



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"



VICTOR SANTOS SILVA

ANÁLISE DOS PARÂMETROS FÍSICOS ESTIMADOS PARA CÁLCULO DE
BLINDAGEM DA SALA DO ACELERADOR LINEAR DO HC-FMB – ADEQUAÇÃO
COM A ROTINA ATUAL DO SERVIÇO

BOTUCATU – SP

2017

VICTOR SANTOS SILVA

ANÁLISE DOS PARÂMETROS FÍSICOS ESTIMADOS PARA CÁLCULO DE
BLINDAGEM DA SALA DO ACELERADOR LINEAR DO HC-FMB – ADEQUAÇÃO
COM A ROTINA ATUAL DO SERVIÇO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Instituto de Biociências da Unesp, Câmpus de
Botucatu, como requisito necessário para a
conclusão do curso de graduação em Física
Médica.

Professor orientador: Prof. Dr. Roberto Morato
Fernandez.

BOTUCATU – SP

2017

Agradecimentos

Ao longo desses anos de universidade, tive o prazer de conhecer muitas pessoas, de muitas ideias e de diversas opiniões. Digo isto, pois o simples contato e convivência, me fizeram uma pessoa melhor. Portanto, além de agradecer aos meus pais, pois sem eles eu ainda estaria na praia (Bertioga, minha terra), muito longe de um diploma do ensino superior, sou grato a estes.

Agradeço aos meus professores, todos eles, pois influenciaram para que eu mudasse minha postura ao longo da graduação, estou saindo com uma cabeça diferente da qual eu tinha quando ingressei.

Agradeço aos professores que aceitaram ser minha banca, será uma honra tê-los.

No desenvolvimentos deste projeto, agradeço ao apoio do professor Roberto Morato, por nos permitir realizar o trabalho no setor de radioterapia.

Agradeço aos físicos César e Vander, sem os quais ainda estaríamos tentando entender os procedimentos.

Por último, agradeço ao destino, por ter permitido que meu caminho cruzasse com o caminho de Suelen Simões Costa, a qual também teve participação neste projeto, além de me ajudar (e como meu ajudou, minha futura física radioterapeuta e eterna companheira). A esta pessoa dedico muitas de minhas conquistas, esta monografia é apenas uma, pois sua paciência em me aceitar, e me ter como parte de sua família, me tornaram esta pessoa melhor que hoje sou, e que já não imagina algo sem você.

Resumo

Quando um setor de radioterapia é construído, é realizado o RPAS (relatório preliminar de análise de segurança) onde contém o cálculo de blindagem, que é responsável pelas espessuras que as paredes da sala do acelerador linear serão construídas. Os fatores necessários para realizar esses cálculos são valores obtidos da norma da CNEN-3.01 e NCRP-49, são valores sugeridos, já que as condições reais do local ainda são desconhecidas. A fim de comprovar se o cálculo de blindagem está adequado para as condições atuais, este projeto foi desenvolvido com todos os dados reais e atuais que o cálculo precisa para adquirir as espessuras das paredes. Os valores obtidos foram comparados ao planejamento original do setor realizado no ano de 2000, concluindo que a construção não só é superior ao necessário, mas as condições no setor poderiam variar, como o aumento da carga de trabalho.

Sumário

Lista de Abreviações e símbolos.....	5
Introdução.....	6
1.1 Contexto histórico.....	6
1.2 Radioterapia.....	7
1.2.1 Aparelho de Cobaltoterapia.....	8
1.2.2 Acelerador Linear.....	9
1.3 Proteção Radiológica.....	10
1.3.1 Definição das grandezas dosimétricas.....	10
1.4 Construção de um setor de radioterapia.....	11
1.4.1 Cálculo de Blindagem.....	12
1.4.1.1 Carga de Trabalho – W.....	12
1.4.1.2 Fator Uso – U.....	12
1.4.1.3 Fator Ocupação – T.....	13
1.5 Limites de Dose.....	13
2. Objetivo.....	15
3. Metodologia.....	16
3.1 Características do acelerador linear utilizado.....	16
3.2 Barreira Primária.....	17
3.3 Barreira Secundária.....	18
3.4 Teto e chão.....	19
3.5 Porta.....	20
4. Resultados.....	21
5. Discussão.....	30
6. Conclusão.....	31
7. Referências Bibliográficas.....	34

Lista de abreviações e símbolos

A é a área em m^2 da parede a ser blindada;
 A_1 é a área do feixe incidente no primeiro material refletor (m^2);
 A_2 é a área da seção transversal no labirinto (m^2);
 B_1 é a atenuação para a radiação de fuga para o cabeçote (Gy);
 B_{pri} é a atenuação do feixe primário (Gy);
 B_{sky} é a atenuação para a radiação de espalhamento do ar (Skyshine);
 C é o custo da construção da parede em m^3 do material (US\$/ m^3);
 d_{prim} é a distância em metros entre o alvo até o ponto a ser protegido;
 d_{sec} é a distância em metros entre a fonte e o ponto do cálculo para a radiação secundária;
 d_{rj} é a distância em metros entre as linhas medianas dos labirintos;
 d_i é a distância vertical em metros do alvo até um ponto situado a 2m acima do teto;
 d_s é a distância horizontal em metros do isocentro até o ponto de análise;
 d_l é a distância em metros entre a fonte e o eixo do primeiro espalhamento;
 h é o pé direito da sala (m);
 H_{tot} é a taxa de dose equivalente total no ponto de análise na ausência de barreira (Sv/semana);
 l é o comprimento da parede (m);
 n é o número de indivíduos com ocupação integral na vizinhança próxima à parede;
 P é o limite de dose semanal (Sv/semana);
 T é o fator ocupação local;
 T_v é a vida útil da instalação (1040 semanas);
 TVL_{mat} é a espessura décima redutora para o material da parede (m);
 U é o fator de uso do feixe;
 W é a carga de trabalho do acelerador linear (Sv/semana a 1 metro);
 α é o coeficiente monetário (US\$10.000/homem-Sv);
 α_1 é o coeficiente de reflexão para fótons incidente no primeiro material refletor;
 α_2 é o coeficiente de reflexão para fótons de 0,5 Mev incidentes em subsequentes materiais refletores;
 Ω é o ângulo sólido do campo médio utilizado.

1 – Introdução

1.1 Contexto histórico

Como no final do século XIX já havia sido descoberto tanto a radioatividade quanto o raios-x, dentre as numerosas aplicações que se procederam daí por diante, na área médica as principais aplicações foram o radiodiagnóstico, a medicina nuclear e a radioterapia. A radioproteção é um item importante que também é incluído nesta lista de aplicações. No entanto, o efeito biológico da radiação só foi identificado inicialmente em 1896 quando notaram queimaduras na pele, epilação e irritação ocular, e mais tarde em 1928 com a suspeita de indução de efeitos genéticos [1].

O uso da radiação na área médica surge a partir dos resultados de Wilhelm Conrad Röntgen, que na noite de 8 de novembro de 1895 decide repetir o experimento de Philipp Lenard, mas embrulhando o tubo com um papel preto, a fim de se evitar que a luminescência muito forte do vidro atrapalhasse a visão de uma tela pintada com platino cianeto de bário, que fluorecia fracamente quando colocada a uma distância próxima de 8 cm de distância do tubo. Röntgen percebeu que os ossos de sua mão estavam aparecendo na imagem obtida na tela, pois sua mão estava entre o tubo e a tela, enquanto posicionava os objetos entre estas duas extremidades. Röntgen então conclui que estes raios sofriam freamento parcial pelos seus ossos, e no dia 22 de dezembro executa o que posteriormente ficou conhecido como “primeira radiografia da história”, fazendo com que sua esposa, Anna Bertha, ficasse estática em determinada posição durante 15 minutos, para que pudesse irradiar sua mão. Em 5 de janeiro de 1896, a descoberta inovadora realizada por W.C. Röntgen foi noticiada na primeira página do jornal Neue Freie Presse, de Viena, como uma forma de se observar o interior do corpo sem a necessidade de intervenções cirúrgicas. [1,2]

Logo após Röntgen ter publicado sua descoberta, ocorreram diversas aplicações das radiações, quer em diagnóstico quer em terapia, com o objetivo de realçar o tratamento de um cancro de estômago que Emil Grubbe fez em Chicago (Estados Unidos da América) em 1896.

