

# MINISTÉRIO DA SAÚDE INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER

## Programa de Qualidade em Radioterapia



## BLINDAGEM EM RADIOTERAPIA Técnicas e Normas

© 2000, Ministério da Saúde

É permitida a reprodução parcial ou total desta obra, desde que citada a fonte.

**MINISTÉRIO DA SAÚDE**

José Serra

**SECRETARIA DE ASSISTÊNCIA À SAÚDE**

Renilson Rehem de Souza

**INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER**

Jacob Kligerman

**TIRAGEM**

100 exemplares

**ELABORAÇÃO**

Eugenio Del Vigna Filho (Santa Casa da Misericórdia - Belo Horizonte)

Rossana C. Falcão (Diretoria de Radioproteção e Segurança - DRS/CNEN - IFUSP)

**REVISÃO**

Carlos Eduardo de Almeida (Instituto Nacional de Câncer e Universidade do Estado do Rio de Janeiro)

**PROJETO GRÁFICO**

Wilson Domingues de Souza

Ficha Catalográfica

B823b Brasil. Ministério da Saúde. Instituto Nacional de Câncer-INCA.  
Blindagem em radioterapia: técnica e normas. Rio de Janeiro:  
INCA, 2000.  
75 p.il  
Inclui bibliografia

1.Radioterapia    2.Organização de Normalização Profissional    3.Blindagem    I.Título.

CDD 615.842

# Ministério da Saúde

## Instituto Nacional de Câncer

### Programa de Qualidade em Radioterapia

#### COMISSÃO EXECUTIVA

Aristides Maltez Filho

*Associação Brasileira de Instituições*

*Filantrópicas de Combate ao Câncer - ABIFCC*

Carlos Eduardo de Almeida – Coordenador

*Instituto Nacional de Câncer – INCA*

Heloisa Carvalho

*Hospital das Clínicas - USP*

Luiz Henrique Pinto

*Instituto Nacional de Câncer – INCA*

Miguel Gonçalves

*Colégio Brasileiro de Radiologia - CBR*

PauloNovaes

*Hospital A. C. Camargo - CBR*

#### COORDENAÇÃO OPERACIONAL

Antonio Augusto de Freitas Peregrino, M.Sc.

*Laboratório de Ciências Radiológicas - UERJ*

André Novaes de Almeida

*Instituto Nacional de Câncer – INCA*

#### COMISSÃO CIENTÍFICA

Adelino José Pereira - Físico

*Hospital A. C. Camargo*

Carlos Manoel Araújo - Médico

*Instituto Nacional de Câncer – INCA*

Eugenio Del Vigna Filho - Físico

Santa Casa de Belo Horizonte

JFernandes da Silva - Médico

Hospital Sírio Libanês

José Carlos Cruz - Físico

*Hospital Albert Einstein*

Marcos David Mello - Médico

Santa Casa de Maceió

Miguel Mizziara Filho - Médico

*Hospital Arnaldo Viera de Carvalho*

Miguel Guizzardi - Médico

*Instituto Nacional de Câncer – INCA*

Sérgio Lannes Vieira - Médico

*Hospital Mario Kroeff*

#### APOIO



#### REALIZAÇÃO





# Apresentação

*Preparar a documentação técnica visando ao licenciamento de um Serviço de Radioterapia nos organismos responsáveis, CNEN e Secretárias de Saúde Estaduais, não tem sido trivial para muitos profissionais da área. Parte disto pode ser atribuída à pouca formação específica dos projetistas, às mudanças que ocorreram nos conceitos e normas de segurança e proteção radiológica ao longo dos anos e à falta de maior contato entre licenciadores e licenciados.*

*O Ministério da Saúde está implantando um Programa Nacional de Reequipamento Hospitalar que, ainda este ano, através do Instituto Nacional de Câncer - INCA promoverá a modernização de mais de 20 serviços de radioterapia na sua grande maioria afiliadas à ABIFICC e que atendem prioritariamente pacientes do SUS. Além disso o INCA, também coordena o Programa de Qualidade em Radioterapia, PQR, que visa a capacitar os diferentes profissionais especializados, radioterapeutas, físicos e técnicos, e promover a uniformização das condutas clínicas e dosimétricas.*

*Num esforço conjunto do Instituto Nacional de Câncer, através do PQR e da Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN, por meio da sua Diretoria de Radioproteção e Segurança (DRS), foi oferecido a todos os centros da radioterapia a oportunidade de discutirem o método envolvido no licenciamento de construção, de forma estruturada, com bibliografia específica e com a participação dos usuários, fabricantes e órgão licenciador.*

*Para preparar uma monografia e ministrar o curso sobre técnicas e normas de projetos de serviços de radioterapia, o PQR indicou o Prof. Eugenio Del Vigna Filho, membro de sua Comissão Científica, e a DRS designou a Prof<sup>a</sup> Rossana Falcão, uma das responsáveis pela análise de projetos, que aceitaram a tarefa e a cumpriram muito bem. Este documento será o Guia que todos estávamos esperando e o Curso, com certeza foi a oportunidade para apresentá-lo e enriquecê-lo com valiosas discussões e sugestões.*

Dr. Jacob Kligerman  
Diretor, INCA



# CONTEÚDO

<b>1.</b>	<b>Introdução</b> .....	9
1.1.	Objetivo .....	9
1.2.	Publicações Necessárias. ....	10
<b>2.</b>	<b>Projeto</b> .....	13
2.1.	Aspectos Legais .....	13
2.2.	Papel do Arquiteto .....	14
2.3.	Papel dos Engenheiros .....	16
2.4.	Detalhamento .....	17
<b>3.</b>	<b>Formato e apresentação</b> .....	21
3.1.	Estrutura Geral do RPAS .....	21
3.2.	Composição do RPAS .....	21
3.3.	Conteúdo do RPAS .....	21
<b>4.</b>	<b>Calculo de Blindagem Convencional</b> .....	23
4.1.	Limites Autorizados e Classificação de Área .....	23
4.2.	Método de Calculo Convencional .....	24
4.3.	Carga de Trabalho- W .....	25
4.4.	Fator de Uso- U .....	27
4.5.	Fator Ocupacional- T .....	28
4.6.	Razão Espalhamento Primária e Coeficientes de Reflexão .....	28
4.7.	Materiais de Blindagem .....	29
4.8.	Espessura da Barreira .....	30
4.9.	Incidência Oblíqua .....	31
4.10.	Largura e Comprimento da Barreira Primária .....	31
4.11.	Situação Especial - Skyshine .....	31
<b>5.</b>	<b>Labirinto convencional</b> .....	33
5.1.	Método de Falcão e Okuno .....	34
5.2.	Método de McGinley .....	35
<b>6.</b>	<b>Blindagem de nêutrons</b> .....	39
6.1.	Transporte de Nêutrons na Sala .....	39
6.2.	Blindagem das Paredes .....	40
6.3.	Labirinto e Porta para nêutrons .....	41
6.4.	Blindagem de Raios Gama de Captura .....	42
6.5.	Skyshine para Nêutrons .....	43
6.6.	Blindagem de Dutos e Passagens .....	43
<b>7.</b>	<b>Sala de Braquiterapia de Alta Taxa de Dose e sala do simulador</b> .....	45
7.1.	Blindagem da Sala de Braquiterapia HDR .....	45
7.2.	Blindagem da Sala do Simulador .....	47
<b>8.</b>	<b>Otimização das blindagens</b> .....	49
8.1.	Princípio da Otimização .....	49
8.2.	Método Iterativo do ICRP-33 .....	49
8.3.	Método Direto de Otimização .....	50
<b>9.</b>	<b>Exemplo de calculo de blindagem</b> .....	53
9.1.	Teleterapia: Acelerador Linear Varian Clinac 2100C .....	53
9.2.	Braquiterapia de Alta Taxa de Dose .....	56
<b>10.</b>	<b>Apêndice - dados técnicos</b> .....	59
<b>11.</b>	<b>Bibliografia</b> .....	65



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Objetivo

A implementação de um Serviço de Radioterapia é um processo longo e multidisciplinar, que envolve alto custo e requer profissionais de diversas áreas. A primeira etapa para implementação desse serviço é a da escolha e aquisição dos equipamentos que, para os participantes do Programa de Reequipamento Hospitalar do Ministério da Saúde, já foi concluída. A próxima etapa é a elaboração do Projeto de Blindagem, parte central do Relatório Preliminar de Análise de Segurança (RPAS). Esse documento é um dos que devem ser apresentados à CORAD/CNEN para que o serviço obtenha os registros e autorizações necessárias ao seu funcionamento. Aprovado o RPAS, a CORAD/CNEN emite uma autorização para construção (ou modificação) e o serviço pode iniciar as obras físicas para receber as máquinas. Depois da construção, da instalação dos equipamentos e dos testes de aceitação dos mesmos, deve-se apresentar o Relatório Final de Análise de Segurança (RFAS) - Plano de Radioproteção que, se aprovado, habilitará a operação dos equipamentos e o início do tratamento de pacientes.

Esse roteiro foi escrito para auxiliar os físicos brasileiros das instituições da ABIFCC, que receberão equipamentos do Ministério da Saúde, na preparação do Relatório Preliminar de Análise de Segurança. O objetivo principal é guiar os profissionais envolvidos nas diferentes etapas, mostrando como se prepara o RPAS de modo que a CORAD/CNEN possa analisá-lo com presteza. O documento deve ser sistematizado com muito cuidado para evitar-se recusa, agilizando a aprovação do projeto e habilitando o serviço a receber os equipamentos.

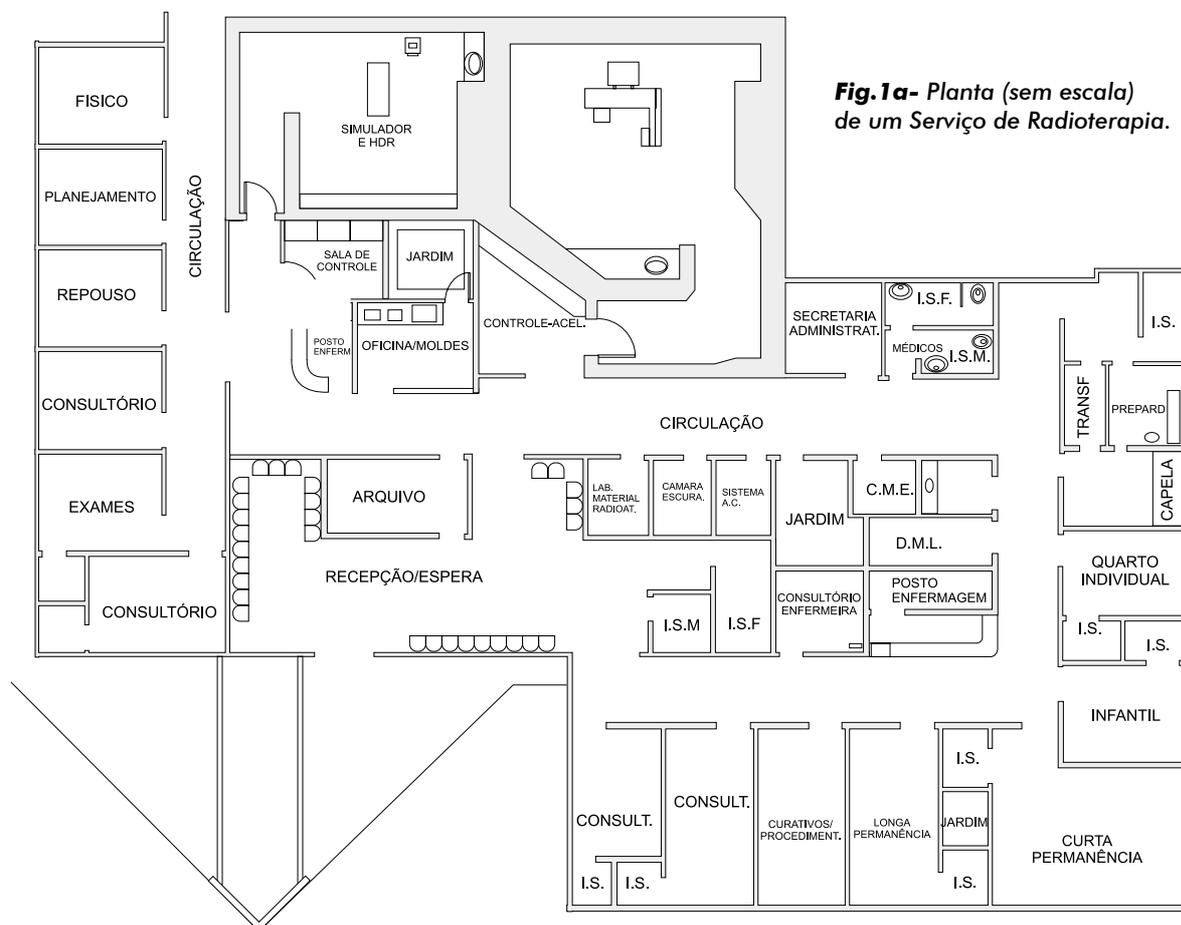
A preparação dessa documentação é de responsabilidade da direção da instituição. O RPAS deve ser elaborado por um profissional experiente, prefe-

rencialmente um físico supervisor de radioproteção. Geralmente o grupo encarregado do projeto e construção é composto por: Hospital Contratante, Médico Radioterapeuta, Arquiteto, Físico, Engenheiro Civil, Engenheiro Eletricista, Engenheiro Mecânico, Construtor e Vendedor dos Equipamentos. Para assegurar que o processo transcorra sem problemas é vital que a interação entre esses profissionais seja clara e permanente. A coordenação geral deve ser do arquiteto, com a assistência direta do físico, que trabalharão juntos até o início das operações, e que serão o elo entre o contratante e os outros, principalmente entre o fabricante dos equipamentos e o construtor.

A implementação de um serviço de radioterapia é demorada e o cronograma deve ser realista, incluindo um período adequado para a aceitação dos equipamentos e início dos tratamentos. Além disso, é extremamente importante que todas as exigências legais sejam rigorosamente cumpridas. Dentre elas, destacam-se as autorizações das Secretarias de Saúde e da Coordenação de Instalações Radiativas da CNEN. Nas próximas seções discutiremos em detalhes os itens que devem constar no RPAS.

Um prédio para radioterapia não é simplesmente uma construção de tijolos e concreto. Ele envolve também a integração de serviços de energia elétrica, iluminação, condicionamento de ventilação e temperatura, fornecimento de água, drenagem, gases medicinais, acabamento e decoração, tudo conjugado com ergonomia e segurança. Embora os princípios básicos de construção sejam os mesmos, não existe uma solução única do problema e cada caso individual deve ser tratado pela equipe com cuidado e atenção.

A figura abaixo é uma planta de um moderno Serviço de Radioterapia associado a um Serviço de Quimioterapia, mostrada aqui como exemplo.



**Fig. 1a-** Planta (sem escala) de um Serviço de Radioterapia.

## 1.2. Publicações Necessárias

Na elaboração do RPAS deve-se seguir as recomendações das normas abaixo, que podem ser encontradas no endereço da internet [cnen.gov.br](http://cnen.gov.br) ou adquiridas no Serviço de Informações Nucleares da CNEN, R. General Severiano, 90 – RJ, fones (021) 546-2301 e 546-2308 ou fax (021) 546-2447:

1. CNEN NE-3.01: Diretrizes Básicas de Radioproteção.
2. CNEN NE-3.02: Serviços de Radioproteção.
3. CNEN NE-3.03: Certificação de Qualificação de Supervisores de Radioproteção.

4. CNEN NE-3.06: Requisitos de Radioproteção e Segurança para Serviços de Radioterapia.

5. CNEN NE 5.01: Transporte de Materiais Radioativos.

6. CNEN NE 6.02: Licenciamento de Instalações Radiativas.

Para os cálculos das blindagens sugerimos as seguintes publicações:

1. HMSO (1971). Handbook of Radiological Protection. Part 1: Data.
2. ICRP #26 (1977). Recommendations of the ICRP.

3. ICRP #33 (1981). Protection Against Ionizing Radiation from External Sources...
4. ICRP #44 (1985). Protection of the Patient in Radiation Therapy.
5. ICRP #60 (1990). Recommendations of the ICRP.
6. IPSM # 46 (1986). Radiation Protection in Radiotherapy.
7. NCRP #49 (1976). Structural Shielding Design and Evaluation for Medical Use of x-rays And  $\gamma$  Rays of Energies Up To 10 MeV.
8. NCRP #51 (1979). Radiation Protection Design Guidelines for 0,1-100 MeV Particle Accelerator Facilities.
9. NCRP #79 (1984). Neutron Contamination from Medical Accelerators.
10. NCRP #102 (1989). Medical x-ray, Electron Beam and Gamma Ray Protection for energies up to 50 MeV (Equipment design, performance and use).

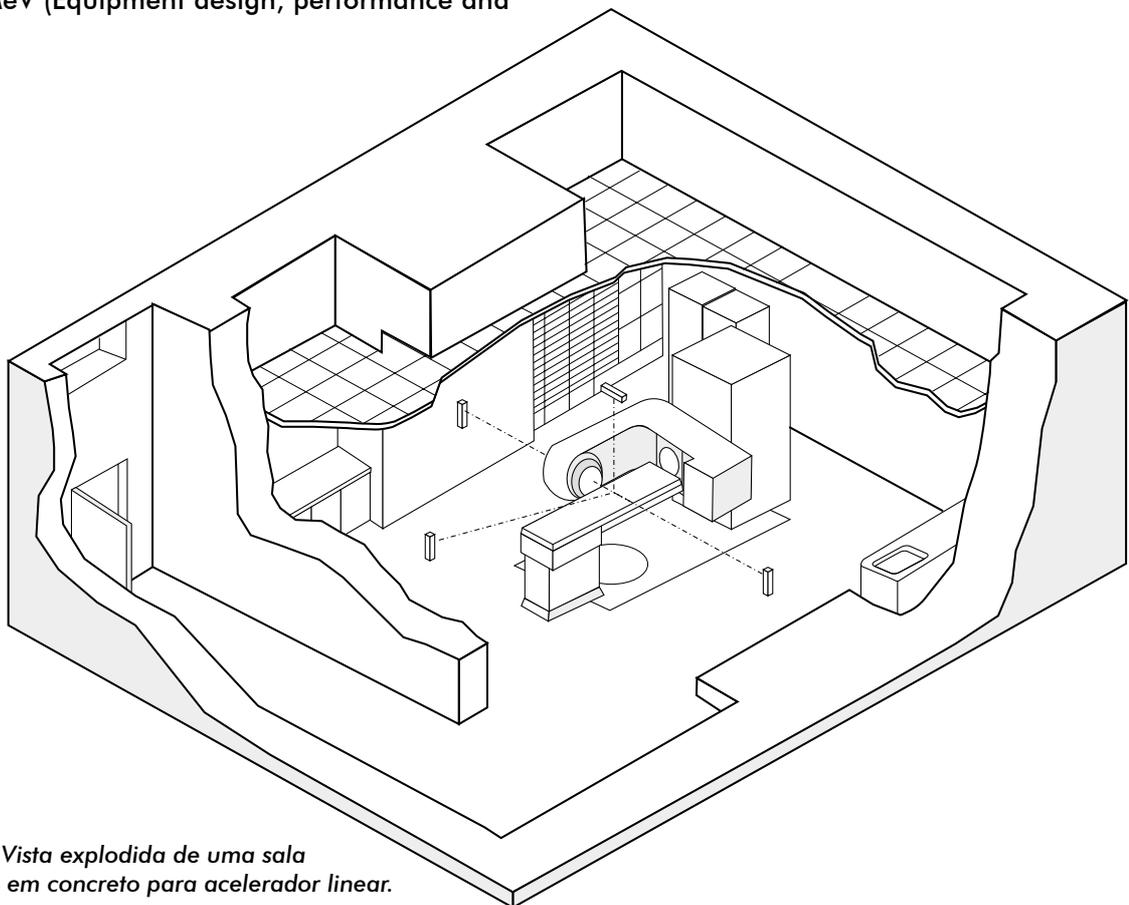
11. McGinley P. (1998) – Shielding Techniques for Radiation Oncology Facilities.

12. Mould, R.F. (1990) – Radiation Protection in Hospitals. Adam Hilger Pub.

13. Wright, A. E. (1992) – Medical Physics Handbook of Radiation Therapy – MPP.

Além delas deve-se ter também os manuais dos fabricantes que contenham as especificações técnicas dos equipamentos e as instruções de instalação. No final desta apostila apresentamos uma bibliografia relativamente extensa com livros texto, publicações e trabalhos importantes e pertinentes para nosso objetivo.

A figura abaixo é uma vista explodida de uma sala de acelerador linear. Notar posição da máquina, blindagem de feixe primário e radiação secundária, labirinto, porta e entrada para ar condicionado na bandeira da porta.



**Fig. 1b-** Vista explodida de uma sala blindada em concreto para acelerador linear.



## 2. PROJETO

### 2.1. Aspectos Legais

A portaria 1884/1994 do Ministério da Saúde estabelece que, para a implementação de um serviço de radioterapia onde se possa realizar consultas médicas de programação, preparar o paciente, realizar procedimentos de enfermagem, efetuar o planejamento de tratamento (cálculos, moldes, máscaras, simulação, etc.), aplicar radiações ionizantes terapêuticas com equipamentos apropriados e zelar pela proteção e segurança dos pacientes, operadores e ambiente. Um serviço deve ter, no mínimo:

- 1 consultório indiferenciado com 7,5 m<sup>2</sup>;
- 1 sala de preparo e observação de pacientes com 6,5 m<sup>2</sup>;
- 1 posto de enfermagem com 6 m<sup>2</sup>;
- 1 sala de serviços gerais com 6 m<sup>2</sup>;
- 1 oficina para confecção de moldes e máscaras com 10 m<sup>2</sup>;
- 1 sala para simulador (que pode ser a mesma que a de braquiterapia de alta taxa de dose), com área e blindagem compatíveis com os equipamentos;
- 1 sala de planejamento e física médica com 10 m<sup>2</sup>;
- 1 sala de comando para cada equipamento com 6 m<sup>2</sup> cada;
- 1 sala de terapia para cada equipamento de tratamento, com área e blindagem compatíveis com a máquina;
- Sala de espera de pacientes e acompanhantes;
- Área de registro de pacientes;
- Depósito de material de limpeza;
- Sanitários para funcionários;
- Vestiário para pacientes;
- Sala de utilidades;
- Copa;
- Câmara escura;
- Sala administrativa;
- Depósito de equipamentos;
- Sanitários para pacientes;
- Área para macas e cadeira.

Essa mesma portaria determina, ainda, que o serviço deve atender às recomendações da norma CNEN NE-3.06, que trata especificamente da radioproteção e segurança em radioterapia. Este documento estabelece os requisitos necessários para a instalação e operação de um serviço de radioterapia, e suas proposições formam o arcabouço legal que deve ser atendido nos planos de radioproteção. Resumidamente, a norma inicialmente apresenta várias definições, depois apresenta as condições gerais, que incluem a justificativa das atividades, as responsabilidades básicas dos diferentes profissionais, as condições de um plano de radioproteção, os requisitos gerais quanto a instalações e equipamentos, os requisitos gerais de radioproteção, os procedimentos e dispositivos de segurança, o controle e monitoração da área, os requisitos de blindagem, os instrumentos de medição necessários, os requisitos de garantia de qualidade, os requisitos de projeto e operação, os registros e inspeções e, finalmente, orientações para o planejamento de instalações e para o projeto das blindagens em radioterapia.

Essa apostila segue as recomendações acima, sendo um complemento para seu atendimento.

## 2.2. Papel do Arquiteto

Os departamentos de radioterapia devem ser instalados, preferencialmente, em andar térreo, na periferia do complexo hospitalar, para evitar os problemas de radioproteção que surgem se as salas de tratamento estiverem próximas a locais de alta ocupação. Sendo possível, deve ser um bloco independente e exclusivo e sem ocupação sobre o teto. Construções subterrâneas são aceitáveis, mas muito caras, e construções acima do térreo não são recomendadas. A situação em relação ao hospital deve ser tal que facilite a entrada de pacientes ambulatoriais, proporcionando maior facilidade de interação com os outros serviços hospitalares, principalmente a locomoção de pacientes internados e os exames complementares.

Depois de definidas a área a ser construída, as máquinas e as necessidades do serviço, o arquiteto, líder do projeto, começa a encaixar todas as peças, detalhando o projeto. Nessa etapa, é necessária a participação de toda a equipe: médicos, físico, ad-

ministração e engenheiros, que devem assegurar que a construção estará terminada e que todos os requisitos de pré-instalação exigidos pelos fabricantes estarão executados na chegada dos equipamentos. Consultas aos fabricantes são extremamente importantes e, a maioria deles, possui departamentos de ajuda aos usuários que fornecem todas as informações necessárias.

