



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de Botucatu

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

INSTITUTO DE BIOCÊNCIAS

*Cálculo de Blindagem para sala de Radioterapia de
Ortovoltagem – Atualizações Tecnológicas*

Karine Mey Kitahara

Botucatu, São Paulo
2025

***Cálculo de Blindagem para sala de Radioterapia de
Ortovoltagem – Atualizações Tecnológicas***

Karine Mey Kitahara

**Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Biociências da
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho”, Campus de Botucatu,
como parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Física Médica.**

Orientador: Prof. Associado Dr. Marco Antônio Rodrigues Fernandes

Botucatu, São Paulo
2025

M613c Mey Kitahara, Karine
Cálculo de Blindagem para sala de Radioterapia de Ortovoltagem –
Atualizações Tecnológicas / Karine Mey Kitahara. -- Botucatu, 2025
73 f. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Física Médica) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Biociências,
Botucatu
Orientador: Marco Antônio Rodrigues Fernandes

1. Cálculo de Blindagem. 2. Ortovoltagem. 3. Radioterapia. 4.
Proteção Radiológica. I. Título.

KARINE MEY KITAHARA

CÁLCULO DE BLINDAGEM PARA SALA DE ORTOVOLTAGEM – ATUALIZAÇÕES TECNOLÓGICAS

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado a Universidade Estadual
Paulista, como parte das exigências
para a obtenção do título de Bacharel,
do curso de Graduação em Física
Médica.

Botucatu, 6 de Novembro de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Associado Dr. Marco Antonio Rodrigues Fernandes
Departamento de Infectologia, Dermatologia, Diagnóstico por Imagem e
Radioterapia - FMB

Prof. Joel Mesa Hormaza
Departamento de Física e Biofísica - IBB

Prof. Bianca de Fátima Pinheiro Fabri Ramos
FMVZ – Animais Selvagens

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a todos que estiveram ao meu lado nos momentos mais importantes da minha vida, me dando proteção, apoio e ajuda, tornando possível que eu superasse desafios e alcançasse minhas conquistas.

Ao Professor Dr. Marco Antônio Rodrigues Fernandes, por toda paciência, disponibilidade e dedicação ao longo deste trabalho, além de todo o conhecimento compartilhado e pela forma como sempre esteve disposto a me ensinar e a me ajudar.

Aos meus pais, Elaine Akemi Kitahara e Adelino Yoshihiro Kitahara, e à minha irmã, Nicolay Aya Kitahara, por toda ajuda e pelo incentivo constante, sempre demonstrando orgulho de minhas conquistas. Graças a vocês, pude concluir minha graduação e realizar este sonho.

Ao meu namorado, Rafael Makoto Chibana, por sempre me apoiar, acreditar em mim e me incentivar a seguir em frente, mesmo nos momentos mais desafiadores. Sua presença foi essencial para que eu chegasse até aqui.

Às minhas amigas de república, pela amizade, pela convivência e por todos os momentos compartilhados. Em especial, à Roberta (Balalaika), Beatriz (Pokas) e Ana Giulia (Tigresa), por tornarem essa jornada mais leve e divertida.

Encerro expressando minha gratidão por todas as experiências e aprendizados vividos ao longo desta trajetória, que tornaram esta conquista ainda mais valiosa e significativa.

RESUMO

A radioterapia é uma modalidade terapêutica muito importante no tratamento do câncer, em que é utilizada radiação ionizante para destruir células tumorais. Os procedimentos de radioterapia requerem salas de tratamento que devem possuir blindagens às radiações ionizantes emitidas pelos respectivos equipamentos de irradiação. A radioterapia de ortovoltagem usa feixes de radiação de baixa penetração, sendo indicados para o tratamento de lesões localizadas na superfície corporal, e representa uma alternativa eficaz e de baixo custo. Com a recente oferta de modernos e tecnologicamente atualizados equipamentos de ortovoltagem, estudos que demonstrem a sua exequível e eficiente utilização devem ser estimulados mediante pesquisas científicas e aplicações práticas. O trabalho foi desenvolvido através de planilhas no software Excel da Microsoft e os dados radiométricos dos equipamentos de ortovoltagem, as dimensões físicas da sala de radioterapia, as características dos materiais usados na construção das barreiras de proteção e as informações de carga de trabalho da clínica de radioterapia foram inseridos na rotina computacional. Mediante algoritmos matemáticos preconizados nos protocolos internacionais de cálculo de blindagem e de dosimetria de feixes de kilovoltagem, foram realizados os cálculos para se determinar as espessuras das barreiras de radioproteção usadas nas salas de radioterapia de ortovoltagem. A análise incluiu os manuais dos equipamentos e os croquis das salas fornecidos pelos responsáveis técnicos. Os resultados mostraram que as diferentes metodologias aplicadas ao cálculo de blindagem para ortovoltagem produziram valores que variam significativamente em relação às espessuras utilizadas no projeto real da sala com o equipamento WCR da Safe Life. Métodos baseados em relatórios da NCRP para megavoltagem tendem a superdimensionar as barreiras, enquanto aqueles voltados ao radiodiagnóstico, embora mais compatíveis com a faixa energética da ortovoltagem, são limitados para feixes acima de 150 kVp. Assim, o estudo evidencia a necessidade de ajustes específicos nos modelos de cálculo, contribuindo para o desenvolvimento de projetos de blindagem mais adequados, seguros e alinhados às características atuais dos equipamentos de ortovoltagem.

Palavras-chave: Radioterapia. Blindagem. Ortovoltagem. Raios-X. Proteção Radiológica.

ABSTRACT

Radiotherapy is a very important therapeutic modality in cancer treatment, in which ionizing radiation is used to destroy tumor cells. Radiotherapy procedures require treatment rooms that must include shielding against the ionizing radiation emitted by the respective irradiation equipment. Orthovoltage radiotherapy uses low-penetration radiation beams, indicated for treating lesions located on the body surface, and represents an effective and low-cost alternative. With the recent availability of modern and technologically updated orthovoltage equipment, studies that demonstrate its feasible and efficient use should be encouraged through scientific research and practical applications. The work was developed using spreadsheets in Microsoft Excel, and the radiometric data of the orthovoltage equipment, the physical dimensions of the radiotherapy room, the characteristics of the materials used in the construction of the protective barriers, and the workload information of the radiotherapy clinic were inserted into the computational routine. Using mathematical algorithms recommended in international protocols for shielding calculations and kilovoltage beam dosimetry, calculations were performed to determine the thicknesses of the protective barriers used in orthovoltage radiotherapy rooms. The analysis included the equipment manuals and the room schematics provided by the technical staff. The results showed that the different methodologies applied to shielding calculations for orthovoltage produced values that vary significantly in relation to the thicknesses used in the actual design of the room containing the WCR equipment from Safe Life. Methods based on NCRP reports intended for megavoltage tend to oversize the barriers, while those aimed at diagnostic radiology, although more compatible with the energy range of orthovoltage, are limited for beams above 150 kVp. Thus, the study highlights the need for specific adjustments in the calculation models, contributing to the development of shielding designs that are more appropriate, safe, and aligned with the current characteristics of orthovoltage equipment.

Keywords: Radiotherapy. Shielding. Orthovoltage. X-rays. Radiation Protection.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Distribuição de isodose para diferentes energias de feixe: A) Ortovoltagem (200 kVp, SSD = 50 cm); B) Telecobalto (Co-60, SSD = 80 cm); C) Acelerador linear - 4 MV (SSD = 100 cm); D) Acelerador linear - 10 MV (SSD = 100 cm)	6
Figura 2 Equipamento de radioterapia ortovoltagem WCR 200 montado no suporte de piso	8
Figura 3 Esquema das fontes de radiação (primária, de fuga e espalhada pelo paciente) e das barreiras primária e secundária	11
Figura 4 Dimensões mínimas - amplitude parcial - WCR 100	13
Figura 5 Dimensões mínimas - WCR 150 a 300	14
Figura 6 Planta ilustrativa da sala de tratamento com inserção de medidas - WCR 100	34
Figura 7 Planta ilustrativa da sala de tratamento com inserção de medidas - WCR 150 a 300	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 Especificações dos tubos de Raio-X	14
Quadro 2 Fator de Uso (U) - Feixe primário	16
Quadro 3 Limites de Doses Anuais - CNEN 3.01	16
Quadro 4 Fator Ocupacional (T) - Para paredes da Sala de Radioterapia	17
Quadro 5 Camada décimo-redutora (CDR) para o concreto e chumbo.....	18
Quadro 6 Fatores de uso do feixe primário (U) para uma sala de radiografia geral.....	23
Quadro 7 Limite de Dose Semanal pela NCRP 147 e Portaria Anvisa nº 453	23
Quadro 8 Espessuras de Parede Calculadas para Sala de Radioterapia do Equipamento WCR 100	26
Quadro 9 Espessuras de Parede Calculadas para Sala de Radioterapia dos Equipamentos WCR 150 a 300	26
Quadro 10 Espessuras de Parede Calculadas para Parede C com o Método de Archer...	27
Quadro 11 Espessuras de parede apresentados pelo fornecedor responsável pelo projeto das salas.....	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALARA	As Low As Reasonably Achievable
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
CDR	Camada Décimo-Redutora
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CSR	Camada Semi-Redutora
DNA	Ácido Desoxirribonucleico
IAEA	International Atomic Energy Agency
IARC	International Agency for Research on Cancer
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ICRU	International Commission on Radiation Units and Measurements
INCA	Instituto Nacional de Câncer
IOE	Indivíduos Ocupacionalmente Expostos
LINAC	Acelerador Lineares Clínico
NCRP	National Council on Radiation Protection and Measurements
OMS	Organização Mundial da Saúde
RPAS	Relatório Preliminar de Análise de Segurança
TBI	Total Body Irradiation

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Objetivos	4
2.1. Objetivo Geral	4
2.2. Objetivos Específicos	4
2.3. Justificativa	4
3. Revisão Bibliográfica	5
3.1. Câncer	5
3.2. Radioterapia	5
3.3. Proteção Radiológica	8
3.4. Cálculo de Blindagem	9
4. Materiais e métodos	13
4.1 Características dos equipamentos de ortovoltagem	13
4.2 Fatores para o Cálculo de Blindagens para aparelhos de Radioterapia	15
4.2.1 Carga de Trabalho - W	15
4.2.2 Fator Uso - U	15
4.2.3 Limite Máximo Permitido de Dose Equivalente - P(H)	16
4.2.4 Fator Ocupacional - T	17
4.2.5 Materiais Atenuadores	17
4.3 Equações para o Cálculo das Espessuras das Barreiras - Aparelhos de Radioterapia	18
4.3.1 Espessura (t)	19
4.3.2 Barreira Primária	19
4.3.3 Barreiras Secundárias	20
4.4 Fatores para o Cálculo de Blindagens de aparelhos de Radiodiagnóstico	22
4.4.1 Carga de Trabalho - W	22
4.4.2 Fator Uso - U	22
4.4.3 Fator Ocupacional - T	23
4.4.4 Limite de Dose Semanal - P	23
4.5 Equações para o Cálculo das Espessuras das Barreiras - Aparelhos de Radiodiagnóstico	23
4.5.1 Barreira Primária	23
4.5.2 Barreira Secundária	24
5. Resultados	26
6. Discussão e Conclusão	28
7. Referências	30
Apêndice	33

1. Introdução

O câncer é uma doença que pode ser caracterizada pelo crescimento descontrolado de células que podem invadir tecidos e órgãos próximos comprometendo seu funcionamento. A doença abrange um conjunto de mais de 100 tipos diferentes que são classificados de acordo com a origem e o comportamento celular (INCA, 2020).

De acordo com o Instituto Nacional de Câncer (INCA), são esperados 704 mil casos novos de câncer no Brasil para cada ano do triênio 2023-2025 (INCA, 2022).

As células do organismo possuem um ciclo de crescimento e multiplicação regulado, no qual a maioria cresce, se divide e morre de maneira ordenada. No entanto, em casos de câncer, esse mecanismo é alterado, podendo resultar na formação de células anormais que se proliferam de forma acelerada e incontrolável. Essa divisão desordenada pode originar tumores, que podem ser malignos (câncer) e não malignos (não câncer). Os tumores do tipo não malignos são caracterizados por um crescimento limitado e organizado, enquanto os tumores malignos possuem grande capacidade de invasão e metástase, afetando diferentes regiões do corpo (INCA, 2020).

As principais modalidades terapêuticas usadas para o tratamento do câncer são: 1) cirurgia; 2) radioterapia e 3) quimioterapia. A radioterapia desempenha um papel essencial no tratamento da doença. Pesquisas indicam que entre 50% a 70% dos pacientes diagnosticados com câncer irão precisar de radioterapia em alguma fase do tratamento, o que demonstra a importância dessa modalidade terapêutica nos serviços de saúde voltados ao câncer (IAEA, 2024).

Atualmente, o Brasil conta com 315 serviços de radioterapia autorizados pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), responsáveis por oferecer tratamentos com radiações ionizantes. Essas unidades precisam estar devidamente registradas e seguir as normas de segurança e funcionamento estabelecidas pela CNEN, que atua na fiscalização das instalações, garantindo a qualidade e segurança dos serviços realizados (CNEN, 2025).

A radioterapia é uma modalidade terapêutica que utiliza radiação ionizante para destruir ou inibir o crescimento das células cancerosas. Ela se divide em teleterapia e braquiterapia (SCAFF, 2010).

Na teleterapia, a fonte de radiação está posicionada a uma certa distância da lesão a ser tratada. Em equipamentos de raios-X de energia convencional (70 kV a 250 kV), na faixa de energia de ortovoltagem, essa distância varia entre 30 cm e 50 cm. Nos equipamentos de megavoltagem, tem-se as Unidades de Telecobaloterapia com distância de tratamento de 80,0

cm e os aceleradores lineares clínicos (LINACs), com distâncias de 100,0 cm. Na braquiterapia, a fonte radioativa é posicionada diretamente na lesão, podendo estar em contato ou até mesmo inserida no tecido afetado (FERNANDES, 2000).

A radioterapia de ortovoltagem, também denominada radioterapia superficial, corresponde a uma modalidade terapêutica que utiliza feixes de raios-X com energias entre 100 e 300 kVp. Por suas características físicas, os feixes possuem baixa penetração, sendo indicados para o tratamento de lesões localizadas próximas à superfície (INCA, 2020).

Os aparelhos utilizados para esse tipo de terapia incluem um tubo de raios-X instalado em um cabeçote, sustentado por uma estrutura fixa conhecida como estativa, que serve de suporte para o braço mecânico do equipamento. Além disso, a configuração inclui um console de controle e uma mesa de posicionamento, possibilitando a aplicação precisa do tratamento conforme a área afetada (INCA, 2020).

Com o avanço das tecnologias em radioterapia, a ortovoltagem acabou sendo deixada de lado em muitos centros de tratamento. No entanto, por sua eficácia no tratamento de lesões superficiais e pelo menor custo em comparação com outros equipamentos mais modernos, essa técnica voltou a ser adotada em algumas instituições. Utilizando feixes de radiação com tensões baixas, a ortovoltagem é adequada para tratar neoplasias de pele e outras alterações localizadas na superfície. Além disso, seu uso com acessórios como cones e blindagens locais permite maior controle da área irradiada, o que contribui para a segurança do paciente (INCA, 2004).

A distribuição de dose de radiação varia significativamente entre os equipamentos de ortovoltagem, telecobalto e aceleradores lineares (LINACs). A ortovoltagem, com feixes de baixa energia (100-300 kVp), apresenta máxima dose na superfície e rápida atenuação, sendo indicada para lesões cutâneas e superficiais. Já na telecobaltoterapia, se utiliza radiação gama de energia clínica igual a 1,25 MeV (média entre os picos energéticos do Co-60: 1,17 MeV e 1,33 MeV), oferecendo maior penetração e profundidade de dose máxima a cerca de 0,5 cm da pele, ideal para tumores de profundidade moderada. E por fim, os LINACs, com feixes de alta energia (4 a 25 MeV), promovem maior preservação da pele devido ao efeito de build-up, alcançando a dose máxima a profundidades de até 3 cm, sendo os mais indicados para tumores profundos e tratamentos com maior conformidade.

Os procedimentos de radioterapia, quer sejam de megavoltagem ou ortovoltagem, requerem salas de tratamento que devem possuir blindagens às radiações ionizantes emitidas pelos respectivos equipamentos (teleterapia ou braquiterapia) utilizados na rotina da clínica

radioterápica. O uso de fontes de radiações ionizantes deve se dar de forma segura e garantindo a preservação do meio ambiente quanto aos efeitos deletérios das radiações.

Em radioterapia, o termo blindagem refere-se ao conjunto de barreiras físicas projetadas para conter e atenuar a radiação ionizante durante o tratamento, impedindo que ela ultrapasse os limites da sala e cause exposição indevida em áreas adjacentes. A necessidade dessa proteção está diretamente relacionada à distribuição de dose ao redor da sala, já que parte da radiação gerada durante o tratamento pode se propagar por paredes, portas, tetos e pisos. Por isso, o projeto da blindagem deve levar em conta fatores como a energia do feixe, a direção predominante da radiação, a frequência de uso do equipamento e a ocupação das áreas vizinhas, assegurando que a dose nesses locais permaneça dentro dos limites aceitáveis de exposição.

A elaboração das planilhas de cálculos de blindagem envolve o conhecimento dos parâmetros radiométricos das fontes emissoras, bem como o layout (plantas arquitetônicas) do ambiente e de suas vizinhanças, além de conhecimento específico de física médica e proteção radiológica.

Sendo assim, o cálculo de blindagem em salas de radioterapia é fundamental para proteger pacientes, profissionais e o público contra a exposição à radiação ionizante. No Brasil, esse processo deve seguir as normas da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), que exigem a elaboração do Relatório Preliminar de Análise de Segurança (RPAS) para garantir que os níveis de radiação fora da sala estejam dentro dos limites permitidos. A Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) também contribui com normas que estabelecem boas práticas para o funcionamento seguro dos serviços de radioterapia, reforçando a importância da proteção radiológica.

Além disso, o relatório NCRP 151 é amplamente utilizado também como referência técnica para o dimensionamento das barreiras de proteção, oferecendo parâmetros que contribuem para o cálculo de blindagem. Adicionalmente, o NCRP 147, focado em instalações de diagnóstico por raios X (na faixa de kilovoltagem), oferece também modelos e parâmetros atualizados que são aplicáveis e relevantes para o dimensionamento de blindagens em radioterapia de ortovoltagem.

Este trabalho visa elaborar um estudo e dimensionamento das paredes de uma sala de radioterapia de ortovoltagem para equipamentos com modernas concepções, conforme propostas comerciais originadas nos últimos dois anos. As dimensões das blindagens determinadas neste estudo serão comparadas com aquelas já existentes em salas de ortovoltagem convencional.

2. Objetivos

2.1. Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo realizar o cálculo de blindagem de uma sala de radioterapia de ortovoltagem, determinando as espessuras adequadas das paredes para garantir a segurança radiológica do ambiente. Pretende-se apresentar os parâmetros físicos e radiométricos dos materiais empregados e feixes de radiação com energia na faixa de ortovoltagem.

2.2. Objetivos Específicos

Calcular as dimensões e espessuras das paredes de uma sala projetada para a realização de radioterapia com raios-X de ortovoltagem, considerando os requisitos de segurança radiológica, e analisar as especificidades necessárias para a blindagem de uma sala onde se pretenda instalar os modernos equipamentos de ortovoltagem.

2.3. Justificativa

Embora os equipamentos de ortovoltagem básicos e convencionais para aplicação em radioterapia tenham entrado em desuso, recentemente surgiram novas propostas de comercialização de modernos equipamentos que utilizam esta faixa de energia e com sistemas de imagens e controle de qualidade atualizados, e que permitem melhor distribuição de dose de radiação.

Todavia, ainda não há na literatura estudos mais detalhados dos cálculos de blindagem para salas de teleterapia destinadas para estes modernos equipamentos de ortovoltagem.

Desta forma, este trabalho poderá contribuir para o incentivo de novos projetos de instalações de clínicas de radioterapia que busquem modalidades terapêuticas mais acessíveis para o tratamento de lesões indicadas para feixes de radiação de baixa energia, tais como lesões câncer de pele e quelóides.