Com a evolução da tecnologia e da informática, o aumento da capacidade de processamento de dados contribuiu bastante para a aquisição de imagens, levando a grandes avanços na radioterapia e no radiodiagnóstico, dentre as quais podemos listar abaixo as de maior importância:

Início do século XX– Aparelhos produtores de raio-X para terapia.

Década de 30– Primeiras “Bombas de Cobalto”, raios gama com energia de milhão de

eletron-Volt (MeV).

Década de 50– Primeiro equipamento específico para efetuar Radioterapia cerebral desenvolvida sob orientação do Prof. Lars Leksell.

Década de 60– Implementação dos primeiros aceleradores lineares específicos.

Década de 80– Equipamento de aquisição de imagens TAC. Permite a realização de planimetrias bidimensionais, abrindo as portas aos planejamentos tridimensionais.

Década de 90– Ressonância Magnética e PET, conjuntamente com o desenvolvimento da ecografia, permite uma efetiva visualização dos volumes-alvo e dos tecidos adjacentes. A evolução da informática permite o desenvolvimento efetivo das planimetrias tridimensionais. Desenvolve-se a Terapia com feixes de Partículas (particularmente Prótons e Carbono). Surgem os primeiros EPID (Electronic Portal Imaging Devices), que permitem o desenvolvimento da integração da imagem com a terapia.

Primeira década do século XXI– Desenvolvem-se técnicas mais sofisticadas de planejamento e tratamento, com a integração completa entre a imagem e o tratamento. Surgem aceleradores com sistemas de sincronização entre a respiração e a irradiação (com a chamada Radioterapia 4D). Desenvolvem-se técnicas de irradiação como a Radioterapia de Intensidade Modulada (IMRT) ou Radioterapia Guiada por Imagem (IGRT), desenvolve-se a Radiocirurgia (craniana e corporal), a Terapia em Arco Dinâmico e novos equipamentos de irradiação como a Tomoterapia, a Ciberknife e os novos aceleradores lineares com sistemas de imagem integrada; surgem novas aplicações da Braquiterapia com novas fontes radioativas [1].

1.2 Radioterapia

Pouco tempo após a descoberta dos raios-x, em 1896 já se imaginavam usos médicos que esta descoberta poderia ter. Neste ano, ocorreram diversas aplicações das radiações, quer em diagnóstico quer em terapia. A radiação foi uma das primeiras vias de tratamento do cancro, tendo sido realizado o primeiro tratamento com sucesso em 1898. Nessa época, por falta de conhecimento acima da radiação, utilizavam-se doses elevadas num único tratamento, o que de fato acabou por levar a ocorrência de problemas.

A radioterapia é usado com o objetivo de eliminar células tumorais da região que for irradiada. No entanto, como as radiações aplicadas não são seletivas a determinados tipos de

células, esta se torna letal para as células saudáveis. Assim, seu tratamento é fracionado e a radiação é administrada em doses diárias iguais (no caso da teleterapia) para que se possa respeitar a tolerância normal à radiação do tecido irradiado. Estas radiações são eletromagnéticas ou corpusculares, carregando energia, e por serem ionizantes, ao interagirem com o tecido biológico dão origem a elétrons que ionizam o meio, gerando a hidrólise da água onde seu efeito final é a ruptura das cadeias de DNA. A morte celular ocorre quando a célula perde sua função específica ou sua capacidade reprodutora [1,3].

Ao fracionar o tratamento em doses diárias menores, as células saudáveis que sofreram dano subletal conseguem se recuperar no período entre as frações, evitando que sua morte ocorra caso a dose não fosse fracionada. A capacidade de recuperação ao dano causado pela radiação é maior nas células saudáveis que nas células tumorais. Desta forma, a próxima fração na célula saudável não levará a sua morte ou a levará a um estado vital mais crítico, pois esta está recuperada. Como o mesmo não ocorre com as células tumorais, as próximas sessões contribuem para o acúmulo de danos, levando a célula à morte ao decorrer do tratamento [3].

A radioterapia pode ser dividida quanto a sua fonte de radiação em teleterapia, onde a fonte de radiação está distante ao tumor do paciente, e braquiterapia, onde a fonte está em contato ou dentro do tumor do paciente. Há ainda a radiocirurgia. No entanto, o Setor de Radioterapia da Unesp de Botucatu contempla apenas a teleterapia, possuindo um acelerador linear em funcionamento e um aparelho de Cobalto desativado.

1.2.1 Aparelho de Cobalto

Os primeiros equipamentos de teleterapia foram os **aparelhos de Cobalto**, um aparelho contendo uma fonte de cobalto 60 onde os feixes utilizados no tratamento provém de seu decaimento. O cobalto é um metal branco-avermelhado que é bastante duro, ligeiramente magnético e moldável. Apresenta o número atômico 27, tem uma densidade de $8,9 \text{ g/cm}^3$ e funde a 1490°C . Na radioterapia, o cobalto comumente usado é o isótopo com massa atômica 60. O cobalto 60 (Co-60) é um isótopo artificial extremamente radioativo, produzido em um reator nuclear a partir do bombardeamento de Co-59 com nêutrons, e decai para Ni-60 emitindo beta (β) e raios gama (γ) com energias de 1,17 MeV e 1,33 MeV, com uma meia-vida de 5,27 anos [4]. Neste tipo de aparelho, a emissão é emitida continuamente ao longo do tempo. Quando a terapia é iniciada, a fonte é exposta com a abertura da janela, e ao finalizar a

terapia a fonte é então recolhida e a janela fechada. Em virtude disto, este equipamento contém algumas limitações [1,4, 5], quando comparado a seu sucessor, o acelerador linear. Estas limitações são:

- Feixes de um valor de energia apenas, que é o valor médio entre os dois picos da emissão gama, pois não há como controlar as energias que o decaimento liberará, visto que este valor de energia é uma característica intrínseca do elemento em questão;

- O tempo de utilização do equipamento é condicionado ao tempo de meia vida do elemento cobalto 60, pois sua atividade decai exponencialmente com o tempo, sendo necessária a criação de normas que determinam o limite de atividade mínima sob o qual este equipamento pode operar;

- Técnicas de tratamento que surgiram com a evolução da tecnologia e da informática não são possíveis com este equipamento, devido a sua limitação de operação;

1.2.2 Acelerador Linear

Os aceleradores lineares usam ondas eletromagnéticas de alta frequência para acelerar partículas carregadas (elétrons) fazendo com que estas percorram o tubo linear em que estão contidos. Da mesma forma como nos tubos de raios-X, no acelerador linear os feixes de raios X são produzidos pela colisão dos elétrons com um alvo. Além disso, no acelerador linear, o feixe de elétrons pode ser utilizado diretamente no tratamento de tumores (lesões) superficiais, em contraste com os feixes de raios-x a alta energia, que são usados para tratamento de tumores (lesões) com profundidade maior ao organismo. Isto se dá pela diferença entre as capacidades de penetração entre o elétron e o raio-X, com características corpusculares e ondulatória, respectivamente [4].