No caso de uma nova sala ou departamento, o arquiteto deve preparar vários desenhos em escala, incluindo locação do terreno, planta de situação, fachada e diagrama de cobertura, planta detalhada do departamento e planta e cortes detalhados das áreas blindadas, incluindo vizinhanças, que atendam as normas legais de construção.

A seguir é mostrada uma lista de itens a serem considerados quando se projeta uma sala de tratamento :

---

### Acesso

- Para a máquina
- Para macas e cadeira de rodas

### Segurança

- Blindagem
- Porta de Entrada
- Sinalização de Radiação
- Indicação de Feixe Ligado
- Botões de Emergência
- Microchaves de Segurança

### Comunicação com o Paciente

- Janela ou Circuito fechado de TV
- Intercomunicação Oral

### Armazenagem Dentro da Sala

- Aplicadores
- Blocos de blindagem
- Dispositivos de Imobilização

### Armazenagem na Área de Controle Prontuário do Paciente

- Registro dos Tratamentos
- Registro dos Defeitos e Emergências
- Registro de Controle de Qualidade
- Registro da Performance da Máquina
- Equipamentos de Dosimetria
- Equipamentos de Testes
- Peças de Reposição
- Dispositivos de Alinhamento por Laser
- Controle de Iluminação

### Energia Elétrica

- Para a Máquina
- Para os Instrumentos de Dosimetria

### Água e Esgoto

### Gases Medicinais

### Decoração

### Acomodação dos Pacientes

- Sala de Espera
  - Sala de Troca de Roupa
-

No detalhamento das áreas blindadas o arquiteto deve ser informado pelo físico sobre as espessuras de blindagem necessárias para instalação de cada máquina. Deve-se levar em consideração as implicações de direcionamento do feixe primário para o teto e paredes e sobre o melhor posicionamento da máquina em relação ao labirinto, porta e área de controle. Para máquinas isocêntricas, o projeto deve-se desenvolver em torno da posição do isocentro.

O fabricante deve fornecer o manual do equipamento, com todos os requisitos de instalação, tais como as dimensões mínimas da sala. Deve-se informar também se existe necessidade de um receso no chão e de sustentadores de peso no teto, quais os métodos de instalação e de manutenção e a natureza e tamanho da máquina e dos equipamentos auxiliares como, por exemplo, gabinete do modulador, gabinetes eletrônicos, controles, resfriadores, regulador de tensão, etc.

O projeto de blindagem, incluindo as espessuras das paredes e porta e a posição do labirinto requer intensa colaboração com o físico, que deverá fornecer um desenho detalhado para ser usado como base ao projeto final. A partir desse desenho, o arquiteto arranjará as acomodações para os equipamentos auxiliares e planejará as salas de controle, de espera, de troca de roupas, recepção.

No caso de reforma o problema é um pouco diferente e mais difícil, já que a sala existe e geralmente a altura e o labirinto não podem ser modificados. Isso pode exigir a fixação de materiais de blindagem mais densos, dificultando a entrada da máquina. Em alguns casos pode ser necessário quebrar uma parede ou até o teto para permitir a entrada do equipamento. Deve-se tomar cuidado especial no caso da sala ser muito antiga ou da máquina a ser instalada ter energia maior que a substituída. Salas antigas podem ter sido planejadas obedecendo a normas de radioproteção menos restritivas que as atuais e não oferecer blindagem adequada. Nos dois casos as blindagens terão que ser aumentadas para atender às normas vigentes e muitas vezes isto é impossível em serviços já construídos.

Os materiais mais comuns para radioproteção em radioterapia são o concreto de densidade normal ou o de alta densidade, placas de aço e/ou lâminas de chumbo. Concreto comum é o material mais barato e simples de se usar. Caso haja restrição de espaço deve-se considerar o uso de materiais alternativos. Em algumas situações, principalmente na reforma de uma sala ou em construções próximas a áreas muito ocupadas, onde o espaço é fundamental, pode ser necessário usar placas de aço ou uma combinação de aço e concreto, de modo a manter mínima a espessura da blindagem e máximo o tamanho da sala.

Embora concreto seja o material mais indicado, sua densidade não é tão uniforme quanto a do aço ou do chumbo e, por isso, seu uso requer cuidado. A equipe de engenharia deve se tomar especial cuidado na armação, nas juntas, na seqüência de lançamento, na vibração e na cura do concreto para evitar o aparecimento de fissuras, buracos ou dilatações.

Nas novas construções é dada preferência pelo concreto de densidade média  $2\ 350\ \text{Kg/m}^3$ , mas admite-se pequena flutuação pela variação local dos componentes. Concretos de alta densidade (com barita ou hematita) e aço devem ser usados somente quando o espaço for limitado. Chumbo ou aço são indicados para revestimento de portas e, algumas vezes, para recessos de parede onde se instalam lasers ou caixas de junção.

Junto com a sala de tratamento o arquiteto deve planejar a sala de controle. A escolha será entre uma sala fechada ou uma aberta. Na primeira, os técnicos e equipamentos ficam visualmente isolados dos pacientes. Na segunda os técnicos podem realizar suas atividades e, ao mesmo tempo, supervisionar os pacientes em espera. Nos dois casos é essencial situar a mesa de controle e equipamentos de modo que se tenha total e permanente controle de acesso à sala de tratamento e que os pacientes em espera ou outros indivíduos não possam ver os que estão sendo tratados. Nessa etapa é importante que os técnicos participem do projeto, já que estão na melhor posição para informar como o departamento trabalha e quais são suas neces-

sidades. A equipe de projetistas deve ainda considerar como fazer a melhor ligação entre a sala de controle e a de tratamento, providenciando as melhores condições de iluminação e refrigeração do ambiente de trabalho, levando sempre em conta a ergonomia e a eficiência.

### 2.3. Papel dos Engenheiros

O papel dos engenheiros é assegurar que a sala do equipamento possa ser construída da maneira como foi planejada. Para paredes de concreto isso inclui a armação e a concretagem e, se forem usadas placas de aço ou chumbo, a forma como elas serão fixadas nos locais apropriados. Deve-se assegurar que o método de construção é tal que não existirão buracos ou juntas pelas quais a radiação possa escapar, e, que as especificações e os controles dos materiais, dosagem (composição), densidade, propriedades mecânicas, elásticas e térmicas são as necessárias e atendem ao projeto.

No caso de reforma, é mais simples aumentar a blindagem das paredes laterais do que do teto, onde as condições de trabalho são geralmente limitadas pelo espaço. Normalmente, é mais fácil construir ou suportar estruturas adicionais sobre o teto do que sob ele, mas, nesse caso, deve-se tomar especial cuidado com a carga adicional e com o isolamento hidráulico. Se a blindagem tiver que ser adicionada abaixo do teto deve-se sustentá-la por vigas de concreto ou de aço que atravessam toda a sala e se apóiam nas paredes existentes, ou em colunas de aço instaladas dentro da sala. No caso de construção de colunas e vigas internas a reforma pode ser impossível, devido à diminuição do espaço da sala.

Juntamente com a equipe de projetistas, os engenheiros devem programar os serviços de suprimentos elétricos, hidráulicos, condicionamento de ar, fornecimento de gases medicinais, etc., que interligarão a máquina na sala de tratamento aos equipamentos associados na sala de controle e/ou outros locais de origem. As rotas para esses serviços devem ser cuidadosamente planejadas antes da

concretagem do piso. Deve-se certificar da quantidade e dos diâmetros das tubulações, de como elas se interligam nos diferentes equipamentos, qual a profundidade e curvatura adequadas e como elas entram na sala blindada. Prioritariamente, deve-se evitar passagem direta da radiação pela estrutura de blindagem, o que se consegue através da entrada dos dutos em curvas ou por acesso sob o alicerce da sala. Como medida de segurança, todas as passagens e dutos devem atravessar a blindagem fora do feixe primário de radiação. Passagens para condicionamento de ar devem chegar pela bandeira da porta, na região do labirinto. Cabos de dosímetros devem penetrar próximos ao controle por tubo de 10 mm de diâmetro, inclinado em relação à parede, em direção ao piso interno. Os cabos elétricos e a alimentação hidráulica devem penetrar na sala por canaleta profunda próxima ao controle.

Os engenheiros devem estar atentos para os recesos no chão, necessários para a instalação das bases de sustentação da máquina e da maca. Como as bases exigem um buraco no chão, deve-se saber quais as condições de sustentação e de hidrografia do solo, de modo a evitar futuras infiltrações e abatimentos. Tanto o piso quanto o receso devem ser impermeabilizados antes do acabamento.

Na parte de serviços é que ocorre a maioria dos problemas de instalação de um novo equipamento, principalmente quando se tratar de reforma. A carga elétrica, por exemplo, pode ser insuficiente, ou os dutos elétricos e hidráulicos podem estar mal posicionados. Não é raro que as plantas estejam defasadas e incompletas e tenham que ser refeitas.

O acabamento e a decoração compõem a parte final do projeto. Ela deve ser planejada cuidadosamente, se possível com a assistência de arquiteto de interiores. A primeira preocupação deve ser a da facilidade de limpeza e desinfecção. Paredes pintadas a óleo, piso de granito e teto rebaixado de gesso oferecem acabamento adequado. As cores, texturas, mobiliário, etc., devem ser tais que proporcionem sensação de tranquilidade e limpeza. Quadros, plantas e até um aquário melhoram bas-

tante o ambiente. As salas de tratamento e de controle devem estar integradas ao acabamento e decoração de todo o departamento de modo a oferecer um ambiente agradável de trabalho. Parte importante nesta etapa é a sinalização de circulação indicando claramente as áreas de acesso restrito.

## 2.4. Detalhamento

O acesso às salas de tratamento deve ser largo o suficiente para tornar possível a entrada da máquina, de macas e cadeiras de rodas. O piso deve suportar as pesadas cargas dos equipamentos e permitir que as caixas circulem sem interferências.

A instalação de uma porta na entrada das salas de tratamento é mandatária. Embora uma sala com labirinto bem projetado possa não exigir blindagem na entrada, a existência de uma barreira física é imprescindível para evitar a circulação de pessoas não autorizadas. A blindagem da porta é necessária quando não se tiver espaço suficiente para um bom labirinto ou quando a sala receber novo equipamento de energia mais alta. Nos casos de reequipamento, a aquisição de aparelhos com "beam-stopper" pode ser uma boa solução. Para máquinas com energia de fótons e/ou elétrons igual ou maior que 10 MV, pode ser necessário blindar a porta para fôtons, especialmente se o labirinto for único e muito curto. Portas motorizadas devem ter um mecanismo auxiliar que permita a sua abertura no caso de falha mecânica ou elétrica. Como são lentas, a provisão de "meia abertura" facilitará o trabalho dos técnicos.

É imprescindível que a porta possa ser aberta de ambos os lados e, embora não exija fechadura, deve-se instalar um dispositivo, por exemplo, magnético, que assegure o fechamento numa exposição. Portas pinoteadas bem balanceadas são mais ergonômicas e fáceis de manusear. A blindagem da porta deve ser contínua e homogênea e se estender alguns centímetros além do vão de entrada para evitar a existência de frestas. A facilidade "corta fogo" e o intertravamento elétrico que impeça a exposição com a porta aberta também são mandatórios.

A sala de controle deve se situar próxima à porta para que os técnicos mantenham vigilância permanente no acesso e para que seu trabalho seja realizado com mais eficiência e presteza. Essa sala deve ser ampla o suficiente para acomodar o pessoal, o mobiliário e os equipamentos de controle e dosimetria, deve ter vários interruptores e tomadas elétricas para o acionamento da iluminação e instalação dos equipamentos, circuitos fechados de TV, intercomunicador, dosímetros, computadores, impressoras, etc. É importante a instalação de uma chave geral para desligar tudo numa emergência. Para evitar danos aos equipamentos, todas as tomadas devem ser aterradas e estar ao mesmo potencial e fase.

Os cabos condutores de eletricidade devem estar fora da vista, mas não fora de acesso. Eles devem correr facilmente para dentro da sala de tratamento, entrando preferencialmente através de canaleta construída sob o alicerce. Todos os dutos devem ter diâmetro compatível com os serviços que vão receber. Um item extremamente importante, e geralmente esquecido pelos fabricantes, é a instalação de dutos de reserva, tanto para os cabos elétricos quanto para água, esgoto e ar condicionado. Não é raro que dutos de serviços, principalmente de água e esgoto, tornem-se entupidos no decorrer dos anos e impeçam seu uso. O material dos dutos de serviços deve ser compatível com sua utilização. Cabos elétricos, p.ex., devem correr em tubos de PVC e água, em tubos de cobre.

Sinalização de segurança é mandatária. Deve-se afixar na porta o sinal internacional de presença de radiação (trifólio) com dizeres CUIDADO – RADIAÇÃO e telefones dos responsáveis e de quem acionar em casos de emergência. Um sinal automático de aviso de prontidão para irradiar e outro de presença de radiação deve-se fazer presente e visível na mesa de controle, na entrada sobre a porta e dentro da sala de tratamento. Esse sinal geralmente é feito com duas lâmpadas, uma verde para indicar prontidão e outra vermelha para indicar radiação. Normalmente o fabricante já a fornece no console de controle, mas a sinalização da entrada e a do interior da sala blindada é instalada pelo departamento. A visibilidade dos avisos de seguran-

ça deve ser total, isto é, a iluminação e as cores devem ser intensas e o tamanho apropriado. Uma configuração otimizada contém um sinal escrito de **Área Restrita** na sinalização verde de prontidão e outro com **Radiação-Entrada Proibida** na vermelha, piscando intermitentemente durante a exposição. A primeira deve-se acender quando a porta for fechada e permanecer neste estado até sua abertura. A vermelha deve ser acionada enquanto houver exposição. As lâmpadas devem ser incandescentes para evitar a demora das fluorescentes.

Para equipamentos de telecobalterapia ou de braquiterapia de alta taxa de dose, deve-se instalar um detector ambiental de radiação independente (GM ou similar), com sinalização de exposição na mesa de controle e na entrada da sala. O sinal do monitor deve indicar a condição de fonte exposta e ser visível. Esse equipamento é mandatório, pois permite um controle que independe das condições de operação da máquina de tratamento. Botões de emergência devem ser instalados nas áreas de controle e de tratamento e seu posicionamento deve ser tal que facilite a identificação e impeça a operação acidental.

As salas de tratamento exigem a instalação de sistema de água para resfriamento do acelerador linear, de água e esgoto para higiene das mãos e para dosimetria. É necessário um sistema de ar condicionado e, muitas vezes, de um sistema de gases medicinais para anestesia e recuperação do paciente. Geralmente, os circuitos de resfriamento são fechados e conectados a um reservatório externo. Seus dutos condutores devem obedecer às condições do fabricante e, como precaução, instalados em duplicata. Normalmente esses sistemas correm sob o piso e é aconselhável que sejam em canaletas com cobertura desmontável.

O reservatório externo especificado pelo fabricante deve ser instalado próximo à sala blindada, construído de modo a facilitar os serviços, a drenagem e a limpeza. É necessário instalar bombas de recalque em duplicata e que possam ser acionadas a partir da área interna do departamento. O sistema de esgoto da pia deve ser bem adaptado e ter ralo no chão para, quando necessário, drenar a água de resfriamento e de dosimetria e facilitar a

limpeza da sala. A entrada de todos os tubos na sala deve ficar fora do feixe primário e devem ser curvos, de modo a evitar o escape de radiação.

Piso e recessos devem ser impermeabilizados. Deve-se tomar especial cuidado com a hidrografia do solo e a existência de lençóis freáticos. Se esses forem superficiais, podem inundar a sala numa chuva intensa e causar danos irreparáveis à máquina. A drenagem do solo é um dos primeiros itens na construção, e deve ser executada com técnica apurada.

O sistema de ar condicionado deve climatizar adequadamente o ambiente e proporcionar recirculação do ar. Pode-se usar um sistema de ar condicionado central ou um sistema tipo "split". No primeiro, indica-se a entrada pela bandeira da porta, tomando-se cuidado para evitar a saída de radiação secundária. O duto de entrada deve ser blindado por lâminas de chumbo ou por absorvedores de foneutrons, e, uma boa solução é fazê-lo entrar em curva sobre a porta. Os sistemas tipo "split" facilitam a radioproteção, já que a canalização é feita por tubos de pequeno diâmetro, que podem entrar na sala fazendo curvaturas, eliminando o escape de radiação. Nesse caso deve-se provisionar a renovação de ar, pois o sistema não possui recirculador. A melhor rota dentro da sala é sobre um teto falso rebaixado, seguindo o labirinto. Em ambos os casos exige-se construção de sala externa para acomodar o maquinário. Sistema individual de ar condicionado é contra indicado porque exige grande abertura numa parede e blindagem adicional complicada.

Um sistema de abastecimento de gases medicinais é imprescindível na sala de braquiterapia de alta taxa de dose e algumas vezes é indicado nas de teleterapia e simulação. Aplicam-se os mesmos cuidados que para os dutos de água e eletricidade em relação à tubulação e posicionamento e deve-se provisionar cuidadosamente a segurança para gases inflamáveis.

Várias tomadas e interruptores elétricos devem ser instalados nas paredes da sala, principalmente próximas ao gantry. Elas são necessárias para a iluminação, para os lasers de posicionamento, para

serviços de limpeza e manutenção, para os equipamentos de dosimetria, para as câmaras de TV, para o monitor ambiental de radiação, para ventiladores, quando o sistema de ar condicionado entra em pane, para os botões de emergência, para os sinalizadores, etc. Se existir um recesso para o modulador ou para a mesa de controle, ele também deve ser iluminado para facilitar o serviço.

Para assegurar a radioproteção adequada, caso as caixas de passagem ou lasers sejam embutidos nas paredes blindadas, deve-se fixá-los em placas de aço fundidas no concreto com dimensões de 4 cm de espessura e margem extra de 2,5 cm em relação à caixa. Essas peças de fixação e blindagem são necessárias tanto para os recessos internos quanto externos à sala.

A visualização do paciente é mandatária e idealmente deve ser feita com duas câmaras de TV, posicionadas defronte ao aparelho para ótima monitoração. Uma delas deve focar no isocentro e a outra dar uma visão panorâmica do paciente e da máquina. O sistema de duas câmaras amplia o campo de monitoração e uma serve de reserva para a outra, no caso de defeito. Nenhum tratamento pode ser realizado se o paciente não for visualmente monitorado. Se o tratamento é feito fora da mesa ou do isocentro, como no caso de irradiação de corpo inteiro, deve-se provisionar a melhor posição de instalação. Dispositivos de controle remoto possibilitam o ajuste automático de foco, do zoom, do controle da íris e da direção.

A instalação de um sistema de intercomunicação oral de duas vias é mandatária e deve ser feito entre a sala de controle e a de tratamento, permitindo que tanto a voz do técnico quanto a do paciente sejam audíveis.

O mobiliário da sala de tratamento deve oferecer condições para o armazenamento de todos os dispositivos usados pelo serviço. Uma sala de teleterapia, por exemplo, deve guardar blocos de blindagem, bandeijas, máscaras de fixação, filtros em cunha, aplicadores de elétrons,

posicionadores, material de bólus, acessórios da unidade de tratamento, fantomas para dosimetria, eletrômetros, réguas, espessômetros, etc. Recomenda-se a instalação de piso antiestático nas salas de tratamento e controle, já que vários computadores, dispositivos eletrônicos e gases inflamáveis serão usados.

Um item extremamente importante e muitas vezes negligenciado é a instalação de duto apropriado para passagem de cabos de dosimetria. Ele é essencial para facilitar e agilizar os procedimentos dosimétricos e imprescindível nas salas com longos labirintos. Esses dutos devem partir da sala de controle próximo à mesa e atravessar a parede blindada, de modo a impedir a incidência de radiação primária e minimizar a de secundária.

Nenhum tubo deve entrar perpendicularmente à parede. Normalmente os cabos de dosimetria correm sobre o piso, mas, se possível, deve-se fazer com que eles fiquem embutidos, para evitar danos. Devemos nos lembrar que a dosimetria moderna exige uma variedade de cabos como, por exemplo, para calibração padrão, para movimentação automática de câmaras de ionização dentro de fantomas, para dosimetria in-vivo, para conexão de computadores, etc. Dessa forma, o duto deve ser planejado adequadamente. Se algum cabo de dosimetria for permanente, deve-se provisionar sua entrada pela canaleta de serviços, sua saída próxima à mesa de tratamento e evitar que corram sobre o piso. O acabamento do duto de dosimetria no lado externo deve ter maior espaço para ser preenchido por blindagem extra removível quando o mesmo não estiver sendo usado.

A presença de lintel interno, que muitas vezes é exigida pela estrutura, é uma boa forma de reduzir a radiação espalhada no labirinto, principalmente para foneutrons. Chicanas e bicos também contribuem, já que aumentam as trajetórias de reflexão. Como eles diminuem também o espaço livre, devem ser projetados cuidadosamente de modo a não interferir no acesso à sala de tratamento.



## 3. FORMATO E APRESENTAÇÃO

### 3.1. Estrutura Geral do RPAS

O Relatório Preliminar de Análise de Segurança-RPAS é o documento hábil para obtenção das Autorizações de Construção e de Importação dos Equipamentos geradores de radiação ionizante junto a CNEN. Note-se que, mesmo na posse da autorização de construção e de importação, o serviço ainda não está apto a operar seus equipamentos. Para tal, depois da instalação, da monitoração radiométrica e dos testes de aceite e comissionamento e, antes de iniciar os tratamentos, deve-se obter junto a CNEN a licença de operação, através de Relatório Final de Análise de Segurança, que não é objeto do presente roteiro.

Tanto nas novas instalações quanto nas modificações de instalações já existentes, o processo se inicia com uma carta do Diretor responsável pela instituição à Coordenação de Instalações Radiativas da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CORAD/CNEN), apresentando o serviço e descrevendo resumidamente o que pretende. Em geral uma página de texto é suficiente. Junto à carta segue a "Solicitação de Concessão de Licenças e Autorizações" (SCRA), formulário padrão da CORAD, que é auto-explicável e de preenchimento simples e que pode ser obtido na home-page da CNEN (<http://www.cnen.gov.br>). O envio do SCRA é obrigatório. Desde o início de 1999, a CNEN foi autorizada por Lei Federal a cobrar taxas de licenciamento. A forma de pagamento ou de pedido de isenção dessas taxas pode também ser encontrada na página da CNEN na internet.

Na elaboração do RPAS deve-se seguir as recomendações do presente roteiro, apresentando-o da seguinte maneira:

### 3.2. Composição do RPAS

O RPAS deve ser apresentado em capítulos, seções e outras subdivisões, na ordem detalhada dos itens que se seguem:

- Enviar para análise da CORAD/CNEN dois vo-

lumes contendo o sumário geral, o índice de tópicos e definição das abreviações, siglas, símbolos e termos especiais. Estes devem ser usados de forma consistente em todo o relatório.

- As informações referentes a rejeitos e transporte, quando aplicável, devem constar em um capítulo exclusivo e independente das demais informações.

- Todas as informações devem ser apresentadas de modo claro, conciso e preciso. Sempre que possível utilizar tabelas, gráficos, esquemas, diagramas e plantas.

O RPAS deve obedecer às seguintes especificações gráficas:

Dimensões do Papel:

- Folhas de texto: 21,0 x 29,7 cm<sup>2</sup> (A4)
- Esquemas e Gráficos: De preferência 21,0 x 29,7 cm<sup>2</sup> (A4). Pode-se usar dimensões maiores, desde que a cópia completa dobrada não ultrapasse A4.
- Plantas: Tamanho A0 ou A1, em escala 1:50 para detalhes, 1:100 para planta baixa e 1:500 para situação, dobradas para A4, com o carimbo de identificação na frente, que deve conter o endereço do serviço, a assinatura e o número no CREA do arquiteto ou engenheiro responsável pela obra. É recomendável, embora não seja obrigatório, que contenha também a assinatura e número de registro na CNEN do supervisor de radioproteção e a assinatura do diretor responsável pela instituição.

### 3.3. Conteúdo do RPAS

#### 3.3.1. Identificar o Serviço na página de rosto.

Colocar o nome oficial, o nome de fantasia, o endereço, telefone, telefax e e-mail, o nome e a qualificação do diretor responsável, o nome e número de registro no CBR do médico radioterapeuta

responsável e o nome e número de registro na CNEN do físico supervisor de radioproteção (caso esse já tenha sido contratado nessa fase do processo). Anexar o contrato social.