A destinação deste tipo de equipamento de teleterapia poderá ainda contribuir para reduzir o uso dos aceleradores lineares, os quais são equipamentos sofisticados e de alto custo, que utilizam energias de megavoltagem, destinando-os para os tratamentos mais profundos, assistindo assim um maior número de doentes de câncer.

3. Revisão Bibliográfica

3.1. Câncer

O câncer é uma das principais causas de morte no mundo e continua sendo um grande desafio para os sistemas de saúde pública. Segundo dados da Organização Mundial da Saúde (OMS) e da Agência Internacional para Pesquisa em Câncer (IARC), mais de 20 milhões de novos casos foram registrados em 2022, e estima-se que esse número ultrapasse 35 milhões até 2050. Esse crescimento mostra o impacto global da doença, especialmente em países com menos acesso a diagnóstico precoce e tratamento adequado (OMS; IARC, 2024).

O câncer pode ser definido como um conjunto de doenças causadas por alterações genéticas e epigenéticas que conferem às células a capacidade de proliferar de maneira descontrolada, resistir à morte celular, invadir tecidos e escapar da vigilância imunológica. Essas transformações comprometem os mecanismos normais de regulação do crescimento celular, reparo do DNA e interação com o microambiente tecidual, levando à formação de tumores e, frequentemente, à disseminação para outros órgãos, fenômeno conhecido como metástase. O entendimento das características funcionais adquiridas por essas células (conhecidas como marcas do câncer) é fundamental para o desenvolvimento de terapias oncológicas mais específicas e eficazes (HANAHAHAN, 2022).

3.2. Radioterapia

A radioterapia é um tratamento que usa radiações ionizantes para destruir células cancerígenas ou impedir que elas se multipliquem. Ela é uma das terapias mais usadas contra o câncer e pode ser aplicada sozinha ou junto com cirurgia e quimioterapia. Cerca de metade dos pacientes com câncer faz uso da radioterapia em alguma fase do tratamento (BASKAR et al., 2012).

Dentro dos tratamentos de radioterapia, é possível classificar em duas modalidades: braquiterapia e radioterapia externa ou conhecida também como teleterapia, conforme a posição da fonte de radiação. Na braquiterapia, a fonte é inserida no interior do corpo, próxima ou dentro do tumor. Já na radioterapia externa, que representa cerca de 90% dos tratamentos, a radiação é aplicada a partir de uma fonte externa direcionada ao tumor enquanto o paciente permanece posicionado sobre uma mesa. Nessa modalidade, são utilizados equipamentos como aceleradores lineares (LINACs) e unidades de cobalto (SIMÕES, 2018).

As técnicas de radioterapia externa podem ser classificadas conforme a energia do feixe utilizado e o tipo de equipamento. A ortovoltagem utiliza raios X com energias entre 150 e 500 kV, sendo indicada principalmente para tumores superficiais, devido à sua baixa penetração. Já a teleterapia por cobalto-60, conhecida como telecobalto, emprega radiação gama com energia em torno de 1,25 MeV, permitindo atingir tumores mais profundos, embora com menor precisão geométrica comparada a tecnologias mais modernas. O acelerador linear (LINAC), por sua vez, é o equipamento mais utilizado atualmente, capaz de produzir feixes de fótons ou elétrons com energias que variam de 4 a mais de 20 MeV, oferecendo maior penetração, precisão e conformação da dose no volume tumoral (INCA, 2020).

As curvas de isodose variam conforme a energia do feixe. Nos feixes de ortovoltagem (kVp), o espalhamento lateral é maior, gerando mais dose fora do campo principal. Já nos feixes de megavoltagem (como Co-60 e aceleradores), a distribuição é mais estreita com um espalhamento maior para frente. A região central nem sempre é totalmente uniforme: pode cair nas bordas (Co-60) ou ter picos de dose (aceleradores). Por isso, são usados critérios de planura e simetria para garantir que o feixe seja homogêneo. A Figura 1 mostra essas diferenças visuais entre as isodoses.

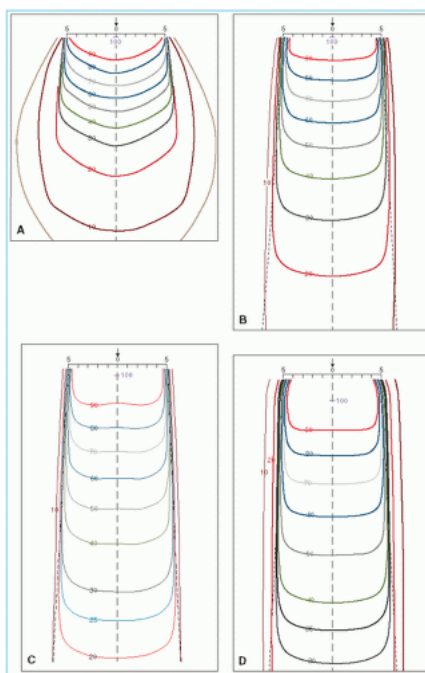


Figura 1 - Distribuição de isodose para diferentes energias de feixe: A) Ortovoltagem (200 kVp, SSD = 50 cm); B) Telecobalto (Co-60, SSD = 80 cm); C) Acelerador linear - 4 MV (SSD = 100 cm); D) Acelerador linear - 10 MV (SSD = 100 cm).

Fonte: Adaptado de Radiology Key (2015).

A chamada radioterapia de ortovoltagem, também conhecida como “terapia profunda”, utiliza raios-X gerados com tensões entre 150 e 500 kV, sendo mais frequente a operação entre 200 e 300 kV, com correntes de 10 a 20 mA. Para melhorar a distribuição da dose em profundidade, são aplicados filtros específicos para alcançar camadas semi-redutoras (CSR). Normalmente, a distância entre a fonte de radiação e a pele do paciente é fixada em 50 cm. Essa técnica é especialmente indicada para o tratamento de lesões mais superficiais, devido à sua limitada penetração no tecido (KHAN, 2014).

Por se tratar de feixes com maior energia que os utilizados na terapia superficial, a ortovoltagem requer condições estruturais específicas, incluindo barreiras de proteção dimensionadas adequadamente para atenuar não apenas o feixe útil, mas também a radiação espalhada e de fuga.

Na ortovoltagem é recomendado que a estação de controle fique do lado de fora da sala de tratamento. As barreiras primárias devem ser projetadas para conter o feixe direto e possuir um fator de uso mínimo de 1/16, conforme indicado nas diretrizes internacionais. Além disso, é importante a instalação de intertravamentos de segurança (interlocks) nas portas de acesso à sala, além de sistemas mecânicos ou eletrônicos que impeçam a incidência do feixe útil sobre barreiras secundárias, que são destinadas à atenuação da radiação espalhada e de fuga. O projeto deve garantir que a radiação fora da sala permaneça dentro dos limites aceitáveis para áreas ocupadas, controladas ou não (NCRP, 1976).

No contexto da radioterapia superficial com ortovoltagem, observa-se uma retomada da utilização de equipamentos modernos com aprimoramentos tecnológicos significativos. Um exemplo representativo dessa nova geração de aparelhos é o WCR 200, desenvolvido com o objetivo de oferecer precisão, segurança e versatilidade no tratamento de lesões localizadas na superfície corporal.

Esse equipamento opera com feixes de raios X de até 220 kV, sendo indicado para tratamentos clínicos superficiais, como neoplasias de pele, lesões paliativas e metástases ósseas. O sistema é composto por um tubo de raios X com tecnologia metal-cerâmica, refrigerado a água, montado em uma estrutura que permite posicionamento preciso do paciente. A forma do campo é definida por aplicadores de diferentes tamanhos e filtros metálicos que ajustam a energia do feixe conforme a profundidade desejada, com camada semi redutora (CSR) de até 2,5 mm de cobre. O sistema de controle permite ajustar os parâmetros do tratamento, registrar dados e garantir a segurança do paciente. Uma câmara de ionização integrada monitora a dose entregue, assegurando precisão e segurança durante a aplicação (SAFE LIFE, 2024).

A Figura 2 ilustra o modelo WCR 200 montado no suporte de piso, com os principais componentes identificáveis, como o cabeçote e o aplicador.



Figura 2: Equipamento de radioterapia de ortovoltagem WCR 200 montado no suporte de piso.

Fonte: Safe Life.

3.3 Proteção Radiológica

A proteção radiológica envolve um conjunto de medidas que visam proteger as pessoas e o meio ambiente dos efeitos nocivos da radiação ionizante. Para isso, são definidos limites de exposição, grandezas radiológicas, métodos de medição, um plano de proteção radiológica e normas específicas para garantir o uso seguro da radiação. As recomendações internacionais da International Commission on Radiological Protection (ICRP) e da International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) servem como base para que cada país estabeleça suas próprias regras de proteção, adaptando-as conforme suas necessidades e tecnologias (TAUHATA et al., 2013).

No Brasil, a responsabilidade pela normatização e fiscalização do uso das radiações ionizantes é feita pelos órgãos: Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Esses órgãos estabelecem limites de dose, requisitos para o funcionamento dos serviços e diretrizes de segurança para ambientes controlados, como as salas de radioterapia.

A norma CNEN NN 3.01 define os princípios básicos de proteção radiológica, enquanto a CNEN NN 6.10 trata especificamente das exigências para instalações de radioterapia, incluindo a necessidade de blindagem adequada e a elaboração do Relatório

Preliminar de Análise de Segurança (RPAS). O RPAS é essencial pois esse documento deve conter os cálculos de blindagem, parâmetros de radiação, estimativas de dose e justificativas técnicas, assegurando que os níveis de exposição nas áreas adjacentes fiquem abaixo dos limites estabelecidos (CNEN, 2024; CNEN 2023).

O relatório NCRP nº 151 da AIEA é um dos documentos mais consultados para o projeto de blindagens em unidades de tratamento com megavoltagem, fornecendo conceitos aplicáveis também a ambientes de ortovoltagem (NCRP, 2005).

O estabelecimento de um serviço de radioterapia demanda um planejamento cuidadoso e uma infraestrutura adequada, na qual a proteção radiológica desempenha papel essencial. Conforme ressaltado pelo Instituto Nacional de Câncer, além da necessidade de barreiras físicas apropriadas, é fundamental o treinamento dos profissionais, o controle rigoroso do acesso às áreas e o monitoramento ambiental contínuo, complementados por programas efetivos de garantia da qualidade (INCA, 2020).

A definição de limites de dose é extremamente importante dentro da proteção radiológica. Para os trabalhadores expostos à radiação (Indivíduos Ocupacionalmente Expostos - IOEs), o limite é de 100 mSv ao longo de cinco anos, não ultrapassando 50 mSv em um único ano. Já para o público em geral, o limite é de 1 mSv por ano. Esses limites são baseados em avaliações de risco e refletem a aplicação do princípio da limitação da dose (CNEN, 2024).

Outro princípio essencial da radioproteção é a justificativa, em que os benefícios da exposição à radiação devem superar os riscos. Associado a ele, está o princípio da limitação de dose que estabelece os limites para a exposição individual, e a otimização que assegura manter as exposições tão baixas quanto razoavelmente possível, fundamentado no conceito ALARA (As Low As Reasonably Achievable) (CNEN, 2024).

A blindagem da sala de tratamento é projetada com base na distinção entre radiação primária e secundária. A radiação primária é aquela emitida diretamente pelo feixe terapêutico, enquanto a radiação secundária inclui a radiação espalhada pelo paciente e pelo ambiente, além da radiação de fuga do equipamento. As barreiras devem ser dimensionadas para atenuar eficazmente ambos os tipos, considerando fatores como carga de trabalho, fator de uso, ocupação e distância (NCRP, 2005).

3.4 Cálculo de Blindagem

Antes da construção de salas de radioterapia, é essencial a elaboração de uma planilha de cálculos de blindagem, na qual são determinadas as espessuras adequadas para cada uma das barreiras de proteção. Esse processo tem como objetivo principal garantir que as doses de radiação nas áreas internas e nas adjacências da instalação permaneçam dentro dos limites de segurança estabelecidos (FERNANDES, 2018).

Sendo assim, o cálculo de blindagem em radioterapia é um processo essencial para garantir que os níveis de radiação fora da sala de tratamento permaneçam abaixo dos limites de exposição ocupacional e pública estabelecidos pelas normas de segurança radiológica. A blindagem visa proteger tanto os profissionais quanto às áreas adjacentes à sala, sendo projetada com base na atenuação da radiação primária, secundária e de fuga, considerando os parâmetros operacionais do equipamento e a ocupação dos ambientes ao redor (NCRP, 2005; CNEN, 2023).

Para garantir a eficácia da blindagem em radioterapia, são utilizados materiais atenuadores capazes de reduzir a intensidade da radiação ao passarem por eles. Esses materiais, como o chumbo e o concreto geralmente possuem alto número atômico (Z) e alta densidade, o que aumenta sua capacidade de absorver a radiação. Essa absorção é essencial para evitar que a radiação se espalhe para fora da sala e atinja áreas vizinhas, garantindo a proteção de quem trabalha no local e também das pessoas que circulam ao redor. (NCRP, 1976; INCA, 2000).

A atenuação ao atravessar um material pode ser descrita pela seguinte equação exponencial:

$$I(x) = I(x_0)e^{-\mu x} \quad (1)$$

Onde $I(x)$ representa a intensidade da radiação após atravessar uma espessura x (em cm), $I(x_0)$ é a intensidade inicial, μ é o coeficiente de atenuação linear do material (em cm^{-1}), e e é a base do logaritmo natural.

Outro princípio físico fundamental é a lei do inverso do quadrado da distância, que estabelece que a intensidade da radiação é inversamente proporcional ao quadrado da distância em relação à fonte. Ou seja, ao dobrar a distância da fonte de radiação, a intensidade cai para um quarto do valor inicial, sendo esse um fator importante quando se trata de proteção radiológica. (NCRP, 1976).

Sendo assim, a dose de radiação depende de diversos fatores como: a) Distância da fonte emissora de radiação, de acordo com a Lei do Inverso do Quadrado da Distância, já

discutida anteriormente; b) Tempo de Exposição, pois quanto maior o tempo em que uma pessoa permanece próxima à fonte, maior será a dose acumulada e c) Blindagem, que é essencial para a proteção radiológica, sendo composta por materiais atenuadores que são colocados entre a fonte de radiação e o ponto de cálculo, reduzindo a intensidade do feixe ao absorver ou dispersar parte da radiação, contribuindo para que os níveis ao redor da sala permaneçam dentro dos limites aceitáveis estabelecidos pelas normas de segurança.

No contexto da radioterapia, a radiação que precisa ser controlada no projeto de blindagem divide-se em dois tipos principais: radiação primária e radiação secundária. A radiação primária (também chamada de feixe útil) é aquela emitida diretamente da fonte - como o tubo de raios X ou o acelerador linear - em direção ao paciente para fins terapêuticos. As barreiras primárias são, portanto, estruturas como paredes, pisos ou tetos que interceptam diretamente esse feixe útil. Essas barreiras devem ser projetadas para atenuar adequadamente não apenas o feixe direto, mas também qualquer componente secundário que incida sobre elas (NCRP, 2005).

A radiação secundária, por sua vez, é composta por dois tipos de emissões: a radiação espalhada, resultante da interação do feixe primário com o paciente ou outros objetos na sala, e a radiação de fuga, que escapa do cabeçote do equipamento por imperfeições ou limitações estruturais, mesmo com colimação adequada. As barreiras secundárias são aquelas que não recebem diretamente o feixe útil, mas sim essa radiação secundária. Assim como as barreiras primárias, elas também devem ser projetadas com espessuras e materiais adequados, de forma a garantir que os níveis de radiação fora da sala estejam abaixo dos limites aceitáveis definidos para cada tipo de área (controlada ou não controlada) (NCRP, 2005; CNEN, 2023).

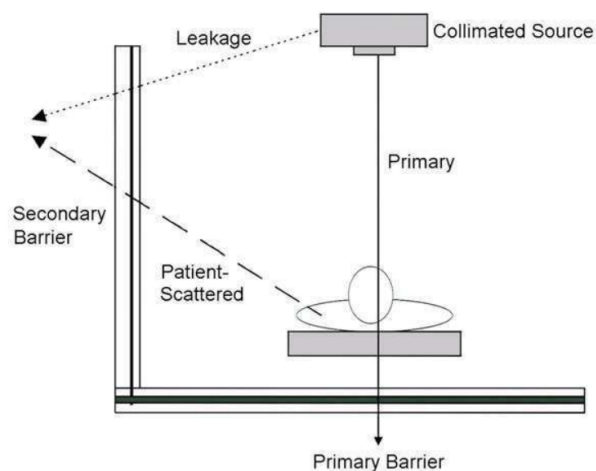


Figura 3: Esquema das fontes de radiação (primária, de fuga e espalhada pelo paciente) e das barreiras primária e secundária.

Fonte: NCRP-151 (2005).

O projeto das barreiras deve levar em consideração variáveis como: Energia do feixe, Carga de trabalho (*workload*), que representa a quantidade de radiação utilizada em uma semana, Fator de uso (U), que indica a frequência com que uma determinada barreira recebe o feixe, Fator de ocupação (T) das áreas vizinhas, distância entre a fonte e o ponto de interesse, e os níveis de dose permitidos em áreas controladas e não controladas (CNEN, 2023).

A norma NCRP Report No. 151 (2005) é a principal referência internacional para o cálculo de blindagens em salas de radioterapia com feixes de megavoltagem, fornecendo modelos para estimativas de espessura de barreiras em diferentes situações clínicas. No Brasil, os requisitos para o dimensionamento das salas estão descritos na norma CNEN NN 3.01 (2024), que determina, entre outros aspectos, a elaboração do Relatório Preliminar de Análise de Segurança (RPAS) para avaliação da eficácia das barreiras antes do início do funcionamento do serviço. A blindagem de salas de radioterapia é, portanto, resultado de uma combinação entre conhecimento técnico, dados operacionais e critérios normativos que asseguram a proteção efetiva das pessoas e do meio ambiente.

4. Materiais e métodos

4.1 Características dos equipamentos de ortovoltagem

As Figuras 4 e 5 apresentam exemplos de croquis para salas de radioterapia sugeridas para a instalação de equipamentos de ortovoltagem da marca Safe Life, modelos 100, 150, 200 e 300.

As imagens foram cedidas por um representante comercial da empresa Safe Life Brasil Distribuidora de Produtos para a Saúde, e trata das características de uma sala para a instalação do equipamento de radioterapia de ortovoltagem, modelo WCR.