Ao contrário da telecobaltoterapia, o acelerador linear possui espectro de energia contínuo, e não discreto, resultante do frenamento do feixe de elétrons pelo alvo. Este fato, aliado a geometria do aparelho possibilitaram uma evolução com técnicas que vieram a ser implantadas graças à evolução da informática, processamento de imagens e programação [6].

O Setor de Radioterapia da Unesp de Botucatu possui um acelerador linear da marca Varian, modelo 2100 C.

1.3 Proteção Radiológica

Os limites para as exposições à radiação só começaram a ser estabelecidos no século XX. A *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) foi um dos primeiros órgãos a padronizar o limite de dose, através de uma série de publicações que são a base de muitas diretrizes de proteção radiológica internacional. A publicação de seu primeiro relatório ocorreu em 1928, sendo denominada *Publicação I*, e possuía recomendações que só vieram a ser adotadas em 1958. A ICRP promove o desenvolvimento da proteção radiológica e faz recomendações voltadas às *grandezas limitantes*. Uma outra comissão, a *International Commission on Radiation Units and Measurements* (ICRU), fundada em 1925, cuida das grandezas dosimétricas básicas e operacionais [4, 6].

1.3.1 Definição das grandezas dosimétricas

Grandezas Dosimétricas

Grandezas dosimétricas estão associadas à quantidade de radiação absorvida por um material (ou mesmo organismo). São grandezas dosimétricas os elétrons, os íons produzidos, a energia transferida e a energia absorvida pelo material devido à passagem da radiação pelo meio. Logo, grandezas dosimétricas visam relacionar a interação da radiação com a matéria usando para tal algum efeito ou subproduto desta interação [6].

Grandezas Limitantes

São grandezas que indicam risco à saúde, devido ao efeito nocivo da interação da radiação com o organismo. Como cada radiação possui seu poder de ionização, penetração e dano biológico, que dependem do material irradiado e do feixe de radiação, introduz-se fatores de peso, associados a estas grandezas, obtendo-se assim, a dose equivalente [6].

Grandezas Operacionais

São grandezas práticas, em contraste com as grandezas limitantes, que não são mensuráveis nem tão pouco de fácil estimativa. Exemplos de grandezas operacionais são a dose equivalente de dose ambiente e dose equivalente de dose pessoal [6].

1.4 Construção de um setor de radioterapia

Para que um setor de radioterapia possa ser construído e que sua atividade possa ser inicializada, há certos procedimentos que devem ser realizados por medida preventiva e de

segurança, uma vez que a radiação usada no serviço é ionizante e de alta energia, o que favorece sua capacidade de penetração.

- 1º*: apresentação do RPAS (relatório preliminar de análise e segurança);
- 2º*: necessidade de autorização da CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear) para que possa iniciar a construção do setor;
- 3º*: necessidade de autorização da CNEN para que a máquina possa ser importada;
- 4º*: instalação da máquina, o que deve ocorrer dentro de um intervalo entre 20 e 30 dias;
- 5º*: teste de aceitação da máquina, onde é feito o alinhamento do feixe, verificação das energias em que a máquina trabalha, garantia dos padrões de qualidade da máquina;
- 6º*: teste de comissionamento, que é realizado com o uso de um “fantoma” ou objeto simulador, que tem por finalidade simular um paciente;
- 7º*: formação de tabelas de auxílio;
- 8º*: solicitação à CNEN para início de operação;
- 9º*: preenchimento do SCRAS e apresentação do RFAS (relatório final de análise de segurança);
- 10º*: visita de indivíduos autorizados pela CNEN no local, afim de se realizar algumas medidas antes da autorização;
- 11º*: início das operações.

1.4.1 Cálculo de Blindagem

Uma das primeiras etapas para a construção de um setor de radioterapia é fazer o RPAS (relatório preliminar de análise e segurança). Nele contém o cálculo de blindagem do setor a ser construído responsável em determinar as espessuras das paredes onde será instalado o acelerador linear. O cálculo leva em consideração fatores intrínsecos como a carga de trabalho, fator uso e ocupação. Esses fatores foram calculados no contexto atual do setor [7] para realizar o cálculo de blindagem deste projeto.

1.4.1.1 Carga de Trabalho – W

Carga de trabalho é a quantidade de radiação produzida por uma máquina de tratamento em um determinado intervalo de tempo a uma dada distância. A carga de trabalho

é dividida em clínica(W_c) e física(W_f), onde W_c corresponde a carga de trabalho usada em tratamentos e W_f a manutenção e irradiações de dosimetria [7].

1.4.1.2 Fator Uso – U

Fator Uso é uma grandeza adimensional relacionada ao número de vezes e direção que um feixe é condicionado em um serviço de radioterapia. É um fator que leva em consideração o tempo que este feixe permanece em uma direção, ou ângulo em particular. [7]

A figura 1 apresenta as posições do gantry em que são analisados os fatores uso do setor de radioterapia. As paredes que recebem radiação primária são chamadas de barreiras primárias. As demais paredes que recebem radiação espalhada e de fuga são chamadas barreiras secundárias, sendo seu fator uso igual a 1.

A figura 2 apresenta a descrição destas barreiras para os ângulos ortogonais do gantry.

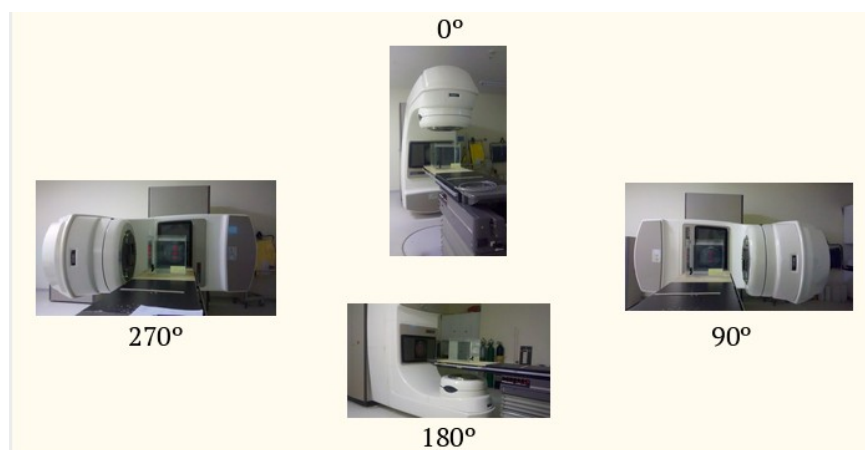


Figura 1: Representação da posição do gantry em relação ao ambiente da sala de radioterapia.

1.4.1.3 Fator Ocupacional – T

Fator Ocupacional é uma grandeza adimensional relacionada a ocupação do público em áreas adjacentes ao setor de radioterapia. É um fator que leva em consideração o tempo em que cada área vizinha ao setor é ocupada, sem relacionar o número de indivíduos presentes [7].

1.5 Limites de Dose

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), determina limites de dose para diferentes indivíduos. Os principais limites de dose são para os indivíduos ocupacionalmente expostos (trabalhadores do setor de radioterapia) de $4 \times 10^{-4} \text{ Sv/semana}$ e para os indivíduos do público de $2 \times 10^{-5} \text{ Sv/semana}$. Para o setor de radioterapia analisado, foi utilizado apenas o limite de dose para o público para o cálculo de blindagem.

1.6 Tipos de Barreiras

Em um setor de radioterapia, a sala que contém o acelerador linear, possui dois tipos de barreiras: primárias e secundárias. As primárias recebem a radiação que atinge diretamente à parede, ou seja, a radiação do cinturão primário. As demais paredes receberão radiação secundária, ou seja, radiação espalhada e radiação de fuga; esse tipo de radiação ocorre independente da direção do gantry, sendo o fator uso dessas paredes igual a 1.