### **3.3.2. Descrever o(s) Equipamento(s) emissor(es) de radiação ionizante.**

Colocar todas as informações para a identificação completa da máquina: Fabricante; Modelo; Tipo; Radiação(ões) emitidas; Energias; Montagem (isocêntrica ou não); Taxa de dose nominal; Campo máximo de irradiação; Fuga máxima pelo cabeçote e, se pertinente, transmissão pelo "beam stopper" certificadas pelo fabricante; Atividade máxima do radionuclídeo; TVL de feixe largo em concreto comum e em quaisquer outros materiais de blindagem utilizados, para o feixe primário, para a radiação de fuga e para a radiação espalhada em todas as energias de fótons, etc.

### **3.3.3. Descrever resumidamente o funcionamento do equipamento.**

Anexar catálogos.

### **3.3.4. Apresentar os Trabalhadores e sua Qualificação.**

Identificar o diretor, o radioterapeuta e o supervisor de radioproteção responsáveis e seus substitutos em casos de impedimentos e descrever suas atribuições, responsabilidades e horário de trabalho. Para outros funcionários só é necessária a descrição das atribuições.

### **3.3.5. Descrever os Instrumentos de Detecção e Monitoração da Radiação que serão adquiridos:**

Identificar o(s) monitor(es) portátil(eis) de área e o(s) dosímetros(s) clínico(s).

### **3.3.6. Descrever as Instalações do Serviço.**

Apresentar as instalações, descrevendo as salas blindadas e as de apoio, classificando-as como li-

vres ou restritas. Descrever o laboratório de preparo de fontes (braquiterapia convencional), as salas de tratamento e simulação, as salas de controle e de espera, de exames, banheiros, etc. Identificar acesso(s), porta(s), gaps, overlaps, material(ais) da(s) parede(s), tubulações, interloques, botões de emergência, sinalização de advertência, intercomunicação visual e oral, etc.

### **3.3.7. Plantas.**

O RPAS deve conter pelo menos 3 plantas (pranchas).

- Uma prancha contendo a Planta de Situação (localizando o serviço de radioterapia e o hospital em relação à vizinhança) em escala 1:200 ou 1:500.
- Uma prancha contendo a planta do serviço de radioterapia, identificando todas as instalações e sua vizinhança. Realçar as áreas blindadas. Escala 1:50 ou 1:100.
- Uma prancha de detalhes da área blindada, contendo planta e cortes (elevação lateral e frontal), para cada máquina de radioterapia (uma para equipamento de teleterapia, uma para braquiterapia HDR, uma para simulador, etc.). Incluir as dimensões das blindagens, a posição dos pontos de cálculos de blindagem (incluindo distância da fonte ou do isocentro). Desenhar a máquina e dispositivos auxiliares em posição, incluindo o feixe primário em todas as direções. Indicar a posição da porta, de armários, de pia e do sistema hidráulico, do sistema de condicionamento de ar, da tubulação para eletricidade, hidráulica e dosimetria, das chaves de segurança (principalmente da porta e de emergência), dos sistemas de visualização e intercomunicação, do sistema de monitoração da radiação, das lâmpadas de segurança, do controle, etc. Incluir um quadro contendo a identificação da máquina, a carga de trabalho, os limites de dose, e para cada ponto de cálculo de blindagem a classificação da área e os fatores uso, ocupacional e distância. Escala 1:20 ou 1:50.

## 4. CÁLCULO DE BLINDAGEM CONVENCIONAL

A memória do cálculo de blindagens de radioproteção é parte integrante do RPAS e deve constar em capítulo exclusivo. Todas as premissas usadas devem ser relatadas de maneira clara, obedecendo às recomendações das publicações sugeridas ao final dessa apostila.

### 4.1. Limites Autorizados e Classificação de Áreas

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

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

- a) a dose equivalente efetiva anual para trabalhadores não excede 1 mSv,
- b) a dose equivalente efetiva anual para indivíduos do público não excede 10  $\mu$ Sv,
- c) a dose equivalente efetiva coletiva integrada num ano não excede 1 homem-Sv.

Não aconselha-se o uso desses limites pois as barreiras se tornarão espessas e caras .

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

- a) para trabalhadores: 50 mSv/ano;
- b) para indivíduos do público: 1 mSv/ano

Para o cálculo de blindagens, quando geralmente se usa carga de trabalho semanal, pode-se usar os seguintes limites derivados:

- a) para trabalhadores: 1 mSv/semana;
- b) para indivíduos do público: 0,02 mSv/semana

Salas de tratamento e de controle devem ser classificadas como áreas controladas e o acesso restrito a pacientes e trabalhadores. Nenhum indivíduo, exceto o paciente, pode permanecer na sala durante uma exposição. Do ponto de vista de cálculo de blindagens e de uso, salas de espera, vestiários, banheiros, etc., devem ser classificadas como áreas livres, pois os pacientes são considerados indivíduos do público quando fora de sua sala de tratamento. Do mesmo modo, para fins de cálculos de blindagem, uma sala de tratamento anexa à que está sendo considerada deve ser classificada como livre porque o paciente dela é um indivíduo do público para a outra. É claro que, como sala de tratamento, ela continua sendo de acesso controlado restrito a trabalhadores e pacientes. Muitas vezes também é conveniente classificar a área de controle como livre pois os procedimentos de segurança são menos restritivos e o aumento no custo não é significativo. No cálculo de barreiras primárias não se considera a atenuação do feixe primário pelo paciente. A fuga pelo cabeçote deve obedecer aos limites da norma CNEN 3.06, item 4.6 e, para fins de cálculo de blindagem em aceleradores, pode-se usar o valor conservador de 0,1% (ou 1/1000).

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

No cálculo de uma blindagem, primeiro determina-se o fator de transmissão-B pelo material e

busca-se a espessura da blindagem que atende aos limites de dose em gráficos B x espessura (ou usando TVLs).

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

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

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

Na otimização, apresentar os cálculos que levaram à determinação das barreiras necessárias para atingir os níveis de dose otimizados dos diferentes pontos. No capítulo 8 apresentamos dois métodos de otimização. Para cada ponto, a maior das espessuras que atendem à otimização e à limitação da dose individual será a definitiva do projeto.

## 4.2. Método de Cálculo Convencional

Os cálculos de blindagens convencionais para aceleradores operando até 10 MV e para

braquiterapia são baseados em informações das publicações NCRP-49 e ICRP-33. Para energias maiores usamos os dados do NCRP-51 e do NCRP-79. Dois tipos de barreiras são consideradas: primárias e secundárias. A barreira primária é aquela irradiada pelo feixe útil e a secundária recebe somente radiação transmitida pela blindagem da máquina (fuga) e/ou espalhada pelo paciente e pelas superfícies da sala de tratamento.

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

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

$$B_x = \frac{P(d_{\text{prim}})^2}{WUT} \quad (1)$$

onde P é o limite autorizado derivado semanal para regiões externas;  $d_{\text{prim}}$  é a distância em metros entre o alvo ou fonte até o ponto protegido; W é a carga de trabalho em Sv/sem; U é o fator de uso e T o fator ocupacional. Depois de ( $B_x$ ), determinamos a espessura necessária para atender o limite autorizado a partir de curvas de atenuação ou de cálculos usando o número de TVLs, baseados na energia do feixe e no tipo do material empregado na blindagem.

A transmissão pela barreira necessária para reduzir a intensidade da radiação espalhada e ao limite autorizado em áreas externas ( $B_p$ ) é dada por:

$$B_p = \frac{P}{aWT} (d_{\text{sec}})^2 (d_{\text{esp}})^2 \frac{400}{F} \quad (2)$$

onde  $d_{\text{sec}}$  é a distância em metros da superfície espalhadora até o ponto a ser protegido;  $d_{\text{esp}}$  é a distância em metros do alvo até a superfície espalhadora (geralmente, no caso do paciente ser

o meio espalhador,  $d_{\text{esp}} = 1 \text{ m}$ ); ( $\alpha$ ) é a razão entre a intensidade da radiação espalhada a 1 m do objeto espalhador e a da radiação primária a 1 m do alvo;  $F$  é o tamanho do campo no paciente em  $\text{cm}^2$ .

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

$$B_s = \frac{P(d_e)^2(d_s)^2}{\alpha AWUT} \quad (3)$$

onde  $d_e$  é a distância em metros entre o alvo e a superfície espalhadora;  $d_s$  é a distância em metros entre a superfície espalhadora e o ponto protegido;  $\alpha$  é o coeficiente de reflexão para o material da superfície espalhadora, ângulo de espalhamento e energia do feixe (ver NCRP-51);  $A$  é a área irradiada da superfície espalhadora em  $\text{m}^2$ .

A transmissão pela barreira proveniente da fuga pelo cabeçote ( $B_f$ ) é dada por:

$$B_f = \frac{1000P(d_{\text{sec}})^2}{WT} \quad (4)$$

onde o fator 1000 aparece porque a blindagem do cabeçote dos aceleradores, em geral, atenua a intensidade da radiação, no mínimo, por esse fator. Entretanto, se o fabricante especificar o nível de fuga, o valor máximo fornecido deve ser usado. A distância  $d_{\text{sec}}$  em metros a ser usada é aquela entre o isocentro e o ponto a ser protegido, já que a posição média da fonte de raios-x (alvo) está no isocentro. Para aceleradores com guia de onda horizontal na barreira atrás da máquina,  $d_{\text{sec}}$  será a distância entre o canhão de elétrons e o ponto a ser protegido, pois ela deve blindar radiação de fuga proveniente das proximidades do canhão.

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

### 4.3. Carga de Trabalho- W

Carga de Trabalho é a quantidade de radiação produzida por uma máquina de tratamento num de-

terminado intervalo de tempo a uma dada distância. Para aceleradores lineares ou para fontes gama geralmente se calcula a carga de trabalho em termos de kerma do feixe útil de radiação por semana, a uma distância de 1 m da fonte. Embora várias publicações tragam valores padrão de  $W$ , este parâmetro depende dos métodos de trabalho de cada serviço e deve ser determinado individualmente para cada local e máquina. Caso o Serviço de Radioterapia seja novo, pode-se empregar valores de outros, que empregam técnicas de tratamento similares ou, em último caso, usar dados da literatura. A carga de trabalho pode ser dividida em Carga de Trabalho Clínica- $W_c$ , a que é usada nos tratamentos e em Carga de Trabalho Física- $W_{\text{fis}}$ , gerada a partir de irradiações de dosimetria e de manutenção. É importante notar que um Serviço de Radioterapia, quando inicia sua operação, nem sempre trabalha com um número grande de pacientes. No entanto, as blindagens devem ser projetadas prevendo-se um aumento gradativo no número de atendimentos, até atingir a capacidade total da máquina. A seguir, apresentamos dois exemplos de determinação de carga de trabalho em radioterapia, com acelerador linear e com braquiterapia de alta taxa de dose:

Exemplo 1: Determinação da Carga de Trabalho Semanal no isocentro para acelerador linear de dupla energia de fótons (6 e 10 MV) e várias energias de elétrons (5–14 MeV).

a) Carga de Trabalho Clínica –  $W_c$

- número de pacientes por dia = 60
- dias de tratamentos por semana = 5
- dose média no isocentro por volume alvo por dia = 2 Gy
- número médio de volumes alvo por paciente = 1,5
- utilização do feixe de elétrons: 10% do total = 0,10
- utilização do feixe de fótons 6 MV: 40% do total = 0,40
- utilização do feixe de fótons 10 MV: 50% do

total = 0,50

Estes valores pressupõem que a máquina trabalhe 10 horas por dia, atendendo 6 pacientes por hora. Note-se que o tempo de 10 minutos por paciente refere-se ao tempo total do mesmo na sala e inclui tanto o tempo médio de irradiação (1-2 min) quanto o de set-up (8-9 min).

Usando os valores acima temos:

$$W_c (\text{elétrons}) = 60 \times 2 \times 1,5 \times 5 \times 0,1 = 90 \text{ Gy/sem a 1 m}$$

$$W_c (6 \text{ MV}) = 60 \times 2 \times 1,5 \times 5 \times 0,4 = 360 \text{ Gy/sem a 1 m}$$

$$W_c (10 \text{ MV}) = 60 \times 2 \times 1,5 \times 5 \times 0,5 = 450 \text{ Gy/sem a 1 m}$$

O valor  $W_c (10 \text{ MV}) = 450 \text{ Gy/sem a 1 m}$  poderia ser usado para os cálculos das barreiras, já que se a sala estiver blindada para 10 MV também estará para os outros feixes. Entretanto, tendo em vista que o fator utilização pode variar, que o custo não será muito maior, e, principalmente em função do princípio ALARA, aconselhamos que a carga de trabalho clínica usada seja calculada como se todos os tratamentos fossem feitos à máxima energia de fótons (10 MV), ou seja:

$$W_c = 60 \times 2 \times 1,5 \times 5 = 900 \text{ Gy/sem a 1 m}$$

b) Carga de Trabalho Física –  $W_{fis}$

A carga de trabalho física deve incluir todas as irradiações além das usadas no tratamento. Dentre elas teremos as de dosimetria e controle de qualidade e as de manutenção da máquina. Embora a carga de trabalho física possa variar de um serviço para outro e mesmo de um dia para outro, uma estimativa bastante realista e conservadora é:

$$W_{fis} = 100 \text{ Gy/sem a 1 m}$$

c) Carga de Trabalho Total –  $W$

A carga de trabalho total será a soma das duas anteriores,  $W = W_c + W_{fis}$ . Assim sendo:

$$W = 1000 \text{ Gy/sem a 1 m ou } W = 10^3 \text{ Gy/sem a 1 m}$$

Este valor deve ser usado nos cálculos das blindagens para acelerador linear. Embora tenha sido obtido para a máquina do exemplo, pode ser usado para outras energias e configurações por ser bastante realista.

Nota: Se o acelerador linear for usado para irradiação de corpo todo, uma das paredes laterais deverá ter maior espessura que a outra, porque, neste caso, o paciente será posicionado próximo a ela para assegurar campo adequado de irradiação. Para se liberar uma dose adequada no paciente a dose no isocentro terá que ser grande e deve-se adequar tanto a carga de trabalho quanto o fator de uso. Por exemplo, se uma dose de 14 Gy for aplicada a 10 cm de profundidade num paciente posicionado a 3,67 m do alvo, aproximadamente 230 Gy de 10 MV terão que ser liberados no isocentro, num tratamento que será feito em menos de 1 semana, aumentando a carga de trabalho semanal e instantânea (por minuto ou hora), o que exige maior blindagem que no caso convencional.

Exemplo 2: Determinação da Carga de Trabalho Semanal para equipamento de braquiterapia de alta taxa de dose (HDR) com fonte de  $^{192}\text{Ir}$ .

Para braquiterapia, a fração de tempo empregada na dosimetria física e na manutenção é pequena, de tal forma que pode-se considerar apenas a carga de trabalho clínica. Em serviços brasileiros não é raro se tratar até 6 pacientes por dia e, portanto, 30 pacientes por semana. Supondo-se que, em média, cada paciente receba 3 canais (típica para tratamentos de tumores uterinos) e que, conservativamente, cada canal dure 2 minutos, teremos:

d) Carga de Trabalho Semanal –  $W$

- número de pacientes por dia = 6
- número de pacientes por semana = 30
- número de canais por paciente = 3
- número de canais por semana = 90
- tempo por canal = 2 min

• tempo de exposição por semana;  $t = 90 \times 2 = 180 \text{ min} = 3 \text{ horas}$

• taxa de kerma no ar (air kerma rate ou AKR) para 370 GBq (10 Ci) de  $^{192}\text{Ir}$ :

$$\text{AKR} = 4,2 \times 10^{-2} \text{ Gy/h a } 1 \text{ m}$$

Carga de Trabalho Semanal W

$$W = \text{AKR} \times t = 4,2 \times 10^{-2} \text{ Gy/h a } 1 \text{ m} \times 3 \text{ h/sem};$$

$$W = 0,126 \text{ Gy/sem a } 1 \text{ m}$$

O valor acima é bastante adequado para HDR. Entretanto, levando-se em conta a dosimetria e manutenção, podemos aproximá-lo para  $W = 0,15 \text{ Gy/sem a } 1 \text{ m}$ .

Devido ao decaimento da fonte, o tempo de exposição da aumenta a medida que a atividade decai mas o tempo médio  $\times$  AKR real se mantém constante. Observa-se também que no cálculo da carga de trabalho não foi considerada a atenuação oferecida pelo paciente.

As cargas de trabalho calculadas acima estão expressas em termos de taxa de dose ou de kerma no

ar. Para coerência metrológica elas precisam ser ajustadas para taxa de dose equivalente, expressas em Sv/sem. Sabendo-se que o fator qualidade da radiação X ou gama até a energia de 10 MV é  $Q=1$ , e assumindo-se que  $N=1$ , teremos, 1 Sv = 1 Gy e W em termos de Sv/sem a 1 m.

#### 4.4. Fator de Uso- U

O fator de uso é uma grandeza adimensional que leva em conta a fração de tempo em que o feixe útil de radiação (feixe primário) se posiciona para uma direção em particular. Esse fator depende essencialmente das técnicas usadas no serviço. O fator de uso é uma grandeza que deve ser considerada apenas para cálculo de blindagem em teleterapia. Em braquiterapia não existe uma direção preferencial para o feixe primário e portanto, o fator de uso é sempre igual a 1. A prática da teleterapia na Santa Casa-BH e no Instituto de Radioterapia do Hospital Belo Horizonte, MG, mostra que 50% dos campos de irradiação são dirigidos para o chão, 20% o são perpendicularmente para o teto, 20% são dirigidos para os lados (10% para cada) e 10% são angulados (5% entre o piso e a parede lateral e 5% entre a parede lateral e o teto). Na tabela abaixo mostramos os fatores uso nestas condições e também dados do NCRP-49, do INCA/RJ e de Johns & Cunningham (4ª Ed).

*Fator Uso U para Feixe Primário*

Direção	NCRP- 49	INCA/RJ	Johns & Cunningham	Santa Casa IRGMV/MG
Piso	1	3/7	1/2	1/2
Teto	1/4	2/7	1/10	1/5
Lateral	1/4	1/7	1/10	1/10
Angulado	-	-	-	1/20

**Na ausência de valores reais, pode-se usar:**

- Para o piso ( $0^\circ \pm 20^\circ$ ):  $U = 3/7$
- Para o teto ( $180^\circ \pm 20^\circ$ ):  $U = 2/7$
- Para a parede direita ( $180^\circ \pm 20^\circ$ ):  $U = 1/7$
- Parede esquerda ( $270^\circ \pm 20^\circ$ ):  $U = 1/7$

#### 4.5. Fator Ocupacional- T

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

- T = 1 (ocupação total): áreas de trabalho como controle, consultórios, escritórios, laboratórios, oficinas, enfermarias, posto de enfermagem, edifícios vizinhos ocupados como residências, escolas, etc.
- T = 1/4 (ocupação parcial): salas de espera, salas de repouso ou recuperação, copas, etc.
- T = 1/16 (ocupação eventual): corredores, banheiros, escadas, depósitos de material, áreas de ventilação ou iluminação, áreas externas usadas para tráfego de pessoas ou veículos (passeios e ruas), etc.

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

#### 4.6. Razão Espalhamento-Primária ( $\alpha$ ) e Coeficientes de Reflexão ( $\alpha$ )

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

Razão espalhamento-primária ( $\alpha$ ) a 1 m de um fantoma de água para um campo de 400 cm<sup>2</sup> e DFI = 1 m. Radiação incidente medida no ar, no centro do campo a 1 m da fonte.

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

No caso do espalhamento ocorrer em outros materiais, como concreto e aço, por exemplo, os dados da literatura são bastante escassos. Existe um grupo de trabalho escrevendo uma nova NCRP para cálculos de blindagem em radioterapia, que deverá substituir a de número 49. Espera-se que nessa nova publicação sejam fornecidos coeficientes de espalhamento para novos materiais, energias e ângulos de reflexão. Entretanto, até hoje, os valores de coeficientes de reflexão para concreto e aço a serem usados, principalmente no cálculo de blindagem de portas para raios-x são os encontrados na figura E.15 do NCRP-51, que está reproduzida no apêndice desta apostila.

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

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

#### 4.7. Materiais de Blindagem

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

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

sidade do concreto usado acarreta um ajuste na espessura calculada que, se não for muito grande, pode ser feito baseado na razão entre as densidades.

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

Aço de baixo teor de carbono apresenta características favoráveis de blindagem e, devido à resistência, pode também ser usado como componente estrutural. Placas de aço podem ser usadas complementarmente ao concreto quando o espaço está

A tabela abaixo resume algumas propriedades físicas dos materiais mais utilizados em blindagem .

Material	Densidade (g cm <sup>-3</sup> )	Nº atômico	Custo relativo
Concreto comum	2,3 - 2,4	11	1,0
Concreto denso	3,0 - 4,8	26	5,8
Aço de baixo C	7,87	26	3,0
Chumbo	11,35	82	22
Terra (seca-compacta)	1,5	-	baixo

O concreto comum tem a vantagem do baixo custo e da facilidade de construção. Embora as blindagens em concreto sejam bastante espessas, devido ao número atômico e densidade relativamente baixos, ele é o material de escolha quando espaço não é problema. A concretagem exige armação de ferragem para aumentar a resistência, e fôrmas para contenção da massa fluida. Sempre que possível ela deve ser feita de forma contínua e vibratória para evitar fendas e espaços vazios. A dosagem do concreto fresco deve ser cuidadosa e corpos de prova devem assegurar a necessária densidade, resistência à compressão e à tração e propriedades elásticas. O controle de temperatura é essencial para evitar perda rápida de água. Como as espessuras são baseadas em concreto comum de 2,35 g cm<sup>-3</sup>, qualquer variação na den-

à prêmio e também como marco e blindagem de portas e ainda como preenchimento de recessos nas paredes. Chumbo só é aconselhado como blindagem nas portas. Embora esse material seja denso, lençóis ou lâminas de chumbo são difíceis de manusear, possuem baixa resistência e são muito caros.

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

#### 4.8. Espessura da Barreira

Conhecendo-se os fatores de transmissão pela barreira (vide fórmulas (1), (2), (3), (4)), determina-se a espessura da blindagem que atende os limites autorizados de dose, a partir de curvas de transmissão de feixes largos das publicações NCRP-49 e 51 ou ICRP-33. Sempre que possível, a espessura da blindagem deve ser determinada a partir da leitura direta do gráfico apropriado. Para radiação de fuga, se não houver uma curva experimental, recomenda-se usar a de transmissão da radiação primária.

Outro método para determinação de espessura de barreira é baseado na primeira TVL ( $T_1$ ) e nas TVLs subseqüentes ( $T_e$ ), e é dado no NCRP-51, podendo ser usado quando não houver curvas de transmissão apropriadas. Uma alternativa mais conservadora e simples é usar somente a primeira TVL. A tabela abaixo mostra alguns valores de TVLs, adaptados do NCRP-51.

O número  $n$  de TVLs da barreira pode ser obtido a partir da equação abaixo, usando-se o valor da transmissão ( $B_x$  ou  $B_p$ ) já calculado:

$$n = \log_{10} (1/B_x) \text{ ou } n = \log_{10} (1/B_p) \quad (5)$$

e a espessura ( $S$ ) da barreira será dada por:

$$S = T_1 + (n-1) T_e \quad (6)$$

A Varian Associates (EUA), fabricante de aceleradores lineares para radioterapia, fornece dados de TVL de feixe primário e de fuga a 90° para suas máquinas, que são baseados em trabalhos publicados por Nelson e LaRiviere (1984). Para a determinação da espessura da barreira é usado um único valor de TVL, que é tirado da média entre a primeira e a terceira TVL. São fornecidos valores para concreto, aço, chumbo e terra, tabulados em função da energia definida a partir do BJR-11 de 1972.

*Espessura décimo-redutora (TVL) para diferentes energias e materiais de blindagem - NCRP*

Energia Nominal	Material	TVL <sub>1</sub> (m)	TVL <sub>e</sub> (m)
6 MV	Concreto Comum	0,35	0,35
	Aço	0,099	0,099
10 MV	Concreto Comum	0,41	0,39
	Aço	0,104	0,104
15 MV	Concreto Comum	0,46	0,43
	Aço	0,108	0,108

*Espessura décimo-redutora (TVL) para radiação primária e para radiação de fuga a 90° - VARIAN*

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

O trabalho de Nelson e LaRivieri de 1984 também apresenta informações de TVLs de fuga pelo cabeçote em direções entre 35° e 145° relativas ao raio central.