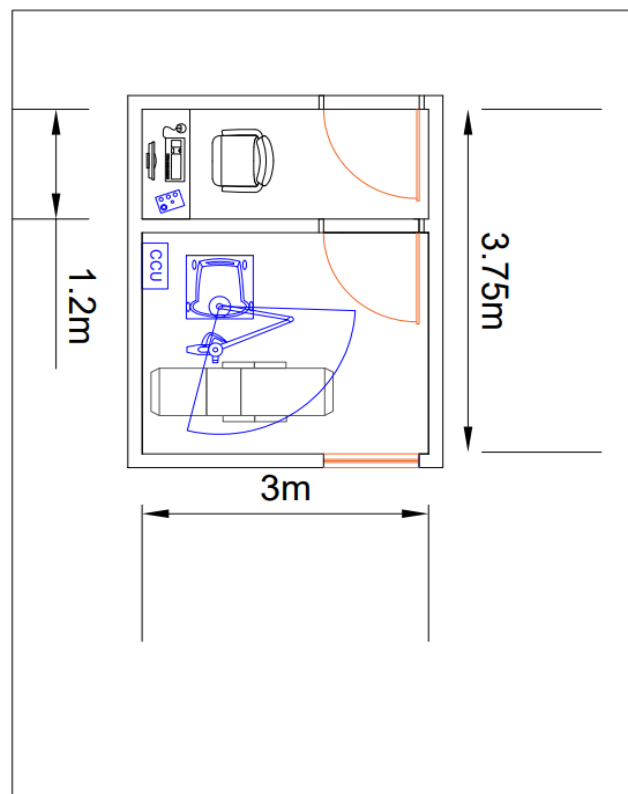


Figura 4: Dimensões mínimas - amplitude parcial.- WCR 100

Fonte: Safe Life

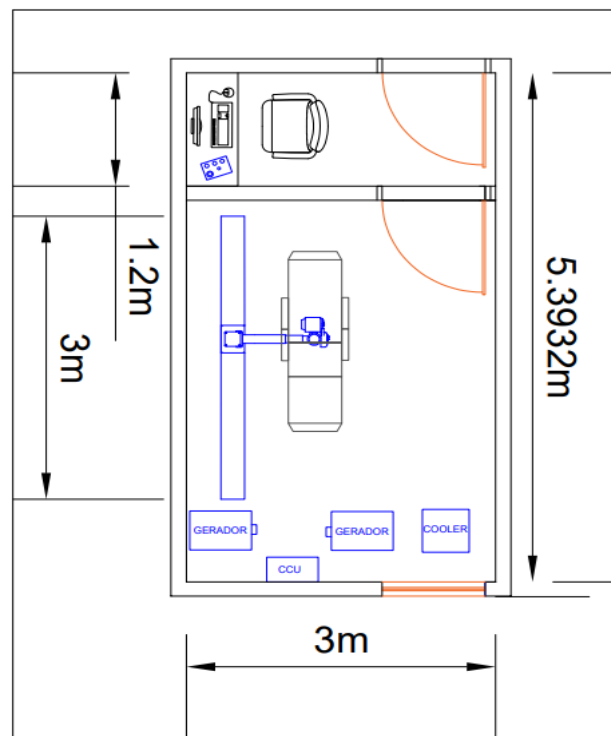


Figura 5: Dimensões mínimas.- WCR 150 a 300

Fonte: Safe Life

O quadro abaixo apresenta as características dos modelos de equipamentos de radioterapia da empresa Safe Life, tipo WCR.

Quadro 1 - Especificações dos tubos de Raio-X

Parâmetros	Modelo			
	WCR 100	WCR 150	WCR 200	WCR 300
Voltagem	10 a 100 kV	30 a 160 kV	40 a 225 kV	60 a 320 kV
Corrente Máxima	2 a 14 mA	4.2 A	4.2 A	4.2 A
Potência Máxima	1000 W	3000 W	3000 W	3200 W
Ponto Focal	D = 5.5 mm	D = 7.5 mm	D = 7.5 mm	D = 8.0 mm
Material do Alvo	Tungstênio	Tungstênio	Tungstênio	Tungstênio
Filtração Inerente	0.8 ± 0.1 mm Be	0.8 mm Be	0.8 mm Be	4.0 mm Be
Ângulo do Alvo	30°	30°	30°	30°
Radiação de Fuga (máxima)	<150 kV <1mGy ^{h-1} média de 100cm ²	<150 kV <1mGy ^{h-1} média de 100cm ² >150 kV <10 mGy ^{h-1} média de 100cm ²	<150kV <1 mGy ^{h-1} média de 100cm ² >150kV <10 mGy ^{h-1} média de 100cm ²	<1mGy ^{h-1} média acima de 100cm ²

Fonte: Safe Life

4.2 Fatores para o Cálculo de Blindagens para aparelhos de Radioterapia

4.2.1 Carga de Trabalho - W

A carga de trabalho (W) representa a quantidade total de radiação gerada por um equipamento de radioterapia durante um determinado período, geralmente especificado por semana. Esse parâmetro é essencial para o cálculo de blindagens, pois está diretamente relacionado à dose de radiação que poderá atingir as áreas adjacentes à sala de tratamento.

A carga de trabalho é expressa em Gy/semana e normalmente corresponde à dose absorvida de fótons no isocentro do tratamento. Ela deve ser estimada com base no número médio de pacientes atendidos por semana e na dose administrada por paciente, sendo essa porção chamada de Carga de Trabalho Clínica (Wc). Também deve incluir a dose gerada em procedimentos de controle de qualidade, calibração e medições físicas, conhecida como Carga de Trabalho Física (Wf).

A carga total de trabalho (Wt) é definido como:

$$Wt = Wc + Wf \quad (2)$$

E para a carga de trabalho clínico utiliza-se a equação:

$$Wc = \frac{\text{dose entregue (Gy)}}{\text{paciente}} \cdot \frac{n^{\circ} \text{ pacientes}}{\text{dia}} \cdot \frac{n^{\circ} \text{ dias}}{\text{semana}} \quad (3)$$

4.2.2 Fator Uso - U

O fator de uso (U) representa a fração da carga de trabalho do feixe primário que incide sobre uma determinada barreira da sala de tratamento, como paredes, teto ou piso. Esse fator varia conforme o tipo de instalação e as técnicas utilizadas no serviço, devendo ser estimado com base no padrão de direcionamento do feixe durante os tratamentos. Em salas onde o equipamento gira em torno do isocentro, como em aceleradores lineares, é comum que os feixes incidem de forma relativamente simétrica nas quatro direções principais: 0°, 90°, 180° e 270°, correspondendo ao chão, laterais e teto. Nesses casos, cada direção recebe uma fração específica da carga de trabalho.

Para o cálculo de blindagem contra radiação de fuga e radiação espalhada, que podem atingir qualquer direção da sala, o fator de uso adotado é sempre igual a 1,0, assumindo que todas as barreiras podem receber esse tipo de radiação.

O Quadro 2 apresenta os valores para o fator de uso recomendados pelo NCRP 151 e pelo Instituto Nacional de Câncer (INCA).

Quadro 2 - Fator de Uso (U) - Feixe primário

Direção	NCRP - 1511	INCA/RJ
Piso	$\frac{1}{4}$	3/7
Teto	$\frac{1}{4}$	2/7
Lateral	$\frac{1}{4}$	1/7

Fonte: NCRP-151 (2005) e INCA (2000)

4.2.3 Limite Máximo Permitido de Dose Equivalente - P(H)

O Quadro 3 abaixo apresenta os limites máximos de dose equivalente em órgãos ou tecidos específicos recomendados pela CNEN para indivíduos ocupacionalmente expostos e para o público em geral.

Quadro 3 - Limites de Doses Anuais - CNEN 3.01

Limites de Dose Anuais			
Grandeza	Órgão	Indivíduo Ocupacionalmente Exposto	Indivíduo do Público
Dose Efetiva	Corpo Inteiro	20 mSv	1 mSv
Dose Equivalente	Cristalino	20 mSv	15 mSv
	Pele	500 mSv	50 mSv
	Mãos e pés	500 mSv	—

Fonte: Norma CNEN 3.01 – 2024

Esses limites não consideram a exposição à radiação de fundo natural nem a radiação para fins médicos, como exames ou tratamentos.

O objetivo da blindagem, calculada pelo físico responsável, é justamente garantir que qualquer exposição a radiação permaneça dentro de níveis considerados seguros, sempre inferiores aos limites estabelecidos.

Na radioterapia, as salas de tratamento são divididas em áreas controladas e não controladas. As áreas controladas são aquelas onde há maior risco de exposição, e nelas permanecem os profissionais diretamente envolvidos com a operação dos equipamentos - os chamados Indivíduos Ocupacionalmente Expostos (IOEs). Já as áreas não controladas são destinadas ao público em geral. Em ambos os casos, os cálculos de blindagem devem assegurar que os níveis de radiação estejam dentro dos limites aceitáveis, protegendo tanto os trabalhadores quanto o público ao redor da instalação.

4.2.4 Fator Ocupacional - T

O fator de ocupação (T) representa o tempo médio que uma pessoa permanece em uma área próxima à sala de radioterapia enquanto o feixe de radiação está ativado. Esse fator é importante para o cálculo de blindagem, pois indica o quanto determinada área deve ser protegida com base na frequência de permanência de indivíduos naquele espaço.

Em áreas controladas, onde circulam trabalhadores expostos à radiação (IOEs), o fator geralmente é considerado como 1, assumindo ocupação total durante o horário de funcionamento. Já em áreas não controladas, como corredores, banheiros ou salas de espera, o fator de ocupação pode ser menor, dependendo de quanto tempo a pessoa mais exposta permanece ali ao longo da semana (NCRP, 2005; INCA, 2000).

A seguir, o Quadro 4 apresenta os valores sugeridos para diferentes ambientes.

Quadro 4 - Fator Ocupacional (T) - Para paredes da Sala de Radioterapia

Localização	Fator Ocupacional (T)
Áreas de ocupação completa (áreas ocupadas o tempo inteiro por um indivíduo), como escritórios administrativos, áreas de planejamento de tratamento, salas de controle de tratamento, enfermarias, áreas recepcionistas, salas de espera atendidas, espaço ocupado no prédio vizinho.	1
Salas Vizinhas a sala projetada, uma segunda sala de tratamento, por exemplo.	½
Corredores, salas de espera dos funcionários, salas de descanso da equipe.	1/5
Portas da sala de tratamento blindada.	1/8
Sanitários públicos, áreas de armazenamento, áreas ao ar livre com assentos, salas de espera sem atendimento, áreas de espera do paciente, sótãos, armários para zeladores.	1/20
Áreas externas com tráfego transitório apenas para pedestres ou veículos, estacionamentos não atendidos, áreas de desembarque de veículos, escadas, elevadores desacompanhados.	1/40

Fonte: NCRP-151 – Apêndice, pág.160.

4.2.5 Materiais Atenuadores

As paredes de uma sala de radioterapia precisam ser construídas com materiais capazes de atenuar a radiação, garantindo a segurança de pacientes, profissionais e do público. Entre os materiais mais utilizados estão o concreto e o chumbo, cada um com características próprias de atenuação.

A escolha do material depende de fatores como espaço disponível, espessura e peso da barreira, custo da obra, facilidade de manutenção e tipo de radiação que precisa ser contida. O concreto, por exemplo, é amplamente adotado por sua boa capacidade de atenuação e por também servir como estrutura da construção.

A medida usada para estimar a espessura necessária das barreiras é chamada de camada décimo-redutora (CDR), que representa a espessura capaz de reduzir em 90% a radiação incidente. Esse valor varia conforme o tipo de material e se a radiação é primária, secundária ou de fuga. O cálculo adequado da blindagem depende do tipo de instalação e requer a colaboração entre o arquiteto, o físico responsável e a equipe técnica envolvida no projeto.

Considerando a aplicação em radioterapia de ortovoltagem, o Quadro 4 apresenta os valores de camada décimo-redutora (CDR) para concreto e chumbo, utilizando como base um feixe com energia média aproximada de 300 keV.

Quadro 5 - Camada décimo-redutora (CDR) para o concreto e chumbo

Energia	CDR – Concreto (densidade = 2,35 g/cm ³)	CDR - Chumbo (densidade = 11,35 g/cm ³)
100 keV	5,30 cm	0,88 mm
300 keV	10,40 cm	4,80 mm

Fonte: NCRP-49 – Apêndice C – pág. 88.

4.3 Equações para o Cálculo das Espessuras das Barreiras - Aparelhos de Radioterapia

Para dar início aos cálculos das espessuras das paredes da clínica, com o objetivo de garantir a blindagem adequada da sala de tratamento e a segurança radiológica nas áreas adjacentes, é necessário, primeiramente, analisar as plantas arquitetônicas e reunir os dados descritos na seção 4.2.

Conforme exigido pela CNEN, a blindagem deve ser calculada utilizando dois métodos: (a) o Método do Limite de Dose e (b) o Método Direto de Otimização. Ambos devem ser aplicados a cada barreira projetada, considerando os diferentes tipos de radiação incidente: primária, secundária e fuga.

Para as barreiras que recebem radiação primária, adota-se como espessura final aquela obtida pelo cálculo mais conservador entre os dois métodos, acrescentando-se, quando necessário, uma camada semi-redutora (CSR) como margem adicional de segurança.

No caso das barreiras secundárias, se a diferença entre as espessuras calculadas para a radiação espalhada e para a radiação de fuga for menor que uma camada décimo-redutora

(CDR), deve-se somar uma CSR à maior espessura obtida. Porém, se essa diferença for superior a um CDR, adota-se diretamente o maior valor calculado para o projeto (NCRP, 2005).

4.3.1 Espessura (t)

A espessura (t) de cada parede, pode ser determinada pela equação abaixo:

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL \quad (4)$$

Tal que, n é o número da quantidade de camadas décimo-redutoras (descrita na equação como TVL) necessárias, representada por:

$$n = -\log(B) \quad (5)$$

Já B corresponde ao fator de transmissividade da radiação pela barreira, ou seja, a fração da radiação que atravessa o material. Na ausência de qualquer blindagem, $B = 1$, indicando transmissão total da radiação incidente. Para o cálculo do fator B, existem fórmulas específicas que variam conforme o tipo de barreira, seja ela primária ou secundária.

4.3.2 Barreira Primária

a) Cálculo pelo Método Direto de Otimização. (INCA. 2010)

$$B_{ot} = \frac{A \cdot C \cdot (TVL)_{mat}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{tot} \cdot T_v} \quad (6)$$

Tal que:

$A = h \cdot l$ - área da parede;

C - custo da parede em dólar por metro cúbico de material (estimado em US\$ 400,00)

$(TVL)_{mat}$ - espessura da CDR em metros;

α - coeficiente monetário (US\$10.000/homem-Sv) – custo do detrimento;

$n = \sum P_i \cdot T_i$ - número de indivíduos com ocupação na vizinhança da sala. Tal que, $P_i = n^\circ$ de indivíduos e T_i é o tempo de permanência máxima dessas pessoas no local;

$H_{tot} = \frac{W \cdot U}{d^2}$ - taxa de dose equivalente no ponto analisado para a dose, onde “d” é

distância entre a fonte de radiação e a parede. (Sv/semana);

T_v - vida útil da instalação. (1040 semanas).

b) Cálculo pelo método de limitação de dose:

$$B_{pri} = \frac{P_{(h)}(d_{pri})^2}{W \cdot U \cdot T} \quad (7)$$

Tal que:

P - limite máximo de dose permitido de radiação equivalente;

d_{pri} - distância em metros da fonte de radiação até o ponto de cálculo;

W - carga de trabalho do tubo de ortovoltagem;

U - fator de uso da parede;

T - fator ocupacional do local.

4.3.3 Barreiras Secundárias

a) Otimização considerando a radiação espalhada pelo paciente:

$$B_{ot} = \frac{A \cdot C \cdot (TVL)_{mat}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{tot} \cdot T_v} \quad (8)$$

Tal que:

$A = h \cdot l$ - área da parede;

C - custo da parede em dólar por metro cúbico de material;

$(TVL)_{mat}$ - espessura da CDR em metros;

α - coeficiente monetário (US\$10.000/homem-Sv) – custo do detrimento;

$n = \sum P_i \cdot T_i$ - número de indivíduos com ocupação na vizinhança da sala. Tal que, $P_i = n^\circ$ de indivíduos e T_i é o tempo de permanência máxima dessas pessoas no local;

$H_{tot} = \frac{W \cdot a}{d_{sec}^2 \cdot d_{sca}^2} \cdot \frac{1600}{400}$ - taxa de dose equivalente no ponto analisado para a dose, onde “ d_{sec} ” é distância entre paciente e a parede a ser calculada, “ d_{sca} ” é a distância em metros entre a fonte e o espalhador, no caso o paciente, e “ a ” a fração de dispersão do feixe. (Sv/semana);
 T_v - vida útil da instalação. (1040 semanas).

b) Método de Limitação de Dose da Radiação Espalhada:

$$B_{sca} = \frac{P_{(h)}(d_{sca})^2 \cdot (d_{sec})^2}{\alpha \cdot W \cdot U \cdot T} \cdot \frac{400}{F} \quad (9)$$

Onde:

P - limite máximo de dose permitida de radiação equivalente;

d_{sca} - distância em metros entre a fonte de espalhamento, geralmente o paciente, e o alvo emissor de radiação (0,4 m para ortovoltagem);

d_{sec} - distância em metros entre a fonte e o ponto de cálculo para radiação secundária;

α - fração de dispersão a 1,0 m do alvo *fantoma*. (Tabela B-3 - pág.59 do NCRP-49);

W - carga de trabalho do tudo de ortovoltagem;

U - fator de uso do feixe;

T - fator Ocupacional do Local;

F - tamanho máximo do campo utilizado. ($F_{max}=20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} = 400\text{cm}^2$)

c) Otimização considerando a radiação de fuga do cabeçote:

$$B_{ot} = \frac{A \cdot C \cdot (TVL)_{mat}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{tot} \cdot T_v} \quad (10)$$

Tal que:

$A = h \cdot l$ - área da parede;

C - custo da parede em dólar por metro cúbico de material;

$(TVL)_{mat}$ - espessura da CDR em metros;

α - coeficiente monetário (US\$10.000/homem-Sv) – custo do detrimento;

$n = \sum P_i \cdot T_i$ - número de indivíduos com ocupação na vizinhança da sala. Tal que, $P_i = n^\circ$ de indivíduos e T_i é o tempo de permanência máxima dessas pessoas no local;

$H_{tot} = \frac{W_{fuga}}{d_{sec}^2}$ - taxa de dose equivalente no ponto analisado na ausência de barreira, onde “dsec” é a distância entre a fonte e a parede analisada. De acordo com o NCRP-49 (1976) W_{fuga} é 0,1% da carga de trabalho total. (Sv/semana)

T_v - vida útil da instalação. (1040 semanas).

d) Limitação de Dose da Radiação de fuga do cabeçote (NCRP-151, 2005):

$$B_L = \frac{P_{(H)} \cdot (d_L)^2}{0,001 \cdot W \cdot U \cdot T} \quad (11)$$

Onde:

P - limite máximo de dose permitida de radiação equivalente;

d_L - distância em metros entre a fonte e a parede calculada;

W - carga de trabalho do todo de ortovoltagem;

U - Fator de uso do feixe;

T - Fator Ocupacional do Local;

Para o dimensionamento da porta de acesso, pode-se adotar o formalismo descrito no relatório NCRP 49, complementado pelas diretrizes do NCRP 151. Em aplicações com feixes de baixa energia, como na ortovoltagem, não há necessidade de portas blindadas pesadas, uma vez que não há produção de nêutrons.

4.4 Fatores para o Cálculo de Blindagens de aparelhos de Radiodiagnóstico

4.4.1 Carga de Trabalho - W

A carga de trabalho (W) representa a quantidade total de radiação produzida por um equipamento de radiodiagnóstico em uma semana, sendo um parâmetro essencial para o cálculo de blindagens. Para energias de feixes na faixa de quilovoltagem (kVp), recomenda-se expressar o valor de “W” em quantidades de mA.min/semana, determinada pela multiplicação do número de exames realizados por semana pela exposição média utilizada (mAs). A W_{norm} corresponde à carga de trabalho média por paciente, enquanto a W_{tot} representa o total semanal e são expressas como:

$$W_{norm} = \frac{mA.min}{pacientes} \quad (12)$$

$$W_{tot} = \frac{mA.min}{pacientes} \cdot \frac{pacientes}{semana} \quad (13)$$

Segundo o NCRP 147, existem valores tabelados de W_{norm} (Tabela 4.5 - pág. 43) que podem ser utilizados diretamente nos cálculos, para piso ou outras barreiras, $W_{norm} = 1,9$ mA.min/paciente; e considerando todas as barreiras, $W_{norm} = 5,2$ mA.min/paciente.

4.4.2 Fator Uso - U

O fator de uso (U) representa a fração da radiação total que incide sobre uma determinada barreira primária. Ele indica quanto da carga de trabalho do feixe primário é direcionada para essa barreira, dependendo do tipo de instalação de radiação e da rotina da clínica médica.

Para a barreira primária, o Quadro 6 apresenta os valores para o fator de uso recomendados pelo NCRP 147. Já para a barreira secundária, recomenda-se utilizar o valor de $U = 1$.

Quadro 6 - Fatores de uso do feixe primário (U) para uma sala de radiografia geral

Barreira	Fator U
Piso	0,89
Atrás da Mesa	0,09
Outras Paredes	0,02
Buck Mural	1,00

Fonte: NCRP 147 (2004).