A figura a seguir demonstra a relação entre essas barreiras, pode-se perceber que as barreiras são primárias quando o gantry está posicionado nos ângulos ortogonais.

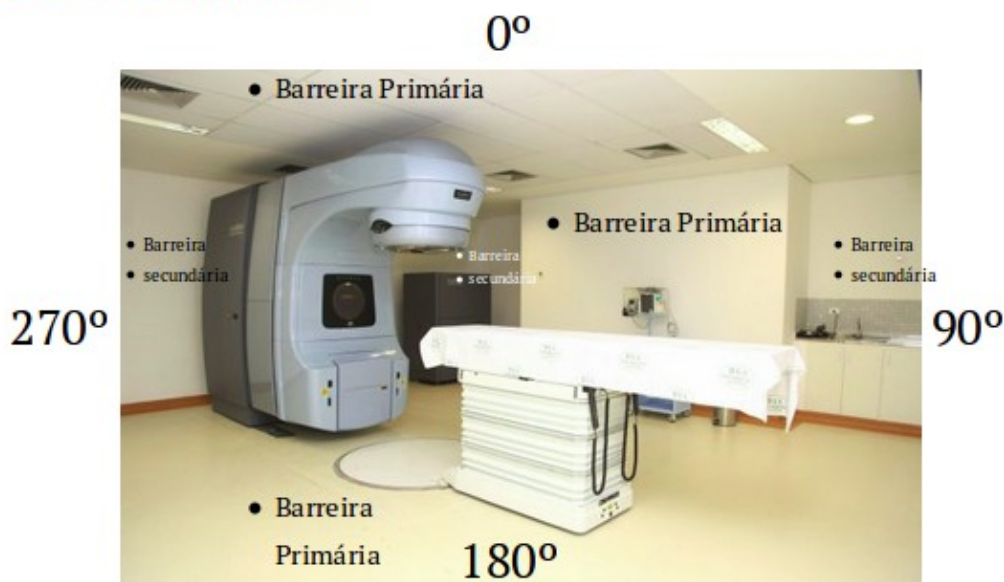


Figura 2: Representação da posição do gantry e os tipos de barreiras da sala de um setor de radioterapia.

2 – Objetivo

Refazer o cálculo de blindagem do setor de radioterapia do Hospital das Clínicas da Unesp de Botucatu considerando o contexto atual ambiental e populacional, assim como as condições atuais de carga de trabalho e comparar com o cálculo de blindagem da construção do setor, cujo projeto foi aprovado pela CNEN no ano de 2000.

3 – Metodologia

3.1 Características do acelerador linear utilizado

Fabricante: Varian;

Marca e Modelo: Clinac 2100C sem beam stopper;

Energias permitidas para feixes de fótons: 6 e 10 MV;

Campo máx. de radiação primária: 40 x 40 cm² a 100 cm;

Isocentro: 100 cm;

Rotação permitida: 360°;

Colimadores: Multileaf.

Após coleta dos dados, foi utilizado as recomendações das publicações NCRP-49, ICRP-33 e NCRP-151 para realizar o cálculo. O cálculo de blindagem foi dividido em 2 partes principais:

3.2 Constantes utilizadas

Tabela 1: Representação dos valores de TVL em função da energia e ângulo de espalhamento

Valores de TVL para diferentes energias e tipo de radiação								
	Primária		Fuga		Espalhamento 30°		Espalhamento 90°	
	10 MV	6 MV	10 MV	6 MV	10 MV	6 MV	10 MV	6 MV
TVL _i	41	37	35	34	28	26	18	17
TVL _e	37	33	31	29				

Tabela 2: Representação do coeficiente de reflexão em função dos ângulos mais críticos

Valores do coeficiente de reflexão para diferentes energias e ângulos		
	90°	30°
10MV	$3,81 \times 10^{-4}$	$3,18 \times 10^{-3}$
6 MV	$4,6 \times 10^{-4}$	$2,77 \times 10^{-3}$

3.3 Barreiras

O cálculo de blindagem é realizado para todas as barreiras do setor de radioterapia, afim de demonstrar a disposição das barreiras primárias e secundárias. As figuras a seguir ilustram essa visualização:

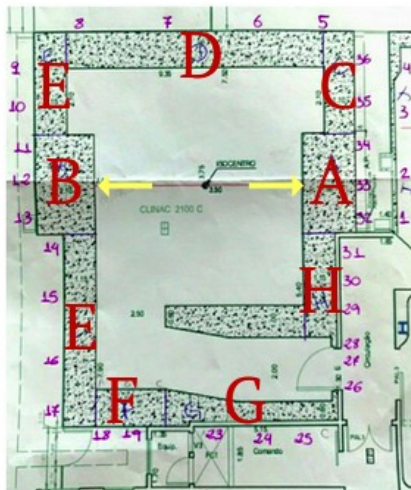


Figura 3: Demonstração das barreiras primárias do setor. Lembrando que o teto e o chão também são considerados barreiras primárias.

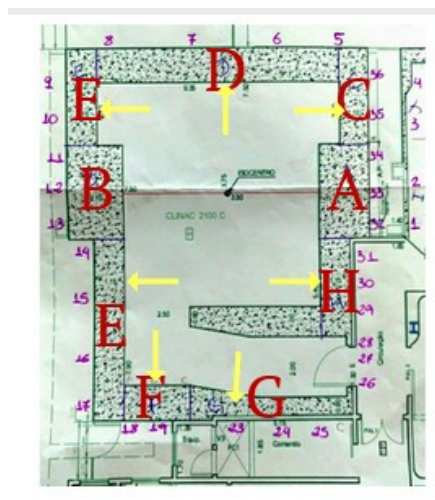


Figura 4: Demonstração das barreiras secundárias do setor.

3.4 Barreira Primária:

A barreira primária é irradiada pelo feixe útil, sendo limitada aos ângulos ortogonais correspondente a posição da máquina na sala. Desta forma, define-se quais paredes serão barreiras primárias. O cálculo das barreiras primárias é feito de duas formas, limitação e otimização, sendo que uma se relaciona com a dose anual, fator uso, fator ocupação e carga de trabalho e a outra a priori ao custo, respectivamente [2].

Limitação:

$$B_{primária} = \frac{P * (dpri)^2}{W * U * T}$$

$$\text{Cálculo da Espessura: } Espessura = TVL_1 + (n - 1) TVL_e$$

Otimização:

$$H_{tot} = \frac{W * U}{(dpri)^2} \quad e \quad Bot = \frac{A * C * (TVL)_{mat}}{(\ln 10) * \alpha * n * H_{tot} * Tv}$$

$$\text{Cálculo da Espessura: } Espessura = TVL_1 + (n - 1) TVL_e$$

$$\text{onde } n = \sum (pixTi)$$

Após a realização do cálculo pelo método da Limitação e pelo método da Otimização comparamos as duas espessuras, sendo que se a diferença entre os métodos for menor que TVL_1 , acrescenta-se 1 HVL à maior espessura, caso contrário usa-se a maior espessura sem acréscimo do HVL.

3.5 Barreira Secundária:

A barreira secundária recebe somente a radiação espalhada (pelo paciente e pela sala) e a radiação de fuga que é transmitida através da blindagem do aparelho (radiação de fuga do cabeçote). O cálculo da barreira secundária é feito da mesma forma que a primária considerando as formas de limitação e otimização tanto para a radiação espalhada quanto para a radiação de fuga [2].