*Primeira e Terceira TVL em concreto para radiação de fuga pelo cabeçote - Nelson e LaRivieri*

Energia Nominal	6 MV		10 MV		25 MV	
Ângulo	TVL <sub>1</sub> (m)	TVL <sub>3</sub> (m)	TVL <sub>1</sub> (m)	TVL <sub>3</sub> (m)	TVL <sub>1</sub> (m)	TVL <sub>3</sub> (m)
35° a 55°	0,353	0,293	0,366	0,328	0,377	0,367
80° a 100°	0,341	0,284	0,349	0,311	0,359	0,347
125° a 145°	0,333	0,269	0,347	0,299	0,355	0,325

#### 4.9. Incidência Oblíqua

O NCRP-49 apresenta uma fórmula empírica para o cálculo de blindagem para feixes de <sup>60</sup>Co e <sup>137</sup>Cs, quando a radiação incide obliquamente na barreira e alguns autores também propõem sua aplicação em altas energias. Entretanto, esse procedimento é desaconselhado porque cálculos de Monte Carlo recentes indicam que essa aproximação não é válida para todas as energias, ângulos de incidência e materiais, podendo induzir a erros importantes e levar ao estabelecimento de barreiras insuficientes.

#### 4.10. Largura e Comprimento da Barreira Primária

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

Se um feixe é projetado numa barreira a X metros de distância, a largura máxima do campo será  $L_{max} = 0,566 X$ , onde X é a distância do alvo à superfície externa.

A largura horizontal da barreira será então dada por:

$$L = 0,566 X + 0,6 \text{ (m)} \quad (7)$$

No caso particular do acelerador linear Varian

2100C, o ângulo máximo de abertura do feixe é de 28° (14° de cada lado do isocentro) e a diagonal máxima é 49,5 cm, no isocentro a 100 cm. Para essas máquinas a largura horizontal da blindagem deverá ser:

$$L = 0,495 X + 0,6 \text{ (m)} \quad (8)$$

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

#### 4.11. Skyshine ou Radiação Espalhada no Ar

Algumas salas de radioterapia podem ser projetadas com menos blindagem no teto, caso não exista ocupação no piso superior. Nesse caso, deve-se levar em consideração a radiação espalhada pela atmosfera, que pode atingir regiões ocupadas no térreo fora da sala, ou quaisquer outras construções adjacentes, e até interferir com equipamentos de medicina nuclear instalados nas dependências do hospital. Essa componente, conhecida como "skyshine" é mostrada abaixo:

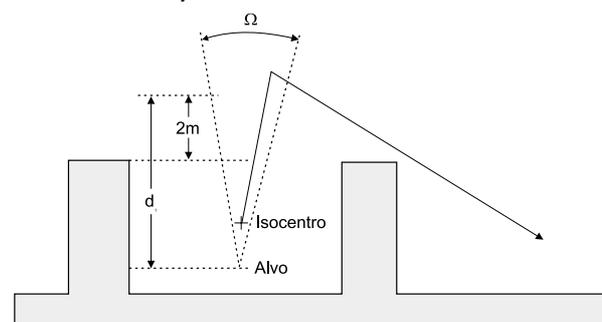


Fig.2- Diagrama para determinação da radiação de "skyshine" de fótons de um acelerador.

A dose devida ao "skyshine" pode ser calculada usando a seguinte relação empírica:

$$B_{x,sky} = 4,02 \times 10^{-6} \frac{D(d_i d_s)^2}{D_{io}(\Omega)^{1.3}} \quad (9)$$

onde,

- $D$  é a taxa de dose equivalente de fótons ao nível do solo (local ocupado) em nSv/s;
- $d_s$  é a distância horizontal (m) do isocentro até o ponto onde a taxa de dose é  $D$ ;
- $d_i$  é a distância vertical em metros do alvo até um ponto situado a 2 m acima do teto;
- $D_{io}$  é a taxa de dose a 1 metro do alvo em cGy/s;
- $W$  é o ângulo sólido do feixe primário em esteroradianos;
- $B_{x,sky}$  é o fator de transmissão pelo teto (se houver);

Resolvendo esta equação para a taxa de dose equivalente ao nível do solo,  $D$ , teremos:

$$D = 0,249 \times 10^6 \frac{B_{x,sky} D_{io} \Omega^{1.3}}{(d_i d_s)^2} \quad (10)$$

O exemplo abaixo ajuda a esclarecer o conceito de blindagem de skyshine:

Supondo que:

- $B_{x,sky} = 1,0$  (não existe blindagem no teto);
- $d_s = 10,6$  m (distância horizontal do isocentro até um ponto ocupado fora da sala);
- $d_i = 5,97$  m (distância vertical = pé direito – distância piso/alvo + 2m);
- $D_{io} = 6,67$  cGy/s (baseado numa máquina que libera 400 cGy/min no isocentro);
- $W = 0,122$  esteroradianos (baseado num campo  $40 \times 40$  cm<sup>2</sup> a 1m;  $W = 2p(1 - \cos q)$ , onde  $q$  é 11,3° para o campo  $40 \times 40$  cm<sup>2</sup> assumido como máximo);

Substituindo-se, temos:

$$D = 0,249 \times 10^6 \times (1 \times 6,67 \times 0,122^{1.3} / (5,97 \times 10,6)^2)$$

ou  $D = 26,9$  nSv/s

Assumindo-se que o limite de dose ao nível do solo é de  $2 \times 10^{-5}$  Sv/sem (área livre), que a carga de trabalho semanal é  $10^3$  Sv/sem e que o fator uso para cima é 1/5, a carga de trabalho em direção ao teto será  $W_t = 200$  Sv/sem e o tempo de irradiação semanal em (s):

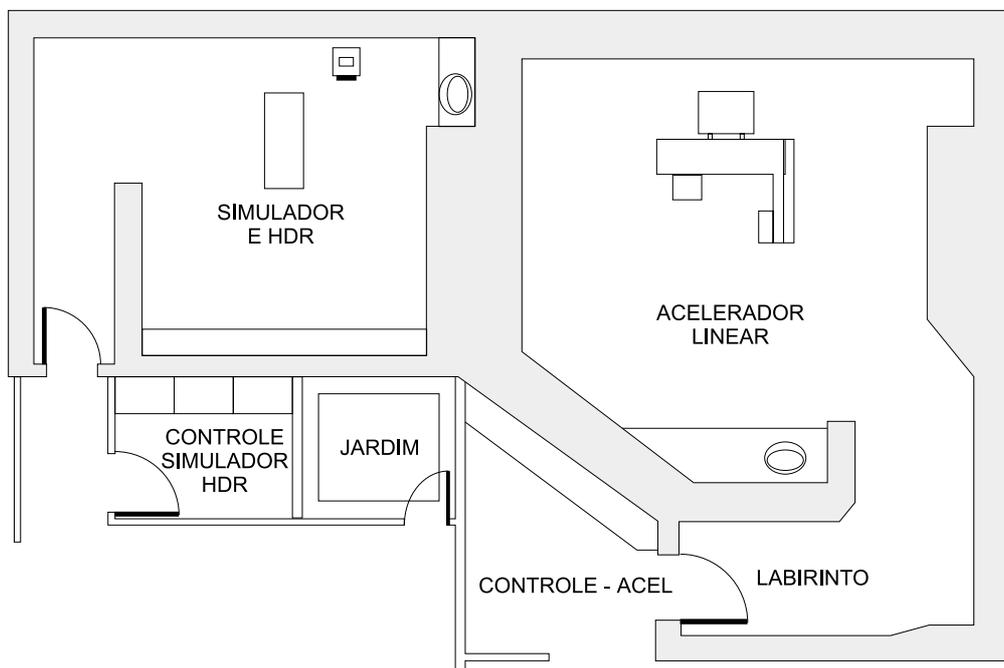
$$t = (200 \text{ Gy sem}^{-1}) / (6,67 \times 10^{-2} \text{ Gy s}^{-1}) \text{ ou } t = 3000 \text{ s/sem}$$

E, portanto, a dose equivalente semanal ao nível do solo será  $D_s = 26,9 \times 3000$  nSv/sem ou  $D_s = 80$  mSv/sem ou  $D_s = 8 \times 10^{-5}$  Sv/sem. Como temos que reduzi-la para o limite de área livre e a razão entre elas é 4, devemos construir um teto com espessura de 2 HVL.

## 5. LABIRINTO CONVENCIONAL

A construção de um labirinto é recomendada para diminuir a intensidade de radiação que chega na entrada da sala de tratamento, tornando desnecessária a instalação de uma porta muito pesada. Nesse capítulo discutiremos projeto de labirinto para salas de aparelhos de média energia ( $4 \leq E \leq 10$  MV), onde a porta típica para blindar fótons consiste de uma lâmina de 0,6 mm a 15 mm chumbo, colocada entre duas lâminas de madeira ou aço.

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



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

A espessura da parede do labirinto deve ser calculada pelo método convencional, levando-se em conta que ela deve reduzir a dose na região da porta a valores menores que os limites primários,

Um dos métodos mais utilizados na determinação da quantidade de radiação incidente na entrada de um labirinto para fins de cálculo de blindagem da porta é o do NCRP-51. Entretanto, esse método não é aqui recomendado pois vários autores têm mostrado que seus valores são muito diferentes dos medidos experimentalmente e dos obtidos através de simulação de Monte Carlo. Essa discrepância pode ser devida ao fato de que o método da NCRP 51 só leva em conta a radiação de múltiplo espalhamento, desconsiderando a radiação de fuga que atravessa a parede interna do labirinto, e, também porque considera a energia média do feixe primário como sendo metade do valor da nominal (o melhor valor seria  $1/3$ ), assumindo que a energia média do campo de fótons na

entradado labirinto seria 0,5 MV (o melhor valor seria 0,2 MV). Alguns trabalhos recentes discutem a dose de fótons em labirintos: Morgan e outros (1995), McGinley e James (1997) e Falcão e Okuno (1999). A seguir descrevemos em mais detalhes esses dois últimos métodos.

### 5.1. Método de Falcão e Okuno (1999)

Essas autoras brasileiras, baseadas no NCRP-49, consideram que a taxa de dose na entrada do labirinto advém da radiação de fuga pela parede interna do mesmo e do espalhamento nas paredes da sala.

A taxa de dose semanal na entrada devido à fuga que atravessa a parede do labirinto será:

$$D_{fuga} = \frac{WFT}{d^2 10^n} \quad (11) \quad \text{onde,}$$

$D_{fuga}$  é a taxa de dose da radiação de fuga (Sv/sem),  $W$  é a carga de trabalho (Gy/sem),  $T$  é o fator de ocupação,  $(d)$  é a distância (m) da fonte até a entrada,  $(f)$  é o fator de fuga pelo cabeçote (geralmente 0,001) e  $(n)$  é o número de TVLs da parede interna do labirinto, para a energia do feixe primário.

A taxa de dose semanal na entrada devido ao espalhamento será:

$$D_{esp} = \frac{aWFT}{(d_{sec})^2 (d_{esp})^2 400} \quad (12) \quad \text{onde,}$$

$D_{esp}$  é a taxa de dose da radiação espalhada (Sv/sem),  $a$  é a relação entre intensidade de radiação espalhada e a radiação primária, como definida na tabela B-2 do NCRP-49,  $W$  e  $T$  são os mesmos acima,  $d_{esp}$  é a distância (m) da fonte até a parede espalhadora,  $d_{sec}$  é a distância (m) da parede espalhadora até a entrada do labirinto (ver figura abaixo),  $F$  é o tamanho de campo em  $cm^2$  e 400 no denominador é o tamanho do campo ( $cm^2$ ) considerado na obtenção de  $a$ .

Com o objetivo de simplificar os cálculos da taxa de dose devido ao espalhamento, as autoras sugerem que se assuma que o campo  $F$  é  $400 \text{ cm}^2$  e que o feixe primário é sempre dirigido para a parede C da figura abaixo, situação em que a dose devida a radiação espalhada é máxima. Depois de se obter a dose total, determina-se a espessura da blindagem da porta para reduzir a taxa de dose aos limites autorizados supondo que a energia da fuga é a mesma da primária e que a energia da espalhada é 0,5 MV.

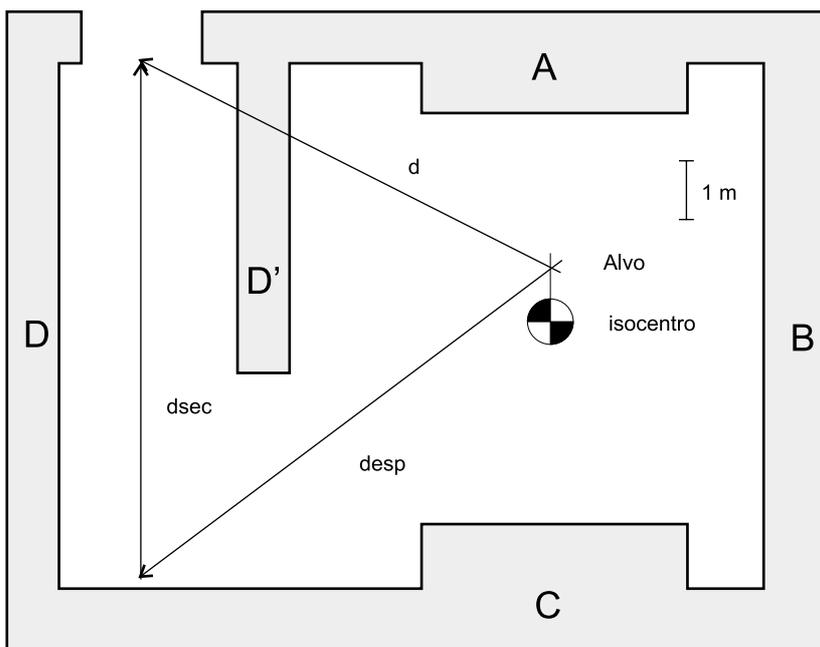


Fig.3- Distâncias para o cálculo da taxa de dose na entrada do labirinto pelo método de Falcão e Okuno.

## 5.2. Método de McGinley (1998)

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

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

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

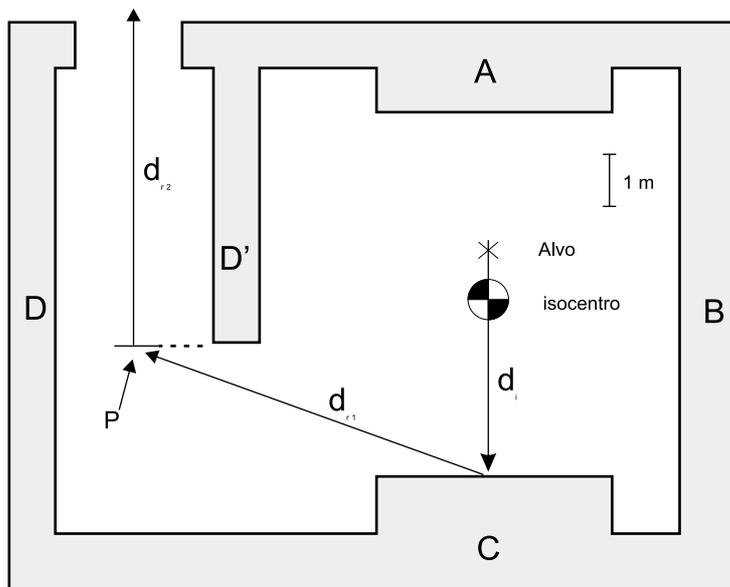


Fig.4- Diagrama da sala para cálculo do espalhamento nas superfícies ( $E_s$ ). Baseado em Numark & Case (1985).

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

$$E_s = \frac{W_c \alpha_1 A_1 \alpha_2 A_2}{(d_1 d_{r1} d_{r2})^2} \quad (13)$$

onde:

$E_s$  é a dose na região da porta devida ao espalhamento na parede;  $W_c$  é a carga de trabalho da máquina na direção da parede C ( $W \times U_c$ );  $\alpha_1$  é o coeficiente da 1ª reflexão (na parede C) baseado em 1/3 do MV;  $A_1$  é a área ( $m^2$ ) do feixe na

primeira reflexão (na parede C);  $\alpha_2$  é o coeficiente da 2ª reflexão (parede D) baseado na energia 0,5 MeV;  $A_2$  é a área ( $m^2$ ) da secção reta do labirinto;  $d_1$  é a distância (m) do alvo até a primeira reflexão;  $d_{r1}$  é a distância (m) central ao longo da primeira perna do labirinto;  $d_{r2}$  é a distância (m) central ao longo da segunda perna do labirinto. A equação acima é válida nas seguintes condições:

- A energia média do feixe primário é tomada como 1/3 da nominal da máquina (MV), ao contrário do NCRP-51 que recomenda o valor 1/2 do MV;
- O ângulo da radiação refletida é determinado a partir de uma linha que se estende desde o centro do campo na parede C até um ponto P na figura;
- Os valores de  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $d_{r1}$  e  $d_{r2}$  são diferentes da-

queles tomados no NCRP-51;

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

- A razão  $d_{r2}/(A_2)^{1/2}$  deve estar entre 2 e 6.

Os valores para os coeficientes de reflexão são encontrados na fig. E.15 do NCRP-51 (reproduzida abaixo), somente para 2 geometrias. Em muitas situações esses dados podem não ser aplicáveis e os coeficientes têm que ser interpolados.

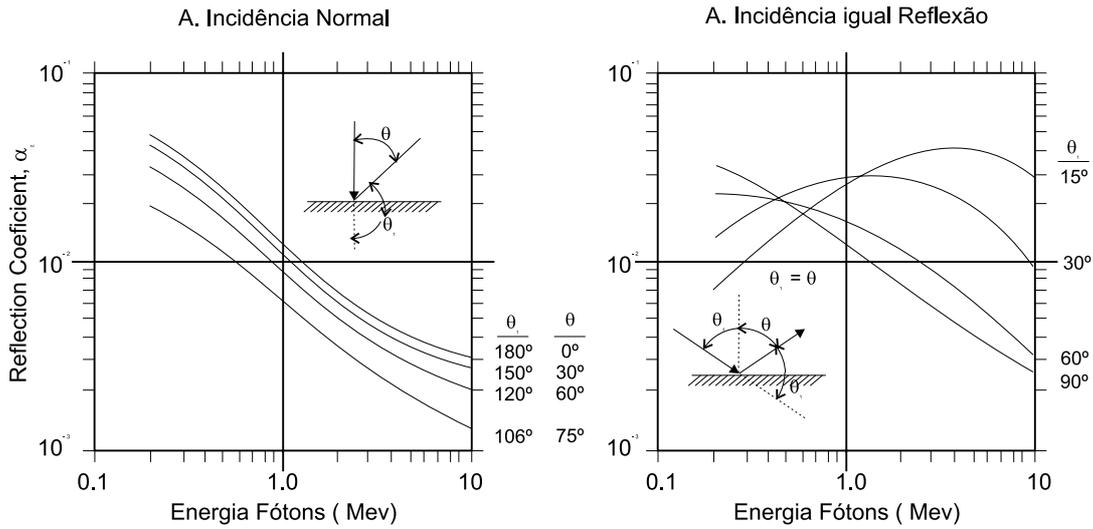


Fig.5- Coeficientes de reflexão para raios-x monoenergético em concreto. NCRP 51

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

Para o calculo dessa componente de dose na porta podemos usar:

$$E_f = \frac{F_0 W_c \alpha_r A_1}{(d_s d_i)^2} \quad (14)$$

onde,

$E_f$  é a dose na região da porta devido à fuga pelo cabeçote;  $F_0$  é a razão entre a dose no isocentro e

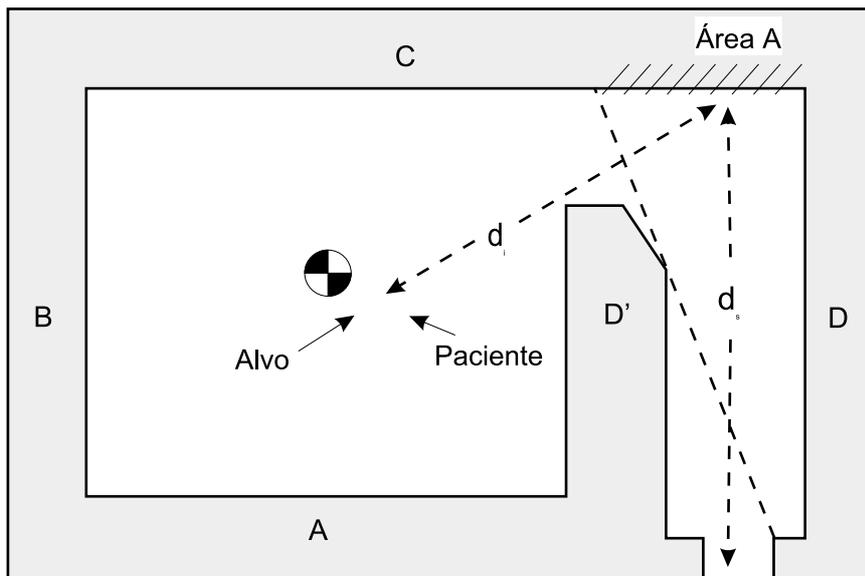


Fig.6- Trajeto da fuga espalhada na parede C até a porta.

a dose de fuga a 1 m do alvo ou canhão, ou seja, é o fator máximo de fuga (para este valor, se possível usar valores experimentais ou os fornecidos pelo fabricante, se não os tiver, uma aproximação aceitável é usar o valor 0,001 ou 0,1%).  $W_c$  é a carga de trabalho da máquina na direção da parede C ( $W \times U_c$ );  $\alpha_1$  é o coeficiente de reflexão na parede;  $A_1$  é a área ( $m^2$ ) da parede C que pode ser vista da entrada da sala (ver figura);  $d_i$  é a distância (m) do alvo até a parede refletora na linha central do labirinto;  $d_s$  é a distância (m) central ao longo do labirinto desde a parede até a porta.

A energia da radiação de fuga ao emergir do cabeçote do acelerador de 6 MV é 1,4 MeV e do acelerador de 10 MV é 1,5 MeV, obtidas do trabalho de Nelson e LaRivieri (1984). Elas correspondem ao valor esperado para a fuga na direção  $d_i$  e são usadas para a determinação do coeficiente de reflexão  $\alpha_1$  a partir da fig. E.15 do NCRP-51.

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

$$E_p = \frac{\alpha W_c (F/400) \alpha_1 A_1}{(d_{esp} d_{sec} d_{r1})^2} \quad (15)$$

onde,

$E_p$  é dose da radiação espalhada pelo paciente na

entrada do labirinto;  $W_c$  é a carga de trabalho da máquina na direção da parede C ( $W \times U_c$ );  $\alpha$  é o coeficiente de reflexão de espalhamento no paciente (ver item 4.1.5);  $F$  é a área do campo ( $cm^2$ ) no paciente;  $\alpha_1$  é o coeficiente de reflexão na parede para energia 0,5 MeV;  $A_1$  é a área ( $m^2$ ) da parede C que pode ser vista da entrada da sala (ver figura);  $d_{esp}$  é a distância (m) do alvo até o paciente (geralmente 1 m);  $d_{sec}$  é a distância (m) do paciente até a linha central do labirinto na parede refletora;  $d_{r1}$  é a distância (m) central ao longo do labirinto, desde a parede até a porta.

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

$$F_1 = \frac{F_0 W_c B}{(d'')^2} \quad (16)$$

onde,

$F_0$  e  $W_c$  já foram definidos anteriormente;  $B$  é o fator de transmissão pela parede do labirinto (parede  $D'$ ) e  $d''$  é a distância do alvo até o centro da porta.

### Cálculo da Dose na Entrada da Sala

A dose é máxima na entrada da sala quando o campo é máximo (colimador todo aberto), o feixe está dirigido para a parede C e temos um meio espalhador no isocentro (paciente ou fantoma). Nestas condições, a dose total na porta ( $D_c$ ), resultante de todas as componentes ( $E_s$ ,  $E_r$ ,  $E_p$  e  $F_1$ ) é dada por:  $D_c = f(E_s) + E_r + E_p + F_1$  (Gy/sem) (17)

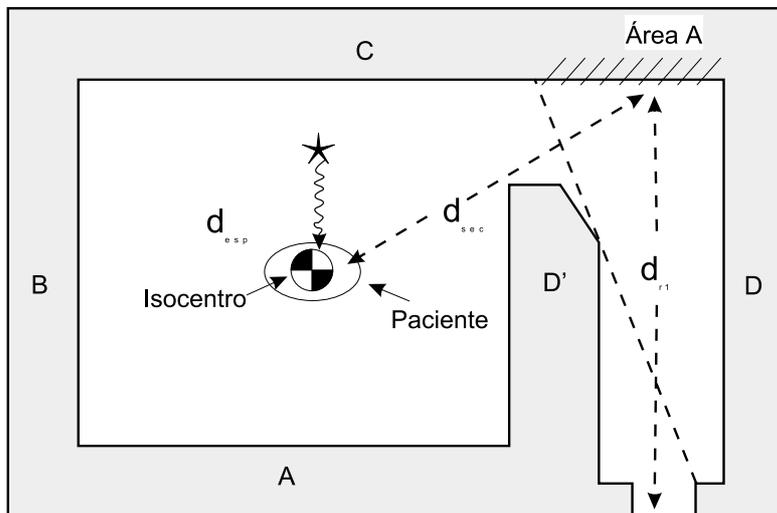


Fig. 7- Trajeto da radiação espalhada pelo paciente até a porta.

onde  $f$  é a fração do feixe transmitida pelo paciente e tem valor 0,23 para 6 MV e 0,27 para 10 MV (McGinley & James-1997). Observe que a carga de trabalho usada nos cálculos ( $W_c$ ) é a do feixe dirigido para a parede C, que se determina a partir da carga de trabalho total  $W$  e do fator de uso  $U_c$  para essa direção. Portanto,  $W_c = W \times U_c$ .