4.4.3 Fator Ocupacional - T

O fator de ocupação (T) quantifica quanto tempo, em média, uma área adjacente a uma sala de exames é efetivamente ocupada por pessoas enquanto o feixe de raios X está em operação. Ele corresponde à fração do tempo semanal em que o indivíduo mais exposto permanece na área, considerando uma média anual. Neste trabalho, os valores adotados seguem as recomendações do NCRP 147, que são semelhantes aos indicados pelo NCRP 151.

4.4.4 Limite de Dose Semanal - P

O limite de dose semanal corresponde ao valor máximo de radiação que pode ser atingido em uma área após a instalação da barreira, considerando os limites de dose estabelecidos de acordo com a ocupação do ambiente. As áreas são classificadas em livres, onde não há exigência de controles especiais de proteção radiológica, e controladas, que exigem medidas específicas de segurança e proteção. No NCRP 147, esses limites são apresentados em termos de kerma no ar (mGy), enquanto a Portaria Anvisa 453 regulamenta o uso das grandezas dosimétricas correspondentes para fins legais e operacionais.

Quadro 7 - Limite de Dose Semanal pela NCRP 147 e Portaria Anvisa nº 453

Local	Portaria Anvisa nº 453	NCRP 147
Área Controlada	0,10 mSv/semana	0,10 mGy/semana
Área Livre	0,01 mSv/semana	0,02 mGy/semana

Fonte: NCRP 147 (2004); ANVISA (1998).

4.5 Equações para o Cálculo das Espessuras das Barreiras - Aparelhos de Radiodiagnóstico

4.5.1 Barreira Primária

É definido como kerma sem blindagem $K(0)$ para barreira primária:

$$K_p(0) = \frac{K_p^1 \cdot U \cdot N}{d_p^2} = \frac{K_p^1 \cdot U \cdot W_{tot}}{d_p^2 \cdot W_{norm}} \quad (14)$$

Tal que:

K_p^1 - kerma por paciente a 1m (valores sugeridos na Tabela 4.5 - pág. 43);

U - fator de uso;

N - número de procedimentos por paciente (valores sugeridos na Tabela 4.3 - pág. 40);

d_p - distância da fonte até o ponto sem barreira (30 cm, 50 cm ou 170 cm + a distância até a parede);

W_{tot} - carga de trabalho total;

W_{norm} - a carga de trabalho por paciente (valores sugeridos na Tabela 4.5 - pág. 43).

A espessura de uma barreira é determinada de forma a reduzir o kerma no ar em uma área ocupada a um valor $\leq P/T$, considerando o fator de ocupação. O fator de transmissão da barreira (B_p), indica a redução necessária do kerma primário não blindado $K_p(0)$ a uma distância d_p de modo que a dose na área ocupada seja limitada a P/T . É dado por:

$$B_p(x_{barrier} + x_{pre}) = \left(\frac{P}{T}\right) \cdot \frac{d_p^2}{K_p^1 \cdot U \cdot N} \quad (15)$$

Após achar obter de B_p , é necessário olhar no NCRP 147 gráfico B.3 - pág 129 para obter o valor da espessura. Para determinar a espessura efetiva da barreira ($x_{barrier}$), deve-se subtrair deste valor a espessura de pré-blindagem (x_{pre}), correspondente ao sistema do receptor de imagem (bucky de parede) de acordo com a Tabela 4.6 - pág 44.

Como alternativa, uma solução algébrica para $x_{barrier}$ pode ser calculada com base no modelo de Archer, expressa como:

$$x_{barrier} = \frac{1}{\alpha\gamma} \cdot \ln \left[\frac{\left(\frac{N \cdot T \cdot U \cdot K_p^1}{P \cdot d_p^2} \right)^\gamma + \frac{\beta}{\alpha}}{1 + \frac{\beta}{\alpha}} \right] - x_{pre} \quad (16)$$

Os parâmetros de ajuste (α , β e γ) para a radiação primária gerada pelas distribuições de carga de trabalho clínica estão fornecidos na NCRP 147 - Tabela B.1 do Apêndice B. E a espessura equivalente de “pré-blindagem” (x_{pre}) está indicada na Tabela 4.6 -pág 44.

4.5.2 Barreira Secundária

É definido como kerma sem blindagem $K(0)$ para barreira secundária:

$$K_{sec}(0) = \frac{K_{sec}^1 \cdot N}{d_{sec}^2} \quad (17)$$

Tal que:

K_{sec}^1 - kerma por paciente a 1m (valores sugeridos na Tabela 4.7 - pág. 46);

N - número de procedimentos por paciente (valores sugeridos na Tabela 4.3 - pág. 40);

d_{sec} - distância da fonte até o ponto sem barreira (30 cm, 50 cm ou 170 cm + a distância até a parede).

O fator de transmissão da barreira $B_{sec}(x_{barrier})$ representa a redução necessária do kerma no ar de radiação secundária não blindada $K_{sec}(0)$ a uma distância d_{sec} , de modo que a dose na área ocupada atinja o limite P/T. É dado por:

$$B_{sec}(x_{barrier}) = \left(\frac{P}{T}\right) \cdot \frac{d_{sec}^2}{K_{sec}^1 \cdot N} \quad (18)$$

Após obter o valor de B_{sec} , é necessário olhar no NCRP 147 gráfico C.3 - pág 142 para obter o valor da espessura.

Determinando de forma algébrica:

$$x_{barrier} = \frac{1}{\alpha\gamma} \cdot \ln \left[\frac{\left(\frac{N \cdot T \cdot K_{sec}^1}{P \cdot d_{sec}^2}\right)^\gamma + \frac{\beta}{\alpha}}{1 + \frac{\beta}{\alpha}} \right] \quad (19)$$

Os parâmetros de ajuste (α , β e γ) para a radiação secundária gerada pelas distribuições de carga de trabalho clínica estão fornecidos na NCRP 147 - Tabela C.1 do Apêndice C.

5. Resultados

No presente estudo, para os cálculos de blindagem baseados na NCRP 151, adotou-se o fator de uso (U) igual a 0,25 para todas as barreiras, considerando a distribuição angular do feixe e o fato de os equipamentos de radioterapia poderem operar em diferentes direções. Já nos cálculos realizados com base na NCRP 147, o fator de uso foi igual a 1. Para ambos, o fator de ocupação (T) também foi considerado igual a 1,0 em todas as áreas adjacentes às salas de tratamento, de modo a garantir uma condição conservadora de proteção radiológica.

Para o limite de dose admissível (P), foi considerado que as paredes A, B e D fazem divisa com setores que poderiam ser ocupadas por pessoas do público em geral, sendo adotado o limite de 1,0 mSv por ano (equivalente a 0,02 mSv por semana). Já para a parede D, cuja vizinhança corresponde a um setor frequentado por trabalhadores ocupacionalmente expostos, foi aplicado o limite de 20 mSv por ano (0,4 mSv por semana).

Cabe destacar que não foi prevista a presença de parede tipo labirinto (parede E) nas salas analisadas, o que impõe à porta de acesso a função de principal barreira secundária. A espessura final de chumbo necessária foi determinada pelo Método de Otimização, resultando no valor mais alto e conservador.

Os Quadros 8 e 9 apresentam os resultados obtidos para as espessuras de blindagem calculadas nas planilhas desenvolvidas no Microsoft Excel, considerando os parâmetros adotados para P, U e T. O Quadro 8 mostra os valores correspondentes à sala de tratamento equipada com o modelo WCR 100, enquanto o Quadro 9 reúne os resultados referentes às salas que utilizam os equipamentos WCR 150, 200 e 300.

Quadro 8 - Espessuras de Parede Calculadas para Sala de Radioterapia do Equipamento WCR 100

	P (mSv/sem)	U	T	Espessura (cm)
Parede A	0,02	$\frac{1}{4}$	1	34
Parede B	0,02	$\frac{1}{4}$	1	37
Parede C	0,40	$\frac{1}{4}$	1	41
Parede D	0,02	$\frac{1}{4}$	1	40
Porta	0,40	$\frac{1}{4}$	1	7

Quadro 9 - Espessuras de Parede Calculadas para Sala de Radioterapia dos Equipamentos WCR 150 a 300

	P (mSv/sem)	U	T	Espessura (cm)
Parede A	0,02	$\frac{1}{4}$	1	62
Parede B	0,02	$\frac{1}{4}$	1	70
Parede C	0,40	$\frac{1}{4}$	1	75
Parede D	0,02	$\frac{1}{4}$	1	67
Porta	0,40	$\frac{1}{4}$	1	36

Para a parede C, que apresentou a maior espessura de blindagem, foi realizado o cálculo utilizando o método de Archer, com o objetivo de comparar esse procedimento com os demais métodos empregados. Os resultados obtidos estão apresentados no Quadro 10.

Quadro 10 - Espessuras de Parede Calculadas para Parede C com o Método de Archer

Parede C	P (mSv/sem)	Espessura 1 (cm)	Espessura 2 (cm)
Equipamento			
WCR 100	0,10	8,4	8,5
WCR 150 a 300	0,10	9,4	9,1

Espessura 1 = calculada pelo NCRP 147 – fator de transmissão “B”

Espessura 2 = calculada pelo NCRP 147 – Método de Archer – coeficientes: α , β e γ .

6. Discussão e Conclusão

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que foi possível aplicar diferentes metodologias para o cálculo das espessuras de blindagem de uma sala de radioterapia de ortovoltagem, utilizando como base os relatórios da NCRP. No entanto, observou-se que os valores calculados foram significativamente maiores que aqueles utilizados no projeto real da sala que abriga o equipamento WCR da Safe Life.

O Quadro 11 abaixo apresenta os valores de espessura de blindagem informados pelo fornecedor responsável pelo projeto das salas. Esses valores correspondem às espessuras efetivamente adotadas nas construções, permitindo avaliar a relação entre os resultados obtidos pelos diferentes métodos normativos e aqueles aplicados na execução do projeto, além de evidenciar a influência das metodologias de cálculo no dimensionamento final das barreiras.

Quadro 10 - Espessuras de parede apresentados pelo fornecedor responsável pelo projeto das salas.

Equipamento	WCR 100	WCR 150	WCR 200	WCR 300
Blindagem Paredes	6 cm	10 cm	15 cm	26 cm
Blindagem Portas	1 mm	2 mm	4 mm	7 mm

Parede - concreto (densidade de 2,3 g/cm³)

Porta - chumbo (densidade de 12 g.cm³)

Essas diferenças podem ser explicadas, principalmente, pelos parâmetros conservadores adotados nos relatórios da NCRP 151, originalmente desenvolvidos para equipamentos de radioterapia de megavoltagem. Por se tratar de feixes com energias muito superiores às utilizadas na ortovoltagem, os coeficientes de atenuação e fatores de transmissão recomendados tendem a superestimar a espessura necessária, resultando em valores de blindagem mais elevados do que o realmente exigido para energias na faixa de centenas de kilovoltagem. Mesmo após a adaptação dos parâmetros, empregando a Camada Décimo Redutora (CDR) correspondente a 300 kVp, conforme o NCRP Report nº 49, os resultados permaneceram acima do esperado.

Por outro lado, quando o cálculo foi realizado com base no NCRP Report nº 147, que trata de instalações de radiodiagnóstico, os resultados se mostraram mais próximos dos valores reais do projeto. Esse relatório apresenta metodologias e coeficientes de transmissão menos conservadores, o que o torna mais coerente com a faixa de energia típica dos equipamentos de ortovoltagem. Contudo, o NCRP 147 é limitado a energias de até 150 kVp, pois foi desenvolvido para equipamentos de imagem médica, que raramente operam acima

desse valor. Assim, para feixes de 300 kVp, não há dados experimentais suficientes para que o cálculo seja aplicado de forma confiável.

Sendo assim, os resultados indicam que os métodos baseados na NCRP 151 e na NCRP 49 tendem a superdimensionar a espessura das barreiras quando aplicados à ortovoltagem, devido ao uso de parâmetros próprios de feixes mais penetrantes. Já o NCRP 147, embora mais compatível com a energia e o comportamento da radiação na ortovoltagem, não abrange toda a faixa energética desses equipamentos, limitando seu uso a cálculos comparativos.

Esses resultados evidenciam a importância de ajustar as metodologias de cálculo de blindagem para a realidade dos equipamentos de ortovoltagem, garantindo que os modelos de cálculo para megavoltagem sejam adaptados de forma coerente às faixas de energia mais baixas, produzindo resultados condizentes com a prática clínica.

A elaboração das planilhas de cálculo no Microsoft Excel contribuiu para a organização e verificação dos parâmetros de forma eficiente e reprodutível, demonstrando a viabilidade da metodologia utilizada e sua aplicabilidade em futuros projetos de radioproteção.

De modo geral, o estudo evidenciou as particularidades dos cálculos de blindagem para ortovoltagem e mostrou que, embora as metodologias consagradas pela NCRP possam ser adaptadas, é fundamental o uso de parâmetros específicos para essa faixa de energia. Isso garante resultados mais realistas, economicamente viáveis e, sobretudo, seguros do ponto de vista da proteção radiológica.

7. Referências

- BASKAR, R. et al. *Cancer and radiation therapy: current advances and future directions*. International Journal of Medical Sciences, [S.l.], v. 9, n. 3, p. 193–199, 2012.
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Portaria nº 453, de 1º de junho de 1998. *Aprova o regulamento técnico que estabelece as diretrizes básicas de proteção radiológica em radiodiagnóstico médico e odontológico, e dá outras providências*. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 104, p. 3-25, 2 jun. 1998.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). CNEN NN 3.01: Requisitos Básicos de Radioproteção e Segurança Radiológica de Fontes de Radiação. Rio de Janeiro: CNEN, 2024.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). CNEN NN 6.10: Requisitos de segurança e proteção radiológica para serviços de radioterapia. Resolução CNEN nº 277/21. Rio de Janeiro: CNEN, 2021.
- COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). Entidades autorizadas: Radioterapia. Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2025.
- FERNANDES, M.A.R. *Metodologia para Determinação da Carga de Trabalho Efetiva em Equipamentos de Teleterapia. Proposta para Otimização das Blindagens da Sala de Radioterapia Veterinária*. Tese (Livre Docência). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP. Faculdade de Medicina de Botucatu. Botucatu. 2018.
- FERNANDES, M.A.R. *Utilização de Moldes Radioativos Especiais de Folhas de Ouro198 no Tratamento de Tumores de Pele*. 2000. Tese (Doutorado em Tecnologia do Combustível Nuclear e Reatores Nucleares de Potência). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN-SP.
- HANAHAH, Douglas. *Hallmarks of cancer: New dimensions*. Cell, 2022. DOI: 10.1016
- INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER JOSÉ ALENCAR GOMES DA SILVA. *ABC do câncer: abordagens básicas para o controle do câncer*. 6. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: INCA, 2020.
- INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER. *Atualização para técnicos em radioterapia*. Rio de Janeiro: INCA, 2020.
- INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER. *Blindagem em radioterapia: técnicas e normas*. Rio de Janeiro: INCA, 2000.
- INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER. *Curso de Atualização para Técnicos em Radioterapia: Módulo 3 – Radioterapia*. Rio de Janeiro: INCA, 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER JOSÉ ALENCAR GOMES DA SILVA. *Estimativa 2023: incidência de câncer no Brasil*. Rio de Janeiro: INCA, 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER. *Oficina em Radioterapia: Ortovoltagem e Telecobaltoterapia*. Rio de Janeiro: INCA, 2004.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Optimized radiotherapy approach could extend treatment to 22 million more cancer patients, IAEA co-authored report finds*. Viena: IAEA, 2024.

KHAN, F. M., GIBBONS, J. P. *The Physics of Radiation Therapy*. Lippincott, Williams and Wilkins, Baltimore, Maryland, EUA, 5ª edição; 2014.

LUCAS, Matheus Henrique Mion. *Cálculo de blindagem para sala de radioterapia de ortovoltagem – aplicação em medicina veterinária*. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Física Médica) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2018.

NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS (NCRP). *NCRP Report N°. 147: Structural shielding design and evaluation for medical use of X rays and gamma rays of energies up to 10 MeV*. Bethesda, MD: NCRP, 2004.

NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS (NCRP). *NCRP Report N°. 151: Structural shielding design and evaluation for megavoltage X- and gamma-ray radiotherapy facilities*. Bethesda, MD: NCRP, 2005.

NATIONAL COUNCIL ON RADIATION PROTECTION AND MEASUREMENTS (NCRP). *NCRP Report N°. 49: Structural shielding design and evaluation for medical use of X rays and gamma rays of energies up to 10 MeV*. Washington, D.C.: NCRP, 1976.

RADIATION ONCOLOGY PHYSICS – TREATMENT PLANNING I: ISODOSE DISTRIBUTIONS. In: RadiologyKey, 2015.

SAFE LIFE. *Manual técnico do equipamento de radioterapia ortovoltagem WCR 100*. Campo Grande, MS: Safe Life, 2024.

SAFE LIFE. *Manual técnico do equipamento de radioterapia ortovoltagem WCR 150*. Campo Grande, MS: Safe Life, 2024.

SAFE LIFE. *Manual técnico do equipamento de radioterapia ortovoltagem WCR 200*. Campo Grande, MS: Safe Life, 2024.

SAFE LIFE. *Manual técnico do equipamento de radioterapia ortovoltagem WCR 300*. Campo Grande, MS: Safe Life, 2024.

SCAFF, Luiz AM. *Física Radioterapia – A base analógica de uma era digital*. v. 1, São Paulo: Projeto Saber, 2010.

SIMÕES, Hugo Joel de Jesus. *Demonstração de um dispositivo de imagiologia por raios ortogonais para apoio à radioterapia externa de fótons*. Coimbra, 2018. Tese (Doutorado) – Universidade de Coimbra.

TAUHATA, Luiz; MOURÃO, Ana Paula; DIAS, Maria da Penha. *Proteção radiológica: fundamentos e aplicações*. Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2013.

WORLD HEALTH ORGANIZATION; INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER. *Global cancer burden rising: new estimates from WHO and IARC*. Geneva: WHO, 2024.

Apêndice

1 - Carga de Trabalho

1.1 - Carga de Trabalho Clínico

A carga de trabalho clínica (W_c) prevista é de 50 pacientes por dia, com dose média de 200 cGy por paciente por dia, 5 dias por semana.

$$W_c = 50 \text{ pac/dia} \times 2 \text{ Gy/paciente} \times 5 \text{ dias/semana} = 500 \text{ Gy/semana}$$

1.2 - Carga de Trabalho Físico

$$W_f = 100 \text{ Gy/semana.}$$

1.3 - Carga de Trabalho Total

$$W_t = W_c + W_f = 600 \text{ Gy/semana.}$$

2 - Radiação de Fuga

De acordo com o NCRP Report nº 49 (1976), considera-se que a carga de trabalho correspondente à fuga (W_{fuga}) equivale a 0,1% da carga total, resultando em 0,6 Sv/semana.

Embora o manual do equipamento indique valores máximos de fuga de $< 1 \text{ mGy/h}$ para tensões inferiores a 150 kV e $< 10 \text{ mGy/h}$ para tensões superiores, correspondendo a 0,04 Sv/semana e 0,4 Sv/semana (para 40 h/semana), para os cálculos deste trabalho será adotado o valor de 0,6 Sv/semana, conforme a recomendação do NCRP 49 (1976).

3- Cálculo das Espessuras de Parede da Sala de Radioterapia para o Equipamento WCR 100

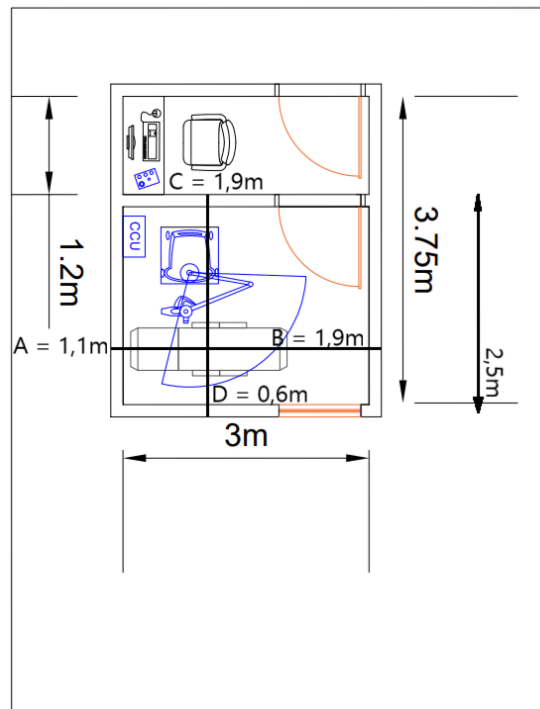


Figura 6: Planta ilustrativa da sala de tratamento com inserção de medidas- WCR 100

Fonte: Adaptada de Safe Life

3.1 Cálculo de Espessura da Parede A (Parede Secundária)

Nesse ponto a vizinhança é um corredor, onde considera-se $P1 = 20$ pessoas e $T1 = 1,25$ horas/semana.