Radiação espalhada:

Limitação:

$$B_{\text{espalhada}} = \frac{P (d_{\text{sca}})^2 (d_{\text{sec}})^2}{a * W * U * T} \frac{400}{F}$$

$$\text{Cálculo da Espessura: } E_{\text{spessura}} = TVL_e * n$$

$$\text{onde: } n = -\log(B_{\text{esp}})$$

Otimização:

$$H_{\text{tot}} = W_{\text{prim}} * a \frac{1600}{(d_{\text{sec}})^2 * (d_{\text{sca}})^2 * 400} e^{Bot} \quad Bot = \frac{A * C * (TVL)_{\text{mat}}}{(\ln 10) * \alpha * n * H_{\text{tot}} * Tv}$$

$$\text{onde: } n = \sum (pixTi)$$

$$\text{Cálculo da Espessura: } E_{\text{spessura}} = TVL_e * n$$

$$\text{onde: } n = -\log(Bot)$$

Após a realização do cálculo pelo método da Limitação e pelo método da Otimização, comparamos as duas espessuras, sendo que se a diferença entre as mesmas for menor que TVL_1 , acrescenta-se 1 HVL à maior espessura, caso contrário usa-se a maior espessura sem acréscimo do HVL.

Radiação de fuga:

Limitação:

$$Bl = \frac{P (dl)^2}{0,001 * W * U * T}$$

$$\text{Cálculo da Espessura: } E_{\text{spessura}} = TVL_1 + (n - 1) TVL_e$$

$$\text{onde: } n = -\log(Bl)$$

Otimização:

$$H_{\text{tot}} = W_{\text{fuga}} \frac{1}{(d_{\text{sec}})^2} e^{Bot} \quad Bot = \frac{A * C * (TVL)_{\text{mat}}}{(\ln 10) * \alpha * n * H_{\text{tot}} * Tv}$$

$$\text{onde: } n = \sum (pixTi)$$

$$\text{Cálculo da Espessura: } E_{\text{spessura}} = TVL_1 + (n - 1) TVL_e$$

$$\text{onde: } n = -\log(Bot)$$

Após a realização do cálculo pelo método da Limitação e pelo método da Otimização, comparamos as duas espessuras, sendo que se a diferença entre as mesmas for menor que TVL_1 , acrescenta-se 1 HVL à maior espessura, caso contrário usa-se a maior espessura sem acréscimo do HVL.

3.6 Teto e chão:

Como o setor de Radioterapia da Unesp de Botucatu é uma construção térrea, não havendo andares superiores, a blindagem para o piso se torna desnecessária. Considera-se esse ponto uma área inacessível. Considerando um campo de 20 cm x 20 cm a 1 m da fonte e utilizando a metodologia do NCRP-51 para a radiação de “Sky-shine”, têm-se:

$$Bsky = 0,67 \times 10^{-3} \frac{60 * P * (di)^2 * (ds)^2}{W * U * \Omega^{1,3}} e$$

$$\text{Cálculo da Espessura: } Espessura = -37,457 (\log (Bsky)) + 0,19 (\log (Bsky))^2$$

3.7 Porta

A porta recebe radiação secundária, e no caso do Setor de Radioterapia da Unesp de Botucatu, há na sala de tratamento um labirinto, o que reduz significativamente a radiação que chega até a porta. A porta é considerada como área controlada, com improvável permanência de pessoas. Há quatro diferentes contribuições para a radiação incidente na porta:

- 1) Dose devido à radiação primária espalhada - H_s ;
- 2) Radiação espalhada pelo paciente - H_{ps} ;
- 3) Radiação de fuga que é espalhada pela parede - H_{ls} ;
- 4) Radiação de fuga que atravessa a parede do labirinto - H_{lt}

O cálculo também é feito com os parâmetros de limitação e otimização.

4 – Resultados

Após obter os valores da dose em Sv/semana, é calculado o valor das espessuras pelo método da limitação e da otimização, sendo que a espessura final é calculada da seguinte forma: se a diferença entre as espessuras calculadas pelo método da limitação e da otimização forem inferiores a TVL_1 , acrescenta-se 1 HVL na maior espessura, caso contrário o maior valor obtido será considerado como a espessura final.

Parede A

O fator ocupação da Parede A (figura 5) foi dividido em duas partes, parte adjacente ao aparelho de cobalto (o mesmo está desativado) e adjacente aos filtros (os filtros de água se localizam superiormente). Como houve divisão da área de risco adjacente a Parede A, o fator uso escolhido foi aquele que mais gerasse situação de risco. Esta parede recebe radiação primária. Como a diferença entre as espessuras calculadas pelos métodos da Otimização e

Limitação foram superior a TVL_1 , não foi acrescentado 1 HVL, sendo usada a maior espessura calculada, obtida pelo método da Limitação (tabela 3).

Fator Uso – U: 2/7

Fator ocupação – T: 1/4

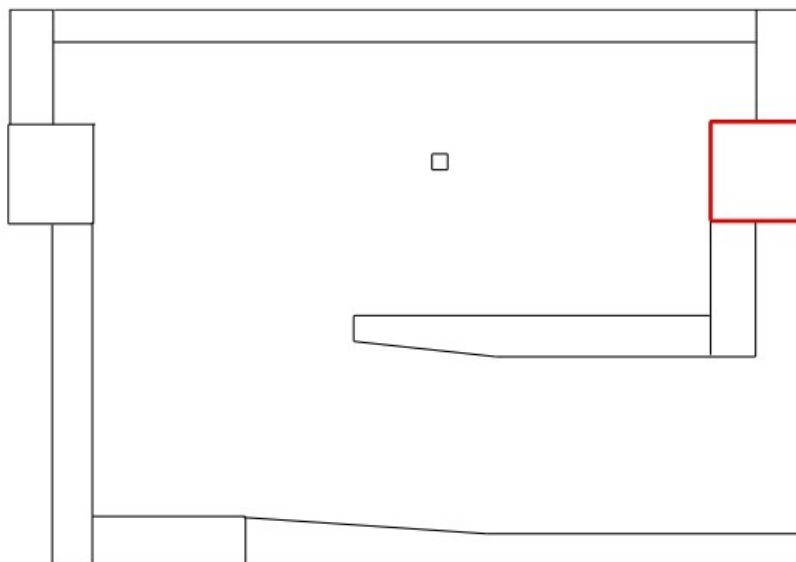


Figura 5: Planta baixa da sala de radioterapia mostrando a parede A.

Tabela 3: Valores das espessuras calculadas para a parede A.

Parede A (valores calculados em cm)				
Cobalto Primária			Filtros Primária	
Limitação	Otimização		Limitação	Otimização
177,16	102,36		161,25	81,70
- 15,00 cm = 162,16			- 15,0 cm = 146,25	

A parede A faz divisa com o corredor da sala de cobaltoterapia, já tendo sido construída uma parede de espessura 15 cm. Por este motivo é retirado essa medida da espessura final da parede como mostrado na tabela 3.

Parede B

O fator ocupação da Parede B (figura 6) foi dividido em duas partes, parte adjacente à calçada e adjacente ao anfiteatro (Casa de Arte). Esta parede recebe radiação primária. Como a diferença entre as espessuras calculadas pelos métodos da Otimização e Limitação não foram superior a TVL_1 , foi acrescentado 1 HVL a maior espessura obtida, que no caso foi pelo método da Otimização (tabela 4).