Admitindo-se que o feixe primário é dirigido igualmente para as quatro direções (para baixo, para cima e horizontais esquerda e direita), McGinley propõe que a dose total na porta ( $D_T$ ), para uma sala semelhante à das figuras anteriores será dada por:  $D_T = 2,64 D_c$  (Gy/sem) (18).

### Espessura de Blindagem da Porta

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

$$B_{\text{porta}} = D_T/P \quad (19)$$

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

Embora este método seja sofisticado e preciso, também é mais trabalhoso, exigindo bastante cuidado na escolha dos parâmetros de interação e direção. Qualquer um dos dois métodos descritos acima pode ser usado. As técnicas de cálculo descritas são válidas também para raios-x na região da porta gerados em máquinas de alta energia. Entretanto se  $E \geq 10 \text{ MV}$  temos que considerar também a presença de fotoneutrons e de raios gama de captura, o que será discutido a seguir.

## 6. BLINDAGEM DE NÊUTRONS

Aceleradores lineares que operam com 10 MV ou mais, produzem feixes terapêuticos que são contaminados por nêutrons. Assim sendo, os planos de blindagem para salas de máquinas de alta energia devem considerar a componente neutrônica do campo de radiação.

Um núcleo atômico pode absorver energia de um elétron ou de um fóton e, se a energia incidente for suficiente, pode emitir um nêutron. Para núcleos mais pesados que o carbono, a energia mínima para produção de nêutrons está entre 6 e 16 MeV. Medidas em aceleradores lineares de uso médico mostram que para energia nominal inferior a 10 MV não é necessária blindagem específica para nêutrons.

As fontes potenciais de nêutrons são os materiais do cabeçote, onde incidem os feixes primários de elétrons e fótons, as paredes do guia de onda, o alvo, o filtro aplainador, os colimadores, a câmara de ionização de transmissão, etc. Nêutrons gerados por fótons são conhecidos como fotoneutrons e a principal reação é a do tipo  $(\gamma, n)$ . Reações tipo  $(\gamma, 2n)$ ,  $(\gamma, pn)$  e  $(e^-, n)$  podem ocorrer com probabilidade menor em várias ordens de magnitude e podem ser ignoradas. A produção de fotoneutrons é quase isotrópica e essas partículas atravessam a blindagem do cabeçote em todas as direções.

O espectro de energia dos fotoneutrons é similar ao espectro de fissão, com um pico próximo a 2 MeV. Pode-se identificar dois grupos de neutrons: Um majoritário que apresenta distribuição Maxwelliana de energia, composto por nêutrons de evaporação, e outro gerado por interação direta entre o fóton e o nêutron do núcleo atômico do alvo, que representam cerca de 15% do total. Poucos nêutrons são atenuados ou perdidos na penetração através de chumbo e somente cerca de 15% o são em cabeçotes de tungstênio. Deve-se salientar que o espectro de energia dos fotonêutrons dentro da sala do acelerador será degradado devido às interações nas estruturas da máquina e ao espalhamento nas superfícies de concreto. A energia média dos neutrons espalha-

dos nas paredes é de 0,4 MeV. Além dos dois grupos mencionados acima, existirá também um de nêutrons térmicos e ainda nêutrons e raios gama bastante energéticos gerados pós captura.

### 6.1. Transporte de Nêutrons na Sala

Os efeitos de uma sala de concreto no espectro de nêutrons têm sido investigado por diversos pesquisadores, com destaque para McCall e colaboradores. Em 1979 esses autores mostraram que o campo de nêutrons pode ser considerado como uma combinação dos advindos diretamente da fonte ( $\Phi_{dir}$ ), que segue a lei do inverso do quadrado da distância, de nêutrons espalhados ( $\Phi_{esp}$ ) e de nêutrons térmicos ( $\Phi_{ter}$ ).

A fluência total de nêutrons ( $n/cm^2$ ) por unidade de dose de raios-x no isocentro será:

$$\Phi = \Phi_{dir} + \Phi_{esp} + \Phi_{ter}$$

A componente direta pode ser escrita como  $\Phi_{dir} = aQ/4\pi d^2$ , onde (a) é o fator transmissão para nêutrons que atravessam a blindagem do cabeçote (a = 1,0 para Pb e a = 0,85 para W), (d) é a distância (cm) do alvo até o ponto onde a fluência é avaliada e (Q) é a intensidade no cabeçote, dada em nêutrons por unidade de dose de raios-x no isocentro (n/Gy).

A componente espalhada é dada por  $\Phi_{esp} = 5,4 aQ/S$ , onde (S) é área da superfície da sala ( $cm^2$ ).

A componente térmica é dada por  $\Phi_{ter} = 1,26 Q/S$ .

A fluência total de nêutrons no isocentro será:

$$\Phi_{total} = aQ/4\pi d^2 + 5,4 aQ/S + 1,26 Q/S \quad (20)$$

Essa equação tem sido usada para a determinação da dose absorvida de nêutrons no plano do paciente. Um acelerador de 15 MV, com blindagem de Pb no cabeçote, gera tipicamente nêutrons com energia média 0,4 MeV e libera cerca de 0,007 Sv (de nêutrons) por Gy de fótons no plano do paciente a 2 m do isocentro.

Na literatura pode-se encontrar valores de (Q) para a maioria dos aceleradores modernos e alguns deles são dados abaixo:

*Intensidade de nêutrons (Q) em aceleradores médicos*

Fabricante	Modelo	MV (do fabricante)	Q (neutrons/Gy)
Varian	2 100 C/D	10	$0,04 \times 10^{12}$
Varian	2 100 C/D	15	$0,7 \times 10^{12}$
Varian	2 100 C/D	18	$1,5 \times 10^{12}$
Siemens	KD	20	$1,0 \times 10^{12}$
Philips (Elekta)	SL-20	17	$0,7 \times 10^{12}$
GE	Saturne 41	12	$0,24 \times 10^{12}$
GE	Saturne 41	15	$0,47 \times 10^{12}$

Muitas vezes o fabricante especifica a produção de nêutrons em termos de percentagem da dose absorvida no plano do isocentro (por exemplo, dose absorvida de nêutrons igual a 0,004% da dose do feixe de fótons para 10 MV ou 0,01% para 15-18 MV). Entretanto, no cálculo de blindagens devemos considerar a dose equivalente de nêutrons, pois eles são biologicamente mais deletérios que fótons. Neste caso, o fator qualidade a ser usado é 10.

A Varian Associates fornece para suas máquinas o percentual em termos de dose equivalente e por isso não se precisa usar o fator qualidade.

*Dose Equivalente de Nêutrons (% da dose de raios-x primário e mSv n/Gy x, no isocentro) - VARIAN*

Energia Nominal	6 MV	10 MV	15 MV	18 MV	20 MV
Dose Equivalente (%)	n/a	0,004 %	0,07 %	0,15 %	0,18 %
Dose Equivalente (mSv n/Gy x)	n/a	0,04	0,7	1,5	1,8

O campo de nêutrons devido à interação com elétrons é da ordem de 0,5 a 1,0 % daquele devido a fótons de mesma energia e, portanto, se a blindagem for adequada para o feixe de raios-x, também o será para o de elétrons. Entretanto, temos uma situação especial no caso de máquinas que usam baixa energia de fótons, p. ex. 6 MV, mas que também permitem o emprego terapêutico do feixe de elétrons com mais de 10 MeV. Nesse caso deve-se levar em conta tanto a contribuição dos nêutrons gerados pelos elétrons quanto a de nêutrons produzidos por fótons contaminadores do feixe de elétrons. Deve-se lembrar que a contaminação de fótons num feixe terapêutico de elétrons geralmente está entre 3 e 6 % da taxa de dose dos elétrons incidentes.

## 6.1. Blindagem das Paredes

No projeto de blindagem para nêutrons deve-se considerar os nêutrons rápidos, os neutrons térmicos e também os raios gama de captura.

Em 1979, McCall e colaboradores mostraram que a TVL para neutrons em função da energia média do espectro dessas partículas (em MeV) pode ser dada por:

$$TVL = 15,5 + 5,6\bar{E}_{dir} \text{ (cm) para concreto}$$

$$TVL = 6,2 + 3,4\bar{E}_{dir} \text{ (cm) para poliestileno}$$

Nas energias de radioterapia os fótons são sempre mais penetrantes que os nêutrons e, se a parede blindar os primeiros também o fará para os últimos. Isto ocorre porque a energia média dos nêutrons jamais excede 1 MeV e a TVL máxima em concreto será 21,0 cm. Como já foi mostrado anteriormente, a TVL em concreto para fótons varia entre 38 cm para 10 MV e 47 cm para energias mais altas, o que é suficiente para blindar os nêutrons.

Deve-se tomar cuidado especial quando se usa chumbo ou aço como parte da blindagem de paredes, pois esses materiais são praticamente transparentes aos nêutrons. Nesses casos será necessário usar um material moderador para captura-los e o projeto é complexo.

### 6.3. Labirinto e Porta para Nêutrons

Todas as salas de radioterapia devem ter labirinto e porta para assegurar que os fótons só possam escapar depois de serem suficientemente atenuados pelo espalhamento e absorção. Como os nêutrons são pouco atenuados em energia e intensidade pelo espalhamento, o projeto de labirinto para altas energias precisa ser feito com cuidado adicional. Quanto mais longo e mais pernas tiver, melhor será o projeto do labirinto. Nêutrons rápidos tendem a perder energia ao se espalharem pelas curvas e a primeira perna reduz bastante a taxa de fluência. Nas outras pernas do labirinto a fluência de nêutrons térmicos é dominante. No entanto, a construção de labirintos complexos, com mais de uma perna é muitas vezes impossível devido a limitações de espaço e ao acréscimo nos custos da construção. A seguir é apresentado um exemplo simples de cálculo de dose em labirinto para nêutrons.

Existem vários métodos para calcular a dose equivalente de nêutrons na entrada de salas com labirintos (NCRP-51). Dentre esses métodos, o de Albedo é o mais exato; no entanto, esse método

requer a solução de equações complexas, muitas vezes sem solução analítica, requerendo métodos computacionais sofisticados.

O método mais empregado para o cálculo de dose de nêutrons em labirintos é o proposto por Kersey em 1979, onde se incorpora a diminuição da intensidade dos nêutrons que chegam na parte interna do labirinto pela lei do inverso do quadrado da distância e uma correção empírica baseada em medidas experimentais. Vários trabalhos indicam que o método de Kersey superestima a dose de nêutrons na porta por um fator entre 3 e 4 e, por isso, adaptações têm sido propostas.

A Varian Associates, na monografia "Neutron Doors for High Energy Accelerators", indica que o método original superestima a primeira TVL, principalmente para labirintos curtos, e sugere que o melhor valor seriam 3 m. Portanto, um cálculo mais apropriado será:

onde,

$$H = (H_0) \times \left( \frac{S}{S_0} \right) \times \left( \frac{d_1}{d_0} \right)^2 \times \frac{1}{10^{[1 + (\Sigma d_i - 3)/5]}} \quad (21)$$

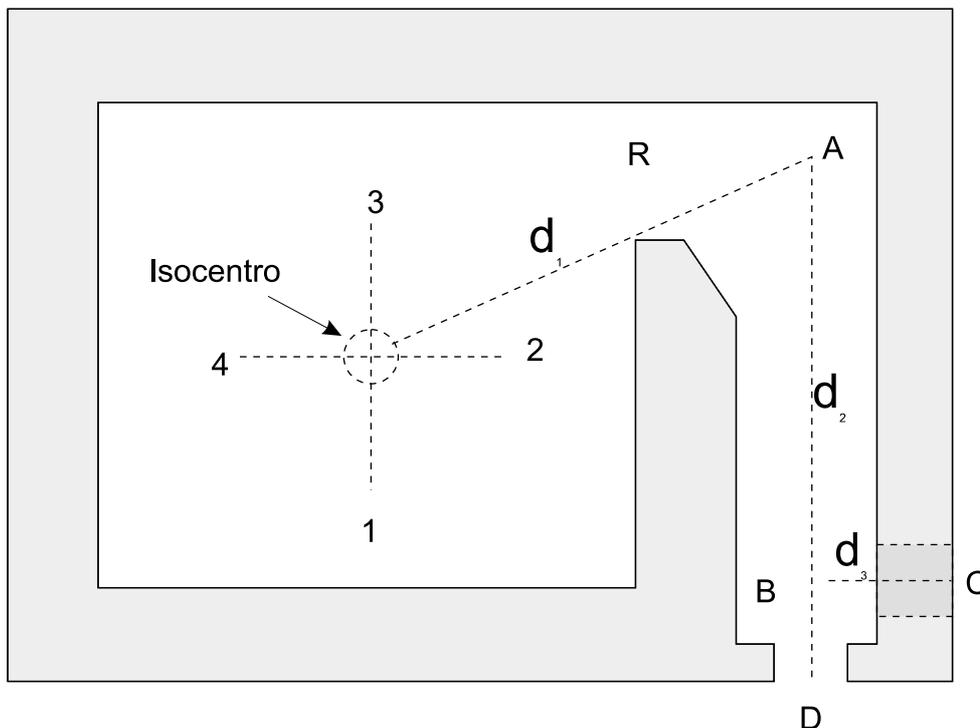


Fig.8- Planta típica para determinação da dose de nêutrons.

- H é a dose equivalente de nêutrons por unidade de dose de raios-x no isocentro, na entrada da sala de tratamento (mSv nêutrons/ Gy Raios X);
- $H_0$  é a dose equivalente de nêutrons no isocentro (mSv n/Gy x);
- $d_0$  é a distância da fonte (alvo) até o isocentro (m);
- $d_1$  é a distância do isocentro até um ponto visível da parte interna da primeira perna, na linha central do labirinto (m);
- S é a área mínima da seção reta do labirinto (m<sup>2</sup>);
- $S_0$  é uma área padrão constante ( $S_0 = 6 \text{ m}^2$ );
- $d_i$  é o comprimento da i-ésima perna do labirinto (m) ao longo de sua linha central.

Uma sala típica para acelerador operando a 10 MV tem dimensões 6,0 m x 7,0 m x 3,0 m e labirinto de uma perna com 6 m de comprimento. Nestas condições,  $d_0 = 1 \text{ m}$ ;  $d_1 = 6 \text{ m}$ ;  $d_2 = 9 \text{ m}$ ;  $S = S_0 = 6 \text{ m}^2$ ;  $H_0 = 0,04 \text{ mSv n/Gy X}$  e, portanto, utilizando-se a eq. (21), temos:

$$H = 0,04 \times (6/6) \times (1/6)^2 \times \{1/10^{[1+(9-3)/5]}\} = 0,04 \times (1/36) \times (1/10^{2,2}) = 7,0 \times 10^{-6} \text{ mSv n/ Gy X}.$$

Supondo que a carga de trabalho semanal para raios-x de 10 MV é  $W = 10^3 \text{ Sv/sem}$ , ou seja,  $W = 10^3 \text{ Gy/sem}$  no isocentro, a dose equivalente semanal na entrada será:

$$D_n = (7,0 \times 10^{-6}) (\text{mSv n/Gy x}) \times 10^3 (\text{Gy/sem}) = 7,0 \times 10^{-3} \text{ mSv/sem}.$$

Se a região da porta for considerada área restrita não haverá necessidade de blindagem para nêutrons. Entretanto, na porta chegam ainda fótons espalhados, de fuga e de emissão por captura de nêutrons, que também precisam ser blindados. Devemos considerar então que a dose máxima na porta deverá ser menor que 0,3 mSv/sem para atender ao limite primário, e a blindagem deve ser calculada a partir deste valor.

Quando a dose de nêutrons ultrapassar os limites autorizados, a blindagem pode ser feita

com uma lâmina de polietileno borado a 5%, sabendo-se que a energia média dos nêutrons na entrada de uma sala convencional com labirinto longo é aproximadamente 100 KeV e que a correspondente TVL nesse material é 4,5 cm (NCRP-79).

#### 6.4. Blindagem de Raios Gama de Captura

As portas de aceleradores lineares geralmente são blindadas com chumbo para atenuar os fótons espalhados e os provenientes da fuga pelo cabeçote. Entretanto, para máquinas de energia  $\leq 10 \text{ MV}$ , haverá ainda fótons de captura com energia média 3,6 MeV (Tochlin & LaRivieri-1979). Para a atenuação dessa componente pode-se usar  $TVL_{pb} = 6,1 \text{ cm}$  (NCRP-79).

A dose (D) de fótons gama de captura por unidade de dose de raios-x no isocentro, na porta da sala, pode ser estimada pelo método de McGinley e outros (1995):

$$D = K \Phi_{\text{total}} 10^{-d_2 / TVD_2} \quad (22)$$

onde,

- K é a razão entre a dose gama de captura e a fluência total de nêutrons num ponto A na parte central interna do labirinto.  $K = 0,77 \times 10^{-12} \text{ Gy/n cm}^2$ ;
- $TVD_2$  é a distância que reduz 10 vezes a fluência de nêutrons (m). Para máquinas de energia nominal entre 16 e 22 MV,  $TVD_2 = 6,2 \text{ m}$ ;
- $d_2$  é a distância entre o isocentro e o ponto A na parte central interna do labirinto (m)- ver figura 8;
- $\Phi_{\text{total}}$  é a fluência de nêutrons em A por unidade de dose de raios-x no isocentro.

Para labirintos com perna maior que 3 m ( $d_2$  na fig.8) o campo de fótons é dominado pelos raios gama de captura e a componente espalhada pode ser ignorada. Depois de calcular a dose de captura na entrada da sala, determinamos a espessura de chumbo necessária para blindar a porta sabendo que  $TVL_{pb} = 6,1 \text{ cm}$  (NCRP-79).

Por exemplo, para um acelerador de 10 MV, numa sala com perna de 6 m, temos:

$d_1 = 6 \text{ m}$ ;  $d_2 = 9 \text{ m}$ ;  $S = 2 \times 10^6 \text{ cm}^2$ ;  $K = 0,77 \times 10^{-12} \text{ Gy/n cm}^2$ ;  $\text{TVD}_2 = 6,2 \text{ m}$ ;  $Q = 0,04 \times 10^{12} \text{ n/Gy}$  e,

$$\Phi_{\text{total}} = Q/4\pi d_1^2 + 6,66 Q/S (\alpha = 1) = (0,04 \times 10^{12}) / (4\pi 600^2) + (6,66 \times 0,04 \times 10^{12}) / (2 \times 10^6)$$

$$\Phi_{\text{total}} = 1,42 \times 10^5 \text{ (n cm}^{-2}\text{)}/(\text{Gy x no isocentro}) \text{ e,}$$

$$D = (0,77 \times 10^{-12}) \times (1,42 \times 10^5) \times (10^{-9/6,2}) = 3,9 \times 10^{-9} \text{ Gy } \gamma/\text{Gy x}$$

Supondo que a carga de trabalho semanal é  $W = 10^3 \text{ Gy x/sem}$  no isocentro, teremos:

$$D(\gamma, \text{ sem}) = 3,9 \times 10^{-9} \times 10^3 = 3,9 \times 10^{-6} \text{ Gy/sem ou}$$

$$D(\gamma, \text{ sem}) = 4,0 \text{ mSv/sem}$$

Portanto, não há necessidade de blindar a porta para raios gama de captura. Nesse exemplo, devido à baixa fluência de nêutrons para aceleradores de 10 MV, não foi necessário blindar a porta para gama de captura (nem para nêutrons conforme exemplo anterior). Entretanto, se a sala for pequena, o labirinto curto e, principalmente, se a energia for alta, a porta pode exigir blindagem espessa. Nesses casos, deve-se projetar a sala e o labirinto com cuidado (ver NCRP-51 e 79), seguindo as seguintes recomendações:

- diminuir a área da parte interna do labirinto e inserir mais de uma perna, ou,
- colocar na parte interna do labirinto outra porta mais leve revestida por um absorvedor de nêutrons térmicos (polietileno borado a 5%).

Normalmente a porta incorpora uma camada de material absorvedor de nêutrons (p.ex., polietileno borado a 5%) seguida de uma lâmina de chumbo para atenuar os raios gama de captura. Como alternativa, pode-se usar o polietileno entre duas camadas de aço de espessura equivalente, o que aumenta a rigidez da porta.

## 6.5. Sky-shine para Nêutrons

Do mesmo modo que para fótons, se a sala do acelerador linear não tiver ocupação no piso superior, e se planejar apenas uma cobertura simples, deve-se blindar o teto para nêutrons espalhados no ar. A equação abaixo é usada para o skyshine de nêutrons (NCRP-51):

$$B_{n,sky} = 1,19 \times 10^{-5} \times \frac{H(d_i)^2}{\Phi_0 \Omega} \quad (23)$$

onde,  $B_{n,sky}$  é o fator de transmissão de nêutrons pelo teto;  $H$  é a taxa de dose equivalente de nêutrons ao nível do solo (nSv/s);  $d_i$  é a distância do alvo até um ponto a 2 m do teto (m);  $\Phi_0$  é a taxa de fluência de nêutrons a 1 m do alvo ( $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) e  $W$  é o ângulo sólido delimitado pelas paredes laterais de blindagem (esteroradianos). Esta equação é válida para distâncias horizontais  $d_s$  menores que 20 m.

A taxa de dose equivalente de nêutrons de skyshine ( $H$ ) será então:

$$H = 0,84 \times 10^{-5} \times \frac{B_{n,sky} \Phi_0 \Omega}{(d_i)^2} \quad (24)$$

Na falta de dados reais pode-se usar  $B_{n,sky} = 3,36 \times 10^{-10} \text{ Sv/cm}^2$  (NCRP-51 (teto sem blindagem e energia média de nêutrons 1,7 MeV). observa-se que o ângulo sólido é baseado no tamanho da sala (distância entre paredes horizontais) e não no tamanho de campo.

## 6.6. Blindagem de Dutos e Passagens

Dutos e passagens (para ar condicionado, energia elétrica, água e esgoto, etc.) devem ser tratados como labirintos. Do ponto de vista de nêutrons eles devem incorporar múltiplas curvaturas e terem a menor área possível, compatíveis com sua função.

Além disso, suas entradas não podem ser alinhadas ao feixe primário de nêutrons rápidos. Para dutos de pernas múltiplas é seguro assumir que, além da segunda perna, só existam nêutrons térmicos. Nos selados permanentemente é aconselhável incorporar borax, parafina borada ou polietileno borado mais chumbo ou aço nas paredes internas e nas saídas.

Embora cada sala exija blindagem particular, para máquinas de alta energia é razoável usar 1,0 cm de chumbo e 2,5 cm de polietileno borado ao redor dos dutos e passagens. A blindagem deve começar no ponto onde o duto penetra na blindagem e terminar na parte interna da sala. Dutos para máquinas de energia  $< 10$  MV são adequadamente blindados com 0,6 cm de chumbo.

A melhor posição para entrada de dutos é na bandeira da porta (pelo labirinto) e esta deve ser a usada também para ar condicionado e para eletricidade. Entretanto, alguns fabricantes exigem que os cabamentos elétricos entrem próximos ao controle, e isto deve ser feito por canaleta profunda, inclinada, de área de seção reta mínima, com múltiplas pernas, fora do campo primário de fótons e não alinhada com feixes de nêutrons rápidos. Tanto nos dutos de ar condicionado quanto nos de energia elétrica o revestimento blindado é essencial. Tubulações de água e esgoto devem correr em múltiplas curvas abaixo do alicerce e geralmente não precisam de blindagem especial.

## 7. SALA DE BRAQUITERAPIA DE ALTA TAXA DE DOSE (HDR) E SALA DO SIMULADOR

### 7.1. Blindagem de Sala de Braquiterapia de alta taxa de dose

Um dos importantes procedimentos da radioterapia moderna é a braquiterapia de carga postergada de alta taxa de dose (HDR). A carga radioativa só é introduzida no paciente após a colocação de cateteres direcionadores, eliminando a exposição direta do pessoal médico e paramédico. O tratamento é realizado em poucos minutos e, em geral, é ambulatorial.

