil é apontado é chamada Barreira Protetora Primária. Paredes, chão e teto, que só interceptam radiação espalhadas e de fuga são onde podem ser instaladas as Barreiras Protetoras Secundárias.

Teto – caso haja pavimento superior à sala de irradiação utiliza-se o mesmo cálculo para blindagem de parede [7]. Caso não haja pavimento superior à sala, usar o cálculo do espalhamento de radiação no ar Skyshine [8].

Piso – Caso haja pavimento inferior à sala de radiação utilizar o mesmo cálculo para blindagem de parede [7].

Os projetos devem assegurar os limites autorizados. Na ausência destes devem-se utilizar valores obtidos segundo processo de otimização, observando os limites primários como condição de contorno.

Na ausência de um período de blindagem específico devem-se utilizar valores médios que correspondem a uma estimativa realística das condições de utilização dos equipamentos e locais adjacentes.

5.3 Realização do Levantamento Radiométrico

No formulário de Levantamento Radiométrico fazer um esboço da instalação e vizinhanças com o leiaute apresentando o equipamento e o painel de controle, indicando a natureza e a ocupação das salas adjacentes. Localizar e assinalar no esboço os pontos críticos da sala nos quais as pessoas podem ser atingidos pelo feixe primário ou espalhados. Tais pessoas podem ser membros da equipe ou do público. As medidas devem ser feitas em locais adjacentes às instalações dos equipamentos de radioterapia para tipos de radiações produzidas pelos mesmos.

O Levantamento Radiométrico abrange a execução das seguintes atividades:

- seleção dos locais mais críticos nas áreas restritas;
- seleção e demonstração dos pontos de referência para realização de medida de modo fácil e acessível a instrumentos portáteis de medição ou à instalação e inspeção de instrumentos fixos;
- representativos para a detecção prévia de irregularidades ou acidentes;
- representativos com relação à permanência e transito de trabalhadores, para efeito de estimativa de dose;
- seleção de equipamentos e de procedimentos de monitoração compatível com as condições de exposição, condições ambientais e com as grandezas objetos de medição e limitação.

5.3.1 Instrumento de medida

Os monitores tipo câmara de ionização são os mais adequados. Uma das maiores aplicações deste tipo de câmara, quando operado com ar, é a medida de taxa de exposição gama, já que esta grandeza é definida em função da ionização no ar. A determinação da carga de ionização dá uma medida precisa da exposição, e uma medida da corrente de ionização indicará a taxa de exposição. Outra característica que torna uma câmara de ionização mais adequada é a pequena dependência energética e a melhor resposta para radiação pulsada. Os Monitores de Radiação podem medir Taxa de Dose (nSv/h ou mR/h) ou Dose Integrada (μSv ou mR) [13].

5.3.2 Barreiras

Barreiras Secundárias – Para medir o feixe espalhado e a fuga pelo cabeçote (Leakage), utiliza-se um simulador (fantoma – $25 \times 25 \times 20 \text{cm}^3$) de material equivalente ao tecido e o campo máximo. As medidas são feitas, em geral: na porta, posição do comando, salas adjacentes e áreas livres circunvizinhas.

Barreiras Primárias – Para medir o feixe primário, apontar o feixe para uma das direções assinaladas no esboço. Medir a taxa de dose ou kerma no ar com o monitor de área calibrado. Anotar no formulário o valor medido para aquele ponto. Realizar as medidas nos demais pontos de interesse.

Barreiras de Skyshine – Para medir a radiação espalhada pelo ar (Skyshine), apontar o feixe para o teto com o campo máximo. Realizar as medidas nas áreas externas relevantes a barreira analisada.

6 CÁLCULO DE BLINDAGEM CONVENCIONAL

O cálculo de blindagem de radioproteção faz parte do RPAS (Relatório Final de Análise de Segurança) e deve constar em capítulo exclusivo. Todas as premissas usadas devem ser relatadas de maneira clara, obedecendo às recomendações.

6.1 Limites Autorizados e Classificação de Áreas

As blindagens de fontes de radiação e as dimensões da instalação devem ser tais que estejam em conformidade com os limites autorizados pela CNEN e com o princípio da otimização. Os projetos devem assegurar que as blindagens ofereçam radioproteção adequada, calculando-se inicialmente as barreiras para os limites primários de dose equivalente efetiva e, em seguida, os valores obtidos segundo o processo de otimização. As áreas onde são utilizadas radiações ionizantes, bem como sua circunvizinhança, devem ser classificadas em restritas (exclusiva para trabalhadores) ou livres (indivíduos do público).

De acordo com a norma CNEN – NE – 3.01, a demonstração de otimização de um sistema de radioproteção é dispensável quando o projeto assegura que, em condições normais de operação, se cumprem simultaneamente às três condições abaixo:

- a dose equivalente efetiva anual para trabalhadores não excede 1 mSv;
- a dose equivalente efetiva anual para indivíduos do público não excede $10 \mu\text{Sv}$,
- a dose equivalente efetiva coletiva integrada num ano não excede 1 *hom em – Sv*.

Não é aconselhado o uso desses limites, pois as barreiras se tornarão espessas e caras.

Os limites de dose equivalente efetiva anual a serem usados são:

- para trabalhadores: $20 \text{ mSv/ano} = 0,4 \text{ mSv/semana}$;
- para indivíduos do público: $1 \text{ mSv/ano} = 0,02 \text{ mSv/semana}$

Área controlada: salas de tratamento e de controle neste caso o acesso é restrito a pacientes e trabalhadores. Nenhum indivíduo, exceto o paciente, pode permanecer na sala durante uma exposição.

Área livre (considerando do ponto de vista de cálculo de blindagens e de uso): salas de espera, vestiários, banheiros, etc.; pois os pacientes são considerados indivíduos do público quando fora de sua sala de tratamento. Do mesmo modo, para fins de cálculos de blindagem, uma sala de tratamento anexa à que está sendo considerada deve ser classificado como livre porque o paciente dela é um indivíduo do público para a outra. É claro que, como sala de tratamento, ela continua sendo de acesso controlado restrito a trabalhadores e pacientes. Muitas vezes também é conveniente classificar a área de controle como livre, pois os procedimentos de segurança são menos restritivos e o aumento no custo não é significativo.

No cálculo de barreiras primárias não se considera a atenuação do feixe primário pelo paciente. A fuga pelo cabeçote deve obedecer aos limites, para fins de cálculo de blindagem em aceleradores, pode-se usar o valor conservador de 0,1% (ou 1/1000) [5].

Os principais parâmetros necessários ao cálculo de blindagem são os limites de dose equivalente para a área a ser blindada (P), a Carga de Trabalho (W), os fatores Uso (U) e ocupação (T), a distância do ponto de cálculo à fonte ou ao isocentro (d), o tamanho máximo de campo de irradiação (C), e, na otimização, o tempo de vida útil do equipamento (*anos*), o custo da blindagem e o número de pessoas com ocupação integral na área a ser blindada.

No cálculo de uma blindagem, primeiro determina-se o fator de transmissão (B) pelo material e busca-se a espessura da blindagem que atende aos limites de dose em gráficos $B \times espessura$ (ou usando $TVLs$).

Para cada ponto e parede, deve-se apresentar as espessuras mínimas de blindagem para feixe primário, para fuga pelo cabeçote e para espalhamento. Para a porta deve-se descrever o material de blindagem e levar em conta os múltiplos espalhamentos no paciente e nas superfícies da sala. Descrever os diversos espalhamentos e determinar corretamente seu número, distância de cada um e percentual de atenuação para incidência angular.

Para o teto, utilizar o mesmo procedimento empregado nas paredes. Geralmente o pavimento superior é área livre e a taxa de ocupação dependerá dos fins a que se destina. Aqui, deve-se calcular também a blindagem necessária para atenuar o feixe em regiões não diretamente sobre a sala do equipamento. Se não houver ocupação no pavimento superior, pode-se usar o cálculo do espalhamento de radiação no ar – “skyshine”. Neste caso deve-se assegurar que nenhuma região diretamente acima estará ocupada.

Geralmente, as salas blindadas são localizadas no andar térreo, sendo desnecessário calcular blindagem do piso. Caso haja pavimento abaixo da sala de tratamento, os cálculos são semelhantes aos de blindagem de parede e teto, deve-se também calcular a blindagem necessária para atenuar o feixe em regiões não diretamente sob a sala do equipamento.

Na otimização, apresentar os cálculos que levaram à determinação das barreiras necessárias para atingir os níveis de dose otimizados dos diferentes pontos. Para cada ponto, a maior das espessuras que atendem à otimização e à limitação da dose individual será a definitiva do projeto.

6.2 Método de Cálculo Convencional

Os cálculos de blindagens convencionais para aceleradores operando até 10 MV e para braquiterapia são baseados em informações das publicações NCRP-49 (*National Council on Radiation Protection and Measurements Report No. 49*) e ICRP-33 (*International Commission on Radiological Protection Publication 33*). Para energias maiores usamos os dados do NCRP-51 (*National Council on Radiation Protection and Measurements Report No. 79*) e do NCRP-79 (*National Council on Radiation Protection and Measurements Report No. 79*). Dois tipos de barreiras são considerados: primárias e secundárias [10].

A radiação primária é limitada em direção pela colocação da máquina na sala e pelo campo máximo de radiação, que ditarão quais porções das paredes, teto e piso serão blindagens primárias. Radiação secundária é emitida em todas as direções e cobre todas as superfícies da sala de tratamento, inclusive o labirinto e a porta.

6.2.1 Transmissões pelas barreiras:

- A transmissão pela barreira primária necessária para reduzir a intensidade do feixe ao limite autorizado em áreas externas (B_x) é dada pela relação

$$B_x = \frac{P \cdot (d_{prim})^2}{W \cdot U \cdot T}, \quad (5)$$

em que P é o limite autorizado derivado semanal para regiões externas, d_{prim} é à distância em metros entre o alvo ou fonte até o ponto protegido, W é a carga de trabalho em Sv/sem , U é o fator de uso e T é o fator ocupacional.

Depois de (B_x), determinamos a espessura necessária para atender o limite autorizado a partir de curvas de atenuação ou de cálculos usando o número de $TVLs$, baseados na energia do feixe e no tipo do material empregado na blindagem.

- A transmissão pela barreira necessária para reduzir a intensidade da radiação espalhada ao limite autorizado em áreas externas (B_p) é dada pela relação

$$B_p = \frac{P}{a \cdot W \cdot T} \cdot (d_{sec})^2 \cdot (d_{esp})^2 \cdot \frac{400}{F}, \quad (6)$$

em que d_{sec} é à distância em metros da superfície espalhadora até o ponto a ser protegido, d_{esp} é à distância em metros do alvo até a superfície espalhadora (geralmente, no caso do paciente ser o meio espalhador) $d_{esp} = 1 \text{ m}$, a é a razão entre a intensidade da radiação espalhada á 1 m do objeto espalhador e a da radiação primária a 1 m do alvo e F é o tamanho do campo no paciente em cm^2 .

- A transmissão pela barreira por radiação espalhada após o feixe primário incidir numa superfície de área A é dada pela relação

$$B_s = \frac{P \cdot (d_e)^2 \cdot (d_s)^2}{\alpha \cdot A \cdot W \cdot U \cdot T}, \quad (7)$$

em que d_e é à distância em metros entre o alvo e a superfície espalhadora, d_s é a distância em metros entre a superfície espalhadora e o ponto protegido, α é o coeficiente de reflexão para o material da superfície espalhadora, ângulo de espalhamento e energia do feixe e A é a área irradiada da superfície espalhadora em m^2 .

- A transmissão pela barreira proveniente da fuga pelo cabeçote (B_f) é dada pela relação

$$B_f = \frac{1000 \cdot P \cdot (d_{sec})^2}{W \cdot T}, \quad (8)$$

em que d_{sec} é a distância em metros entre o isocentro e o ponto a ser protegido, já que a posição média da fonte de raios-X (alvo) está no isocentro. O fator 1000 aparece porque a blindagem do cabeçote dos aceleradores, em geral, atenua a intensidade da radiação, no mínimo, por esse fator. Entretanto, se o fabricante especificar o nível de fuga, o valor máximo fornecido deve ser usado.

Para aceleradores com guia de onda horizontal na barreira atrás da máquina, d_{sec} será a distância entre o canhão de elétrons e o ponto a ser protegido, pois ela deve blindar radiação de fuga proveniente das proximidades do canhão.

Para barreiras secundárias o fator de uso é sempre igual a um ($U=1$) e tanto a fuga pelo cabeçote quanto a radiação espalhada devem ser consideradas.

6.2.2 Carga de trabalho - W

Carga de Trabalho é a quantidade de radiação produzida por uma máquina de tratamento num determinado intervalo de tempo a uma dada distância. Para aceleradores lineares ou para fontes gama geralmente se calcula a carga de trabalho em termos de kerma do feixe útil de radiação por semana, a uma distância de 1 m da fonte. Embora várias publicações tragam valores padrão de W , este parâmetro depende dos métodos de trabalho de cada serviço e deve ser determinado individualmente para cada local e máquina. Caso o Serviço de Radioterapia seja novo, pode-se empregar valores de outros, que empregam técnicas de tratamento similares ou, em último caso, usar dados da literatura.

A carga de trabalho é dada pela relação

$$W = \left(\frac{d_m}{pac} \right) \cdot \left(\frac{pac}{dia} \right) \cdot \left(\frac{5dias}{sem} \right) \cdot \left(\frac{50sem}{ano} \right), \quad (9)$$

em que W é a carga de trabalho, d_m é a dose média, pac é o número de pacientes, dia é o número de dias, sem é o número de semanas e ano é o número de anos. Se o acelerador linear for usado para irradiação de corpo todo, uma das paredes laterais deverá ter maior espessura que a outra, porque, neste caso, o paciente será posicionado próximo a ela para assegurar campo adequado de irradiação.

Para se liberar uma dose adequada no paciente a dose no isocentro terá que ser grande e deve-se adequar tanto à carga de trabalho quanto o fator de uso. Por exemplo, se uma dose de 14 Gy for aplicada a 10 cm de profundidade num paciente posicionado a 3,67 m do alvo, aproximadamente 230 Gy de 10 MV terão que ser liberados no isocentro, num tratamento que será feito em menos de 1 semana, aumentando a carga de trabalho semanal e instantânea (por minuto ou hora), o que exige maior blindagem que no caso convencional.

6.2.3 Fator de uso - U

O fator de uso é uma grandeza adimensional que leva em conta a fração de tempo em que o feixe útil de radiação (feixe primário) se posiciona para uma direção em particular. Esse fator depende essencialmente das técnicas usadas no serviço. O fator de uso é uma grandeza que deve ser considerada apenas para cálculo de blindagem em teleterapia. Em braquiterapia não existe uma direção preferencial para o feixe primário e, portanto, o fator de uso é sempre igual a 1. Os fatores uso são mostrados na tabela 1.

Tabela 1: Fatores de uso geralmente utilizados pelo NCRP-49, pelo INCA/RJ e de Johns & Cunningham (4ª Ed) e pela Santa Casa IRGMVMG [10].

Fator Uso U para Feixe Primário

Direção	NCRP – 49	INCA/RJ	Johns &	Santa Casa
Piso	1	3/7	1/2	1/2
Teto	1/4	2/7	1/10	1/10
Lateral	1/4	1/7	1/10	1/10
Angulado	-	-	-	1/20

6.2.4 Fator ocupacional - T

O fator ocupacional é uma grandeza adimensional que leva em conta a fração de tempo em que áreas vizinhas à sala de irradiação estão ocupadas. O NCRP-49 sugere os seguintes valores de T para os casos onde eles não possam ser individualizados:

- $T = 1$ (ocupação total): áreas de trabalho como controle, consultórios, escritórios, laboratórios, oficinas, enfermarias, posto de enfermagem, edifícios vizinhos ocupados como residências, escolas, etc.

- $T = 1/4$ (ocupação parcial): salas de espera, salas de repouso ou recuperação, copas, etc.

- $T = 1/16$ (ocupação eventual): corredores, banheiros, escadas, depósitos de material, áreas de ventilação ou iluminação, áreas externas usadas para tráfego de pessoas ou veículos (passeios e ruas), etc.

Valores de T e U menores que $1/10$ devem ser usados com muito critério porque a taxa de dose instantânea nos locais considerados pode-se tornar muito grande.

6.2.5 Razão espalhamento-primária (a) e coeficientes de reflexão (α)

A razão (a) entre a intensidade da radiação espalhada a 1m do meio espalhador e a intensidade da radiação primária no isocentro depende da energia do feixe e do ângulo de espalhamento. Valores de (a) para ^{60}Co , 6 MV e 10 MV, adaptados do NCRP-49, são mostrados abaixo.

Tabela 2: Razão espalhamento primária (a) a 1m de um fantoma de água para um campo de 400 cm^2 e DFI=1m. Radiação incidente medida no ar, centro do campo a 1m da fonte [10].

Fonte	Ângulo de espalhamento a partir do raio central (graus)				
	30°	45°	60°	90°	135°
60Co	0,0060	0,0036	0,0023	0,0009	0,0006
6 MV	0,007	0,0018	0,0011	0,0006	0,0004
10 MV	0,0030	0,0010	0,0005	0,0003	0,0002

No caso do espalhamento ocorrer em outros materiais, como concreto e aço, por exemplo, os dados da literatura são bastante escassos. Os valores de coeficientes de reflexão para concreto e aço a serem usados, principalmente no cálculo de blindagem de portas para raios-X são os encontrados na figura 4.

Para máquinas operando com energias acima de 10 MV, a radiação espalhada tem energia bem menor do que a primária e do que a de fuga pelo cabeçote e pode ser ignorada no cálculo de blindagem das paredes, já que será sempre superada pelas outras duas. Entretanto, no cálculo de blindagem de porta com labirinto, deve-se levar em conta os múltiplos espalhamentos e respectivos coeficientes.

Caso não se tenha curvas de transmissão aplicáveis aos feixes espalhados, pode-se supor que sua energia após uma reflexão de 90° é 0,5 MV e usar a curva de transmissão correspondente a essa energia para obter a espessura de blindagem da porta.

6.2.6 Materiais de blindagem

Diversos materiais podem ser utilizados em blindagem contanto que seja empregada a espessura suficiente para atenuar a intensidade da radiação aos limites autorizados. As características principais dos materiais a serem consideradas são:

- área (espaço físico) para a instalação;
- espessura e peso da barreira;
- uso múltiplo (blindagem e estrutura);
- blindagem de vários tipos de radiação;
- uniformidade e homogeneidade;
- estabilidade;
- custo da construção;
- acabamento, limpeza e conservação.

O concreto comum tem a vantagem do baixo custo e da facilidade de construção. Embora as blindagens em concreto sejam bastante espessas, devido ao número atômico e densidade relativamente baixa, ele é o material de escolha quando espaço não é problema. A concretagem exige armação de ferragem para aumentar a resistência, e formas para contenção da massa fluída. Sempre que possível ela deve ser feita de forma contínua e vibratória para evitar fendas e espaços vazios. Como as espessuras são baseadas em concreto comum de

$2,35g.cm^{-3}$, qualquer variação na densidade do concreto usado acarreta um ajuste na espessura calculada que, se não for muito grande, pode ser feito baseado na razão entre as densidades.

Concreto de alta densidade pode ser usado quando o espaço é limitado. Entretanto, seu custo relativamente alto e a falta de curvas de atenuação apropriadas contra indicam sua utilização de rotina. O uso da relação de densidades na correção da espessura superestima a espessura necessária. Caso seja indicado o uso do concreto de alta densidade, deve-se medir ou obter as curvas de atenuação para a energia empregada e usá-las na determinação das espessuras de blindagem.