Fator Uso – U: 1/7

Fator ocupação – T: 1/16

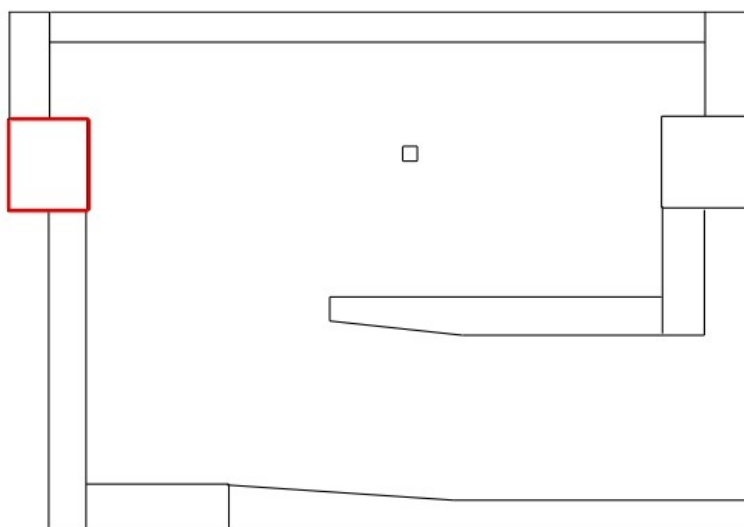


Figura 6: Planta baixa da sala de radioterapia mostrando a parede B.

Tabela 4: Valores das espessuras calculadas para a parede B.

Parede B (valores calculados em cm)				
Calçada Primária			Anfiteatro Primária	
Limitação	Otimização		Limitação	Otimização
145,68	123,20		151,50	154,10
+1HVL = 156,78			+1HVL = 165,20	

Parede C

O fator ocupação da Parede C (figura 7) foi dividido em duas partes, parte adjacente ao aparelho de Cobalto e adjacente aos filtros. Esta parede recebe radiação secundária. Como a diferença entre as espessuras calculadas pelos métodos da Otimização e Limitação não foram superior a TVL_1 , acrescentou-se 1 HVL a maior espessura obtida, que no caso foi pelo método da Otimização (tabela 5).

Fator Uso – U: 1

Fator ocupação – T: $\frac{1}{4}$

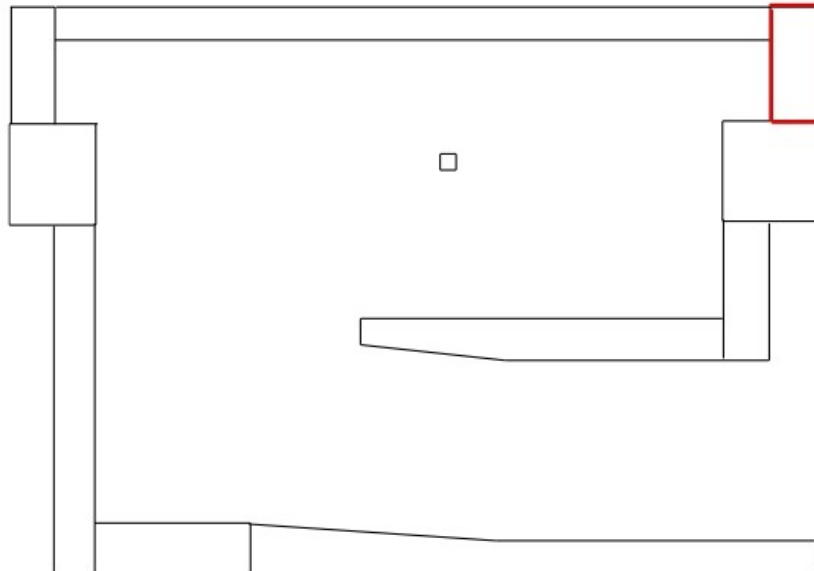


Figura 7: Planta baixa da sala de radioterapia mostrando a parede C.

Tabela 5: Valores das espessuras calculadas para a parede C.

Parede C (valores calculados em cm)							
Cobalto				Filtros			
Espalhada		Fuga		Espalhada		Fuga	
Limitação	Otimização	Limitação	Otimização	Limitação	Otimização	Limitação	Otimização
93,10	41,20	72,83	12,40	76,24	20,50	54,14	10,60
-15,0 cm = 78,10		-15cm = 57,83					

Parede D

Esta parede (figura 8) recebe radiação secundária. Como a diferença entre as espessuras calculadas pelos métodos da Otimização e Limitação foi superior a TVL_1 , não se acrescentou 1 HVL, sendo usada a maior espessura calculada, que foi obtida pelo método da Limitação (tabela 6).

Fator Uso – U: 1

Fator ocupação – T: 1/16

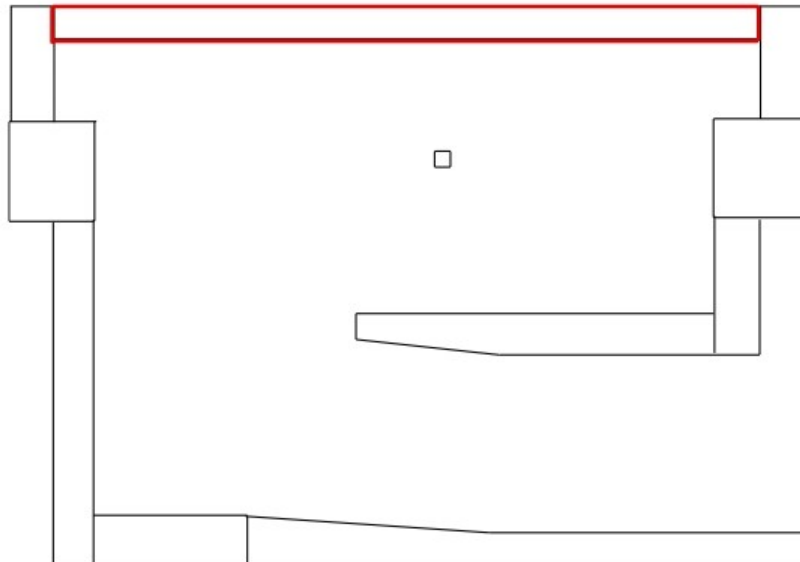


Figura 8: Planta baixa da sala de radioterapia mostrando a parede D.

Tabela 6: Valores das espessuras calculadas para a parede D.

Parede D (valores calculados em cm)			
Espalhada		Fuga	
Limitação	Otimização	Limitação	Otimização
39,77	11,88	66,82	9,70

Parede E

A parede E (figura 9) foi dividida em duas partes, parte adjacente à calçada e adjacente ao anfiteatro. Esta parede recebe radiação secundária. Como a diferença entre as espessuras calculadas pelos métodos da Otimização e Limitação não foi superior a TVL_1 , foi acrescentado 1 HVL a maior espessura obtida, que no caso foi pelo método da Limitação (tabela 7).

Fator Uso – U: 1

Fator ocupação – T: 1/16

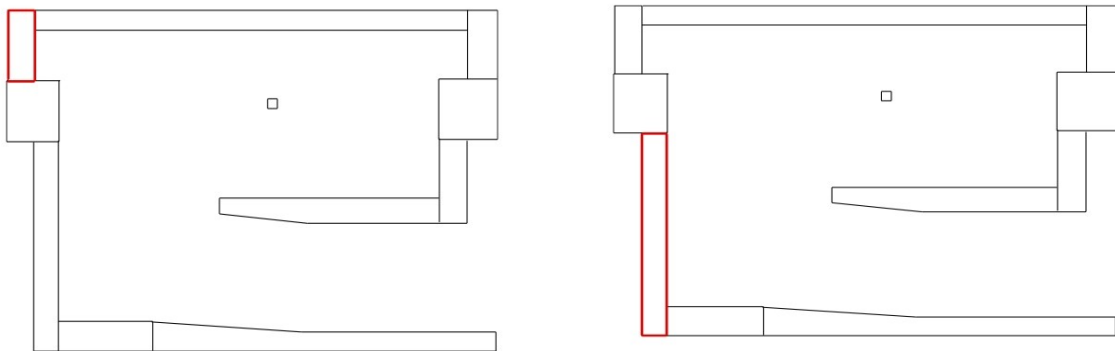


Figura 9: Planta baixa da sala de radioterapia mostrando a parede E.