Os sistemas comerciais de maior sucesso empregam pequenas fontes de  $^{192}\text{Ir}$ , com atividade inicial típica de 370 GBq (10 Ci). A fonte é soldada na extremidade de um cabo flexível e pode ser levada para posições selecionadas dentro do catéter por um mecanismo automático. Essa fonte permanece dentro da blindagem e só é exposta quando acionada. A fuga de radiação pela blindagem da máquina quando a fonte está na posição guardada (off), é pequena ( $< 1 \text{ mSv/h}$ ), e pode ser desprezada nos cálculos de blindagem da sala.

As máquinas HDR exigem uma sala blindada exclusiva, embora em alguns serviços de pouco movimento se possa instalá-la na mesma sala do simulador. As salas de HDR são semelhantes às de teleterapia, incluindo um labirinto para diminuir a blindagem da porta. Normalmente, tanto a área da sala (geralmente  $4 \times 5 \text{ m}^2$ ) quanto o tamanho do

labirinto (2 – 3 m) e a largura da entrada (1,2 – 1,8 m), são menores que as de teleterapia. As espessuras de blindagem das paredes em concreto estarão entre 40 e 60 cm.

Os cálculos de blindagem de uma sala de HDR utilizam os mesmos princípios e recomendações que os de megavoltagem. Entretanto, todas as paredes (inclusive o teto) estão sempre sujeitas à radiação primária direta da fonte. Na porta de uma sala com labirinto só incide radiação espalhada, geralmente de 1ª ordem. A transmissão da radiação direta da fonte, que atende o limite autorizado pode ser determinada por:

$$B_{\gamma} = Pd^2/WT \quad (25)$$

onde,

- $B_{\gamma}$  é fator de transmissão;
- $P$  é o limite autorizado;
- $W$  é a carga de trabalho;
- $T$  é o fator de ocupação da área.

A espessura mínima de blindagem pode ser calculada através de curvas de  $B_{\gamma}$  versus espessura de material (ver fig. 11, 12 e 13 do NCRP-49) ou usando os valores de HVL e TVL abaixo:

*Espessuras semi-redutoras e 1/10 redutoras para radiação  $\gamma$  do  $^{192}\text{Ir}$  – (ICRP-33)*

Material de Blindagem	HVL (CSR)	TVL (TVT)
Chumbo ( $\rho = 11,3 \text{ g/cm}^3$ )	0,6 cm	1,9 cm
Aço ( $\rho = 7,8 \text{ g/cm}^3$ )	1,3 cm	4,3 cm
Concreto ( $\rho = 2,35 \text{ g/cm}^3$ )	4,1 cm	13,5 cm
Terra ( $\rho = 1,5 \text{ g/cm}^3$ )	6,4 cm	21,2 cm

Na porta de uma sala para HDR com labirinto bem projetado só é possível chegar radiação primária que atravessa a parede do labirinto e radiação espalhada nas superfícies da sala.

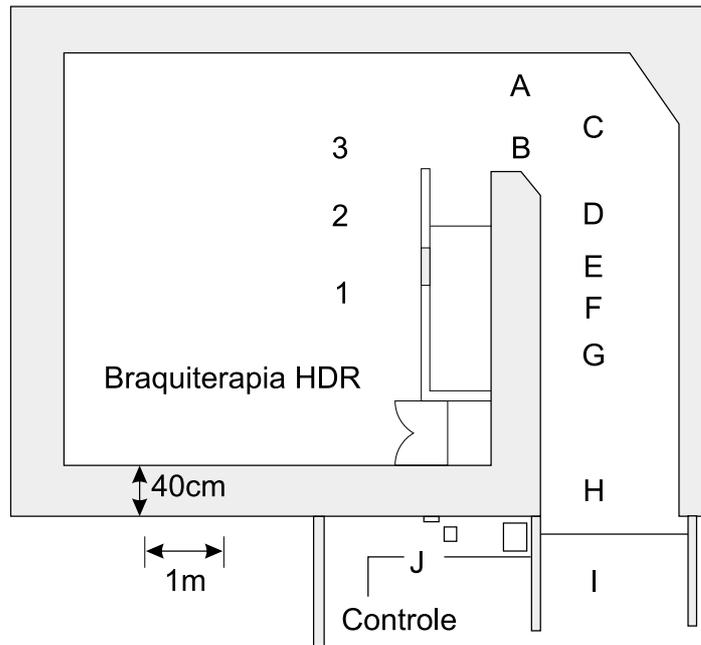


Fig. 9- Sala blindada para braquiterapia HDR. Posições de uma fonte de 370 GBq de <sup>192</sup>Ir (1,2 e 3) e pontos de medição de taxa de dose (A até J).

A tabela a seguir apresenta as taxas de dose em diferentes pontos ao longo do labirinto (A até J) para diversas posições (1,2,3) de uma fonte de HDR com 370 GBq de <sup>192</sup>Ir, dentro de um fantoma equivalente a tecido, mostrando a influência do posicionamento da fonte e a eficiência do labirinto. Taxas de dose em mSv/h.

Onde  $E_s$  é a dose na região da porta devida ao espalhamento na parede;  $W$  é a carga de trabalho total da máquina (Sv/h ou Sv/sem ou Sv/ano);  $\alpha$  é o coeficiente de reflexão no material da parede para a energia do <sup>192</sup>Ir (p. ex.,  $\alpha = 0,00014$  a 1 m para cada 0,01 m<sup>2</sup> e ângulo de incidência igual ao de reflexão, em concreto – ICRP-33);  $A$  é a área (m<sup>2</sup>)

Posição	1	2	3
A	492	1680	3000
B	176	520	3180
C	94	364	1500
D	35	75	170
E	16	37	79
F	8	19	37
G	5	14	24
H	2	6	9
I	1	2	2
J	< 0,5	< 0,5	< 0,5

Conservativamente admitiremos que toda a radiação primária é espalhada numa área  $A$  da parede frontal vista da entrada. A dose do espalhamento na porta será:

$$E_s = \frac{WA\alpha}{(d_i d_{r1})^2} \quad (26)$$

da parede atingida pelo feixe primário;  $d_i$  é a distância (m) da fonte até o centro da área  $A$ ;  $d_{r1}$  é a distância (m) central ao longo do labirinto;

A dose de radiação primária transmitida pela parede do labirinto é determinada por:

$$F_i = \frac{WB}{(d)^2} \quad (27)$$

Onde  $W$  é a carga de trabalho total da máquina (Sv/h ou Sv/sem ou Sv/ano);  $B$  é o fator de transmissão pela parede do labirinto;  $d$  é a distância da fonte até o centro da porta (m).

$$\text{A dose total na porta será: } D_{\text{porta}} = E_s + F_l \quad (28)$$

A espessura da blindagem será calculada a partir dessa dose, atendendo ao limite autorizado. Para radiação secundária na entrada do labirinto podemos supor que a HVL (ou TVL) média é 0,4 do da radiação primária (HMSO-1971) e, para  $^{192}\text{Ir}$  teremos

$\text{HVL}_{\text{Pb}} = 2,4 \text{ mm}$  e  $\text{HVL}_{\text{aço}} = 5,2 \text{ mm}$ . No entanto, para a dose devida a radiação primária que atravessa a parede do labirinto, deve-se, obviamente usar o TVL para radiação primária.

## 7.2. Blindagem da Sala do Simulador

Embora a CNEN não exija projeto de blindagem nem RPAS para sala de simulador de radioterapia, apresentaremos um cálculo de blindagem para o mesmo, por ser um equipamento gerador de radiação ionizante, e portanto deve-se projetar sua sala dentro dos mesmos princípios de segurança e radioproteção.

O simulador de radioterapia é uma máquina de raios-x diagnóstico especialmente projetada para ajudar no planejamento de tratamento. O tubo é montado isocentricamente de modo que o movimento do feixe é similar ao da máquina de tratamento e pode-se ter modo de operação radiográfico e fluoroscópico. Recentemente surgiu no mercado simulador por tomografia computadorizada (CT-Sim), que não será aqui discutido.

A maioria das exposições num simulador é feita no modo fluoroscópico. O simulador é operado de modo tal que o receptor da imagem e o diafragma do feixe movem-se juntos e o campo primário está sempre colimado e restrito ao intensificador de imagem. Assim sendo, a radiação primária é bastante reduzi-

da antes de atingir uma barreira.

As técnicas utilizadas nas blindagens da sala de um simulador são similares às das máquinas de teleterapia. Geralmente, as paredes são construídas em concreto ou tijolo maciço revestido por lâminas de chumbo ou por camada de argamassa de barita na parte interna. O teto é uma laje de concreto e a porta é de madeira revestida por lâmina de chumbo. A visualização do paciente é feita através de uma janela de vidro plumbífero, a menos que o simulador esteja na mesma sala que o aparelho de braquiterapia HDR, quando o vidro não deverá existir e a observação se faz através de circuito fechado de TV.

A carga de trabalho  $W$  é expressa em termos da corrente do tubo (mA) multiplicada pelo tempo de exposição em minutos (min). Valores típicos da carga de trabalho de simuladores são:  $W = 160 \text{ (mA min)/sem}$  para radiografia e  $W = 300 \text{ (mA min)/sem}$  para fluoroscopia. Os fatores Uso ( $U$ ) e ocupacional ( $T$ ) mostrados anteriormente podem ser usados. A quilovoltagem típica é 125 KVp. Nos cálculos das blindagens emprega-se a metodologia do NCRP-49.

Para o feixe primário, a exposição por mA min ( $K_{ux}$ ) em sete dias consecutivos de operação é dada por:

$$K_{ux} = (Pd^2)/WUT \quad (29)$$

onde,  $P$  é o limite autorizado (R/sem);  $d$  (m) é a distância do alvo até a área protegida;  $W$  é a carga de trabalho em (mA min)/sem;  $U$  é o fator de Uso (pode-se usar  $U = 1/4$  para teto, chão e cada lateral);  $T$  é o fator de ocupação.

A partir de  $K_{ux}$  pode-se determinar a espessura da blindagem consultando curvas de transmissão para o material da barreira (p.ex. NCRP-49; fig. 1 para Pb; fig. 3 para concreto;  $E_{\text{max}} = 125 \text{ KVp}$ ). Note-se que essas curvas de transmissão não podem ser descritas por um valor único de HVL ou TVL, e a espessura da blindagem deve ser sempre determinada graficamente. Nas blindagens com barita, inicialmente calcula-se a espessura necessária em chumbo ou concreto e depois determina-se a espessura equivalente nesse material. Como a composição da barita é variável e depende do fornecedor, deve-se usar as que têm equivalência certificada.

A contribuição da radiação espalhada na blindagem do feixe primário pode ser desprezada porque a barreira primária receberá espalhamento somente  $\frac{3}{4}$  do tempo e sua intensidade é de cerca de 1000 vezes inferior a da primária. A largura da barreira primária deve ser, em todos os lados, 0,3 m maior que o campo máximo na parede, para evitar o escape de fótons espalhados do feixe principal.

A radiação que atinge uma barreira secundária é composta de espalhamento no paciente e de fuga pelo cabeçote. A transmissão da fuga pelo cabeçote ( $B_f$ ) é dada por:

$$B_f = \frac{P(d_{sec})^2 600I}{Wt} \quad (30)$$

*Razão (a) entre a intensidade de radiação espalhada a 1m e a incidente em 400 cm<sup>2</sup> da superfície de um fantoma. (125 KVp)*

ângulo $\theta$ (graus)	30	45	60	90	120	135
a (coef. espalh.)	0,0018	0,0015	0,0015	0,0015	0,0023	0,0025

onde P, W e T têm o mesmo significado anterior,  $d_{sec}$  é a distância da fonte até o ponto a ser protegido (m) e I é a corrente máxima do tubo (geralmente I = 5 mA).

Na equação acima se assume que a fuga pelo cabeçote é 0,1 R/h ( $10^{-3}$  Gy/h) a 1 m, limite máximo de fuga nas normas brasileiras para raios-x diagnóstico.

Partindo-se do valor de  $B_f$ , podemos calcular o número de camadas semi-redutoras (N), requeridos para blindagem:  $N = 3,32 \log_{10} (1/B_f)$  (31)

A espessura da blindagem para fuga ( $S_f$ ) será:  $S_f = N \times HVL$  (32)

onde  $HVL_{pb}$  (125 KVp) = 0,28 mm e  $HVL_{concreto}$  (125 KVp) = 20 mm (NCRP-49, tab. 27).

Para a radiação espalhada no paciente, a capacidade de penetração é a mesma que a do feixe útil. Assim sendo, o fator de transmissão ( $K_{ux}$ ) para espalhamento é dado por:

$$K_{ux} = \frac{P}{\alpha WT} (d_{sca})^2 (d_{sec})^2 \frac{400}{F} \quad (33)$$

onde P, W, T e  $d_{sec}$  têm o mesmo significado descrito anteriormente, F é o tamanho de campo no paciente (geralmente  $F = 40 \times 40 \text{ cm}^2$  ou  $F = 1600 \text{ cm}^2$ ),  $d_{sca}$  é a distância do alvo até o paciente e (a) é o coeficiente de espalhamento.

Valores de (a) para diferentes ângulos de espalhamento e energias são dados na tabela B-2 do NCRP-49. Para 125 KVp temos:

Como a penetração da radiação espalhada é a mesma da primária, para a determinação da espessura necessária de blindagem seguem-se os mesmos procedimentos já descritos anteriormente. Caso a diferença entre as espessuras necessárias para blindar a radiação de fuga e espalhada seja igual ou maior que uma TVL, deve-se usar a maior delas. Se esta diferença for menor que 1 TVL acrescenta-se uma HVL.

## 8. OTIMIZAÇÃO DAS BLINDAGENS

### 8.1. Princípio da Otimização

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

Um dos princípios básicos de radioproteção é manter-se as exposições tão baixas quanto razoavelmente exequível, levando-se em conta fatores econômicos e sociais (ALARA). Na prática, esse princípio consiste em aumentar o nível de proteção até o ponto em que as melhorias suplementares só conseguem reduções de exposição que são menos importantes que os esforços adicionais requeridos para essas reduções. O esforço na radioproteção é quantificado em termos de custo. Se o detrimento induzido pela radiação for descrito também em termos de custo, otimizar significa minimizar a relação  $X(w) + Y(w)$ , onde  $X$  é o custo da proteção e  $Y$  é o custo do detrimento induzido, ambos relacionados ao nível de proteção representado por  $w$ , que, pode ser por exemplo, a espessura da blindagem. Se o nível de proteção quantificado por  $w$  for contínuo, o mínimo da expressão anterior será:  $dX/dw = -dY/dw$  e, se  $X$ ,  $Y$  e  $w$  estiverem relacionados com a dose coletiva, ( $S$ ), podemos escrever também,  $dX/dS = -dY/dS$ .

As dimensões das instalações e as blindagens das fontes de radiação devem ser tais que as operações possam ser executadas em conformidade com os limites autorizados e, na sua ausência, com o princípio da otimização (# 4.5.3a – CNEN NE-3.01). Assim sendo, os limites de dose individual não podem, por si só, definir as espessuras das blindagens. Eles são usados como condição de contorno

para assegurar espessuras mínimas e seus valores são 50 mSv/ano para trabalhadores (áreas restritas) e 1 mSv/ano para indivíduos do público. É importante ressaltar que, se a espessura otimizada for inferior à obtida por limitação de dose individual, deve-se adotar o maior valor.

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

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

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

### 8.2. Método Iterativo do ICRP-33

Neste método, depois de determinar-se a espessura de blindagem que atende ao limite de dose individual, propõe-se incrementos na espessura (1 ou mais HVLs), e, calcula-se a redução na dose coletiva e o custo para esse incremento. A seguir, divide-se esse custo (em dólares) pela dose coletiva economizada (em homem-sievert) e compara-se esse custo com o coeficiente monetário, definido pela norma CNEN-3.01 como  $\alpha = \text{US\$ } 10\,000$  por homem-sievert poupado. Quando o custo for igual ao coeficiente monetário, o valor otimizado de blindagem é atingido. Um exemplo detalhado ajuda a esclarecer o método:

a) Consideremos o caso de um teto de concreto para blindagem de uma fonte de braquiterapia HDR, cuja espessura que atende ao princípio da li-

mitação da dose individual (espessura mínima) é 37,0 cm. Suponhamos que o feixe gama possa atingir 20 pessoas numa área acima do teto (p.ex., numa sala de espera). O limite de dose individual é 1 mSv/ano. Embora as pessoas na espera não sejam sempre as mesmas, usamos  $T = 1$ , porque queremos dose coletiva e estamos supondo que sempre temos 20 pessoas na sala.

b) A dose coletiva anual no teto será:  $S_a = 20$  homens  $\times$  1 mSv/ano = 20 homem-mSv/ano.

c) A dose coletiva na vida útil da instalação será:  $S = 20$  homem-mSv/ano  $\times$  20 anos ou  $S = 400$  homem-mSv em 20 anos ou  $S = 0,4$  homem-Sv em 20 anos. Embora objeto de discussão, 20 anos é um valor bastante aceitável para a vida útil da instalação.

d) Calcular do custo da blindagem adicional: A maneira mais correta é avaliar os gastos locais. Entretanto, com boa aproximação, pode-se usar o valor de US\$ 500,00 por  $m^3$  de concreto ou o da tabela PINI para as condições próximas às de construção.

Pelos resultados abaixo pode-se concluir que a espessura otimizada está entre as opções 2 (adição de 2 HVL ou 8,2 cm de concreto) e a opção 3 (adição de 3 HVL ou 12,3 cm de concreto). Refinando

os cálculos, se justifica a adição de 8,5 cm de concreto (= 2,1 HVL) à espessura mínima de 37,0 cm. A espessura otimizada do teto será então 45,5 cm de concreto.

### 8.3. Método Direto de Otimização

Nesse método a espessura otimizada é determinada a partir da transmissão "ótima" dada pela expressão abaixo, através da qual se obtém o  $n^\circ$  de TVLs necessários. A espessura é calculada multiplicando-se este número pelo TVL do material.

O fator de transmissão "ótimo" ( $B_{ot}$ ) para a parede em questão é dado por:

$$B_{ot} = \frac{A \times C \times (T_{VL})_{mat}}{(\ln 10) \times \alpha \times n \times H_{tot} \times T_v} \quad (34)$$

onde,

- A é a área da parede a ser blindada ( $m^2$ );
- C é o custo da construção do metro cúbico de material (US\$/ $m^3$ );
- $(T_{VL})_{mat}$  é a espessura décimo redutora para o material da parede (m);
- $\alpha$  é o coeficiente monetário (US\$ 10 000/homem-Sv);

1-Opção	0	1	2	3	4
2-Espessura de Concreto (cm)	37,0	41,1	45,2	49,3	50,5
3-Espessura Adicional de Concreto (cm)	0	4,1	8,2	12,3	13,5
4-Taxa Dose no Teto (espera) (mSv/ano)	1,0	0,5	0,25	0,125	0,1
5-Dose Coletiva no Teto - S (hSv)	0,4	0,2	0,1	0,05	0,04
6-Diminuição da Dose Coletiva - $\cdot S$	Zero	0,2	0,1	0,05	0,01
7-Custo da Blindagem - X (US\$)	6 500	7 200	7 900	8 600	8 870
8-Incremento Adicional no Custo- $\Delta X$	Zero	700	700	700	270
9-Custo Economizado- $(-\Delta X/\Delta S)$	Zero	3 500	7 000	14 000	27 000
10- Coeficiente Monetário - $\alpha$ (US\$/hSv)	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
11- Comparação de $(-\Delta X/\Delta S)$ com $\alpha$	$< \alpha$	$< \alpha$	$< \alpha$	$> \alpha$	$> \alpha$
12- Implementar a opção	Sim	Sim	Sim	Não	Não

Planilha de otimização da espessura do teto

- $n$  é o número de indivíduos com ocupação integral na vizinhança próxima à parede :  $n = \sum (T_i P_i)$ , onde  $T_i$  é o fator ocupação do grupo de indivíduos  $P_i$ . Por exemplo,  $n = 4$  para 4 trabalhadores em tempo integral, ou para 8 trabalhadores de meio período, ou para 100 pessoas ocupando a área em 10 dias úteis por ano, etc.
- $H_{tot}$  é a taxa de dose equivalente total no ponto de análise *na ausência de barreira* (Sv/sem). Levar em conta todas as componentes do feixe, primário com fator uso, fuga e espalhada, a carga de trabalho  $W$  e a distância mínima até a área ocupada.
- $T_v$  é a vida útil da instalação ( $T_v = 1\ 040$  sem).

Partindo-se do valor de  $B_{ót}$ , podemos calcular em seguida o número de camadas decimo redutoras ( $N$ ), requeridos para blindagem:

$$N = \log_{10} (1/B_{ót}) \quad (35)$$

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

$$S_{ót} = N \times TVL \quad (36)$$

Usando-se os dados pertinentes do exemplo :  $C = \text{US\$ } 500,00/\text{m}^3$ ;  $n = 20$  homens;  $T_v = 1\ 040$  sem;  $a = \text{US\$ } 10\ 000/\text{homen-Sv}$ ;  $(TVL)_{conc} = 0,135$  m, e sabendo-se que a área da parede a ser blindada (teto),  $\alpha = 35 \text{ m}^2$  ( $7 \times 5$  m), que a carga de trabalho  $W = 0,17$  Sv/sem a 1 m, que a distância mínima até a área ocupada no teto (a 0,3 m do piso),  $d_{min} = 4,0$  m e que fator ocupação  $T = 1$ , fator uso  $U = 1$ , então  $H_{tot} = 0,17 \times (1/4)^2 = 1,1 \times 10^{-2}$  Sv/sem e  $B_{ót} = (35 \times 500 \times 0,135)/(2,3 \times 10\ 000 \times 20 \times 1,1 \times 10^{-2} \times 1\ 040) = 4,5 \times 10^{-4}$ . Daqui tiramos  $N = \log_{10} (1/0,00045) = 3,35$ , e portanto,  $S_{ót} = 3,35 \times 0,135 = 0,452$  m ou  $S_{ót} = 45,2$  cm, que é praticamente igual a espessura obtida pelo método anterior (45,5 cm).

O método direto de otimização não leva em conta o tipo de área a ser blindada (livre ou restrita) e, portanto, nada diz sobre o atendimento aos limites primários de dose. Muitas vezes a espessura calculada por ele é inferior à determinada pela limitação da dose individual, o que, se usado, proporcionaria dose superior aos limites individuais. A legislação brasileira exige que sejam atendidos o princípio da limitação da dose individual e o da otimização. Assim sendo, deve-se calcular tanto a espessura necessária para atender os limites primários de dose quanto a da otimização **e usar a maior delas** para estar em conformidade com as normas. Em caso de se utilizar outro material que não o concreto na confecção da blindagem das paredes, deve-se avaliar o custo do metro cúbico desse material no cálculo de otimização.