Aço de baixo teor de carbono apresenta características favoráveis de blindagem e, devido à resistência, pode também ser usado como componente estrutural. Placas de aço podem ser usadas complementarmente ao concreto quando o espaço for pequeno e também como marco e blindagem de portas e ainda como preenchimento de recessos nas paredes. Chumbo só é aconselhado como blindagem nas portas. Embora esse material seja denso, lençóis ou lâminas de chumbo são difíceis de manusear, possuem baixa resistência e de alto custo para o serviço.

Terra compactada é um material de baixo custo e pode ser usada tanto em encostas, diminuindo a espessura de concreto (desde que se assegure que jamais ela será removida), quanto para preencher regiões entre dois arrimos. A atenuação oferecida pela terra depende da densidade e composição, que pode ser bastante variável de um local para outro.

Tabela 3: A tabela abaixo resume algumas propriedades físicas dos materiais mais utilizados em blindagem [10].

Material	Densidade ($g.cm^{-3}$)	Nº atômico	Custo relativo
Concreto comum	2,3 – 2,4	11	1,0
Concreto denso	3,0 – 4,8	26	5,8
Aço de baixo C	7,87	26	3,0
Chumbo	11,35	82	22
Terra (seca-compacta)	1,5	-	Baixo

6.2.7 Espessura da barreira

Conhecendo-se os fatores de transmissão pela barreira, determina-se a espessura da blindagem que atende os limites autorizados de dose, a partir de curvas de transmissão de feixes largos das publicações NCRP-49 e 51 ou ICRP-33. Sempre que possível, a espessura da blindagem deve ser determinada a partir da leitura direta do gráfico apropriado. Para radiação de fuga, se não houver uma curva experimental, recomenda-se usar a de transmissão da radiação primária.

Outro método para determinação de espessura de barreira é baseado na primeira *TVL* (T_I) e nas *TVLs* subseqüentes (T_e), e é dado no NCRP-51, podendo ser usado quando não houver curvas de transmissão apropriadas. Uma alternativa mais conservadora e simples é usar somente a primeira *TVL*. A tabela abaixo mostra alguns valores de *TVLs*, adaptados do NCRP-51.

Tabela 4: Espessura décimo-redutora (*TVL*) para diferentes energias e materiais de blindagem – NCRP [10].

Energia Nominal	Material	TVL_I (m)	TVL_e (m)
6 MV	Concreto Comum	0,35	0,35
	Aço	0,099	0,099
10 MV	Concreto Comum	0,41	0,39
	Aço	0,104	0,104
15 MV	Concreto Comum	0,46	0,43
	Aço	0,108	0,108

Tabela 5: Espessura décimo-redutora (*TVL*) para radiação primária e para radiação de fuga a 90° - VARIAN [10].

Energia Nominal	Material	TVL primária (m)	TVL fuga a 90° (m)
6 MV	Concreto Comum	0,343	0,279
	Terra	0,572	-
	Aço	0,098	0,080
10 MV	Concreto Comum	0,389	0,305
	Terra	0,648	-
	Aço	0,105	0,085
15 MV	Concreto Comum	0,432	0,330
	Terra	0,720	-
	Aço	0,108	0,087

Usando-se o valor da transmissão (B_x ou B_p) já calculado, o número de *TVLs* da barreira é obtido pela relação

$$n = \log\left(\frac{1}{B_x}\right) \text{ ou } n = \log\left(\frac{1}{B_p}\right), \quad (10)$$

em que n é o número de *TVLs* da barreira e B_x e B_p os valores de transmissão.

E a espessura (S) da barreira será dada por

$$S = T_1 + (n - 1) \cdot T_e, \quad (11)$$

em que S é a espessura da barreira, n é o número de *TVLs*, T_1 é o valor da espessura da barreira baseada na primeira *TVL* e T_e é o valor da espessura da barreira baseada nas *TVLs* subseqüentes.

6.2.8 Largura e comprimento da barreira primária

A largura da barreira primária deve ter o tamanho do campo máximo do feixe primário, no lado externo, mais $0,3 \text{ m}$ para cada lado (para prevenir o escape de radiação pela blindagem secundária contígua). Para a maioria dos aceleradores modernos, o maior tamanho de campo a 1 metro do alvo é de $40 \times 40 \text{ cm}^2$. Entretanto, pela rotação de 45° do cabeçote a partir da posição normal, a maior largura do feixe é a diagonal do quadrado de lado 40 cm , ou seja, $56,6 \text{ cm}$.

Se um feixe é projetado numa barreira a X metros de distância, a largura máxima do campo será

$$L = 0,566 \cdot X, \quad (12)$$

em que X é a distância do alvo à superfície externa e L é a largura máxima do campo.

A largura horizontal da barreira será então dada por

$$L = 0,566 \cdot X + 0,6, \quad (13)$$

em que L é a largura horizontal em metros, $0,566$ é o diâmetro do campo máximo ($40\text{cm} \times 40\text{cm}$) a 1m e X é a distância em metros.

Para uma sala construída totalmente em concreto, a prática é fazer-se toda a blindagem primária com a largura L e comprimento ou altura se estendendo por toda a barreira. Caso a blindagem seja uma combinação de concreto e aço, a porção metálica pode ser afunilada para reduzir o custo e o peso.

6.2.9 Labirinto convencional

A construção de um labirinto é recomendada para diminuir a intensidade de radiação que chega à entrada da sala de tratamento, tornando desnecessária a instalação de uma porta muito pesada. Para os aparelhos de média energia ($4 < E < 10 \text{ MV}$), a porta típica para blindar fótons consiste de uma lâmina de $0,6 \text{ mm}$ a 15 mm chumbo, colocada entre duas lâminas de madeira ou aço.

A radiação que atinge a região da porta no labirinto é proveniente tanto do espalhamento no paciente e nas superfícies da sala, quanto da penetração direta de radiação pela parede do labirinto. A região da porta deve estar fora do feixe primário, para evitar que a parede do labirinto tenha que ser muito espessa, e a porta muito pesada. Assim sendo, a radiação que passa diretamente pela parede do labirinto será a de fuga pelo cabeçote (que ditará a espessura dessa parede) e a espalhada pelo paciente ou superfícies da sala.

A espessura da parede do labirinto deve ser calculada pelo método convencional, levando-se em conta que ela deve reduzir a dose na região da porta a valores menores que os limites primários, pois a essa dose se somará a de espalhamento, que chegará pelo labirinto. A parede interna do labirinto também é usada para diminuir a espessura da parede lateral adjacente ao ambiente externo. Um labirinto longo é mais conveniente do ponto de vista da blindagem da porta, mas é menos prático. O projeto deve levar em conta esses dois fatores e uma boa solução é ter um labirinto com comprimento entre 3 e 6 m .

Um dos métodos mais utilizados na determinação da quantidade de radiação incidente na entrada de um labirinto para fins de cálculo de blindagem da porta é o do NCRP 51. Entretanto, esse método não é aqui recomendado, pois vários autores têm mostrado que seus valores são muito diferentes dos medidos experimentalmente e dos obtidos através de simulação de Monte Carlo. Essa discrepância pode ser devida ao fato de que o método da

NCRP 51, só leva em conta a radiação de múltiplo espalhamento, desconsiderando a radiação de fuga que atravessa a parede interna do labirinto, e, também porque considera a energia média do feixe primário como sendo metade do valor da nominal (o melhor valor seria 1/3), assumindo que a energia média do campo de fótons na entrada do labirinto seria 0,5 MV (o melhor valor seria 0,2 MV). Alguns trabalhos recentes discutem a dose de fótons em labirintos: Morgan e outros (1995), McGinley e James (1997) e Falcão e Okuno (1999).

6.2.10 Método de McGinley (1998)

De acordo com este autor, na região da porta pode chegar:

- a) radiação primária espalhada nas superfícies da sala (E_s);
- b) radiação de fuga espalhada pelas superfícies da sala (E_f);
- c) radiação primária espalhada no paciente (E_p);
- d) radiação de fuga transmitida pela parede do labirinto (F_{lab}).

A figura abaixo mostra a situação de espalhamento nas superfícies, quando o feixe primário incide na parede C.

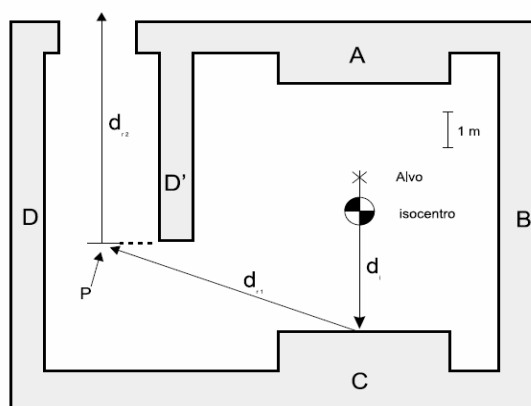


Figura 3: Diagrama da sala para cálculo do espalhamento nas superfícies (E_s). Baseado em Numark & Case (1985).

a) A dose da radiação espalhada para a região da entrada quando o feixe primário atinge a parede C pode ser calculada por

$$E_s = \frac{W_c \cdot \alpha_1 \cdot A_1 \cdot \alpha_2 \cdot A_2}{(d_i \cdot d_{r1} \cdot d_{r2})^2}, \quad (14)$$

em que E_s é a dose na região da porta devida ao espalhamento na parede, W_c é a carga de trabalho da máquina na direção da parede C ($W \times U_c$), α_1 é o coeficiente da 1ª reflexão (na parede C) baseado em 1/3 do MV, A_1 é a área (m^2) do feixe na primeira reflexão (na parede C), α_2 é o coeficiente da 2ª reflexão (parede D) baseado na energia 0,5 MeV, A_2 é a área (m^2) da secção reta do labirinto, d_i é a distância (m) do alvo até a primeira reflexão, d_{r1} é a distância (m) central ao longo da primeira perna do labirinto e d_{r2} é a distância (m) central ao longo da segunda perna do labirinto.

A equação acima é válida nas seguintes condições:

I. A energia média do feixe primário é tomada como 1/3 da nominal da máquina (MV), ao contrário do NCRP 51 que recomenda o valor 1/2 do MV;

II. O ângulo da radiação refletida é determinado a partir de uma linha que se estende desde o centro do campo na parede C até um ponto P na figura;

III. Os valores de $\alpha_1, \alpha_2, d_{r1}$ e d_{r2} são diferentes daqueles tomados no NCRP 51;

IV. A razão altura/largura do labirinto deve estar entre 1 e 2;

V. A razão $\sqrt{\frac{d_{r2}}{A_2}}$ deve estar entre 2 e 6.

Os valores para os coeficientes de reflexão são encontrados na figura 4, somente para 2 geometrias. Em muitas situações esses dados podem não ser aplicáveis e os coeficientes têm que ser interpolados.

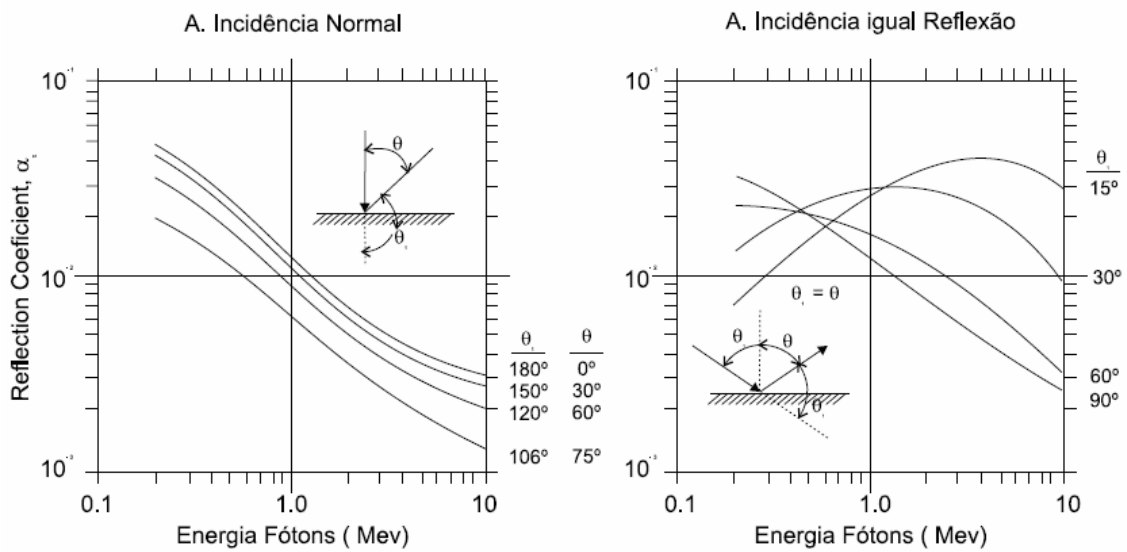


Figura 4: Coeficientes de reflexão para raios-X monoenergéticos em concreto. NCRP - 51.

b) A radiação de fuga pelo cabeçote que atinge a parede C (mostrada na figura abaixo) experimenta um único espalhamento antes de chegar na entrada do labirinto.

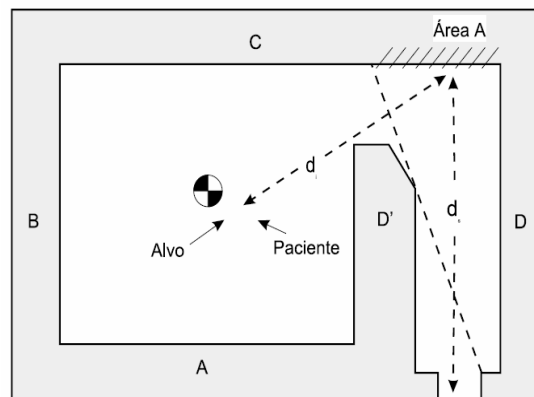


Figura 5: Esquema mostrando o trajeto da radiação de fuga espalhada na parede C até na porta. Baseado em Numark & Case (1985)

Essa radiação é mais energética do que a de duplo espalhamento do feixe primário ou do que a espalhada a partir do paciente. Para feixes primários com energias de 6 a 10 MV pode-se assumir que a energia média dos fótons na entrada do labirinto é 0,3 MeV.

Para o cálculo dessa componente de dose na porta podemos usar

$$E_f = \frac{F_0 \cdot W_c \cdot \alpha_1 \cdot A_1}{(d_s \cdot d_i)^2}, \quad (15)$$

em que E_f é a dose na região da porta devido à fuga pelo cabeçote, F_0 é a razão entre a dose no isocentro e a dose de fuga a 1m do alvo ou canhão, ou seja, é o fator máximo de fuga (para este valor, se possível usar valores experimentais ou os fornecidos pelo fabricante, se não os tiver, uma aproximação aceitável é usar o valor 0,001 ou 0,1%), W_c é a carga de trabalho da máquina na direção da parede C ($W \times U_C$), α_1 é o coeficiente de reflexão na parede, A_1 é a área (m^2) da parede C que pode ser vista da entrada da sala (figura 5), d_i é a distância (m) do alvo até a parede refletora na linha central do labirinto e d_s é a distância (m) central ao longo do labirinto desde a parede até a porta.

c) A dose da radiação espalhada para a região da entrada, quando o feixe primário atinge o paciente pode ser calculada por

$$E_p = \frac{a \cdot W_c \cdot \left(\frac{F}{400}\right) \cdot \alpha_1 \cdot A_1}{(d_{esp} \cdot d_{sec} \cdot d_{r1})^2}, \quad (16)$$

em que E_p é dose da radiação espalhada pelo paciente na entrada do labirinto, W_c é a carga de trabalho da máquina na direção da parede C ($W \times U_C$), a é o coeficiente de reflexão de espalhamento no paciente, F é a área do campo (cm^2) no paciente, α_1 é o coeficiente de reflexão na parede para energia 0,5 MeV, A_1 é a área (m^2) da parede C que pode ser vista da entrada da sala mostrada na figura 7, d_{esp} é a distância (m) do alvo até o paciente (geralmente 1 m), d_{sec} é a distância (m) do paciente até a linha central do labirinto na parede refletora e d_{r1} é a distância (m) central ao longo do labirinto, desde a parede até a porta.

d) A dose de radiação de fuga na entrada, transmitida pela parede do labirinto é determinada por

$$F_l = \frac{F_0 \cdot W_c \cdot B}{(d'')^2}, \quad (17)$$

em que F_l é a dose de radiação de fuga na entrada transmitida pela parede do labirinto, F_0 é a razão entre a dose no isocentro e a dose de fuga a 1m do alvo ou canhão, ou seja, é o fator máximo de fuga (para este valor, se possível usar valores experimentais ou os fornecidos pelo fabricante, se não os tiver, uma aproximação aceitável é usar o valor 0,001 ou 0,1%), W_c é a

carga de trabalho da máquina na direção da parede C ($W \times U_C$), B é o fator de transmissão pela parede do labirinto (parede D') e d'' é a distância do alvo até o centro da porta.

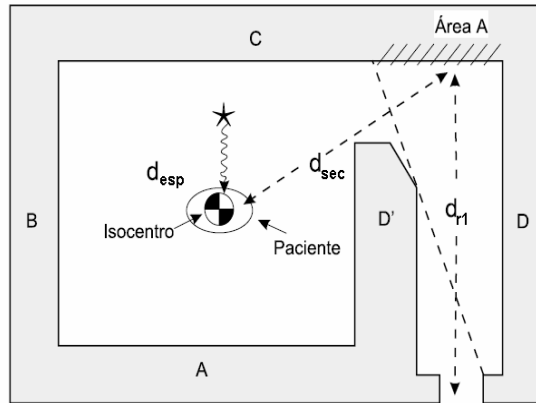


Figura 6: Esquema mostrando trajeto de espalhamento da radiação espalhada pelo paciente até a porta. Baseado em Numark & Case (1985).

6.2.11 Cálculo da dose na entrada da sala

A dose é máxima na entrada da sala quando o campo é máximo (colimador todo aberto), o feixe está dirigido para a parede C e temos um meio espalhador no isocentro (paciente ou fantoma).

Nestas condições, a dose total na porta (D_c), resultante de todas as componentes (E_s, E_f, E_p e F_l) é dada por

$$D_c = f \cdot (E_s) + (E_f) + (E_p) + (F_l), \quad (18)$$

em que D_c é a dose total na porta dada em Gy/sem resultante de todas as componentes, f é a fração do feixe transmitida pelo paciente e tem valor 0,23 para 6 MV e 0,27 para 10 MV (McGinley & James-1997), E_s é a dose na região da porta devida ao espalhamento na parede, E_f é a dose na região da porta devido à fuga pelo cabeçote, E_p é dose da radiação espalhada pelo paciente na entrada do labirinto e F_l é a dose de radiação de fuga na entrada transmitida pela parede do labirinto.

Admitindo-se que o feixe primário é dirigido igualmente para as quatro direções (para baixo, para cima e horizontais esquerda e direita), McGinley propõe que a dose total na porta (D_T), para uma sala semelhante à das figuras anteriores será dada por

$$D_T = 2,64 \cdot D_C, \quad (19)$$

em que D_T é a dose total na porta dada em Gy/sem segundo McGinley e D_C é a dose total na porta dada em Gy/sem resultante de todas as componentes

6.2.12 Espessura de blindagem da porta

O fator de transmissão é calculado pelo quociente entre a dose total (D_T) e o nível de proteção necessário para a área externa à porta. Portanto,

$$B_{porta} = \frac{D_T}{P}, \quad (20)$$

em que B_{porta} é a espessura de blindagem da porta, D_T é a dose total na porta dada em Gy/sem segundo McGinley e P é o limite autorizado.

Daqui podemos determinar a espessura da blindagem consultando curvas de B versus espessura de material ou usando valores de TVLs. Para acelerador de 10 MV a espessura da blindagem pode ser baseada nos dados de fótons de 0,21 MeV ($TVL_{Pb} = 10$ mm).

Embora este método seja sofisticado e preciso, também é mais trabalhoso, exigindo bastante cuidado na escolha dos parâmetros de interação e direção.

Qualquer um dos dois métodos descritos acima pode ser usado. As técnicas de cálculo descritas são válidas também para raios-X na região da porta gerados em máquinas de alta energia.