Tabela 7: Valores das espessuras calculadas para a parede E.

Parede E (valores calculados em cm)							
Calçada				Anfiteatro			
Espalhada		Fuga		Espalhada		Fuga	
Limitação	Otimização	Limitação	Otimização	Limitação	Otimização	Limitação	Otimização
83,30	66,50	61,97	40,40	83,20	77,00	61,91	52,05
+1HVL =		+1HVL =		+1HVL =		+1HVL =	
91,70		71,30		91,60		71,24	

Parede F

O fator ocupação da Parede F (figura 10) foi dividido em duas partes, parte adjacente à sala de máscaras e adjacente às bombas do chiler. Esta parede recebe radiação secundária. Como a diferença entre as espessuras calculadas pelos métodos da Otimização e Limitação não foram superior a TVL1, acrescentou-se um HVL a maior espessura obtida, no caso, pelo método da Limitação (tabela 8).

Fator Uso – U: 1

Fator ocupação – T: 1

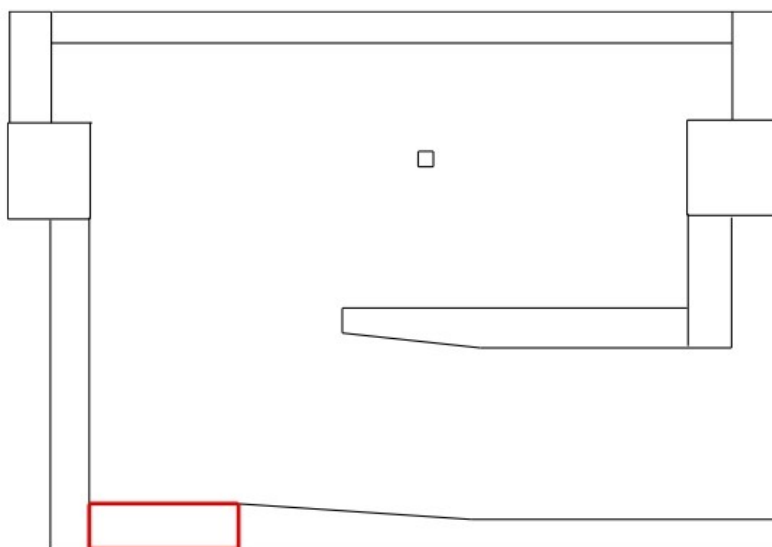


Figura 10: Planta baixa da sala de radioterapia mostrando a parede F.

Tabela 8: Valores das espessuras calculadas para a parede F.

Parede F (valores calculados em cm)							
Sala de máscaras				Bombas			
Espalhada		Fuga		Espalhada		Fuga	
Limitação	Otimização	Limitação	Otimização	Limitação	Otimização	Limitação	Otimização
103,34	76,20	84,17	39,50	74,76	22,20	52,53	- 1,00
+1HVL=							
111,70							

Analisando a tabela 8 pode-se perceber que o valor calculado pela otimização referente ao fator ocupação das bombas, resultou em espessura negativa.

Parede G:

Esta parede (figura 11) recebe radiação secundária, pois se localiza atrás de uma parede primária, constituindo o labirinto. Como a diferença entre as espessuras calculadas pelos métodos da Otimização e Limitação não foi superior a TVL_1 , acrescentou-se 1 HVL a maior espessura obtida, no caso, pelo método da Limitação (tabela 9).

Fator Uso – U: 1

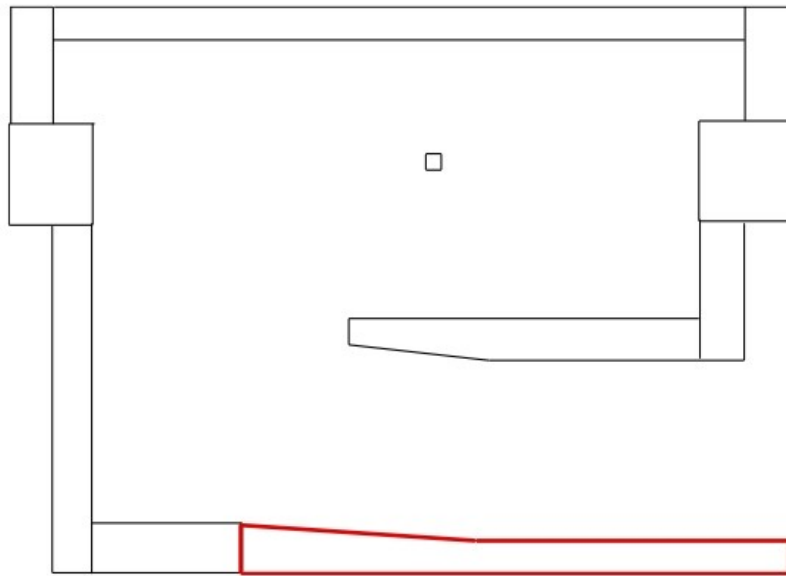


Figura 11: Planta baixa da sala de radioterapia mostrando a parede G.

Tabela 9: Valores das espessuras calculadas para a parede G.

Parede G (valores calculados em cm)	
Limitação	Otimização
9,27 cm	1,18 cm

Parede H

Esta parede (figura 12) recebe radiação secundária. Como a diferença entre as espessuras calculadas pelos métodos da Otimização e Limitação foram superior a TVL_1 , não se acrescentou 1 HVL, sendo usada a maior espessura calculada, que foi obtida pelo método da Limitação (tabela 10).

Fator Uso – U: 1

Fator ocupação – T: 1/4

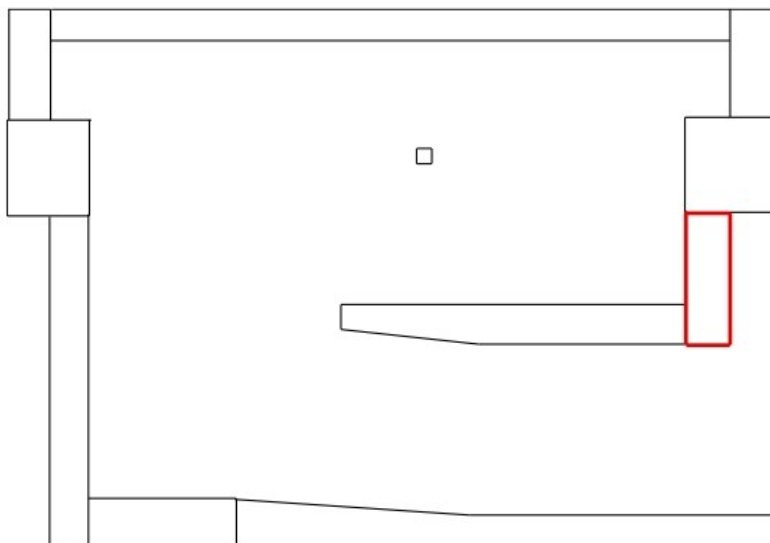


Figura 12: Planta baixa da sala de radioterapia mostrando a parede H.

Tabela 10: Valores das espessuras calculadas para a parede H.

Parede H (valores calculados em cm)				
Secundária				
Espalhada		Fuga		
Limitação	Otimização	Limitação	Otimização	
102,20	68,60	82,92	42,70	

Teto

Como não existe nenhum tipo de construção neste local, o mesmo foi considerado área inacessível. Para esta área foi considerado o método da radiação de “Sky-shine”, de acordo com a norma NCRP-51, para um campo de 20 cm x 20 cm a 1 m da fonte.