A) Cálculo pelo Método de Otimização - Radiação Secundária:

Assumindo:

$C = 400$ dólares

$\alpha = 10.000$ dólares/(homens-Sv)

Altura (h) = 2,8 m

$T_v = 1040$ semanas

Comprimento (l) = 2,5 m

$W = 600$ Sv/semana

$A = h.l = 7,0 \text{ m}^2$

$U = \frac{1}{4}$

$d_{\text{sec}} = 1,1 \text{ m}$

$T = 1$

$TVL = 5,3 \text{ cm} = 0,053 \text{ m}$

$d_{\text{sca}} = 0,5 \text{ m}$

$P1 = 20$ pessoas

$T1 = 1,25$ horas / semana

$a = 0,0015$ para 30° (ângulo de maior fator)

$$n = \sum P_i \cdot T_i = \{ 20 \times 1,25 \} / 40 \text{ horas} = 0,625$$

$$H_{tot} = \frac{W \cdot a}{d_{sec}^2 \cdot d_{sca}^2} \cdot \frac{1600}{400} = \{ [600 \times 0,0015] / [(1,1)^2 \times (0,5)^2] \} \times [1600 / 400]$$

$$= 11,9008$$

$$B_{ot} = \frac{A \cdot C \cdot (TVL)_{mat}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{tot} \cdot T_v} = [7 \times 400 \times 0,053] / [2,302 \times 10000 \times 0,625 \times 11,9008 \times 1040]$$

$$= 8,3337 \times 10^{-7}$$

$$n = -\log(B) = -\log(8,3337 \times 10^{-7}) = 6,0792$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 5,3 + (6,0792 - 1) \times 5,3 = \mathbf{32,22}$$

B) Cálculo pelo Método de Limite de Dose - Radiação Secundária:

Assumindo:

$$d_{sec} = 1,1 \text{ m}$$

$$U = 1/4$$

$$P(h) = 0,00002 \text{ Sv/semana}$$

$$T = 1$$

$$W = 600 \text{ Gy/semana}$$

$$d_{sca} = 0,5 \text{ m}$$

$$F = 20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} = 400 \text{ cm}^2$$

$$a = 0,0015, \text{ para ângulo de } 30^\circ$$

$$B_{sca} = \frac{P(h)(d_{sca})^2 \cdot (d_{sec})^2}{\alpha \cdot W \cdot U \cdot T} \cdot \frac{400}{F}$$

$$= [0,00002 \times (1,1)^2 \times (0,5)^2] / [0,0015 \times 600 \times 0,25 \times 1] \times (400 / 400)$$

$$= 2,6889 \times 10^{-5}$$

$$n = -\log(B) = -\log(2,6889 \times 10^{-5}) = 4,5704$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 5,3 + (4,5704 - 1) \times 5,3 = \mathbf{24,223}$$

O Método de Otimização apresentou uma espessura maior (32,22 cm). Acrescentando 1 CSR (1,6 cm) tem-se: 33,82 cm.

A parede A deverá ser construída com uma espessura de 34,0 cm.

C) Cálculo pelo Método de Otimização - Radiação de Fuga:

Assumindo:

$$C = 400 \text{ dólares}$$

$$A = h \cdot l = 7,0 \text{ m}^2$$

$$\text{Altura (h)} = 2,8 \text{ m}$$

$$d_{sec} = 1,1 \text{ m}$$

$$\text{Comprimento (l)} = 2,5 \text{ m}$$

$$TVL = 5,3 \text{ cm} = 0,053 \text{ m}$$

$P_1 = 20$ pessoas

$T_v = 1040$ semanas

$a = 0,0015$ para 30° (ângulo de maior fator)

$W_{fuga} = 0,6$ Sv/semana

$\alpha = 10.000$ dólares/(homens-Sv)

$U = 1/4$

$T_1 = 1,25$ horas / semana

$T = 1$

$$n = \sum P_i \cdot T_i = \{ 20 \times 1,25 \} / 40 \text{ horas} = 0,625$$

$$H_{tot} = \frac{W_{fuga}}{d_{sec}^2} = 0,6 / (1,1)^2 = 0,4959$$

$$B_{ot} = \frac{A.C.(TVL)_{mat}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{tot} \cdot T_v} = [7 \times 400 \times 0,053] / [2,302 \times 10000 \times 0,625 \times 0,4959 \times 1040]$$

$$= 2 \times 10^{-5}$$

$$n = -\log(B) = -\log(2 \times 10^{-5}) = 4,6990$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 5,3 + (4,6990 - 1) \times 5,3 = \mathbf{24,905}$$

D) Cálculo pelo Método de Limite de Dose - Radiação de Fuga:

Assumindo:

$d_L = 1,1$ m

$U = 1/4$

$P(h) = 0,00002$ Sv/semana

$T = 1$

$W = 600$ Gy/semana

$$B_L = \frac{P_{(H)} \cdot (d_L)^2}{0,001 \cdot W \cdot U \cdot T}$$

$$= [0,00002 \times (1,1)^2] / [0,001 \times 600 \times 0,25 \times 1] = 1,6133 \times 10^{-4}$$

$$n = -\log(B) = -\log(1,6133 \times 10^{-4}) = 3,7923$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 5,3 + (3,7923 - 1) \times 5,3 = \mathbf{20,099}$$

3.2 - Cálculo de Espessura da Parede B (Parede Secundária)

Nesse ponto a vizinhança é uma sala de espera, onde considera-se $P_1 = 50$ pacientes, $T_1 = 5$ horas/semana e $P_2 = 1$ funcionário, $T_2 = 40$ horas/semana.

A) Cálculo pelo Método de Otimização - Radiação Secundária:

Assumindo:

C = 400 dólares	$\alpha = 10.000 \text{ dólares}/(\text{homens-Sv})$
Altura (h) = 2,8 m	Tv = 1040 semanas
Comprimento (l) = 2,5 m	W = 600 Sv/semana
A = h.l = 7,0 m ²	U = 1/4
d _{sec} = 1,9 m	T = 1
TVL = 5,3 cm = 0,053 m	P2 = 1 pessoa
P1 = 50 pessoas	T2 = 40 horas/semana
T1 = 5 horas/semana	d _{sca} = 0,5 m
a = 0,0015 para 30° (ângulo de maior fator)	

$$n = \sum P_i \cdot T_i = \{ 50 \times 5 + 1 \times 40 \} / 40 \text{ horas} = 7,25$$

$$H_{tot} = \frac{W \cdot a}{d_{sec}^2 \cdot d_{sca}^2} \cdot \frac{1600}{400} = \{ [600 \times 0,0015] / [(1,9)^2 \times (0,5)^2] \} \times [1600 / 400] \\ = 3,9889$$

$$B_{ot} = \frac{A \cdot C \cdot (TVL)_{mat}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{tot} \cdot T_v} = [7 \times 400 \times 0,053] / [2,302 \times 10000 \times 7,25 \times 3,9889 \times 1040] \\ = 2,1434 \times 10^{-7}$$

$$n = -\log(B) = -\log(2,1434 \times 10^{-7}) = 6,6689$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 5,3 + (6,6689 - 1) \times 5,3 = \mathbf{35,345}$$

B) Cálculo pelo Método de Limite de Dose - Radiação Secundária:

Assumindo:

d _{sec} = 1,9 m	U = 1/4
P(h) = 0,00002 Sv/semana	T = 1
W = 600 Gy/semana	d _{sca} = 0,5 m
F = 20 cm x 20 cm = 400 cm ²	a = 0,0015, para ângulo de 30°

$$B_{sca} = \frac{P_{(h)}(d_{sca})^2 \cdot (d_{sec})^2}{\alpha \cdot W \cdot U \cdot T} \cdot \frac{400}{F} \\ = [0,00002 \times (1,9)^2 \times (0,5)^2] / [0,0015 \times 600 \times 0,25 \times 1] \times (400 / 400) \\ = 8,0222 \times 10^{-5}$$

$$n = -\log(B) = -\log(8,0222 \times 10^{-5}) = 4,0957$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 5,3 + (4,0957 - 1) \times 5,3 = \mathbf{21,707}$$

O Método de Otimização apresentou uma espessura maior (35,35 cm). Acrescentando 1 CSR (1,6 cm) tem-se: 36,95 cm.

A parede B deverá ser construída com uma espessura de 37,0 cm.

C) Cálculo pelo Método de Otimização - Radiação de Fuga:

Assumindo:

C = 400 dólares	$\alpha = 10.000 \text{ dólares}/(\text{homens-Sv})$
Altura (h) = 2,8 m	$T_v = 1040 \text{ semanas}$
Comprimento (l) = 2,5 m	$W_{\text{fuga}} = 0,6 \text{ Sv/semana}$
$A = h.l = 7,0 \text{ m}^2$	$U = 1/4$
$d_{\text{sec}} = 1,9 \text{ m}$	$T = 1$
$TVL = 5,3 \text{ cm} = 0,053 \text{ m}$	$P_2 = 1 \text{ pessoa}$
$P_1 = 50 \text{ pessoas}$	$T_2 = 40 \text{ horas/semana}$
$T_1 = 5 \text{ horas/semana}$	

$$n = \sum P_i \cdot T_i = \{ 50 \times 5 + 1 \times 40 \} / 40 \text{ horas} = 7,25$$

$$H_{\text{tot}} = \frac{W_{\text{fuga}}}{d_{\text{sec}}^2} = 0,6 / (1,9)^2 = 0,1662$$

$$B_{\text{ot}} = \frac{A \cdot C \cdot (TVL)_{\text{mat}}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{\text{tot}} \cdot T_v} = [7 \times 400 \times 0,053] / [2,302 \times 10000 \times 7,25 \times 0,1662 \times 1040] = 5,1443 \times 10^{-6}$$

$$n = -\log(B) = -\log(5,1443 \times 10^{-6}) = 5,2887$$

$$t_{\text{barreira}} = TVL + (n - 1)TVL = 5,3 + (5,2887 - 1) \times 5,3 = \mathbf{28,03}$$

D) Cálculo pelo Método de Limite de Dose - Radiação de Fuga:

Assumindo:

$d_L = 1,9 \text{ m}$	$U = 1/4$
$P(h) = 0,00002 \text{ Sv/semana}$	$T = 1$
$W = 600 \text{ Gy/semana}$	

$$B_L = \frac{P_{(H)} \cdot (d_L)^2}{0,001 \cdot W \cdot U \cdot T} = [0,00002 \times (1,9)^2] / [0,001 \times 600 \times 0,25 \times 1] = 4,8133 \times 10^{-4}$$

$$n = -\log(B) = -\log(4,8133 \times 10^{-4}) = 3,3176$$

$$t_{\text{barreira}} = TVL + (n - 1)TVL = 5,3 + (3,3176 - 1) \times 5,3 = \mathbf{17,583}$$

3.3 - Cálculo de Espessura da Parede C (Parede Primária)

Nesse ponto a vizinhança é a área de comando e o corredor que dá à entrada da sala de tratamento. Considera-se P1 = 4 técnicos, T1 = 25 horas/semana ; P2 = 1 físico, T2 = 10 horas/semana e P3 = 1 médico, T3 = 5 horas/semana.

A) Cálculo pelo Método de Limite de Dose - Radiação Primária:

Assumindo:

$$d_{pri} = (1,9 + 0,4) = 2,3 \text{ m}$$

$$P(h) = 0,0004 \text{ Sv/semana}$$

$$W = 600 \text{ Gy/semana}$$

$$U = 1/4$$

$$T = 1$$

$$B_{pri} = \frac{P(h)(d_{pri})^2}{W \cdot U \cdot T} = [0,0004 \times (2,3)^2] / [600 \times 0,25 \times 1] = 1,4107 \times 10^{-5}$$

$$n = -\log(B) = -\log(1,4107 \times 10^{-5}) = 4,8506$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 5,3 + (4,8506 - 1) \times 5,3 = 25,708$$

Segundo o NCRP-49, é necessário acrescentar uma camada semi redutora de 1,6 cm ao obtido. Logo, $t_{barreira} = 27,31 \text{ cm}$.

B) Cálculo pelo Método de Otimização - Radiação Primária:

Assumindo:

$$C = 400 \text{ dólares}$$

$$\alpha = 10.000 \text{ dólares}/(\text{homens-Sv})$$

$$\text{Altura (h)} = 2,8 \text{ m}$$

$$T_v = 1040 \text{ semanas}$$

$$\text{Comprimento (l)} = 3,0 \text{ m}$$

$$W = 600 \text{ Sv/semana}$$

$$A = h \times l = 8,4 \text{ m}^2$$

$$U = 1/4$$

$$d_{pri} = (1,9 + 0,4) = 2,3 \text{ m}$$

$$T = 1$$

$$TVL = 10,4 \text{ cm} = 0,104 \text{ m}$$

$$P_2 = 1 \text{ pessoa}$$

$$P_1 = 4 \text{ pessoas}$$

$$T_2 = 10 \text{ hora/semana}$$

$$T_1 = 25 \text{ horas / semana}$$

$$\ln(10) = 2,302$$

$$P_3 = 1 \text{ pessoa}$$

$$T_3 = 5 \text{ horas/semana}$$

$$n = \sum P_i \cdot T_i = (4 \times 25 + 1 \times 2 + 1 \times 5) / 40 \text{ horas} = 2,675$$

$$H_{tot} = \frac{W \cdot U}{d^2} = (600 \times 0,25) / (2,3)^2 = 28,3554$$

$$B_{ot} = \frac{A \cdot C \cdot (TVL)_{mat}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{tot} \cdot T_v}$$

$$= [8,4 \times 400 \times 0,053] / [2,302 \times 10000 \times 2,675 \times 28,3554 \times 1040] = 9,8066 \times 10^{-8}$$

$$n = -\log(B) = -\log(9,8066 \times 10^{-8}) = 7,0085$$

$$t_{\text{barreira}} = TVL + (n - 1)TVL = 5,3 + (7,0085 - 1) \times 5,3 = 37,145$$

Segundo o NCRP-49, é necessário acrescentar uma camada semi redutora de 3,1 cm ao obtido. Logo, $t_{\text{barreira}} = 40,25 \text{ cm}$.

A parede C será construída com uma espessura de 41 cm.

C) Cálculo pelo Método de Limite de Dose - Radiação Secundária:

Assumindo:

$$d_{\text{seci}} = 1,9 \text{ m}$$

$$P(h) = 0,0004 \text{ Sv/semana}$$

$$W = 600 \text{ Gy/semana}$$

$$U = 1/4$$

$$T = 1$$

$$d_{\text{sca}} = 0,5 \text{ m}$$

$$F = 20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} = 400 \text{ cm}^2$$

$$a = 0,0015, \text{ para ângulo de } 30^\circ$$

$$B_{\text{sca}} = \frac{P(h)(d_{\text{sca}})^2 \cdot (d_{\text{sec}})^2}{\alpha \cdot W \cdot U \cdot T} \cdot \frac{400}{F}$$

$$= [0,0004 \times (1,9)^2 \times (0,5)^2] / [0,0015 \times 600 \times 0,25 \times 1] \times (400 / 400) = 1,6044 \times 10^{-3}$$

$$n = -\log(B) = -\log(1,6044 \times 10^{-3}) = 2,7947$$

$$t_{\text{barreira}} = TVL + (n - 1)TVL = 5,3 + (2,7947 - 1) \times 5,3 = 14,812$$

D) Cálculo pelo Método de Otimização - Radiação Secundária:

Assumindo:

$$C = 400 \text{ dólares}$$

$$\alpha = 10.000 \text{ dólares}/(\text{homens-Sv})$$

$$\text{Altura (h)} = 2,8 \text{ m}$$

$$T_v = 1040 \text{ semanas}$$

$$\text{Comprimento (l)} = 3,0 \text{ m}$$

$$W = 600 \text{ Sv/semana}$$

$$A = h \times l = 8,4 \text{ m}^2$$

$$U = 1/4$$

$$d_{\text{sec}} = 1,9 \text{ m}$$

$$T = 1$$

$$TVL = 5,3 \text{ cm} = 0,053 \text{ m}$$

$$P_2 = 1 \text{ pessoa}$$

$$P_1 = 4 \text{ pessoas}$$

$$T_2 = 10 \text{ hora/semana}$$

$$T_1 = 25 \text{ horas / semana}$$

$$\ln(10) = 2,302$$

$$P_3 = 1 \text{ pessoa}$$

$$T_3 = 5 \text{ horas/semana}$$

$$a = 0,0015, \text{ para ângulo de } 30^\circ$$

$$d_{\text{sca}} = 0,5 \text{ m}$$

$$n = \sum P_i \cdot T_i = (4 \times 25 + 1 \times 2 + 1 \times 5) / 40 \text{ horas} = 2,675$$

$$H_{tot} = \frac{W \cdot a}{d_{sec}^2 \cdot d_{sca}^2} \cdot \frac{1600}{400} = \{[600 \times 0,0015] / [(1,9)^2 \times (0,5)^2]\} \times [1600 / 400] = 3,9889$$

$$B_{ot} = \frac{A \cdot C \cdot (TVL)_{mat}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{tot} \cdot T_v}$$

$$= [8,4 \times 400 \times 0,053] / [2,302 \times 10000 \times 2,675 \times 3,9889 \times 1040] = 6,9711 \times 10^{-7}$$

$$n = -\log(B) = -\log(6,9711 \times 10^{-7}) = 6,1567$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 5,3 + (6,1567 - 1) \times 5,3 = 32,631$$

E) Cálculo pelo Método de Limite de Dose - Radiação de Fuga:

Assumindo:

$$d_{sec} = 1,9 \text{ m}$$

$$P(h) = 0,0004 \text{ Sv/semana}$$

$$W = 600 \text{ Gy/semana}$$

$$U = 1/4$$

$$T = 1$$

$$B_L = \frac{P_{(H)} \cdot (d_L)^2}{0,001 \cdot W \cdot U \cdot T} = [0,0004 \times (1,9)^2] / [0,001 \times 600 \times 0,25 \times 1] = 9,6267 \times 10^{-3}$$

$$n = -\log(B) = -\log(9,6267 \times 10^{-3}) = 2,0165$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 5,3 + (2,0165 - 1) \times 5,3 = 10,687$$

F) Cálculo pelo Método de Otimização - Radiação de Fuga:

Assumindo:

$$C = 400 \text{ dólares}$$

$$\alpha = 10.000 \text{ dólares}/(\text{homens-Sv})$$

$$\text{Altura (h)} = 2,8 \text{ m}$$

$$T_v = 1040 \text{ semanas}$$

$$\text{Comprimento (l)} = 3,0 \text{ m}$$

$$W = 600 \text{ Sv/semana}$$

$$A = h \times l = 8,4 \text{ m}^2$$

$$U = 1/4$$

$$d_{sec} = 1,9 \text{ m}$$

$$T = 1$$

$$TVL = 5,3 \text{ cm} = 0,053 \text{ m}$$

$$P_2 = 1 \text{ pessoa}$$

$$P_1 = 4 \text{ pessoas}$$

$$T_2 = 10 \text{ hora/semana}$$

$$T_1 = 25 \text{ horas / semana}$$

$$\ln(10) = 2,302$$

$$P_3 = 1 \text{ pessoa}$$

$$T_3 = 5 \text{ horas/semana}$$

$$n = \sum P_i \cdot T_i = (4 \times 25 + 1 \times 2 + 1 \times 5) / 40 \text{ horas} = 2,675$$

$$H_{tot} = \frac{W_{fuga}}{d_{sec}^2} = 0,6 / (1,9)^2 = 0,1662$$

$$B_{ot} = \frac{A.C.(TVL)_{mat}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{tot} \cdot T_v}$$

$$= [8,4 \times 400 \times 0,053] / [2,302 \times 10000 \times 2,675 \times 0,1662 \times 1040] = 1,6731 \times 10^{-5}$$

$$n = -\log(B) = -\log(1,6731 \times 10^{-5}) = 4,7765$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 5,3 + (4,7765 - 1) \times 5,3 = 25,315$$