Entretanto se $E > 10$ MV temos que considerar também a presença de foneutrons e de raios gama de captura.

7 Otimização das blindagens

7.1.1 Princípio da otimização

As normas de radioproteção da CNEN são baseadas em três princípios: Justificativa, Otimização e Limitação da dose. A justificativa deve levar em consideração as possíveis vantagens comparativas a outros métodos como cirurgia e/ou quimioterapia; o balanço entre a severidade da condição a ser tratada e a possibilidade de ocorrência de efeitos indesejáveis, estocásticos ou não estocásticos. A justificativa na prática implica em se produzir mais benefícios que dano. A limitação da dose implica em se ter um adequado padrão de radioproteção e a otimização da proteção significa maximizar as margens de segurança, minimizando os custos.

Um dos princípios básicos de radioproteção é manter-se as exposições tão baixas quanto razoavelmente exequível – ALARA (Australian Ladies Amateur Radio Association), levando-se em conta fatores econômicos e sociais. Na prática, esse princípio consiste em aumentar o nível de proteção até o ponto em que as melhorias suplementares só conseguem reduções de exposição que são menos importantes que os esforços adicionais requeridos para essas reduções. O esforço na radioproteção é quantificado em termos de custo.

As dimensões das instalações e as blindagens das fontes de radiação devem ser tais que as operações possam ser executadas em conformidade com os limites autorizados e, na sua ausência, com o princípio da otimização [5].

Assim sendo, os limites de dose individual não podem, por si só, definir as espessuras das blindagens.

Eles são usados como condição de contorno para assegurar espessuras mínimas e seus valores são 20 *mSv/ano* para trabalhadores (áreas restritas) e 1 *mSv/ano* para indivíduos do público. É importante ressaltar que, se a espessura otimizada for inferior à obtida por limitação de dose individual, deve-se adotar o maior valor.

A não ser que a CNEN solicite especificamente, a demonstração de otimização de um sistema de proteção radiológica é dispensável quando o projeto assegura que, em condições normais de operação, cumprem-se simultaneamente as três condições seguintes:

- a dose equivalente efetiva para trabalhadores não excede a 1 *mSv/ano*;

- a dose equivalente efetiva para indivíduos do público não excede a $10 \mu\text{Sv/ano}$;
- a dose equivalente efetiva coletiva não excede a $1 \text{ homem-sievert/ano}$.

Existem vários métodos e algoritmos para cálculo de otimização de blindagens. Dois deles são descritos a seguir:

7.1.2 Método iterativo do ICRP-33

Neste método, depois de determinar a espessura de blindagem que atende ao limite de dose individual, propõe-se incrementos na espessura (1 ou mais *HVLs*), e, calcula-se a redução na dose coletiva e o custo para esse incremento. A seguir, divide-se esse custo (em dólares) pela dose coletiva economizada (em *homem-sievert*) e compara-se esse custo com o coeficiente monetário, definido pela norma CNEN – NE - 3.01 como $\alpha = \text{US\$ } 10\,000$ por *homem-sievert* poupado. Quando o custo for igual ao coeficiente monetário, o valor otimizado de blindagem é atingido. Pode-se usar o valor de $\text{US\$ } 500,00$ por m^3 de concreto ou o da tabela PINI para as condições próximas às de construção [12].

7.1.3 Método direto de otimização

Nesse método a espessura otimizada é determinada a partir da transmissão “ótima” dada pela expressão abaixo, através da qual se obtém o no de *TVLs* necessários. A espessura é calculada multiplicando-se este número pelo *TVL* do material.

O fator de transmissão “ótimo” ($B_{\text{ót}}$) para a parede em questão é dado por

$$B_{\text{ót}} = \frac{A \cdot C \cdot TVL_{\text{mat}}}{\ln 10 \cdot \alpha \cdot n \cdot H_{\text{tot}} \cdot T_v}, \quad (21)$$

em que $B_{\text{ót}}$ é o fator de transmissão “ótimo” para a parede em questão, A é a área da parede a ser blindada (m^2), C é o custo da construção do metro cúbico de material ($\text{US\$}/\text{m}^3$), TVL_{mat} é a espessura décimo redutora para o material da parede, α é o coeficiente monetário ($\text{US\$}10000/\text{homem-Sv}$), n é o número de indivíduos com ocupação integral na vizinhança

próxima à parede, H_{tot} é a taxa de dose equivalente total no ponto de análise na ausência de barreira dada em Sv/sem e T_v é a vida útil da instalação ($T_v = 1040$ sem).

O número de indivíduos com ocupação integral na vizinhança próxima à parede é dada por

$$n = \sum (T_i \cdot P_i), \quad (22)$$

em que n é o número de indivíduos com ocupação integral na vizinhança próxima à parede, T_i é o fator ocupação do grupo de indivíduos P_i .

Partindo-se do valor de $B_{ót}$, podemos calcular em seguida o número de camadas décimo redutoras (N) requeridos para blindagem, que é dada por

$$N = \log\left(\frac{1}{B_{ót}}\right), \quad (23)$$

em que $B_{ót}$ é o fator de transmissão “ótimo” para a parede em questão e N é o número de camadas décimo redutoras.

A espessura otimizada da blindagem ($S_{ót}$) será

$$S_{ót} = N \cdot TVL, \quad (24)$$

em que $S_{ót}$ é a espessura otimizada da blindagem, N é o número de camadas décimo redutoras e TVL é a espessura décimo redutora.

O método direto de otimização não leva em conta o tipo de área a ser blindada (livre ou restrita) e, portanto, nada diz sobre o atendimento aos limites primários de dose. Muitas vezes a espessura calculada por ele é inferior à determinada pela limitação da dose individual, o que, se usado, proporcionaria dose superior aos limites individuais. A legislação brasileira exige que sejam atendidos o princípio da limitação da dose individual e o da otimização. Assim sendo, deve-se calcular tanto a espessura necessária para atender os limites primários de dose quanto à da otimização e usar a maior delas para estar em conformidade com as

normas. Em caso de se utilizar outro material que não o concreto na confecção da blindagem das paredes, deve-se avaliar o custo do metro cúbico desse material no cálculo de otimização.

8 MONITORAÇÃO AMBIENTAL E PESSOAL

Após a instalação e o funcionamento de equipamentos produtores de radiação ionizante nos centros de radioterapia, um físico qualificado deve fazer no local o chamado “levantamento radiométrico de área”, verificando não somente se o nível de proteção radiológica (avisos de radiação, funcionamento dos botões de emergência, procedimentos de emergência e etc.).

Todos estes procedimentos são determinados pelas publicações da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

Quanto ao trabalhador com radiações ionizantes, este deverá portar, durante seu período de trabalho, um dosímetro que acumule a dose por ele recebida. Normalmente, estes dosímetros pessoais são filmes dosimétricos ou cristais termoluminescentes.

Outro método de monitoração pessoal que pode ser usado são as câmaras de ionização de bolso, as chamadas canetas dosimétricas, que possuem boa exatidão. Entretanto, seu preço é alto, e os cuidados que devemos tomar são intensos, o que inviabiliza seu uso rotineiro nos centros de radioterapias.

Normalmente, estas canetas dosimétricas são reservadas para uma avaliação da dose recebida durante algum procedimento, pois estas câmaras são de leitura direta.

Enfim, o mais importante é que o trabalhador sempre use um dosímetro pessoal, caso contrário, todas as normas de proteção radiológica poderão não ser verificadas, pois não saberemos a dose recebida por ele.

8.1 Levantamento Radiométrico de Área

Os levantamentos radiométricos são efetuados com detetores calibrados e pessoal qualificado, com duração de 2 a 3 horas para cada equipamento. Realizamos medidas em toda circunvizinhança da sala: do acelerador de 4MV, do acelerador de 6MV, da bomba de cobalto, do aparelho de raios-X superficial e da sala quente instalados no Instituto de Radioterapia do Vale do Paraíba, os resultados seguem no item 11. Esta avaliação permite averiguar se as blindagens existentes na sala reduzem a intensidade de radiação a níveis recomendados pela legislação vigente.

Portanto, este documento atesta a execução dos serviços de radiodiagnóstico médico, para poder obter o alvará de saúde da instituição.

Instrumentos utilizados no levantamento radiométrico: câmara de ionização, galão de água de 20l.

8.2 Teste de Fuga do Aparelho de Raios-X Superficial:

De acordo com as normas da vigilância sanitária a cada 4 anos preconizam-se medidas de radiação de fuga do tubo de raios-X.

Para se medir a fuga da radiação através do cabeçote, utilizamos o maior filtro e o menor cone.

Todas as medidas foram feitas utilizando a câmara de ionização dedal distando 5 cm do cabeçote e os dados são apresentados em anexo.

9 PLANEJAMENTOS

9.1 Planejamento de Mama, Cálculo Manual das Curvas de Isodose Utilizando a Curva da Mama

A mama é tratada com o auxílio de 5 campos, só que não podemos aplicar todos eles os 25 dias de tratamento porque o SUS só cobre as despesas de 120 campos (somente 4,8 campos/dia), por isso, nos primeiros 19 dias utilizamos os 5 campos e no restante dos dias utilizamos somente 4 campos.

Para se calcular as curvas de isodose, utilizamos à curvatura da mama de cada paciente tanto para cálculo manual que era usado no hospital Regional de Taubaté até meados de 2008 e é mostrada na figura 6, quanto com o auxílio do programa CAT3D Shell Version 14.2.1 que é usado no Instituto de Radioterapia do Vale do Paraíba localizada na cidade de São José dos Campos.

Se for calcular através do programa, a curvatura da mama é escaneada e as curvas de isodose são calculadas com ajuda do programa.

Se o cálculo for feito manualmente, a curvatura da mama é colocada sobre transparência onde desenhemos (dependerá do filtro) as curvas de dose, como são dois campos, primeiramente desenhemos as curvas de um lado e depois do outro. Como a dose percorre um espaço que contém ar, ocorre um deslocamento da dose, então, multiplicamos esse percurso de ar por um fator 0,65. Para ligar as curvas de isodose é necessário achar o valor de dose em cada ponto, para se encontrar a dose em cada ponto é necessário somar a dose que vem da esquerda com a que vem da direita, se elas tiverem pesos diferentes é só multiplicar a dose pelo seu peso e depois somar.

A dose total (100%) será aquela que irá atingir seu alvo e o restante serão porcentagens dessa dose que foi atribuída como sendo 100%.

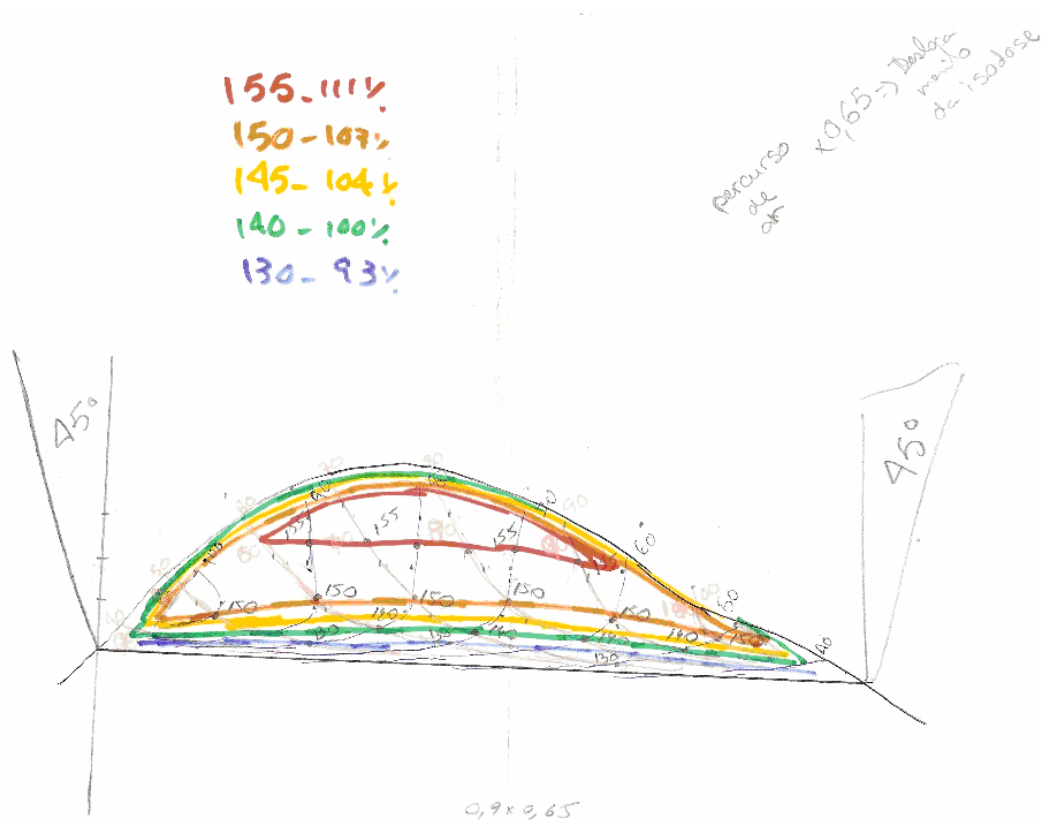


Figura 6: Esquema mostrando o cálculo manual de curvas de isodose feitas no Hospital Regional de Taubaté em 10/01/2007.

9.2 Planejamento e Cálculo de Próstata Convencional

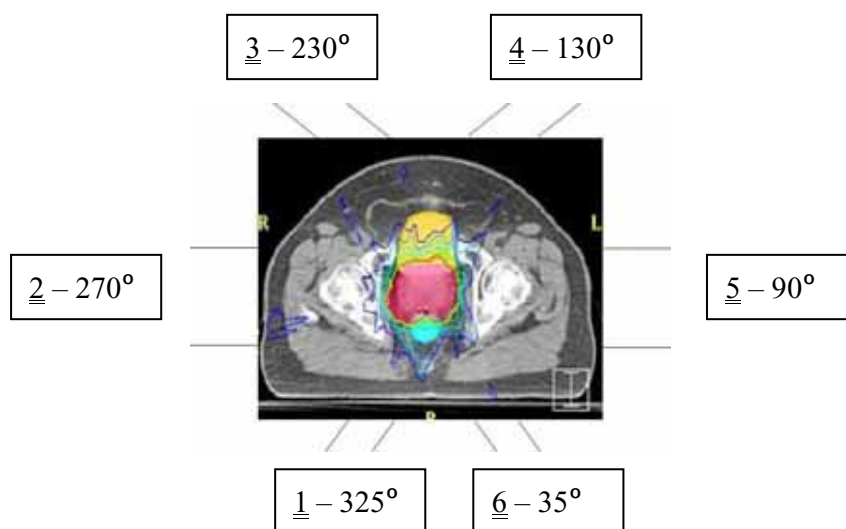


Figura 7: Angulações para um planejamento convencional de próstata (Imagem meramente ilustrativa).

A próstata é tratada com o auxílio de 6 campos, só que não podemos aplicar todos eles os 35 dias de tratamento porque o SUS só cobre as despesas de 140 campos (somente 4 campos/dia), por isso, no 1º dia utilizam-se os campos 2, 3, 4 e 5 e no 2º dia utilizam-se os campos 1, 2, 5 e 6.

As distâncias entre a fonte e a pele (*DFP*) são medidas para cada paciente e utilizadas na Tabela (*Campo X Profundidade*), sabendo os campos e a profundidade, as doses a serem aplicadas são calculadas através da equação 23.

Para tratamento *SAD*, o cálculo das unidades monitoras será

$$UM = \frac{Dose \cdot Peso}{(FN/100) \cdot (Iso/100) \cdot TMR \cdot F_{cal} \cdot F_c \cdot F_p \cdot F_b \cdot F_f \cdot FOA}, \quad (23)$$

em que *UM* é o número de unidades monitoras, *Dose* é a dose prescrita, em cGy, *Peso* é o peso atribuído ao campo em questão, *FN* é o fator normalização (que é o somatório dos pesos de todos os campos), *Iso* é a curva de isodose escolhida pelo radioterapeuta para o tratamento (que é elaborada pelo físico médico manualmente ou com auxílio de algum programa específico), *TMR* é a relação tecido máximo (que é a caracterização da dose a 100cm de distância do foco na profundidade de tratamento em relação à profundidade de máximo, que é 1,5cm para os feixes de 6MV e de 2,8cm para feixes de 15 MV), *F_{cal}* é o fator de calibração (característico da energia do feixe a ser utilizada), *F_c* é o fator espalhamento do colimador (que corrige a dose devido ao espalhamento originário do sistema interno de colimação do aparelho), *F_b* é o fator bandeja (correção devida à presença da bandeja), *F_f* é o fator filtro (correção devida à presença de filtro), *F_p* é o fator objeto simulador e *FOA* é o fator “off-axis” (correção devida ao deslocamento do volume alvo em relação ao eixo central do feixe).

O cálculo é feito com o auxílio do programa CAT3D Shell Version 14.2.1 no Instituto de Radioterapia do Vale do Paraíba, através de imagens tomográficas ou contornos; ou se não contar com a ajuda do programa, como é o caso do Hospital Regional de Taubaté, o cálculo é feito manualmente.

10 PRÁTICA DE CÁLCULO DE BLINDAGEM PARA O INSTITUTO DE RADIOTERAPIA DO VALE DO PARAÍBA

No meu estágio, aprendi a fazer o cálculo de blindagem do Instituto de Radioterapia do Vale do Paraíba, localizado na cidade São José dos Campos, para a instalação de um Acelerador Linear Simenes Mevatron MXE de 6 MEV sem “Beam stopper”.

Para tanto, foi necessário plotar a primeira planta baixa em um software específico - AUTOCAD, para iniciarmos os cálculos de blindagem, mesmo sem termos o conhecimento exato da espessura necessária de cada parede. A primeira planta pode ser observada na figura 16. A descrição do processo de cálculos de blindagem encontra-se no item 10.1 - Cálculo de Blindagem Inicial.

Entretanto, houve a necessidade de melhor adequação da planta baixa do Instituto e todo o novo cálculo de blindagem foi refeito no item 10.2 com base na figura 17 (Planta plotada com os resultados obtidos no item 10.1).

10.1 Cálculo de Blindagem Inicial

10.1.1 Parede C – feixe secundário

a) Espessura de concreto necessária para atender a limitação da dose individual:

Para radiação primária. Não há incidência de feixe primário na região do ponto C. Portanto $U_{\text{prim}} = 0$ e não há necessidade de blindagem para feixe primário.

Usaremos toda a área como sendo área livre para subestimar a dose. Sendo que $P = 2.10^{-5} \text{ Sv/sem}(1\text{mSv/ano})$, $W = 10^3 \text{ Sv/sem}(50000\text{Sv/ano})$, $f_f = 10^{-3}$, $U = 1$, $T = 1$ e $D_{\text{fuga}} = 5,3\text{m}$.

Utilizando a equação 8 e substituindo os valores, temos que

$$B_f = 5,618.10^{-4}.$$

Segundo a tabela 5: TVL do concreto (fuga de 90° p/ 6MV) é igual a 0,279m.

Utilizando a equação 10, temos que

$$n = 3,25 .$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 0,90675m..

Não nos esqueçamos que para um feixe de 10 MV a componente de radiação espalhada é sempre inferior à de fuga e, portanto, não é necessário calcular aquela contribuição. Para um feixe de 6 MV, deve-se calcular a componente espalhada para a parede mais crítica (em geral o comando) e mostrar que é inferior à radiação de fuga do cabeçote.

b) Espessura otimizada

Sendo

$$H_{tot} = W \cdot l \cdot \left(\frac{1}{d}\right)^2 \cdot U \cdot T , \quad (25)$$

em que $W_f = 1Sv / sem(1000 * 0,1\%)$, $d = 5,3m$, $N = 3$ e $T = 1$, temos que

$$H_{tot} = 0,0287Sv / sem .$$

Utilizando a equação 21, sendo que $A = 21,42m^2(3,15x6,8)$, $C = 500,00US\$/m^3$, $TVL_{mat} 0,279m$, $\alpha = 10000US\$/hom emSv$, $n = 3hom em$ e $T_v = 1040sem(52sem \cdot 20anos)$, temos que

$$B_{ót} = 1,45 \cdot 10^{-3} .$$

Utilizando a equação 23, sendo que $B_{ót} = 1,45 \cdot 10^{-3}$, temos que

$$N = 2,84 .$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 0,7839m.