Para o cálculo da blindagem do teto utilizou-se dos mesmos procedimentos aplicados para a blindagem do Setor de Radioterapia da Unesp de Botucatu realizados no ano 2000. No entanto, o NCRP 51 aboliu o método da “radiação de sky shine”, exigindo que no teto se calcule barreira primária. Dessa maneira, foi obtida uma espessura calculada de 11,50 cm.

Porta

Considerando os valores calculados para a radiação espalhada e radiação de fuga, assim como para nêutrons e fótons de captura, foi obtido uma espessura de valor negativo, o que indica ausência de barreira. Sabendo que a porta deve ser construída com chumbo, foi considerado uma construção prévia de 2 mm Pb. Com essa avaliação a espessura da porta passou a ser de 1,20 cm.

Para equipamentos que possuam energias superiores a 10MV, a blindagem para nêutrons se torna necessária.

5 – Discussão

O fator ocupação é um ponto que deve ser levado em consideração, de forma a alterar o cálculo de forma significativa. Na parede B por exemplo, o fator ocupação usado no cálculo de blindagem é referente a calçada adjacente e ao anfiteatro, e portanto o cálculo será alterado conforme alteração desses valores e pela distância do alvo até o ponto a ser protegido. Esse é um fator de extrema importância, já que é mais prejudicial uma pessoa estar parada durante muito tempo em um lugar mais distante do ponto a ser protegido, do que centenas de pessoas passando rapidamente em um ponto adjacente ao ponto a ser protegido. Pode-se analisar essas informações nos resultados referentes a parede B, onde a maior espessura calculada foi referente ao fator ocupação do anfiteatro, local mais afastado, com menor número de pessoas, porém com tempo de ocupação maior, resultando em um fator ocupação maior.

6 - Conclusão

A tabela 11 apresenta os valores de dose medidos para todas as paredes da sala de radioterapia [7], referente a carga de trabalho proporcional a fótons de energia de 6 e 10 MV, a somatória desses valores para energias de 6 e 10 MV, e a carga de trabalho total supondo que todos os feixes de fótons são de 10 MV. Nesta tabela consta somente energias de fótons, uma vez que elétrons não contribuem significativamente para a dose. Conforme pode-se observar, as doses medidas (colunas 1, 2 e 3) estão abaixo do limite semanal de dose permitida (20 $\mu\text{Sv/semana}$).

Tabela 11: Valores da dose transmitida por cada parede referentes a fótons de 6 MV, 10 MV, o somatório para estas energias e considerando toda a carga de trabalho proveniente de fótons de 10 MV.

Dose transmitida ($\mu\text{Sv/semana}$) para diferentes energias de fótons				
	considerando W só para 6 MV	considerando W só para 10 MV	considerando a soma de ambos (6 MV+10 MV)	considerando que toda W seja de 10 MV
Parede A	3,42	7,39	10,80	20,00
Parede B	2,78	1,40	4,18	7,51
Parede C	6,80	7,73	14,00	20,00
Parede D	10,03	7,52	17,55	20,00
Parede E	1,23	1,15	2,38	3,11
Parede F	1,26	1,30	2,56	3,51
Parede G	1,26	1,30	2,56	3,51
Parede H	1,16	1,51	2,67	5,47

A terceira coluna da tabela 11 apresenta os valores reais para as condições de trabalho atuais da sala de radioterapia do HC de Botucatu. Como podemos observar as doses transmitidas pelas paredes que envolvem a sala são menores que o limite permitido. A quarta coluna apresenta o caso em que toda a carga de trabalho seja resultante de fótons de 10 MV. Mesmo neste caso, as doses transmitidas estão abaixo do limite permitido, com exceção das paredes A, C, D que estão no limite.

A tabela 12 compara as espessuras calculadas em 2000 com as espessuras calculadas hoje, considerando os fatores atuais. É fácil perceber uma superestimativa da espessura das paredes do setor. Essa diferença corresponde ao conservadorismo do cálculo, por questão de segurança, para a realização do cálculo de blindagem. Vale ressaltar que a CNEN dificilmente aprova um projeto que utiliza condições extremamente reais, justamente por ser comum as condições de serviço mudar, como aumento da carga de trabalho, ou até mesmo a construção de algum local adjacente ao setor que não estava planejado.

Tabela 12: Comparação entre as espessuras construídas e as espessuras calculadas com os fatores reais e atuais do setor de radioterapia.

Parede	Espessura calculada em 2000 (cm)	Espessura atual calculada (cm)
A	190,0	165,0
B	210,0	166,0
C	110,0	80,0
D	115,0	67,0
E	115,0	92,0
F	115,0	112,0
G	60,0	20,0
H	115,0	105,0
Teto	26,0*	12,0

* Por medida de segurança, o teto foi construído com espessura de 70 cm

Se levarmos em consideração a diferença entre as espessuras construídas e calculadas, a somatória dessa diferença totalizaria um volume excedente de 82,32 m³ de concreto. Esse valor daria uma diferença de U\$41.160,00 na construção de um serviço de radioterapia. Um valor que pode ser considerado alto, mas quando se pensa em valores de tratamento percebe-se que é um valor irrisório, um valor que faria diferença a curto prazo, mas que não interferiria em número de tratamento feitos em um setor.

Conclui-se portanto que a proteção radiológica do setor de radioterapia de Botucatu está dentro dos limites exigidos pela CNEN, e que as barreiras poderiam suportar um aumento de pacientes a ser tratados por dia.

7 - Referências Bibliográficas

[1] Disponível em <http://www.oncologiaalentejo.com/historia-no-mundo> acessado 17/07/2017

[2] Brasil. Ministério da Saúde. Instituto Nacional de Câncer-INCA.

Blindagem em radioterapia: técnica e normas. Rio de Janeiro:

INCA, 2000

[3] Agência Internacional de Energia Atômica, “Efeitos biológicos da radiação”.

[4] KHAN, Faiz M. The physics of radiation therapy 3ed. Filadélfia: Lippincott W & W, 2003. 560 p.

[5] De Lima, Bruna. Junior, Luiz. Lopreto, Camila. Junior, Paulo. Basaglia, Redemilson. Modalidades da Radioterapia: Teleterapia, Braquiterapia e Radiocirurgia.

[6] Tauhata, L., Salati, I. P. A., Di Prinzio, R., Di Prinzio, M. A. R. R. Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos - 10ª revisão abril/2014 - Rio de Janeiro - IRD/CNEN. 344p

[7] Costa, Suelen S. Análise do índice de transmissão da radiação da sala do acelerador linear do Hospital das Clínicas da Faculdade de Medicina de Botucatu e mapeamento com dosímetro TLD. 2017. 27 p. Monografia - Unesp Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2017

Programa de Qualidade em Radioterapia

Blindagem em radioterapia – Técnicas e Normas

Diretrizes Básicas de Radioproteção

CNEN – NN – 3.01

Publicada no Diário Oficial da União em janeiro de 2005

Requisitos de Radioproteção e Segurança para Serviços de Radioterapia

CNEN – NE – 3.06

Publicada no Diário da União em 30 de março de 1990

National Council on Radiation Protection and Measurements

STRUCTURAL SHIELDING DESIGN AND EVALUTION FOR MEDICAL USE OF X
RAYS AND GAMMA RAYS OF ENERGIES UP TO 10Mev NCRP Report 49

National Council on Radiation Protection and Measurements

RADITION PROTECTION DESIGN GUIDELINES FOR 0.1-100Mev PARTICLE
ACCELERATOR FACILITOTIES

NCRP Report 51

National Council on Radiation Protection and Measurements

STRUCTURAL SHIELDING DESIGN AND EVALUTION FOR MEGAVOLTAGE X -
AND GAMMA RAYS RADIOTHERAPY FACILITIES

NCRP Report 151