## 9. EXEMPLO DE CÁLCULO DE BLINDAGEM

### 9.1. Teleterapia: Acelerador Linear Varian Clinac 2100C

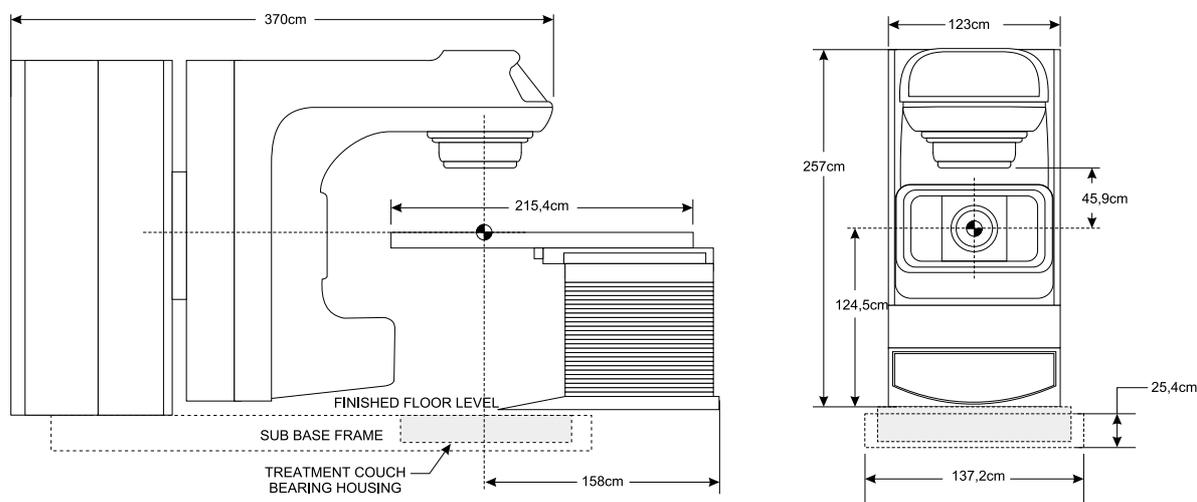


Fig. 10- Dimensões do acelerador linear Varian Clinac 2100C (cortesia da Varian)

**Beam Stopper:** Não

**Tipo:** Acelerador Linear de Elétrons

**Radiação:** Feixe Colimado ( $x$  e  $e^-$ )

**Montagem:** Isocêntrica-DFI = 100,0 cm

#### Dados Típicos dos Feixes de Fótons:

Energia Nominal	6 MV		10 MV	
Taxa Dose Nominal a 100 cm	0,8 - 4 Gy/min		0,8 - 4 Gy/min	
PDP típica (10 x 10 cm <sup>2</sup> ; 100 cm; 10 cm prof.)	(67 ±2) %		(74 ±1) %	
Planura a 10 cm (> 10 x 10 cm <sup>2</sup> ; DFI = 100 cm)	± 3,0 %		± 3,0 %	
Simetria a 10 cm (> 10 x 10 cm <sup>2</sup> ; DFI = 100 cm)	2,0 %		2,0 %	
Tamanho de Campo no Isocentro (cm <sup>2</sup> )	0 x 0 a 40 x 40		0 x 0 a 40 x 40	
Campo Máximo no Isocentro - Diâmetro	49,5 cm		49,5 cm	
Fuga Máxima pelo Cabeçote (100 cm)	< 0,1 %		< 0,1 %	
TVL Feixe Largo - Radiação Primária (cm de concreto) (NCRP-51)	TVL <sub>1</sub> 35,0	TVL <sub>i</sub> 35,0	TVL <sub>1</sub> 41,0	TVL <sub>i</sub> 39,0
TVL concreto - Feixe Largo - Fuga (VARIAN)	27,9 cm		30,5 cm	
TVL concreto - Feixe Largo - Espalhada (ICRP-33)	17,0 cm		17,0 cm	

**Dados Típicos dos Feixes de Elétrons (Clinac 2100C - Grupo II):**

Energia Nominal (MeV)	4	6	9	12	15
Taxa Dose Nominal a 100 cm	0,8 – 4 Gy/min (5 passos)				
Prof. 80% da dose (cm)	1,0 ±0,1	1,9 ±0,1	3,0 ±0,1	4,2 ±0,1	5,2 ±0,1
Contaminação Raios-X (% max.)	≤ 2 %	≤ 2 %	≤ 2 %	≤ 5 %	≤ 5 %
Campo Máximo (cm <sup>2</sup> )	25 x 25 cm <sup>2</sup> definidos pôr aplicadores				
Planura (prof. máxima) (%)	± 7,0 %	± 5,0 %	± 5,0 %	± 5,0 %	± 5,0 %
Simetria (máx.; > 10 x 10 cm <sup>2</sup> ;) )	2,0 %	2,0 %	2,0 %	2,0 %	2,0 %

**Produção de Fotonêutrons:**

Energia Nominal (MV)	6 MV	10 MV
Dose Equivalente (Sv n/ Gy x)	negligível	0,004 %
Q – Nêutrons pôr Gy de raios-X no isocentro	negligível	4 x 10 <sup>10</sup> n/Gy x

Nota: A contaminação por nêutrons produzidos pelos feixes de elétrons é negligível

**9.1.1 Calculo de Blindagem de Raios-x para sala típica de acelerador Clinac 2100C**

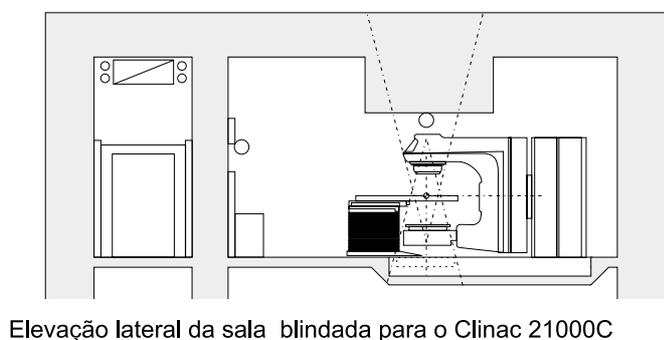
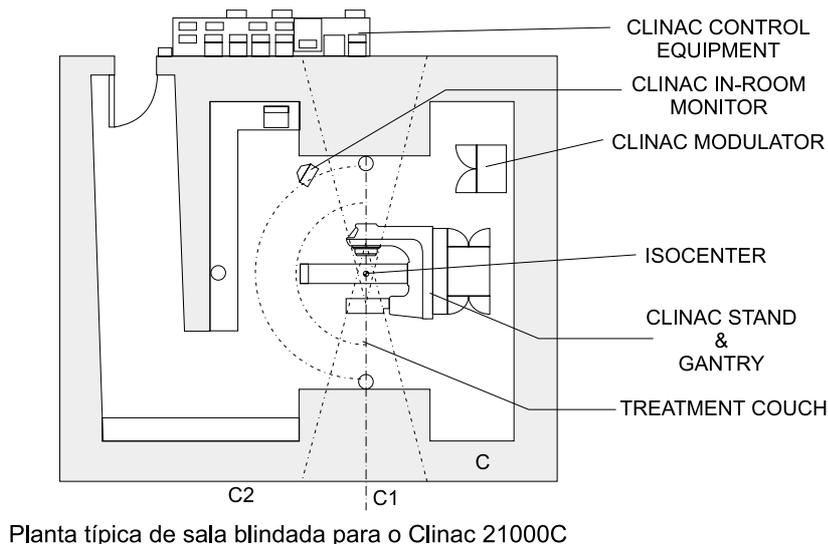


Fig 11a- Plantas para cálculos de blindagem do Clinac 2100C nos pontos C1 (primária) e C2 (secundária) – (cortesia da Varian).

**Parede Lateral C- Leste:**

Do lado direito temos uma área ajardinada, com acesso para indivíduos do público ( $P = 2 \times 10^{-5}$  Sv/sem), com previsão de utilização futura para expansão do serviço. Será classificada como área livre com  $T = 1$ . A distância do alvo até C1 é 6,3 m e do isocentro até C2 é 6,5 m. O fator de uso do feixe primário é  $U = 1/10$ . O fator de uso para radiação secundária é  $U = 1$ .  $W = 10^3$  Gy/sem. Energia do feixe = 10 MV.

**Região do Feixe Primário – Ponto C1****1. Espessura de concreto para atender a limitação da dose individual:**

<i>Para radiação primária</i>						
P (Sv/sem)	W (Sv/sem)	U	T	$d_{\text{prim}}$ (m)	$B_x$	<b>Espessura</b>
$2 \times 10^{-5}$	$10^3$	1/10	1	6,3	$7,9 \times 10^{-6}$	<b>195,0 cm</b>

<i>Para radiação de fuga</i>							
P (Sv/sem)	W (Sv/sem)	$f_f$	U	T	$d_{\text{fuga}}$ (m)	$B_f$	<b>Espessura</b>
$2 \times 10^{-5}$	$10^3$	$10^3$	1	1	5,3	$5,6 \times 10^{-4}$	<b>99,0 cm</b>

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

**2. Espessura otimizada ( $W_1 = 100$  Sv/sem;  $d = 6,3$  m;  $N = 5$  e  $T = 1$ )**

A	C	TVL	$\alpha$	n	$H_{\text{tot}}$	$T_v$	$B_{\text{ót}}$	<b>Espessura</b>
( $m^2$ )	(US\$/ $m^3$ )	(m)	(US\$/h-Sv)	(h)	(Sv/sem)	(sem)		
12,0	500	0,39	10 000	5	2,52	1 040	$7,8 \times 10^{-6}$	<b>210,0 cm</b>

Conclusão(a) : A espessura de concreto que atende a otimização (210,0 cm) é maior do que a espessura calculada por limitação de dose individual (195,0 cm) e bem maior que a de fuga (99,0 cm). Portanto, a parede C na região primária deve ter espessura 210,0 cm de concreto.

**3. Largura da blindagem primária na parede C:**

( $X = 6,3$  m; diâmetro do campo máximo a 1 m = 0,495 m);

$$L = 0,495 X + 0,6 \text{ (m)} = (0,495 \times 6,3) + 0,6 = 3,7 \text{ m} = 370 \text{ cm}$$

Conclusão (b): A largura da barreira primária que blinda o maior campo possível na situação mais crítica de distância (C1) é 370 cm de concreto.

Conclusão final: Na região do feixe primário da parede C teremos um cinturão de concreto com 210 cm de espessura, 370 cm de largura (135 cm de cada lado do plano vertical do isocentro) e 340 cm de altura (pé direito).

**Região do Feixe Secundário – Ponto C2:****1. Espessura de concreto necessária para atender a limitação da dose individual:**

Para radiação primária. Não há incidência de feixe primário na região do ponto C2. Portanto  $U_{\text{prim}} = 0$  e não há necessidade de blindagem para feixe primário.

Para radiação de fuga

P (Sv/sem)	W (Sv/sem)	$f_f$	U	T	$d_{\text{fuga}}$ (m)	$B_f$	Espessura
$2 \times 10^{-5}$	$10^3$	$10^3$	1	1	6,5	$8,5 \times 10^{-4}$	<b>94,0 cm</b>

**2. Espessura otimizada ( $W_f = 1$  Sv/sem;  $d = 6,5$  m;  $N = 5$  e  $T = 1$ )**

A ( $\text{m}^2$ )	C ( $\text{US}\$/\text{m}^3$ )	TVL (m)	$\alpha$ ( $\text{US}\$/\text{h-Sv}$ )	n (h)	$H_{\text{tot}}$ (Sv/sem)	$T_v$ (sem)	$B_{\text{ót}}$	Espessura
21,8	500	0,305	10 000	5	$2,4 \times 10^{-2}$	1 040	$1,16 \times 10^{-3}$	<b>90,0 cm</b>

Conclusão: A espessura que atende o limite de dose individual (94,0 cm) é maior que a otimizada (90,0 cm). Portanto, a parede C, na região do feixe secundário, deve ser construída com espessura 94,0 cm de concreto.

**9.1.2. Blindagem de Nêutrons nas Paredes**

A contaminação do feixe útil por nêutrons é  $4 \times 10^{10}$  nêutrons por gray de raios-x, ou seja, a dose equivalente de nêutrons é 0,004% da de raios-x. Supondo que todos os tratamentos são feitos com 10 MV, a carga de trabalho de raios-x será  $W = 10^3$  Gy/sem e a dose equivalente de nêutrons no isocentro será 0,04 Sv n/sem. A energia média dos nêutrons diretos é cerca de que 0,5 MeV e dos espalhados na sala é 0,1 MeV. A TVL para nêutrons diretos será cerca de 18,5 cm de concreto. A menor espessura na parede C é 94,0 cm de concreto, que corresponde a 5 TVL. Sabendo que a distância até C1 é 6,5 m, a dose equivalente de nêutrons nesse ponto será:  $DE(C1) = 0,04 \times 10^{-5} \times (1/6,5)^2 = 10^{-8}$  Sv/sem. Esta dose é muito menor que o limite individual e também dispensa otimização, podendo ser negligenciada nos cálculos das blindagens. Daqui conclui-se que a blindagem de concreto das paredes para raios-x é suficiente para os nêutrons.

**9.2 Blindagem para Braquiterapia de Alta Taxa de Dose: Equipamento de HDR GammaMed Plus****Dados Técnicos**

**Fabricante:** Isotopen-Technick Dr. Sauerwein GMBH- Alemanha.

**Fornecedor:** REM Industria e Comércio Ltda.- São Paulo.

**Modelo:** GammaMed Plus.

**Tipo:** Unidade de carga remota para braquiterapia intersticial e intracavitária de alta taxa de dose com  $^{192}\text{Ir}$ .

**Fonte de Radiação:** Iridio-192.

**Tipo de Radiação:** Gama ( $\gamma$ ).

**Energia Média:** 0,36 MeV (0,136 – 0,66 MeV)

**Dimensões da Fonte:**

Comprimento total = 4,52 mm

Comprimento ativo = 3,5 mm

Diâmetro total = 0,9 mm

Diâmetro ativo = 0,6 mm

Comprimento cabo = 1300 mm

Diâmetro cabo = 0,9 mm

**Dados Físicos da Fonte:**

Atividade Nominal = 370 GBq (10 Ci)  
 Atividade Máxima = 555 GBq (15 Ci)  
 Taxa de kerma no ar = 114 mGy m<sup>2</sup> h<sup>-1</sup> Gbq<sup>-1</sup>  
 Meia vida = 74,2 dias

**Construção da Fonte:** Fio de irídio metálico sólido encapsulado em Ni/Ti. A capsula é ligada a um cabo de aço de alta resistência com 1300 mm de comprimento. Atende as normas ISO 1677, ISO 2919, ISO/TR4826 e ISO 9978.

**Unidade de Carga Remota:**

Dimensões: C x L x A – 575 x 510 x 1050 mm.  
 Peso: 130 Kg.

**Carga:** 115 V, 60 Hz, 100 VA

**Classe de Proteção:** IP 40, I. Atende normas IEC 601-1, IEC 601-1-1, IEC 601-2-17, IAEA e USDOT-7A.

**Cabeçote da Fonte:** Blindagem- Tungstênio

**Carga <sup>192</sup>Ir:** 555 GBq max.; 370 GBq nom.

**Fuga máxima:** < 2,0 mGy/h a 1 m para 370 GBq.

**Ajuste de altura:** 900 – 1300 mm.

**Numero de canais:** 24

**Numero de paradas:** 60

**Tamanho do Passo:** 1 – 10 mm

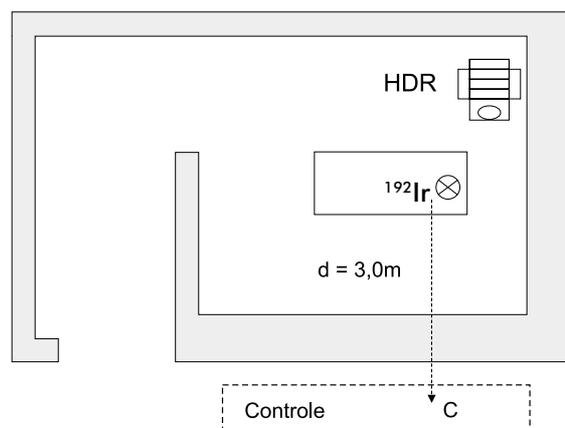
**9.2.1 Cálculo de Blindagem para sala típica de Braquiterapia HDR**

Fig 11b – Planta típica para braquiterapia HDR (sem escala)

**9.2.2.Carga de Trabalho Semanal Típica:**

**W = 0,15 Gy/sem a 1 m (exemplo 2; pág. 21)**

**9.2.3.PAREDE FRONTAL - (Ponto C):****Região do Controle**

A parede frontal blindada a sala de controle do HDR. Embora esta área pudesse ser considerada área restrita, para maior segurança e em função do princípio ALARA, considera-la-emos como área livre com fator ocupacional T = 1.

**1.Espessura de concreto necessária para atender a limitação da dose individual:**

P (Sv/sem)	W (Sv/sem)	U	T	d (m)	B <sub>f</sub>	Espessura
$2 \times 10^{-5}$	0,15	1	1	3,0	$1,2 \times 10^{-2}$	<b>27,8 cm</b>

**2.Espessura otimizada (W=0,15 Sv/sem; d= 3,0 m; N=2 e t = 1)**

A (m <sup>2</sup> )	C (US\$/m <sup>3</sup> )	TVL (m)	α (US\$/h-Sv)	n (h)	H <sub>tot</sub> (Sv/sem)	T <sub>v</sub> (sem)	B <sub>ot</sub>	Espessura
14,0	500	0,145	10 000	2	0,0167	1 040	$1,27 \times 10^{-3}$	<b>45,0 cm</b>

Conclusão: A espessura que atende a limitação da dose individual (45,0 cm) é maior que a da otimização (27,8 cm). Portanto, a espessura da parede frontal que blindada a região do controle deve ter 46,0 cm de concreto.



## 10. APÊNDICE – DADOS TÉCNICOS

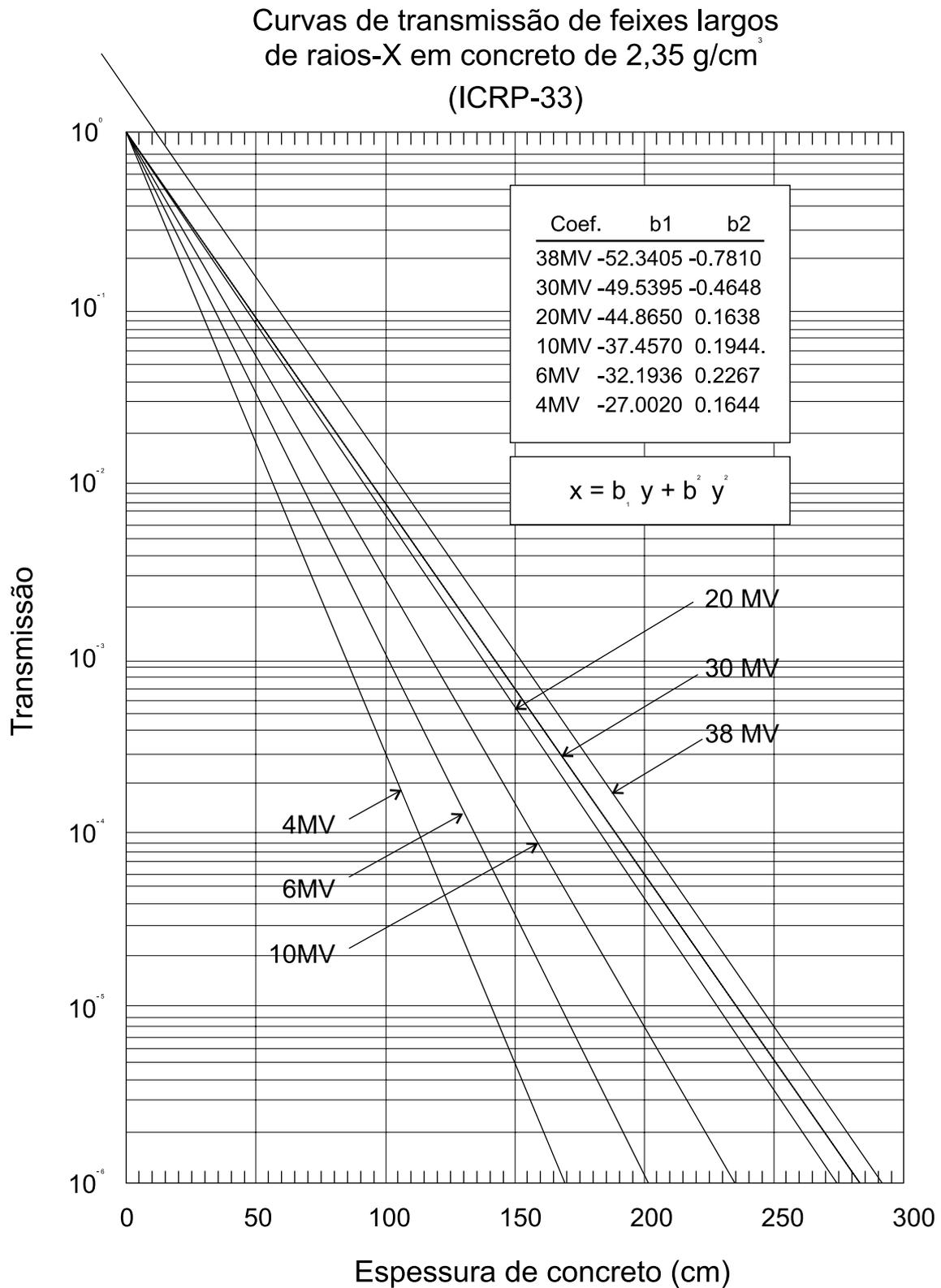


Fig. 12- Transmissão de raios-x de megavoltagem em concreto.

Curvas de transmissão de feixes largos para radiação gama do Irídio-192 em aço e concreto

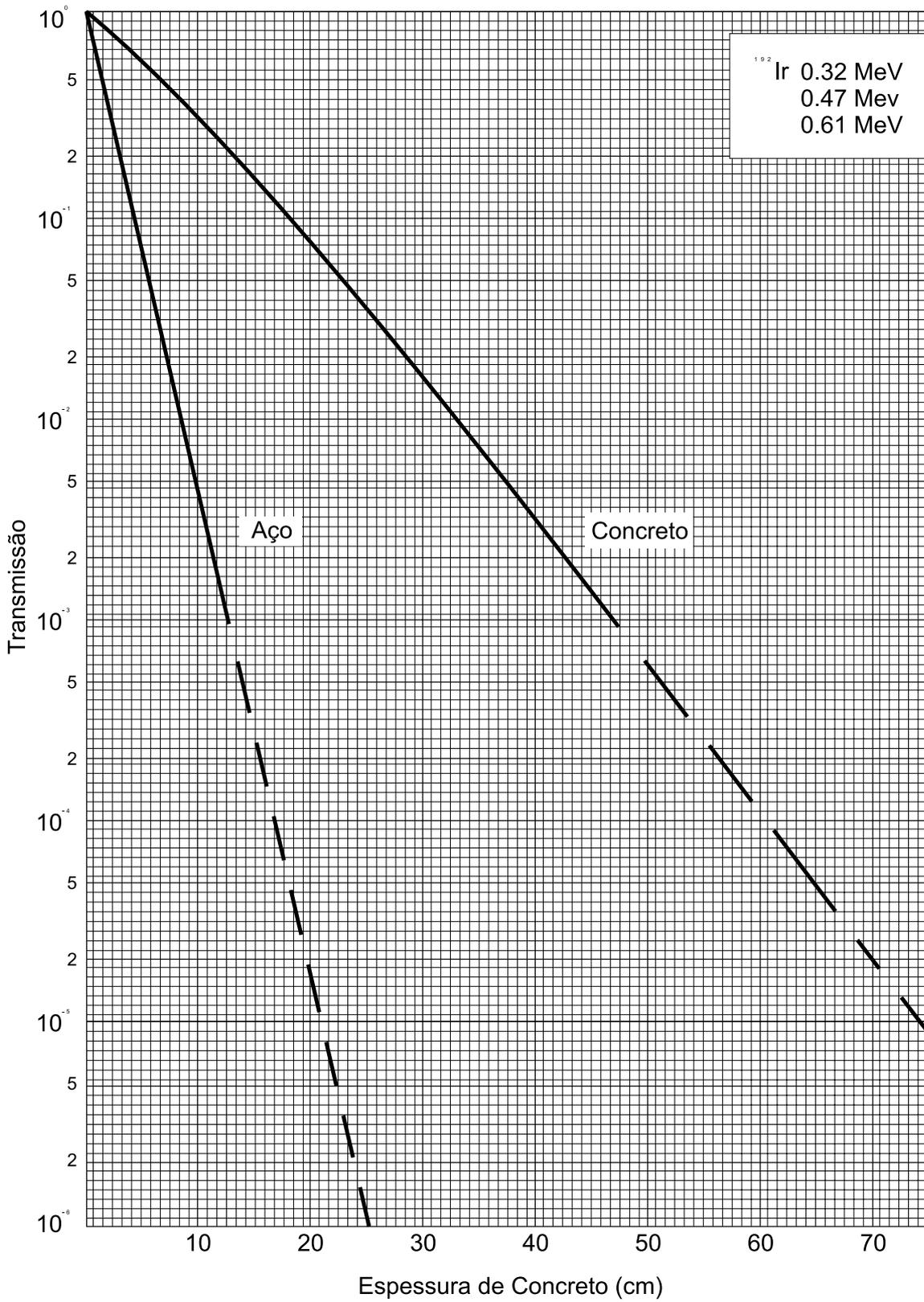
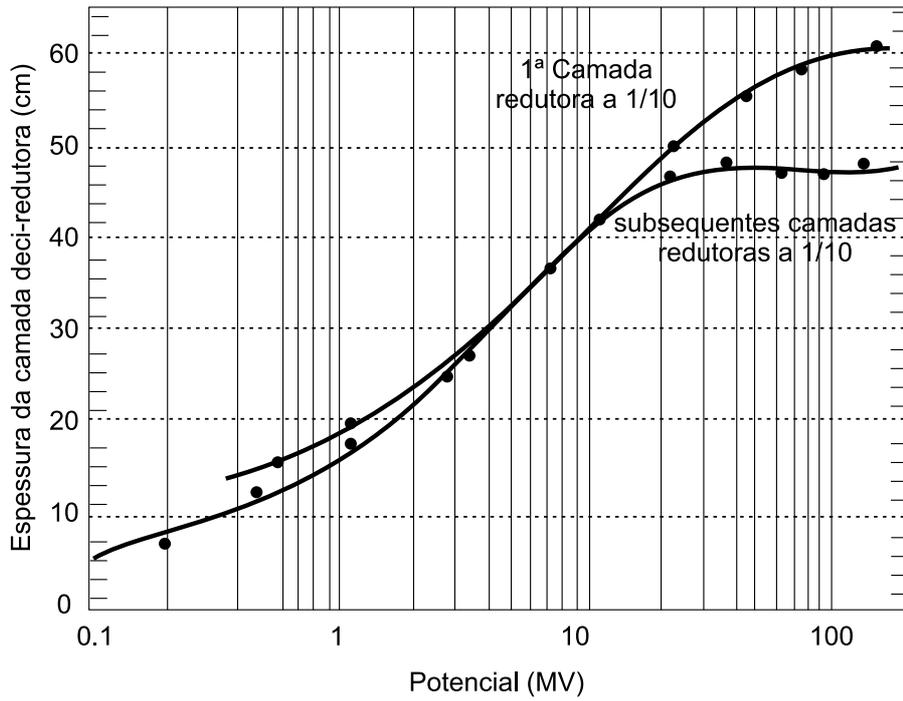


Fig. 13- Transmissão de raios g do <sup>192</sup>Ir em aço e concreto de densidade 2,35 g/cm<sup>3</sup>.