Conclusão: A espessura que atende o limite de dose individual (90,68 cm) é maior que a otimizada (78,39 cm). Portanto, a parede C, deve ser construída com espessura de 90,68 cm de concreto.

10.1.2 Parede A - feixe primário

a) Largura da blindagem primária na parede A:

Utilizando a equação 13, sendo que $X = 5,9$ m, temos que

$$L = 3,94m .$$

Conclusão (a): A largura da barreira primária que blindo o maior campo possível na situação mais crítica é 394 cm de concreto.

b) Espessura de concreto para atender a limitação da dose individual

Usaremos toda área como sendo área livre para subestimar a proteção.

Utilizando a equação 5, sendo que $P = 2.10^{-5} Sv / sem(1mSv / ano)$, $W = 10^3 Sv / sem$, $U = 1/7(Tabela1 - INCA)$, $T = 1$ e $d_{prim} = 5,9m$, temos que

$$B_x = 4,874.10^{-6} .$$

Utilizando a equação 10, sendo que $B_x = 4,874.10^{-6}$, temos que

$$n = 5,3121 .$$

Utilizando a equação 11 e segundo a tabela 4: $TVL_1 (T_1)$ do concreto (radiação primária p/ 6MV) é igual a 0,35m e $TVL_e (T_e)$ do concreto (radiação primária p/ 6MV) é igual a 0,35m, temos que

$$Espessura = 1,8592 .$$

c) Espessura otimizada

Utilizando a equação 25, sendo que $W_i = 142,86\text{Sv}/\text{sem}$, $d = 5,9\text{m}$, $N = 3$, $U = 1/7$ e $T = 1$, temos que

$$H_{tot} = 4,104\text{Sv}/\text{sem}.$$

Utilizando a equação 21, sendo que $A = 12,411\text{m}^2 (3,15 \times 3,94)$, $C = 500,00\text{US}\$/\text{m}^3$, $TVL_{mat} = 0,279\text{m}$, $\alpha = 10000\text{US}\$/\text{hom em Sv}$, $n = 3\text{hom em}$ e $T_v = 1040\text{sem} (52\text{sem} \cdot 20\text{anos})$, temos que

$$B_{ót} = 7,22 \cdot 10^{-6}.$$

Utilizando a equação 23, sendo que $B_{ót} = 7,22 \cdot 10^{-6}$, temos que

$$N = 5,14.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (radiação primária para 6 MV), que será 1,7630m.

Conclusão(b): A espessura de concreto que atende o limite de dose individual (185,92 cm) é maior do que a espessura calculada por otimização (176,30 cm). Portanto, a parede A, na região primária, deve ter espessura 185,92 cm de concreto.

Conclusão final: Na região do feixe primário da parede A teremos um cinturão de concreto com 185,92 cm de espessura, 394 cm de largura (197 cm de cada lado do plano vertical do isocentro) e 315 cm de altura.

10.1.3 Parede B – feixe secundário

a) Espessura de concreto necessária para atender a limitação da dose individual:

Para radiação primária. Não há incidência de feixe primário na região do ponto B. Portanto $U_{prim} = 0$ e não há necessidade de blindagem para feixe primário.

Usaremos toda a área como sendo área livre para subestimar a dose. Utilizando a equação 8, sendo que $P = 2.10^{-5} Sv/sem(1mSv/ano)$, $W = 10^3 Sv/sem(50000Sv/ano)$, $f_f = 10^{-3}$, $U = 1$, $T = 1$ e $D_{fuga} = 3,9m$, temos que

$$B_f = 3,042.10^{-4}.$$

Segundo a tabela 5: TVL do concreto (fuga de 90° p/ 6MV) é igual a 0,279m.

Utilizando a equação 10, temos que

$$n = 3,52.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 0,9821m..

Não nos esqueçamos que para um feixe de 10 MV a componente de radiação espalhada é sempre inferior à de fuga e, portanto, não é necessário calcular aquela contribuição. Para um feixe de 6 MV, deve-se calcular a componente espalhada para a parede mais crítica (em geral o comando) e mostrar que é inferior à radiação de fuga do cabeçote.

b) Espessura otimizada

Utilizando a equação 25, e sendo que $W_f = 1Sv/sem(1000 * 0,1\%)$, $d = 3,9m$, $N = 3$ e $T = 1$, temos que

$$H_{tot} = 0,06575Sv/sem.$$

Utilizando a equação 21, sendo que $A = 17,325m^2(3,15x(2,3 + 3,2))$, $C = 500,00US\$/m^3$, $TVL_{mat} 0,279m$, $\alpha = 10000US\$/hom emSv$, $n = 3 hom em$ e $T_v = 1040sem(52sem \cdot 20anos)$, temos que

$$B_{ót} = 5,116.10^{-4}.$$

Utilizando a equação 23, sendo que $B_{ót} = 5,116.10^{-4}$, temos que

$$N = 3,29 .$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 0,9179m.

Conclusão: A espessura que atende o limite de dose individual (98,21 cm) é maior que a otimizada (91,79 cm). Portanto, a parede B, na região do feixe secundário, deve ser construída com espessura 98,21 cm de concreto.

10.1.4 Parede I (teto) – feixe primário

a) Largura da blindagem primária na parede I:

Utilizando a equação 13, sendo que $X = 3,096$ m, temos que

$$L = 2,32m .$$

Conclusão (a): A largura da barreira primária que blindo o maior campo possível na situação mais crítica é 232 cm de concreto.

b) Espessura de concreto para atender a limitação da dose individual

Usaremos toda área como sendo área livre para subestimar a proteção.

Utilizando a equação 5, sendo que $P = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Sv/sem} (1 \text{ mSv/ano})$, $W = 10^3 \text{ Sv/sem}$, $U = 2/7(\text{Tabela1} - \text{INCA})$, $T = 1$ e $d_{\text{prim}} = 3,096 \text{ m}$, temos que

$$B_x = 6,71 \cdot 10^{-7} .$$

Utilizando a equação 10, sendo que $B_x = 6,71 \cdot 10^{-7}$, temos que

$$n = 6,17 .$$

Utilizando a equação 11 e segundo a tabela 4: $\text{TVL}_1 (T_1)$ do concreto (radiação primária p/ 6MV) é igual a 0,35m e $\text{TVL}_e (T_e)$ do concreto (radiação primária p/ 6MV) é igual a 0,35m, temos que

$$Espessura = 2,1595m .$$

c) Espessura otimizada

Utilizando a equação 25, sendo que $W_t = 285,72Sv/sem$, $d = 3,096m$, $N = 3$, $U = 2/7$ e $T = 1$, temos que

$$H_{tot} = 29,8Sv/sem .$$

Utilizando a equação 21, sendo que $A = 12,76m^2(2,32 \times 5,5)$, $C = 500,00US\$/m^3$, $TVL_{mat} = 0,343m(tabela5)$, $\alpha = 10000US\$/homemSv$, $n = 3homem$ e $T_v = 1040sem(52sem \cdot 20anos)$, temos que

$$B_{\acute{o}t} = 1,0210^{-6} .$$

Utilizando a equação 23, sendo que $B_{\acute{o}t} = 1,0210^{-6}$, temos que

$$N = 5,99 .$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (radiação primária para 6 MV), que será 2,0546m.

Conclusão(b) : A espessura de concreto que atende o limite de dose individual (215,95 cm) é maior do que a espessura calculada por otimização (205,46 cm). Portanto, a parede I na região primária deve ter espessura 215,95 cm de concreto.

Conclusão final: Na região do feixe primário da parede I teremos um cinturão de concreto com 215,95 cm de espessura, 232 cm de largura (116 cm de cada lado do plano vertical do isocentro) e 5,5 cm de comprimento.

10.1.5 Parede J (teto) - feixe secundário

a) Espessura de concreto necessária para atender a limitação da dose individual:

Não há incidência de feixe primário na região do ponto J. Portanto $U_{\text{prim}} = 0$ e não há necessidade de blindagem para feixe primário.

Usaremos toda a área como sendo área livre para subestimar a dose. Utilizando a equação 8, sendo que $P = 2.10^{-5} \text{ Sv/sem}(1\text{mSv/ano})$, $W = 10^3 \text{ Sv/sem}(50000\text{Sv/ano})$, $f_f = 10^{-3}$, $U = 1$, $T = 1$ e $D_{\text{fuga}} = 0,53\text{m}$, temos que

$$B_f = 5,618.10^{-6}.$$

Segundo a tabela 5: TVL do concreto (fuga de 90° p/ 6MV) é igual a 0,279m.

Utilizando a equação 10, temos que

$$n = 5,25.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 1,468m..

Não nos esqueçamos que para um feixe de 10 MV a componente de radiação espalhada é sempre inferior à de fuga e, portanto, não é necessário calcular aquela contribuição. Para um feixe de 6 MV, deve-se calcular a componente espalhada para a parede mais crítica (em geral o comando) e mostrar que é inferior à radiação de fuga do cabeçote.

b) Espessura otimizada

Utilizando a equação 25, e sendo que $W_f = 1\text{Sv/sem}(1000 * 0,1\%)$, $d = 0,53\text{m}$, $N = 3$ e $T = 1$, temos que

$$H_{\text{tot}} = 3,56\text{Sv/sem}.$$

Utilizando a equação 21, sendo que $A = 35,09m^2 (6,38 \times 5,5)$, $C = 500,00US\$/m^3$, $T_{VL_{mat}} = 0,279m$, $\alpha = 10000US\$/homemSv$, $n = 3homem$ e $T_v = 1040sem (52sem \cdot 20anos)$, temos que

$$B_{\acute{o}t} = 1,91 \cdot 10^{-5}.$$

Utilizando a equação 23, sendo que $B_{\acute{o}t} = 1,91 \cdot 10^{-5}$, temos que

$$N = 4,72.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 1,3169m.

Conclusão: A espessura que atende o limite de dose individual (146,48 cm) é maior que a otimizada (131,69 cm). Portanto, a parede J, na região do feixe secundário, deve ser construída com espessura 146,48 cm de concreto.

10.1.6 Parede D - feixe secundário

a) Espessura de concreto necessária para atender a limitação da dose individual:

Não há incidência de feixe primário na região do ponto D. Portanto $U_{prim} = 0$ e não há necessidade de blindagem para feixe primário.

Usaremos toda a área como sendo área livre para subestimar a dose. Utilizando a equação 8, sendo que $P = 2 \cdot 10^{-5} Sv/sem (1mSv/ano)$, $W = 10^3 Sv/sem (50000Sv/ano)$, $f_f = 10^{-3}$, $U = 1$, $T = 1$ e $D_{fuga} = 3,5m$, temos que

$$B_f = 2,45 \cdot 10^{-4}.$$

Segundo a tabela 5: TVL do concreto (fuga de 90° p/ 6MV) é igual a 0,279m.

Utilizando a equação 10, temos que

$$n = 3,61.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 1,0072m..

Não nos esqueçamos que para um feixe de 10 MV a componente de radiação espalhada é sempre inferior à de fuga e, portanto, não é necessário calcular aquela contribuição. Para um feixe de 6 MV, deve-se calcular a componente espalhada para a parede mais crítica (em geral o comando) e mostrar que é inferior à radiação de fuga do cabeçote.

b) Espessura otimizada

Utilizando a equação 25, e sendo que $W_f = 1Sv/sem(1000 * 0,1\%)$, $d = 3,5m$, $N = 3$ e $T = 1$, temos que

$$H_{tot} = 0,0816Sv/sem.$$

Utilizando a equação 21, sendo que $A = 6,3m^2(3,15 \times 2,00)$, $C = 500,00US\$/m^3$, $TVL_{mat} 0,279m$, $\alpha = 10000US\$/homemSv$, $n = 3homem$ e $T_v = 1040sem(52sem \cdot 20anos)$, temos que

$$B_{\acute{o}t} = 1,4992 \cdot 10^{-4}.$$

Utilizando a equação 23, sendo que $B_{\acute{o}t} = 1,4992 \cdot 10^{-4}$, temos que

$$N = 3,824.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 1,0669m.

Conclusão: A espessura que atende o limite de dose individual (100,72 cm) é menor que a otimizada (106,69 cm). Portanto, a parede D, na região do feixe secundário, deve ser construída com espessura 106,69 cm de concreto.

10.1.7 Parede E - feixe primário

a) Largura da blindagem primária na parede E:

Utilizando a equação 13, sendo que $X = 5,5$ m, temos que

$$L = 3,71m .$$

Conclusão (a): A largura da barreira primária que blindo o maior campo possível na situação mais crítica é 371 cm de concreto.

b) Espessura de concreto para atender a limitação da dose individual

Usaremos toda área como sendo área livre para subestimar a proteção.

Utilizando a equação 5, sendo que $P = 2 \cdot 10^{-5} Sv/sem(1mSv/ano)$, $W = 10^3 Sv/sem$, $U = 1/7(Tabela1 - INCA)$, $T = 1$ e $d_{prim} = 5,5m$, temos que

$$B_x = 4,235 \cdot 10^{-6} .$$

Utilizando a equação 10, sendo que $B_x = 4,235 \cdot 10^{-6}$, temos que

$$n = 5,3731 .$$

Utilizando a equação 11 e segundo a tabela 4: $TVL_1 (T_1)$ do concreto (radiação primária p/ 6MV) é igual a 0,35m e $TVL_e (T_e)$ do concreto (radiação primária p/ 6MV) é igual a 0,35m, temos que

$$Espessura = 1,8806m .$$

c) Espessura otimizada

Utilizando a equação 25, sendo que $W_t = 142,86,72Sv/sem$, $d = 5,5m$, $N = 3$, $U = 1/7$ e $T = 1$, temos que

$$H_{tot} = 4,7225Sv/sem .$$

Utilizando a equação 21, sendo que $A = 11,687m^2(3,15 \times 3,71)$, $C = 500,00US\$/m^3$, $T_{VL_{mat}} = 0,343m(tabela5)$, $\alpha = 10000US\$/homemSv$, $n = 3homem$ e $T_v = 1040sem(52sem \cdot 20anos)$, temos que

$$B_{\acute{o}t} = 5,91 \cdot 10^{-6}.$$

Utilizando a equação 23, sendo que $B_{\acute{o}t} = 5,91 \cdot 10^{-6}$, temos que

$$N = 5,23.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (radiação primária para 6 MV), que será 1,7939m.

Conclusão(b): A espessura de concreto que atende o limite de dose individual (188,06 cm) é maior do que a espessura calculada por otimização (179,39 cm). Portanto, a parede E, na região primária, deve ter espessura 188,06 cm de concreto.

Conclusão final: Na região do feixe primário da parede E teremos um cinturão de concreto com 188,06 cm de espessura, 371 cm de largura (185,5 cm de cada lado do plano vertical do isocentro) e 315 cm de altura.

10.1.8 Parede F - feixe secundário

10.1.8.1 Transmissão necessária quando temos a fuga pelo cabeçote a: 90° , 270° e 0° - 180° .

10.1.8.1.1 Cabeçote a 90°

a) Cálculo da transmissão pela barreira proveniente da fuga pelo cabeçote a 90° .

Não há incidência de feixe primário na região do ponto F. Portanto $U_{prim} = 0$ e não há necessidade de blindagem para feixe primário.

Usaremos toda a área como sendo área livre para subestimar a dose. Utilizando a equação 8, sendo que $P = 2 \cdot 10^{-5} Sv/sem(1mSv/ano)$, $W = 10^3 Sv/sem(50000Sv/ano)$, $f_f = 10^{-3}$, $U = 1/7$, $T = 1$ e $D_{fuga} = 5,4m$, temos que

$$B_f(90^\circ) = 4,0824 \cdot 10^{-3}.$$

b) Cálculo da transmissão otimizada pela barreira proveniente da fuga pelo cabeçote a 90°.

Utilizando a equação 25, e sendo que $W_f = 1Sv/sem(1000 * 0,1\%)$, $d = 5,4m$, $N = 3$, $U = 1/7$ e $T = 1$, temos que

$$H_{tot} = 4,899 \cdot 10^{-3} Sv/sem.$$

Utilizando a equação 21, sendo que $A = 5,04m^2(3,15 \times 1,60)$, $C = 500,00US\$/m^3$, $TVL_{mat} 0,279m$, $\alpha = 10000US\$/hom em Sv$, $n = 3 hom em$ e $T_v = 1040sem(52sem \cdot 20anos)$, temos que

$$B_{ot}(90^\circ) = 1,9977 \cdot 10^{-3}.$$

10.1.8.1.2 Cabeçote a 270°

a) Cálculo da transmissão pela barreira proveniente da fuga pelo cabeçote a 270°.

Não há incidência de feixe primário na região do ponto F. Portanto $U_{prim} = 0$ e não há necessidade de blindagem para feixe primário.

Usaremos toda a área como sendo área livre para subestimar a dose. Utilizando a equação 8, sendo que $P = 2 \cdot 10^{-5} Sv/sem(1mSv/ano)$, $W = 10^3 Sv/sem(50000Sv/ano)$, $f_f = 10^{-3}$, $U = 1/7$, $T = 1$ e $D_{fuga} = 3,9m$, temos que

$$B_f(270^\circ) = 2,1294 \cdot 10^{-3}.$$

b) Cálculo da transmissão otimizada pela barreira proveniente da fuga pelo cabeçote a 270°.

Utilizando a equação 25, e sendo que $W_f = 1Sv/sem(1000 * 0,1\%)$, $d = 3,9m$, $N = 3$, $U = 1/7$ e $T = 1$, temos que

$$H_{tot} = 9,39 \cdot 10^{-3} \text{ Sv/sem}.$$

Utilizando a equação 21, sendo que $A = 5,04 \text{ m}^2 (3,15 \times 1,60)$, $C = 500,00 \text{ US\$/m}^3$, $TVL_{mat} = 0,279 \text{ m}$, $\alpha = 10000 \text{ US\$/hom em Sv}$, $n = 3 \text{ hom em}$ e $T_v = 1040 \text{ sem} (52 \text{ sem} \cdot 20 \text{ anos})$, temos que

$$B_{\acute{o}t}(270^\circ) = 1,042 \cdot 10^{-3}.$$

10.1.8.1.3 Cabeçote a 0° e 180°

a) Cálculo da transmissão pela barreira proveniente da fuga pelo cabeçote a 0° e a 180°.

Não há incidência de feixe primário na região do ponto F. Portanto $U_{prim} = 0$ e não há necessidade de blindagem para feixe primário.

Usaremos toda a área como sendo área livre para subestimar a dose. Utilizando a equação 8, sendo que $P = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Sv/sem} (1 \text{ mSv/ano})$, $W = 10^3 \text{ Sv/sem} (50000 \text{ Sv/ano})$, $f_f = 10^{-3}$, $U = 5/7$, $T = 1$ e $D_{fuga} = 4,6 \text{ m}$, temos que

$$B_f(0^\circ \text{ e } 180^\circ) = 5,9248 \cdot 10^{-4}.$$

b) Cálculo da transmissão otimizada pela barreira proveniente da fuga pelo cabeçote a 0° e 180°.