G) Cálculo pelo Método de Archer - Radiação Primária:

Assumindo:

$$K_p^{-1} = 5,2$$

$$U = 1$$

$$W_{norm} = 1,9 \text{ mA.min/paciente}$$

$$d_p = 1,9 + 0,3 = 2,2 \text{ m}$$

$$W_{tot} = 250 \text{ pacientes/sem} \times 1,9 = 475 \text{ mA.min/sem}$$

$$P = 0,1$$

$$x_{pre} = 72 \text{ mm}$$

$$\alpha = 3,994 \times 10^{-2} \text{ mm}^{-1}$$

$$\beta = 1,448 \times 10^{-1} \text{ mm}^{-1}$$

$$\gamma = 4,231 \times 10^{-1}$$

$$N = 250 \text{ pacientes/sem}$$

$$T = 1$$

$$K_p(0) = \frac{K_p^{-1} \cdot U \cdot N}{d_p^2} = \frac{K_p^{-1} \cdot U \cdot W_{tot}}{d_p^2 \cdot W_{norm}} = (5,2 \times 1 \times 475) / (2,2)^2 \times 1,9 = 269 \text{ mGy/paciente}$$

$$B_p(x_{barrier} + x_{pre}) = \left(\frac{P}{T}\right) \cdot \frac{d_p^2}{K_p^{-1} \cdot U \cdot N} = 0,1/269 = 3,72 \times 10^{-4}$$

$$x_{barrier} = 114 \text{ mm de concreto}$$

$$x_{barrier} - x_{pre} = 114 \text{ mm} - 30 \text{ mm} = 84 \text{ mm} = 8,4 \text{ cm de concreto}$$

$$x_{barrier} = \frac{1}{\alpha \gamma} \cdot \ln \left[\frac{\left(\frac{N \cdot T \cdot U \cdot K_p^{-1}}{P \cdot d_p^2} \right)^\gamma + \frac{\beta}{\alpha}}{1 + \frac{\beta}{\alpha}} \right] - x_{pre}$$

$$= (1/3,994 \times 10^{-2} \times 4,231 \times 10^{-1}) \times \ln [(250 \times 1 \times 1 \times 5,2 / 0,1 \times (2,2)^2)^{4,231 \times 10^{-1}} + (1,448 \times 10^{-1} / 3,994 \times 10^{-2}) / 1 + (1,448 \times 10^{-1} / 3,994 \times 10^{-2}) - 30]$$

$$= 84,19 = 85 \text{ mm} = 8,5 \text{ cm de concreto}$$

H) Cálculo pelo Método de Archer - Radiação Secundária:

$$K_{sec}^{-1} = 2,3 \times 10^{-2}$$

$$U = 1$$

$$W_{\text{norm}} = 1,9 \text{ mA.min/paciente}$$

$$d_{\text{sec}} = 1,9 + 0,3 = 2,2 \text{ m}$$

$$W_{\text{tot}} = 250 \text{ pacientes/sem} \times 1,9 = 475 \text{ mA.min/sem}$$

$$P = 0,1$$

$$T = 1$$

$$\alpha = 3,950 \times 10^{-2} \text{ mm}^{-1}$$

$$\beta = 8,440 \times 10^{-2} \text{ mm}^{-1}$$

$$\gamma = 5,191 \times 10^{-1}$$

$$N = 250 \text{ pacientes/sem}$$

$$T = 1$$

$$K_{\text{sec}}(0) = \frac{K_{\text{sec}}^1 \cdot N}{d_{\text{sec}}^2} = (2,3 \times 10^{-2} \times 250) / (2,2)^2 = 1,19 \text{ mGy/paciente}$$

$$B_{\text{sec}}(x_{\text{barrier}}) = \left(\frac{P}{T}\right) \cdot \frac{d_{\text{sec}}^2}{K_{\text{sec}}^1 \cdot N} = 0,1 / 1,188 = 0,0842 = 8,42 \times 10^{-2}$$

$$x_{\text{barrier}} = 20 \text{ mm} = 2,0 \text{ cm de concreto}$$

$$x_{\text{barrier}} = \frac{1}{\alpha \gamma} \cdot \ln \left[\frac{\left(\frac{N \cdot T \cdot K_{\text{sec}}^1}{P \cdot d_{\text{sec}}^2} \right)^\gamma + \frac{\beta}{\alpha}}{1 + \frac{\beta}{\alpha}} \right]$$

$$= (1/3,950 \times 10^{-2} \times 5,191 \times 10^{-1}) \times \ln [(250 \times 1 \times 2,3 \times 10^{-2}) / 0,1 \times (1,9)^2]^{5,191 \times 10^{-1}} + (8,440 \times 10^{-2} / 3,950 \times 10^{-2}) / 1 + (8,440 \times 10^{-2} / 3,950 \times 10^{-2})$$

$$= 29,55 = 30 \text{ mm} = 3 \text{ cm de concreto}$$

3.4 - Cálculo de Espessura da Parede D (Parede Primária)

Nesse ponto a vizinhança é um corredor, onde considera-se $P_1 = 20$ pessoas e $T_1 = 1,25$ horas/semana.

A) Cálculo pelo Método de Limite de Dose - Radiação Primária:

Assumindo:

$$d_{\text{pri}} = (0,6 + 0,4) = 1,0 \text{ m}$$

$$P(h) = 0,00002 \text{ Sv/semana}$$

$$W = 600 \text{ Gy/semana}$$

$$U = 1/4$$

$$T = 1$$

$$B_{\text{pri}} = \frac{P(h)(d_{\text{pri}})^2}{W \cdot U \cdot T} = [0,00002 \times (1)^2] / [600 \times 0,25 \times 1] = 1,3334 \times 10^{-7}$$

$$n = -\log(B) = -\log(1,3334 \times 10^{-7}) = 6,8751$$

$$t_{\text{barreira}} = TVL + (n - 1)TVL = 5,3 + (6,8751 - 1) \times 5,3 = 36,438$$

Segundo o NCRP-49, é necessário acrescentar uma camada semi redutora de 1,6 cm ao obtido. Logo, $t_{\text{barreira}} = 38,04 \text{ cm}$.

B) Cálculo pelo Método de Otimização - Radiação Primária:

Assumindo:

$C = 400$ dólares	$\alpha = 10.000$ dólares/(homens-Sv)
Altura (h) = 2,8 m	$T_v = 1040$ semanas
Comprimento (l) = 3,0 m	$W = 600$ Sv/semana
$A = h \times l = 8,4 \text{ m}^2$	$U = 1/4$
$d_{pri} = (0,6+0,4) = 1,0 \text{ m}$	$T = 1$
$TVL = 5,3 \text{ cm} = 0,053 \text{ m}$	$T_1 = 1,25$ horas / semana
$P_1 = 20$ pessoas	$\ln(10) = 2,302$

$$n = \sum P_i \cdot T_i = \{20 \times 1,25\} / 40 \text{ horas} = 0,625$$

$$H_{tot} = \frac{W \cdot U}{d^2} = [600 \times 0,25] / (1)^2 = 150$$

$$B_{ot} = \frac{A \cdot C \cdot (TVL)_{mat}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{tot} \cdot T_v} = [8,4 \times 400 \times 0,053] / [2,302 \times 10000 \times 0,625 \times 150 \times 1040] = 7,9342 \times 10^{-8}$$

$$n = -\log(B) = -\log(7,9342 \times 10^{-8}) = 7,1005$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 5,3 + (7,1005 - 1) \times 5,3 = 37,633$$

Segundo o NCRP-49, é necessário acrescentar uma camada semi redutora de 1,6 cm ao obtido. Logo, $t_{barreira} = 39,23 \text{ cm}$.

A parede D será construída com uma espessura de 40 cm.

C) Cálculo pelo Método de Limite de Dose - Radiação Secundária:

Assumindo:

$d_{sec} = 0,6 \text{ m}$	$P(h) = 0,00002 \text{ Sv/semana}$
$W = 600 \text{ Gy/semana}$	$U = 1/4$
$T = 1$	$d_{sca} = 0,5 \text{ m}$
$F = 20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} = 400 \text{ cm}^2$	$a = 0,0015$, para ângulo de 30°

$$B_{sca} = \frac{P_{(h)}(d_{sca})^2 \cdot (d_{sec})^2}{\alpha \cdot W \cdot U \cdot T} \cdot \frac{400}{F}$$

$$= [0,00002 \times (0,6)^2 \times (0,5)^2] / [0,0015 \times 600 \times 0,25 \times 1] \times (400 / 400) = 8,0 \times 10^{-6}$$

$$n = -\log(B) = -\log(8,0 \times 10^{-6}) = 5,0969$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 5,3 + (5,0969 - 1) \times 5,3 = 27,014$$

D) Cálculo pelo Método de Otimização - Radiação Secundária:

Assumindo:

$C = 400$ dólares	$\alpha = 10.000$ dólares/(homens-Sv)
Altura (h) = 2,8 m	$T_v = 1040$ semanas
Comprimento (l) = 3,0 m	$W = 600$ Sv/semana
$A = h \times l = 8,4 \text{ m}^2$	$U = 1/4$
$d_{sec} = 0,6 \text{ m}$	$T = 1$
$TVL = 5,3 \text{ cm} = 0,053 \text{ m}$	$T_1 = 1,25$ horas / semana
$P_1 = 20$ pessoas	$\ln(10) = 2,302$
$d_{sca} = 0,5 \text{ m}$	$a = 0,0015$, para ângulo de 30°

$$n = \sum P_i \cdot T_i = \{20 \times 1,25\} / 40 \text{ horas} = 0,625$$

$$H_{tot} = \frac{W \cdot a}{d_{sec}^2 \cdot d_{sca}^2} \cdot \frac{1600}{400} = \{[600 \times 0,0015] / [(0,6)^2 \times (0,5)^2]\} \times [1600 / 400] = 40$$

$$B_{ot} = \frac{A \cdot C \cdot (TVL)_{mat}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{tot} \cdot T_v} = [8,4 \times 400 \times 0,053] / [2,302 \times 10000 \times 0,625 \times 40 \times 1040] \\ = 2,9753 \times 10^{-7}$$

$$n = -\log(B) = -\log(2,9753 \times 10^{-7}) = 6,5265$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 5,3 + (6,5265 - 1) \times 5,3 = 34,59$$

E) Cálculo pelo Método de Limite de Dose - Radiação de Fuga :

Assumindo:

$d_L = 0,6 \text{ m}$	$P(h) = 0,00002$ Sv/semana
$W = 600$ Gy/semana	$U = 1/4$
$T = 1$	

$$B_L = \frac{P_{(H)} \cdot (d_L)^2}{0,001 \cdot W \cdot U \cdot T} = [0,00002 \times (0,6)^2] / [0,001 \times 600 \times 0,25 \times 1] = 4,8 \times 10^{-5}$$

$$n = -\log(B) = -\log(4,8 \times 10^{-5}) = 4,3188$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 5,3 + (4,3188 - 1) \times 5,3 = 22,89$$

F) Cálculo pelo Método de Otimização - Radiação de Fuga:

Assumindo:

$C = 400$ dólares	$\alpha = 10.000$ dólares/(homens-Sv)
Altura (h) = 2,8 m	$T_v = 1040$ semanas
Comprimento (l) = 3,0 m	$W_{fuga} = 0,6$ Sv/semana
$A = h \times l = 8,4 \text{ m}^2$	$U = 1/4$
$d_{sec} = 0,6$ m	$T = 1$
$TVL = 5,3 \text{ cm} = 0,053\text{m}$	$T1 = 1,25$ horas / semana
$P1 = 20$ pessoas	$\ln(10) = 2,302$

$$n = \sum P_i \cdot T_i = \{20 \times 1,25\} / 40 \text{ horas} = 0,625$$

$$H_{tot} = \frac{W_{fuga}}{d_{sec}^2} = 0,6 / (0,6)^2 = 1,6667$$

$$B_{ot} = \frac{A \cdot C \cdot (TVL)_{mat}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{tot} \cdot T_v} = [8,4 \times 400 \times 0,053] / [2,302 \times 10000 \times 0,625 \times 1,6667 \times 1040]$$

$$= 7,1407 \times 10^{-6}$$

$$n = -\log(B) = -\log(7,1407 \times 10^{-6}) = 5,1463$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 5,3 + (5,1463 - 1) \times 5,3 = 27,275$$

3.5 - Cálculo de Espessura da Porta

Embora os equipamentos de ortovoltagem possam emitir radiação com energia máxima de 500 kV, a faixa de uso clínico vai até 250 kV. Nesta faixa de energia não ocorre a produção de nêutrons, eliminando assim a necessidade de blindagem específica para estas partículas na porta, ao contrário do que é exigido para equipamentos de megavoltagem.

Nesse ponto a vizinhança é a área de comando e o corredor que dá à entrada da sala de tratamento. Considera-se $P1 = 4$ técnicos, $T1 = 25$ horas/semana ; $P2 = 1$ físico, $T2 = 10$ horas/semana e $P3 = 1$ médico, $T3 = 5$ horas/semana.

A) Cálculo pelo Método de Limite de Dose - Radiação Secundária:

Assumindo:

$d_{seci} = 2,2$ m	$P(h) = 0,0004$ Sv/semana
$W = 600$ Gy/semana	$U = 1/4$
$T = 1$	$d_{sca} = 0,5$ m

$$F = 20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} = 400 \text{ cm}^2$$

$$a = 0,0015, \text{ para } \text{ângulo de } 30^\circ$$

$$B_{sca} = \frac{P(h)(d_{sca})^2 \cdot (d_{sec})^2}{\alpha \cdot W \cdot U \cdot T} \cdot \frac{400}{F}$$

$$= [0,0004 \times (2,2)^2 \times (0,5)^2] / [0,0015 \times 600 \times 0,25 \times 1] \times (400 / 400) = 2,1511 \times 10^{-3}$$

$$n = -\log(B) = -\log(2,1511 \times 10^{-3}) = 2,6673$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 0,88 + (2,6673 - 1) \times 0,88 = 2,347$$

B) Cálculo pelo Método de Otimização - Radiação Secundária:

Assumindo:

$$C = 400 \text{ dólares}$$

$$\alpha = 10.000 \text{ dólares}/(\text{homens-Sv})$$

$$\text{Altura (h)} = 2,8 \text{ m}$$

$$T_v = 1040 \text{ semanas}$$

$$\text{Comprimento (l)} = 3,0 \text{ m}$$

$$W = 600 \text{ Sv/semana}$$

$$A = h \times l = 8,4 \text{ m}^2$$

$$U = 1/4$$

$$d_{sec} = 2,3 \text{ m}$$

$$T = 1$$

$$TVL = 0,88 \text{ cm} = 0,00088 \text{ m}$$

$$P_2 = 1 \text{ pessoa}$$

$$P_1 = 4 \text{ pessoas}$$

$$T_2 = 10 \text{ hora/semana}$$

$$T_1 = 25 \text{ horas / semana}$$

$$\ln(10) = 2,302$$

$$P_3 = 1 \text{ pessoa}$$

$$T_3 = 5 \text{ horas/semana}$$

$$a = 0,0015, \text{ para } \text{ângulo de } 30^\circ$$

$$d_{sca} = 0,5 \text{ m}$$

$$n = \sum P_i \cdot T_i = (4 \times 25 + 1 \times 2 + 1 \times 5) / 40 \text{ horas} = 2,675$$

$$H_{tot} = \frac{W \cdot a}{d_{sec}^2 \cdot d_{sca}^2} \cdot \frac{1600}{400} = \{[600 \times 0,0015] / [(2,2)^2 \times (0,5)^2]\} \times [1600 / 400] = 2,9752$$

$$B_{ot} = \frac{A \cdot C \cdot (TVL)_{mat}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{tot} \cdot T_v}$$

$$= [8,4 \times 400 \times 0,00088] / [2,302 \times 10000 \times 2,675 \times 2,9752 \times 1040] = 1,5518 \times 10^{-8}$$

$$n = -\log(B) = -\log(1,5518 \times 10^{-8}) = 7,8092$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 0,88 + (7,8092 - 1) \times 0,88 = 6,872$$

E) Cálculo pelo Método de Limite de Dose - Radiação de Fuga:

Assumindo:

$$d_{sec} = 2,2 \text{ m}$$

$$P(h) = 0,0004 \text{ Sv/semana}$$

$$W = 600 \text{ Gy/semana}$$

$$U = 1/4$$

$$T = 1$$

$$B_L = \frac{P_{(H)} \cdot (d_L)^2}{0,001 \cdot W \cdot U \cdot T} = [0,0004 \times (2,2)^2] / [0,001 \times 600 \times 0,25 \times 1] = 1,2907 \times 10^{-2}$$

$$n = -\log(B) = -\log(1,2907 \times 10^{-2}) = 1,8892$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 0,88 + (1,8892 - 1) \times 0,88 = 1,662$$

F) Cálculo pelo Método de Otimização - Radiação de Fuga:

Assumindo:

$$C = 400 \text{ dólares}$$

$$\alpha = 10.000 \text{ dólares}/(\text{homens-Sv})$$

$$\text{Altura (h)} = 2,8 \text{ m}$$

$$T_v = 1040 \text{ semanas}$$

$$\text{Comprimento (l)} = 3,0 \text{ m}$$

$$W = 600 \text{ Sv/semana}$$

$$A = h \times l = 8,4 \text{ m}^2$$

$$U = 1/4$$

$$d_{sec} = 2,2 \text{ m}$$

$$T = 1$$

$$TVL = 0,88 \text{ cm} = 0,00088 \text{ m}$$

$$P_2 = 1 \text{ pessoa}$$

$$P_1 = 4 \text{ pessoas}$$

$$T_2 = 10 \text{ hora/semana}$$

$$T_1 = 25 \text{ horas / semana}$$

$$\ln(10) = 2,302$$

$$P_3 = 1 \text{ pessoa}$$

$$T_3 = 5 \text{ horas/semana}$$

$$n = \sum P_i \cdot T_i = (4 \times 25 + 1 \times 2 + 1 \times 5) / 40 \text{ horas} = 2,675$$

$$H_{tot} = \frac{W_{fuga}}{d_{sec}^2} = 0,6 / (2,2)^2 = 0,1240$$

$$B_{ot} = \frac{A \cdot C \cdot (TVL)_{mat}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{tot} \cdot T_v}$$

$$= [8,4 \times 400 \times 0,00088] / [2,302 \times 10000 \times 2,675 \times 0,1240 \times 1040] = 3,7234 \times 10^{-7}$$

$$n = -\log(B) = -\log(3,7234 \times 10^{-7}) = 6,4291$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 0,88 + (6,4291 - 1) \times 0,88 = 5,658$$

4- Cálculo das Espessuras de Parede da Sala de Radioterapia para os Equipamentos WCR 150 a 300

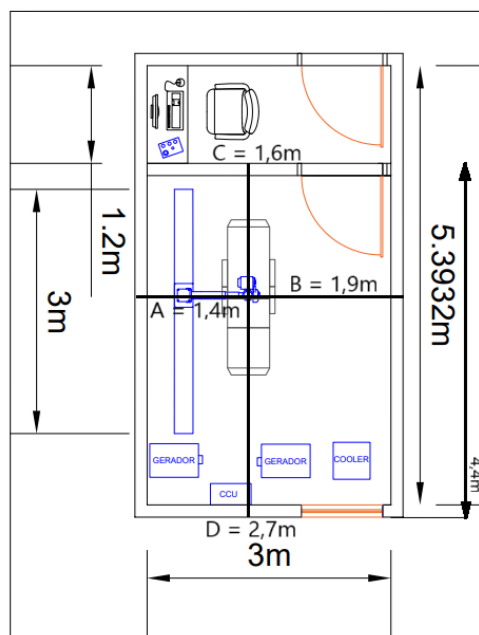


Figura 7: Planta ilustrativa da sala de tratamento com inserção de medidas - WCR 150 a 300

Fonte: Adaptada de Safe Life

4.1 Cálculo de Espessura da Parede A (Parede Secundária)

Nesse ponto a vizinhança é um corredor, onde considera-se $P1= 20$ pessoas e $T1= 1,25$ horas/semana.