Camadas deci-redutoras para feixes largos de raios-X em concreto de 2,35 g/cm<sup>3</sup> (NCRP-51)



Camadas deci-redutoras para feixes largos de raios-X em concreto de 2,35 g/cm<sup>3</sup> (NCRP-51)

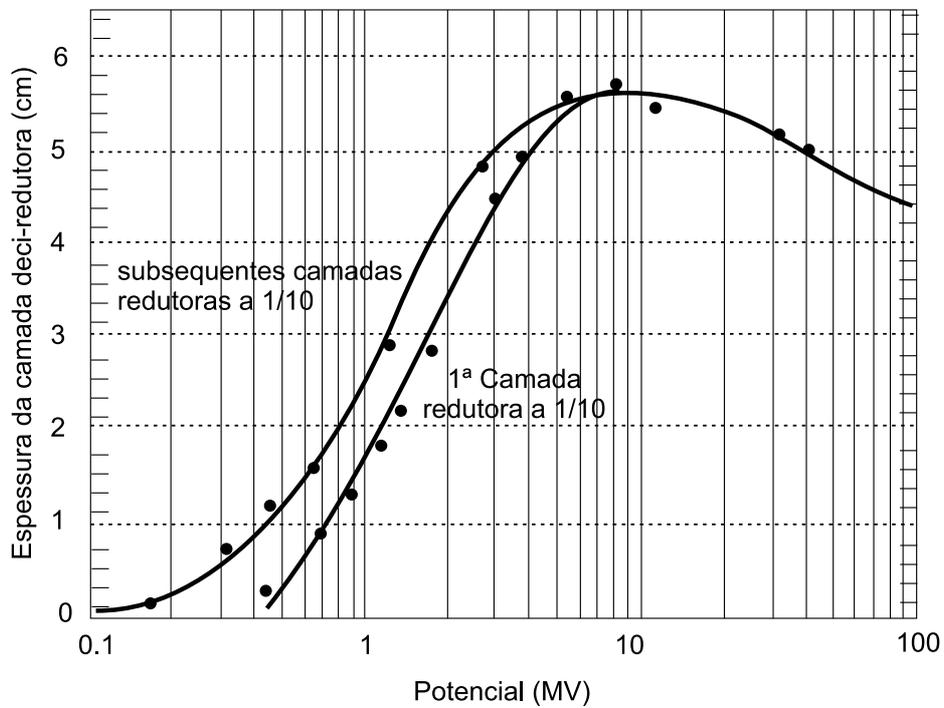
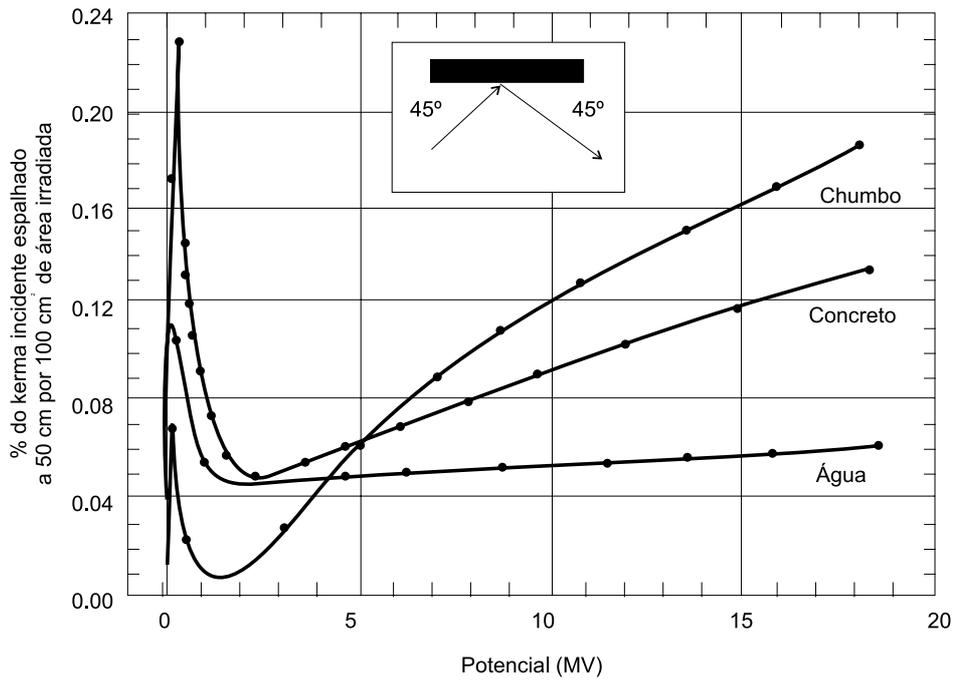


Fig. 14- Camadas deci-redutoras para feixes largos de raios-x em concreto e chumbo.

Varição do espalhamento a 90° por vários materiais em função do potencial do feixe de raios-X.



Varição do espalhamento em um fantoma de tecido mole para várias energias em função do ângulo de espalhamento a 1m para uma superfície irradiada de 400 cm²

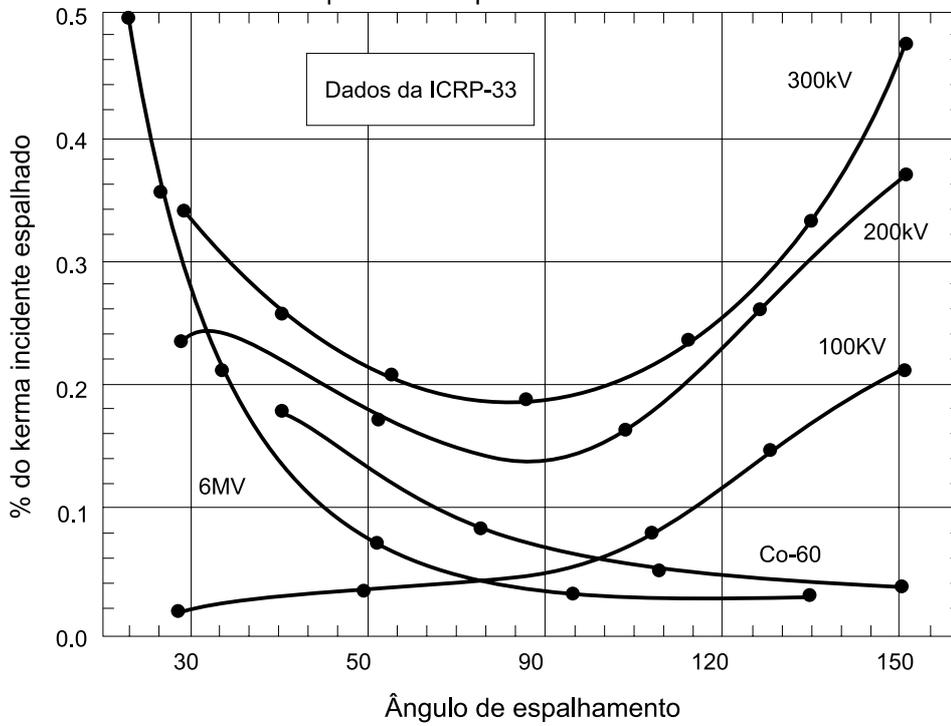


Fig. 15- Dados técnicos espalhamento para cálculos de blindagens.

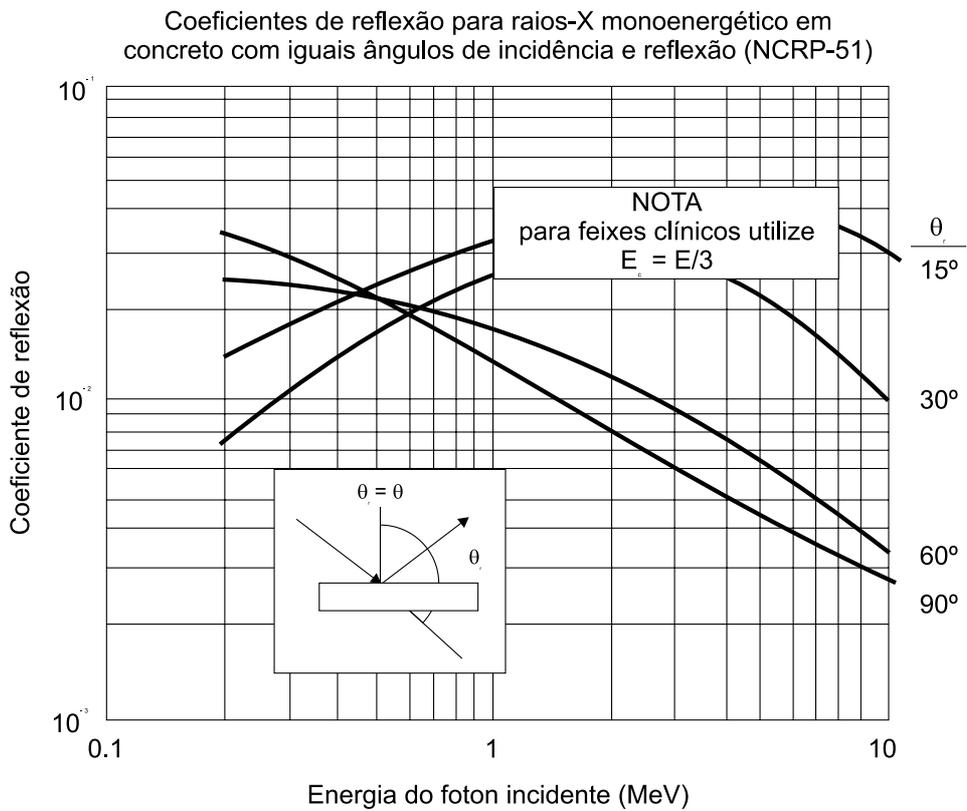
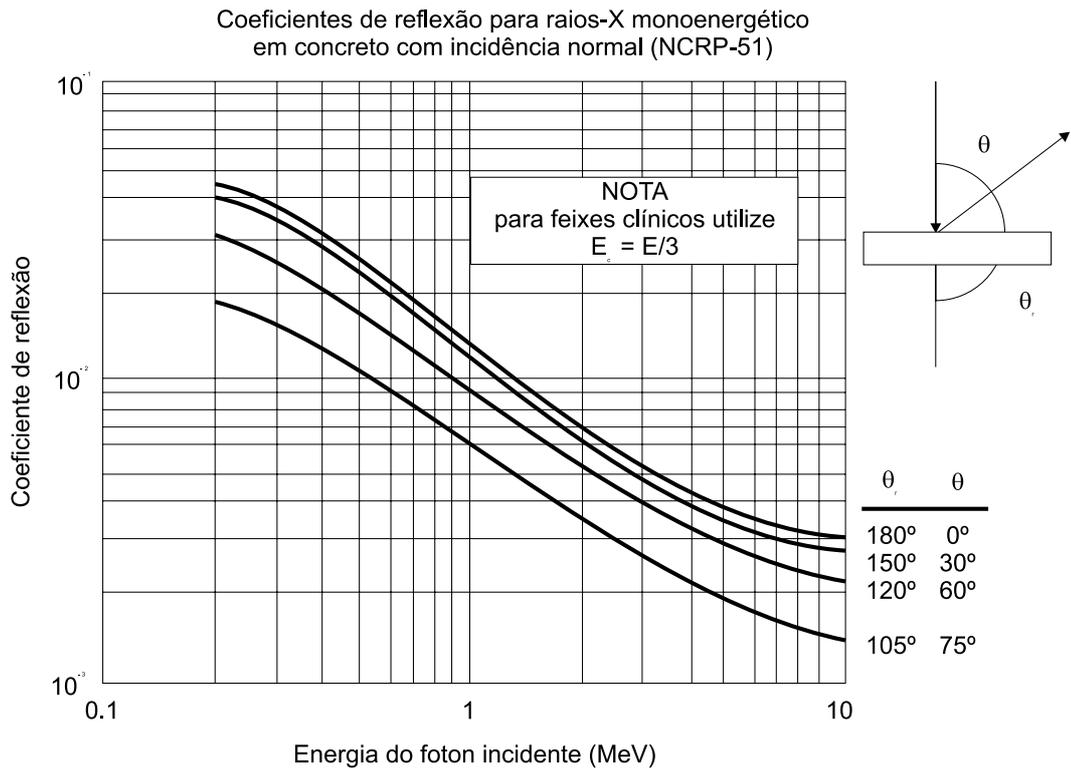


Fig. 16- Coeficientes de reflexão para raios-x monoenergetico em concreto.



## 11. BIBLIOGRAFIA

1. AIEA TRS #110 (1970). Manual of Dosimetry in Radiotherapy.
2. AIEA TRS #277 (1987). Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams:...
3. AIEA TRS #374 (1994). Calibration of Dosimeters Used in Radiotherapy.
4. AIEA TRS #381 (1997). The Use of Plane-Parallel Ionization Chambers in High-Energy ....
5. AIEA TRS #277-2<sup>nd</sup> Ed. (1997). Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams..
6. AIEA TECDOC-896 (1996). Radiation Dose in Radiotherapy from Prescription to Delivery.
7. AIEA TECDOC-987 (1996). Review of Data and Methods Recommended in TRS 277.
8. AIEA TECDOC-989 (1997). Quality Assurance in Radiotherapy.
9. AIEA TECDOC-1040 (1998). Design and Implementation of a Radiotherapy Programme:..
10. AIEA TECDOC-1079 (1999). Calibration of Brachytherapy Sources.
11. AIEA STI/PUB/1027 (1998). The Accidental Overexposure of Radiotherapy Patients....
12. AAPM TG-21 (1983). A Protocol for the Determination of Absorbed Dose from High-Energy ..
13. AAPM TG-40 (1994). Comprehensive QA for Radiation Oncology.
14. AAPM TG-41 (1994). AAPM Code of Practice for Radiotherapy Accelerators.
15. AAPM TG-36 (1995). Fetal Dose from Radiotherapy with Photon Beams.
16. AAPM TG-56 (1997). Code of Practice for Brachytherapy Physics. Med Phys. 24(10).
17. AAPM TG-51 (1999). Clinical Reference Dosimetry of High Energy Photon and Electrons...
18. BJR sup. #11 (1972). Central Axis Depth Dose Data for Use in Radiotherapy.
19. BJR sup. #17 (1983). Central Axis Depth Dose Data for Use in Radiotherapy.
20. BJR sup. #25 (1995). Central Axis Depth Dose Data for Use in Radiotherapy Departments.
21. CNEN (1984). Licenciamento de Instalações Radiativas. CNEN NE- 6.02.
22. CNEN (1988). Diretrizes Básicas de Radioproteção. CNEN NE- 3.01.
23. CNEN (1990). Requisitos de Radioproteção e Segurança Serviços de Radioterapia. NE-3.06.
24. CNEN (1998). Guias e Procedimentos para a Prática de Teleterapia (DEFISME-IRD-CNEN).
25. ESTRO Booklet #1. (1994). Methods for In Vivo Dosimetry in External Radiotherapy.
26. ESTRO Booklet #2. (1995). Recommendations for a Quality Assurance Programme ...
27. ESTRO Booklet #3. (1997). Monitor Unit Calculation For High Energy Photon Beams.
28. ESTRO Booklet #4. (1998). Practical Guidelines for the Implementation of a Quality System....
29. HMSO (1971). Handbook of Radiological Protection. Part 1: Data.
30. HPA #3 (1970). A Suggested Procedure for the Mechanical Alignment .....
31. HPA (1983). Revised Code of Practice for the Dosimetry of 2 to 35 MV x-ray and Caesium ...
32. HPA (1985). Code of Practice for Electron Beam Dosimetry in Radiotherapy. PMB 30:1169.
33. ICRP #26 (1977). Recommendations of the International Commission on Radiological Protec.

34. ICRP #33 (1981). Protection Against Ionizing Radiation from External Sources....
35. ICRP #35 (1982). General Principles of Monitoring for Radiation Protection of Workers.
36. ICRP #44 (1985). Protection of the Patient in Radiation Therapy.
37. ICRP#60 (1990). Recommendations of the International Commission on Radiological Protec.
38. ICRP #73 (1997). Radiological Protection and Safety in Medicine.
39. ICRU #33 (1980). Radiation Quantities and Units.
40. ICRU #35 (1984). Radiation Dosimetry: Electron Beams with Energies Between 1 and 50 MV
41. ICRU #37 (1984). Stopping Powers for Electrons and Positrons.
42. ICRU#38 (1985). Dose and Volume Specification for Reporting Intracavitary Therapy in ...
43. ICRU #44 (1989). Tissue Substitutes in Radiation Dosimetry and Measurements.
44. ICRU #48 (1993). Phantoms and Computational Models in Therapy, Diagnosis and Protection.
45. ICRU #50 (1993). Prescribing, Recording, and Reporting Photon Beam Therapy.
46. ICRU #51 (1993). Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry.
47. IPEM # 54(1998). Commissioning and Quality Assurance of Linear Accelerators.
48. IPEM #75 (1998). The Design of Radiotherapy Treatment Room Facilities.
49. IPSM # 46 (1986). Radiation Protection in Radiotherapy.
50. IPSM # 54 (1988). Commissioning and Quality Assurance of Linear Accelerators.
51. NCRP #49 (1976). Structural Shielding Design and Evaluation for Medical Use of x-rays And ..
52. NCRP #51 (1979). Radiation Protection Design Guidelines for 0,1 - 100 MeV Particle Accel...
53. NCRP #79 (1984). Neutron Contamination from Medical Accelerators.
54. NCRP #102 (1989). Medical x-ray, Electron Beam and Gamma Ray Protection for energies up..
55. UNEP (1985) – Radiation: Doses, Effects, Risks. United Nations Environment Programs.
56. Attix, F.H. (1986) – Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry. Wiley Pub.
57. Bentel, G.C. (1996) – Radiation Therapy Planning. 2<sup>nd</sup>. Ed.- Mc Graw-Hill.
58. Bitelli, T. (1982) – Dosimetria e Higiene das Radiações- Ed. Gremio Politécnico.
59. Cember, H. (1996) – Introduction to Health Physics- Mc Graw-Hill Pub.
60. Dendy, P. P. & Heaton, B. (1987) – Physics for Radiologists - Blackwell Pub.
61. Dobbs, J. e outros (1999) – Practical Radiotherapy Planning- 3<sup>rd</sup> Ed.- Arnold Pub.
62. Evans, R.D. (1982) – The Atomic Nucleus.- E. Krieger Pub.
63. Fletcher, G.H. (1980) – Textbook of Radiotherapy- 3<sup>rd</sup> Ed.- Lea & Febiger.
64. Frein, J.J e Feldman, A (1992) – Medical Physics Handbook of Units and Measures - MPP.
65. Hall, E.J. (1994) – Radiobiology for the Radiologist. 4<sup>th</sup>. Ed.- JB Lippincot pub.
66. Hendee, W.R. & Ibbott, G.S. (1996) - Radiation Therapy Physics. 2<sup>nd</sup> Ed.- Mosby Ed.
67. Jani, S.K. (1993) – Handbook of Dosimetry Data for Radiotherapy- CRC Press.
68. Johns, H.E. & Cunningham, J.R. (1983) - The Physics of Radiology. 4<sup>th</sup> Ed.- C.C. Thomas.

69. Khan, F.M. (1994) – The Physics of Radiation Therapy. 2<sup>nd</sup> Ed.- Williams & Wilkins.
70. Knoll, G. F. (1989) – Radiation Detection and Measurements.- J. Wiley & Sons.
71. Leung, P.M.K. (1990) - The Physics of Radiation Therapy.- Williams & Wilkins Pub.
72. Levitt, S.H. e outros (1999) – Levitt & Tapley's Technological Basis of Radiation Therapy:
73. McGinley P. (1998) – Shielding Techniques for Radiation Oncology Facilities.- MPP.
74. Meredith, W.J; Massey, J.B. (1972) – Fundamental Physics of Radiology- 2<sup>nd</sup>. Ed.- Year Book
75. Metcalfe, P. (1997) – The Physics of Radiotherapy x-rays from Linear Accelerators.- MPP
76. Mettler, F.A e outros (1985) – Medical Effects of Ionizing Radiation.- Grune & Stratton.
77. Mould, R.F. (1990) – Radiation Protection in Hospitals.- Adam Hilger Pub.
78. Mould, R.F. (1985) – Radiotherapy Treatment Planning.- 2<sup>nd</sup> Ed.- Adam Hilger Pub.
79. Okuno, E. (1988) – Radiação: Efeitos, Riscos e Benefícios.- Ed. Harbra.
80. Purdy, J.A & Emami, B. (1995) – 3-D Radiation Treatment Planning and Conformal Therapy-
81. Scaff, L. A. M. (1997) – Física da Radioterapia- Sarvier.
82. Shahabi, S. (1989) – Blackburn's Introduction to Clinical Radiation Therapy Physics - MPP.
83. Starkschall, G & Horton, J. (1991) – Quality Assurance in Radiotherapy Physics- MPP.
84. Washington, C.M & L,D.T. (1996) – Physics, Simulation and Treatment Planning- Mosby.
85. Williams, J.R & Thwaites, D.I. (1993) – Radiotherapy Physics In Practice.- Oxford Medical
86. Wright, A. E. (1992) – Medical Physics Handbook of Radiation Therapy- MPP.
87. Kersey, R. W.- Estimation of neutron and gamma radiation... Medicamundi, vol. 24, n° 3, 1979.
88. Abrath, F. G. et all.- Attenuation of primary and scatter... Health Physics. Vol 45(5), nov 1983.
89. Nelson, W.R. & LaRivieri, P.D.- Primary and leakage ...Health Physics. Vol 47(6), dec 1984.
90. LaRivieri, P. D.- Transmission in concrete of primary ....Health Physics. Vol 47(6), dec 1984.
91. Numark, N. J. & Kase, K. R.- Radiation transmission and scattering for medical linacs producing x-rays of 6 and 15 MV: comparison .....Health Physics, vol 48(3), mar 1985.
92. Powell, N. L. et all.- A radiation safety survey on a Clinac-20 linear accel. PMB. 32(6) 1987.
93. McGinley, P. H. & Butker, E. K.- Evaluation of neutron dose equivalent levels at the maze entrance of medical accelerator treatment rooms. Med. Phys. 18 (2), Mar/Apr 1991.
94. Varian Monograph (1992)- Neutron doors for high energy accelerators (1997).
95. Morgan S. et all.- Dose rates and energy spectra in the maze....BJR. Vol 68(815), nov 1995.
96. McGynley, P. H. et all.- A method for calculating the dose due to capture ...PMB. 40, 1995.
97. McGinley, P. H. & Miner, M. S.- A method of eliminating the maze door.RPM, vol 12(5),1995.
98. McCall R.C.- Shielding for thermal neutrons. Med. Phys. 24 (1), Jan 1997.
99. Kase, K.R. et all.- Neutron fluence and energy spectra around the Varian Clinac 2100C/2300C medical accelerator. Health Physics, vol 74(1), Jan 1998.
100. Falcão, R.C. & Okuno, E.- On a method of dose rate calculation at the maze entrance of medical linear accelerator rooms. Radiat. Protec. Dosim. Vol 86, n° 3, 1999.