Utilizando a equação 25, e sendo que $W_f = 1 \text{ Sv/sem} (1000 * 0,1\%)$, $d = 4,6 \text{ m}$, $N = 3$, $U = 5/7$ e $T = 1$, temos que

$$H_{tot} = 0,0338 \cdot 10^{-3} \text{ Sv/sem}.$$

Utilizando a equação 21, sendo que $A = 5,04 \text{ m}^2 (3,15 \times 1,60)$, $C = 500,00 \text{ US\$/m}^3$, $TVL_{mat} = 0,279 \text{ m}$, $\alpha = 10000 \text{ US\$/hom em Sv}$, $n = 3 \text{ hom em}$ e $T_v = 1040 \text{ sem} (52 \text{ sem} \cdot 20 \text{ anos})$, temos que

$$B_{\acute{o}t}(0^\circ \text{ e } 180^\circ) = 2,895 \cdot 10^{-4}.$$

10.1.8.1.4 Somando as transmissões provenientes do cabeçote a: 90°, 270°, 0° e 180°.

a) Espessura de concreto necessária para atender a limitação da dose individual para a parede F.

Utilizando a equação 10, sendo que $\frac{1}{B_f(total)} = 2,4024 \cdot 10^{-3}$, temos que

$$n = 3,38.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 0,9430m..

Não nos esqueçamos que para um feixe de 10 MV a componente de radiação espalhada é sempre inferior à de fuga e, portanto, não é necessário calcular aquela contribuição. Para um feixe de 6 MV, deve-se calcular a componente espalhada para a parede mais crítica (em geral o comando) e mostrar que é inferior à radiação de fuga do cabeçote.

b) Espessura otimizada

Utilizando a equação 23, sendo que $\frac{1}{B_{ot}(total)} = 4,9145 \cdot 10^{-3}$, temos que

$$N = 3,69.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 1,0295m.

Conclusão: A espessura que atende o limite de dose individual (94,30 cm) é menor que a otimizada (102,95 cm). Portanto, a parede F, na região do feixe secundário, deve ser construída com espessura 102,95 cm de concreto.

10.1.8.2 Considerando o cabeçote somente a 270° (posição mais crítica para a parede F)

a) Espessura de concreto necessária para atender a limitação da dose individual

Não há incidência de feixe primário na região do ponto F. Portanto $U_{\text{prim}} = 0$ e não há necessidade de blindagem para feixe primário.

Usaremos toda a área como sendo área livre para subestimar a dose. Utilizando a equação 8, sendo que $P = 2.10^{-5} \text{ Sv/sem}(1\text{mSv/ano})$, $W = 10^3 \text{ Sv/sem}(50000\text{Sv/ano})$, $f_f = 10^{-3}$, $U = 1$, $T = 1$ e $D_{\text{fuga}} = 3,9\text{m}$, temos que

$$B_f = 3,042.10^{-4}.$$

Segundo a tabela 5: TVL do concreto (fuga de 90° p/ 6MV) é igual a 0,279m.

Utilizando a equação 10, temos que

$$n = 3,52.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 0,9821m..

Não nos esqueçamos que para um feixe de 10 MV a componente de radiação espalhada é sempre inferior à de fuga e, portanto, não é necessário calcular aquela contribuição. Para um feixe de 6 MV, deve-se calcular a componente espalhada para a parede mais crítica (em geral o comando) e mostrar que é inferior à radiação de fuga do cabeçote.

b) Espessura otimizada

Utilizando a equação 25, e sendo que $W_f = 1\text{Sv/sem}(1000 * 0,1\%)$, $d = 3,9\text{m}$, $N = 3$ e $T = 1$, temos que

$$H_{\text{tot}} = 0,06575\text{Sv/sem}.$$

Utilizando a equação 21, sendo que $A = 5,04m^2 (3,15 \times 1,60)$, $C = 500,00US\$/m^3$, $TVL_{mat} 0,279m$, $\alpha = 10000US\$/homemSv$, $n = 3homem$ e $T_v = 1040sem(52sem \cdot 20anos)$, temos que

$$B_{\acute{o}t} = 1,4885 \cdot 10^{-4}.$$

Utilizando a equação 23, sendo que $B_{\acute{o}t} = 1,4885 \cdot 10^{-4}$, temos que

$$N = 3,83.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 1,0686m.

Conclusão: A espessura que atende o limite de dose individual (98,21 cm) é menor que a otimizada (106,86 cm). Portanto, a parede F, na região do feixe secundário, deve ser construída com espessura 106,86 cm de concreto.

10.1.8.3 Considerando o cabeçote somente a 0°-180°

a) Espessura de concreto necessária para atender a limitação da dose individual.

Não há incidência de feixe primário na região do ponto F. Portanto $U_{prim} = 0$ e não há necessidade de blindagem para feixe primário.

Usaremos toda a área como sendo área livre para subestimar a dose. Utilizando a equação 8, sendo que $P = 2 \cdot 10^{-5} Sv/sem(1mSv/ano)$, $W = 10^3 Sv/sem(50000Sv/ano)$, $f_f = 10^{-3}$, $U = 1$, $T = 1$ e $D_{fuga} = 4,6m$, temos que

$$B_f = 4,232 \cdot 10^{-4}.$$

Segundo a tabela 5: TVL do concreto (fuga de 90° p/ 6MV) é igual a 0,279m.

Utilizando a equação 10, temos que

$$n = 3,37.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 0,9402m.

Não nos esqueçamos que para um feixe de 10 MV a componente de radiação espalhada é sempre inferior à de fuga e, portanto, não é necessário calcular aquela contribuição. Para um feixe de 6 MV, deve-se calcular a componente espalhada para a parede mais crítica (em geral o comando) e mostrar que é inferior à radiação de fuga do cabeçote.

b) Espessura otimizada

Utilizando a equação 25, e sendo que $W_f = 1Sv/sem(1000 * 0,1\%)$, $d = 4,6m$, $N = 3$ e $T = 1$, temos que

$$H_{tot} = 0,04725Sv/sem.$$

Utilizando a equação 21, sendo que $A = 5,04m^2(3,15 \times 1,60)$, $C = 500,00US\$/m^3$, $TVL_{mat} 0,279m$, $\alpha = 10000US\$/hom emSv$, $n = 3 hom em$ e $T_v = 1040sem(52sem \cdot 20anos)$, temos que

$$B_{\acute{o}t} = 2,071.10^{-4}.$$

Utilizando a equação 23, sendo que $B_{\acute{o}t} = 2,071.10^{-4}$, temos que

$$N = 3,68.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 1,0267m.

Conclusão: A espessura que atende o limite de dose individual (94,02 cm) é menor que a otimizada (102,67 cm). Portanto, a parede F, na região do feixe secundário, deve ser construída com espessura 102,67 cm de concreto.

10.1.9 Cálculo do labirinto (parede G – feixe secundário):

a) Espessura de concreto necessária para atender a limitação da dose individual

Não há incidência de feixe primário na região do ponto G. Portanto $U_{\text{prim}} = 0$ e não há necessidade de blindagem para feixe primário.

Usaremos toda a área como sendo área livre para subestimar a dose. Utilizando a equação 8, sendo que $P = 2.10^{-5} \text{ Sv/sem}(1\text{mSv/ano})$, $W = 10^3 \text{ Sv/sem}(50000\text{Sv/ano})$, $f_f = 10^{-3}$, $U = 1$, $T = 1$ e $D_{\text{fuga}} = 3,6\text{m}$, temos que

$$B_f = 2,592.10^{-4} .$$

Segundo a tabela 5: TVL do concreto (fuga de 90° p/ 6MV) é igual a 0,279m.

Utilizando a equação 10, temos que

$$n = 3,59 .$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 1,0016m..

Não nos esqueçamos que para um feixe de 10 MV a componente de radiação espalhada é sempre inferior à de fuga e, portanto, não é necessário calcular aquela contribuição. Para um feixe de 6 MV, deve-se calcular a componente espalhada para a parede mais crítica (em geral o comando) e mostrar que é inferior à radiação de fuga do cabeçote.

b) Espessura otimizada

Utilizando a equação 25, e sendo que $W_f = 1\text{Sv/sem}(1000 * 0,1\%)$, $d = 3,6\text{m}$, $N = 3$ e $T = 1$, temos que

$$H_{\text{tot}} = 0,07716\text{Sv/sem} .$$

Utilizando a equação 21, sendo que $A = 9,45m^2 (3,15 \times 3,00)$, $C = 500,00US\$/m^3$, $TVL_{mat} 0,279m$, $\alpha = 10000US\$/homemSv$, $n = 3homem$ e $T_v = 1040sem (52sem \cdot 20anos)$, temos que

$$B_{\acute{o}t} = 2,378.10^{-4}.$$

Utilizando a equação 23, sendo que $B_{\acute{o}t} = 2,378.10^{-4}$, temos que

$$N = 3,624.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 1,0111m.

Conclusão: A espessura que atende o limite de dose individual (100,16 cm) é menor que a otimizada (101,11 cm). Portanto, a parede G (labirinto), na região do feixe secundário, deve ser construída com espessura 101,11 cm de concreto e com largura de 3,0m.

10.1.10 Cálculo da porta

a) A dose da radiação espalhada para a região da entrada quando o feixe primário atinge a parede A pode ser calculada utilizando a equação 14, sendo que $W_A = 142,86Sv/sem$, $U_A = 1/7$, $A_1 = 0,5476m^2 (0,74 \times 0,74)$, $A_2 = 4,725m^2 (3,15 \times 1,50)$, $d_i = 3,7m$, $d_{r1} = 4,3m$ e $d_{r2} = 3,7m$. Interpolando os valores das curvas da figura 4, temos que $\alpha_1 = 3,78.10^{-3} (\theta_1 = 72,19^\circ)$ e $\alpha_2 = 1,22.10^{-2} (\theta_2 = 54,19^\circ)$. Substituindo os valores na equação 14, temos que

$$E_s = 5,13.10^{-6}.$$

b) A radiação de fuga pelo cabeçote que atinge a parede B experimenta um único espalhamento antes de chegar na entrada do labirinto. Essa radiação é mais energética do que a de duplo espalhamento do feixe primário ou do que a espalhada a partir do paciente. Para feixes primários com energias de 6 a 10 MV pode-se assumir que a energia média dos fótons na entrada do labirinto é 0,3 MeV.

Para o cálculo dessa componente de dose na porta usaremos a equação 15, sendo que $F_0 = 0,001(0,1\%)$, $W_B = 142,86Sv/sem$, $U_B = 1/7$, $A_1 = 7,56m^2(2,4x3,15)$, $d_i = 6,3$ e $d_s = 5,9$. Interpolando os valores das curvas da figura 4, temos que $\alpha_1 = 6,625.10^{-3}(\theta_1 = 41,25^\circ)$. Substituindo os valores na equação 15, temos que

$$E_f = 5,179.10^{-6}.$$

c) A dose da radiação espalhada para a região da entrada, quando o feixe primário atinge o paciente pode ser calculado utilizando a equação 16, sendo que $a = 1,2.10^{-3}$, $W_A = 142,86Sv/sem$, $U_A = 1/7$, $F = 400cm^2(20x20)$, $A_1 = 7,56m^2(2,4x3,15)$, $d_{esp} = 1,0m$, $d_{sec} = 5,7m$ e $d_{r1} = 5,9m$. Interpolando os valores das curvas da figura 4, temos que $\alpha_1 = 4,5.10^{-3}(\theta_1 = 41,25^\circ)$. Substituindo os valores na equação 16, temos que

$$E_p = 5,16.10^{-6}.$$

d) A dose de radiação de fuga na entrada, transmitida pela parede do labirinto será determinada utilizando a equação 17, sendo que $F_0 = 0,001(0,1\%)$, $W_A = 142,86Sv/sem$, $U_A = 1/7$, $B = 2,592.10^{-4}Sv/sem$ e $d'' = 4,4m$. Substituindo os valores na equação 17, temos que

$$F_l = 1,91.10^{-6}.$$

10.1.10.1 Cálculo da dose na entrada da sala

A dose é máxima na entrada da sala quando o campo é máximo (colimador todo aberto), o feixe está dirigido para a parede A e temos um meio espalhador no isocentro (paciente ou fantoma).

Nestas condições, a dose total na porta é dada pela equação 18, sendo que $f = 0,23(6MV)$, $E_s = 5,13.10^{-6}$, $E_f = 5,179.10^{-6}$, $E_p = 5,16.10^{-6}$ e $F_l = 1,91.10^{-6}$, temos que

$$D_C = 1,34.10^{-5}Gy/sem$$

Admitindo-se que o feixe primário é dirigido igualmente para as quatro direções (para baixo, para cima e horizontais esquerda e direita), a dose total na porta será calculando usando a equação 19, sendo que $D_C = 1,34.10^{-5} Gy/sem$, temos que

$$D_T = 3,54.10^{-5} Gy/sem.$$

10.1.10.2 Espessura de blindagem da porta

O fator de transmissão é calculado pela equação 20, sendo que $D_T = 3,54.10^{-5} Gy/sem$ e $P = 2.10^{-5} Sv/sem$, temos que

$$B_{porta} = 0,56.$$

Daqui podemos determinar a espessura da blindagem consultando curvas de transmissão versus espessura de material ou usando valores de TVLs. Utilizando a equação 10, sendo que $B_{porta} = 0,56$, temos que

$$n = 0,25.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para a blindagem dessa porta, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do chumbo (para 0,5MV), que será 3mm.

Conclusão: A porta deve ser construída com espessura 3,0 mm de chumbo.

10.1.11 Parede H – feixe secundário

a) Espessura de concreto necessária para atender a limitação da dose individual:

Não há incidência de feixe primário na região do ponto H. Portanto $U_{prim} = 0$ e não há necessidade de blindagem para feixe primário.

Usaremos toda a área como sendo área livre para subestimar a dose. Utilizando a equação 8, sendo que $P = 2.10^{-5} Sv/sem(1mSv/ano)$, $W = 10^3 Sv/sem(50000Sv/ano)$, $f_f = 10^{-3}$, $U = 1$, $T = 1$ e $D_{fuga} = 6,3m$, temos que

$$B_f = 7,938.10^{-4}.$$

Segundo a tabela 5: TVL do concreto (fuga de 90° p/ 6MV) é igual a 0,279m.

Utilizando a equação 10, temos que

$$n = 3,10.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 0,8649m.

Não nos esqueçamos que para um feixe de 10 MV a componente de radiação espalhada é sempre inferior à de fuga e, portanto, não é necessário calcular aquela contribuição. Para um feixe de 6 MV, deve-se calcular a componente espalhada para a parede mais crítica (em geral o comando) e mostrar que é inferior à radiação de fuga do cabeçote.

b) Espessura otimizada

Utilizando a equação 25, e sendo que $W_f = 1Sv/sem(1000 * 0,1\%)$, $d = 6,3m$, $N = 3$ e $T = 1$, temos que

$$H_{tot} = 0,0252Sv/sem.$$

Utilizando a equação 21, sendo que $A = 18,9m^2(3,15x6,00)$, $C = 500,00US\$/m^3$, $TVL_{mat} 0,279m$, $\alpha = 10000US\$/homemSv$, $n = 3homem$ e $T_v = 1040sem(52sem \cdot 20anos)$, temos que

$$B_{\acute{o}t} = 1,46.10^{-3}.$$

Utilizando a equação 23, sendo que $B_{\acute{o}t} = 1,46.10^{-3}$, temos que

$$N = 2,84.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 0,7924m.

Conclusão: A espessura que atende o limite de dose individual (86,49 cm) é maior que a otimizada (79,24 cm). Portanto, a parede H, na região do feixe secundário, deve ser construída com espessura 86,49 cm de concreto.

10.1.12 Espessuras

Parede A:

- Largura da blindagem primária que blindo o maior campo possível na situação mais crítica de distância é 394 cm de concreto.

A espessura que atende o limite de dose individual é maior que a otimizada.

Tabela 6: Valores referentes à parede A.

$P\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	$W\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	U	T	$d_{prim}(m)$	B_x	Espessura (cm)
$2 \cdot 10^{-5}$	10^3	1/7	1	5,9	$4,874 \cdot 10^{-6}$	185,92

Parede B:

A espessura que atende o limite de dose individual é maior que a otimizada.

Tabela 7: Valores referentes à parede B.

$P\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	$W\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	f_f	T	$d_{fuga}(m)$	B_f	Espessura (cm)
$2 \cdot 10^{-5}$	10^3	10^{-3}	1	3,9	$3,042 \cdot 10^{-4}$	98,21

Parede C:

A espessura que atende o limite de dose individual é maior que a otimizada.

Tabela 8: Valores referentes à parede C.

$P\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	$W\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	f_f	T	$d_{fuga} (m)$	B_f	$Espessura (cm)$
$2 \cdot 10^{-5}$	10^3	10^{-3}	1	5,3	$5,618 \cdot 10^{-4}$	90,68

Parede D:

A espessura que atende o limite de dose individual é menor que a otimizada.

Tabela 9: Valores referentes à parede D.

$A (m^2)$	$C\left(\frac{US\$}{m^3}\right)$	$TVL (m)$	$\alpha\left(\frac{US\$}{m^3}\right)$	$n (h)$	$H_{tot}\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	$T_v (sem)$	B_{ot}	$Espessura (cm)$
6,3	500	0,279	10000	3	0,0816	1040	$1,4992 \cdot 10^{-4}$	106,69

Parede E:

Largura da blindagem primária que blindo o maior campo possível na situação mais crítica de distância é 332 cm de concreto.

A espessura que atende o limite de dose individual é maior que a otimizada.

Tabela 10: Valores referentes à parede E.

$P\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	$W\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	U	T	$d_{prim} (m)$	B_x	$Espessura (cm)$
$2 \cdot 10^{-5}$	10^3	1/7	1	5,5	$4,235 \cdot 10^{-6}$	188,06

Parede F:

A espessura que atende o limite de dose individual é menor que a otimizada.

Tabela 11: Valores referentes à parede F.

$A (m^2)$	$C \left(\frac{US\$}{m^3} \right)$	$TVL (m)$	$\alpha \left(\frac{US\$}{m^3} \right)$	$n (h)$	$H_{tot} \left(\frac{Sv}{sem} \right)$	$T_v (sem)$	B_{ot}	$Espessura (cm)$
5,04	500	0,279	10000	3	0,04725	1040	$2,071 \cdot 10^{-4}$	102,67

Parede G:

A espessura que atende o limite de dose individual é menor que a otimizada.

Tabela 12: Valores referentes à parede G.

$A (m^2)$	$C \left(\frac{US\$}{m^3} \right)$	$TVL (m)$	$\alpha \left(\frac{US\$}{m^3} \right)$	$n (h)$	$H_{tot} \left(\frac{Sv}{sem} \right)$	$T_v (sem)$	B_{ot}	$Espessura (cm)$
9,45	500	0,279	10000	3	0,07716	1040	$2,378 \cdot 10^{-4}$	101,11

Parede H:

A espessura que atende o limite de dose individual é maior que a otimizada.

Tabela 13: Valores referentes à parede H.

$P \left(\frac{Sv}{sem} \right)$	$W \left(\frac{Sv}{sem} \right)$	f_f	T	$d_{fuga} (m)$	B_f	$Espessura (cm)$
$2 \cdot 10^{-5}$	10^3	10^{-3}	1	6,3	$7,938 \cdot 10^{-4}$	86,49

Porta:

A espessura que atende o limite de dose é mostrada na tabela 14.

Tabela 14: Valores referentes à porta.

$P\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	$W\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	B_{porta}	<i>Espessura de chumbo (mm)</i>
$2 \cdot 10^{-5}$	10^3	0,56	3,0

Laje:

Largura da blindagem primária que blindo o maior campo possível na situação mais crítica de distância é 232 cm de concreto.

A espessura que atende o limite de dose individual é maior que a otimizada.

Tabela 15: Valores referentes à laje.

$P\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	$W\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	U	T	$d_{prim} (m)$	B_x	<i>Espessura (cm)</i>
$2 \cdot 10^{-5}$	10^3	2/7	1	3,096	$6,71 \cdot 10^{-7}$	215,95

Parede J:

A espessura que atende o limite de dose individual é maior que a otimizada.

Tabela 16: Valores referentes à parede J.