A) Cálculo pelo Método de Otimização - Radiação Secundária:

Assumindo:

C = 400 dólares

$$\alpha = 10.000 \text{ dólares}/(\text{homens-Sv})$$

Altura (h) = 2,8 m

$T_V = 1040$ semanas

Comprimento (l) = 4,4 m

$W = 600 \text{ Sv/semana}$

$$A = h.l = 12,32 \text{ m}^2$$
$$U = 1/4$$
$$d_{\text{sec}} = 1,4 \text{ m}$$
$$T = 1$$
$$\text{TVL} = 10,4 \text{ cm} = 0,104 \text{ m}$$
$$d_{\text{sca}} = 0,5 \text{ m}$$

P1 = 20 pessoas

T1 = 1,25 horas / semana

$a = 0,0026$ para 30° (ângulo de maior fator)

$$n = \sum P_i \cdot T_i = \{ 20 \times 1,25 \} / 40 \text{ horas} = 0,625$$

$$H_{tot} = \frac{W \cdot a}{d_{sec}^2 \cdot d_{sca}^2} \cdot \frac{1600}{400} = \{ [600 \times 0,0026] / [(1,4)^2 \times (0,5)^2] \} \times [1600 / 400]$$

$$= 12,7347$$

$$B_{ot} = \frac{A \cdot C \cdot (TVL)_{mat}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{tot} \cdot T_v} = [12,32 \times 400 \times 0,104] / [2,302 \times 10000 \times 0,625 \times 12,7347 \times 1040]$$

$$= 2,6897 \times 10^{-6}$$

$$n = -\log(B) = -\log(2,6897 \times 10^{-6}) = 5,5703$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 10,4 + (5,5703 - 1) \times 10,4 = \mathbf{57,931}$$

B) Cálculo pelo Método de Limite de Dose - Radiação Secundária:

Assumindo:

$$d_{sec} = 1,4 \text{ m}$$

$$U = 1/4$$

$$P(h) = 0,00002 \text{ Sv/semana}$$

$$T = 1$$

$$W = 600 \text{ Gy/semana}$$

$$d_{sca} = 0,5 \text{ m}$$

$$F = 20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} = 400 \text{ cm}^2$$

$$a = 0,0026, \text{ para ângulo de } 30^\circ$$

$$B_{sca} = \frac{P_{(h)}(d_{sca})^2 \cdot (d_{sec})^2}{\alpha \cdot W \cdot U \cdot T} \cdot \frac{400}{F}$$

$$= [0,00002 \times (1,4)^2 \times (0,5)^2] / [0,0026 \times 600 \times 0,25 \times 1] \times (400 / 400)$$

$$= 2,5128 \times 10^{-5}$$

$$n = -\log(B) = -\log(2,5128 \times 10^{-5}) = 4,5998$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 10,4 + (4,5998 - 1) \times 10,4 = 47,838$$

O Método de Otimização apresentou uma espessura maior (57,93 cm). Acrescentando 1 CSR (3,1 cm) tem-se: 61,03 cm.

A parede A deverá ser construída com uma espessura de 62,0 cm.

C) Cálculo pelo Método de Otimização - Radiação de Fuga:

Assumindo:

$$C = 400 \text{ dólares}$$

$$A = h \cdot l = 12,32 \text{ m}^2$$

$$\text{Altura (h)} = 2,8 \text{ m}$$

$$d_{sec} = 1,4 \text{ m}$$

$$\text{Comprimento (l)} = 4,4 \text{ m}$$

$$TVL = 10,4 \text{ cm} = 0,104 \text{ m}$$

$$P1 = 20 \text{ pessoas}$$

$$U = 1/4$$

$$a = 0,0026 \text{ para } 30^\circ \text{ (ângulo de maior fator)} \quad T = 1$$

$$\alpha = 10.000 \text{ dólares/(homens-Sv)} \quad d_{sca} = 0,5 \text{ m}$$

$$T_v = 1040 \text{ semanas}$$

$$T1 = 1,25 \text{ horas / semana}$$

$$W_{fuga} = 0,6 \text{ Sv/semana}$$

$$n = \sum P_i \cdot T_i = \{ 20 \times 1,25 \} / 40 \text{ horas} = 0,625$$

$$H_{tot} = \frac{W_{fuga}}{d_{sec}^2} = 0,6 / (1,4)^2 = 0,3061$$

$$B_{ot} = \frac{A.C.(TVL)_{mat}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{tot} \cdot T_v} = [12,32 \times 400 \times 0,104] / [2,302 \times 10000 \times 0,625 \times 0,3061 \times 1040]$$

$$= 1,1190 \times 10^{-4}$$

$$n = -\log(B) = -\log(1,1190 \times 10^{-4}) = 3,9512$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 10,4 + (3,9512 - 1) \times 10,4 = \mathbf{41,092}$$

D) Cálculo pelo Método de Limite de Dose - Radiação de Fuga:

Assumindo:

$$d_L = 1,4 \text{ m}$$

$$U = 1/4$$

$$P(h) = 0,00002 \text{ Sv/semana}$$

$$T = 1$$

$$W = 600 \text{ Gy/semana}$$

$$B_L = \frac{P_{(H)} \cdot (d_L)^2}{0,001 \cdot W \cdot U \cdot T} = [0,00002 \times (1,4)^2] / [0,001 \times 600 \times 0,25 \times 1] = 2,6133 \times 10^{-4}$$

$$n = -\log(B) = -\log(2,6133 \times 10^{-4}) = 3,5828$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 10,4 + (3,5828 - 1) \times 10,4 = 37,261$$

4.2 - Cálculo de Espessura da Parede B (Parede Secundária)

Nesse ponto a vizinhança é uma sala de espera, onde considera-se $P1 = 50$ pacientes, $T1 = 5$ horas/semana e $P2 = 1$ funcionário, $T2 = 40$ horas/semana.

A) Cálculo pelo Método de Otimização - Radiação Secundária:

Assumindo:

$$C = 400 \text{ dólares}$$

$$\alpha = 10.000 \text{ dólares/(homens-Sv)}$$

$$\text{Altura (h)} = 2,8 \text{ m}$$

$$T_v = 1040 \text{ semanas}$$

$$\text{Comprimento (l)} = 4,4 \text{ m}$$

$$W = 600 \text{ Sv/semana}$$

$$A = h.l = 12,32 \text{ m}^2$$

$$U = 1/4$$

$$d_{\text{sec}} = 1,9 \text{ m}$$

$$T = 1$$

$$\text{TVL} = 10,4 \text{ cm} = 0,104 \text{ m}$$

$$P_2 = 1 \text{ pessoa}$$

$$P_1 = 50 \text{ pessoas}$$

$$T_2 = 40 \text{ horas/semana}$$

$$T_1 = 5 \text{ horas/semana}$$

$$d_{\text{sca}} = 0,5 \text{ m}$$

$$a = 0,0026 \text{ para } 30^\circ \text{ (ângulo de maior fator)}$$

$$n = \sum P_i \cdot T_i = \{ 50 \times 5 + 1 \times 40 \} / 40 \text{ horas} = 7,25$$

$$H_{\text{tot}} = \frac{W \cdot a}{d_{\text{sec}}^2 \cdot d_{\text{sca}}^2} \cdot \frac{1600}{400} = \{ [600 \times 0,0026] / [(1,9)^2 \times (0,5)^2] \} \times [1600 / 400] \\ = 6,9141$$

$$B_{\text{ot}} = \frac{A \cdot C \cdot (\text{TVL})_{\text{mat}}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{\text{tot}} \cdot T_v} = [12,32 \times 400 \times 0,104] / [2,302 \times 10000 \times 7,25 \times 6,9141 \times 1040] \\ = 4,2707 \times 10^{-7}$$

$$n = -\log(B) = -\log(4,2707 \times 10^{-7}) = 6,3695$$

$$t_{\text{barreira}} = \text{TVL} + (n - 1)\text{TVL} = 10,4 + (6,3695 - 1) \times 10,4 = \mathbf{66,243}$$

B) Cálculo pelo Método de Limite de Dose - Radiação Secundária:

Assumindo:

$$d_{\text{sec}} = 1,9 \text{ m}$$

$$U = 1/4$$

$$P(h) = 0,00002 \text{ Sv/semana}$$

$$T = 1$$

$$W = 600 \text{ Gy/semana}$$

$$d_{\text{sca}} = 0,5 \text{ m}$$

$$F = 20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} = 400 \text{ cm}^2$$

$$a = 0,0026, \text{ para ângulo de } 30^\circ$$

$$B_{\text{sca}} = \frac{P(h)(d_{\text{sca}})^2 \cdot (d_{\text{sec}})^2}{\alpha \cdot W \cdot U \cdot T} \cdot \frac{400}{F} \\ = [0,00002 \times (1,9)^2 \times (0,5)^2] / [0,0026 \times 600 \times 0,25 \times 1] \times (400 / 400) \\ = 4,6282 \times 10^{-5}$$

$$n = -\log(B) = -\log(4,6282 \times 10^{-5}) = 4,3346$$

$$t_{\text{barreira}} = \text{TVL} + (n - 1)\text{TVL} = 10,4 + (4,3346 - 1) \times 10,4 = \mathbf{45,08}$$

O Método de Otimização apresentou uma espessura maior (66,24 cm). Acrescentando 1 CSR (3,1 cm) tem-se: 69,34 cm.

A parede B deverá ser construída com uma espessura de 70 cm.

C) Cálculo pelo Método de Otimização - Radiação de Fuga:

Assumindo:

C = 400 dólares	$\alpha = 10.000 \text{ dólares}/(\text{homens-Sv})$
Altura (h) = 2,8 m	Tv = 1040 semanas
Comprimento (l) = 4,4 m	Wfuga = 0,6 Sv/semana
A = h.l = 12,32 m ²	U = 1/4
d _{sec} = 1,9 m	T = 1
TVL = 10,4 cm = 0,104 m	P2 = 1 pessoa
P1 = 50 pessoas	T2 = 40 horas/semana
T1 = 5 horas/semana	

$$n = \sum P_i \cdot T_i = \{ 50 \times 5 + 1 \times 40 \} / 40 \text{ horas} = 7,25$$

$$H_{tot} = \frac{W_{fuga}}{d_{sec}^2} = 0,6 / (1,9)^2 = 0,1662$$

$$B_{ot} = \frac{A \cdot C \cdot (TVL)_{mat}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{tot} \cdot T_v} = [12,32 \times 400 \times 0,104] / [2,302 \times 10000 \times 7,25 \times 0,1662 \times 1040]$$

$$= 1,7766 \times 10^{-5}$$

$$n = -\log(B) = -\log(1,7766 \times 10^{-5}) = 4,7504$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 10,4 + (4,7504 - 1) \times 10,4 = 49,404$$

D) Cálculo pelo Método de Limite de Dose - Radiação de Fuga:

Assumindo:

d _L = 1,9 m	U = 1/4
P(h) = 0,00002 Sv/semana	T = 1
W = 600 Gy/semana	

$$B_L = \frac{P_{(H)} \cdot (d_L)^2}{0,001 \cdot W \cdot U \cdot T} = [0,00002 \times (1,9)^2] / [0,001 \times 600 \times 0,25 \times 1] = 4,8133 \times 10^{-4}$$

$$n = -\log(B) = -\log(4,8133 \times 10^{-4}) = 3,3176$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 10,4 + (3,3176 - 1) \times 10,4 = \mathbf{34,503}$$

4.3 - Cálculo de Espessura da Parede C (Parede Primária)

Nesse ponto a vizinhança é a área de comando e o corredor que dá à entrada da sala de tratamento. Considera-se P1 = 4 técnicos, T1 = 25 horas/semana ; P2 = 1 físico, T2 = 10 horas/semana e P3 = 1 médico, T3 = 5 horas/semana.

A) Cálculo pelo Método de Limite de Dose - Radiação Primária:

Assumindo:

$$d_{pri} = (1,6 + 0,4) = 2,0 \text{ m}$$

$$P(h) = 0,0004 \text{ Sv/semana}$$

$$W = 600 \text{ Gy/semana}$$

$$U = 1/4$$

$$T = 1$$

$$B_{pri} = \frac{P(h)(d_{pri})^2}{W \cdot U \cdot T} = [0,0004 \times (2)^2] / [600 \times 0,25 \times 1] = 1,0667 \times 10^{-5}$$

$$n = -\log(B) = -\log(1,0667 \times 10^{-5}) = 4,9720$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 10,4 + (4,9720 - 1) \times 10,4 = 51,709$$

Segundo o NCRP-49, é necessário acrescentar uma camada semi redutora de 3,1 cm ao obtido. Logo, $t_{barreira} = 54,81 \text{ cm}$.

B) Cálculo pelo Método de Otimização - Radiação Primária:

Assumindo:

$$C = 400 \text{ dólares}$$

$$\alpha = 10.000 \text{ dólares}/(\text{homens-Sv})$$

$$\text{Altura (h)} = 2,8 \text{ m}$$

$$T_v = 1040 \text{ semanas}$$

$$\text{Comprimento (l)} = 3,0 \text{ m}$$

$$W = 600 \text{ Sv/semana}$$

$$A = h \times l = 8,4 \text{ m}^2$$

$$U = 1/4$$

$$d_{pri} = (1,6 + 0,4) = 2,0 \text{ m}$$

$$T = 1$$

$$TVL = 10,4 \text{ cm} = 0,104 \text{ m}$$

$$P2 = 1 \text{ pessoa}$$

$$P1 = 4 \text{ pessoas}$$

$$T2 = 10 \text{ hora/semana}$$

$$T1 = 25 \text{ horas / semana}$$

$$\ln(10) = 2,302$$

$$P3 = 1 \text{ pessoa}$$

$$T3 = 5 \text{ horas/semana}$$

$$n = \sum P_i \cdot T_i = (4 \times 25 + 1 \times 2 + 1 \times 5) / 40 \text{ horas} = 2,675$$

$$H_{tot} = \frac{W \cdot U}{d^2} = (600 \times 0,25) / (2)^2 = 37,5$$

$$B_{ot} = \frac{A \cdot C \cdot (TVL)_{mat}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{tot} \cdot T_v} = [8,4 \times 400 \times 0,104] / [2,302 \times 10000 \times 2,675 \times 37,5 \times 1040]$$

$$= 1,4551 \times 10^{-7}$$

$$n = -\log(B) = -\log(1,4551 \times 10^{-7}) = 6,8371$$

$$t_{\text{barreira}} = TVL + (n - 1)TVL = 10,4 + (6,8371 - 1) \times 10,4 = 71,106$$

Segundo o NCRP-49, é necessário acrescentar uma camada semi redutora de 3,1 cm ao obtido. Logo, $t_{\text{barreira}} = 74,21 \text{ cm}$.

A escolha da espessura da barreira deve ser a maior entre as duas calculadas.

A parede C será construída com uma espessura de 75 cm.

C) Cálculo pelo Método de Limite de Dose - Radiação Secundária:

Assumindo:

$$d_{\text{sec}} = 1,6 \text{ m}$$

$$P(h) = 0,0004 \text{ Sv/semana}$$

$$W = 600 \text{ Gy/semana}$$

$$U = 1/4$$

$$T = 1$$

$$d_{\text{sca}} = 0,5 \text{ m}$$

$$F = 20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} = 400 \text{ cm}^2$$

$$a = 0,0026, \text{ para ângulo de } 30^\circ$$

$$B_{\text{sca}} = \frac{P(h)(d_{\text{sca}})^2 \cdot (d_{\text{sec}})^2}{\alpha \cdot W \cdot U \cdot T} \cdot \frac{400}{F}$$

$$= [0,0004 \times (1,6)^2 \times (0,5)^2] / [0,0026 \times 600 \times 0,25 \times 1] \times (400 / 400) = 6,5641 \times 10^{-4}$$

$$n = -\log(B) = -\log(6,5641 \times 10^{-4}) = 3,1828$$

$$t_{\text{barreira}} = TVL + (n - 1)TVL = 10,4 + (3,1828 - 1) \times 10,4 = 33,101$$

D) Cálculo pelo Método de Otimização - Radiação Secundária:

Assumindo:

$$C = 400 \text{ dólares}$$

$$\alpha = 10.000 \text{ dólares}/(\text{homens-Sv})$$

$$\text{Altura (h)} = 2,8 \text{ m}$$

$$T_v = 1040 \text{ semanas}$$

$$\text{Comprimento (l)} = 3,0 \text{ m}$$

$$W = 600 \text{ Sv/semana}$$

$$A = h \times l = 8,4 \text{ m}^2$$

$$U = 1/4$$

$$d_{\text{sec}} = 1,6 \text{ m}$$

$$T = 1$$

$$TVL = 10,4 \text{ cm} = 0,104 \text{ m}$$

$$P_2 = 1 \text{ pessoa}$$

$$P_1 = 4 \text{ pessoas}$$

$$T_2 = 10 \text{ hora/semana}$$

$$T_1 = 25 \text{ horas / semana}$$

$$\ln(10) = 2,302$$

$$P_3 = 1 \text{ pessoa}$$

$$T_3 = 5 \text{ horas/semana}$$

$$d_{\text{sca}} = 0,5 \text{ m}$$

$$a = 0,0026, \text{ para ângulo de } 30^\circ$$

$$n = \sum P_i \cdot T_i = (4 \times 25 + 1 \times 2 + 1 \times 5) / 40 \text{ horas} = 2,675$$

$$H_{tot} = \frac{W \cdot a}{d_{sec}^2 \cdot d_{sca}^2} \cdot \frac{1600}{400} = \{[600 \times 0,0026] / [(1,6)^2 \times (0,5)^2]\} \times [1600 / 400] = 9,75$$

$$B_{ot} = \frac{A \cdot C \cdot (TVL)_{mat}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{tot} \cdot T_v} = [8,4 \times 400 \times 0,104] / [2,302 \times 10000 \times 2,675 \times 9,75 \times 1040] \\ = 5,5964 \times 10^{-7}$$

$$n = -\log(B) = -\log(5,5964 \times 10^{-7}) = 6,2521$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 10,4 + (6,2521 - 1) \times 10,4 = 65,022$$

E) Cálculo pelo Método de Limite de Dose - Radiação de Fuga:

Assumindo:

$$d_L = 1,6 \text{ m}$$

$$P(h) = 0,0004 \text{ Sv/semana}$$

$$W = 600 \text{ Gy/semana}$$

$$U = 1/4$$

$$T = 1$$

$$B_L = \frac{P_{(H)} \cdot (d_L)^2}{0,001 \cdot W \cdot U \cdot T} = [0,0004 \times (1,6)^2] / [0,001 \times 600 \times 0,25 \times 1] = 6,8267 \times 10^{-3}$$

$$n = -\log(B) = -\log(6,8267 \times 10^{-3}) = 2,1658$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 10,4 + (2,1658 - 1) \times 10,4 = 22,524$$

F) Cálculo pelo Método de Otimização - Radiação de Fuga:

Assumindo:

$$C = 400 \text{ dólares}$$

$$\alpha = 10.000 \text{ dólares}/(\text{homens-Sv})$$

$$\text{Altura (h)} = 2,8 \text{ m}$$

$$T_v = 1040 \text{ semanas}$$

$$\text{Comprimento (l)} = 3,0 \text{ m}$$

$$W_{fuga} = 0,6 \text{ Sv/semana}$$

$$A = h \times l = 8,4 \text{ m}^2$$

$$U = 1/4$$

$$d_{sec} = 1,6 \text{ m}$$

$$T = 1$$

$$TVL = 10,4 \text{ cm} = 0,104 \text{ m}$$

$$P_2 = 1 \text{ pessoa}$$

$$P_1 = 4 \text{ pessoas}$$

$$T_2 = 10 \text{ hora/semana}$$

$$T_1 = 25 \text{ horas / semana}$$

$$\ln(10) = 2,302$$

$$P_3 = 1 \text{ pessoa}$$

$$T_3 = 5 \text{ horas/semana}$$

$$n = \sum P_i \cdot T_i = (4 \times 25 + 1 \times 2 + 1 \times 5) / 40 \text{ horas} = 2,675$$

$$H_{tot} = \frac{W_{fuga}}{d_{sec}^2} = 0,6 / (1,6)^2 = 0,2344$$

$$B_{ot} = \frac{A.C.(TVL)_{mat}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{tot} \cdot T_v} = [8,4 \times 400 \times 0,104] / [2,302 \times 10000 \times 2,675 \times 0,2344 \times 1040] \\ = 2,3278 \times 10^{-5}$$

$$n = -\log(B) = -\log(2,3278 \times 10^{-5}) = 4,6331$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 10,4 + (4,6331 - 1) \times 10,4 = 48,184$$

G) Cálculo pelo Método de Archer - Radiação Primária:

Assumindo:

$$K_p^1 = 5,2$$

$$U = 1$$

$$W_{norm} = 1,9 \text{ mA.min/paciente}$$

$$d_p = 1,6 + 0,3 = 1,9 \text{ m}$$

$$W_{tot} = 250 \text{ pacientes/sem} \times 1,9 = 475 \text{ mA.min/sem}$$

$$P = 0,1$$

$$x_{pre} = 30 \text{ mm}$$

$$\alpha = 3,994 \times 10^{-2} \text{ mm}^{-1}$$

$$\beta = 1,448 \times 10^{-1} \text{ mm}^{-1}$$

$$\gamma = 4,231 \times 10^{-1}$$

$$N = 250 \text{ pacientes/sem}$$

$$T = 1$$

$$K_p(0) = \frac{K_p^1 \cdot U \cdot N}{d_p^2} = \frac{K_p^1 \cdot U \cdot W_{tot}}{d_p^2 \cdot W_{norm}} = (5,2 \times 1 \times 475) / (1,9)^2 \times 1,9 = 360 \text{ mGy/paciente}$$

$$B_p(x_{barrier} + x_{pre}) = \left(\frac{P}{T}\right) \cdot \frac{d_p^2}{K_p^1 \cdot U \cdot N} = 0,1/360 = 2,78 \times 10^{-4}$$

$$x_{barrier} = 124 \text{ mm de concreto}$$

$$x_{barrier} - x_{pre} = 124 \text{ mm} - 30 \text{ mm} = 94 \text{ mm} = 9,4 \text{ cm de concreto}$$

$$x_{barrier} = \frac{1}{\alpha \gamma} \cdot \ln \left[\frac{\left(\frac{N \cdot T \cdot U \cdot K_p^1}{P \cdot d_p^2} \right)^\gamma + \frac{\beta}{\alpha}}{1 + \frac{\beta}{\alpha}} \right] - x_{pre}$$

$$= (1/3,994 \times 10^{-2} \times 4,231 \times 10^{-1}) \times \ln [(250 \times 1 \times 1 \times 5,2 / 0,1 \times (1,9)^2)^{4,231 \times 10^{-1}} + \\ (1,448 \times 10^{-1} / 3,994 \times 10^{-2}) / 1 + (1,448 \times 10^{-1} / 3,994 \times 10^{-2}) - 72 \\ = 90,75 = 91 \text{ mm} = 9,1 \text{ cm de concreto}$$

H) Cálculo pelo Método de Archer - Radiação Secundária:

$$K_{sec}^1 = 2,3 \times 10^{-2}$$

$$U = 1$$

$$W_{norm} = 1,9 \text{ mA.min/paciente}$$

$$d_{sec} = 1,6 + 0,3 = 1,9 \text{ m}$$

$$W_{tot} = 250 \text{ pacientes/sem} \times 1,9 = 475 \text{ mA.min/sem}$$

$$P = 0,1$$

$$T = 1$$

$$\alpha = 3,510 \times 10^{-2} \text{ mm}^{-1}$$

$$\beta = 6,600 \times 10^{-2} \text{ mm}^{-1}$$

$$\gamma = 7,832 \times 10^{-1}$$

$$N = 250 \text{ pacientes/sem}$$

$$T = 1$$

$$K_{sec}(0) = \frac{K_{sec}^1 \cdot N}{d_{sec}^2} = (2,3 \times 10^{-2} \times 475) / (1,9)^2 \times 1,9 = 1,5928 \text{ mGy/paciente}$$

$$B_{sec}(x_{barrier}) = \left(\frac{P}{T}\right) \cdot \frac{d_{sec}^2}{K_{sec}^1 \cdot N} = 0,1 / 1,5928 = 0,0628 = 6,28 \times 10^{-2}$$

$$x_{barrier} = 36 \text{ mm} = 3,6 \text{ cm de concreto}$$

$$x_{barrier} = \frac{1}{\alpha \gamma} \cdot \ln \left[\frac{\left(\frac{N \cdot T \cdot K_{sec}^1}{P \cdot d_{sec}^2} \right)^\gamma + \frac{\beta}{\alpha}}{1 + \frac{\beta}{\alpha}} \right]$$

$$= (1/3,510 \times 10^{-2} \times 7,832 \times 10^{-1}) \times \ln [(250 \times 1 \times 2,3 \times 10^{-2}) / 0,1 \times (1,9)^2]^7,832 \times 10^{-1}$$

$$+ (6,600 \times 10^{-2} / 3,510 \times 10^{-2}) / 1 + (6,600 \times 10^{-2} / 3,510 \times 10^{-2})$$

$$= 47,47 = 48 \text{ mm} = 4,8 \text{ cm}$$

4.4 - Cálculo de Espessura da Parede D (Parede Primária)

Nesse ponto a vizinhança é um corredor, onde considera-se P1= 20 pessoas e T1= 1,25 horas/semana.

A) Cálculo pelo Método de Limite de Dose - Radiação Primária:

Assumindo:

$$d_{pri} = (2,7 + 0,4) = 3,1 \text{ m}$$

$$P(h) = 0,00002 \text{ Sv/semana}$$

$$W = 600 \text{ Gy/semana}$$

$$U = 1/4$$

$$T = 1$$

$$B_{pri} = \frac{P(h)(d_{pri})^2}{W \cdot U \cdot T} = [0,00002 \times (3,1)^2] / [600 \times 0,25 \times 1] = 1,2813 \times 10^{-6}$$

$$n = -\log(B) = -\log(1,2813 \times 10^{-6}) = 5,8924$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 10,4 + (5,8924 - 1) \times 10,4 = 61,281$$

Segundo o NCRP-49, é necessário acrescentar uma camada semi redutora de 3,1 cm ao obtido. Logo, $t_{\text{barreira}} = 64,38 \text{ cm}$.

B) Cálculo pelo Método de Otimização - Radiação Primária:

Assumindo:

$C = 400 \text{ dólares}$	$\alpha = 10.000 \text{ dólares}/(\text{homens-Sv})$
Altura (h) = 2,8 m	$T_v = 1040 \text{ semanas}$
Comprimento (l) = 3,0 m	$W = 600 \text{ Sv/semana}$
$A = h \times l = 8,4 \text{ m}^2$	$U = 1/4$
$d_{\text{pri}} = (2,7+0,4) = 3,1 \text{ m}$	$T = 1$
$TVL = 10,4 \text{ cm} = 0,104 \text{ m}$	$T_1 = 1,25 \text{ horas / semana}$
$P_1 = 20 \text{ pessoas}$	$\ln(10) = 2,302$

$$n = \sum P_i \cdot T_i = \{20 \times 1,25\} / 40 \text{ horas} = 0,625$$

$$H_{\text{tot}} = \frac{W \cdot U}{d^2} = [600 \times 0,25] / (3,1)^2 = 15,6088$$

$$B_{\text{ot}} = \frac{A \cdot C \cdot (TVL)_{\text{mat}}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{\text{tot}} \cdot T_v} = [8,4 \times 400 \times 0,104] / [2,302 \times 10000 \times 0,625 \times 15,6088 \times 1040]$$

$$= 1,4962 \times 10^{-6}$$

$$n = -\log(B) = -\log(1,4962 \times 10^{-6}) = 5,8250$$

$$t_{\text{barreira}} = TVL + (n - 1)TVL = 10,4 + (5,8250 - 1) \times 10,4 = 60,58$$

Segundo o NCRP-49, é necessário acrescentar uma camada semi redutora de 3,1 cm ao obtido. Logo, $t_{\text{barreira}} = 63,68 \text{ cm}$.

A escolha da espessura da barreira deve ser a maior entre as duas calculadas.

A parede D será construída com uma espessura de 67 cm.

C) Cálculo pelo Método de Limite de Dose - Radiação Secundária:

Assumindo:

$d_{\text{pri}} = 2,7 \text{ m}$	$P(h) = 0,00002 \text{ Sv/semana}$
$W = 600 \text{ Gy/semana}$	$U = 1/4$
$T = 1$	$d_{\text{sca}} = 0,5 \text{ m}$
$F = 20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} = 400 \text{ cm}^2$	$a = 0,0026$, para ângulo de 30°

$$B_{sca} = \frac{P_{(h)}(d_{sca})^2 \cdot (d_{sec})^2}{\alpha \cdot W \cdot U \cdot T} \cdot \frac{400}{F}$$

$$= [0,00002 \times (2,7)^2 \times (0,5)^2] / [0,0026 \times 600 \times 0,25 \times 1] \times (400 / 400) = 9,3462 \times 10^{-5}$$

$$n = -\log(B) = -\log(9,3462 \times 10^{-5}) = 4,0294$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 10,4 + (4,0294 - 1) \times 10,4 = 41,906$$

D) Cálculo pelo Método de Otimização - Radiação Secundária:

Assumindo:

$$C = 400 \text{ dólares}$$

$$\alpha = 10.000 \text{ dólares}/(\text{homens-Sv})$$

$$\text{Altura (h)} = 2,8 \text{ m}$$

$$T_v = 1040 \text{ semanas}$$

$$\text{Comprimento (l)} = 3,0 \text{ m}$$

$$W = 600 \text{ Sv/semana}$$

$$A = h \times l = 8,4 \text{ m}^2$$

$$U = 1/4$$

$$d_{sec} = 2,7 \text{ m}$$

$$T = 1$$

$$TVL = 10,4 \text{ cm} = 0,104 \text{ m}$$

$$T_1 = 1,25 \text{ horas / semana}$$

$$P_1 = 20 \text{ pessoas}$$

$$\ln(10) = 2,302$$

$$n = \sum P_i \cdot T_i = \{20 \times 1,25\} / 40 \text{ horas} = 0,625$$

$$H_{tot} = \frac{W \cdot a}{d_{sec}^2 \cdot d_{sca}^2} \cdot \frac{1600}{400} = \{[600 \times 0,0026] / [(2,7)^2 \times (0,5)^2] \times [1600 / 400]\} = 3,4239$$

$$B_{ot} = \frac{A \cdot C \cdot (TVL)_{mat}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{tot} \cdot T_v} = [8,4 \times 400 \times 0,104] / [2,302 \times 10000 \times 0,625 \times 3,4239 \times 1040] \\ = 6,8208 \times 10^{-6}$$

$$n = -\log(B) = -\log(6,8208 \times 10^{-6}) = 5,1662$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 10,4 + (5,1662 - 1) \times 10,4 = 53,728$$

E) Cálculo pelo Método de Limite de Dose - Radiação de Fuga:

Assumindo:

$$d_L = 2,7 \text{ m}$$

$$P(h) = 0,00002 \text{ Sv/semana}$$

$$W = 600 \text{ Gy/semana}$$

$$U = 1/4$$

$$T = 1$$

$$B_L = \frac{P_{(H)} \cdot (d_L)^2}{0,001 \cdot W \cdot U \cdot T} = [0,00002 \times (2,7)^2] / [0,001 \times 600 \times 0,25 \times 1] = 9,72 \times 10^{-4}$$

$$n = -\log(B) = -\log(9,72 \times 10^{-4}) = 3,0123$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 10,4 + (3,0123 - 1) \times 10,4 = 31,328$$

F) Cálculo pelo Método de Otimização - Radiação de Fuga:

Assumindo:

C = 400 dólares	$\alpha = 10.000 \text{ dólares}/(\text{homens-Sv})$
Altura (h) = 2,8 m	$T_v = 1040 \text{ semanas}$
Comprimento (l) = 3,0 m	$W = 600 \text{ Sv/semana}$
$A = h \times l = 8,4 \text{ m}^2$	$U = 1/4$
$d_{sec} = 2,7 \text{ m}$	$T = 1$
$TVL = 10,4 \text{ cm} = 0,104 \text{ m}$	$T_1 = 1,25 \text{ horas} / \text{semana}$
$P_1 = 20 \text{ pessoas}$	$\ln(10) = 2,302$

$$n = \sum P_i \cdot T_i = \{20 \times 1,25\} / 40 \text{ horas} = 0,625$$

$$H_{tot} = \frac{W_{fuga}}{d_{sec}^2} = 0,6 / (2,7)^2 = 0,0823$$

$$B_{ot} = \frac{A \cdot C \cdot (TVL)_{mat}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{tot} \cdot T_v} = [8,4 \times 400 \times 0,104] / [2,302 \times 10000 \times 0,625 \times 0,0823 \times 1040] \\ = 2,8376 \times 10^{-4}$$

$$n = -\log(B) = -\log(2,8376 \times 10^{-4}) = 3,5471$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 10,4 + (3,5471 - 1) \times 10,4 = 36,89$$

4.5 - Cálculo de Espessura da Porta

Embora os equipamentos de ortovoltagem possam emitir radiação com energia máxima de 500 kV, a faixa de uso clínico vai até 250 kV. Nesta faixa de energia não ocorre a produção de nêutrons, eliminando assim a necessidade de blindagem específica para estas partículas na porta, ao contrário do que é exigido para equipamentos de megavoltagem.

Nesse ponto a vizinhança é a área de comando e o corredor que dá à entrada da sala de tratamento. Considera-se P1 = 4 técnicos, T1 = 25 horas/semana ; P2 = 1 físico, T2 = 10 horas/semana e P3 = 1 médico, T3 = 5 horas/semana.

A) Cálculo pelo Método de Limite de Dose - Radiação Secundária:

Assumindo:

$$d_{sec} = 1,9 \text{ m}$$

$$P(h) = 0,0004 \text{ Sv/semana}$$

$$W = 600 \text{ Gy/semana}$$

$$U = 1/4$$

$$T = 1$$

$$d_{sca} = 0,5 \text{ m}$$

$$F = 20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} = 400 \text{ cm}^2$$

$$a = 0,0026, \text{ para ângulo de } 30^\circ$$

$$B_{sca} = \frac{P(h)(d_{sca})^2 \cdot (d_{sec})^2}{\alpha \cdot W \cdot U \cdot T} \cdot \frac{400}{F}$$

$$= [0,0004 \times (1,9)^2 \times (0,5)^2] / [0,0026 \times 600 \times 0,25 \times 1] \times (400 / 400) = 9,2564 \times 10^{-4}$$

$$n = -\log(B) = -\log(9,2564 \times 10^{-4}) = 3,0336$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 4,8 + (3,0336 - 1) \times 4,8 = 14,561$$

B) Cálculo pelo Método de Otimização - Radiação Secundária:

Assumindo:

$$C = 400 \text{ dólares}$$

$$\alpha = 10.000 \text{ dólares}/(\text{homens-Sv})$$

$$\text{Altura (h)} = 2,8 \text{ m}$$

$$T_v = 1040 \text{ semanas}$$

$$\text{Comprimento (l)} = 3,0 \text{ m}$$

$$W = 600 \text{ Sv/semana}$$

$$A = h \times l = 8,4 \text{ m}^2$$

$$U = 1/4$$

$$d_{sec} = 1,6 \text{ m}$$

$$T = 1$$

$$TVL = 4,8 \text{ cm} = 0,0048 \text{ m}$$

$$P2 = 1 \text{ pessoa}$$

$$P1 = 4 \text{ pessoas}$$

$$T2 = 10 \text{ hora/semana}$$

$$T1 = 25 \text{ horas / semana}$$

$$\ln(10) = 2,302$$

$$P3 = 1 \text{ pessoa}$$

$$T3 = 5 \text{ horas/semana}$$

$$d_{sca} = 0,5 \text{ m}$$

$$a = 0,0026, \text{ para ângulo de } 30^\circ$$

$$n = \sum P_i \cdot T_i = (4 \times 25 + 1 \times 2 + 1 \times 5) / 40 \text{ horas} = 2,675$$

$$H_{tot} = \frac{W \cdot a}{d_{sec}^2 \cdot d_{sca}^2} \cdot \frac{1600}{400} = \{[600 \times 0,0026] / [(1,9)^2 \times (0,5)^2]\} \times [1600 / 400] = 6,9141$$

$$B_{ot} = \frac{A.C.(TVL)_{mat}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{tot} \cdot T_v} = [8,4 \times 400 \times 0,0048] / [2,302 \times 10000 \times 2,675 \times 6,9141 \times 1040]$$

$$= 3,6424 \times 10^{-8}$$

$$n = -\log(B) = -\log(3,6424 \times 10^{-8}) = 7,4386$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 4,8 + (7,4386 - 1) \times 4,8 = 35,705$$

C) Cálculo pelo Método de Limite de Dose - Radiação de Fuga:

Assumindo:

$$d_L = 1,9 \text{ m}$$

$$P(h) = 0,0004 \text{ Sv/semana}$$

$$W = 600 \text{ Gy/semana}$$

$$U = 1/4$$

$$T = 1$$

$$B_L = \frac{P_{(H)} \cdot (d_L)^2}{0,001 \cdot W \cdot U \cdot T} = [0,0004 \times (1,9)^2] / [0,001 \times 600 \times 0,25 \times 1] = 9,6267 \times 10^{-3}$$

$$n = -\log(B) = -\log(9,6267 \times 10^{-3}) = 2,0165$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 4,8 + (2,0165 - 1) \times 4,8 = 9,679$$

D) Cálculo pelo Método de Otimização - Radiação de Fuga:

Assumindo:

$$C = 400 \text{ dólares}$$

$$\alpha = 10.000 \text{ dólares}/(\text{homens-Sv})$$

$$\text{Altura (h)} = 2,8 \text{ m}$$

$$T_v = 1040 \text{ semanas}$$

$$\text{Comprimento (l)} = 3,0 \text{ m}$$

$$W_{fuga} = 0,6 \text{ Sv/semana}$$

$$A = h \times l = 8,4 \text{ m}^2$$

$$U = 1/4$$

$$d_{sec} = 1,9 \text{ m}$$

$$T = 1$$

$$TVL = 10,4 \text{ cm} = 0,104 \text{ m}$$

$$P_2 = 1 \text{ pessoa}$$

$$P_1 = 4 \text{ pessoas}$$

$$T_2 = 10 \text{ hora/semana}$$

$$T_1 = 25 \text{ horas / semana}$$

$$\ln(10) = 2,302$$

$$P_3 = 1 \text{ pessoa}$$

$$T_3 = 5 \text{ horas/semana}$$

$$n = \sum P_i \cdot T_i = (4 \times 25 + 1 \times 2 + 1 \times 5) / 40 \text{ horas} = 2,675$$

$$H_{tot} = \frac{W_{fuga}}{d_{sec}^2} = 0,6 / (1,9)^2 = 0,1662$$

$$B_{ot} = \frac{A.C.(TVL)_{mat}}{\ln(10) \cdot \alpha \cdot \eta \cdot H_{tot} \cdot T_v} = [8,4 \times 400 \times 0,0048] / [2,302 \times 10000 \times 2,675 \times 0,1662 \times 1040]$$

$$= 1,5153 \times 10^{-6}$$

$$n = -\log(B) = -\log(1,5153 \times 10^{-6}) = 5,8195$$

$$t_{barreira} = TVL + (n - 1)TVL = 4,8 + (5,8195 - 1) \times 4,8 = 27,934$$