$P\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	$W\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	f_f	T	$d_{fuga} (m)$	B_f	<i>Espessura (cm)</i>
$2 \cdot 10^{-5}$	10^3	10^{-3}	1	0,53	$5,618 \cdot 10^{-6}$	146,48

10.2 Cálculo de Blindagem

O cálculo de blindagem será refeito, utilizando como base a figura 17 (Esboço feito com os resultados obtidos no cálculo do item 10.1).

10.2.1 Parede C – feixe secundário

a) Espessura de concreto necessária para atender a limitação da dose individual:

Para radiação primária. Não há incidência de feixe primário na região do ponto C. Portanto $U_{\text{prim}} = 0$ e não há necessidade de blindagem para feixe primário.

Usaremos toda a área como sendo área livre para subestimar a dose. Sendo que $P = 2.10^{-5} \text{ Sv/sem}(1\text{mSv/ano})$, $W = 10^3 \text{ Sv/sem}(50000\text{Sv/ano})$, $f_f = 10^{-3}$, $U = 1$, $T = 1$ e $D_{\text{fuga}} = 4,7\text{m}$.

Utilizando a equação 8 e substituindo os valores, temos que

$$B_f = 4,418.10^{-4}.$$

Segundo a tabela 5: TVL do concreto (fuga de 90° p/ 6MV) é igual a 0,279m.

Utilizando a equação 10, temos que

$$n = 3,35.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 0,9347m..

Não nos esqueçamos que para um feixe de 10 MV a componente de radiação espalhada é sempre inferior à de fuga e, portanto, não é necessário calcular aquela contribuição. Para um feixe de 6 MV, deve-se calcular a componente espalhada para a parede mais crítica (em geral o comando) e mostrar que é inferior à radiação de fuga do cabeçote.

b) Espessura otimizada

Utilizando a equação 25, sendo que $W_f = 1\text{Sv/sem}(1000*0,1\%)$, $d = 4,7\text{m}$, $N = 3$ e $T = 1$, temos que

$$H_{\text{tot}} = 0,0453\text{Sv/sem}.$$

Utilizando a equação 21, sendo que $A = 24,26m^2 (3,15 \times 7,7)$, $C = 500,00US\$/m^3$, $TVL_{mat} 0,279m$, $\alpha = 10000US\$/homemSv$, $n = 3homem$ e $T_v = 1040sem(52sem \cdot 20anos)$, temos que

$$B_{\acute{o}t} = 1,04.10^{-3}.$$

Utilizando a equação 23, sendo que $B_{\acute{o}t} = 1,04.10^{-3}$, temos que

$$N = 2,98.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 0,8314m.

Conclusão: A espessura que atende o limite de dose individual (93,47 cm) é maior que a otimizada (83,14 cm). Portanto, a parede C, deve ser construída com espessura de 93,47 cm de concreto.

10.2.2 Parede A - feixe primário

a) Largura da blindagem primária na parede A:

Utilizando a equação 13, sendo que $X = 6,1m$, temos que

$$L = 4,05m.$$

Conclusão (a): A largura da barreira primária que blinda o maior campo possível na situação mais crítica é 405 cm de concreto.

b) Espessura de concreto para atender a limitação da dose individual

Usaremos toda área como sendo área livre para subestimar a proteção.

Utilizando a equação 5, sendo que $P = 2.10^{-5}Sv/sem(1mSv/ano)$, $W = 10^3Sv/sem$, $U = 1/7(Tabela1 - INCA)$, $T = 1$ e $d_{prim} = 6,1m$, temos que

$$B_x = 5,21.10^{-6}.$$

Utilizando a equação 10, sendo que $B_x = 5,21 \cdot 10^{-6}$, temos que

$$n = 5,28.$$

Utilizando a equação 11 e segundo a tabela 4: $TVL_1 (T_1)$ do concreto (radiação primária p/ 6MV) é igual a 0,35m e $TVL_e (T_e)$ do concreto (radiação primária p/ 6MV) é igual a 0,35m, temos que

$$Espessura = 1,8480.$$

c) Espessura otimizada

Utilizando a equação 25, sendo que $W_i = 142,86 Sv / sem$, $d = 6,1m$, $N = 3$, $U = 1/7$ e $T = 1$, temos que

$$H_{tot} = 3,84 Sv / sem.$$

Utilizando a equação 21, sendo que $A = 12,76 m^2 (3,15 \times 4,05)$, $C = 500,00 US\$ / m^3$, $TVL_{mat} 0,279m$, $\alpha = 10000 US\$ / homem Sv$, $n = 3$ homem e $T_v = 1040 sem (52 sem \cdot 20 anos)$, temos que

$$B_{\acute{o}t} = 7,93 \cdot 10^{-6}.$$

Utilizando a equação 23, sendo que $B_{\acute{o}t} = 7,93 \cdot 10^{-6}$, temos que

$$N = 5,10.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (radiação primária para 6 MV), que será 1,7493m.

Conclusão(b): A espessura de concreto que atende o limite de dose individual (184,80 cm) é maior do que a espessura calculada por otimização (174,93 cm). Portanto, a parede A, na região primária, deve ter espessura 184,80 cm de concreto.

Conclusão final: Na região do feixe primário da parede A teremos um cinturão de concreto com 184,80 cm de espessura, 405 cm de largura (202,5 cm de cada lado do plano vertical do isocentro) e 315 cm de altura.

10.2.3 Parede B – feixe secundário

a) Espessura de concreto necessária para atender a limitação da dose individual:

Para radiação primária. Não há incidência de feixe primário na região do ponto B. Portanto $U_{\text{prim}} = 0$ e não há necessidade de blindagem para feixe primário.

Usaremos toda a área como sendo área livre para subestimar a dose. Utilizando a equação 8, sendo que $P = 2.10^{-5} Sv/sem(1mSv/ano)$, $W = 10^3 Sv/sem(50000Sv/ano)$, $f_f = 10^{-3}$, $U = 1$, $T = 1$ e $D_{\text{fuga}} = 4,1m$, temos que

$$B_f = 3,362.10^{-4}.$$

Segundo a tabela 5: TVL do concreto (fuga de 90° p/ 6MV) é igual a 0,279m.

Utilizando a equação 10, temos que

$$n = 3,47.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 0,9681m..

Não nos esqueçamos que para um feixe de 10 MV a componente de radiação espalhada é sempre inferior à de fuga e, portanto, não é necessário calcular aquela contribuição. Para um feixe de 6 MV, deve-se calcular a componente espalhada para a parede mais crítica (em geral o comando) e mostrar que é inferior à radiação de fuga do cabeçote.

b) Espessura otimizada

Utilizando a equação 25, e sendo que $W_f = 1Sv/sem(1000*0,1\%)$, $d = 4,1m$, $N = 3$ e $T = 1$, temos que

$$H_{tot} = 0,059 Sv / sem .$$

Utilizando a equação 21, sendo que $A = 16,38 m^2 (3,15 \times 5,2)$, $C = 500,00 US\$ / m^3$, $TVL_{mat} = 0,279 m$, $\alpha = 10000 US\$ / hom em Sv$, $n = 3 hom em$ e $T_v = 1040 sem (52 sem \cdot 20 anos)$, temos que

$$B_{\acute{o}t} = 5,391 \cdot 10^{-4} .$$

Utilizando a equação 23, sendo que $B_{\acute{o}t} = 5,391 \cdot 10^{-4}$, temos que

$$N = 3,27 .$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 0,9123m.

Conclusão: A espessura que atende o limite de dose individual (96,81 cm) é maior que a otimizada (91,23 cm). Portanto, a parede B, na região do feixe secundário, deve ser construída com espessura 96,81 cm de concreto.

10.2.4 Parede I (teto) – feixe primário

a) Largura da blindagem primária na parede I:

Utilizando a equação 13, sendo que $X = 3,096 m$, temos que

$$L = 2,32 m .$$

Conclusão (a): A largura da barreira primária que blindo o maior campo possível na situação mais crítica é 232 cm de concreto.

b) Espessura de concreto para atender a limitação da dose individual

Usaremos toda área como sendo área livre para subestimar a proteção.

Utilizando a equação 5, sendo que $P = 2 \cdot 10^{-5} Sv / sem (1 mSv / ano)$, $W = 10^3 Sv / sem$, $U = 2 / 7 (Tabela 1 - INCA)$, $T = 1$ e $d_{prim} = 3,096 m$, temos que

$$B_x = 6,71 \cdot 10^{-7}.$$

Utilizando a equação 10, sendo que $B_x = 6,71 \cdot 10^{-7}$, temos que

$$n = 6,17.$$

Utilizando a equação 11 e segundo a tabela 4: T_{V1} (T_1) do concreto (radiação primária p/ 6MV) é igual a 0,35m e T_{Ve} (T_e) do concreto (radiação primária p/ 6MV) é igual a 0,35m, temos que

$$Espessura = 2,1595m.$$

c) Espessura otimizada

Utilizando a equação 25, sendo que $W_t = 285,72Sv/sem$, $d = 3,096m$, $N = 3$, $U = 2/7$ e $T = 1$, temos que

$$H_{tot} = 29,8Sv/sem.$$

Utilizando a equação 21, sendo que $A = 12,76m^2(2,32 \times 5,5)$, $C = 500,00US\$/m^3$, $T_{V_{mat}} = 0,343m(tabela5)$, $\alpha = 10000US\$/homemSv$, $n = 3homem$ e $T_v = 1040sem(52sem \cdot 20anos)$, temos que

$$B_{\acute{o}t} = 1,0210^{-6}.$$

Utilizando a equação 23, sendo que $B_{\acute{o}t} = 1,0210^{-6}$, temos que

$$N = 5,99.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (radiação primária para 6 MV), que será 2,0546m.

Conclusão(b) : A espessura de concreto que atende o limite de dose individual (215,95 cm) é maior do que a espessura calculada por otimização (205,46 cm). Portanto, a parede I na região primária deve ter espessura 215,95 cm de concreto.

Conclusão final: Na região do feixe primário da parede I teremos um cinturão de concreto com 215,95 cm de espessura, 232 cm de largura (116 cm de cada lado do plano vertical do isocentro) e 5,5 cm de comprimento.

10.2.5 Parede J (teto) - feixe secundário

a) Espessura de concreto necessária para atender a limitação da dose individual:

Não há incidência de feixe primário na região do ponto J. Portanto $U_{\text{prim}} = 0$ e não há necessidade de blindagem para feixe primário.

Usaremos toda a área como sendo área livre para subestimar a dose. Utilizando a equação 8, sendo que $P = 2.10^{-5} \text{ Sv/sem}(1\text{mSv/ano})$, $W = 10^3 \text{ Sv/sem}(50000\text{Sv/ano})$, $f_f = 10^{-3}$, $U = 1$, $T = 1$ e $D_{\text{fuga}} = 0,53\text{m}$, temos que

$$B_f = 5,618.10^{-6}.$$

Segundo a tabela 5: TVL do concreto (fuga de 90° p/ 6MV) é igual a 0,279m.

Utilizando a equação 10, temos que

$$n = 5,25.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 1,468m..

Não nos esqueçamos que para um feixe de 10 MV a componente de radiação espalhada é sempre inferior à de fuga e, portanto, não é necessário calcular aquela contribuição. Para um feixe de 6 MV, deve-se calcular a componente espalhada para a parede mais crítica (em geral o comando) e mostrar que é inferior à radiação de fuga do cabeçote.

b) Espessura otimizada

Utilizando a equação 25, e sendo que $W_f = 1Sv/sem(1000 * 0,1\%)$, $d = 0,53m$, $N = 3$ e $T = 1$, temos que

$$H_{tot} = 3,56Sv/sem.$$

Utilizando a equação 21, sendo que $A = 49,90m^2(6,48x7,7)$, $C = 500,00US\$/m^3$, $TVL_{mat} 0,279m$, $\alpha = 10000US\$/homemSv$, $n = 3homem$ e $T_v = 1040sem(52sem \cdot 20anos)$, temos que

$$B_{\acute{o}t} = 2,72.10^{-5}.$$

Utilizando a equação 23, sendo que $B_{\acute{o}t} = 2,72.10^{-5}$, temos que

$$N = 4,57.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 1,2750m.

Conclusão: A espessura que atende o limite de dose individual (146,48 cm) é maior que a otimizada (127,50 cm). Portanto, a parede J, na região do feixe secundário, deve ser construída com espessura 146,48 cm de concreto.

10.2.6 Parede D - feixe secundário

a) Espessura de concreto necessária para atender a limitação da dose individual:

Não há incidência de feixe primário na região do ponto D. Portanto $U_{prim} = 0$ e não há necessidade de blindagem para feixe primário.

Usaremos toda a área como sendo área livre para subestimar a dose. Utilizando a equação 8, sendo que $P = 2.10^{-5}Sv/sem(1mSv/ano)$, $W = 10^3Sv/sem(50000Sv/ano)$, $f_f = 10^{-3}$, $U = 1$, $T = 1$ e $D_{fuga} = 4,1m$, temos que

$$B_f = 3,362.10^{-4}.$$

Segundo a tabela 5: TVL do concreto (fuga de 90° p/ 6MV) é igual a 0,279m.

Utilizando a equação 10, temos que

$$n = 3,47 .$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 0,9681m..

Não nos esqueçamos que para um feixe de 10 MV a componente de radiação espalhada é sempre inferior à de fuga e, portanto, não é necessário calcular aquela contribuição. Para um feixe de 6 MV, deve-se calcular a componente espalhada para a parede mais crítica (em geral o comando) e mostrar que é inferior à radiação de fuga do cabeçote.

b) Espessura otimizada

Utilizando a equação 25, e sendo que $W_f = 1Sv/sem(1000*0,1\%)$, $d = 4,1m$, $N = 3$ e $T = 1$, temos que

$$H_{tot} = 0,0595Sv/sem .$$

Utilizando a equação 21, sendo que $A = 5,355m^2(3,15x1,70)$, $C = 500,00US\$/m^3$, $TVL_{mat} 0,279m$, $\alpha = 10000US\$/homemSv$, $n = 3homem$ e $T_v = 1040sem(52sem \cdot 20anos)$, temos que

$$B_{ót} = 1,748.10^{-4} .$$

Utilizando a equação 23, sendo que $B_{ót} = 1,748.10^{-4}$, temos que

$$N = 3,76 .$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 1,0490m.

Conclusão: A espessura que atende o limite de dose individual (96,81 cm) é menor que a otimizada (104,90 cm). Portanto, a parede D, na região do feixe secundário, deve ser construída com espessura 104,90 cm de concreto.

10.2.7 Parede E - feixe primário

a) Largura da blindagem primária na parede E:

Utilizando a equação 13, sendo que $X = 6,1$ m, temos que

$$L = 4,05m .$$

Conclusão (a): A largura da barreira primária que blinda o maior campo possível na situação mais crítica é 405 cm de concreto.

b) Espessura de concreto para atender a limitação da dose individual

Usaremos toda área como sendo área livre para subestimar a proteção.

Utilizando a equação 5, sendo que $P = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Sv/sem}(1mSv/ano)$, $W = 10^3 \text{ Sv/sem}$, $U = 1/7(\text{Tabela1} - \text{INCA})$, $T = 1$ e $d_{prim} = 6,1m$, temos que

$$B_x = 5,21 \cdot 10^{-6} .$$

Utilizando a equação 10, sendo que $B_x = 5,21 \cdot 10^{-6}$, temos que

$$n = 5,28 .$$

Utilizando a equação 11 e segundo a tabela 4: $TVL_1 (T_1)$ do concreto (radiação primária p/ 6MV) é igual a 0,35m e $TVL_e (T_e)$ do concreto (radiação primária p/ 6MV) é igual a 0,35m, temos que

$$Espessura = 1,848m .$$

c) Espessura otimizada

Utilizando a equação 25, sendo que $W_i = 142,86Sv/sem$, $d = 6,1m$, $N = 3$, $U = 1/7$ e $T = 1$, temos que

$$H_{tot} = 3,839Sv/sem.$$

Utilizando a equação 21, sendo que $A = 12,758m^2 (3,15 \times 4,05)$, $C = 500,00US\$/m^3$, $TVL_{mat} = 0,343m$ (tabela 5), $\alpha = 10000US\$/homemSv$, $n = 3$ homens e $T_v = 1040sem (52sem \cdot 20anos)$, temos que

$$B_{\acute{o}t} = 7,93 \cdot 10^{-6}.$$

Utilizando a equação 23, sendo que $B_{\acute{o}t} = 7,93 \cdot 10^{-6}$, temos que

$$N = 5,10.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (radiação primária para 6 MV), que será 1,7493m.

Conclusão(b): A espessura de concreto que atende o limite de dose individual (184,80 cm) é maior do que a espessura calculada por otimização (174,93 cm). Portanto, a parede E, na região primária, deve ter espessura 184,80 cm de concreto.

Conclusão final: Na região do feixe primário da parede E teremos um cinturão de concreto com 184,80 cm de espessura, 405 cm de largura (202,5 cm de cada lado do plano vertical do isocentro) e 315 cm de altura.

10.2.8 Parede F - feixe secundário

10.2.8.1 Considerando o cabeçote somente a 270° (posição mais crítica para a parede F)

a) Espessura de concreto necessária para atender a limitação da dose individual

Não há incidência de feixe primário na região do ponto F. Portanto $U_{\text{prim}} = 0$ e não há necessidade de blindagem para feixe primário.

Usaremos toda a área como sendo área livre para subestimar a dose. Utilizando a equação 8, sendo que $P = 2.10^{-5} Sv/sem(1mSv/ano)$, $W = 10^3 Sv/sem(50000Sv/ano)$, $f_f = 10^{-3}$, $U = 1$, $T = 1$ e $D_{\text{fuga}} = 4,5m$, temos que

$$B_f = 4,05.10^{-4}.$$

Segundo a tabela 5: TVL do concreto (fuga de 90° p/ 6MV) é igual a 0,279m.

Utilizando a equação 10, temos que

$$n = 3,39.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 0,9458m..

Não nos esqueçamos que para um feixe de 10 MV a componente de radiação espalhada é sempre inferior à de fuga e, portanto, não é necessário calcular aquela contribuição. Para um feixe de 6 MV, deve-se calcular a componente espalhada para a parede mais crítica (em geral o comando) e mostrar que é inferior à radiação de fuga do cabeçote.

b) Espessura otimizada

Utilizando a equação 25, e sendo que $W_f = 1Sv/sem(1000*0,1\%)$, $d = 4,5m$, $N = 3$ e $T = 1$, temos que

$$H_{\text{tot}} = 0,0494Sv/sem.$$

Utilizando a equação 21, sendo que $A = 4,095m^2(3,15 \times 1,30)$, $C = 500,00US\$/m^3$, $T_{VL_{mat}} = 0,279m$, $\alpha = 10000US\$/homemSv$, $n = 3homem$ e $T_v = 1040sem(52sem \cdot 20anos)$, temos que

$$B_{\acute{o}t} = 1,61 \cdot 10^{-4}.$$

Utilizando a equação 23, sendo que $B_{\acute{o}t} = 1,61 \cdot 10^{-4}$, temos que

$$N = 3,79.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 1,0574m.

Conclusão: A espessura que atende o limite de dose individual (94,58 cm) é menor que a otimizada (105,74 cm). Portanto, a parede F, na região do feixe secundário, deve ser construída com espessura 105,74 cm de concreto.

10.2.9 Cálculo do Labirinto (Parede G – feixe secundário):

a) Espessura de concreto necessária para atender a limitação da dose individual

Não há incidência de feixe primário na região do ponto G. Portanto $U_{prim} = 0$ e não há necessidade de blindagem para feixe primário.

Usaremos toda a área como sendo área livre para subestimar a dose. Utilizando a equação 8, sendo que $P = 2 \cdot 10^{-5} Sv/sem(1mSv/ano)$, $W = 10^3 Sv/sem(50000Sv/ano)$, $f_f = 10^{-3}$, $U = 1$, $T = 1$ e $D_{fuga} = 4,0m$, temos que

$$B_f = 3,2 \cdot 10^{-4}.$$

Segundo a tabela 5: TVL do concreto (fuga de 90° p/ 6MV) é igual a 0,279m.

Utilizando a equação 10, temos que

$$n = 3,49.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 0,9737m..

Não nos esqueçamos que para um feixe de 10 MV a componente de radiação espalhada é sempre inferior à de fuga e, portanto, não é necessário calcular aquela contribuição. Para um feixe de 6 MV, deve-se calcular a componente espalhada para a parede mais crítica (em geral o comando) e mostrar que é inferior à radiação de fuga do cabeçote.

b) Espessura otimizada

Utilizando a equação 25, e sendo que $W_f = 1Sv/sem(1000 * 0,1\%)$, $d = 4,0m$, $N = 3$ e $T = 1$, temos que

$$H_{tot} = 0,0625Sv/sem.$$

Utilizando a equação 21, sendo que $A = 11,655m^2(3,15 \times 3,70)$, $C = 500,00US\$/m^3$, $TVL_{mat} 0,279m$, $\alpha = 10000US\$/homemSv$, $n = 3homem$ e $T_v = 1040sem(52sem \cdot 20anos)$, temos que

$$B_{ót} = 3,62 \cdot 10^{-4}.$$

Utilizando a equação 23, sendo que $B_{ót} = 3,62 \cdot 10^{-4}$, temos que

$$N = 3,44.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 0,9598m.

Conclusão: A espessura que atende o limite de dose individual (97,37 cm) é maior que a otimizada (95,98 cm). Portanto, a parede G (labirinto), na região do feixe secundário, deve ser construída com espessura 97,37 cm de concreto e com largura de 3,7m.

10.2.10 Cálculo da porta

a) A dose da radiação espalhada para a região da entrada quando o feixe primário atinge a parede A pode ser calculada utilizando a equação 14, sendo que $W_A = 250\text{Sv/sem}$, $U_A = 1/4$, $A_1 = 0,5476\text{m}^2 (0,74 \times 0,74)$, $A_2 = 4,725\text{m}^2 (3,15 \times 1,50)$, $d_i = 3,8\text{m}$, $d_{r1} = 4,4\text{m}$ e $d_{r2} = 3,7\text{m}$. Interpolando os valores das curvas da figura 4, temos que $\alpha_1 = 3,78 \cdot 10^{-3} (\theta_1 = 72,19^\circ)$ e $\alpha_2 = 3,61 \cdot 10^{-2} (\theta_2 = 19,69^\circ)$. Substituindo os valores na equação 14, temos que

$$E_s = 2,31 \cdot 10^{-5}.$$

b) A radiação de fuga pelo cabeçote que atinge a parede B experimenta um único espalhamento antes de chegar na entrada do labirinto. Essa radiação é mais energética do que a de duplo espalhamento do feixe primário ou do que a espalhada a partir do paciente.

Para feixes primários com energias de 6 a 10 MV pode-se assumir que a energia média dos fótons na entrada do labirinto é 0,3 MeV.

Para o cálculo dessa componente de dose na porta usaremos a equação 15, sendo que $F_0 = 0,001 (0,1\%)$, $W_B = 250\text{Sv/sem}$, $U_B = 1/4$, $A_1 = 7,56\text{m}^2 (2,4 \times 3,15)$, $d_i = 6,3$ e $d_s = 5,9$. Interpolando os valores das curvas da figura 4, temos que $\alpha_1 = 6,625 \cdot 10^{-3} (\theta_1 = 41,25^\circ)$. Substituindo os valores na equação 15, temos que

$$E_f = 9,06 \cdot 10^{-6}.$$

b) A dose da radiação espalhada para a região da entrada, quando o feixe primário atinge o paciente pode ser calculado utilizando a equação 16, sendo que $a = 1,2 \cdot 10^{-3}$, $W_A = 250\text{Sv/sem}$, $U_A = 1/4$, $F = 400\text{cm}^2 (20 \times 20)$, $A_1 = 7,56\text{m}^2 (2,4 \times 3,15)$, $d_{esp} = 1,0\text{m}$, $d_{sec} = 5,7\text{m}$ e $d_{r1} = 5,9\text{m}$. Interpolando os valores das curvas da figura 4, temos que $\alpha_1 = 4,5 \cdot 10^{-3} (\theta_1 = 41,25^\circ)$. Substituindo os valores na equação 16, temos que

$$E_p = 9,02 \cdot 10^{-6}.$$

c) A dose de radiação de fuga na entrada, transmitida pela parede do labirinto será determinada utilizando a equação 17, sendo que $F_0 = 0,001(0,1\%)$, $W_A = 250Sv/sem$, $U_A = 1/4$, $B = 2,592.10^{-4} Sv/sem$ e $d'' = 4,4m$. Substituindo os valores na equação 17, temos que

$$F_l = 3,35.10^{-6} .$$

10.2.10.1 Cálculo da dose na entrada da sala

A dose é máxima na entrada da sala quando o campo é máximo (colimador todo aberto), o feixe está dirigido para a parede A e temos um meio espalhador no isocentro (paciente ou fantoma).

Nestas condições, a dose total na porta é dada pela equação 18, sendo que $f = 0,23(6MV)$, $E_s = 2,31.10^{-5}$, $E_f = 9,06.10^{-6}$, $E_p = 9,02.10^{-6}$ e $F_l = 3,35.10^{-6}$, temos que

$$D_C = 2,67.10^{-5} Gy/sem$$

Admitindo-se que o feixe primário é dirigido igualmente para as quatro direções (para baixo, para cima e horizontais esquerda e direita), a dose total na porta será calculando usando a equação 19, sendo que $D_C = 2,67.10^{-5} Gy/sem$, temos que

$$D_T = 7,05.10^{-5} Gy/sem .$$

10.2.10.2 Espessura de blindagem da porta

O fator de transmissão é calculado pela equação 20, sendo que $D_T = 7,05.10^{-5} Gy/sem$ e $P = 2.10^{-5} Sv/sem$, temos que

$$B_{porta} = 0,28 .$$

Daqui podemos determinar a espessura da blindagem consultando curvas de transmissão versus espessura de material ou usando valores de TVLs. Utilizando a equação 10, sendo que $B_{porta} = 0,28$, temos que

$$n = 0,55 .$$

Para encontrarmos a espessura necessária para a blindagem dessa porta, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do chumbo (para 0,5MV), que será 6,55mm.

Conclusão: A porta deve ser construída com espessura 6,55 mm de chumbo.

10.2.11 Parede H – feixe secundário

a) Espessura de concreto necessária para atender a limitação da dose individual:

Não há incidência de feixe primário na região do ponto H. Portanto $U_{\text{prim}} = 0$ e não há necessidade de blindagem para feixe primário.

Usaremos toda a área como sendo área livre para subestimar a dose. Utilizando a equação 8, sendo que $P = 2.10^{-5} Sv/sem(1mSv/ano)$, $W = 10^3 Sv/sem(50000Sv/ano)$, $f_f = 10^{-3}$, $U = 1$, $T = 1$ e $D_{\text{fuga}} = 6,4m$, temos que

$$B_f = 8,192.10^{-4} .$$

Segundo a tabela 5: TVL do concreto (fuga de 90° p/ 6MV) é igual a 0,279m.

Utilizando a equação 10, temos que

$$n = 3,09 .$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 0,8621m.

Não nos esqueçamos que para um feixe de 10 MV a componente de radiação espalhada é sempre inferior à de fuga e, portanto, não é necessário calcular aquela contribuição. Para um feixe de 6 MV, deve-se calcular a componente espalhada para a parede mais crítica (em geral o comando) e mostrar que é inferior à radiação de fuga do cabeçote.

b) Espessura otimizada

Utilizando a equação 25, e sendo que $W_f = 1Sv/sem(1000 * 0,1\%)$, $d = 6,4m$, $N = 3$ e $T = 1$, temos que

$$H_{tot} = 0,0244Sv/sem.$$

Utilizando a equação 21, sendo que $A = 21,42m^2(3,15x6,8)$, $C = 500,00US\$/m^3$, $TVL_{mat} 0,279m$, $\alpha = 10000US\$/homemSv$, $n = 3homem$ e $T_v = 1040sem(52sem \cdot 20anos)$, temos que

$$B_{ot} = 1,71.10^{-3}.$$

Utilizando a equação 23, sendo que $B_{ot} = 1,71.10^{-3}$, temos que

$$N = 2,77.$$

Para encontrarmos a espessura necessária para essa barreira, basta multiplicarmos o n (número de TVL) pelo valor de TVL do concreto (fuga de 90° para 6 MV), que será 0,7728m.

Conclusão: A espessura que atende o limite de dose individual (86,21 cm) é maior que a otimizada (77,28 cm). Portanto, a parede H, na região do feixe secundário, deve ser construída com espessura 86,21 cm de concreto.

10.2.12 Espessuras

Parede A:

- Largura da blindagem primária que blinda o maior campo possível na situação mais crítica de distância é 394 cm de concreto.

A espessura que atende o limite de dose individual é maior que a otimizada.

Tabela 17: Valores referentes à parede A.

$P\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	$W\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	U	T	$d_{prim}(m)$	B_x	$Espessura (cm)$
$2 \cdot 10^{-5}$	10^3	1/7	1	6,1	$5,21 \cdot 10^{-6}$	184,80

Parede B:

A espessura que atende o limite de dose individual é maior que a otimizada.

Tabela 18: Valores referentes à parede B.

$P\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	$W\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	f_f	T	$d_{fuga}(m)$	B_f	$Espessura (cm)$
$2 \cdot 10^{-5}$	10^3	10^{-3}	1	4,1	$3,362 \cdot 10^{-4}$	96,81

Parede C:

A espessura que atende o limite de dose individual é maior que a otimizada.

Tabela 19: Valores referentes à parede C.

$P\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	$W\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	f_f	T	$d_{fuga}(m)$	B_f	$Espessura (cm)$
$2 \cdot 10^{-5}$	10^3	10^{-3}	1	4,7	$4,418 \cdot 10^{-4}$	93,47

Parede D:

A espessura que atende o limite de dose individual é menor que a otimizada.

Tabela 20: Valores referentes à parede D.

$A (m^2)$	$C \left(\frac{US\$}{m^3} \right)$	$TVL (m)$	$\alpha \left(\frac{US\$}{m^3} \right)$	$n (h)$	$H_{tot} \left(\frac{Sv}{sem} \right)$	$T_v (sem)$	$B_{ót}$	$Espessura (cm)$
5,355	500	0,279	10000	3	0,0595	1040	$1,748 \cdot 10^{-4}$	104,90

Parede E:

Largura da blindagem primária que blinda o maior campo possível na situação mais crítica de distância é 405 cm de concreto.

A espessura que atende o limite de dose individual é maior que a otimizada.

Tabela 21: Valores referentes à parede E.

$P \left(\frac{Sv}{sem} \right)$	$W \left(\frac{Sv}{sem} \right)$	U	T	$d_{prim} (m)$	B_x	$Espessura (cm)$
$2 \cdot 10^{-5}$	10^3	1/7	1	6,6	$5,21 \cdot 10^{-6}$	184,80

Parede F:

A espessura que atende o limite de dose individual é menor que a otimizada.

Tabela 22: Valores referentes à parede F.

$A (m^2)$	$C \left(\frac{US\$}{m^3} \right)$	$TVL (m)$	$\alpha \left(\frac{US\$}{m^3} \right)$	$n (h)$	$H_{tot} \left(\frac{Sv}{sem} \right)$	$T_v (sem)$	$B_{ót}$	$Espessura (cm)$
4,095	500	0,279	10000	3	0,0494	1040	$1,61 \cdot 10^{-4}$	105,74

Parede G:

A espessura que atende o limite de dose individual é maior que a otimizada.

Tabela 23: Valores referentes à parede G.

$P\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	$W\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	f_f	T	$d_{fuga} (m)$	B_f	Espessura (cm)
$2 \cdot 10^{-5}$	10^3	10^{-3}	1	4,0	$3,2 \cdot 10^{-4}$	97,37

Parede H:

A espessura que atende o limite de dose individual é maior que a otimizada.

Tabela 24: Valores referentes à parede H.

$P\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	$W\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	f_f	T	$d_{fuga} (m)$	B_f	Espessura (cm)
$2 \cdot 10^{-5}$	10^3	10^{-3}	1	6,4	$8,192 \cdot 10^{-4}$	86,21

Porta:

A espessura que atende o limite de dose é mostrada na tabela 25.

Tabela 25: Valores referentes à porta.

$P\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	$W\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	B_{porta}	Espessura de chumbo (mm)
$2 \cdot 10^{-5}$	10^3	$2,592 \cdot 10^{-4}$	6,55

Laje:

Largura da blindagem primária que blindo o maior campo possível na situação mais crítica de distância é 232 cm de concreto.

A espessura que atende o limite de dose individual é maior que a otimizada.

Tabela 26: Valores referentes à laje.

$P\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	$W\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	U	T	$d_{prim}(m)$	B_x	Espessura (cm)
$2 \cdot 10^{-5}$	10^3	2/7	1	3,096	$6,71 \cdot 10^{-7}$	215,95

Parede J:

A espessura que atende o limite de dose individual é maior que a otimizada.

Tabela 27: Valores referentes à parede J.

$P\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	$W\left(\frac{Sv}{sem}\right)$	f_f	T	$d_{fuga}(m)$	B_f	Espessura (cm)
$2 \cdot 10^{-5}$	10^3	10^{-3}	1	0,53	$5,618 \cdot 10^{-6}$	146,48

11 PRÁTICA DO LEVANTAMENTO RADIOMÉTRICO DE ÁREA REALIZADO NO INSTUTO DE RADIOTERAPIA DO VALE DO PARAÍBA

11.1.1 Acelerador de 4 MV (Varian Clinac);

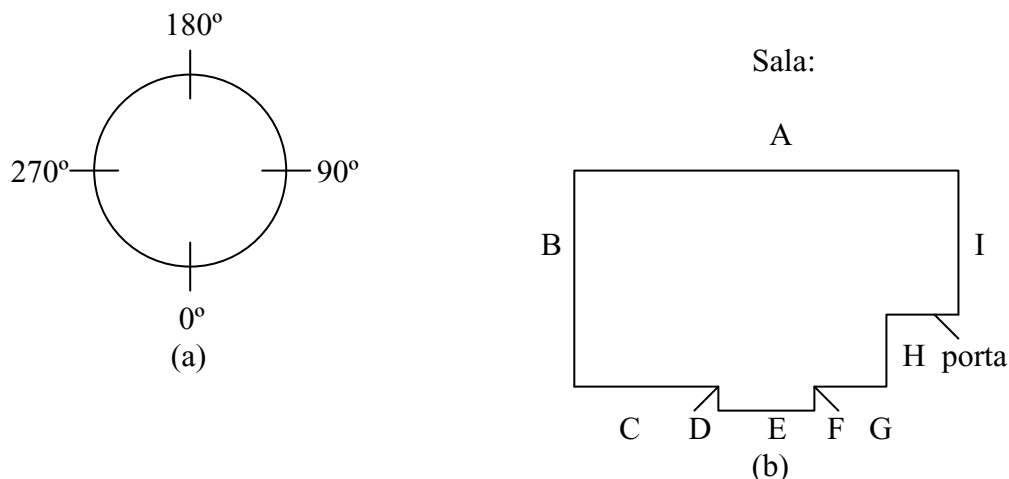


Figura 8: (a) Ilustração dos ângulos utilizados . (b) Ilustração da sala do acelerador de 4 MeV e das paredes avaliadas.

Tabela 28: Dados medidos no levantamento radiométrico do acelerador de 4 MV a 90°.

90°	
Parede A	BG
Parede B	BG
Parede C	BG
Parede D	BG
Parede E	3.2mR/h
Parede F	BG
Parede G	BG
Parede H	BG
Parede I	BG
Porta	2.9mR/h

Tabela 29: Dados medidos no levantamento radiométrico do acelerador de 4 MV a 0°.

0°	
Parede A	BG
Parede B	BG
Parede C	BG
Parede D	BG
Parede E	BG
Parede F	BG
Parede G	BG
Parede H	BG
Parede I	BG
Porta	2.9mR/h
Teto	14mR/h

Tabela 30: Dados medidos no levantamento radiométrico do acelerador de 4 MV a 270°.

270°	
Parede A	BG
Parede B	BG
Parede C	3.1mR/h
Parede D	BG
Parede E	BG
Parede F	BG
Parede G	BG
Parede H	BG
Parede I	BG
Porta	3.2mR/h

Tabela 31: Dados medidos no levantamento radiométrico do acelerador de 4 MV a 180°.

180°	
Parede A	BG
Parede B	BG
Parede C	BG
Parede D	BG
Parede E	BG
Parede F	BG
Parede G	BG
Parede H	BG
Parede I	BG
Porta	3.1mR/h

Sendo que $BG=2,5\text{mR/h}$, $P = 95 \text{ Kpa}$, $T = 25,0^\circ\text{C}$, $t_{\text{beam-on}} = 10\text{h}$, $T=0,25$, $U=0,29$ (0°), $U=0,14$ (90°), $U=0,43$ (180°) e $U=0,14$ (270°).

Temos que, o fator temperatura e pressão ($f(T, P)$) é 1,081.

Utilizando a equação 26, calculamos a dose equivalente média semanal para cada parede em cada angulação do gantry,

$$D_{\text{semanal}} = T \cdot t_{\text{beam-on}} \cdot U \cdot \left(\frac{(L - BG) \cdot 8,76}{f(T, P)} \right), \quad (26)$$

em que D_{semanal} é a dose equivalente média em mR para cada parede em cada angulação do gantry, T é o fator ocupacional, U é o fator uso, L é a leitura obtida em mR/h, BG é o Background em mR/h e $f(T, P)$ é o fator temperatura e pressão.

A dose equivalente média semanal (total para cada parede) é dada por

$$D_{\text{semanal-tot}} = (D_{\text{semanal}}^{0^\circ} + D_{\text{semanal}}^{90^\circ} + D_{\text{semanal}}^{180^\circ} + D_{\text{semanal}}^{270^\circ}), \quad (27)$$

em que $D_{\text{semanal}}^{0^\circ}$ é a dose equivalente média para o gantry em 0° , $D_{\text{semanal}}^{90^\circ}$ é a dose equivalente média para o gantry em 90° , $D_{\text{semanal}}^{180^\circ}$ é a dose equivalente média para o gantry em 180° e $D_{\text{semanal}}^{270^\circ}$ é a dose equivalente média para o gantry em 270° .

Utilizando a equação 27, obtemos os seguintes resultados: $D_{\text{semanal-tot}}$ (porta) = 10.73mR, $D_{\text{semanal-tot}}$ (parede A) = BG, $D_{\text{semanal-tot}}$ (parede B) = BG, $D_{\text{semanal-tot}}$ (parede C) = 1.71mR, $D_{\text{semanal-tot}}$ (parede D) = BG, $D_{\text{semanal-tot}}$ (parede E) = 1.98mR, $D_{\text{semanal-tot}}$ (parede F) = BG, $D_{\text{semanal-tot}}$ (parede G) = BG, $D_{\text{semanal-tot}}$ (parede H) = BG e $D_{\text{semanal-tot}}$ (parede I) = BG.

Sendo a dose semanal total, a soma de todas as paredes, temos que a dose semanal total é 14.41mR.

Conclusão: dose satisfatória, área livre até 20mR é considerado satisfatório.

11.1.2 Acelerador de 6 MV (Siemens Internacional Mevatron MXE)

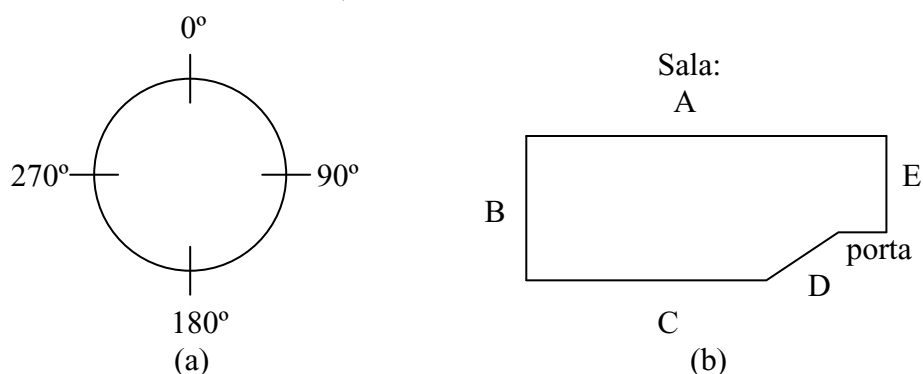


Figura 9: (a) Ilustração dos ângulos utilizados . (b) Ilustração da sala do acelerador de 6 MeV e das paredes avaliadas.

Tabela 32: Dados medidos no levantamento radiométrico do acelerador de 6 MV a 0°.

0°	
Parede A	BG
Parede B	BG
Parede C	BG
Parede D	BG
Parede E	BG
Porta	BG

Tabela 33: Dados medidos no levantamento radiométrico do acelerador de 6 MV a 90°.

90°	
Parede A	BG
Parede B	BG
Parede C	BG
Parede D	BG
Parede E	BG
Porta	BG

Tabela 34: Dados medidos no levantamento radiométrico do acelerador de 6 MV a 270°.

270°	
Parede A	BG
Parede B	BG
Parede C	BG
Parede D	BG
Parede E	BG
Porta	BG

Tabela 35: Dados medidos no levantamento radiométrico do acelerador de 6 MV a 180°.

180°	
Parede A	BG
Parede B	BG
Parede C	BG
Parede D	BG
Parede E	BG
Porta	BG

Conclusão: Dose satisfatória.

11.1.3 Bomba de cobalto (Theratron 80);

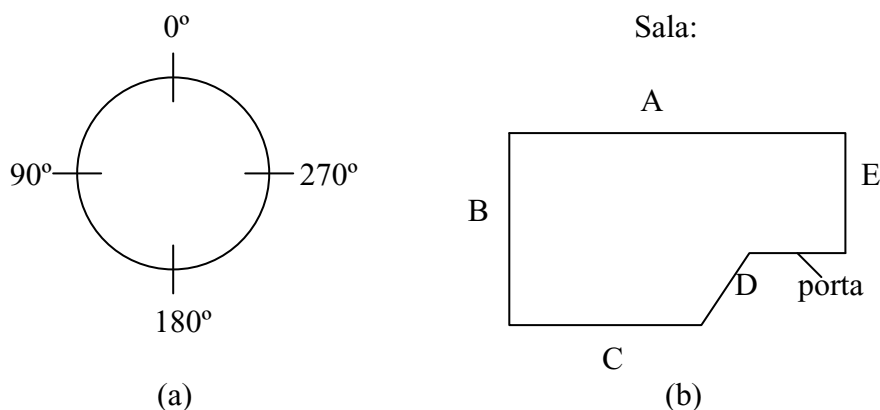


Figura 10: (a) Ilustração dos ângulos utilizados. (b) Ilustração da sala do acelerador de 4 MeV e das paredes avaliadas.

Tabela 36: Dados medidos no levantamento radiométrico da bomba de Cobalto a 0°.

0°	
Parede A	BG
Parede B	BG
Parede C	BG
Parede D	BG
Parede E	BG
Porta	BG

Tabela 38: Dados medidos no levantamento radiométrico da bomba de Cobalto a 180°.

180°	
Parede A	BG
Parede B	BG
Parede C	BG
Parede D	BG
Parede E	BG
Porta	BG

Tabela 37: Dados medidos no levantamento radiométrico da bomba de Cobalto a 90°.

90°	
Parede A	BG
Parede B	BG
Parede C	BG
Parede D	BG
Parede E	BG
Porta	BG

Tabela 39: Dados medidos no levantamento radiométrico da bomba de Cobalto a 270°.

270°	
Parede A	BG
Parede B	BG
Parede C	BG
Parede D	BG
Parede E	BG
Porta	BG

Conclusão: Dose satisfatória.

11.1.4 Raios-X superficial;

Cone: 12.5 cm;
Filtro mais baixo.

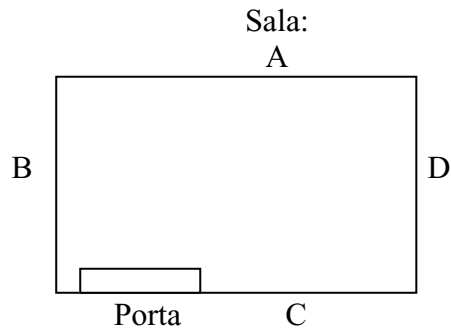


Figura 11: Ilustração da sala do aparelho de raios-X superficial e das paredes avaliadas.

Tabela 40: Dados medidos no levantamento radiométrico do raios-X superficial .

Parede A	BG
Parede B	BG
Parede C	BG
Parede D	BG
Porta	BG

Conclusão: Dose satisfatória.

11.1.5 Sala quente

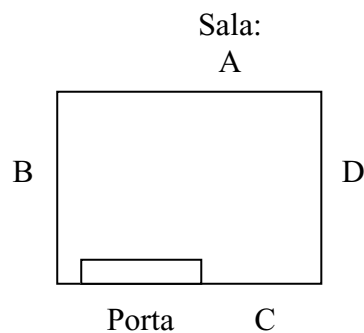


Figura 12: Ilustração da sala quente e das paredes avaliadas.

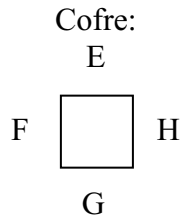


Figura 13: Ilustração do cofre e das paredes avaliadas.

Tabela 41: Dados medidos no levantamento radiométrico da sala quente.

Parede A	BG
Parede B	BG
Parede C	BG
Parede D	BG
Lado E	3.5mR/h
Lado F	3.1mR/h
Lado G	3.1mR/h
Lado H	3.5mR/h
Encima cofre	BG
Porta	BG

Sendo que $BG=2,5\text{mR/h}$, $P = 95 \text{ Kpa}$, $T = 25,0^\circ\text{C}$, $t_{\text{bean-on}} = 40\text{h}$, $T=0,25$, $U=1$.

Temos que, o fator temperatura e pressão ($f(T, P)$) é 1,081.

Utilizando a equação 26, calculamos a dose equivalente média semanal para cada lado do cofre, e obtemos que: $D_{\text{semanal-tot}}$ (lado E)=81,04mR, $D_{\text{semanal-tot}}$ (lado F)=81,04mR, $D_{\text{semanal-tot}}$ (lado G)=48,66mR e $D_{\text{semanal-tot}}$ (lado H)=48,66mR.

Sendo a dose semanal total, a soma de todas as paredes, temos que a dose semanal total é do cofre é 260,04mR.

Conclusão: dose satisfatória, limite até 400mR é considerado satisfatório.

11.2 Teste de fuga do aparelho de raios-X superficial

Tubo de raios –X:

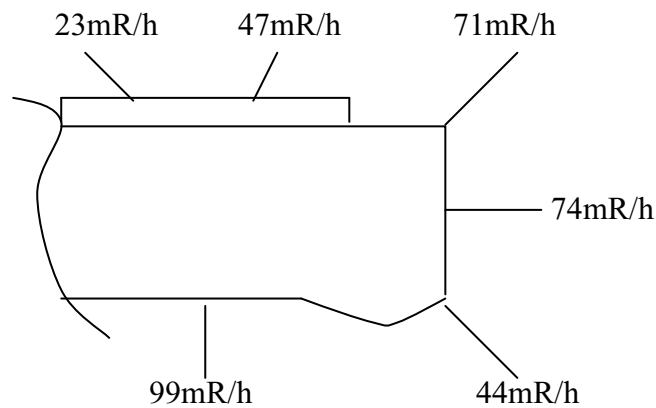


Figura 14: Ilustração de um tubo de raios-X e dos locais avaliados.

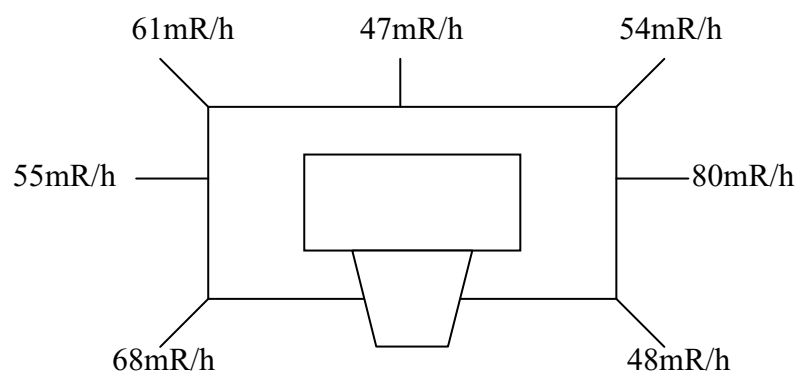


Figura 15: Ilustração de um tubo de raios-X e dos locais avaliados.

O cálculo da taxa de fuga do cabeçote (*Taxa*) é dado pela equação 27,

$$Taxa = L \cdot f(T, P) \cdot 8,73 \cdot 10^{-3}, \quad (27)$$

em que L é a leitura máxima encontrada nos pontos da figura 14 e figura 15 e $f(T, P)$ é o fator de correção de temperatura e pressão.

Se a leitura máxima foi de 99mR/h, temos que $Taxa=0,937mGy/h$.

Conclusão: Taxa de fuga está dentro do permitido, permitido até 1 mGy/h.

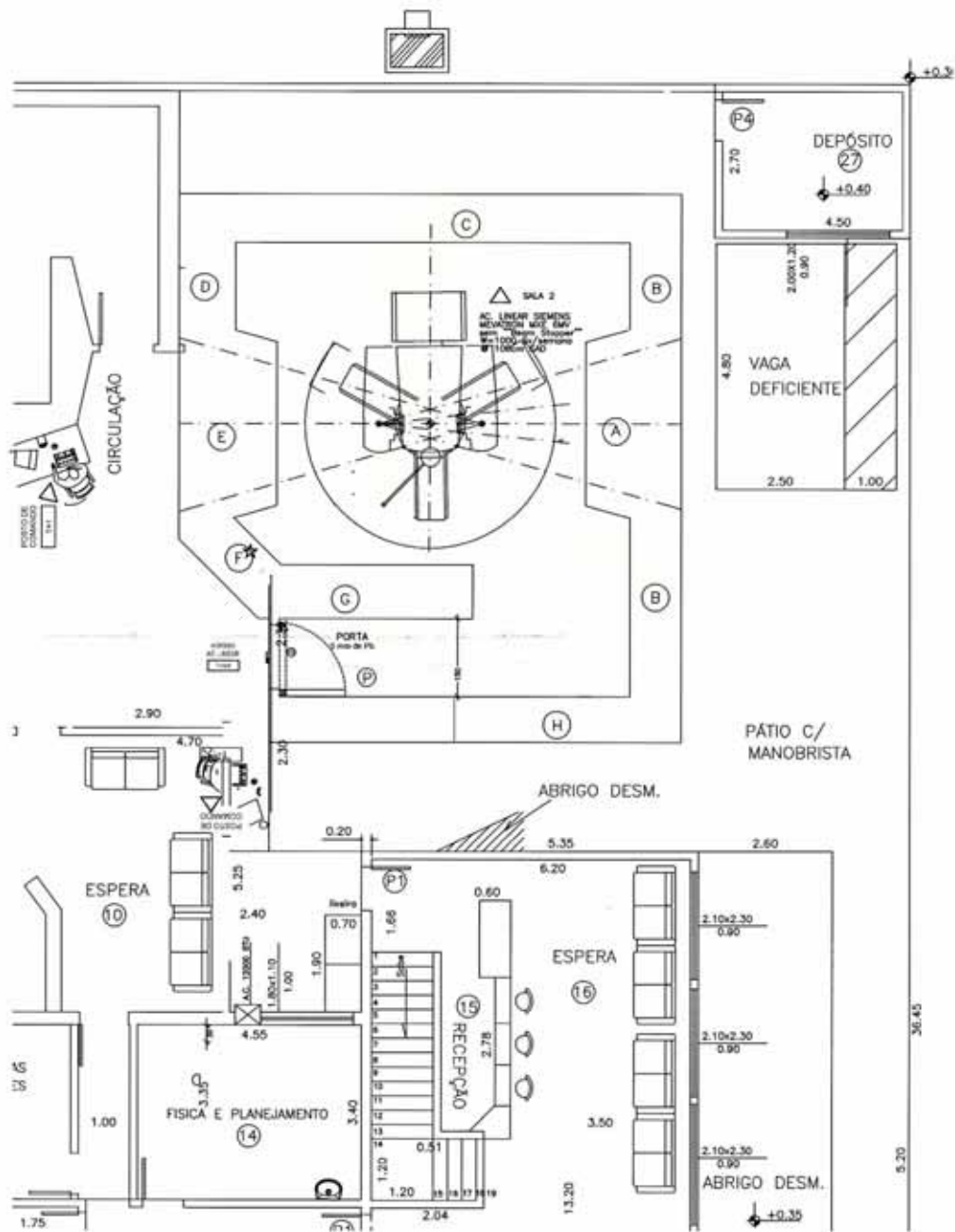


Figura 16: Planta baixa do Instituto de Radioterapia do Vale do Paraíba com as dimensões da sala, a ser construída, ainda não muito bem definidas.

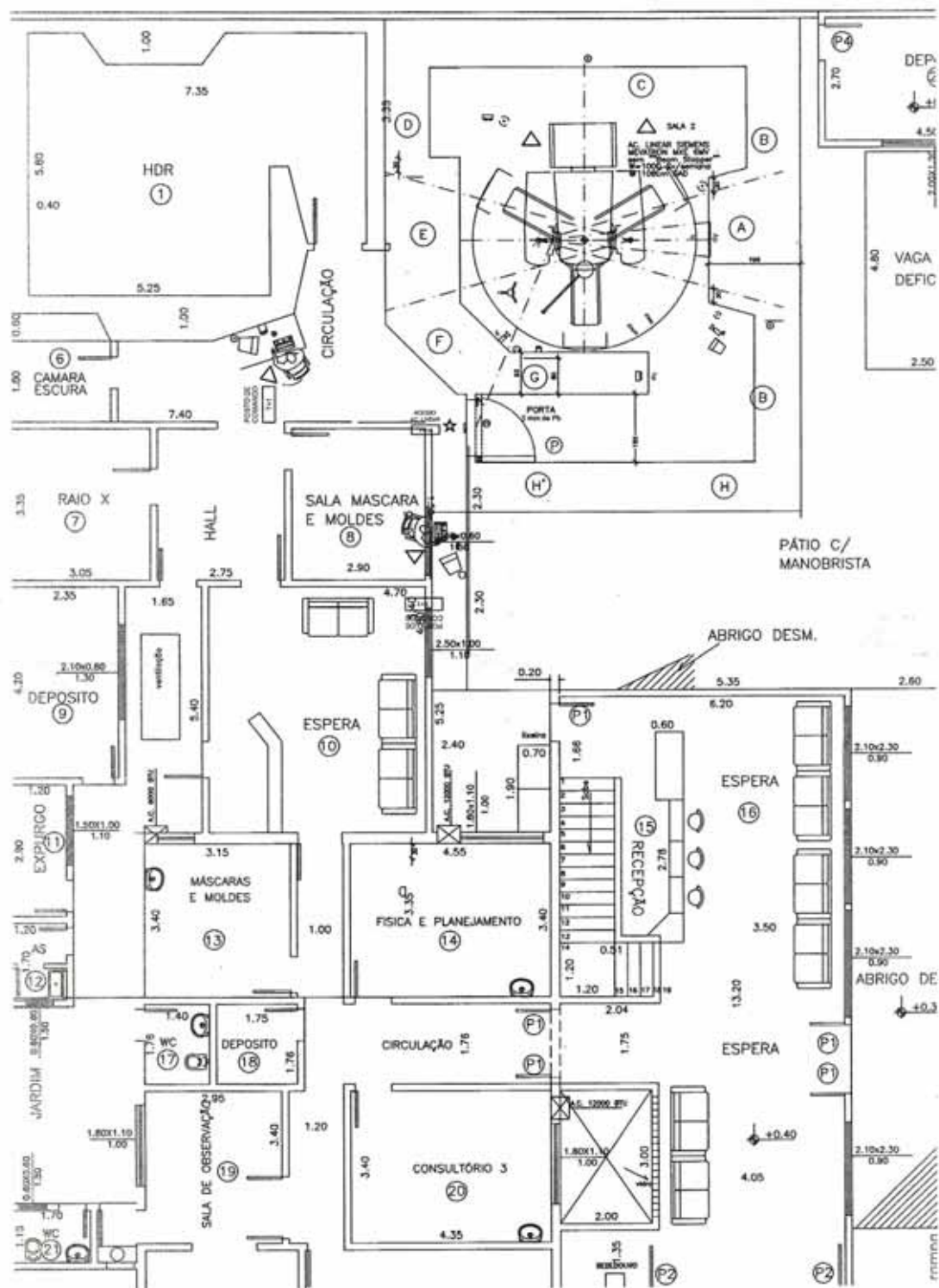


Figura 17: Planta baixa do Instituto de Radioterapia do Vale do Paraíba utilizando os resultados do item 10.1 - Cálculo de Blindagem Inicial.

12 REFERÊNCIAS

- [1] SCAFF, L. A.M. **Física da Radioterapia**. SARVIER. São Paulo, 1997.
- [2] SPRAWLS, P. JR. **Physical Principles of Medical Imaging**. ASPEN PUBLISHERS, Inc. MARYLAND: GAITHERSBURG, 1987.
- [3] **ACELERADORES Lineares**. Disponível em: <<http://rikmendes.vilabol.uol.com.br/Aparelhosradioterapia.htm#Linear>>. Acesso em: 22 jan. 2008.
- [4] MARIN, C. et al.. **Radioterapia**. Disponível em: <<http://www.biofisica.ufsc.br/index.jsp?page=arquivos/radioterapia.htm>>. Acesso em: 01 fev. 2008.
- [5] Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN (1988), Diretrizes Básicas de Radioproteção. CNEN/NE-3.01, Brasil.
- [6] **PLANO de Radioproteção**. Disponível em: <http://200.152.208.135/sapra_landauer/portarias/pub/res625/res625_8.html#planosite>. Acesso em: 20 jan. 2008.
- [7] National Council on Radiation Protection and Measurements, *Structural Shielding Design and Evaluation for Medical Use of X and Gamma Rays of Energies up to 10 MeV*, NCRP Report 49, Bethesda, MD, 1976.
- [8] National Council on Radiation Protection and Measurements, *Radiation Protection Design Guidelines for 0.1 –100 MeV particle accelerator facilities*, NCRP Report 51, Bethesda, MD, 1979.
- [9] **FÍSICA Moderna, Produção de Raios-X**. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/tex/fis142/fismod/mod05/m_s01.html> . Acesso em: 25 jan. 2008.
- [10] VIGNA, E. D. F.; FALCÃO, R. C. **Blindagem em radioterapia**. Instituto Nacional do Câncer, 2000.
- [11] National Council on Radiation Protection and Measurements, *Neutron Contamination from Medical Electron Accelerators*, NCRP Report No. 79, Bethesda, MD, 1987.
- [12] International Commission on Radiological Protection, *Protection against ionising from external sources used in medicine*. ICRP Publication 33, Oxford: Pergamon Press , 1981.

[13] FARIAS, J. T. Procedimentos para o Levantamento Radiométrico em Instalação de Radioterapia. Proteção Radiológica e Controle de Qualidade em radioterapia, 2000.